

Ezio Mantegazza

ASPECTOS AMBIENTAIS DO CO-  
PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS EM  
FORNOS DE PRODUÇÃO DE CLÍNQUER NO  
ESTADO DE SÃO PAULO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Josmar Davilson Pagliuso

São Carlos

2004

M291a Mantegazza, Ezio  
Aspectos ambientais do co-processamento de resíduos em  
fornos de produção de clínquer no estado de São Paulo /  
Ezio Mantegazza. -- São Carlos, 2004.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de  
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.

Área : Engenharia Mecânica.

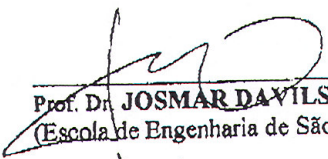
Orientador: Prof. Dr. Josmar Davilson Pagliuso.


1. Co-processamento. 2. Forno de clínquer. 3. Forno de  
cimento. 4. Clínquer. 5. Cimento. 6. Poluentes  
atmosféricos. 7. Resíduos industriais. 8. Resíduos  
perigosos. 9. Metais pesados. 10. Compostos orgânicos.  
I. Título.

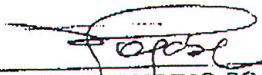
FOLHA DE JULGAMENTO


Candidato: Engenheiro **EZIO MANTEGAZZA**


Dissertação defendida e julgada em 08-12-2004 perante a Comissão julgadora:

  
Prof. Dr. **JOSMAR DAVILSON PAGLIUSO** (Orientador designado)  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado

  
Prof. Dr. **JOSE RENATO COURY**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCAR) APROVADO

  
MSc. **MILTON NORIO SOGABE**  
(Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental/CETESB) APROVADO

  
Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica

  
Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico este trabalho à minha família. Minha esposa, Sonia, que não se poupou e não se intimidou frente aos afazeres rotineiros, para que eu fosse poupado de quase todos eles, bem como encarando as necessidades de nossos três filhos: Gabriela, Graziela e Pedro, os quais quero que sintam-se também homenageados com a conclusão desta etapa de aprimoramento profissional, mas, sobretudo, de aprimoramento para a vida, em família e em sociedade. Não se privem desta experiência, que considero ter sido um privilégio, pois, ao mesmo tempo em que se mostrou difícil, sofrida, pelas intermináveis horas de pesquisa e estudo, longas horas distante do convívio com vocês, meus quatro queridos, trouxe também a convicção do dever cumprido, ainda que não integralmente concluído e a certeza de ter aprendido um pouco mais da vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos senhores, meus valorosos pais, Odilon e Celi, por todas as suas virtudes, nas quais sempre tentei me espelhar e assimilar para que, tomara, pudesse eu gozar de uma experiência de vida assim tão digna. Agradeço pela compreensão, nestes últimos meses, nos quais, literalmente, os abandonei para poder conciliar os afazeres profissionais, um pouco dos familiares e a conclusão deste trabalho.

Agradeço com a mesma intensidade a minha esposa, Sonia, minha revisora particular da língua, e aos meus filhos, Gabriela, Graziela e Pedro, os quais, para honrar os compromissos assumidos, praticamente, também os abandonei, frente aos momentos mais agudos e exigidos pelo programa em vias de finalização. Tenho plena consciência da “pressão” que pesou sobre mãe e filhos, mas que, com muito amor, compreensão e incentivos, me ampararam nesta difícil, mas muito gratificante etapa da caminhada.

Agradeço aos meus amigos, os quais, nem mesmo em momentos de chuvas torrenciais telefonaram para me convidar para um passeio de jipe; bem sei que foi para não me desconcentrar. Agora, eu digo a vocês: que venham as chuvas...

Agradeço à CETESB, instituição que me proporcionou a oportunidade de voltar aos bancos escolares para esta empreitada, nas pessoas do Tecnólogo Sétimo, que além de “chefe” é um grande amigo e grande incentivador de meus estudos e a Eng<sup>a</sup> Fabíola que também me apoiou ao longo desses meses.

Agradeço também a todos os demais amigos e companheiros de CETESB, dentre os quais destaco: Rosângela, Anita, Cíntia, Dirceu, Martinho, Neemias, Eloisa e pessoal de Itapetininga, César Valente, Cristina Poli, Maria Helena, Jesuíno e tantos outros, que a todo momento em que solicitei ajuda, aqui estavam para emprestar seus conhecimentos, grande experiência, sua paciência, sua colaboração....

Agradeço ao Mestre Norio, especialista na área em que tive a audácia de me intrometer, que grande auxílio me prestou na discussão das inúmeras dúvidas surgidas no transcorrer desses estudos, algumas, certamente, ainda não integralmente esclarecidas.

Agradeço às empresas Companhia de Cimento Ribeirão Grande e Resicontrol nas pessoas de seus gerentes, Eng<sup>o</sup> Antonio Mauro e Eng<sup>o</sup> Mauro Cunha, e a seus competentes grupamentos técnicos, nas pessoas do Milton Cecílio e da Marina, que compartilharam suas experiências e prestaram inúmeros esclarecimentos técnico-operacionais que facilitaram a conclusão deste trabalho.

Agradeço também aos Eng<sup>os</sup> Osório e Osmarino da Cimento Rio Branco e ao pessoal da ABCP – São Paulo, destacando o Geólogo Wagner Maringolo, pela expressiva colaboração na etapa de pesquisa bibliográfica.

Agradeço ao Prof. Josmar, a quem prezo como “grande” amigo, estudioso e fascinado com as sérias e complexas questões ambientais globais, possuidor de um raciocínio privilegiado, otimista, sempre com um incentivo pronto para ser disparado durante, espero, esta minha primeira etapa da trajetória na consagrada Escola de Engenharia de São Carlos.

Agradeço aos demais professores dos quais tive a honra de ser aluno e aos demais que conheci nesses tempos na Escola. Devo ressaltar a capacidade, dedicação e disponibilidade do corpo docente com o qual me relacionei nesses meses.

Agradeço à Eleninha, pela paciência e competência nos atendimentos prestados e pelas revisões de texto e bibliografia, extensivo aos demais funcionários da Biblioteca Central e dos outros setores da Escola dos quais dependi e recebi, sempre, tratamento profissional e agradável.

Agradeço ao apoio e incentivo dos colegas-alunos, alguns alunos-bolsistas, outros tantos alunos-profissionais já no mercado de trabalho, como eu, das mais variadas áreas de atuação, pelo excelente convívio nas atividades acadêmicas e fora delas.

Agradeço também a todas as demais pessoas de meu relacionamento pessoal e profissional, impossíveis de serem todas aqui referenciadas, as quais das mais variadas maneiras contribuíram para tornar mais suave e produtiva esta empreitada.

## RESUMO

MANTEGAZZA, E. (2004). *Aspectos ambientais do co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer no Estado de São Paulo*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

A geração de resíduos sólidos é inerente ao desenvolvimento humano. O concreto armado é um dos materiais mais utilizados pelo homem e tem o cimento *portland* como seu principal constituinte, o qual é produzido pela moagem de clínquer e gesso. O clínquer pode ser definido como um mineral artificial, obtido a partir das reações físico-químicas de calcário, argila e corretivos a altas temperaturas, em forno rotativo industrial, mediante a queima de combustíveis fósseis. No início da década de 70 foram realizadas as primeiras experiências de substituição de combustíveis fósseis por resíduos industriais nos Estados Unidos e países europeus, através da técnica denominada co-processamento, resultando na manufatura de um produto ao mesmo tempo em que os resíduos eram eliminados. O co-processamento se baseia na recuperação da energia disponível nos resíduos, substituindo parte daquela fornecida pelos combustíveis tradicionais ou na substituição de matérias-primas por resíduos com características químicas semelhantes àquelas normalmente empregadas na produção do clínquer. No Estado de São Paulo as primeiras iniciativas para a utilização de resíduos industriais em fornos de clínquer ocorreram no início da década de 90. A partir de 1997 os órgãos ambientais de alguns estados brasileiros normatizaram procedimentos de licenciamento da atividade que foi, posteriormente, uniformizada por norma em âmbito federal. No ano de 1995 a Companhia de Cimento Ribeirão Grande (CCRG), localizada no município de Ribeirão Grande/SP, Brasil, iniciou os procedimentos visando a substituição parcial dos combustíveis utilizados nos fornos rotativos por uma mistura de resíduos industriais. No período de 1995 a 2002 foram realizadas campanhas de amostragens em chaminés para avaliação das emissões atmosféricas dos dois fornos de produção de clínquer. A análise dos resultados obtidos associada às demais informações disponíveis de monitoramento das características das matérias-primas e combustíveis utilizados, bem como dos produtos finais, clínquer e cimento, não evidenciou alterações significativas nos níveis de emissões atmosféricas, sobretudo de material particulado e óxidos de enxofre, que pudessem ser associadas à utilização dos resíduos. Foram confirmadas as baixas emissões de inorgânicos e evidenciado o papel representado pelos resíduos no aporte dessas substâncias no sistema-forno, concluindo-se que esse aporte pode ser tão ou mais importante pela via da alimentação da *farinha*, cujos teores estão associados às características das jazidas minerais utilizadas. Foi também confirmada a alta eficiência do sistema-forno na destruição e remoção dos compostos orgânicos perigosos alimentados durante os testes de queima.

Palavras-chave: co-processamento, forno de clínquer, forno de cimento, clínquer, cimento, poluentes atmosféricos, resíduos industriais, resíduos perigosos, metais pesados, compostos orgânicos

## ABSTRACT

MANTEGAZZA, E. (2004). Environmental aspects of the co-processing in cement clinker kilns in the State of São Paulo. M.Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

The production of industrial residues is inherent to the human development. The cement concrete is one of the most used material, mainly the type *portland* cement, which is constituted by grinding clinker and gypsum together. Clinker can be defined as an artificial mineral obtained by applying physico-chemical reactions, at very high temperatures, to an appropriated mixture of limestone, clay, and some other materials in a rotating industrial kiln which burns fossil fuels. In the early 1970 decade occurred the first experiences substituting fossil fuels by organic residues in USA and Europe through a technique named *co-processing* that results the production of certain manufacture while eliminates residues. *Co-processing* is based in the recovery of thermal energy and/or the mass of some constituents from some residues, with the same chemical characteristics of normal sources of energy, then economizing fuels and mass constituents and making better use of residues, otherwise useless and environmentally polluters. In the State of São Paulo this practice began in early 1990 decade and by 1997 it was started the standardization of the rules for its use in some units of the Federation. Later this activity was regulated by nationally approved standard rules. In 1995 the industry Companhia de Cimento Ribeirão Grande (CCRG), a cement plant located in the city of Ribeirão Grande, São Paulo state, Brazil, started procedures searching the partial substitution of the normal fuels by a mixture of industrial residues in its two rotating kilns. The gaseous emissions from the chimneys of these two clinker kilns were studied from 1995 to 2002 about the use of residues as part of the fuel. Analyses of the final results associated with other informations concerning to the quality of raw minerals, fuels and products did not show significant alterations in atmospheric emissions, mainly for particulate material and sulfur oxides, related with the use of residues. The emissions of inorganic continued to be low and not significantly altered by the presence of residues. It was possible to conclude that the alterations in inorganic emissions depend more from the quality of the raw minerals feed in the kilns, which is more difficult to control, than from the presence of residues being burn with the fuel. It was shown a high efficiency in the destruction of dangerous organic compounds feed in the cement kilns, under test conditions.

Key-words: co-processing, clinker kiln, cement kiln, clinker, cement, atmospheric pollutants, industrial residues, hazardous waste, heavy metals, organic compound



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Produção de cimento <i>portland</i> segundo o Continente, no período de 1997 a 2000, em milhões de toneladas	34
Figura 2.2	Evolução do consumo relativo das principais fontes de energia utilizadas pelo setor cimenteiro nacional no período de 1979 a 2001	38
Figura 2.3	Estrutura do consumo energético no setor cimenteiro nacional no período de 1987 a 2002	39
Figura 4.1	Vista parcial da zona de queima primária de um forno de clínquer com resfriador de satélites	106
Figura 4.2	Forno rotativo de via seca com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones, com indicação dos fluxos de <i>farinha</i> e gases	112
Figura 4.3	Fluxograma simplificado do processo de produção de clínquer e cimento utilizando sistema-forno de via seca com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones	117
Figura 4.4	Fluxos das matérias-primas cruas e dos gases gerados num forno de via seca com pré-aquecedor de ciclones	126
Figura 4.5	Fluxos das matérias-primas cruas e dos gases gerados num forno de via seca com pré-aquecedor de ciclones e pré-calcinador	127
Figura 4.6	Perfis de temperaturas dos gases e materiais sólidos num sistema-forno equipado com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones, e pré-calcinador	128
Figura 4.7	Caracterização das zonas integrantes do processo de produção de clínquer em sistema-forno de via seca com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones	130
Figura 4.8	Corte esquemático de um resfriador de clínquer rotativo	135
Figura 4.9	Corte esquemático de um resfriador de clínquer de satélites ou planetário	137
Figura 4.10	Corte esquemático de um resfriador de clínquer de grelhas móveis	138
Figura 4.11	Corte esquemático de um resfriador de clínquer de grelhas (convencional)	139
Figura 4.12	Ciclo do enxofre num sistema-forno de via úmida	142
Figura 4.13	Ciclo do enxofre num sistema-forno de via seca com pré-aquecedor e pré-calcinador	144
Figura 4.14	Concentrações teóricas de equilíbrio de óxido nítrico no gás de combustão mantido no ar	151
Figura 4.15	Oferta interna de energia (%), no Brasil, no período de 1940 a 2000	156

Figura 4.16	Croqui esquemático identificando os ciclos internos e externos de componentes voláteis no sistema-forno pré-aquecedor, tipo torre de ciclones	165
Figura 4.17	Representação estrutural de dioxinas e furanos	168
Figura 4.18	Representação estrutural de dibenzo-p-dioxinas e dibenzo furanos	168
Figura 5.1	Tempo de residência cumulativo dos gases <i>versus</i> temperatura para um forno de clínquer	185
Figura 5.2	Curvas de resistências mecânicas a 1, 3, 7 e 28 dias de cimentos industriais de 1998 da CCRG. As linhas divisórias correspondem aos limites normativos a 3, 7 e 28 dias	201
Figura 6.1	Roteiro básico estabelecido para as análises de controle das etapas de processamento de resíduos na UCAH	227
Figura 6.2	Vista geral do parque industrial da CCRG	229
Figura 6.3	Vista parcial das instalações industriais da CCRG, observando-se o forno nº 2 à esquerda e o forno nº 1 à direita. No primeiro plano, à direita, observa-se parte do pré-aquecedor do forno nº 1 e ao fundo, à esquerda, o galpão de clínquer tendo ao lado as instalações de moagem e armazenamento de cimento	229
Figura 6.4	Vista lateral do forno nº 1 da CCRG, observando-se ao fundo os pré-aquecedores, tipo intercambiadores, integrantes das duas linhas produtivas e os silos de concreto para armazenamento de <i>farinha</i>	230
Figura 6.5	Perfil esquemático dos sistemas-fornos de produção de clínquer da CCRG	232
Figura 6.6	Concepção da lança e do bico para nebulização de óleo pesado e <i>blend</i> nos fornos da CCRG	234
Figura 6.7	Vista dos tanques de recepção da mistura homogeneizada de resíduos com indicação dos sistemas de agitação e da plataforma de descarga	236
Figura 6.8	Vista do parque de bombas com indicação de um moinho de linha	237
Figura 6.9	Plataforma instalada em chaminé do forno rotativo com indicação do ponto de monitoramento contínuo de emissões interligado ao sistema de bloqueio da injeção da mistura de resíduos no queimador	238
Figura 6.10	Representação esquemática de um <i>trem</i> de amostragem utilizado para a coleta de amostras do fluxo gasoso em chaminés para avaliação das emissões de poluentes atmosféricos	244

Figura 6.11	Descrição das metodologias utilizadas para a coleta de amostras dos fluxos gasosos em chaminés dos fornos nº 1 e 2 da CCRG, para avaliação de poluentes atmosféricos, durante testes em branco e de queima realizados no período de 1995 a 2002	245
Figura 6.12	Metodologias utilizadas para a preparação e análises de amostras coletadas nas correntes de entrada e de saída dos sistemas-fornos da CCRG, no período de 1995 a 2002, segundo o parâmetro de interesse	246
Figura 6.13	Identificação das metodologias utilizadas na preparação e análises de amostras coletadas nas correntes avaliadas nos sistemas-fornos da CCRG no período de 1995 a 2002	247
Figura 6.14	Disponibilidades de resultados de amostragens em chaminés, segundo o sistema-forno avaliado e tipos de testes realizados pela CCRG, no período de 1995 a 2002	248
Figura 7.1	Evolução das emissões de óxidos de enxofre (kg/h), expressas em SO <sub>2</sub> , em planta de produção de clínquer de via seca com pré-aquecedor e resfriador, tipo planetário, da empresa "A", localizada no Estado de São Paulo, no período de 1991 a 2004	266

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Comportamento do consumo de cimento por países, no período de 1997 a 2000, em milhões de toneladas	35
Tabela 3.1	Limites de emissão atmosférica (LE), estabelecidos pela NBR 11175/90, para a incineração de resíduos perigosos	68
Tabela 3.2	Limites de emissão atmosférica (LE), estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 264/99, para o co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer	70
Tabela 3.3	Limites de emissão atmosférica (LE), estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 316/02, para a destruição térmica de resíduos	72
Tabela 3.4	Limites de emissão atmosférica (deltas), estabelecidos em procedimento de licenciamento da CETESB/97, para o co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer	80
Tabela 3.5	Limites de emissão atmosférica (LE), estabelecidos pela Norma CETESB P4.263/03, para a atividade de co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer	82
Tabela 3.6	Frequências dos monitoramentos não contínuos, estabelecidos pela Norma CETESB P4.263/03, para fornos de produção de clínquer co-processando resíduos	83
Tabela 3.7	Limites de emissão atmosférica (LE), estabelecidos pela Diretiva 2000/76 do Conselho Europeu, para a co-incineração de resíduos	94
Tabela 4.1	Consumo específico médio de calor em processos de produção de clínquer industrial para cimento	114
Tabela 4.2	Concentrações (ppm) de metais pesados e halogêneos em matérias-primas para cimento e na crosta terrestre	118
Tabela 4.3	Composição química (% em massa) das principais matérias-primas, corretivos e <i>farinha</i> crua utilizados em sistemas-fornos para a produção de clínquer para cimento	120
Tabela 4.4	Parâmetros técnicos e tecnológicos dos resfriadores de clínquer	136
Tabela 4.5	Famílias de compostos de NO <sub>x</sub> e suas propriedades	146
Tabela 4.6	Classificação de metais pesados instituída pelo TA-Luft, segundo o grau de toxicidade	162
Tabela 4.7	Classificação de metais pesados, segundo a volatilidade, conforme o autor indicado	163
Tabela 4.8	Fatores internacionais de toxicidade equivalente (I-TEF)	170
Tabela 5.1	Resíduos co-processáveis provenientes de diferentes setores industriais	182

Tabela 5.2	Parâmetros comparativos entre as características do forno de clínquer e do incinerador de resíduos perigosos	186
Tabela 5.3	Zinco no clínquer de cimento e no pó com e sem (números entre parênteses) o uso de resíduos	188
Tabela 5.4	Chumbo no clínquer de cimento e no pó com e sem (números entre parênteses) o uso de resíduos	189
Tabela 5.5	Componentes traços e secundários na alimentação do forno e pré-aquecedor, tipo torre de ciclones, e no clínquer de sistema-forno com operação composta	193
Tabela 5.6	Emissão e retenção relativas de metais pesados	196
Tabela 5.7	Retenção dos metais cádmio e chumbo mediante o incremento da alimentação de cloro no sistema-forno	197
Tabela 6.1	Características físicas (médias) do <i>blend</i> de resíduos	225
Tabela 6.2	Características principais dos fornos rotativos da CCRG	231
Tabela 6.3	Caracterização do coque de petróleo utilizado pela indústria cimenteira brasileira	231
Tabela 7.1	Concentrações e taxas de emissão (TE) de material particulado (MP) em chaminés dos fornos nº 1 e 2 da CCRG, com e sem a alimentação de resíduos, no período de maio de 1995 a setembro de 2002	254
Tabela 7.2	Concentrações e taxas de emissão (TE) de material particulado (MP) em chaminé do forno nº 2 da CCRG, durante pré-teste realizado em março de 2001 com substituição energética de 30% por mistura de resíduos	258
Tabela 7.3	Características médias do combustível e <i>blend</i> utilizados no forno nº 1 da CCRG, durante o teste de queima de julho de 1996, com substituição energética de 15% por mistura de resíduos	260
Tabela 7.4	Características médias do combustível e <i>blend</i> utilizados no forno nº 1 da CCRG, durante o teste de queima de setembro de 1998, com substituição energética de 30% por mistura de resíduos	261
Tabela 7.5	Características médias do combustível e <i>blend</i> utilizados no forno nº 2 da CCRG, durante o teste de queima de setembro de 2002, com substituição energética de 30% por mistura de resíduos	261
Tabela 7.6	Concentrações médias e taxas de emissão (TE) de óxidos de enxofre (SO <sub>x</sub> ), expressas como SO <sub>2</sub> , em chaminés dos fornos nº 1 e 2 da CCRG, com e sem a alimentação de resíduos	263
Tabela 7.7	Concentrações médias de enxofre nas <i>farinhas</i> utilizadas em testes de queima de resíduos realizados nos fornos nº 1 e 2 da CCRG nos anos de 1996, 1998 e 2002	264

Tabela 7.8	Concentrações e taxas de emissão (TE) de óxidos de enxofre (SO <sub>x</sub> ), expressas em SO <sub>2</sub> , em chaminé do forno nº 2 da CCRG, durante pré-teste realizado em março de 2001, com substituição energética de 30% por mistura de resíduos	267
Tabela 7.9	Concentrações e taxas de emissão (TE) de óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ), expressas como NO <sub>2</sub> , em chaminés dos fornos nº 1 e 2 da CCRG, de julho de 1996 a setembro de 2002	269
Tabela 7.10	Concentrações e taxas de emissão (TE) de óxidos de nitrogênio, expressas como NO <sub>2</sub> , em chaminé do forno da empresa “B”, localizada no Estado de São Paulo, em teste de queima com pneus inservíveis, em 2001, com substituição energética de 13%	271
Tabela 7.11	Concentrações e taxas de emissão (TE) de óxidos de nitrogênio, expressas como NO <sub>2</sub> , em chaminés dos fornos das empresas “A” e “C”, localizadas no Estado de São Paulo, em testes em branco de 2004	273
Tabela 7.12	Variações das concentrações de substâncias inorgânicas (ppm) em <i>farinhas</i> utilizadas para a produção de clínquer nos fornos nº 1 e 2 da CCRG no período de maio a dezembro de 1998	274
Tabela 7.13	Variações das taxas de alimentação de substâncias inorgânicas (g/h) nos fornos da CCRG, no período de maio a dezembro de 1998, baseadas nas concentrações médias presentes nas <i>farinhas</i> utilizadas	276
Tabela 7.14	Taxas de emissão atmosférica de mercúrio (Hg) em chaminé do forno nº 2 da CCRG, entre junho de 1997 e setembro de 2002, com e sem a utilização de resíduos	276
Tabela 7.15	Caracterização das correntes de entrada de substâncias inorgânicas no forno nº 2 da CCRG, durante teste de queima de resíduos, em setembro de 2002, com substituição energética de 30%	278
Tabela 7.16	Participação relativa de substâncias inorgânicas nas correntes integrantes dos fluxos de massas do forno nº 2 da CCRG, durante teste de queima de resíduos, em setembro de 2002, com substituição energética de 30%	279
Tabela 7.17	Substâncias inorgânicas nas correntes integrantes dos fluxos de massas do forno nº 2 da CCRG, durante teste de queima de resíduos, em setembro de 2002, com substituição energética de 30%	280
Tabela 7.18	Comparativo entre as taxas de emissão de metais pesados no forno nº 2 da CCRG, durante teste de queima de setembro de 2002, e aquelas obtidas por Seebach e Tompkins (1991)	281

Tabela 7.19	Taxas médias de emissão de metais pesados em chaminés dos fornos n <sup>os</sup> 1 e 2 da CCRG, no período de junho de 1997 a setembro de 2002, sem a utilização de resíduos	282
Tabela 7.20	Taxas médias de emissão de metais pesados em chaminés dos fornos n <sup>os</sup> 1 e 2 da CCRG, no período de julho de 1996 a setembro de 2002, utilizando resíduos como substitutos energéticos parciais	284
Tabela 7.21	Razões entre as taxas médias de emissão de metais pesados (g/h), mínimas, médias e máximas, relativas às variabilidades obtidas em testes com e sem a utilização de resíduos nos fornos n <sup>os</sup> 1 e 2 da CCRG, no período de junho de 1997 a setembro de 2002	285
Tabela 7.22	Concentrações e taxas de emissão (TE) de ácido clorídrico (HCl) e cloro livre (Cl <sub>2</sub> ) em chaminé do forno n <sup>o</sup> 1 da CCRG, sem e com a utilização de resíduos em substituição energética parcial, no período de agosto de 1995 a setembro de 1998	287
Tabela 7.23	Concentrações e taxas de emissão (TE) de ácido clorídrico (HCl) e cloro livre (Cl <sub>2</sub> ) em chaminé do forno n <sup>o</sup> 2 da CCRG, sem e com a utilização de resíduos em substituição energética parcial, no período de junho de 1997 a setembro de 2002	288
Tabela 7.24	Concentrações e taxas de emissão (TE) de ácido fluorídrico (HF) e fluoretos totais (F <sup>-</sup> ) em chaminé do forno n <sup>o</sup> 2 da CCRG, sem e com a utilização de resíduos em substituição energética parcial, em abril de 2001 e setembro de 2002	289
Tabela 7.25	Resultados obtidos em testes de eficiência de destruição e de remoção (EDR) de compostos orgânicos, nos fornos n <sup>os</sup> 1 e 2 da CCRG, no período de julho de 1996 a setembro de 2002	291
Tabela 7.26	Concentrações de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos totais (HCT) e óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ), expressas em partes por milhão (ppm), e de oxigênio (O <sub>2</sub> ), expressas em percentual (%), durante testes em branco e de queima realizados no forno n <sup>o</sup> 1 da CCRG, no período de 1996 a 2002	292
Tabela 7.27	Concentrações de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos totais (HCT) e óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ), expressas em partes por milhão (ppm), e de oxigênio (O <sub>2</sub> ), expressas em percentual (%), durante pré-testes, testes em branco e de queima realizados no forno n <sup>o</sup> 1 da CCRG, no período de 2001 a 2002	293

Tabela 7.28	Massas coletadas (ng) em amostragens em chaminé do forno nº 2 da CCRG nos meses de junho e setembro de 2002 para avaliação das emissões atmosféricas equivalentes de dioxinas e furanos	295
Tabela 7.29	Concentrações de dioxinas e furanos (ng/Nm <sup>3</sup> corrigidas a 11% de oxigênio) obtidas em amostragens em chaminé do forno nº 2 da CCRG nos meses de junho e setembro de 2002	296
Tabela 7.30	Taxas de emissão (TE) de dioxinas e furanos obtidas em amostragens em chaminé do forno nº 2 da CCRG nos meses de junho e setembro de 2002	297



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND
ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
BIF	HAZARDOUS WASTE BURNED IN BOILERS AND INDUSTRIAL FURNACES
BNDES	BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO
CAAA	CLEAN AIR ACT AMENDMENTS
CAC	CONSUMO APARENTE DE CIMENTO
CCRG	COMPANHIA DE CIMENTO RIBEIRÃO GRANDE
CE	COMUNIDADE EUROPÉIA
CEMBUREAU	THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION
CETESB	COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL
CNEN	COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CONAMA	CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE
CONSEMA	CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE
DNPM	DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL
EAR	ESTUDO DE ANÁLISE DE RISCO
e-CFR	ELETRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS
ECP	EQUIPAMENTO DE CONTROLE DE POLUIÇÃO
EDR	EFICIÊNCIA DE DESTRUIÇÃO E REMOÇÃO
EU	EUROPEAN UNION
EVQ	ESTUDO DE VIABILIDADE DE QUEIMA
FEEMA	FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE
IBAMA	INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
LI	LICENÇA DE INSTALAÇÃO
LO	LICENÇA DE OPERAÇÃO
LP	LICENÇA AMBIENTAL PRÉVIA
MEI	MÁXIMA EXPOSIÇÃO INDIVIDUAL

NSPS	NEW SOURCE PERFORMANCE STANDARDS
PAP	POLUENTE ATMOSFÉRICO PERIGOSO
PCB's	BIFENILAS POLICLORADAS
pci	PODER CALORÍFICO INFERIOR
pcs	PODER CALORÍFICO SUPERIOR
PCI's	PRODUTOS DE COMBUSTÃO INCOMPLETA
PCOP	PRINCIPAL COMPOSTO ORGÂNICO PERIGOSO
PETAR	PARQUE ESPELEOLÓGICO E TURÍSTICO DO ALTO RIBEIRA
PNMA	POLÍTICA NACIONAL DO MEIO AMBIENTE
PRONAR	PROGRAMA NACIONAL DE CONTROLE DA QUALIDADE DO AR
PTB	PLANO DE TESTE EM BRANCO
PTQ	PLANO DE TESTE DE QUEIMA
RAP	RELATÓRIO AMBIENTAL PRELIMINAR
RCRA	RESOURCE CONSERVATION AND RECOVERY ACT
SEAQUA	SISTEMA ESTADUAL DE ADMINISTRAÇÃO DA QUALIDADE AMBIENTAL, PROTEÇÃO, CONTROLE E DESENVOLVIMENTO DO MEIO AMBIENTE E USO ADEQUADO DOS RECURSOS NATURAIS
SISNAMA	SISTEMA NACIONAL DE MEIO AMBIENTE
SMA	SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE
SNIC	SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO
TB	TESTE EM BRANCO
TQ	TESTE DE QUEIMA
UCAH	UNIDADE CENTRAL DE ARMAZENAMENTO E HOMOGENEIZAÇÃO
UNEP	UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME
USEPA	U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY

## SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	22
1.1 – Introdução	22
1.2 – Objetivos	26
1.2.1 – Geral	27
1.2.1.1 – Específicos	27
REFERÊNCIAS	28
2 - CIMENTO E O HISTÓRICO ESTADUAL	31
2.1 - Origem do cimento	31
2.2 - Panorama mundial	32
2.3 - Panorama nacional	35
2.3.1 - Reservas de calcário	36
2.3.2 - Indústria brasileira de clínquer e cimento	36
2.3.2.1 - Breve histórico	36
2.3.2.2 - Situação atual	37
2.3.2.3 - Panorama estadual	40
2.3.2.3.1 - Reservas de calcário	40
2.3.2.3.2 - Evolução da indústria paulista	41
2.3.2.4 - O co-processamento de resíduos no Estado de São Paulo	46
2.3.2.4.1 – Introdução	46
2.3.2.4.2 - Iniciativas pioneiras	48
2.3.2.4.3 - Situação atual	53
REFERÊNCIAS	55
3 - LEGISLAÇÃO AMBIENTAL	60
3.1 – Introdução	60
3.2 - Em âmbito federal	60

3.2.1 - Meio ambiente em geral	61
3.2.2 - Destruição térmica de resíduos	67
3.3 - Em âmbito estadual	73
3.3.1 - Meio ambiente em geral	73
3.3.2 - Co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer	78
3.4 - Legislação americana para destruição térmica de resíduos perigosos	84
3.4.1 - Regulamento para a queima de resíduos em caldeiras e fornos industriais	84
3.4.1.1 - Padrões para controle de emissões orgânicas	85
3.4.1.2 - Destruição de produtos de combustão incompleta (PIC's)	86
3.4.1.3 - Limites para o monóxido de carbono e hidrocarbonetos	86
3.4.1.4 - Compostos metálicos	88
3.4.1.4.1 - Categoria 1 ( <i>Tier 1</i> )	89
3.4.1.4.2 - Categoria 2 ( <i>Tier 2</i> )	89
3.4.1.4.3 - Categoria 3 ( <i>Tier 3</i> )	89
3.4.1.5 - Cloreto de hidrogênio e gás cloro (HCl e Cl <sub>2</sub> )	90
3.4.1.5.1 - Categorias 1 e 2 ( <i>Tier 1 e 2</i> )	90
3.4.1.5.2 - Categoria 3 ( <i>Tier 3</i> )	90
3.4.1.6 - Material particulado (MP)	90
3.5 - Legislação da Comunidade Européia para destruição térmica de resíduos	91
REFERÊNCIAS	96
4 - PROCESSO INDUSTRIAL	104
4.1 - Introdução	104
4.2 - Processo de combustão	104
4.2.1 - Combustão no forno de clínquer	105
4.3 - Processos de fabricação de clínquer e cimento	109
4.3.1 - Etapas do processo produtivo	114
4.3.1.1 - Extração do calcário/argila e britagem	116
4.3.1.2 - Pré-homogeneização, dosagem e moagem das matérias-primas	118
4.3.1.3 - Homogeneização da mistura crua – <i>farinha</i>	119

4.3.1.4 - Calcinação e clínquerização seguida de resfriamento	120
4.3.1.5 - Moagem do clínquer para produção do cimento	123
4.3.1.6 - Armazenamento e expedição	124
4.3.2 - O sistema-forno	124
4.3.2.1 - Fluxo de material sólido	129
4.3.2.2 - Fluxo de gases	132
4.3.3 - Resfriamento secundário de clínquer	134
4.3.4 - Principais parâmetros de controle do processo produtivo	139
4.4 - Emissão de poluentes no processo de produção de clínquer	141
4.4.1 - Compostos de enxofre	141
4.4.2 - Compostos de nitrogênio	146
4.4.3 - Emissões de dióxido de carbono	154
4.4.4 - Emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos totais	156
4.4.5 - Emissões de ácido clorídrico e gás cloro	157
4.4.6 - Emissões de material particulado	159
4.4.7 - Emissões de metais pesados	161
4.4.8 - Emissões de orgânicos	166
4.4.9 - Emissões de dioxinas e furanos	167
REFERÊNCIAS	171
5 - CO-PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS	176
5.1 - Introdução	176
5.2 - Resíduos como fonte energética	179
5.3 - Co-processamento em fornos rotativos de produção de clínquer	183
5.3.1 - O forno de clínquer como equipamento de destruição de resíduos	183
5.3.2 - Principais emissões atmosféricas decorrentes do co-processamento	185
5.3.2.1 - Emissões de metais pesados	186
5.3.2.2 - Emissão de orgânicos	203
REFERÊNCIAS	215
6 - EXPERIMENTAL	220
6.1 - Introdução	220
6.2 - Unidade Central de Armazenamento e Homogeneização (UCAH)	222

6.2.1 - Preparação da mistura de resíduos ( <i>blend</i> )	222
6.2.2 - Seleção dos resíduos	223
6.2.3 - Principais características do <i>blend</i>	224
6.2.4 - Etapas de preparação	224
6.2.5 - Controle de qualidade	226
6.3 - Unidade de manufatura de clínquer e cimento	228
6.3.1 - Caracterização da planta industrial	228
6.3.2 - A unidade como co-processadora de resíduos	234
6.4 - Campanhas de amostragens	238
6.4.1 - Caracterização dos testes realizados	238
6.4.2 - Metodologias utilizadas	240
6.4.3 - Operacionalização dos testes	247
REFERÊNCIAS	249
7 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	252
7.1 – Introdução	252
7.2 - Material particulado	253
7.3 - Óxidos de enxofre	259
7.4 - Óxidos de nitrogênio	268
7.5 - Substâncias inorgânicas	273
7.6 - Ácido clorídrico e cloro	286
7.7 - Ácido fluorídrico e flúor total	289
7.8 - Compostos orgânicos perigosos	290
7.9 - Dioxinas e furanos	294
REFERÊNCIAS	298
8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	301
8.1 - Conclusões	301
8.2 - Recomendações	303
ANEXO A - Caracterização de correntes mássicas	305
ANEXO B - Resultados de amostragens em chaminés	312
ANEXO C - Gerais	353



## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS**

### **1.1 - Introdução**

No período Paleolítico ou Idade da Pedra Lascada, há cerca de 200 000 anos, o homem ocupava grande parte do Velho Mundo sobrevivendo da caça, numa forma de vida selvagem, e utilizando as peles dos animais como vestimentas para proteção contra as intempéries. Em 10 000 a.C. iniciou-se o período Neolítico ou Idade da Pedra Polida que durou até 4 000 a.C., no qual os ancestrais da espécie deram mais um passo em direção à civilização organizando-se em formas, ainda primitivas, de vida em sociedade. (A ORIGEM..., 2004).

A necessidade do homem se defender dos perigos inerentes à vida selvagem o levou à formação de grupos sociais mais complexos - as tribos. Como consequência dessa característica comportamental, de viver em agrupamentos, surgiram os povoados, vilas e demais formas de adensamentos populacionais que resultaram nas cidades. Nelas se concentra o desenvolvimento das principais atividades necessárias à sobrevivência da espécie humana, associado a uma diversidade de problemas, destacando-se, nestas considerações, os de natureza ambiental.

Observa-se que o homem ao longo da cadeia evolutiva desenvolveu o conhecimento e, conseqüentemente, a capacidade intelectual, cultural e tecnológica propiciando o descobrimento de inúmeras maneiras de interferir nas relações com o ambiente natural para obter maior nível de conforto e comodidade para a sua existência, destacando-se, nesse cenário, o papel representado pela atividade industrial.



Segundo Galvêas (2003), a grande revolução industrial começou a acontecer na Inglaterra, aproximadamente, em 1760 no setor têxtil. Foi motivada pelo rápido crescimento da população e pela constante migração do homem do campo para as grandes cidades, criando excedentes de mão de obra, que permitiriam a exploração e expansão de negócios pela burguesia emergente. Tais condições aliadas ao avanço do desenvolvimento científico, principalmente com a invenção da máquina a vapor, por James Watts, e de inúmeras outras inovações tecnológicas, proporcionou o início do fenômeno da industrialização mundial.

A partir de meados do século XIX o desenvolvimento industrial evoluiu em velocidade extremamente acelerada favorecendo a produção de bens materiais e de consumo que rapidamente eram, e ainda são, incorporados à vida cotidiana. Como resultado foi verificado um considerável aumento da poluição ambiental, provocado pelas atividades produtivas, refletindo nos meios físico (água, ar e solo) e biológico, e traduzindo-se, ao longo do tempo, num potencial crescente e capaz de provocar profundas alterações nas relações do homem com o meio ambiente.

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) (2004a) é a agência do Governo do Estado de São Paulo responsável pelo controle, fiscalização, monitoramento e licenciamento de atividades potencialmente poluidoras, com a preocupação fundamental de preservar e recuperar a qualidade das águas, do ar e do solo. Da análise dos dados de monitoramento ambiental realizado nos vários compartimentos naturais e divulgados pela Agência estadual, confirma-se a hipótese de que a aglomeração humana contribui decisivamente para a degradação da qualidade ambiental (CETESB, 2003 e 2004b).

Pode-se, por exemplo, verificar que a Região Metropolitana de São Paulo sofre todo tipo de problema ambiental, entre os quais está a deterioração da qualidade do ar, devida às emissões atmosféricas remanescentes de cerca de 2 000 indústrias de alto potencial poluidor e de uma frota de aproximadamente 7,2 milhões de veículos automotores, equivalente a 1/5 do total nacional. Outras regiões do Estado também são afetadas por problemas de poluição atmosférica, por vezes em razão das características topográficas associadas às condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão de

poluentes e às emissões de poluentes de fontes industriais ou das frotas locais de veículos automotores (CETESB, 2004c).

A aglomeração humana é também responsável pela maior concentração de resíduos, dentre os quais se incluem aqueles de origem doméstica, cujas características quali-quantitativas podem sofrer alterações dependendo das condições sócio-econômicas dos geradores, mantendo, no entanto, base essencialmente orgânica.

Diferentemente, os resíduos gerados nos processos industriais podem apresentar características totalmente diversas e complexas dependendo dos tipos e fontes das matérias-primas, processos e operações industriais empregados, reações químicas envolvidas e uma diversidade de variáveis intervenientes. É a partir desses processos que se transformam as matérias-primas, naturais ou sintéticas, para fornecimento dos insumos e produtos necessários para o homem atingir as “melhores condições de vida”, sob a ótica de maior conforto e comodidade.

Relativamente a esses resíduos, conforme dados de inventário efetuado pela CETESB (2004d), no ano de 1997 eram gerados 512 196 t/ano classificados como perigosos, dos quais 53% recebiam algum tipo de tratamento, 31% eram armazenados e 16% depositados no solo. Eram gerados ainda 19 519 026 t/ano de resíduos não inertes e 1 012 899 t/ano de resíduos inertes, acerca dos quais não foram informados os tipos de destinação.

Os depósitos clandestinos de resíduos químicos perigosos e áreas de disposição inadequadas de materiais poluidores, vinculados a empreendimentos industriais, foram responsáveis por 202 das 727 áreas contaminadas existentes no Estado de São Paulo até outubro de 2003 (CETESB, 2004).

Saxena e Jotshi (1996) destacam que foi proposta pela *U. S. Environmental Protection Agency* (USEPA) uma estrutura hierarquizada de gerenciamento de resíduos baseada primariamente em preocupações ambientais. Contemplava a redução e minimização; separação e concentração; permuta; recuperação material e energética; tratamento/incineração e disposição final segura. Observa-se o desenvolvimento ainda incipiente, nos últimos anos, dessas iniciativas de gestão de resíduos sólidos.

A política adotada pelas principais Agências Ambientais, ao dar transparência aos problemas constatados, associada à maior facilidade de acesso à informação, sobretudo com o advento da rede mundial de computadores, se reflete no gradual aumento do interesse popular e conseqüentemente de maiores pressões e exigências para a gestão racional dos recursos naturais e da preservação do meio ambiente.

Como conseqüência, crescem, por exemplo, as demandas por formas sanitárias e ambientalmente adequadas para o tratamento e disposição final de resíduos. Nesse contexto insere-se a necessidade de maiores investimentos na investigação das formas de destruição térmica, principalmente quanto aos aspectos associados aos riscos à saúde pública e ao meio ambiente.

Oppelt (1986) já atestava que sistemas de destruição térmica, devidamente projetados, ofereciam a possibilidade de destruição dos componentes orgânicos perigosos de correntes de resíduos, sendo os mesmos reconhecidos, no decorrer da década de 70, como alternativa progressivamente mais desejável que os métodos tradicionais de disposição em aterros, lagoas ou injeção em poços profundos de mineração.

Em conformidade com os aspectos apresentados a proposta deste trabalho de pesquisa enfocará uma tecnologia alternativa de destruição de parte dos resíduos sólidos industriais, concomitante à produção de clínquer para cimento, denominada co-processamento, contemplando também a avaliação das emissões atmosféricas provenientes dessa prática.

O conceito fundamenta-se na substituição parcial dos combustíveis fósseis tradicionais por resíduos com significativo potencial energético para aporte ao sistema-forno. Contempla também a possibilidade de substituição de matérias-primas por resíduos que apresentem características qualitativas semelhantes àquelas normalmente empregadas no processo produtivo.

Kihara (1999) refere que os primeiros experimentos bem sucedidos na área do co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer foram realizados na década de 70 no Canadá e, posteriormente, na Europa e Estados Unidos. Dados atuais disponíveis na literatura especializada e *Internet* indicam que quantidades significativas de resíduos industriais têm sido utilizadas em fábricas de cimento do Japão, Estados Unidos e da União

Européia, em substituição parcial à energia consumida no sistema-forno, demonstrando a viabilidade operacional e econômica da tecnologia. Resíduos de origem doméstica também são utilizados como combustível complementar em fornos de via úmida na Inglaterra, em substituição de até 30% da quantidade de carvão necessária no processo (MENON et al., 1993).

A USEPA (1994) descreve que as principais emissões atmosféricas geradas no processo de manufatura de clínquer para cimento *portland*, sem o uso de resíduos, resumem-se aos parâmetros: material particulado (MP), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Refere que podem também ser emitidas pequenas quantidades de compostos orgânicos voláteis (COV), amônia (NH<sub>3</sub>), cloro (Cl<sub>2</sub>) e ácido clorídrico (HCl), assim como materiais residuais dos combustíveis e matérias-primas e, ainda, produtos de combustão incompleta. As matérias-primas e os combustíveis utilizados também contém quantidades traços de metais pesados que podem ser emitidos para a atmosfera através dos fluxos gasosos exauridos, via chaminés, do sistema-forno. Destaca ainda que nas instalações que queimam resíduos como substitutos de combustíveis, particularmente solventes gastos, podem também ser emitidas pequenas quantidades adicionais de poluentes orgânicos perigosos.

## 1.2 - Objetivos

A evolução das tendências mundiais, fruto da crescente conscientização do homem para com as questões ambientais globais, exige maior racionalidade no uso da energia e dos recursos naturais não renováveis, mas deve também privilegiar a continuidade do desenvolvimento de tecnologias que favoreçam a melhoria constante da qualidade de vida da população.

Frente a esse quadro discute-se o co-processamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer como alternativa com significativo potencial para colaborar na minimização de dois relevantes problemas atuais: a destinação inadequada de resíduos e a exaustão de recursos naturais não renováveis.

Em compasso com essa visão identifica-se a necessidade de um melhor e maior entendimento das questões que envolvem essa técnica de reaproveitamento de resíduos através do uso de fornos industriais de manufatura de clínquer. Visa contribuir para a elucidação de questões que preocupam órgãos ambientais, responsáveis pela regulamentação aplicável à implementação dessa alternativa; a comunidade científica; os empreendimentos envolvidos, técnicos e população em geral, de forma a otimizar o uso dos recursos naturais garantindo, porém, a segurança da saúde pública e do meio ambiente.

### **1.2.1 - Geral**

Apresentar e discutir a evolução da atividade cimenteira no Estado de São Paulo no que se refere ao co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer e o estágio atual dessa tecnologia com base nas experiências de empreendimentos industriais.

#### **1.2.1.1 - Específicos**

1 - Comparar os resultados de emissões atmosféricas obtidas em campanhas de amostragens em chaminés de fornos rotativos operando com alimentação de combustíveis fósseis e com substituição energética parcial por mistura de resíduos industriais, em empreendimento instalado na Região de Governo de Itapeva – Estado de São Paulo;

2 - Discutir as emissões atmosféricas provenientes de fornos de clínquer, sob a ótica quali-quantitativa, decorrente do processamento industrial das matérias-primas naturais e da utilização de resíduos industriais como substitutos energéticos parciais.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR 10004*: Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1987a). *NBR 10005*: Lixiviação de resíduos - procedimento. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1987b). *NBR 10006*: Solubilização de resíduos - procedimento. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1987c). *NBR 10007*: Amostragem de resíduos - procedimento. Rio de Janeiro.

BRASIL (1999). Resolução CONAMA n.258, de 26 de agosto de 1999. Dispõe sobre a obrigatoriedade das empresas fabricantes e importadoras de pneumáticos de coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 02 dez. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm> >. Acesso em: 17 nov. 2003.

COIMBRA, J. A. A. (2003). In: MILARÉ ADVOGADOS CONSULTORIA EM MEIO AMBIENTE. Legislação ambiental. Disponível em:<<http://www.milare.adv.br/legis04.htm>>. Acesso em: 23 nov.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (2003). *Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares 2002 versão 2*. São Paulo. Disponível em:<<http://www.ambiente.sp.gov.br/inventario/introd.htm>>. Acesso em: 22 nov.

\_\_\_\_\_. (2004). *Áreas contaminadas*. Disponível em:<[http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas\\_contaminadas/relacao\\_areas.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/relacao_areas.asp)>. Acesso em: 5 abr.

\_\_\_\_\_. (2004a). *Objetivos e ações*. Disponível em:<[http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/portugues\\_objetivos.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/portugues_objetivos.asp)>. Acesso em: 8 abr.

\_\_\_\_\_. (2004b). *Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo 2003*. São Paulo. Disponível em:<[http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rel\\_aguas\\_2003/introdução.zip](http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rel_aguas_2003/introdução.zip)>. Acesso em: 25 abr.

\_\_\_\_\_. (2004c). *Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2003*. São Paulo. Disponível em:<[http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar\\_geral.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_geral.asp)>. Acesso em: 25 abr.

\_\_\_\_\_. (2004d). *Solo*. Disponível em:<[http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/portugues\\_solo.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/portugues_solo.asp)>. Acesso em: 8 abr.

THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION (1997). *Alternative fuels in cement manufacture*. Disponível em:<<http://www.cembureau.be/Documents/Publications>>. Acesso em: 8 Oct. 2003.

GALVÊAS, E. C. (2003). *A revolução industrial e suas conseqüências: da corporação de artesãos e manufaturas locais à produção em escala internacional*. Disponível em:<[http://www.maxpages.com/elias/A\\_Revolucao\\_Industrial](http://www.maxpages.com/elias/A_Revolucao_Industrial)>. Acesso em: 5 dez.

KIHARA, Y. (1999). Co-processamento de resíduos em fornos de cimento: tendências. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1999, São Paulo. *Anais...* São Paulo: IBRACON.

MENON, G. J. et al. (1993). Estudo do processo de combustão nos fornos rotativos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 3., 1993, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP. p.479-497.

OPPELT, E.T. (1986). Hazardous waste destruction. *Environmental Science Technology*, Easton, v.20, n.4, p.312-318.

A ORIGEM do homem e a pré-história: como o "homem" se transformou em homem. (2004). Disponível em:<<http://www.ccerqueira.hpg.ig.com.br/PreHistoria.htm>>. Acesso em: 4 abr.

SAXENA, S.C.; JOTSHI, C.K. (1996). Management and combustion of hazardous wastes. *Progress in Energy and Combustion Science*, Oxford, v.22, n.5, p.401-423.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (2004). *SNIC – 50 anos*. Disponível em:<<http://www.sindicatodocimento.org.br/pdf/História%20do%20Cimento%20no%20Brasil.pdf>>. Acesso em: 16 abr.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1994). *Emission factor documentation for AP-42, section 11.6, portland cement manufacturing*. Final report. Disponível em:<<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/final/c11s07.pdf>>. Acesso em: 4 Apr. 2004.



## CAPÍTULO 2 – CIMENTO E O HISTÓRICO ESTADUAL

### 2.1 - Origem do cimento

A palavra cimento é originária do latim *caementu* que na Roma antiga designava uma espécie de pedra natural de rochedos não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4 500 anos em face do uso no antigo Egito de uma liga constituída por mistura de gesso calcinado na construção de monumentos. As ruínas romanas, pirâmides egípcias e as muralhas da China provam que no século V antes de Cristo esses povos já empregavam materiais aglomerantes entre os blocos de pedras utilizados em suas construções (BATTAGIN, 2004; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP), 2004).

O cimento *portland*, denominação mundialmente convencionada, é um pó fino, cinza ou branco, que consiste numa mistura de materiais hidráulicos, principalmente, aluminatos, silicatos e ferroaluminatos de cálcio que endurece sob ação de água (U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) 1994; THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION (CEMBUREAU) 1999; ABCP, 2002).

A história do cimento começa antes do século XVIII, mas o grande passo para o seu desenvolvimento ocorreu por volta de 1756 quando o inglês John Smeaton, por meio da calcinação de calcários moles e argilosos, obteve um produto de alta resistência. Na época havia grande empenho de cientistas europeus visando a descoberta da fórmula perfeita para a obtenção do ainda pouco desenvolvido cimento hidráulico.

Em 1818 o francês Vicat chegou a resultados semelhantes aos de Smeaton e em 1824 ou meados de 1830 o inglês Joseph Aspdin, que desde 1811 também se dedicava à pesquisa da melhoria da qualidade do cimento, obteve sucesso ao calcinar proporções adequadas de pedras calcárias e argilas numa temperatura em torno de 800°C. Ele descobriu que essa mistura, transformada num pó fino, apresentava propriedades ligantes que após hidratação e secagem tornava-se tão dura quanto as pedras utilizadas nas construções. Nesse mesmo ano a mistura foi patenteada por Aspdin com o nome de cimento *portland* por apresentar características de cor, solidez e propriedades de durabilidade semelhantes às abundantes rochas da ilha britânica de Portland (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC), 2004a; BATTAGIN, 2004; ABCP, 2004; ROBERTO, 2004).

## **2.2 - Panorama mundial**

O cimento é a matéria-prima fundamental para a preparação do concreto armado. Tem ampla aplicação desde pequenas obras residenciais até grandes projetos nas áreas de transportes, energia, saneamento e inúmeras outras. Documento elaborado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico (BNDES) (1995) relata que o cimento apresenta alta homogeneidade de especificações entre os diversos fabricantes em nível mundial. Tal fato decorre das rigorosas exigências técnicas estabelecidas pelos organismos internacionais e nacionais de certificação da qualidade do produto. CEMBUREAU (2004) discrimina os 27 tipos de cimentos normalizados na Europa, divididos em 05 categorias, cujas composições, propriedades e resistências variam em função dos teores dos principais constituintes dosados.

A implantação de unidades destinadas à produção de clínquer para cimento requer significativas disponibilidades de matérias-primas, sendo o calcário a principal, e de energia elétrica, dependendo ainda de fatores econômicos e logísticos como, por exemplo, o custo dos transportes e a proximidade e nível da atividade econômica dos centros consumidores (HERRANZ, 2004).

Decorrente da ampla distribuição geográfica das reservas de calcário e de outros minérios utilizados na fabricação do clínquer e cimento e das características dos processos produtivos, amplamente conhecidos ao redor do mundo, resulta a existência de empreendimentos em quase todos os países (ANDRADE, CUNHA e SILVA, 2002).

Segundo BNDES (1995) e Andrade, Cunha e Silva (2002) nos últimos anos a indústria cimenteira tem direcionado os investimentos nas áreas de automação industrial e controle do processo, visando a otimização do consumo energético, bem como em sistemas de controle ambiental.

A esse respeito Dekkiche, Clark e Clark (1996) afirmam que os problemas de produção de clínquer são quase sempre localizados em determinados pontos do processo e que os sistemas de controle têm que se adaptar e desenvolver a partir das mudanças das características e tipos dos combustíveis utilizados. Destacam que a implementação de sistemas automatizados de controle propiciam reais benefícios mediante constante tratamento de perturbações do processo maximizando, por exemplo, as taxas de queima de combustíveis derivados de resíduos dentro dos limites legais fixados.

A produção mundial de cimento alcançou no ano 2000, 1,673 gigatonelada<sup>1</sup> (Gt) frente a uma capacidade global de fabricação de 1,75 Gt, destacando-se a rápida ascensão da China com 576 megatonelada<sup>2</sup> (Mt) ou 34,4% do total. O crescimento da produção mundial foi de 3,4% em relação a 1999 e o crescimento médio anual no período de 1997 a 2000 ficou em torno de 2,8%.

A Figura 2.1 ilustra a evolução da produção de cimento por continente no período de 1997 a 2000. O Brasil, com uma produção de 39,56 Mt em 2000, ocupava a sexta posição na produção mundial, atrás da China, Índia, Estados Unidos, Japão e Coréia do Sul.

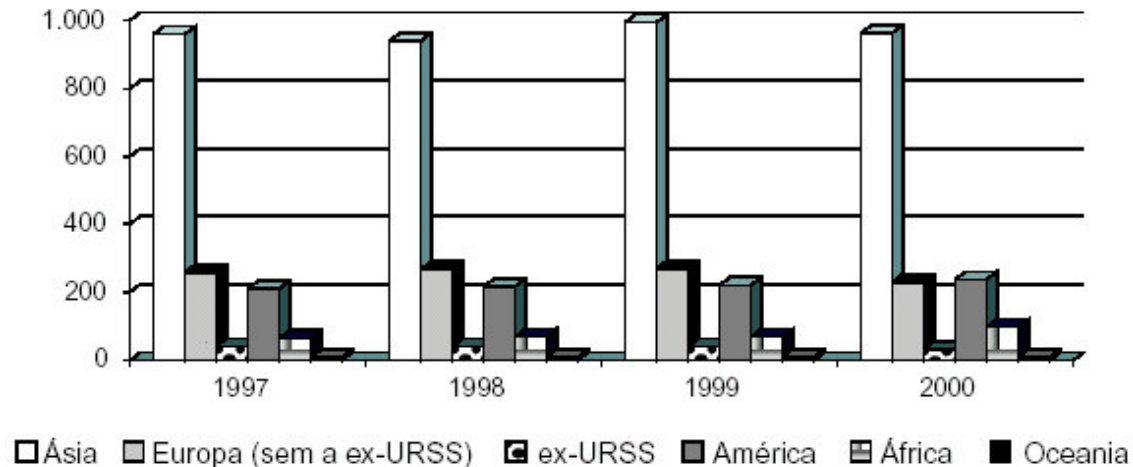
Com relação ao consumo os países da Ásia lideram as estatísticas seguidos por aqueles dos Continentes Europeu, Americano, Africano e Oceania, (Tabela 2.1). Por ser o cimento um produto perecível e susceptível à umidade, devendo ser utilizado no curto prazo, os níveis de produção

---

<sup>1</sup> Gigatonelada (Gt) equivale a 1 000 000 000 t.

<sup>2</sup> Megatonelada (Mt) equivale a 1 000 000 t.

historicamente apresentam valores semelhantes aos de consumo (BNDES, 1995; ANDRADE, CUNHA e SILVA, 2002).



**Figura 2.1** – Produção de cimento *portland* segundo o Continente, no período de 1997 a 2000, em milhões de toneladas

Fonte: BNDES (1995), p.43

Para permitir comparações relacionadas às atividades cimenteiras entre países foram estabelecidos alguns indicadores, dentre os quais destaca-se o consumo aparente de cimento (CAC), dado pela eq.(2.1).

Segundo Herranz (2004) o CAC integra um grupo de indicadores que, por não poder medir diretamente a magnitude que representam, estimam, de maneira indireta, uma aproximação por meio de outras variáveis.

$$\text{CAC} = P + I - E \quad (2.1)$$

na qual as parcelas representam:

P - produção de cimento (e clínquer);

I - importações de cimento (e clínquer); e

E - exportações de cimento (e clínquer).

O consumo aparente de cimento é expresso em milhões de toneladas e é considerado um indicador universal já que existe em todos os países com atividade cimenteira. O uso desse indicador apresenta limitações em razão da falta de uniformidade na sua obtenção visto que alguns países incluem o clínquer na produção total de cimento.

No entanto, Herranz (2004) e Andrade, Cunha e Silva (2002) observam que existe alta correlação entre a evolução do CAC e a evolução da economia nacional num determinado intervalo de tempo considerado, sendo utilizado em projeções de consumo visando o estabelecimento de planos de investimentos e de expansão da atividade cimenteira.

**Tabela 2.1** – Comportamento do consumo de cimento por países, no período de 1997 a 2000, em milhões de toneladas

PAÍSES	ANO			
	1997	1998	1999	2000 <sup>1</sup>
China <sup>2</sup>	493,0	511,0	557,0	560,0
Estados Unidos	90,9	102,5	108,1	115,5
Índia	73,5	83,5	95,9	105,5
Japão	78,6	71,6	70,8	70,0
Coréia do Sul	61,5	44,6	44,7	48,0
<b>Brasil</b>	<b>38,4</b>	<b>40,1</b>	<b>40,2</b>	<b>39,4</b>
Itália	33,7	34,7	36,1	38,0
Espanha	26,7	31,0	34,6	37,8
Alemanha	34,2	37,3	38,3	35,5
Rússia	25,9	26,0	28,4	32,2
<b>Subtotal</b>	<b>956,4</b>	<b>982,3</b>	<b>1.054,1</b>	<b>1.081,9</b>
Outros Países	568,6	512,7	515,9	538,1
<b>Total Mundial</b>	<b>1.525,0</b>	<b>1.495,0</b>	<b>1.570,0</b>	<b>1.620,0</b>

Obs.:1. Estimativa BNDES;

2. na China são considerados todos os tipos de cimento produzidos, sendo que alguns deles não correspondem à normatização internacional

Fonte: BNDES (1995), p.44, adaptada pelo autor

### 2.3 - Panorama nacional

### 2.3.1 - Reservas de calcário

Conforme referido no Balanço Mineral Brasileiro 2001, ano base 2000, editado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (2001a), o Brasil dispõe de grandes reservas minerais, sendo expressivas as quantidades disponíveis da maioria das substâncias. A partir da tabulação de dados disponíveis no Anuário Mineral Brasileiro de 2001, ano base 2000, DNPM (2001), verificou-se que as reservas nacionais de calcário totalizavam 90,50 bilhões de toneladas (50,23% de reservas medidas<sup>3</sup>) distribuídas entre os Estados do Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio Grande do Norte, São Paulo, Ceará, Paraná, Mato Grosso, Goiás, Bahia e demais estados, à exceção do Acre, Amapá e Roraima onde não há registro oficial da ocorrência desse mineral.

### 2.3.2 - Indústria brasileira de clínquer e cimento

#### 2.3.2.1 - Breve histórico

A história da indústria cimenteira, a exemplo de muitas outras, é reflexo ou está intimamente associada às fases do desenvolvimento econômico do país, dentre outros fatores, como por exemplo o tecnológico. Conforme SNIC (2004a) o desenvolvimento do Brasil no final do século XIX já exigia a implantação de uma indústria nacional de cimento. Ao final da Primeira Guerra Mundial (1918) eram importadas 40 mil toneladas anuais do produto.

As iniciativas pioneiras visando a produção de cimento *portland* no Brasil datam de 1888 quando o Eng<sup>o</sup> Louis Felipe Alves da Nóbrega, nos arredores da capital do Estado da Paraíba e o Comendador Antônio Proost Rodovalho, idealizando o aproveitamento de reservas minerais nas vizinhanças de Sorocaba, SP, iniciaram os trabalhos de prospecção de calcário.

---

<sup>3</sup> Reserva medida é aquela obtida pela cubicagem, mediante pesquisa mineral, através de sondagens, caracterização físico-química do bem material e avaliações estatísticas e econômicas.

O Eng<sup>o</sup> Louis da Nóbrega foi o primeiro a produzir o cimento, porém, durante apenas 3 meses em 1892. O Comendador Rodovalho, por sua vez, acabou instalando uma fábrica em Santo Antônio, Estado de São Paulo, a qual, após várias partidas e interrupções encerrou definitivamente as atividades por volta de 1918. Em 1912 uma terceira iniciativa para implantação de uma fábrica de cimento ocorreu no Espírito Santo através do governo estadual, porém, sem sucesso e mesmo após ter sido arrendada e remodelada nunca conseguiu operar regularmente tendo as atividades definitivamente encerradas em 1958.

A Companhia Brasileira de Cimento Portland, instalada no município de Perus, SP em 1924 e que em 1926 colocou as primeiras toneladas do cimento nacional no mercado foi a única que conseguiu manter a produção, sendo considerada o verdadeiro marco da atividade cimenteira no país. Nessa época a importação do produto atingia a quantia nada desprezível de 400 mil toneladas anuais. A produção evoluiu de 13 000 t em 1926 para 96 000 t em 1929 conquistando o mercado que, de início, desconfiava da qualidade do produto nacional (SNIC, 2004a; BATTAGIN, 2004; ROBERTO, 2004).

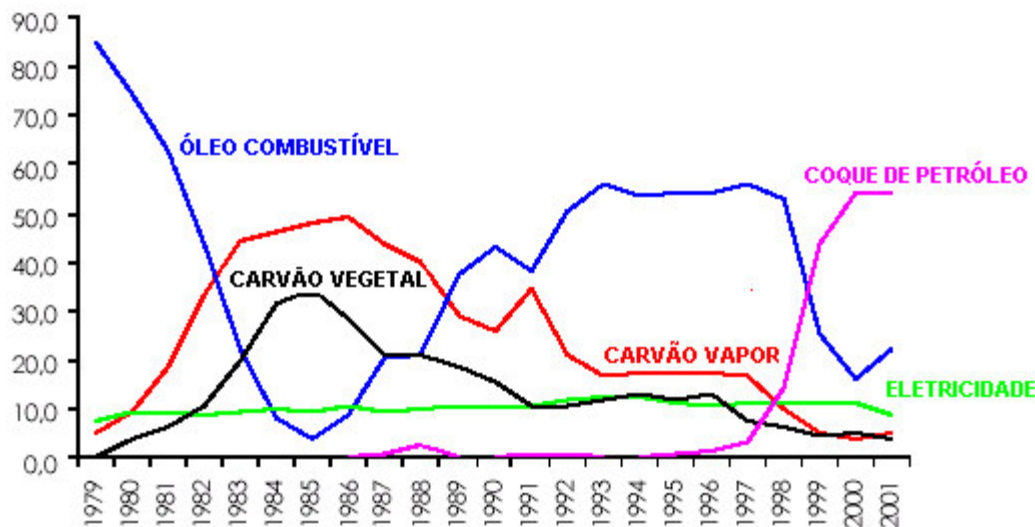
O surgimento da maioria dos grupos produtores brasileiros ocorreu no período entre 1930 e 1960 e o grande desenvolvimento da indústria nacional foi registrado entre 1970 e 1980, com a elevação da produção de 9,0 milhões de toneladas para 27,2 milhões de toneladas anuais (BNDES, 1995).

### **2.3.2.2 - Situação atual**

O Brasil dispõe de um parque industrial de última geração e com alto grau de desenvolvimento, comparável aos principais produtores mundiais. Chaves (2002) relata que, a partir das crises energéticas, as antigas fábricas de clínquer de via úmida foram transformadas em processos produtivos de via seca mediante a reforma e modernização das instalações.

Tais ações resultaram, sobretudo, na melhoria da eficiência energética das unidades de manufatura, culminando com a evolução da produção nacional que conduziu o Brasil da posição de 12<sup>o</sup> produtor mundial em 1970, com 9,0 milhões de toneladas, para o 6<sup>o</sup> lugar em 2000, com 39,2 Mt produzidas (DNPM, 2001a; ANDRADE, CUNHA e SILVA, 2002).

Na Figura 2.2 é mostrada a evolução da participação das principais fontes de energia utilizadas em processos de produção do clínquer para cimento *portland* em relação ao consumo total do setor. Da mesma maneira a Figura 2.3 também ilustra a estrutura do consumo relativo de energia pelo setor cimenteiro nacional. Ficam evidenciadas nessas representações a queda do consumo de óleo combustível na década de 80 e o gradativo crescimento do uso de coque de petróleo a partir de meados da década de 90 motivado pela constante necessidade de redução dos custos de produção.



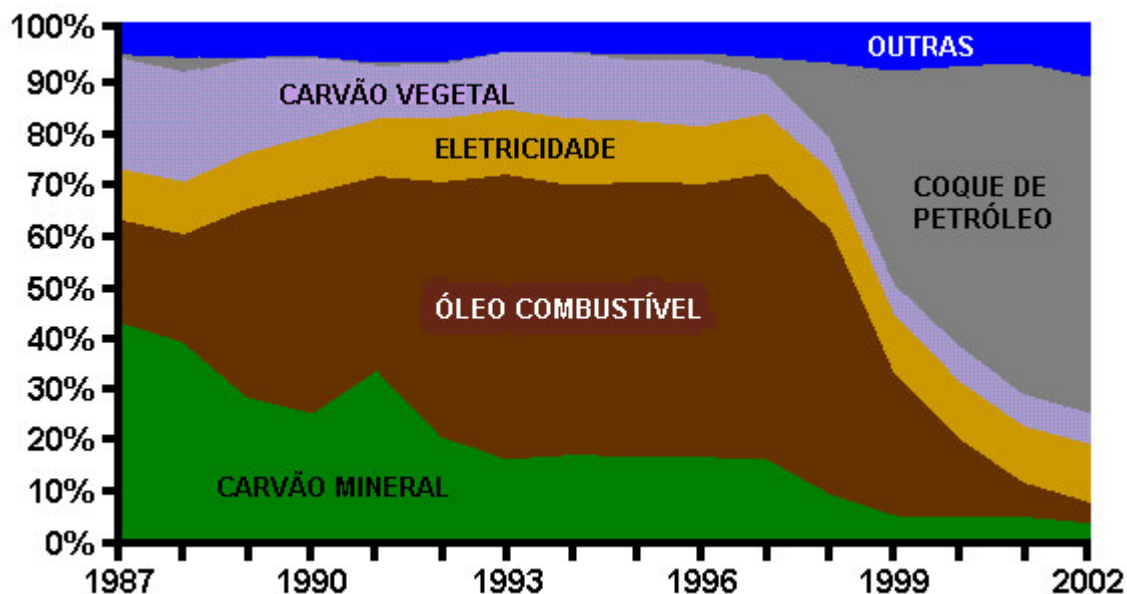
**Figura 2.2** – Evolução do consumo relativo das principais fontes de energia utilizadas pelo setor cimenteiro nacional no período de 1979 a 2001  
 Fonte: Brasil. Ministério de Minas e Energia (2002), p.41, adaptada pelo autor

O parque cimenteiro nacional em 2000 era composto por 56 unidades, sendo 45 integradas, ou seja, produtoras de clínquer e cimento e 11 moagens de cimento pertencentes a 10 grupos corporativos (ABCP, 2004a). Até o mês de abril de 2004 o setor permanecia composto pelos mesmos 10 grupos cimenteiros, porém com 47 unidades integradas com um total de 118 fornos rotativos e 12 unidades de moagem (MARINGOLO, 2004).

Em 2003 a produção nacional foi procedente de 22 Estados, tendo Minas Gerais como o maior produtor individual (23,4% do total), seguido por



São Paulo e Paraná, e juntas essas três unidades federativas responderam por 50,8% da produção brasileira (SNIC, 2004).



**Figura 2.3** – Estrutura do consumo energético no setor cimenteiro nacional no período de 1987 a 2002

Fonte: Brasil. Ministério de Minas e Energia (2003), p.67, adaptada pelo autor

O Brasil fabrica, segundo terminologia e especificações definidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 09 tipos diferentes de cimentos para uso comum ou específico. Os 05 principais para uso comum são: cimento *portland* comum (NBR 5732), cimento *portland* composto (NBR 11578), cimento *portland* de alto forno (NBR 5735), cimento *portland* pozolânico (NBR 5736) e cimento *portland* de alta resistência inicial (NBR 5733). Os cimentos destinados a usos específicos resumem-se àqueles resistentes a sulfatos (NBR 5737), de baixo calor de hidratação (NBR 13116), branco (NBR 12989) e para poços petrolíferos (NBR 9831) (ABCP, 2002).

O consumo aparente de cimento no Brasil passou de 25.046.375 toneladas em 1994 para 39.179.754 toneladas em 2000, enquanto o consumo

*per capita*<sup>4</sup> subiu de 184 kg/hab/ano em 1995 para 267 kg/hab/ano em 2000. O índice nacional, no entanto, se manteve bastante abaixo do verificado nos Estados Unidos e em países europeus, que variava de 359 a 681 kg/hab/ano, evidenciando a correlação existente entre as condições sócio-econômicas da população e o aumento de consumo do produto (ROBERTO, 2004; ANDRADE, CUNHA e SILVA, 2002).

As oportunidades de crescimento do consumo são bastante visíveis frente à realidade brasileira, conforme avaliado por Andrade, Cunha e Silva (2002), devido ao elevado déficit habitacional, déficit na oferta de serviços de saneamento básico e precariedade da rede rodoviária nacional.

Roberto (2004) cita a previsão de produção para 2010 de 54,28 Mt de cimento, a qual, com as reservas de calcário medidas em 2000 (45,46 Gt) seriam suficientes para abastecer o mercado nacional por mais de um milênio.

### **2.3.2.3 - Panorama estadual**

#### **2.3.2.3.1 - Reservas de calcário**

A partir da tabulação de dados disponíveis no Anuário Mineral Brasileiro 2001 editado pelo Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) (2001), concluiu-se que o Estado de São Paulo dispunha no ano 2000 de reservas de calcário de cerca de 5,29 bilhões de toneladas, representando cerca de 5,85% das reservas nacionais.

Em pesquisa às informações apresentadas em DNPM (2001b) e Chaves (2002) foram obtidos os registros referentes aos empreendimentos autorizados a explorar calcário no Estado de São Paulo e com produção informada no ano 2000. O resultado indicou o desenvolvimento da atividade em vinte e três (23) municípios paulistas com oito (08) deles associados a empreendimentos dedicados à fabricação de clínquer e cimento e em dezoito (18) à produção de cal, brita para construção civil e corretivos agrícolas.

---

<sup>4</sup> Consumo *per capita* é dado pela relação entre o consumo aparente de cimento num determinado ano e o número de habitantes do país considerado.

Os municípios identificados com produção destinada à indústria cimenteira foram: Apiaí, Itaóca, Itapeva e Ribeirão Grande, pertencentes à Região de Governo de Itapeva e Salto de Pirapora, Votorantim, Araçariguama e Iperó, da Região de Governo de Sorocaba.

Observe-se que a jazida de calcário do município de Iperó está esaurida e que a licença ambiental pleiteada pela empresa junto ao Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA) para a ampliação da atividade minerária foi indeferida em 2001 devido à sua localização dentro da área da Floresta Nacional de Ipanema, em Unidade de Conservação Federal. Outras situações dessa natureza poderão ocorrer no Estado em face das restrições previstas na legislação ambiental, tanto em âmbito federal quanto estadual. Elas afetarão diretamente a indústria cimenteira paulista, pois, conforme ressaltado por Chaves (2002), grande parte dessas reservas minerais está localizada em áreas de preservação ambiental, citando-se como exemplo o PETAR – Parque Espeleológico e Turístico do Alto Ribeira.

#### **2.3.2.3.2 - Evolução da indústria paulista**

Em razão das reservas de calcário com qualidade adequada à produção de clínquer se localizarem nas regiões sudeste e sul do Estado, a implantação dessas unidades produtivas ocorreu, principalmente, em municípios integrantes das Regiões Administrativas de Sorocaba e Registro.

A Região Administrativa de Sorocaba, composta pelas Regiões de Governo de Sorocaba, Itapetininga, Itapeva, Avaré e Botucatu, congrega um parque industrial diversificado, bem como intensa atividade minerária. Destaca-se a atividade extrativa de calcário nas Regiões de Governo de Sorocaba e Itapeva destinadas à produção de clínquer para cimento.

Essas regiões concentram a maioria das fábricas de cimento do Estado contabilizando, respectivamente, duas (02) unidades com 04 fornos rotativos e três (03) unidades com outros 04 fornos totalizando a capacidade produtiva instalada atual de aproximadamente 16,96 mil toneladas diárias de clínquer. Observe-se que até o ano de 1983 uma terceira fábrica de clínquer e cimento estava em operação na região de Sorocaba com um forno de via úmida.

Além dessas, uma outra fábrica localizada na Região de Governo de Registro, também produtora de clínquer e cimento tem capacidade instalada para produção diária de 2.900 t clínquer por processo de via seca.

Portanto, a capacidade produtiva total de clínquer instalada no Estado atinge a significativa marca de 19,86 mil toneladas diárias traduzindo-se num consumo potencial médio de 773 mil toneladas anuais de coque de petróleo ou 2.342 t diárias. Atualmente esse combustível é utilizado pela maioria dos grupos cimenteiros em razão de seu menor custo quando comparado aos demais combustíveis fósseis convencionais.

Interessante observar que no início da década de 80 a capacidade total instalada no Estado para produção de clínquer atingia 19,79 mil toneladas diárias, com consumo potencial médio anual de 552 mil toneladas ou 1.673 t diárias de óleos combustíveis pesados. Desde 1983 três dessas empresas desativaram 04 fornos rotativos (03 de via úmida e 01 de via seca), porém, devido à ampliação da capacidade de fornos de outros empreendimentos foi mantida praticamente inalterada a capacidade produtiva total instalada.

Outras unidades dedicadas apenas à moagem de clínquer e demais insumos necessários à obtenção do cimento e localizadas fora das plantas de manufatura referidas não foram citadas por não representarem objeto de discussão sob a ótica abordada neste estudo.

Destaca-se também o significativo consumo de energia elétrica das unidades integradas e de moagem, tanto para acionamento dos motores dos fornos de clínquer como também dos moinhos verticais ou rotativos de bolas, normalmente utilizados para a produção do cru ou *farinha* e do cimento propriamente dito.

Com exceção da Fábrica de Cimento Votoran – Unidade de Santa Helena, da Fábrica de Cimento Maringá, da Companhia de Cimento Ipanema e da extinta Companhia Brasileira de Cimento Portland, conhecida como Companhia de Cimento Perus, as demais unidades integradas do Estado foram implantadas durante a década de 70.

A unidade da Votoran, atual Cimento Rio Branco S/A – Fábrica de Santa Helena, localizada no município de Votorantim, Região de Governo de Sorocaba, foi implantada em 1936 contando com dois fornos de via úmida com capacidade para produção de 250 t clínquer/dia. Posteriormente foi ampliada

com a instalação de outros 03 fornos com capacidades de 350 t clínquer/dia e 01 forno de 600 t clínquer/dia, todos de via úmida.

Em 1968 foi instalado o atual forno nº 1, de via seca, com pré-aquecedor tipo torre de ciclones com capacidade para a produção de 1.600 t clínquer/dia dispondo de resfriador de clínquer de grelhas. Posteriormente passou por reformas e melhorias para ampliação da capacidade instalada atingindo 2.100 t/dia e atualmente 2.400 t clínquer/dia. Para o controle das emissões de material particulado do forno e resfriador foram instalados precipitadores eletrostáticos.

Em 1978 foi implantado o forno nº 2, de via seca, com pré-aquecedor tipo torre de ciclones com capacidade para 3.600 t clínquer/dia e resfriador de clínquer tipo planetário. O controle das emissões de material particulado do forno e resfriador de clínquer é realizado por precipitadores eletrostáticos.

Em 1980 o forno nº 6, de via úmida, atual forno nº 3, foi reformado e transformado em processo de via seca, com pré-aquecedor e pré-calcinador, com capacidade para 1.200 t clínquer/dia equipado com resfriador de clínquer tipo grelhas e dispondo de precipitadores eletrostáticos para controle das emissões de material particulado, tanto do forno como do resfriador. Nos últimos anos a produção de clínquer tem se concentrado no forno nº 2, de forma intermitente, mantendo-se os fornos nºs 1 e 3 fora de operação (MARTINS, 2004).

Em 1951 foi instalado, em Sorocaba, pela INCISA – Indústria de Cimento S/A do grupo suíço Holderbank, um forno de via úmida de 2,8 m de diâmetro por 60 m de comprimento com capacidade nominal para a produção de 200 t diárias de clínquer dispondo de resfriador de clínquer tipo planetário.

Posteriormente essas instalações foram adquiridas pelo Grupo Matarazzo, que reformou o forno devido a problemas mecânicos constatados após sua instalação e em abril de 1953 reiniciou a produção industrial sob a razão social de Companhia de Cimento Ipanema (informação verbal)<sup>5</sup>. Para controle das emissões de material particulado foi instalada uma câmara gravitacional construída em alvenaria dispondo de chaminé do mesmo material para lançamento das emissões na atmosfera.

---

<sup>5</sup> Informação pessoal de Jaime Saydel – Gerente da unidade industrial, em 22/10/2004.

Conforme documentação existente na Agência Ambiental da COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB) (1982, 1982a) de Sorocaba esse forno teve suas atividades paralisadas em 1983 devido ao elevado consumo térmico associado ao alto custo dos combustíveis derivados de petróleo. A partir dessa época passou a produzir cimento com clínquer recebido da unidade industrial localizada no município mineiro de Pedro Leopoldo do mesmo grupo corporativo, bem como mediante a compra de clínquer de outras unidades cimenteiras existentes no Estado de São Paulo.

O empreendimento sofreu várias alterações de razão social ao longo de sua história, passando por Cimento Nacional de Minas S/A – CIMINAS, Holdercim Brasil S/A e posteriormente sob controle da Holcim Brasil S/A encerrou as atividades de moagem de cimento em fevereiro de 2003 devido à exaustão da jazida de calcário Felicissimo Sul associada a questões mercadológicas.

A Companhia de Cimento Portland Maringá, localizada no município de Itapeva, instalou o forno nº 1, com capacidade para 280 t de clínquer/dia em 1954; o forno nº 2 também de 280 t clínquer/dia em 1962 e o forno nº 3 de 250 t clínquer/dia em 1978, todos de via úmida. Em junho de 1998 a unidade industrial foi adquirida pela Lafarge Brasil e atualmente encontra-se em operação somente o forno nº 1, de 2,98 m de diâmetro por 98 m de comprimento consumindo um *mix* de combustíveis composto por coque de petróleo, carvão de biomassa, carvão mineral e pó de serra. O controle de material particulado gerado nas operações do forno e do resfriador de clínquer tipo grelhas é realizado através de filtros de mangas. O fornos nº 2 e 3 foram desativados em 1998 e 2002, respectivamente (MINNICELLI, 2004).

Em 1972 foi instalada a fábrica de Cimento Serrana no município de Cajati, região de Registro, cujos ativos foram adquiridos em 1997 pela CIMPOR. Trata-se de um forno de via seca de 4,2 m de diâmetro e 55 m de comprimento, com pré-aquecedor de ramal duplo (duas torres de pré-aquecimento) com 04 estágios de ciclones e pré-calcinador, bem como resfriador tipo grelhas com capacidade de produção de 2.900 t de clínquer por dia. Os sistemas de controle de poluição atmosférica resumem-se a precipitador eletrostático para controle das emissões de particulados do forno e filtro de mangas para o resfriador de clínquer (VALENTE, 2004).

Em 1974 a Camargo Corrêa Industrial S/A inaugurou sua fábrica no município de Apiaí, Região de Governo de Itapeva, com um forno rotativo de via seca com capacidade para produção de clínquer de 2.100 t/dia, equipado com torre pré-aquecedora de dois ramais de 4 estágios de ciclones e resfriador de clínquer tipo grelhas. Essa linha dispõe de dois precipitadores eletrostáticos para controle das emissões de material particulado do forno e mais um para o resfriador de clínquer. Em 1987 o órgão ambiental expediu a licença autorizando a instalação de um segundo forno com capacidade para 1.500 t diárias de clínquer, dispoendo de torre pré-aquecedora de dois ramais com 4 estágios de ciclones, pré-calcinador e resfriador tipo grelhas. Essa linha foi colocada em operação em 1991 dispoendo de precipitadores eletrostáticos para despoeiramento dos gases exauridos do forno e do resfriador de clínquer.

Em 1976 a empresa Cimento Santa Rita inaugurou sua fábrica no município de Salto de Pirapora, Região de Governo de Sorocaba, com a instalação de um forno de via seca com capacidade para 2.300 t diárias de clínquer a qual, em 1986 passou para o controle acionário da S/A Indústrias Votorantim, com a denominação de Cimento Votoran – Unidade 2, atual Cimento Rio Branco S/A – Fábrica de Salto de Pirapora. Em 1995 essa planta foi reformada com a instalação de mais uma unidade de moagem de *farinha*, troca do pré-aquecedor tipo torre de ciclones, repotenciamento dos motores, instalação de pré-calcinador, ampliação do sistema de controle de poluição atmosférica e demais adequações necessárias, atingindo a capacidade produtiva instalada de 5.000 t diárias de clínquer.

Em 1975 a Itabira Agroindustrial, empresa do Grupo João Santos, iniciou a instalação de dois fornos de via seca, equipados com pré-aquecedor tipo intercambiador e resfriador de clínquer de satélites, num distrito rural do município de Capão Bonito, Região de Governo de Itapeva. Na década de 90 esse distrito foi emancipado originando o município de Ribeirão Grande, localizado na região onde se concentram as maiores reservas de calcário do Estado. Esses fornos, com capacidade diária total de 2.800 t/dia de clínquer, entraram em operação em 1977, dispoendo de precipitadores eletrostáticos para controle das emissões de material particulado. No início da década de 90 mudou o controle acionário do empreendimento passando a denominar-se Companhia de Cimento Ribeirão Grande – CCRG.

Posteriormente o Grupo João Santos iniciou a implantação de uma nova fábrica no município de Ribeirão Grande cujo projeto prevê a instalação de um forno rotativo para produção de clínquer por via seca com capacidade nominal para 4 000 toneladas diárias. O projeto prevê a instalação de resfriador tipo grelhas e sistema de controle de material particulado constituído por precipitadores eletrostáticos.

Encontra-se também sob análise na Unidade da CETESB de Itapetininga solicitação de avaliação da viabilidade ambiental de empreendimento que pretende se instalar na Região de Governo de Itapeva destinado à fabricação de clínquer para cimento *portland* utilizando fornos verticais. Os estudos iniciais prevêem a instalação de duas linhas produtivas com capacidade nominal de 32 000 toneladas anuais de clínquer utilizando coque de petróleo como combustível principal.

O Grupo Votorantim também pretende implantar uma nova fábrica de clínquer e cimento no município de Ribeirão Grande, segundo procedimento de licenciamento ambiental prévio a ser reapresentado ao sistema estadual de meio ambiente. Trata-se de um forno de via seca, com pré-aquecedor de ciclones e pré-calcinador, com capacidade para produção de 5 000 t diárias de clínquer, que disporá de resfriador de grelhas e sistema de controle de particulados constituído por precipitadores eletrostáticos (MARTINS, 2004).

De maneira geral todas unidades industriais referidas dispõem de instalações de moagem de cimento equipadas com moinhos rotativos de bolas, algumas vezes associados a moinhos de rolos, e equipamentos de controle de material particulado constituídos por filtros de mangas.

#### **2.3.2.4 - O co-processamento de resíduos no Estado de São Paulo**

##### **2.3.2.4.1 - Introdução**

Maringolo (2001) relata que as atividades de co-processamento de resíduos industriais iniciaram-se no Brasil na década de 90 no Estado de São Paulo, estendendo-se posteriormente para o Rio de Janeiro, Paraná, Rio Grande do Sul e Minas Gerais. Cabe destacar, no entanto, a informação



prestada por representante da FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE (FEEMA), que em 1983, através de Convênio GTZ entre Brasil – Alemanha, foram iniciadas as ações visando o controle da destinação de resíduos industriais gerados no Estado do Rio de Janeiro. Posteriormente, em 1986, técnicos do órgão ambiental mantiveram contatos com as três empresas cimenteiras instaladas no Estado propondo uma parceria para viabilizar o início dos trabalhos de co-processamento de resíduos em fornos de manufatura de clínquer, porém, sem que houvesse qualquer demonstração de interesse por parte dos responsáveis pelas indústrias.

A FEEMA iniciou então, a partir de 1988, os trabalhos de elaboração das normas de procedimento para regulamentar a atividade de destruição térmica e de co-processamento de resíduos industriais. Em 1993 foi publicada a norma relativa aos níveis de emissão e em 1994 foi iniciado o licenciamento da atividade, que atualmente conta com três fornos e três plataformas de preparação de resíduos licenciadas pelo órgão ambiental (informação pessoal)<sup>6</sup>.

Marciano, Jr. e Kihara (1997) referem que a indústria brasileira de cimento tem usado numerosos sub-produtos industriais como aditivos desde 1952, destacando a escória de alto forno, as cinzas volantes de usinas termelétricas e o gesso.

Kihara (1999, 1999a) cita que apesar das atividades de co-processamento de resíduos industriais terem se iniciado na década de 90 no Brasil, a experiência da indústria nacional no uso de combustíveis alternativos é antiga e pioneira. Relata que na década de 70 já eram utilizadas cascas de arroz em Goiás e Rio Grande do Sul, cascas de coco babaçu na região Nordeste, pneus na Bahia, moinha de carvão vegetal da indústria siderúrgica em Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro e carvão com alto teor de cinzas (>30%) no Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e São Paulo.

Maringolo (2001) comenta que a crise mundial do petróleo entre 1979 e 1985 motivou o desenvolvimento tecnológico da indústria cimenteira nacional atendendo à convocação do governo federal visando a redução do consumo energético. O autor menciona ainda que a permanente necessidade

---

<sup>6</sup> Informações fornecidas por Ana Cristina Henney durante “Seminário de co-processamento – Destinação final de resíduos em fornos de cimento: uma solução inteligente” em São Paulo, em 04 de novembro de 2004.

de redução desses custos, aliada à pressão ambiental decorrente da crescente geração de resíduos industriais tem resultado na ampliação da atividade de co-processamento.

Através de pesquisa realizada em documentos existentes na Unidade Regional de Sorocaba da CETESB (1982, 1982a, 1991, 1992) foram identificados elementos que permitiram traçar um breve relato acerca da evolução dos procedimentos adotados para a regulamentação dessa modalidade tecnológica. Foi verificado que as primeiras iniciativas voltadas ao desenvolvimento da atividade de co-processamento de resíduos industriais para substituição parcial de energia em fornos de produção de clínquer no Estado de São Paulo são do início da década de 90.

#### **2.3.2.4.2 - Iniciativas pioneiras**

No início do ano de 1991 foram formalizadas, junto à CETESB em Sorocaba, as primeiras consultas por parte de uma empresa do ramo ambiental requisitando autorização para realizar testes de queima com resíduos industriais em dois fornos rotativos de indústria cimenteira localizada na região.

Na época nem a Agência Ambiental paulista, nem o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) dispunham de legislação e procedimentos específicos para normatizar a condução das etapas a serem cumpridas por empreendimentos interessados na implementação da atividade.

Entretanto, já naquela época, o grupamento técnico envolvido nessas discussões manifestava-se no sentido de que os procedimentos prevendo a utilização de resíduos em fornos de clínquer como substituto energético parcial deveriam garantir o adequado nível de segurança, tanto em termos da saúde pública, da manutenção da qualidade ambiental, quanto da qualidade do produto final a ser disponibilizado para os consumidores.

Depreende-se dos documentos estudados que desde as tratativas iniciais o órgão ambiental visualizou, a partir das consultas formuladas, a possibilidade de implementar solução alternativa para o equacionamento de parte dos passivos ambientais decorrentes da geração cada vez maior de resíduos industriais.

A utilização dos fornos de clínquer fundamenta-se no aproveitamento das características inerentes à tecnologia de produção do clínquer industrial, em face principalmente do perfil de temperaturas disponíveis no forno e pré-aquecedor, do tempo de permanência dos gases no sistema-forno, do grau de turbulência devido às características fluidodinâmicas associados àquelas de natureza química das matérias-primas empregadas.

Do ponto de vista teórico era evidente que o processo produtivo oferecia as condições mínimas necessárias para justificar a realização dos testes considerados necessários para subsidiar a obtenção de parâmetros operacionais que permitiriam a identificação das adaptações e ajustes necessários à operacionalização dos procedimentos de queima, passando obrigatoriamente pelo controle do processo de combustão e das emissões atmosféricas.

Na época o órgão ambiental dispunha apenas de normas técnicas editadas pela ABNT relativas à caracterização de resíduos e aos padrões de desempenho em processo convencional de incineração (ABNT, 1987, 1987a, 1987b, 1987c e 1990).

Dentre os posicionamentos registrados nos documentos analisados identificou-se uma proposta de critério geral para autorizar a realização dos testes de queima que pode ser entendido como avançado para a época. Essa proposta previa a autorização dos testes com resíduos não perigosos, bem como daqueles cuja característica que conferisse periculosidade fosse em razão de sua inflamabilidade. Tal posicionamento, técnico, pode ser interpretado como uma demonstração da disposição do órgão ambiental, com longa e tradicional história na defesa intransigente da qualidade do meio ambiente, de investir na viabilização das avaliações de campo da alternativa tecnológica que poderia se traduzir num importante instrumento de gestão de resíduos e materiais inservíveis.

Nessa época a atividade cimenteira, a exemplo de outros segmentos industriais, já estava sujeita ao cumprimento de exigências técnicas estabelecidas pela CETESB, quando da concessão de autorizações para instalação de equipamentos produtivos, visando o controle da poluição do ar, das águas e do solo. Dentre essas cabe destacar o potencial inerente à geração de emissões atmosféricas de material particulado, parâmetro de grande relevância em razão das características próprias do processo de

manufatura de clínquer e cimento. A limitação dessas emissões, por carecer de normatização específica e procedimentos padronizados de licenciamento ambiental, por vezes resultou na adoção de valores limites de emissão diferenciados para os empreendimentos instalados no Estado.

Essa problemática pode ser atribuída, em parte, ao fato de que algumas dessas unidades industriais, em razão da implantação em data anterior à vigência da legislação ambiental (SÃO PAULO (Estado), 1976, 1976a), estavam desobrigadas de obter a licença da CETESB para sua instalação, associada à inexistência de padrões de emissão normalizados.

Tal situação foi equacionada em meados da década de 90 quando a Agência Ambiental estabeleceu os limites de emissão para o parâmetro material particulado contemplando os empreendimentos existentes, bem como os novos que viessem a se implantar no Estado. Na época foi também fixado o prazo de 180 (cento e oitenta) dias para a implementação das medidas necessárias ao enquadramento das emissões das fontes industriais que se apresentassem em desconformidade com os limites fixados.

Para a condução das etapas de avaliação técnica, bem como administrativas visando a autorização para a realização dos testes com resíduos em fornos de clínquer foram estabelecidos, no final de 1991, os procedimentos básicos que norteariam a evolução do processo regulatório da atividade de co-processamento.

Em 16 de dezembro de 1991 a CETESB notificou os empreendimentos interessados na realização dos testes que a queima de resíduos industriais em fornos de clínquer deveriam atender aos seguintes procedimentos:

- *os fornos de cimento deverão estar providos de equipamentos de controle de poluição (ECP), cuja eficiência, avaliada através de amostragem em chaminé, deverá atender aos padrões de emissão estabelecidos;*
- *uma vez verificada a eficiência do ECP, os resíduos industriais a serem queimados, depois de perfeitamente caracterizados, serão introduzidos nos fornos em quantidades pré-determinadas, quando novas amostragens de chaminé deverão ser realizadas para avaliar eventuais alterações nos padrões de emissão de poluentes;*
- *uma vez constatada a não alteração dos padrões de emissão, a CETESB poderá autorizar a queima de resíduos industriais em fornos de cimento nas proporções pré-estabelecidas (CETESB, 1991, p.70).*

A data referida pode ser considerada como marco histórico para a implementação da atividade de co-processamento de resíduos em fornos de clínquer no Estado de São Paulo. A sistemática estabelecida previa a realização das etapas de testes que alguns anos depois caracterizariam os Testes em Branco (TB) e de Queima (TQ), instituídos através das normas regulamentadoras da atividade (SÃO PAULO, 1997; CETESB, 2003a; BRASIL, 1999), mediante prévia aprovação pelo órgão ambiental dos Planos de Teste em Branco (PTB) e de Queima (PTQ). Estavam dessa forma definidos os procedimentos básicos de licenciamento ambiental para a implementação da atividade que, posteriormente, seriam adotados em âmbito nacional.

Estabelecidas as condições mínimas necessárias para a operacionalização das etapas de análise dos resíduos de interesse das empresas e para realização das avaliações atmosféricas exigíveis, foram analisadas as solicitações de testes anteriormente apresentadas. A maioria dessas solicitações não chegou a ser autorizada em razão do não cumprimento dos requisitos estabelecidos. Várias campanhas de amostragens em chaminés (TB) foram realizadas com e sem o acompanhamento da CETESB para fins de verificação dos níveis de emissões atmosféricas dos processos produtivos, de forma a comprovar a conformidade da planta industrial com os limites de emissão estabelecidos.

Após a comprovação do atendimento ao padrão de emissão fixado para material particulado um dos fornos, dispondo de pré-aquecedor tipo torre de ciclones e resfriador de clínquer de satélites, foi autorizado a realizar os testes com a alimentação de resíduos, os quais foram acompanhados pelos técnicos da Agência Ambiental. À exceção de um único resíduo que foi alimentado através do maçarico principal do forno, todos os demais foram realizados com alimentação através da extremidade fria, na entrada do tubo do forno (caixa de fumaça) em razão das características físicas dos materiais testados.

Através de relatórios e demais documentos consultados pode-se constatar que muitas dificuldades ocorreram durante a realização desses testes. As principais referiram-se à não funcionalidade das instalações de alimentação dos resíduos assim como às perturbações provocadas no

desempenho do processo produtivo resultando na formação de colagens<sup>7</sup> que determinaram a paralisação da alimentação dos resíduos ou mesmo do funcionamento do forno rotativo.

As emissões de material particulado devidas à baixa eficiência dos equipamentos de controle de poluição (ECP) foram incrementadas pelas interrupções do funcionamento dos precipitadores eletrostáticos causadas pela ocorrência de picos de emissão de monóxido de carbono. A falta de familiaridade dos técnicos envolvidos com as situações adversas provocadas pela alimentação dos resíduos também concorreram para determinar o insucesso dessa primeira iniciativa de co-processamento de resíduos em fornos de clínquer no Estado de São Paulo.

Kihara (1999a) também se manifesta nesse sentido referindo que a falta de experiência do setor e a limitação dos equipamentos de controle ambiental nas indústrias de cimento, somadas ao amadorismo no trato das questões ambientais são fatores que atuaram fortemente na resistência dos órgãos ambientais à implantação do co-processamento no Brasil.

Essa primeira etapa do co-processamento de resíduos no Estado de São Paulo encerrou-se, portanto, com a reprovação, pelo órgão ambiental, dos testes realizados e com o indeferimento das demais solicitações pleiteadas. Pode-se destacar que uma das principais razões para esses posicionamentos deveu-se ao baixo desempenho do ECP existente que não apresentou condições mínimas para atendimento ao padrão de emissão atmosférica de material particulado, único parâmetro exigível à época como pré-requisito para a realização dos testes.

Em 1994 outra empresa cimenteira da região de Sorocaba também pleiteou, junto à CETESB, autorização para a realização de testes de queima com areia de fundição em forno de produção de clínquer. Após estabelecimento, pelo órgão ambiental, dos pré-requisitos para a realização de pré-testes de queima, o empreendimento declinou de sua implementação.

---

<sup>7</sup> Colagem é a denominação dada à camada de clínquer aderida aos tijolos refratários considerada parte do revestimento que serve para proteção da parte metálica do forno rotativo.

### 2.3.2.4.3 - Situação atual

Em 1995 a Companhia de Cimento Ribeirão Grande (CCRG), localizada na Região de Governo de Itapeva, formalizou junto à CETESB de Sorocaba a solicitação da licença ambiental para a implantação de projeto de co-processamento prevendo a utilização de uma mistura homogeneizada de resíduos sólidos e líquidos alimentada no maçarico principal de um forno rotativo de produção de clínquer.

A mistura (*blend*) seria preparada por uma empresa destinada ao recebimento, qualificação e dosagem dos resíduos de forma a fornecer um substituto energético para o combustível fóssil em uso (óleo pesado) com características qualitativas o mais homogêneas possíveis, de forma a minimizar a ocorrência de perturbações do processo de combustão e, conseqüentemente, maximizar o desempenho do sistema-forno.

Nesse mesmo ano a CETESB (2003), baseada no princípio constitucional de que a qualidade do meio ambiente é responsabilidade de todos e entendendo que a interação entre órgãos governamentais e a sociedade civil apresentava caráter estratégico no caminho do desenvolvimento sustentável do Estado, criou, em 12 de setembro, dentro de sua estrutura, um fórum, constituído por Câmaras Ambientais da Atividade Produtiva, para propiciar uma nova forma de relacionamento com o setor industrial. As Câmaras Ambientais têm a missão de atuar como órgãos colegiados de caráter consultivo para assessorar a Secretaria de Meio Ambiente (SMA) e a CETESB no trato de questões relacionadas ao controle ambiental de fontes industriais.

A Câmara Ambiental da Indústria de Produtos de Minerais Não Metálicos foi instalada em 30 de setembro de 1996 e vinculada a ela foi criada a Comissão de Co-processamento composta por representantes da Agência Ambiental e do setor produtivo integrado por técnicos das empresas cimenteiras com unidades implantadas no território paulista e da ABCP. O objetivo da comissão era elaborar um procedimento destinado à uniformizar as ações relacionadas ao licenciamento ambiental da atividade de co-processamento de resíduos industriais em fornos de produção de clínquer.

Nessa época os técnicos da CETESB envolvidos nos procedimentos de licenciamento ambiental iniciados em 1991 e 1995 já haviam acumulado experiências que somadas àquelas vivenciadas pelas demais partes envolvidas no processo de discussão subsidiaram o trabalho da comissão. O produto final, na forma de minuta de procedimento, foi submetido à Diretoria da CETESB para homologação, sendo oficializado como norma a partir da publicação no Diário Oficial do Estado de São Paulo em 25 de novembro de 1997.

Em 1998 a Companhia de Cimentos do Brasil (CCB), localizada no município de Cajati também deu início ao processo de licenciamento para co-processar resíduos de resina fenólica e pneus inservíveis em forno rotativo dispondo de pré-aquecedor e pré-calcinador, mediante a preparação dos resíduos na própria planta industrial.

Após cumprir os pré-requisitos estabelecidos pela norma estadual, a CCRG em 1998 e a CCB em 2002 iniciaram, respectivamente, a utilização de uma mistura de resíduos industriais e de pneus inservíveis em substituição parcial aos combustíveis convencionais empregados no processo de manufatura de clínquer.

No ano de 1999 o CONAMA, (BRASIL, 1999), publicou a Resolução nº 264 através da qual foram uniformizados os critérios básicos para a utilização de resíduos em atividades de co-processamento em fornos de produção de clínquer, motivando a revisão do procedimento estadual para adequação aos termos da norma federal.

Esse trabalho foi também realizado pela Comissão de co-processamento no período de 2000 a 2003 cujo produto foi aprovado pela CETESB na forma da norma P4.263 em dezembro de 2003 (CETESB, 2003a).

Outros empreendimentos cimenteiros iniciaram procedimentos de licenciamento ambiental junto ao sistema estadual de meio ambiente, porém, até o momento não resultaram na expedição de autorização pelo órgão ambiental para a queima de resíduos nos fornos de clínquer.



## REFERÊNCIAS

ANDRADE, M.L.A.; CUNHA, L.M.S.; SILVA, M.C. (2002). *Desenvolvimento e perspectiva da indústria de cimento*. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.15, p.35-62, mar. Disponível em:<<http://www.bndes.gov.br/conhecimento/bnset/set1502.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2002). *Guia básico de utilização do cimento portland - BT-106*. Disponível em:<[http://www.abcp.org.br/downloads/arquivos\\_pdf/BT106\\_2003.pdf](http://www.abcp.org.br/downloads/arquivos_pdf/BT106_2003.pdf)>. Acesso em: 18 out. 2004.

\_\_\_\_\_. (2004). *História do cimento*. Disponível em:<<http://www.abcp.org.br/>>. Acesso em: 10 abr.

\_\_\_\_\_. (2004a). *Quadro social*. Disponível em:<[http://www.abcp.org.br/cont\\_asso.htm](http://www.abcp.org.br/cont_asso.htm)>. Acesso em: 28 mar.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR 10004: Resíduos sólidos - classificação*. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1987a). *NBR 10005: Lixiviação de resíduos - procedimento*. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1987b). *NBR 10006: Solubilização de resíduos - procedimento*. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1987c). *NBR 10007: Amostragem de resíduos - procedimento*. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1990). *NBR 11175: Incineração de resíduos sólidos perigosos – padrões de desempenho - procedimento*. Rio de Janeiro.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (1995). *Cimento*. Disponível em:<<http://www.bndes.gov.br/conhecimento/relato/cim.pdf>>. Acesso em: 9 abr. 2004.

BATTAGIN, A.F. (2004). *Uma breve história do cimento Portland*. Disponível em:<[http://www.abcp.org.br/basico\\_sobre\\_cimento/historia.shtml](http://www.abcp.org.br/basico_sobre_cimento/historia.shtml)>. Acesso em: 9 abr.

BRASIL (1999). Resolução CONAMA n.264, de 26 de agosto de 1999. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 20 mar. 2000. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. (2002). *Balanço energético nacional BEN 2002 (ano base 2001)*. Brasília, DF. Disponível em:<[http://www.brasil-rounds.gov.br/geral/balanco\\_energetico/ben\\_p02.pdf](http://www.brasil-rounds.gov.br/geral/balanco_energetico/ben_p02.pdf)>. Acesso em: 9 abr. 2004.

\_\_\_\_\_. (2003). *Balanço energético nacional 2003 (ano base 2002)*. Brasília, DF. 168p. Disponível em:<[http://www.brasil-rounds.gov.br/geral/balanco\\_energetico/ben\\_p03.pdf](http://www.brasil-rounds.gov.br/geral/balanco_energetico/ben_p03.pdf)>. Acesso em: 14 out. 2004.

CHAVES, A. P. (2002). *Estado da arte em tecnologia mineral no Brasil*. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Disponível em:<[http://www.mct.gov.br/Fontes/Fundos/Documentos/CTMineral/ct-mineral06estado\\_da\\_arte.pdf](http://www.mct.gov.br/Fontes/Fundos/Documentos/CTMineral/ct-mineral06estado_da_arte.pdf)>. Acesso em: 10 abr. 2004.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1982). *Companhia de Cimento Ipanema - Sorocaba - licenciamento ambiental*. Sorocaba. Processo n.04/287/82

\_\_\_\_\_. (1982a). *Companhia de Cimento Ipanema - Sorocaba - contravenção ambiental*. Sorocaba. Processo n.04/5060-82.

\_\_\_\_\_. (1991). S.A. *Indústrias Votorantim (Fábrica de Santa Helena) - Votorantim - amostragem em chaminé forno 2 e 1*. Sorocaba. Processo n.06/00351-91, 3v.

\_\_\_\_\_. (1992). S.A. *Indústrias Votorantim (Fábrica de Santa Helena) - Votorantim - incineração de resíduos*. Sorocaba. PA-1042-01.

\_\_\_\_\_. (2003). *Câmaras ambientais*. Disponível em:<[http://www.cetesb.sp.gov.br/Ambiente/camaras/texto\\_ca/ind\\_prod\\_min\\_n\\_met.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Ambiente/camaras/texto_ca/ind_prod_min_n_met.asp)>. Acesso em: 16 nov.

\_\_\_\_\_. (2003a). *Procedimento para utilização de resíduos em fornos de clínquer* - norma P4.263. São Paulo.

\_\_\_\_\_. (2004). *Processos administrativos dos anos de 1976 a 2003 de empreendimentos cimenteiros e de preparação de resíduos – unidade regional de Sorocaba*. Sorocaba.

DEKKICHE, E.A.; CLARK, D.P.; CLARK, M.C. (1996). Expert systems & waste fuel burning in cement clinker production. *Rock Products Cement Edition*, Chicago, p.37-40, Sept.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (2001). *Anuário mineral brasileiro – 2001*. Brasília, DF. Disponível em: <[http://www.dnpm.gov.br/dnpm\\_legis/amb2001.html](http://www.dnpm.gov.br/dnpm_legis/amb2001.html)>. Acesso em: 10 abr. 2004.

\_\_\_\_\_. (2001a). *Balanço mineral brasileiro 2001 - cimento*. Brasília, DF. Disponível em:<[http://www.dnpm.gov.br/dnpm\\_legis/bmb2001.html](http://www.dnpm.gov.br/dnpm_legis/bmb2001.html)>. Acesso em: 9 abr. 2004.

\_\_\_\_\_. (2001b). *O universo da mineração brasileira – 2000: a produção das 1.862 minas no Brasil*. Brasília, DF. Disponível em: <[http://www.dnpm.gov.br/dnpm\\_legis/univmi00.pdf](http://www.dnpm.gov.br/dnpm_legis/univmi00.pdf)>. Acesso em: 10 abr. 2004.

THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION (1999). *Best available techniques for the cement industry*. Disponível em:<<http://www.cembureau.be/Documents/Publications>>. Acesso em: 8 June 2004.

\_\_\_\_\_. (2004). *The 27 products in the family of common cements*. Disponível em:<<http://www.cembureau.be/key%20Facts/DOC/ENV%20197-1%202000%20.pdf>>. Acesso em: 14 Apr.

HERRANZ, D.R. (2004). *Consumo aparente de cimento seminário sobre metodologia de los indicadores econômicos*. Disponível em:<[www.fuentesestadisticas.com/indicadores/cemento.html](http://www.fuentesestadisticas.com/indicadores/cemento.html)>. Acesso em: 9 abr.

KIHARA, Y. (1999). Co-processamento de resíduos em fornos de cimento: tendências. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1999, São Paulo. *Anais...* São Paulo: IBRACON.

\_\_\_\_\_. (1999a). Impacto da normalização do co-processamento de resíduos em fornos de clínquer. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 5., 1999, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP. 1 CD-ROM.

MARCIANO, JR. E.; KIHARA, Y. (1997). Looking green. *World Cement*, Farnham, v.28, n.4, p.82-88, Apr.

MARINGOLO, V. (2001). *Clínquer co-processado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento*. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001.

\_\_\_\_\_. (2004). Publicação eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <eziom@cetesb.sp.gov.br> em 15 abr.

MARTINS, O.L.S. (2004). *Publicação eletrônica* [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <eziom@cetesb.sp.gov.br> em 21 out.

MINNICELLI, D. (2004). *Publicação eletrônica* [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <eziom@cetesb.sp.gov.br> em 30 jun.

ROBERTO, F.A.C. (2004). *Cimento*. Disponível em:<[http://www.dnpm.gov.br/dnpm\\_legis/Balanço01/pdf/cimento.pdf](http://www.dnpm.gov.br/dnpm_legis/Balanço01/pdf/cimento.pdf)>. Acesso em: 9 abr.

SÃO PAULO (Estado) (1976). Decreto n.8.468, de 8 de setembro de 1976. Aprovou o regulamento da lei n.997, de 31 de maio de 1976. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo. Disponível em:<[http://www.ambiente.sp.gov.br/leis\\_internet/76\\_8468.doc](http://www.ambiente.sp.gov.br/leis_internet/76_8468.doc)>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1976a). Lei n.997, de 31 de maio de 1976. Dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo. Disponível em:<[http://www.ambiente.sp.gov.br/leis\\_internet/76\\_8468.doc](http://www.ambiente.sp.gov.br/leis_internet/76_8468.doc)>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1997). Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer. Fornece suporte técnico para licenciamento das atividades de reaproveitamento de resíduos sólidos em fornos de produção de clínquer. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo, 25 nov.1997. Ineditoriais, p.13-15.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (2004). *Produção de cimento*. Disponível em:<[http://www.sindicatodocimento.org.br/f\\_numeros.asp](http://www.sindicatodocimento.org.br/f_numeros.asp)>. Acesso em: 16 abr.

\_\_\_\_\_. (2004a). *SNIC – 50 anos*. Disponível em:<<http://www.sindicatodocimento.org.br/pdf/História%20do%20Cimento%20no%20Brasil.pdf>>. Acesso em: 16 abr.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1994). Emission factor documentation for AP-42, section 11.6, portland cement manufacturing - final report. Disponível em:<<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/final/c11s07.pdf>>. Acesso em: 4 Apr. 2004.

VALENTE, C.E.P. (2004). *Publicação eletrônica* [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <eziom@cetesb.sp.gov.br> em 23 jul.

## **CAPÍTULO 3 – LEGISLAÇÃO AMBIENTAL**

### **3.1 - Introdução**

Coimbra (2003) defende a importância da legislação como instrumento necessário para garantir os direitos e interesses da coletividade, dos indivíduos e diferentes grupos sociais. Argumenta que se ela impede o ilícito, também liberta as iniciativas de quem respeita o bem comum e as condições para o desenvolvimento harmônico das pessoas e das comunidades.

Comenta que para atender seu objetivo a legislação deve ser elaborada, aplicada, atualizada e postula que o avanço de um país se mede pelo estágio da sua legislação ambiental e respectiva prática.

Em sintonia com esse espírito pretende-se traçar uma brevíssima revisão histórica da legislação ambiental brasileira, apresentando cronologicamente alguns instrumentos nos âmbitos federal e estadual, focalizando neste último, especificamente o Estado de São Paulo. Serão também abordados alguns aspectos das legislações ambientais norte-americana e européia relacionadas à atividade de co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer para cimento.

### **3.2 - Em âmbito federal**

A Constituição da República Federativa do Brasil, Título VIII, CAPÍTULO VI - Do Meio Ambiente no artigo 225 estabelece que:

*Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida,*

*impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações (BRASIL. Constituição, 1988, p.150).*

Em compasso com o espírito preconizado pelo instrumento jurídico maior da Federação, buscar-se-á a abordagem sucinta de tópicos da legislação que ilustrem sua amplitude e complexidade as quais motivam especialistas a classificá-la como avançada, por vezes exemplar (COIMBRA, 2003). Serão enfocados aspectos relativos às diretrizes fixadas para o licenciamento ambiental de empreendimentos potencialmente poluidores, o estabelecimento de padrões de emissão e de qualidade ambiental para poluentes atmosféricos e outros relacionados ao gerenciamento de resíduos sólidos.

### 3.2.1 - Meio ambiente em geral

**Decreto-lei nº 1.413, de 14 de agosto de 1975** dispôs sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais. Estabeleceu a obrigatoriedade dos empreendimentos adotarem medidas preventivas e corretivas de controle da poluição ambiental. A competência para suspender o funcionamento de empreendimento poluidor, cuja atividade fosse considerada de alto interesse ao desenvolvimento e da segurança nacional, era exclusiva do Poder Executivo Federal (BRASIL, 1975).

**Portaria MINTER nº 53, de 01 de março de 1979** estabeleceu exigências para acondicionamento e destinação de resíduos sólidos domiciliares. **Recomendava** a não **incineração a céu aberto**, tolerando-a em situações de emergência sanitária para “**incinerar**” resíduos sólidos ou semi-sólidos de qualquer natureza (BRASIL, 1979, grifo nosso).

**Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981** dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), constitui o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e define os órgãos integrantes. Anteriormente à edição da PNMA outros regulamentos foram publicados visando o controle ambiental, porém, sem a abrangência deste dispositivo. É instrumento fundamental para a

definição das diretrizes do sistema de controle ambiental. Contempla, incentiva e respalda a busca por soluções tecnológicas visando a racionalização do uso de recursos naturais, dentre as quais se insere o objeto deste estudo.

No artigo 2º é definido que a PNMA tem por objetivo a preservação da qualidade ambiental propícia à vida visando assegurar condições ao desenvolvimento sócio-econômico atendidos, dentre outros, os princípios de:

***racionalização do uso do solo, do subsolo, da água e do ar; planejamento e fiscalização do uso dos recursos ambientais; incentivos ao estudo e à pesquisa de tecnologias orientadas para o uso racional e a proteção dos recursos ambientais; acompanhamento do estado da qualidade ambiental (BRASIL, 1981, p.1, grifo nosso).***

Os objetivos da PNMA enumerados no artigo 4º visam, entre outros:

***a compatibilização do desenvolvimento econômico-social com a preservação da qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico; o estabelecimento de critérios e padrões da qualidade ambiental e de normas relativas ao uso e manejo de recursos ambientais; o desenvolvimento de pesquisas e de tecnologias nacionais orientadas para o uso racional de recursos ambientais, a preservação e restauração dos recursos ambientais com vistas à sua utilização racional e disponibilidade permanente, concorrendo para manutenção do equilíbrio ecológico propício à vida (BRASIL, 1981, p.2, grifo nosso).***

No artigo 6º estabelece os órgãos e entidades responsáveis pela proteção e melhoria da qualidade ambiental e que constituem o SISNAMA. Cria o CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA), órgão consultivo e deliberativo com finalidade de estudar e propor ao governo federal as diretrizes e políticas para o meio ambiente e recursos naturais e deliberar sobre normas e padrões relacionados. Dá ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) competência para executar, como órgão federal, a política e diretrizes federais fixadas para o meio ambiente.

No artigo 13 estabelece que o Poder Executivo **incentivará as atividades** voltadas ao meio ambiente, visando:

***ao desenvolvimento, no País, de pesquisas e processos tecnológicos destinados a reduzir a degradação da qualidade ambiental; à fabricação de equipamentos antipoluidores; e outras iniciativas que propiciem a racionalização do uso de recursos ambientais (BRASIL, 1981, p.6, grifo nosso).***

**Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986** dispõe sobre a Avaliação de Impacto Ambiental (EIA) como um dos instrumentos da



PNMA. Relaciona dentre as atividades modificadoras do meio ambiente que dependem da elaboração de EIA e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), **o processamento e destino final de resíduos tóxicos ou perigosos** e qualquer atividade que utilizar carvão vegetal, derivados ou produtos similares, em quantidade superior a dez toneladas por dia (BRASIL, 1986, grifo nosso).

**Norma NBR 10004 de setembro de 1987** - “Resíduos sólidos - Classificação” da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), classifica os resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ter manuseio e destinação adequados. Os resíduos radioativos não são objeto desta Norma, pois são de competência exclusiva da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) (ABNT, 1987).

**Norma NBR 10005 de setembro de 1987** - “Lixiviação de resíduos - Procedimento” da ABNT, fixa as condições exigíveis para a lixiviação de resíduos visando à classificação (ABNT, 1987a).

**Norma NBR 10006 de setembro de 1987** - “Solubilização de resíduos - Procedimento” da ABNT, fixa as condições exigíveis para diferenciar os resíduos das classes II e III. Aplica-se somente para resíduos no estado físico sólido (ABNT, 1987b).

**Norma NBR 10007 de setembro de 1987** - “Amostragem de resíduos - Procedimento” da ABNT, fixa as condições exigíveis para amostragem, preservação e estocagem de amostras de resíduos sólidos (ABNT, 1987c).

**Norma NBR 7501 de junho de 1989** - “Transporte de produtos perigosos - Terminologia” da ABNT, define os termos empregados no transporte de produtos perigosos. Para sua aplicação é necessário consultar as demais normas referentes ao transporte de carga perigosa (ABNT, 1989).

**Resolução CONAMA nº 005, de 15 de junho de 1989** institui o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR) como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem-estar das populações e melhoria da qualidade de vida. Estabelece como estratégia básica limitar, em nível nacional, as emissões atmosféricas por tipologia de fontes e poluentes prioritários, reservando o uso dos padrões de qualidade do ar como ação complementar de controle (BRASIL, 1989).

**Resolução CONAMA nº 003, de 28 de junho de 1990** define os conceitos de padrões primários e secundários de qualidade do ar, seus objetivos e as concentrações máximas admissíveis para os parâmetros: partículas totais em suspensão, fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, ozônio e dióxido de nitrogênio (BRASIL, 1990).

**Norma NBR 12235 de abril de 1992** - “Armazenamento de resíduos sólidos - Procedimento” da ABNT, fixa as condições exigíveis para o armazenamento de resíduos sólidos perigosos (Classe I), visando a proteção da saúde pública e meio ambiente (ABNT, 1992).

**Resolução CONAMA nº 009, de 31 de agosto de 1993** dispõe sobre o gerenciamento de óleos lubrificantes em razão de seu uso prolongado resultar na formação de compostos que lhe conferem periculosidade por apresentar toxicidade, requerendo medidas que evitem danos à saúde e ao meio ambiente. Estabelece a obrigatoriedade de que todo óleo lubrificante usado seja destinado à reciclagem, sendo passível de autorização para combustão, visando o aproveitamento energético, quando inviável a reciclagem. Proíbe o descarte de óleos usados em quaisquer compartimentos ambientais; bem como a industrialização e comercialização de novos óleos lubrificantes não recicláveis, nacionais ou importados (BRASIL, 1993).

**Norma NBR 13741 de novembro de 1996** - “Destinação de bifenilas policloradas - Procedimento” da ABNT, fixa as condições exigíveis

para a destinação de PCB's e resíduos contaminados com PCB's. Especifica que resíduos no estado físico sólido, sem líquidos livres, contendo concentrações de PCB's menores ou iguais a 50 mg/kg podem, a critério do órgão de controle ambiental, ser dispostos em aterros industriais de resíduos perigosos (Classe I) (ABNT, 1996).

**Resolução CONAMA nº 023, de 12 de dezembro de 1996** proíbe a importação de resíduos perigosos (Classe I), devido aos riscos reais e potenciais à saúde e ao meio ambiente. Estabelece procedimento para importação de itens da categoria resíduos não inertes (Classe II) somente para finalidades de reciclagem ou reaproveitamento mediante autorização do IBAMA e anuência do Órgão Estadual de Meio Ambiente (BRASIL, 1996).

**Norma NBR 8371 de junho de 1997** – “Ascarel para transformadores e capacitores – Características e riscos” da ABNT, descreve os ascaréis para transformadores e capacitores, suas características e riscos, e estabelece orientações para manuseio, acondicionamento, rotulagem, armazenamento, transporte, procedimentos para equipamentos em operação e eliminação (ABNT, 1997).

**Norma NBR 13882 de junho de 1997** - “Líquidos isolantes elétricos - Determinação do teor de bifenila policlorada (PCB)” da ABNT, prescreve métodos para a determinação do teor de PCB em líquidos isolantes elétricos, sendo aplicável a teores de PCB a partir de 3 mg/kg (ABNT, 1997a).

**Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997** dispõe sobre a revisão de critérios e procedimentos de licenciamento ambiental para integrar a atuação dos órgãos do SISNAMA na execução da PNMA e efetivar a utilização do sistema de licenciamento como instrumento de gestão ambiental. Define como instrumentos do licenciamento as Licenças Prévia, de Instalação e de Operação, as etapas do licenciamento, os níveis de competência e os prazos de validade e de renovação de licenças ambientais (BRASIL, 1997).

**Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998** (*Lei de crimes ambientais*) dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente (BRASIL, 1998).

**Resolução CONAMA nº 257, de 30 de junho de 1999** dispõe sobre a obrigatoriedade dos estabelecimentos que comercializam ou prestam assistência técnica referente a pilhas e baterias que contenham chumbo, cádmio, mercúrio e seus compostos, a aceitarem a devolução das unidades usadas após seu esgotamento energético. Devem mantê-las adequadamente armazenadas até a devolução aos fabricantes e importadores para reutilização, reciclagem, tratamento ou disposição final (BRASIL, 1999).

**Resolução CONAMA nº 258, de 26 de agosto de 1999** dispõe sobre a obrigatoriedade das empresas fabricantes e importadoras de pneumáticos de coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis no território nacional. Estabelece os prazos e proporções anuais de coleta relativos às quantidades fabricadas e/ou importadas por constituírem passivo ambiental que resulta em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública e da impossibilidade de seu integral reaproveitamento para uso veicular e em processos de reforma (BRASIL, 1999).

**Norma NBR 13221 de novembro de 2000** - “Transporte de resíduos” da ABNT, especifica as condições necessárias de forma a evitar danos ao meio ambiente e para proteção da saúde pública. Aplica-se ao transporte de resíduos, por meio terrestre, inclusive daqueles materiais que possam ser reaproveitados, reciclados e/ou reprocessados. Não se aplica a materiais radioativos e aos transportes aéreo, hidroviário e marítimo, assim como transporte interno, numa mesma área do gerador (ABNT, 2000).

**Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002** estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção

civil, disciplinando as ações necessárias para minimizar os impactos ambientais da disposição em locais inadequados (BRASIL, 2002).

**Resolução CONAMA nº 313, de 29 de outubro de 2002** dispõe sobre a realização do Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais para obter informações precisas da quantidade, tipos e destino dos resíduos gerados no parque industrial brasileiro. Visa à elaboração dos Programas Estaduais e do Plano Nacional para Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais (BRASIL, 2002a).

### **3.2.2 - Destruição térmica de resíduos**

**Norma NBR 11175 de julho de 1990** - “Incineração de resíduos sólidos perigosos - Padrões de desempenho - Procedimento” da ABNT, fixa as condições exigíveis de desempenho do equipamento para incineração de resíduos perigosos, exceto aqueles assim classificados por patogenicidade ou inflamabilidade e estabelece os limites de emissão (Tabela 3.1). Define como principais compostos orgânicos perigosos (PCOP's) de um resíduo as substâncias da listagem nº 4 da NBR 10004 (ABNT, 1987) para servirem como indicadores da eficiência de destruição e remoção (ABNT, 1990).

**Resolução CONAMA nº 264, de 26 de agosto de 1999** dispõe sobre os procedimentos, critérios e aspectos técnicos para o licenciamento ambiental para co-processamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer para cimento, excetuando os resíduos domiciliares brutos, de serviços de saúde, radioativos, explosivos, organoclorados, agrotóxicos e afins.

Estabelece que as solicitações para co-processamento em unidades industriais existentes somente serão analisadas se estiverem licenciadas e ambientalmente regularizadas para a produção por processos convencionais.

Essa norma prevê a concessão da autorização para o co-processamento desde que as quantidades de resíduos gerados e/ou estocados sejam suficientes para justificar sua utilização como substitutos parciais de

matérias-primas e/ou de combustíveis, de forma a impedir a utilização do procedimento com o propósito de dar fim a passivos, sob pretexto de execução dos testes exigíveis.

**Tabela 3.1** - Limites de emissão atmosférica (LE), estabelecidos pela NBR 11175/90, para a incineração de resíduos perigosos

Poluentes	LE	Unidades
HCl	1,8 <sup>(1)</sup>	kg/h
HF	5	mg/Nm <sup>3</sup>
CO	100 <sup>(2)</sup>	ppm
SO <sub>x</sub> (medido como SO <sub>2</sub> )	280 <sup>(2)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub> (medido como NO <sub>2</sub> )	560 <sup>(2)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
MP total	70 <sup>(2)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
Inorgânicos Classe 1 (para fluxo de massa ≥1g/h) <sup>(3)</sup> Cd+Hg+Tl	0,28 <sup>(2)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
Inorgânicos Classe 2 (para fluxo de massa ≥5g/h) <sup>(3)</sup> As+Co+Ni+Se+Te	1,4 <sup>(2)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
Inorgânicos Classe 3 (para fluxo de massa ≥25g/h) <sup>(3)</sup> Sb+Pb+Cr+CN+Cu+Sn+F+Mn+Pt+Pd+Rh+V	7 <sup>(2)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
Inorgânicos das classes 1 e 2	1,4 <sup>(4)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
Inorgânicos das classes 1 e 3	7 <sup>(4)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
Inorgânicos das classes 2 e 3	7 <sup>(5)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
E <sub>d</sub> <sup>(6)</sup> (PCOP)	99,99	%
E <sub>d</sub> <sup>(6)</sup> (PCB's e dioxinas)	99,999	%

Obs.: 1 - o limite de HCl para resíduo com mais de 0,5% de cloro é de 99% de remoção;

2 - os valores para CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, MP total e Inorgânicos devem ser corrigidos a 7% de oxigênio;

3 - os limites não se aplicam se os fluxos de massa forem menores que os indicados;

4 - desde que o somatório das substâncias da classe 1 seja menor que 0,28 mg/Nm<sup>3</sup>;

5 - desde que o somatório das substâncias da classe 2 seja menor que 1,4 mg/Nm<sup>3</sup>;

6 - E<sub>d</sub> - eficiência de remoção e destruição

Fonte: ABNT (1990), organizada pelo autor

Aspecto destacável refere-se à exigência de que o co-processamento de resíduos nesses fornos garanta a manutenção da qualidade ambiental, evite danos e riscos à saúde atendendo aos padrões de emissão

fixados. Exige ainda que o cimento não incorpore substâncias ou elementos em quantidades que possam afetar a saúde humana e o meio ambiente.

Um dos critérios básicos se refere à utilização de resíduos como substitutos de matérias-primas desde que apresentem características similares às dos componentes normalmente empregados na produção, incluindo materiais mineralizadores e/ou fundentes. O outro prevê o uso de resíduos como substitutos parciais de combustíveis, para fins de reaproveitamento de energia, desde que devidamente comprovado o ganho energético proposto.

O procedimento de licenciamento ambiental contempla a concessão das Licenças Prévia (LP), de Instalação (LI) e de Operação(LO) para as plantas novas ou existentes. Exige a apresentação de estudos tecnicamente fundamentados demonstrando a viabilidade de queima do(s) resíduo(s) (EVQ); os planos de teste em branco (PTB) e de queima (PTQ); os relatórios com os resultados obtidos nos testes em branco (TB) e de queima (TQ) realizados e o relatório do estudo de análise de risco (EAR).

O teste em branco é definido como:

*Conjunto de medições realizadas no forno em funcionamento normal, operando sem a alimentação de resíduos, para avaliação das condições operacionais da unidade de produção de clínquer e do atendimento às exigências técnicas fixadas pelo Órgão Ambiental (BRASIL, 1999c, p. 12).*

O teste de queima é definido como:

*Conjunto de medições realizadas na unidade operando com a alimentação de resíduos, para avaliar a compatibilidade das condições operacionais da instalação de produção de clínquer com atendimento aos limites de emissões definidos na presente Resolução e com as exigências técnicas fixadas pelo Órgão Ambiental (BRASIL, 1999c, p. 12).*

A norma estabelece que a capacidade de operação prevista para o co-processamento de resíduos deve ser mantida durante os testes em branco e de queima com uma variação aceitável de até 10%. É prevista a possibilidade de realização de um período de "pré-teste de queima", que deverá ser aprovado pelo Órgão Ambiental, para efetuar os ajustes necessários da planta industrial às condições de alimentação dos resíduos a serem testados.

Como pré-requisito para a realização do teste de queima deverá estar instalado e em operação o sistema de intertravamento para interrupção

automática da alimentação de resíduos, o qual será testado antes do início das medições. As hipóteses de falhas contemplam a emissão de poluentes, monitorados continuamente, acima dos limites estabelecidos; queda da temperatura normal de operação; queda do teor de O<sub>2</sub> no sistema; interrupção do funcionamento do equipamento de controle de poluição; entre outras.

Durante o teste de queima é exigida a realização do teste com o PCOP selecionado para avaliação da eficiência de destruição e remoção (EDR) de orgânicos, que deve atingir, no mínimo, 99,99%. Os limites de emissão estabelecidos (Tabela 3.2) não devem ser ultrapassados durante a operação do forno com combustíveis convencionais, nem quando utilizando resíduos.

**Tabela 3.2** - Limites de emissão atmosférica (LE), estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 264/99, para o co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer

Poluentes	LE	Unidades
HCl	1,8 <sup>(1)</sup>	kg/h
HF	5	mg/Nm <sup>3</sup>
CO	100	ppm <sub>v</sub>
Material particulado	70 <sup>(2)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
HCT (hidrocarbonetos totais expressos como propano - C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	20	ppm <sub>v</sub>
Mercúrio (Hg)	0,05	mg/Nm <sup>3</sup>
Chumbo (Pb)	0,35	mg/Nm <sup>3</sup>
Cádmio (Cd)	0,10	mg/Nm <sup>3</sup>
Tálio (Tl)	0,10	mg/Nm <sup>3</sup>
(As+Be+Co+Ni+Se+Te)	1,4	mg/Nm <sup>3</sup>
(As+Be+Co+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Sb+Se+Sn+Te+Zn)	7,0	mg/Nm <sup>3</sup>
EDR - (PCOP)	99,99	%
Dioxinas e furanos (expressos em TEQ da 2,3,7,8 TCDD)	0,50 <sup>(4)</sup>	µg/Nm <sup>3</sup>

Obs. 1 - o limite alternativo para HCl é uma redução de 99% do teor de cloro;

2 - o parâmetro MP está expresso a 11% de O<sub>2</sub> em base seca;

3 - todos os demais parâmetros são expressos a 7% de O<sub>2</sub> em base seca;

4 - limite estabelecido através da Resolução CONAMA nº 316 de 29 de outubro de 2002

Fonte: BRASIL (1999a), adaptada pelo autor



O limite de 100 ppm<sub>v</sub> para o monóxido de carbono (CO) poderá ser excedido desde que os valores medidos de hidrocarbonetos totais (HCT) não excedam 20 ppm<sub>v</sub> (medidos como propano – C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), em termos de média horária, e que não seja ultrapassado o limite superior de CO de 500 ppm<sub>v</sub>, corrigido a 7% de O<sub>2</sub> (base seca - bs), em qualquer instante. O limite de CO para o intertravamento da alimentação de resíduo, deve ser fixado a partir dos Testes de Queima, com base nas médias horárias, e corrigido continuamente a 7% de O<sub>2</sub> (bs).

O Estudo de Análise de Risco (EAR) tem por objetivo identificar as características de perigo das instalações, bem como das atividades a serem desenvolvidas na planta industrial para identificação qualitativa e quantitativa dos riscos associados e a possibilidade de adoção de medidas de mitigação que possam torná-los assimiláveis, tanto do ponto de vista ambiental como da saúde pública.

A norma estabelece que os limites de emissão podem ser mais restritivos a critério dos órgãos ambientais locais, em função de fatores relacionados à capacidade de dispersão atmosférica dos poluentes, considerando as variações climáticas e de relevo locais ou a intensidade de ocupação industrial e os valores de qualidade de ar da região. Os limites de emissão para os parâmetros SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub> devem ser fixados pelos órgãos ambientais locais considerando as peculiaridades regionais. Este regulamento também não estabelece limite mínimo de poder calorífico para os resíduos a serem co-processados em fornos de clínquer.

Deverão ser monitorados, de forma contínua, os parâmetros pressão interna, temperatura dos gases do sistema-forno e na entrada do precipitador eletrostático, vazão de alimentação do resíduo, material particulado (através de opacímetro), O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> e/ou HCT, quando necessário.

Deverão ser monitoradas, de forma não contínua, os parâmetros SO<sub>x</sub>, PCOP's, HCl/Cl<sub>2</sub>, HF, elementos e substâncias inorgânicas.

A Resolução aborda também as Unidades de Mistura e Pré-condicionamento de resíduos, estabelecendo os procedimentos para controle de recebimento, armazenamento e transporte de resíduos, treinamento de pessoal e do estudo de análise de risco (BRASIL, 1999b).

**Resolução nº 316, de 29 de outubro de 2002** dispõe sobre os procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos e cadáveres, estabelecendo procedimentos operacionais, limites de emissão (Tabela 3.3) e critérios de desempenho, controle, tratamento e disposição final de efluentes, para minimizar os impactos ao meio ambiente e à saúde pública resultantes dessas atividades.

Excetua os rejeitos radioativos, que devem seguir normatização específica da CNEN e o co-processamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer que deve atender ao disposto na Resolução CONAMA nº 264/99 (BRASIL, 1999a), salvo disposição sobre dioxinas e furanos estabelecida neste regulamento.

**Tabela 3.3** - Limites de emissão atmosférica (LE), estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 316/02, para a destruição térmica de resíduos

Parâmetros	LE	Unidades
Material particulado total	70	mg/Nm <sup>3</sup>
Inorgânicos Classe 1 (forma particulada) Cd+Hg+Tl	0,28	mg/Nm <sup>3</sup>
Inorgânicos Classe 2 (forma particulada) As+Co+Ni+Se+Te	1,40	mg/Nm <sup>3</sup>
Inorgânicos Classe 3 (forma particulada) Sb+Pb+Cr+CN+Cu+Sn+F+Mn+Pt+Pd+Rh+V	7	mg/Nm <sup>3</sup>
SO <sub>x</sub> (medido como SO <sub>2</sub> )	280	mg/Nm <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub> (medido como NO <sub>2</sub> )	560	mg/Nm <sup>3</sup>
CO	100	ppm/Nm <sup>3</sup>
HCl	80 <sup>(2)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
HF	5	mg/Nm <sup>3</sup>
Dioxinas e furanos (expressos em TEQ da 2,3,7,8 TCDD)	0,50	ng/Nm <sup>3</sup>

Obs.: 1 - todos os parâmetros medidos devem ser corrigidos para 7% de O<sub>2</sub>, em base seca;

2 - HCl com limite mássico fixado em 1,8 kg/h

Fonte: Brasil (2002b), organizada pelo autor

A norma determina que os sistemas de tratamento térmico de resíduos, definidos como todo e qualquer processo com temperatura mínima de operação superior a 800°C para estes fins, deverão atender aos critérios técnicos fixados, complementados, quando necessário, pelos demais órgãos ambientais, para atender às peculiaridades regionais e locais.

A adoção de sistemas de tratamento térmico de resíduos deverá ser precedida de estudo de análise das alternativas tecnológicas que comprove que a escolha da tecnologia adotada está de acordo com o conceito de melhor técnica disponível. Todo sistema de tratamento térmico para resíduos industriais deverá atingir a EDR superior ou igual a 99,99% para o PCOP utilizado no teste de queima. No caso de PCB's, a EDR deverá ser superior ou igual a 99,99%.

A Resolução fixa como limite máximo de emissão para dibenzo-p-dioxinas policloradas e dibenzo-p-furanos, expressos em toxicidade total equivalente (TEQ) da 2,3,7,8 TCDD (tetracloro-dibenzo-para-dioxina) o valor de concentração de 0,50 ng/Nm<sup>3</sup>, corrigida a 7% de oxigênio, aplicável também para o co-processamento de resíduos em fornos de clínquer (BRASIL, 2002b).

### **3.3 - Em âmbito estadual**

#### **3.3.1 - Meio ambiente em geral**

A Constituição do Estado de São Paulo, CAPÍTULO IV - Do Meio Ambiente, dos Recursos Naturais e do Saneamento, Seção I – Do Meio Ambiente em seu artigo 191 estabelece que:

*O Estado e os Municípios providenciarão, com a participação da coletividade, a preservação, conservação, defesa, recuperação e melhoria do meio ambiente natural, artificial e do trabalho, atendidas as peculiaridades regionais e locais e em harmonia com o desenvolvimento social e econômico (SÃO PAULO. Constituição, 1989, p.124).*

Para cumprir o objetivo constitucional o Estado de São Paulo dispõe de sistema de meio ambiente, integrado por unidades específicas, para tratar das interfaces de relacionamento das atividades poluidoras e o meio natural.

Conta também, a exemplo da federação, com um conjunto avançado de leis, decretos, regulamentos e outras normas bastante restritivas, dentre as quais, nesta abordagem serão destacadas aquelas relacionadas à prevenção e controle da poluição ambiental e aquelas específicas para co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer para cimento.

**Lei nº 118, de 29 de junho de 1973** autoriza a constituição da Companhia de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle da Poluição das Águas (CETESB) para exercer as atividades do controle da poluição das águas; o controle de qualidade das águas para abastecimento público, assim como das águas residuárias, entre outras atribuições (SÃO PAULO (Estado), 1973).

**Decreto nº 5.993, de 16 de abril de 1975** altera a denominação e as atribuições da CETESB para Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Estabelece como sua atribuição o controle da qualidade das águas, do ar e do solo, assim como pesquisas e serviços científicos e tecnológicos relacionados ao seu campo de atuação. Define seu campo de atuação para o exercício das atividades de controle da poluição das águas, do ar e solo através de medidas preventivas ou corretivas de emissão de poluentes, lhe dá o poder de polícia administrativa, entre outras atribuições (SÃO PAULO (Estado), 1975).

**Lei nº 997, de 31 de maio de 1976** dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente e institui o Sistema de Prevenção e Controle da Poluição do Meio Ambiente através do estabelecimento de sistemática de licenciamento de fontes de poluição (SÃO PAULO (Estado), 1976a).

**Decreto nº 8468, de 08 de setembro de 1976** aprova o regulamento da Lei 997/76 dispendo sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Estabelece a competência da CETESB, na qualidade de órgão delegado do Governo do Estado de São Paulo, para aplicação da lei tendo, dentre outras, a atribuição de desenvolver ações preventivas e corretivas de controle ambiental, elaborar normas técnicas

relativas ao controle da poluição, estabelecer e executar planos de prevenção e controle da poluição (SÃO PAULO (Estado), 1976).

**Decreto nº 24.932, de 24 de março de 1986** institui o Sistema Estadual do Meio Ambiente com objetivos de:

*promover a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental; coordenar e integrar as atividades ligadas à defesa do meio ambiente; promover a elaboração e o aperfeiçoamento das normas de proteção ao meio ambiente; **incentivar o desenvolvimento de pesquisas e processos tecnológicos destinados a reduzir a degradação da qualidade ambiental** e estimular a realização de atividades educativas e a participação da comunidade no processo de preservação do meio ambiente (SÃO PAULO (Estado), 1986, p.1, grifo nosso).*

Cria a Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SMA) definindo a estrutura do Sistema tendo como órgão central o Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA); órgãos setoriais, todos os integrantes da estrutura organizacional da Administração Centralizada e Descentralizada do Estado e órgãos locais, constituídos por órgãos ou entidades municipais responsáveis, em suas áreas de jurisdição, pelo controle e fiscalização das atividades suscetíveis de degradarem a qualidade ambiental (SÃO PAULO (Estado), 1986).

**Lei nº 7.750, de 31 de março de 1992** dispõe sobre a Política Estadual de Saneamento com a finalidade de disciplinar o planejamento e a execução das ações, obras e serviços de Saneamento no Estado, respeitada a autonomia dos Municípios, orientando-se pelo princípio, dentre outros, de que o ambiente salubre, indispensável à segurança sanitária e à melhoria da qualidade de vida, é direito de todos, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de assegurá-lo (SÃO PAULO (Estado), 1992).

**Resolução SMA nº 42, de 29 de dezembro de 1994** aprova, no âmbito da SMA, os procedimentos para análise de EIA e RIMA e institui o Relatório Ambiental Preliminar (RAP) como instrumento inicial para avaliação de impactos ambientais (SÃO PAULO (Estado), 1994).

**Lei nº 9.509, de 20 de março de 1997** dispõe sobre a Política Estadual do Meio Ambiente e constitui o Sistema Estadual de Administração da Qualidade Ambiental, Proteção, Controle e Desenvolvimento do Meio Ambiente e Uso Adequado dos Recursos Naturais (SEAQUA). Estabelece que a Política Estadual tem por objetivo garantir a todos da presente e das futuras gerações, o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, visando assegurar condições ao desenvolvimento sustentável, com justiça social, aos interesses da seguridade social e à proteção da dignidade da vida humana (SAO PAULO (Estado), 1997).

**Resolução SMA nº 50, de 25 de julho de 1997** dispõe sobre o estabelecimento de critérios para o licenciamento ambiental de aterros sanitários e usinas de reciclagem e compostagem de resíduos sólidos domésticos operados por municípios (SÃO PAULO (Estado), 1997b).

**Resolução SMA nº 41, de 17 de outubro de 2002** dispõe sobre os procedimentos para o licenciamento ambiental de aterros de resíduos inertes e da construção civil no Estado de São Paulo (SÃO PAULO (Estado), 2002b).

**Decreto nº 47.397, de 4 de dezembro de 2002** dá nova redação ao Título V e ao Anexo 5 e acrescentou os Anexos 9 e 10 ao Regulamento da Lei nº 997/76, aprovado pelo Decreto nº 8.468/76, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Define as fontes de poluição, os procedimentos técnico-administrativos para concessão de Licenças Prévia, de Instalação e de Operação, seus prazos de validade e preços (SÃO PAULO (Estado), 2002).

**Decreto Nº 47.400, de 4 de dezembro de 2002** regulamenta dispositivos da Lei Estadual nº 9.509, de 20 de março de 1997, referentes ao licenciamento ambiental, estabelece prazos de validade para cada modalidade de licença ambiental e condições para renovação, estabelece prazo de análise dos requerimentos e licenciamento ambiental, institui procedimento obrigatório

de notificação de suspensão ou encerramento de atividade e o recolhimento de valor referente ao preço de análise (SÃO PAULO (Estado), 2002a).

**Lei nº 11.387, de 27 de maio de 2003** dispõe sobre a apresentação, pelo Poder Executivo, de Plano Diretor de Resíduos Sólidos para o Estado de São Paulo diagnosticando e propondo soluções para os problemas existentes relativos à coleta, tratamento e disposição final dos resíduos sólidos de origem domiciliar, industrial e hospitalar. Prevê a apresentação de cenários para os próximos cinco, dez, quinze e vinte anos, com indicação das situações e problemas prováveis e as soluções indicadas naqueles intervalos de tempo.

Estabelece que nas análises e proposições do Plano deverá ser adotado enfoque regional e integrado, priorizando parcerias com Prefeituras municipais, consórcios intermunicipais e a iniciativa privada, identificando especificidades e áreas em processo avançado de metropolização no Estado.

O Plano deverá avaliar as tecnologias disponíveis para destinação de resíduos domiciliares, hospitalares e industriais, e as inovações tecnológicas pertinentes. Deverá também avaliar soluções alternativas ou complementares, especialmente a coleta seletiva com reciclagem e compostagem de resíduos orgânicos e a geração de gás a partir do lixo (SÃO PAULO (Estado), 2003).

**Resolução SMA nº 31, de 22 de julho de 2003** dispõe sobre procedimentos para o gerenciamento e licenciamento ambiental de sistemas de tratamento e disposição final de resíduos de serviços de saúde humana e animal no Estado de São Paulo (SÃO PAULO (Estado), 2003).

**Decreto nº 48.523, de 02 de março de 2004** introduz alterações no Regulamento da Lei nº 997/76, aprovado pelo Decreto nº 8.468/76 definindo critérios para classificação de sub-região quanto ao grau de saturação da qualidade do ar, em relação a um poluente atmosférico específico, pela avaliação das concentrações verificadas frente aos padrões de qualidade do ar.

Dá competência ao órgão ambiental para definir exigências especiais para atividades instaladas em áreas saturadas ou em via de saturação visando a recuperação e melhoria da qualidade do ar. A autorização

para implantação de novas fontes poluidoras ou ampliação das existentes estará sujeita à compensação das emissões por ganho ambiental para assegurar o atendimento aos padrões de qualidade do ar (SÃO PAULO (Estado), 2004).

### 3.3.2 - Co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer

**Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer** aprovado pela Diretoria Plena da CETESB em 30 de outubro de 1997 e publicado no Diário Oficial do Estado de São Paulo em 25 de novembro de 1997 (substituído pela Norma CETESB P4.263/03).

Disponha sobre o fornecimento de suporte técnico para o licenciamento das atividades de reaproveitamento de resíduos sólidos em fornos de produção de clínquer, excetuando resíduos domiciliares brutos, de estabelecimentos prestadores de serviços de saúde, radioativos e explosivos. Estabelecia que o co-processamento de resíduos cancerígenos, organoclorados e praguicidas deveriam ser estudados caso a caso.

O procedimento adotava como premissas:

- *que a utilização de resíduos sólidos em fornos de clínquer não deveriam gerar taxas de emissão maiores do que as devidas à destruição do mesmo resíduo em incineradores de resíduos perigosos;*
- *que o resíduo deveria ser gerado e/ou estar estocado em quantidade suficiente para justificar sua utilização em um teste de queima; e*
- *que somente seriam analisadas solicitações de licença de cimenteiras já instaladas, se devidamente licenciadas e regularizadas (SÃO PAULO (Estado), 1997a, p.1).*

Os critérios básicos para a utilização de resíduos resumiam-se no reaproveitamento de energia e substituição de matéria-prima. Para a primeira condição o poder calorífico inferior (pci) mínimo, na base seca, foi fixado em 11 620 kJ/kg (5 000 BTU/lb ou 2 775 kcal/kg). Acerca dessa limitação Lamb e Nail (1997) destacam que a fixação de limite semelhante na legislação americana tinha o propósito de impedir a utilização de resíduos com baixo pci em caldeiras e fornos industriais para “fugir” dos custos da incineração. Os autores apresentam memória de cálculo do mínimo poder calorífico



autogênico<sup>8</sup> de um combustível de resíduo perigoso para uso num sistema-forno tendo o tolueno como fração combustível. Considerando o cenário de pior caso aplicável a todos os tipos de fornos chegaram ao valor autogênico de 1 948 BTU/lb (4 531 kJ/kg ou 1 082 kcal/kg). Comentam que cálculos similares para componentes típicos de resíduos permitem concluir que 3 000 BTU/lb (6 978 kJ/kg ou 1 667 kcal/kg) é um valor conservativo para o menor poder calorífico autogênico a partir do qual o combustível contribui energeticamente para com o processo.

O procedimento previa que, para substituição de matéria-prima, o resíduo deveria apresentar características qualitativas similares às dos componentes normalmente empregados na produção de clínquer, contemplando também elementos que facilitassem as reações de clínquerização, tais como Zn, Ba, F, fosfatos, entre outros.

Estabelecia a necessidade de elaboração do estudo de viabilidade de queima; planos de teste em branco e de queima; realização do teste em branco e de queima e estudo de análise de risco. Possibilitava a expedição de autorização de período de pré-teste, não superior a 30 dias, para propiciar os ajustes necessários nas condições de alimentação dos resíduos, bem como para a familiarização dos profissionais envolvidos com a atividade, com vistas à realização do teste de queima.

Para assegurar o controle de compostos orgânicos foi fixada uma EDR mínima de 99,99% para o PCOP selecionado mediante prévia manifestação do órgão ambiental. Estabeleceu diferenciais de emissões atmosféricas (Tabela 3.4) que não poderiam ser excedidos quando subtraídas as emissões do teste em branco daquelas obtidas no teste de queima. Tais limites caracterizaram o conceito conhecido como “delta”, uma vez que não foram fixados padrões de emissão independentes, mas uma vinculação entre as emissões obtidas nos testes realizados, exceto para os parâmetros material particulado e monóxido de carbono.

---

<sup>8</sup> Poder calorífico autogênico de um combustível é a energia requerida para aquecer os produtos de combustão até a temperatura do sistema, sem uso de combustível auxiliar.

**Tabela 3.4** – Limites de emissão atmosférica (deltas), estabelecidos em procedimento de licenciamento da CETESB/97, para o co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer

Poluentes	Limites de emissão	Unidades
Material particulado	0,15	kg/t de <i>farinha</i> alimentada no forno
SO <sub>x</sub> (expresso como SO <sub>2</sub> )	8	kg/h
NO <sub>x</sub> (expresso como NO <sub>2</sub> )	280 <sup>(1)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
Ácido clorídrico	0,60	kg/h
Ácido fluorídrico	43	g/h
Inorgânicos Classe I	2,50 <sup>(2)</sup>	g/h
Inorgânicos Classe II	12 <sup>(3)</sup>	g/h
Inorgânicos Classe III	60 <sup>(4)</sup>	g/h
CO	100 <sup>(5)</sup>	ppm

Obs.:1 - concentração corrigida a 11%O<sub>2</sub>;

2 - taxa de emissão correspondente ao somatório das emissões das substâncias inorgânicas classe I: cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e tálio (Tl);

3 - taxa de emissão correspondente ao somatório das emissões das substâncias inorgânicas classe II: arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), selênio (Se) e telúrio (Te);

4 - taxa de emissão correspondente ao somatório das emissões das substâncias inorgânicas classe III: antimônio (Sb), chumbo (Pb), cromo (Cr), cianetos (CN), fluoretos (F), cobre (Cu), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) e estanho (Sn);

5 - o padrão de CO pode ser ultrapassado em intervalo inferior a 10 minutos, em qualquer período de 1 hora, desde que não seja ultrapassado o valor de 500 ppm, em qualquer instante

Fonte: SÃO PAULO (Estado) (1997a), adaptada pelo autor

### **Norma CETESB P4.263, de 10 de dezembro de 2003 -**

Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer.

Decorrente da publicação da Resolução CONAMA n<sup>o</sup> 264/99 (BRASIL, 1999a) foi efetuada a revisão da norma estadual de 1997 para adequá-la aos termos do regulamento federal. A revisão contemplou também sua atualização com base na experiência acumulada no período de 1997 a 2003, mantendo-se seu objetivo focado no fornecimento de suporte técnico para licenciamento das atividades de co-processamento de resíduos sólidos em fornos de produção de clínquer.

Um dos pontos nos quais a norma avançou refere-se à identificação de correntes de resíduos que foram dispensadas do cumprimento dos rigorosos critérios de licenciamento para co-processamento, dentre os quais:

*resíduos vegetais provenientes de atividade agrícola e da indústria de transformação de produtos alimentícios; resíduos vegetais fibrosos da produção de pasta virgem e de papel; resíduos de madeira, exceto os que possam conter compostos orgânicos halogenados ou metais pesados resultantes de tratamentos químicos; coque de petróleo; sucatas de metais ferrosos e não ferrosos como pós, carepas, cavacos e limalhas; resíduos de materiais têxteis; resíduos de obras de construção civil e demolição; e resíduos gerados na própria unidade de co-processamento, exceto aqueles passíveis de re-refino (CETESB, 2003, p. 2-3).*

A norma mantém como premissas a proibição da utilização de correntes de resíduos geradas ou estocadas em quantidades que não justifiquem a realização dos testes de queima, bem como estabelece que a atividade de co-processamento deve garantir a qualidade do clínquer e cimento, evitar danos e riscos à saúde humana e atender aos padrões de emissão fixados (Tabela 3.5).

Os resíduos candidatos ao co-processamento somente poderão ser utilizados desde que atendam ao critério de reaproveitamento energético dispondo de pci, em base seca, superior a 2 775 kcal/kg (5 000 Btu/lb ou 11 620 kJ/kg), abrindo-se a possibilidade, em caso de resíduo com poder calorífico menor que o especificado, de ser procedida análise caso a caso. Manteve-se também o critério de utilização de resíduo como substituto de matéria-prima desde que apresente composição química similar àquela dos constituintes normalmente utilizados na produção do clínquer.

O procedimento de licenciamento contempla as etapas de obtenção das Licenças Prévia, de Instalação e de Operação, desde que cumpridos os requisitos relativos aos estudos técnicos exigíveis para subsidiar a avaliação da viabilidade ambiental e potencial poluidor do empreendimento. A etapa de licenciamento ambiental prévia deve ser formalizada em conformidade com os procedimentos estabelecidos na Resolução SMA 42/94 (SÃO PAULO (Estado), 1994).

Os estudos técnicos necessários para cumprimento das etapas de licenciamento junto à CETESB resumem-se ao estudo de viabilidade de queima (EVQ), plano de teste em branco (PTB), avaliação quanto à necessidade de estudo de análise de risco (EAR), relatório do teste em branco (TB), plano de teste de queima (PTQ) e relatório do teste de queima (TQ).

**Tabela 3.5** - Limites de emissão atmosférica (LE), estabelecidos pela Norma CETESB P4.263/03, para a atividade de co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer

Parâmetro	LE	Unidades <sup>(1)</sup>
Material particulado <sup>(2)</sup>	70	mg/Nm <sup>3</sup>
SO <sub>x</sub> (expresso como SO <sub>2</sub> )	350	mg/Nm <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub> (expresso como NO <sub>2</sub> )	800	mg/Nm <sup>3</sup>
Ácido clorídrico (cloreto de hidrogênio)	10	mg/Nm <sup>3</sup>
Ácido fluorídrico (fluoreto de hidrogênio)	4	mg/Nm <sup>3</sup>
Cd+Tl	0,050	mg/Nm <sup>3</sup>
Hg	0,040	mg/Nm <sup>3</sup>
Pb	0,275	mg/Nm <sup>3</sup>
As+Co+Ni+Se+Te+Be	1	mg/Nm <sup>3</sup>
Pb+As+Co+Ni+Se+Te+Be+Cr+Mn+Sb+Sn+Zn	5	mg/Nm <sup>3</sup>
HCT (expresso como propano)	20	ppm <sub>v</sub>
Dioxinas e furanos <sup>(2)</sup>	0,1	ηg/Nm <sup>3</sup>
EDR	99,99	%

Obs.: 1 - todos valores expressos nas condições normais de temperatura e pressão (0°C e 1 atm) e base seca;

2 - material particulado e dioxinas e furanos corrigidos a 11% de O<sub>2</sub>;

3 - todos os demais parâmetros corrigidos a 10% de O<sub>2</sub>;

4 - o limite para o parâmetro CO deve atender ao estabelecido na Resolução CONAMA n° 264/99

Fonte: CETESB (2003), adaptada pelo autor

A norma estabelece que o limite para as emissões de monóxido de carbono seguirá o disposto na Resolução CONAMA n° 264/99 (BRASIL, 1999b) e que a exigência de atendimento ao padrão de emissão para dioxinas e furanos será definida caso a caso, em função do resíduo a ser co-processado.

Foi mantida a possibilidade de autorização de período máximo de 30 dias, a título de pré-testes, para efetuar ajustes necessários no processo produtivo e familiarização dos profissionais para a execução do teste de queima.

Outro avanço incorporado pela norma estadual, em consonância com o estabelecido na Resolução CONAMA n° 258/99 (BRASIL, 1999a), refere-se à dispensa de apresentação do EVQ e EAR para obtenção das

autorizações visando o consumo de pneumáticos inservíveis como fonte energética nos fornos de clínquer.

Foram estabelecidos os parâmetros para monitoramento durante a realização dos testes em branco e de queima, mantendo-se o critério de que a capacidade produtiva a licenciar para co-processamento tem que ser mantida durante a realização das duas campanhas de amostragens em chaminés.

São exigidos monitoramentos contínuos que garantam as boas condições de combustão inter-travados com sistema automático de interrupção da alimentação do resíduo em caso de ocorrência de falha de operação .

Diferentemente do procedimento de 1997 esta norma estabelece os limites de emissões atmosféricas que devem ser atendidos quando da realização do teste em branco e de queima de resíduos.

Para a comprovação de atendimento à EDR o PCOP deve ser selecionado com base no grau de dificuldade de destruição dos constituintes orgânicos do resíduo, sua toxicidade e concentração.

São também estabelecidas exigências de monitoramento periódico de emissões (Tabela 3.6), monitoramentos contínuos dos parâmetros de controle da combustão, dos resíduos recebidos na planta de co-processamento, dos parâmetros operacionais e de efluentes líquidos.

**Tabela 3.6** - Freqüências dos monitoramentos não contínuos, estabelecidos pela Norma CETESB P4.263/03, para fornos de produção de clínquer co-processando resíduos

<b>Poluente</b>	<b>Local</b>	<b>Freqüência</b>
Material particulado	Efluente gasoso (chaminé)	Semestral
Óxidos de nitrogênio	Efluente gasoso (chaminé)	Semestral
Teste de queima completo	Efluente gasoso (chaminé)	Bienal

Fonte: CETESB (2003)

As bases do monitoramento ambiental deverão ser definidas caso a caso, com base nos resultados de estudo de análise de risco, estudo de dispersão atmosférica e características da área de entorno do empreendimento.

A norma aborda também questões relacionadas às exigências de licenciamento das unidades de mistura de resíduos, vinculadas à atividade de co-processamento, destinadas à preparação de *blend* a ser alimentado no forno de clínquer (CETESB, 2003).

### **3.4 - Legislação americana para destruição térmica de resíduos perigosos**

Dempsey e Oppelt (1999) referem que os primeiros padrões federais americanos para o controle das emissões aplicáveis à incineração foram estabelecidos para os incineradores municipais sob as provisões do *New Source Performance Standards* (NSPS). Posteriormente a *U. S. Environmental Protection Agency* (USEPA) fixou regras mais restritivas requerendo também o uso de técnicas de boas práticas de combustão caracterizadas por um conjunto de procedimentos que resultavam na combustão mais eficiente com a minimização da geração de produtos indesejados.

A legislação federal americana está disponível no *ELETRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS* (e-CFR, 2003) composto por 50 Títulos, sendo o de nº 40 destinado à Proteção do Meio ambiente. Esse Título é composto por vários volumes divididos em capítulos, sub-capítulos, partes e sub-partes, tratando-se de uma complexa coletânea de regulamentos e procedimentos.

#### **3.4.1 - Regulamento para a queima de resíduos em caldeiras e fornos industriais**

Em 21 de fevereiro de 1991 foi editado sob o Título 40, Parte 266, Sub-parte H o regulamento *Hazardous Waste Burned in Boilers and Industrial Furnaces* (BIF), disponível no e-CFR (2003), relativo ao controle das emissões de compostos orgânicos, metais tóxicos, cloreto de hidrogênio, cloro livre e material particulado provenientes da queima de resíduos perigosos em caldeiras e fornalhas industriais.

Alguns aspectos importantes no contexto desta pesquisa serão abordados em relação aos parâmetros citados. Observe-se que Mantus (1992)

relata que a USEPA classifica o forno de clínquer como fornalha industrial. Assim, as cimenteiras americanas que utilizam resíduos como combustíveis suplementares estão sujeitas aos requisitos estabelecidos no BIF.

#### 3.4.1.1 - Padrões para controle de emissões orgânicas

O regulamento define que um forno de clínquer queimando resíduos perigosos como combustível suplementar deve atingir a EDR de 99,99% para todos os constituintes orgânicos perigosos presentes no resíduo alimentado. Para demonstrar essa conformidade a EDR de 99,99% deve ser obtida em teste de queima para cada PCOP selecionado. Os PCOP's são definidos baseados no grau de dificuldade de destruição dos constituintes orgânicos do resíduo e na concentração ou massa deles no resíduo alimentado.

Dellinger, Pershing e Sarofim (1993) comentam que o nível de 99,99% reflete a EDR que a agência reguladora considera indicar que as emissões subseqüentes não representam risco significativo à saúde.

A EDR é determinada para cada PCOP com base na equação:

$$EDR = \left[ 1 - \frac{m_{sai}}{m_{ent}} \right] \times 100 \quad (3.1)$$

onde:

$m_{ent}$ : é a taxa alimentada em massa de um PCOP no resíduo perigoso queimado no forno rotativo, e

$m_{sai}$ : é a taxa de emissão em massa do mesmo PCOP detectado no gás da chaminé lançado na atmosfera.

A queima de resíduos identificados como dioxinas, codificados pela USEPA como F020, F021, F022, F023, F026 e F027 ou seus derivados, deve demonstrar uma EDR de 99,9999% para cada PCOP testado. Essa performance deve ser demonstrada com PCOP's mais difíceis de queimar que o tetra-, penta- e hexaclorodibenzo-para-dioxinas e dibenzofuranos. Essa codificação é a mesma adotada na NBR 10004 (ABNT, 1987).

### 3.4.1.2 - Destruição de produtos de combustão incompleta (PIC's)

Dellinger, Pershing e Sarofim (1993) afirmam que embora o padrão de eficiência de destruição e remoção de orgânicos busque assegurar a adequada destruição dos PCOP's no forno de clínquer, pode haver uma significativa quantidade de PCI's nas emissões lançadas na atmosfera se adequadas condições de combustão não forem garantidas.

Mantus (1992) cita que a USEPA define PIC's como compostos orgânicos não queimados que estavam presentes no resíduo, produtos de decomposição térmica resultantes de constituintes orgânicos no resíduo ou compostos sintetizados durante ou imediatamente após a combustão.

Dempsey e Oppelt (1999) referem que os PCI's são controlados pela fixação de limites para os parâmetros que assegurem que o equipamento está sendo operado em boas condições de combustão. Para obter essa garantia foram estabelecidos padrões de operação baseados no monitoramento dos níveis de monóxido de carbono (CO) e de hidrocarbonetos totais (HCT) (e-CFR, 2003).

### 3.4.1.3 - Limites para o monóxido de carbono e hidrocarbonetos

A concentração de CO na chaminé do forno, demonstrada durante teste de queima, não pode exceder 100 ppm<sub>v</sub> (20°C, 1 atm, bs) baseada na média horária móvel<sup>9</sup>, monitorada e corrigida continuamente a 7% O<sub>2</sub> (bs). Os níveis de CO e oxigênio devem ser monitorados continuamente em conformidade com as especificações de desempenho estabelecidas. Mantus (1992) comenta que atender a esse limite é difícil para muitos fornos que operam sob boas condições de combustão com combustível convencional.

Para contornar essa situação o e-CFR (2003) prevê a possibilidade de que seja estabelecido um padrão alternativo para o CO compatível com as condições operacionais específicas do forno testado. Esse limite poderá ser

---

<sup>9</sup> Média horária móvel é a média aritmética dos 60 últimos valores médios de 1 minuto registrados pelo sistema de monitoramento contínuo.



autorizado desde que as concentrações de HCT no gás da chaminé não excedam 20 ppm<sub>v</sub>, com base nas médias horárias móveis, expressas como propano, continuamente monitoradas e corrigidas a 7% O<sub>2</sub>, (bs). O padrão alternativo será fixado com base nas maiores médias horárias obtidas durante o teste de conformidade ou de queima, continuamente monitoradas e corrigidas a 7% O<sub>2</sub>, (bs). Caso a alimentação dos resíduos seja efetuada em qualquer outro local que não a extremidade de descarga do clínquer, o limite de HCT exigível é o de 20 ppm<sub>v</sub> independentemente do nível do CO atender ao limite de 100 ppm<sub>v</sub>.

Dempsey e Oppelt (1999) citam que fornos incapazes de atender ao limite de hidrocarbonetos de 20 ppm<sub>v</sub>, devido à presença de substâncias orgânicas na matéria-prima, podem dispor de limite alternativo de HCT definido por amostragens, análises e modelagem de dispersão que demonstrem que as concentrações ao nível do solo não excedem aquelas recomendadas para não carcinogênicos e não representam altos riscos para indivíduo sob máxima exposição.

Fornos providos de ECP para material particulado seco na faixa de temperatura de 232,2°C a 398,9°C devem dispor de análise de risco específica para o local da instalação afim de demonstrar que as emissões de dibenzo-p-dioxinas e dibenzofuranos não aumentam o risco de câncer em mais que 1 em 100 000 durante o tempo de vida para um indivíduo sujeito à máxima exposição. A máxima exposição individual (MEI) é definida como a exposição de um indivíduo de 70 kg em localização de máxima exposição possível durante 24 horas por dia, 365 dias por ano no decorrer de período de esperança de vida de 70 anos.

Para casos com potencial para emissão de dioxinas e furanos exige-se que durante o teste de queima sejam determinadas as taxas de emissão dos congêneres de interesse de dibenzo-p-dioxinas cloradas e dibenzofuranos para estimativa da toxicidade equivalente em termos da 2,3,7,8-TCDD, assim como a modelagem de dispersão para prognosticar a máxima concentração média anual equivalente de 2,3,7,8-TCDD no nível do solo fora da planta.

A comprovação da conformidade com os limites de CO e HCT estabelecidos ou para estabelecimento de limites alternativos devem ser obtidos durante a verificação da EDR, e quando aplicável, durante a verificação de emissões de dioxinas e furanos e outros orgânicos.

Mantus (1992) comenta que todos esses regulamentos foram desenvolvidos para assegurar que os constituintes orgânicos do combustível preparado com resíduos perigosos são destruídos e que nenhum composto orgânico tóxico é lançado na atmosfera em quantidade que possa afetar adversamente a saúde pública.

#### **3.4.1.4 - Compostos metálicos**

Dellinger, Pershing e Sarofim (1993) citam que ao contrário dos orgânicos, os metais pesados introduzidos no forno de clínquer não são destruídos. A regulamentação preocupa-se, então, com sua distribuição entre as várias vias de saída do forno, em particular com a quantidade que certos elementos tóxicos poderiam ser emitidos através das chaminés de exaustão.

Conforme interpretado por Mantus (1992) no BIF, disponível no e-CFR (2003), são estabelecidos os padrões de emissão para 10 metais: antimônio, arsênio, bário, berílio, cádmio, cromo hexavalente, chumbo, mercúrio, prata e tálio. A USEPA selecionou esses metais com base no potencial estimado para provocar efeitos adversos à saúde e ao meio ambiente. Quatro desses metais (arsênio, berílio, cádmio e cromo hexavalente) são classificados pela agência norte-americana como cancerígenos e os demais como não carcinogênicos.

Dempsey e Oppelt (1999) comentam que os limites de emissão para os dez metais tóxicos foram estabelecidos com base em riscos à saúde que seriam decorrentes da sua inalação por um indivíduo hipotético sob MEI. Para os metais carcinogênicos os limites foram fixados de forma que o risco de câncer para o indivíduo sob MEI, incrementado com a emissão dos metais não seja maior que 1 para 100 000 durante a esperança de vida. Para os metais não carcinogênicos os limites de emissão são baseados nas doses referência, abaixo das quais não têm sido observado nenhum efeito adverso à saúde, e para o chumbo com base no padrão nacional de qualidade do ar.

Os limites de emissão são então calculados partindo das concentrações de referência no ar e utilizando modelos de dispersão, no sentido inverso, determinam-se as emissões correspondentes na chaminé. Os

padrões descritos são implementados através da classificação em três categorias, sendo aceitável o atendimento a qualquer uma delas, as quais permitem maiores taxas de emissão (e taxas de alimentação) se o responsável pela instalação opta por efetuar testes e análises mais detalhadas em função das características de seu processo.

#### **3.4.1.4.1 - Categoria 1 (*Tier 1*)**

Assume que todos os metais que entram no sistema de combustão são emitidos através da chaminé na forma de vapor ou de particulado, sendo projetado para sistemas com baixas concentrações de metais na corrente de resíduos.

#### **3.4.1.4.2 - Categoria 2 (*Tier 2*)**

O responsável realiza avaliação das emissões para determinar o percentual de metais que é efetivamente emitido em relação ao alimentado, considerando a partição entre a incorporação no clínquer ou pó de forno e a quantidade retida pelo equipamento de controle de poluição do ar. Se o teste de emissões demonstrar que a quantidade de metais alimentados no sistema é maior que aquela emitida, então uma concentração maior é autorizada para ser alimentada no forno, desde que respeitado o limite de emissão estabelecido.

#### **3.4.1.4.3 - Categoria 3 (*Tier 3*)**

Nesta condição o nível de controle dos metais deve ser demonstrado pela amostragem em chaminé para determinar a taxa de emissão de cada um. Adicionalmente deve ser efetuada a modelagem da dispersão atmosférica para prever a máxima média anual da concentração de cada metal no nível do solo fora da planta industrial. Essas avaliações devem demonstrar que os níveis ambientais aceitáveis não são excedidos. Essas avaliações são desenvolvidas

por instalações que têm uma grande variedade de metais nas correntes de resíduos utilizadas.

#### **3.4.1.5 - Cloreto de hidrogênio e gás cloro (HCl e Cl<sub>2</sub>)**

Dellinger, Pershing e Sarofim (1993) referem que a principal fonte de cloro no forno de clínquer que utiliza resíduos é devida aos compostos halogenados presentes no próprio resíduo e o e-CFR (2003) define três categorias para limitar as emissões de HCl e Cl<sub>2</sub> idênticas às usadas no controle das emissões de metais. O responsável deve cumprir com e implementar os controles de HCl e Cl<sub>2</sub> da mesma maneira que para os metais.

##### **3.4.1.5.1 - Categorias 1 e 2 (*Tier 1 e 2*)**

Os limites da autorização são determinados para o cenário de pior caso pela consulta aos valores na tabela de classificação da taxa de alimentação disponíveis na legislação ambiental.

##### **3.4.1.5.2 - Categoria 3 (*Tier 3*)**

Os níveis autorizados da corrente de alimentação são determinados pelos testes de emissões e modelagem de dispersão atmosférica tais que as concentrações referência do ar para HCl e Cl<sub>2</sub> não sejam excedidos. As taxas de alimentação são determinadas durante o teste de conformidade.

#### **3.4.1.6 - Material particulado (MP)**

É estabelecido que o forno de clínquer queimando resíduos perigosos não pode emitir mais que 180 mg/m<sup>3</sup> padrão (20°C, 760 mmHg) de material particulado corrigido a 7% O<sub>2</sub>, (bs). É previsto que a autoridade ambiental pode

impor padrões mais baixos para esse parâmetro, cujo cumprimento deve ser demonstrado pelas emissões nos testes de conformidade.

Nas instalações onde a reciclagem do material particulado é praticada, os operadores podem cumprir com 1 dos 3 itens seguintes:

- *monitoramento diário do material particulado coletado para assegurar que os níveis de metais não excedem os limites estabelecidos (inventário para enriquecimento de metais);*
- *amostragem em chaminé diária para metais; ou*
- *condicionamento prévio da instalação para o teste de conformidade para assegurar que as emissões de metais estão em equilíbrio com as taxas de alimentação do metal (e-CFR, 2003, tradução nossa).*

### **3.5 - Legislação da Comunidade Européia para destruição térmica de resíduos**

Foi efetuada pesquisa na Internet acerca da legislação ambiental da Comunidade Européia (CE), direcionada, principalmente, às referências contidas na norma atual que regulamenta a incineração e co-incineração de resíduos. Verificou-se que a CE, a exemplo dos casos brasileiro e americano, dispõe de vasta legislação ambiental destacando-se uma Diretiva de 1975 (EUROPEAN COUNCIL, 1975), que alertava os países membros para a necessidade de adoção de medidas que estimulassem a prevenção, reciclagem e processamento de resíduos para recuperação de matérias-primas e, possivelmente, de energia.

São várias normas direcionadas à classificação, transporte, gerenciamento, tratamento e disposição de resíduos, outras tantas para limitação das emissões de poluentes atmosféricos, fixação de padrões de qualidade do ar, avaliação e gerenciamento, bem como regulamentação que assegure o livre acesso público às informações das condições ambientais.

Com relação à destruição térmica de resíduos destaca-se a Diretiva 94/67/EC de 16 de dezembro de 1994 (EUROPEAN COUNCIL, 1994) direcionada a propiciar os meios e processos para prevenir, ou onde isto não fosse praticável, reduzir, tanto quanto possível, os efeitos negativos sobre o meio ambiente e os riscos resultantes para a saúde humana, decorrentes da incineração de resíduos perigosos.

Com a edição da Diretiva 2000/76/EC de 04 de dezembro de 2000 (EUROPEAN COUNCIL, 2000), que atualizou os procedimentos destinados ao licenciamento, implantação, operação e monitoramento de plantas destinadas à incineração e co-incineração de resíduos perigosos no âmbito da Comunidade Européia, está prevista a revogação da 94/67/EC em 28 de dezembro de 2005.

**Diretiva 2000/76/EC de 04 de dezembro de 2000**, dispõe sobre a incineração de resíduos.

O Parlamento Europeu e o Conselho da União Européia, responsáveis pela adoção dessa diretiva, relacionaram, dentre outros motivos, os seguintes para justificar a sua aprovação:

- *que um alto nível de proteção ambiental e da saúde humana requer a definição e manutenção de rigorosas condições operacionais, requisitos técnicos e valores limite de emissão para plantas de incineração e co-incineração de resíduos;*
- *que o Conselho da União Européia reiterou sua convicção que a prevenção deve ser a principal prioridade de qualquer política racional de resíduo em relação à minimização da produção e propriedades perigosas do resíduo, seguida do reuso e recuperação e finalmente a disposição segura;*
- *que a distinção entre resíduos perigosos e não perigosos se baseia principalmente nas propriedades dos resíduos antes da incineração ou co-incineração, mas não nas diferenças das emissões; os mesmos valores de limite de emissão são aplicáveis à incineração ou co-incineração de resíduos perigosos e não perigosos;*
- *a co-incineração de resíduo em planta não projetada originalmente para incinerar resíduos não deve provocar emissões de substâncias poluentes maiores nos gases resultantes de tal co-incineração que aquelas permitidas para plantas dedicadas de incineração;*
- *disposições devem ser estabelecidas para casos nos quais os valores limites de emissão são excedidos, bem como para paradas tecnicamente inevitáveis, distúrbios ou falhas nos dispositivos de controle de poluição ou de medição (EUROPEAN COUNCIL, 2000, p.1-3, tradução nossa).*

Essa diretiva contemplou as plantas de incineração e co-incineração de resíduos mantendo o objetivo de prevenir ou limitar tanto quanto possível os efeitos negativos sobre o meio ambiente, em particular a poluição provocada pelas emissões no ar, solo, águas superficiais e subterrâneas e os riscos resultantes para a saúde humana, provenientes da incineração e co-incineração de resíduos. Estabelece que o objetivo deverá ser atingido pela fixação de rigorosas condições operacionais e requisitos técnicos através de um conjunto de valores limites de emissão.

A planta de co-incineração é definida como qualquer planta móvel ou estacionária cuja finalidade principal é a geração de energia ou manufatura de produtos na qual os resíduos são usados como combustível regular ou adicional, ou na qual eles são tratados termicamente com o propósito de destinação.

A diretiva estabelece que uma planta de incineração ou co-incineração não iniciará sua operação sem dispor da licença destinada à atividade e que seu projeto, equipamentos e operação deverão prever, tanto quanto possível a recuperação do calor gerado, a minimização em quantidade de nocividade, a reciclagem e disposição adequada dos resíduos, bem como o atendimento aos requisitos de controle de poluição ambiental. O operador da planta de incineração ou co-incineração deverá adotar todas as medidas para prevenir efeitos negativos ao meio ambiente e à saúde humana quando do transporte e recepção de resíduos, determinando, previamente à aceitação do resíduo na planta, a massa de cada categoria pretendida, bem como as informações sobre as características físico-químicas e outras necessárias para avaliar a possibilidade e conveniência de sua utilização no processo.

As plantas de incineração e co-incineração deverão ser projetadas, construídas, equipadas e operadas de forma que os gases resultantes da combustão sejam submetidos, mesmo nas condições mais desfavoráveis, a uma temperatura de 850°C por tempo de 2 segundos, ou a 1 100°C se o conteúdo de substâncias orgânicas halogenadas, expressas como cloro, presente nos resíduos perigosos for superior a 1%.

Deverão dispor de sistema automático para interrupção da alimentação do resíduo em condições pré-determinadas ou a qualquer momento em que o monitoramento contínuo de emissões identifique a desconformidade com os valores limites estabelecidos, conforme apresentados na Tabela 3.7, a qual se refere apenas às plantas de co-incineração.

Foram definidos limites de emissão para as plantas de incineração e de co-incineração, no entanto, se numa planta de co-incineração mais de 40% do calor liberado vier do resíduo perigoso, deverão ser aplicados os limites de emissão definidos para os sistemas de incineração.

**Tabela 3.7** - Limites de emissão atmosférica (LE), estabelecidos pela Diretiva 2000/76 do Conselho Europeu, para a co-incineração de resíduos

Poluentes	LE	Unidades
Poeira total	30	mg/Nm <sup>3</sup>
HCl	10	mg/Nm <sup>3</sup>
HF	1	mg/Nm <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub> (plantas existentes)	800	mg/Nm <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub> (plantas novas)	500	mg/Nm <sup>3</sup>
Cd+Tl	0,05	mg/Nm <sup>3</sup>
Hg	0,05	mg/Nm <sup>3</sup>
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V	0,50	mg/Nm <sup>3</sup>
Dioxinas e furanos	0,10	ng/Nm <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	50	mg/Nm <sup>3</sup>
COT (carbono orgânico total)	10	mg/Nm <sup>3</sup>

Obs.:1 - Todos valores padronizados a 273K e 101,3kPa e corrigidos a 10% de oxigênio em base seca;

2 - até 01/01/2008 isenções para NO<sub>x</sub> podem ser autorizadas pela autoridade competente para fornos de cimento via úmida ou fornos que queimem menos que três toneladas de resíduo por hora, desde que previsto na licença um valor limite de emissão menor que 1200 mg/Nm<sup>3</sup>;

3 - até 01/01/2008 isenções para poeira podem ser autorizadas pela autoridade competente para fornos de cimento que queimem menos que três toneladas de resíduos por hora, desde previsto na licença um valor limite de emissão menor que 50 mg/Nm<sup>3</sup>;

4 - isenções podem ser autorizadas pela autoridade competente nos casos onde COT e SO<sub>2</sub> não resultam da queima de resíduo;

5 - valores limites para CO podem ser definidos pela autoridade competente

Fonte: EUROPEAN COUNCIL (2000), adaptada pelo autor

Estabeleceu parâmetros para controle dos efluentes líquidos gerados nos equipamentos de controle de poluentes atmosféricos, não sendo admitida em nenhuma circunstância a sua diluição com o propósito de cumprir com os valores limite de emissão.

Prevê que o sistema de monitoramento das emissões atmosféricas deve ser testado anualmente quanto à eficiência e medições para aferição das emissões devem ser realizadas periodicamente. Deverão ser monitoradas continuamente as emissões de óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, poeira total, carbono orgânico total, ácido clorídrico, ácido fluorídrico e dióxido de enxofre. Deverão ser também monitorados continuamente os parâmetros operacionais do processo tais como a temperatura da câmara de combustão e



a concentração de oxigênio, pressão, temperatura e conteúdo de vapor d'água no gás lançado na atmosfera. No mínimo deverão ser efetuadas duas avaliações por ano de metais pesados, dioxinas e furanos, com uma medida a cada três meses nos primeiros doze meses de operação.

A autoridade competente deverá estabelecer na licença o período máximo admissível para qualquer interrupção tecnicamente inevitável, distúrbios ou falhas dos sistemas de medição e controle de emissões no qual as substâncias regulamentadas talvez excedam os valores limite regulamentados. As plantas de incineração ou co-incineração não deverão em nenhuma hipótese continuar a incineração de resíduo por um período maior que 4 horas ininterruptas quando os limites de emissão são excedidos e a duração cumulativa da operação nessas condições será limitada a 60 horas ao longo de um ano (EUROPEAN COUNCIL, 2000).

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR 10004: Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1987a). NBR 10005: Lixiviação de resíduos - procedimento. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1987b). NBR 10006: Solubilização de resíduos - procedimento. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1987c). NBR 10007: Amostragem de resíduos - procedimento. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1989). *NBR 7501*: Transporte de produtos perigosos - terminologia. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1990). *NBR 11175*: Incineração de resíduos sólidos perigosos – padrões de desempenho - procedimento. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1992). *NBR 12235*: Armazenamento de resíduos sólidos - procedimento. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1996). *NBR 13741*: Destinação de bifenilas policloradas - procedimento. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1997). *NBR 8371*: Ascarel para transformadores e capacitores – características e riscos. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (1997a). *NBR 13882*: Líquidos isolantes elétricos - determinação do teor de bifenila policlorada (PCB). Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (2000). *NBR 13221*: Transporte de resíduos. Rio de Janeiro.

BRASIL (1975). Decreto-Lei n. 1413, de 14 de agosto de 1975. Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocado por atividades industriais. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 15 ago. 1979. Disponível em:<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/D1413.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D1413.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1979). Portaria n. 53, de 01 de março de 1979. Dispõe sobre o acondicionamento e destinação de resíduos sólidos em geral. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 08 mar. 1979. Disponível em:<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/portaria/P53.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/portaria/P53.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1981). Lei Federal n. 6938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 02 set. 1981. Disponível em:<<http://www.lei.adv.br/6938-81.htm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1986). Resolução CONAMA n.001, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre os procedimentos relativos a Estudo de Impacto Ambiental. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 07 mar. 1986. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm> 01>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1989). Resolução CONAMA n.005, de 15 de junho de 1989. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar - PRONAR. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 25 ago. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1990). Resolução CONAMA n.003, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 16 ago. 1990. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1993). Resolução CONAMA n.009, de 31 de agosto de 1993. Estabelece definições e torna obrigatório o recolhimento e destinação adequada de todo o óleo lubrificante usado ou contaminado. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 01 out, retificada em 21 out. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1996). Resolução CONAMA n.23, de 12 de dezembro de 1996. Proíbe a importação de resíduos perigosos - classe I e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 20 jan. 1997. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res96/res2396.doc>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1997). Resolução CONAMA n.237, de 19 de dezembro de 1997. Regulamenta aspectos de licenciamento ambiental estabelecidos na política nacional do meio ambiente. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 22 dez. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1998). Lei Federal n. 9605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 13 fev. 1998. Disponível em:<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L9605.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9605.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1999). Resolução CONAMA n.257, de 30 de junho de 1999. Dispõe sobre a obrigatoriedade dos estabelecimentos que comercializam ou prestam assistência técnica de pilhas e baterias aceitarem a devolução das unidades usadas após o esgotamento energético. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 22 jul. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm> >. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1999a). Resolução CONAMA n.258, de 26 de agosto de 1999. Dispõe sobre a obrigatoriedade das empresas fabricantes e importadoras de pneumáticos de coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 02 dez. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm> >. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1999b). Resolução CONAMA n.264, de 26 de agosto de 1999. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 20 mar. 2000. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (2002). Resolução CONAMA n.307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 17 jul. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (2002a). Resolução CONAMA n.313, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre o Inventário nacional de resíduos sólidos industriais. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 22 nov. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (2002b). Resolução CONAMA n.316, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre os procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 20 nov. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

BRASIL. Constituição (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF: Senado.

COIMBRA. J. A. A. (2003). In: MILARÉ ADVOGADOS CONSULTORIA EM MEIO AMBIENTE. Legislação ambiental. Disponível em <<http://www.milare.adv.br/legis04.htm>>. Acesso em: 23 nov.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (2003). *Procedimento para utilização de resíduos em fornos de clínquer* – norma P4.263. São Paulo.

DELLINGER, H.B.; PERSHING, D.W.; SAROFIM, A.F. (1993). *Evaluation of the origin, emissions and control of organic and metal compounds from cement kilns co-fired with hazardous wastes*. Washington: Scientific Advisory Board on Cement Kiln Recycling - SAB.

DEMPSEY, C.R.; OPPELT, E.T. (1999). *Incineração de resíduos perigosos: uma revisão crítica*. Tradução de Milton Norio Sogabe. São Paulo; A & WMA – Seção Brasil.

ELECTRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS (2003). In: Title 40: Protection of Environment. Part 266. Subpart H-Hazardous waste burned in boilers and industrial furnaces - BIF. Disponível em <<http://www.gpoaccess.gov/ecfr/>>. Acesso em: 09 Dec.

EUROPEAN COUNCIL (1975). Council Directive 75/442/EEC of 15 July 1975 on waste. *Official Journal of the European Communities*, Brussels, 25 July. 1975. Disponível em:<<http://www.hdm-stuttgart.de/printing-green/D75442.html>>. Acesso em: 16 Dec. 2003.

\_\_\_\_\_. (1994). Council Directive 94/67/EC of 16 December 1994 on the incineration of hazardous waste. *Official Journal of the European Communities*, Brussels, 31 Dec. 1994. Disponível em:<[http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga\\_doc?...](http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?...)>. Acesso em: 16 Dec. 2003.

\_\_\_\_\_. (2000). Directive 2000/76/EC of the European Parliament and the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste. *Official Journal of the European Communities*, Brussels, 28 Dec. 2000. Disponível em:<[europa.eu.int/comm/environment/wasteinc/newdir/2000-76\\_en.pdf](http://europa.eu.int/comm/environment/wasteinc/newdir/2000-76_en.pdf)>. Acesso em: 16 Dec. 2003.

LAMB, C.; NAIL, T. L. (1997). *The regulatory history and relationship of calorific heat value in waste materials and their use in cement kilns*. Louisville: Green Environmental Services.

MANTUS, E.K. (1992). *All Fired up: burning hazardous waste in cement kilns*. Seattle: Environmental Toxicology International.

SÃO PAULO (Estado) (1973). Lei n.118, de 29 de junho de 1973. Autoriza a Constituição de uma sociedade por ações, sob denominação de CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle da Poluição das Águas, e dá providências correlatas. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo. Disponível em:<[http://www.ambiente.sp.gov.br/leis\\_internet/estadual/leis/118\\_73.htm](http://www.ambiente.sp.gov.br/leis_internet/estadual/leis/118_73.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1975). Decreto n.5.993, de 16 de abril de 1975. Altera a denominação e as atribuições da Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle de Poluição das Águas - CETESB, e dá providências correlatas. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo. Disponível em:<[http://www.ambiente.sp.gov.br/leis\\_internet/estadual/decretos/5993\\_75.htm](http://www.ambiente.sp.gov.br/leis_internet/estadual/decretos/5993_75.htm)>. Acesso em: 16 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1976). Decreto n.8.468, de 8 de setembro de 1976. Aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo. Disponível em:<[http://www.ambiente.sp.gov.br/leis\\_internet/76\\_8468.doc](http://www.ambiente.sp.gov.br/leis_internet/76_8468.doc)>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1976a). Lei n.997, de 31 de maio de 1976. Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo. Disponível em:<[http://www.ambiente.sp.gov.br/leis\\_internet/76\\_8468.doc](http://www.ambiente.sp.gov.br/leis_internet/76_8468.doc)>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1986). Decreto n.24932, de 24 de março de 1986. Institui o Sistema Estadual do Meio Ambiente, cria a Secretaria de Estado do Meio Ambiente, e dá providências correlatas. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo. Disponível em:<[http://www.ambiente.sp.gov.br/leis\\_internet/estadual/decretos/24932\\_86.htm](http://www.ambiente.sp.gov.br/leis_internet/estadual/decretos/24932_86.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1992). Lei n.7.750, de 31 de março de 1992. Dispõe sobre a política estadual de saneamento, e dá outras providências. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo, 25 mar. 2003. Disponível em:<[http://www.ambiente.sp.gov.br/leis\\_internet/outras\\_leis/legis\\_outras.htm](http://www.ambiente.sp.gov.br/leis_internet/outras_leis/legis_outras.htm)>. Acesso em: 23 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1994). Resolução SMA n.42, de 29 de dezembro de 1994. Aprova os procedimentos para análise de estudos de impacto ambiental (EIA e RIMA), no âmbito da Secretaria de Estado do Meio Ambiente. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo. Disponível em:<[http://www.ambiente.sp.gov.br/leis\\_internet/geral/licenc/sma4294.htm](http://www.ambiente.sp.gov.br/leis_internet/geral/licenc/sma4294.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1997). Lei n.9.509, de 20 de março de 1997. Dispõe sobre a Política Estadual do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo. Disponível em:<[http://www.ambiente.sp.gov.br/leis\\_internet/geral/politica\\_meio/lei\\_est9509\\_97.htm](http://www.ambiente.sp.gov.br/leis_internet/geral/politica_meio/lei_est9509_97.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1997a). Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer. Fornece suporte técnico para licenciamento das atividades de reaproveitamento de resíduos sólidos em fornos de produção de clínquer. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo, 25 nov.1997. Ineditoriais, p.13-15.

\_\_\_\_\_. (1997b). Resolução SMA n.50, de 25 de julho de 1997. Estabelece critérios para o licenciamento ambiental de aterros sanitários e usinas de reciclagem e compostagem de resíduos sólidos domésticos operados por municípios. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo. Disponível em:<[http://www.ambiente.sp.gov.br/leis\\_internet/outras\\_leis/legis\\_outras.htm](http://www.ambiente.sp.gov.br/leis_internet/outras_leis/legis_outras.htm)>. Acesso em: 23 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (2002). Decreto n.47.397, de 4 de dezembro de 2002. Dá nova redação ao Título V e ao Anexo 5 e acrescenta os Anexos 9 e 10, ao Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, aprovado pelo Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo. Disponível em:<[http://www.imprensaoficial.com.br/cgi/om\\_isapi.dll](http://www.imprensaoficial.com.br/cgi/om_isapi.dll)>. Acesso em: 23 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (2002a). Decreto n.47.400, de 4 de dezembro de 2002. Regulamenta dispositivos da Lei Estadual nº 9.509, de 20 de março de 1997, referentes ao licenciamento ambiental, estabelece prazos de validade para cada modalidade de licenciamento ambiental e condições para sua renovação, estabelece prazo de análise dos requerimentos e licenciamento ambiental, institui procedimento obrigatório de notificação de suspensão ou encerramento de atividade, e o recolhimento de valor referente ao preço de análise. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo. Disponível em:<[http://www.imprensaoficial.com.br/cgi/om\\_isapi.dll](http://www.imprensaoficial.com.br/cgi/om_isapi.dll)>. Acesso em: 23 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (2002b). Resolução SMA n.41, de 17 de outubro de 2002. Dispõe sobre procedimentos para o licenciamento ambiental de aterros de resíduos inertes e da construção civil no Estado de São Paulo. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo, 23 out.2002. Disponível em:<<http://www.mp.sp.gov.br/caouma/Avisos%20Publicados/2002/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20SMA%2041-02.htm>>. Acesso em: 23 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (2003). Lei n.11.387, de 27 de maio de 2003. Dispõe sobre a apresentação, pelo poder executivo, de um plano diretor de resíduos sólidos para o estado de São Paulo, e dá providências correlatas. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo, 25 mar. 2003. Disponível em:<<http://cetesbnet/legislacao/LEMA/01%20Estadual/leis/11387-03.doc>>. Acesso em: 14 out. 2004.



\_\_\_\_\_. (2003a). Resolução SMA n.31, de 22 de julho de 2003. Dispõe sobre procedimentos para o gerenciamento e licenciamento ambiental de sistemas de tratamento e disposição final de resíduos de serviços de saúde humana e animal no Estado de São Paulo. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo. Disponível em:<[http://www.ambiente.sp.gov.br/leis\\_internet/estadual/txt\\_resolucao.htm](http://www.ambiente.sp.gov.br/leis_internet/estadual/txt_resolucao.htm)>. Acesso em: 23 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (2004). Decreto n.48.523, de 2 de março de 2004. Introduz alterações no regulamento da Lei n.997, de 31 de maio de 1976, aprovado pelo Decreto n.8468, de 8 de setembro de 1976 e suas alterações posteriores, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente e dá providências correlatas. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo, 3 mar. 2004. Disponível em:<<http://cetesbnet/legislação/LEMA/01%20Estadual/decretos/48523-04.doc>>. Acesso em: 14 out. 2004.

SÃO PAULO. Constituição (1989). *Constituição do Estado de São Paulo*. São Paulo, SP: Assembléia Legislativa.

## **CAPÍTULO 4 – PROCESSO INDUSTRIAL**

### **4.1 - Introdução**

Conforme descrito por Wittmann e Koester (1988) a manufatura do clínquer para cimento é um processo que envolve o manuseio de grandes quantidades de materiais que passam por redução de tamanho, mistura, combinação e reações termo-químicas. Para que ocorram as reações são utilizadas enormes quantidades de matérias-primas e de energia para atingir as altas temperaturas necessárias à formação das fases do clínquer. Essas altas temperaturas dependem das condições de queima dos combustíveis no maçarico principal do forno e, quando disponível, no pré-calcinador.

Devido a essas características considerou-se conveniente apresentar algumas informações básicas sobre o processo de combustão, preliminarmente à apresentação das etapas de manufatura do clínquer para cimento.

### **4.2 - Processo de combustão**

A combustão é uma reação química rápida entre um combustível e um oxidante, normalmente o oxigênio puro ou do ar atmosférico, em condições ideais de temperatura e pressão, que resulta em intenso desprendimento de energia na forma de calor e luz (LIMA, 1974).

Uma reação química consiste em modificações da arquitetura molecular de um elemento ou composto alterando as suas propriedades e resultando na formação de outros compostos. Para que o processo de

combustão ocorra algumas condições devem ser previamente satisfeitas, como por exemplo o combustível precisa ser aquecido até atingir a temperatura de ignição. Nessa temperatura ocorre maior atividade cinética molecular a qual depende do meio em que se desenvolve a combustão. A pressão de trabalho é um dos fatores mais importantes para atingir a temperatura de ignição.

Havendo disponibilidade de uma mistura conveniente do combustível e do oxigênio, em temperatura e pressão adequadas, o processo tem início. A partir desse momento e com o processo atingindo uma temperatura superior à de ignição a reação passa a se realizar naturalmente com grande desprendimento de energia e tornando-se auto-sustentável.

#### 4.2.1 - Combustão no forno de clínquer

Os fornos rotativos para produção de clínquer são fornalhas cilíndricas de aço carbono com dimensões aproximadas de 3 m a 8 m de diâmetro e de 50 m a 230 m de comprimento dispoindo de motores elétricos de acionamento para promover o movimento giratório em seu eixo longitudinal na faixa de 1 rpm a 3 rpm. São montados levemente inclinados em relação a horizontal (2,5% a 4,5%), revestidos com material refratário altamente resistente à temperatura para proteção do casco e para proporcionar a retenção do calor no interior da fornalha. O calor é gerado pela queima dos combustíveis selecionados através do maçarico principal do forno instalado na extremidade mais baixa, podendo também utilizar queimadores secundários (THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION (CEMBUREAU), 1999; U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), 1994). A título ilustrativo é apresentada na Figura 4.1 uma chama típica obtida na zona de queima primária de forno rotativo de produção de clínquer.

Acerca do queimador Maringolo (2001) comenta que:

*O queimador simples ou de múltiplos canais alinhado paralelamente ao eixo longitudinal do forno, posicionado no centro da seção transversal deste, deve ser capaz de realizar combustão completa em presença de baixo excesso de ar (secundário) e com geração mínima de CO e NO<sub>x</sub>, produzindo uma chama curta, estreita e fortemente radiante para boa transferência de calor da chama para o material na zona de sinterização do forno (MARINGOLO, 2001, p.37).*



**Figura 4.1** – Vista parcial da zona de queima primária de um forno de clínquer com resfriador de satélites

Fonte: Fotografia cedida pela Companhia de Cimento Ribeirão Grande – CCRG

Smart, Mullinger e Jenkins (1998) relatam que fornos rotativos são utilizados em muitos processos industriais, porém, de longe a grande usuária é a indústria cimenteira, a qual opera em torno de 2.000 equipamentos em todo o mundo. Citam que a química da oxidação de combustíveis hidrocarbonetos é muito complexa e que nenhuma reação pode ocorrer até que o oxigênio do ar entre em contato com o combustível. Como resultado todo o processo de combustão ocorre conforme as etapas seguintes:

- *mistura;*
- *ignição;*
- *reação química; e*
- *dispersão dos produtos (SMART, MULLINGER e JENKINS, 1998, p.15. tradução nossa).*

Os autores também referem que a velocidade global da combustão é dependente do estágio mais lento dentre os referidos. Na maioria dos sistemas de combustão industrial a mistura é lenta enquanto que as outras etapas são muito rápidas. Comentam ainda que a combustão e a sua integração no projeto do equipamento de transferência de energia é o mais complexo de todos os

problemas de engenharia de processo, requerendo, simultaneamente as soluções para as transferências de calor, de massa e de momento.

Greco (1996) também menciona que o controle do processo de produção em fornos rotativos é assunto extremamente complexo da tecnologia de combustão. Refere que inúmeras reações químicas em diferentes graus de intensidade, tanto em fase gasosa como líquida e sólida, altas temperaturas, radiação térmica, elevadas taxas de troca de calor e de massa e escoamentos multifásicos tornam extremamente difícil a modelagem, o acompanhamento e o controle desse processo.

Cita que o comportamento de um forno rotativo é muito influenciado pelas características das matérias-primas, pelos perfís de temperatura, pelas taxas de troca de calor por radiação e convecção, pelas velocidades relativas dos fluxos nos três eixos, pelas concentrações das substâncias geradas ou introduzidas entre outros fatores.

Posicionamento defendido por Menon et al. (1993a) acerca dos combustíveis utilizados nos fornos rotativos, considera que além de serem economicamente viáveis devem também possuir características físico-químicas compatíveis com as exigências de combustão do processo. O autor cita que os combustíveis devem possuir poder calorífico inferior (pci) de, no mínimo, 18 800 kJ/Kg (4 490 kcal/kg), para que possa ser obtida a temperatura mínima necessária na zona de sinterização ou de queima.

A qualidade do produto é muito influenciada pelos parâmetros de controle do processo em decorrência de uma relação íntima entre equipamentos, combustíveis e materiais utilizados. Os combustíveis empregados devem possuir componentes químicos que tenham pouca ou nenhuma influência negativa na composição final do clínquer, garantindo a sua qualidade e a possibilidade de gerar um tipo característico de chama, de acordo com cada tipo de combustível consumido.

A distribuição de propriedades num forno rotativo, tais como, temperaturas, concentrações, velocidades, entre outras, pode afetar as características finais do clínquer. O processo de fabricação requer zonas de aquecimento e de resfriamento primário do material com ritmos adequados para a obtenção da estrutura cristalina desejável. O não atendimento a essas condições poderá resultar na formação de cristais com características

inadequadas, aumentando os custos de moagem e alterando a qualidade do produto final (MENON et al., 1993a; GRECO, 1996).

Obviamente tais questões interessam e muito aos empreendedores em face da necessidade de manutenção da qualidade do cimento, bem como para o controle de seu custo final, num processo já intensivo em uso de energia. Os custos de transformação da matéria-prima podem também ser otimizados mediante a operação do equipamento dentro das condições ideais de processamento. O fluxo de calor no forno, como resultado das condições de combustão, além de interferir na qualidade do clínquer tem consequência direta no consumo do combustível. Com o controle da chama pode-se obter uma economia de até 5% do combustível que seria consumido se fosse usado um queimador não conjugado à aerodinâmica do forno (MENON et al., 1993a).

Acerca da redução dos custos de produção, Maringolo (2001), refere que a indústria americana entre os anos de 1973 a 1987 promoveu o corte de 39% no número de homens/hora gastos na produção de 1 000 t de cimento e que em relação à energia ocorreu a redução de 28% entre os anos de 1973 a 1988. Comenta que, de 1989 a 1995, essa tendência de redução foi nivelada para ambos os parâmetros e que tais valores se mantêm mais ou menos constantes.

O autor afirma que:

*Esse nivelamento indica que a otimização do processo se aproxima das limitações impostas pelas leis da termodinâmica, o que representa um grande desafio para a indústria de cimento, pois, implementados os principais e mais dramáticos cortes de pessoal e ganhos de eficiência, restam apenas ajustes menores a serem feitos, e apenas tecnologias inovadoras, como dispositivos para a utilização de resíduos industriais, podem trazer novas reduções nos custos da produção (MARINGOLO, 2001, p.22).*

A implementação dessa alternativa repercute positivamente na questão ambiental, seja enquanto técnica associada ao gerenciamento de resíduos, seja como elemento que propicia maior racionalização na exploração e no uso de recursos naturais necessários para a produção do clínquer e cimento.

Sobre essa questão existem relatos, como o mencionado por Kemesis (1993), acerca da manifestação da Associação de Recicladores em fornos de clínquer dos Estados Unidos de que os custos para obtenção da conformidade ambiental cancela qualquer benefício extra do uso de resíduos

combustíveis. No entanto, essa argumentação deve ser vista com cautela, uma vez que, segundo o autor, surgiu na época em que entidades ambientalistas e proprietários de incineradores acusavam as companhias cimenteiras americanas de se utilizarem das “brechas” na legislação ambiental para efetuar a queima de resíduos em fornos de clínquer sem atender aos rígidos padrões impostos às plantas de incineração.

Ainda sob a ótica dos custos do processo de produção, cabe destacar que a estabilidade na formação da colagem no interior do forno rotativo proporciona a proteção do refratário. Essa proteção é imprescindível, principalmente entre a zona de transição e a zona de queima, contra o desgaste mecânico decorrente da abrasão dos grãos de clínquer, a deformação das chapas metálicas, os ataques químicos pela fase líquida do clínquer e térmicos provocados pela variação de temperatura.

Esse fenômeno altamente desejável e dependente das condições do processo de combustão permite a adequada operação do forno e garante a vida útil operacional do revestimento refratário assim como a integridade do casco do forno. A espessura e a estabilidade da colagem, dependem em grande parte das características das matérias-primas, das condições de aquecimento e das temperaturas locais. Parte do alto consumo específico<sup>10</sup> de calor nos fornos rotativos, quer estes trabalhem com pré-aquecedores convencionais ou com pré-calcinadores, se deve às perdas através do casco metálico, as quais aumentam com o desgaste do refratário (MENON, SILVA e OLIVEIRA, 1993; GRECO, 1996).

### 4.3 - Processos de fabricação de clínquer e cimento

Como citado o cimento *portland* é um pó fino, cinza ou branco, que consiste de uma mistura de materiais hidráulicos composto, principalmente, por silicatos de cálcio, aluminatos e ferroaluminatos. São conhecidas mais de 30 matérias-primas usadas na produção de cimento *portland* as quais podem ser divididas em quatro categorias distintas: calcária, silicosa, argilosa e

---

<sup>10</sup> O consumo específico é dado pela quantidade de energia térmica necessária para a produção de uma massa unitária de produto (p. ex.: kJ/kg clínquer, kcal/kg clínquer, etc.).

ferruginosa. Esses materiais são quimicamente combinados para a produção do clínquer e sujeitos às operações mecânicas subseqüentes de processamento para a fabricação dos cimentos mencionados (USEPA, 1994).

Os processos de manufatura do clínquer para cimento são consumidores intensivos de energia requerendo energia térmica de 3 200 MJ/t a 5 500 MJ/t de clínquer produzido (764,31 kcal/kg a 1 313,65 kcal/kg) para a calcinação do material cru, em função das matérias-primas e tipos de processos industriais empregados. O consumo de energia elétrica pode variar de 90 kWh/t a 120 kWh/t de cimento na etapa de moagem do clínquer (CEMBUREAU, (1997).

Enquanto a energia térmica é consumida, sobretudo, no processo de clinquerização, incluindo a secagem das matérias-primas, de carvão e de escória de alto forno, a maior parcela da energia elétrica é requerida para a moagem da mistura crua a ser alimentada no forno e do clínquer para a produção do cimento propriamente dito (SPRUNG, 1993).

A energia térmica é tradicionalmente fornecida pela queima de carvão vegetal, carvão mineral, óleo combustível, gás natural e, principalmente, nos dias atuais de coque de petróleo nos maçaricos principal e secundário do sistema-forno.

CEMBUREAU (1999) refere que o desenvolvimento da tecnologia de manufatura do clínquer foi, historicamente, marcado pelas variações entre os processos de via úmida e de via seca com etapas intermediárias caracterizadas por processos de vias semi-úmida e semi-seca. A entidade destaca que os primeiros fornos rotativos instalados por volta de 1895 eram longos de via úmida.

Esses processos permitiam um manejo e homogeneização mais fáceis das matérias-primas, especialmente nos casos em que se apresentavam úmidas e pegajosas ou exibiam grandes flutuações na composição química dos componentes individuais da mistura.

Entretanto, com o desenvolvimento de tecnologias modernas foi possível a preparação de misturas homogêneas sem a adição de água permitindo o uso dos processos de via seca, nos quais a principal vantagem sobre o sistema úmido tradicional é o menor consumo de combustíveis



resultando, dessa forma, num custo de produção mais baixo e menor potencial para emissões atmosféricas devidas ao processo de combustão.

A esse respeito Sprung (1993) destaca que devido ao alto consumo específico de energia, a indústria cimenteira fez consideráveis esforços nos últimos 40 anos (entre as décadas de 50 e 90) para reduzir os custos de produção através da conservação da energia. Ao mesmo tempo essa redução também proporcionou a diminuição da emissão de compostos gasosos tais como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), importante gás de efeito estufa.

Na Figura 4.2 é apresentado o desenho esquemático de um forno rotativo de via seca com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones, no qual estão identificados seus principais componentes e indicados os fluxos de material sólido e de gases que se desenvolvem no sistema.

Os processos de produção de clínquer são classificados em quatro categorias por CEMBUREAU (1999):

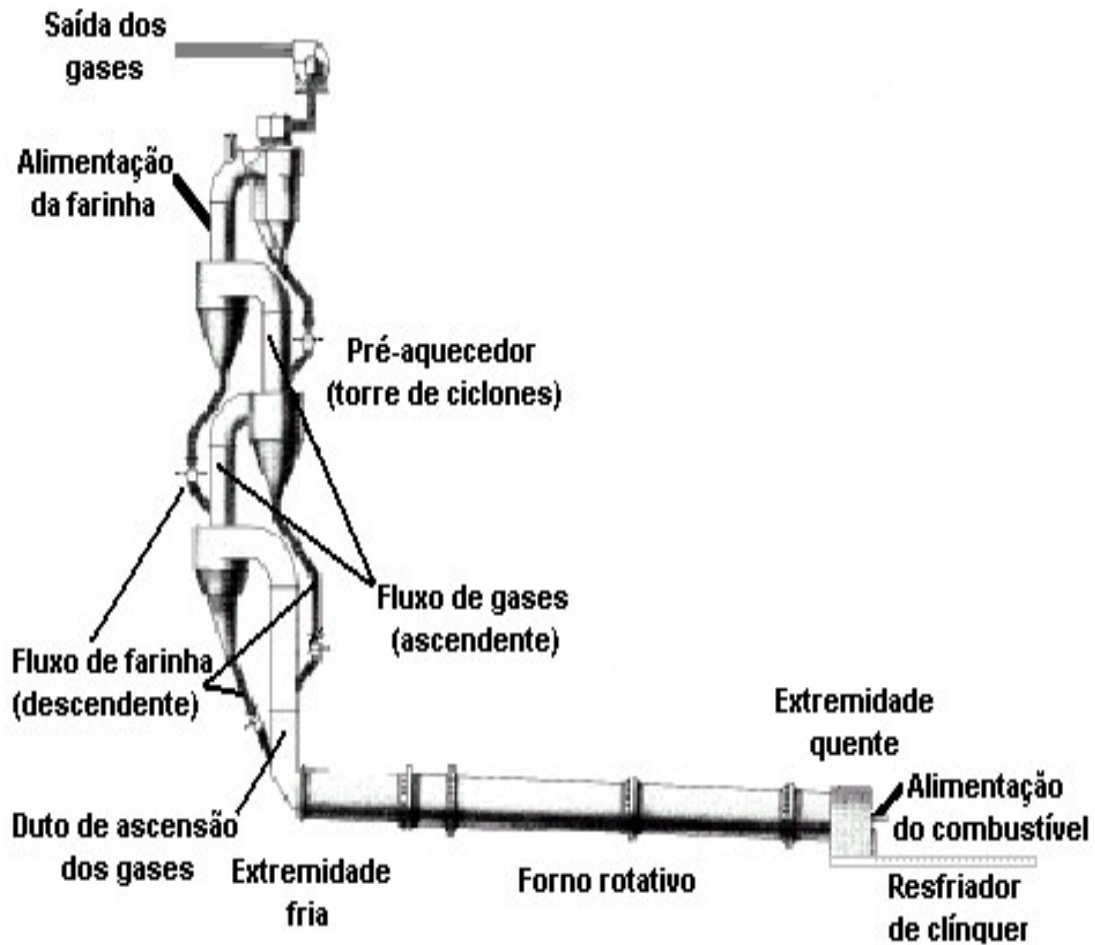
- *via seca;*
- *via semi-seca;*
- *via semi-úmida; e*
- *via úmida (CEMBUREAU, 1999, p.25, tradução nossa).*

O diferencial entre cada um desses processos se refere ao teor de umidade da mistura de matérias-primas básicas e aditivos pré-homogeneizados e moídos para alimentação no forno rotativo. Oportunamente serão discriminadas as matérias-primas utilizadas na produção de clínquer e cimento.

Para o processo de via úmida essa mistura é obtida através da adição de água durante a operação de moagem das matérias-primas em moinho de bolas resultando numa “pasta” com teor de umidade entre 28% a 43%. No processo de via semi-úmida a “pasta” é desidratada em filtro-prensa e a mistura a ser alimentada no forno com umidade entre 16% a 21% é denominada de “torta”.

No processo de via seca as matérias-primas pré-homogeneizadas são alimentadas em moinho de bolas ou de rolos verticais recebendo parte do fluxo de gases quentes gerados no forno, em contra-corrente, para secagem e moagem, produzindo a *farinha* com teor de umidade entre 0,5% a 1%. Finalmente no processo de via semi-seca adiciona-se água na *farinha* obtendo-

se grânulos com 10% a 12% de umidade denominados *pellets* que são alimentados em forno que dispõe de grade pré-aquecedora da matéria-prima.



**Figura 4.2** - Forno rotativo de via seca com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones, com indicação dos fluxos de *farinha* e gases

Fonte: CEMBUREAU (1999), adaptada pelo autor

A norma americana, por sua vez, classifica os processos de fabricação de clínquer de maneira diferente da européia, contemplando cinco categorias:

- *processo via úmida;*
- *processo longo via seca;*
- *processo semi-seco;*
- *processo via seca com pré-aquecedor; e*
- *processo via seca com pré-aquecedor e pré-calcinador (USEPA, 1994, p.7, tradução nossa).*

Erhard e Scheuer (1993) relatam que uma parte considerável do clínquer produzido em escala mundial ainda utiliza o processamento de matérias-primas por via úmida. Avaliam que essa é uma consequência do histórico do desenvolvimento dos custos energéticos e do processo tecnológico de produção de cimento. O consumo específico de energia térmica em processos de via úmida é comparativamente mais alto que aquele resultante de processos de via seca já que parte dele é utilizado para a evaporação da água contida no material alimentado no forno. Os autores ressaltam que o teor de umidade das matérias-primas disponíveis é um importante fator a ser considerado quando da seleção do sistema-forno que será empregado na manufatura do clínquer.

O calor sensível do gás de exaustão de um forno rotativo é suficiente para a secagem de somente 5% a 10% da umidade das matérias-primas dependendo do tipo de processo utilizado. Se o gás do resfriador de clínquer também estiver disponível, então o teor de umidade pode ser limitado em aproximadamente 15%. Com o decréscimo do consumo específico de calor do sistema-forno a capacidade de secagem dos gases de exaustão é diminuída (ERHARD e SCHEUER, 1993; SPRUNG, 1993).

Ressalte-se que independentemente da denominação dada às variantes do processo produtivo do clínquer, em cada uma delas são realizadas as mesmas etapas físicas e químicas de transformação das matérias-primas utilizadas. As diferenças entre elas referem-se ao projeto do equipamento, método de operação e, principalmente ao consumo de energia térmica, o qual, geralmente decresce na ordem dos processos citados (Tabela 4.1) em razão da redução do teor de umidade da mistura alimentada no sistema-forno.

Os processos de produção de via seca são os preferidos devido ao menor consumo de energia, exceto nas situações em que o teor de umidade das matérias-primas indique a viabilidade do uso de outros sistemas-fornos.

**Tabela 4.1** - Consumo específico médio de calor em processos de produção de clínquer industrial para cimento

Tipo de forno	Consumo específico médio de calor	
	KJ/kg clínquer	Kcal/kg clínquer
Via úmida	4 600 a 6 000	1 099 a 1 433
Longo via seca sem pré-aquecedor	4 500	1 075
Semi-seco com grade pré-aquecedora	3 500 a 3 700	836 a 884
Curto via seca com pré-aquecedor de ciclones (4 estágios)	3 300 a 3 600	788 a 860
Curto pré-calcinador com pré-aquecedor de ciclones (6 estágios)	3 000	717

Fontes: Erhard e Scheuer (1993) e Sprung (1993), adaptada pelo autor

#### 4.3.1 - Etapas do processo produtivo

Erhard e Scheuer (1993) descrevem que o menor consumo de calor e o maior rendimento na produção de clínquer é alcançado por sistemas-fornos que são alimentados com *farinha* crua seca através de pré-aquecedor de ciclones de múltiplos estágios. Esses sistemas são mecanicamente mais simples que os fornos longos de via úmida e longos de via seca e, provavelmente, são hoje os tipos mais utilizados pela indústria cimenteira em âmbito mundial (CEMBUREAU, 1999).

No Brasil, entre os anos de 1996 e 1997, de 97% a 98% da produção de cimento era proveniente de fornos de via seca dotados de pré-aquecedores e pré-calcinadores com consumo térmico específico variando entre 700 kcal/kg a 900 kcal/kg de clínquer e somente de 3% a 2% fabricados em fornos de via úmida com consumos térmicos muito mais elevados. (MARCIANO, KIHARA e ESPER, 1996; MARCIANO e KIHARA, 1997; CENTURIONE et al., 1999).

Portanto, para descrição das etapas envolvidas na fabricação do clínquer será considerado o processo de via seca com pré-aquecedor, tipo

torre de ciclones, inserindo-se, quando oportuno, informações relativas ao sistema que também dispõe de pré-calcinador.

Ritzmann (1974) relata que a evolução desses sistemas-fornos iniciou-se nos anos 30 quando foi inventado o pré-aquecedor suspenso e que entre os anos de 1959 a 1974 registrou-se uma tendência de utilização de *farinha* crua pré-aquecida. No início dos anos 50, no entanto, praticamente não ocorreu a comercialização de fornos pré-aquecedores. Posteriormente o número deles cresceu continuamente até alcançar um recorde de aproximadamente 90% da capacidade total vendida em 1971.

A partir do início dos anos 70 o sistema-forno pré-aquecedor de ciclones com 4 estágios foi adotado como tecnologia padrão. Simultaneamente cresceram também as dimensões dos fornos, assim como a capacidade média de produção de clínquer. Em 1960 atingiam 500 toneladas diárias e em 1971 alcançavam capacidades produtivas superiores a 2 000 t/dia.

A utilização dos pré-aquecedores trouxe dificuldades relativas à formação das colagens nas partes internas do equipamento, primariamente associadas aos teores de cloro, álcalis e enxofre, sendo proposta a instalação de um duto de *by-pass* para contornar o problema. Esse dispositivo permitiria a remoção de parte dos gases provenientes do forno, antes de sua entrada no pré-aquecedor, apresentado como desvantagens o aumento do consumo térmico e a necessidade de instalação de um sistema complementar de despoeiramento. Posteriormente esse tipo de equipamento evoluiu para os pré-aquecedores de 5 ou 6 estágios com a instalação de pré-calcinador, os quais são considerados atualmente como tecnologias de escolha para novas plantas, podendo, teoricamente, atingir a produção de até 15 000 t diárias de clínquer (RITZMANN, 1974; CEMBUREAU, 1999).

As etapas da manufatura do clínquer e cimento podem ser agrupadas conforme discriminação a seguir:

- extração de calcário e argila seguida de britagem;
- pré-homogeneização, dosagem e moagem das matérias-primas;
- homogeneização da mistura crua - *farinha*;
- calcinação e clinquerização seguida de resfriamento;
- moagem do clínquer para produção do cimento;
- armazenamento e expedição

Na Figura 4.3 é apresentado o fluxograma simplificado do processo de produção de clínquer e cimento contemplando as etapas mencionadas.

#### 4.3.1.1 - Extração do calcário/argila e britagem

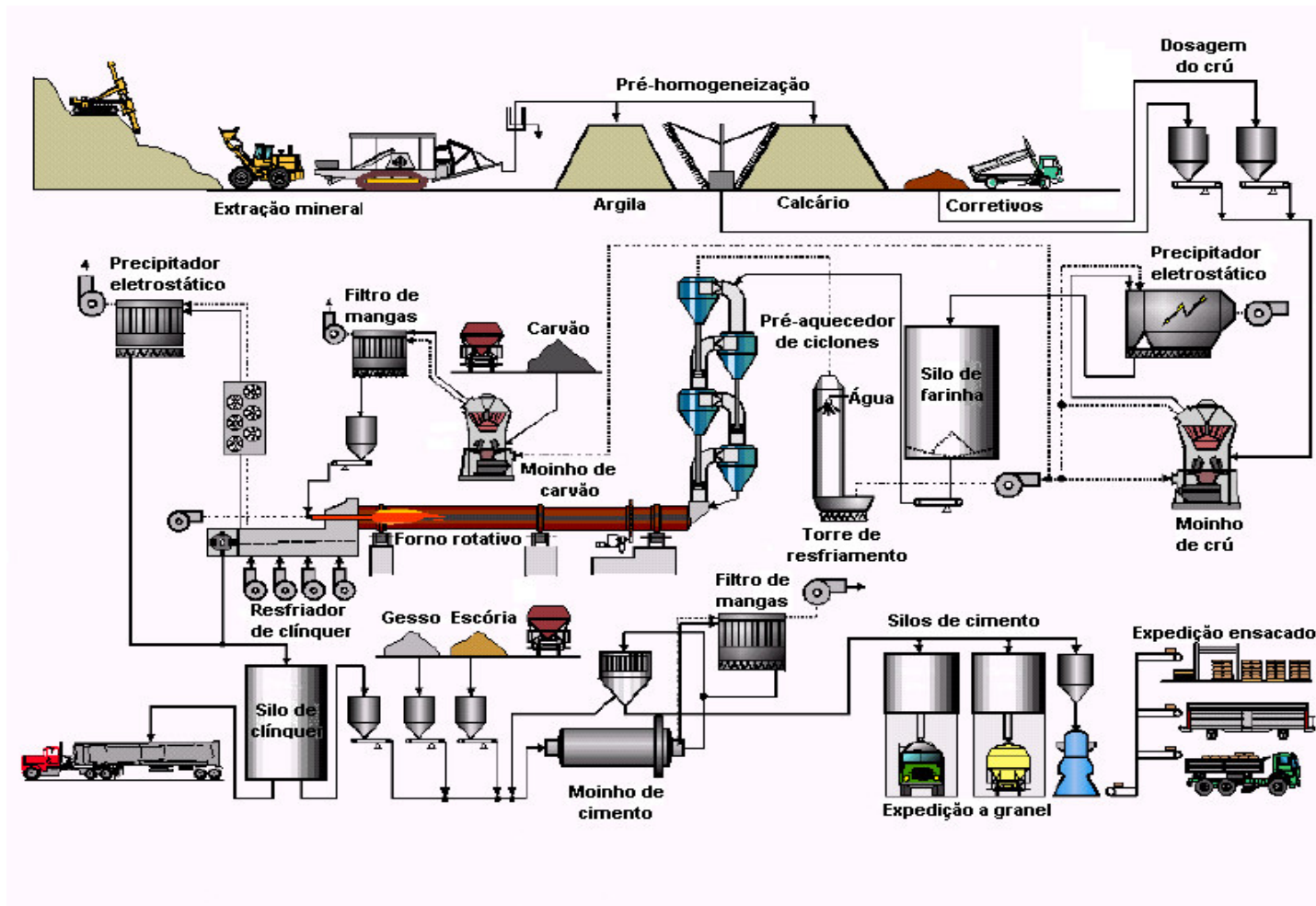
As principais matérias-primas utilizadas na produção do clínquer são o calcário e a argila. A especificação média para os calcários destinados à fabricação de cimento prevê que eles devem ter mais de 75% de  $\text{CaCO}_3$ , menos de 3% de  $\text{MgO}$  e menos de 0,5% de  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

Durante o processo de produção de clínquer o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) é decomposto termicamente em cal livre ( $\text{CaO}$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Por causa de uma grande parcela (aproximadamente 1/3) da massa calcária ser perdida como dióxido de carbono no forno, as plantas de cimento *portland* são localizadas, sempre que possível próximas das fontes dessa matéria-prima (USEPA, 1994).

O calcário é extraído de cavas superficiais podendo também ser extraído de minas subterrâneas. As matérias-primas podem variar de uma jazida para outra, requerendo, normalmente, o uso de aditivos como bauxita, minério de ferro ou areia (sílica) para a obtenção da combinação química ideal da mistura crua utilizada na produção do clínquer. As faixas de concentração de metais pesados e halogêneos encontradas nas principais matérias-primas do cimento e na crosta terrestre são resumidas na Tabela 4.2.

Ocasionalmente bolsões de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) podem ser encontrados em depósitos de calcário e argila incrementando significativamente as emissões de dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) provenientes do processo produtivo.

O calcário e a argila são submetidos a uma britagem primária, normalmente em instalações existentes nas proximidades da própria jazida. Posteriormente são transferidos para as instalações destinadas à britagem secundária, por meio de correias transportadoras, teleféricos, vagonetas, caminhões ou outros meios de transporte, para adequação à granulometria exigida para a etapa seguinte do processamento industrial.



**Figura 4.3** - Fluxograma simplificado do processo de produção de clínquer e cimento utilizando sistema-forno de via seca com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones

Fonte: CEMBUREAU (1999), adaptada pelo autor

**Tabela 4.2** - Concentrações (ppm) de metais pesados e halogêneos em matérias-primas para clínquer e cimento e na crosta terrestre<sup>a</sup>

Constituintes	Calcário	Argila	Crosta terrestre <sup>a</sup>
<b>Metais pesados</b>			
Antimônio	NDA <sup>b</sup>	NDA <sup>b</sup>	1 <sup>c</sup>
Arsênio	0,2 – 12	13 – 23	5
Bário	NDA	NDA	250
Berílio	0,5 <sup>c,d</sup>	3 <sup>d</sup>	6
Cádmio	0,035 – 0,1	0,016 – 0,3	0,15
Cromo	1,2 – 16	90 – 109	200
Chumbo	0,4 – 13	13 – 22	16
Mercúrio	0,03 <sup>d</sup>	0,45 <sup>d</sup>	0,5
Níquel	1,5 – 7,5	67 – 71	80
Selênio	0,19 <sup>d</sup>	0,5 <sup>d</sup>	0,09
Prata	NDA	0,07 <sup>d</sup>	0,1
Tálio	0,05 – 0,5	0,7 – 1,6	0,6
Vanádio	10 – 80	98 – 170	150
Zinco	22 – 24	59 – 115	132
<b>Halogêneos</b>			
Bromo	5,9	1 – 58	1,6
Cloro	50 – 240	15 – 450	314
Flúor	100 – 940	300 – 990	300
Iodo	0,25 – 0,75	0,2 – 2,2	0,3

Obs.: a) CRC (1982);

b) nda - dado não disponível;

c) concentração estimada;

d) Wedepohl (1991)

Fonte: Sprung (1985) a menos de outra indicação, adaptada pelo autor

#### 4.3.1.2 - Pré-homogeneização e dosagem e moagem das matérias-primas

O calcário é normalmente armazenado em pilhas, possibilitando que na operação de retomada ocorra uma pré-homogeneização das matérias-primas provenientes das jazidas utilizadas para a preparação do cru, devidamente dosadas com argila e os demais aditivos referidos, necessários para a obtenção de um clínquer de boa qualidade. Conforme citado a mistura é alimentada em moinhos de bolas ou de rolos para cominuição, sendo simultaneamente secas pelos gases quentes provenientes do forno rotativo. O



material finamente dividido denominado *farinha* é, normalmente, selecionado granulometricamente através de separadores dinâmicos por meio de sistema pneumático e encaminhado aos silos de armazenamento para posterior alimentação no sistema-forno.

#### 4.3.1.3 - Homogeneização da mistura crua – *farinha*

Qualitativamente a *farinha* é composta por carbonato de cálcio -  $\text{CaCO}_3$ ; dióxido de silício -  $\text{SiO}_2$ ; óxido de alumínio -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; óxido de ferro -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; óxido de magnésio -  $\text{MgO}$  ; óxido de potássio -  $\text{K}_2\text{O}$  e óxido de sódio -  $\text{Na}_2\text{O}$ . Na Tabela 4.3 são apresentadas as composições médias das principais matérias-primas, corretivos e da *farinha* crua utilizados na produção de clínquer de cimento conforme CEMBUREAU (1999).

Dentro dos silos de armazenamento a *farinha* é submetida a um processo de mistura através de sistemas pneumáticos, cuja finalidade é promover a homogeneização do material. Essa operação tem por objetivo minimizar a ocorrência de variações localizadas de composição, originárias da fase de dosagem, e otimizar as reações de clínquerização que se desenvolverão no interior do forno rotativo.

Sprung (1988) cita que as propriedades químicas e físicas do clínquer *portland* são caracteristicamente determinadas pelos elementos maiores e menores. Cálcio (Ca), silício (Si) e alumínio (Al) aparecem com concentração maior que 5% em peso e são classificados como elementos maiores ou principais. Outros autores incluem o ferro como elemento maior e referem que os elementos menores aparecem em praticamente todos os clínqueres comerciais em concentrações entre 1% e 5% sob a forma de óxidos, como por exemplo sódio (Na), potássio (K), magnésio (Mg), enxofre (S), manganês (Mn), fósforo (P) e titânio (Ti) (SALOMON, 1999; MARINGOLO, 2001).

Adicionalmente ocorre a entrada de materiais que contêm elementos traços os quais estão presentes em concentrações menores que 100 ppm a 200 ppm na substância sólida. A natureza e concentração desses elementos nas matérias-primas são determinadas pelas distribuições geoquímicas nos

depósitos naturais e podem variar acima de uma margem relativamente grande (SPRUNG, 1988; SALOMON, 1999; MARINGOLO, 2001).

**Tabela 4.3** - Composição química (% em massa) das principais matérias-primas, corretivos e *farinha* crua utilizados em sistemas-fornos para a produção de clínquer para cimento

Compostos	Matérias-primas principais			Corretivos			Farinha crua
	Calcário	Marga	Argila	Areia	Minério de ferro	Bauxita	
SiO <sub>2</sub>	0,5 a 3	3 a 50	37 a 78	80 a 99	4 a 11	2,9	12 a 16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub>	0,1 a 1	1 a 20	7 a 30	0,5 a 3	0,2 a 3	57,5	2 a 5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1 a 0,5	0,5 a 10	2 a 15	0,5 a 2	19 a 95	22,8	5
CaO	52 a 55	5 a 52	0,5 a 25	0,1 a 3	0,1 a 34	2,4	40 a 45
MgO	0,5 a 5	0,5 a 5	5	0,5	1,5	0,04	0,3 a 3
K <sub>2</sub> O	0,3	3,5	0,5 a 5	1	Traços	0,04	0,2 a 1,4
Na <sub>2</sub> O	0,1	0,2	0,1 a 0,3	0,5	Traços	0,02	0,3
SO <sub>3</sub>	0,1	0,1 a 4	3	0,5	Traços	0,12	1,2
Perda ao fogo (CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O)	40 a 44	2 a 42	1 a 20	5	0,1 a 30	13,5	32 a 36

Fonte: CEMBUREAU (1999), adaptada pelo autor

Uma *farinha* típica é dosada com 90% de calcário, 8% de xisto ou argila, 1,3% de bauxita e 0,7% de minério de ferro, para produzir um clínquer com 67% de CaO; 22% de SiO<sub>2</sub>; 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 3% de elementos menores.

#### 4.3.1.4 - Calcinação e clínquerização seguida de resfriamento

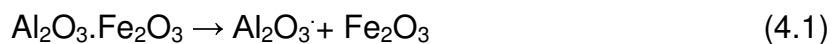
O coração do processo de fabricação do cimento *portland* é o sistema-forno. Este sistema transforma a mistura crua em clínqueres constituídos principalmente por silicatos de cálcio, formados através da reação

entre o calcário e a argila sob altas temperaturas. Os clínqueres podem ser descritos como nódulos esféricos cinza, vítreos, com diâmetro variando entre 0,32 cm a 5,1 cm.

Moir e Glasser (1992) relatam que os principais óxidos componentes do clínquer para cimento,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  normalmente são responsáveis por 96% a 97% das análises químicas. Os níveis relativos desses quatro óxidos controlam as proporções dos quatro principais minerais do clínquer  $\text{C}_3\text{S}$  ( $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ),  $\text{C}_2\text{S}$  ( $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ),  $\text{C}_3\text{A}$  ( $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e  $\text{C}_4\text{AF}$  ( $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e essas proporções têm uma influência fundamental sobre as propriedades do cimento. Os autores observam que os componentes menores, responsáveis por 3% a 4% dos constituintes do clínquer, também podem ter uma influência muito significativa sobre o processo de produção e nas propriedades do cimento.

As reações químicas e os processos físicos responsáveis por essas transformações são bastante complexas, mas podem ser, conceitualmente, divididas conforme a sequência apresentada a seguir:

- evaporação da água livre;
- perda da água adsorvida;
- remoção da água combinada nos componentes argilosos;
- alteração e decomposição das estruturas dos minerais de argila e formação de uma mistura de óxidos reativos;



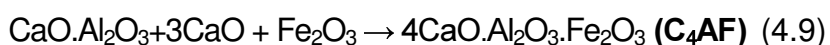
- calcinação dos carbonatos de cálcio e magnésio para óxidos de cálcio e de magnésio;



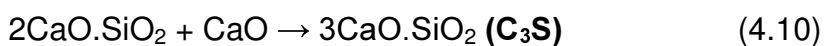
- reação do óxido de cálcio com sílica para produzir silicato dicálcico;



- reação do óxido de cálcio com o alumínio e os constituintes ferruginosos para formar a fase líquida;



- formação dos nódulos de clínquer;
- evaporação dos constituintes voláteis como sódio, potássio, cloretos e sulfatos; e
- reação do excesso de óxido de cálcio com o silicato dicálcico para a formação de silicato tricálcico.



Os principais minerais do clínquer podem ser então resumidos em:

- Silicato tricálcico  $3\text{CaO.SiO}_2$   $\mathbf{C}_3\mathbf{S}$  - alita;
- Silicato dicálcico  $2\text{CaO.SiO}_2$   $\mathbf{C}_2\mathbf{S}$  - belita;
- Aluminato tricálcico  $3\text{CaO.Al}_2\text{O}_3$   $\mathbf{C}_3\mathbf{A}$  - aluminato; e
- Ferro aluminato tetracálcico  $4\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$   $\mathbf{C}_4\mathbf{AF}$  - ferroaluminato tetracálcico.

Grande parte da energia térmica disponibilizada no sistema-forno é, portanto, destinada a propiciar a ocorrência da reação (4.10).

A USEPA (1994) resume essa seqüência de eventos em quatro estágios, em função do local de ocorrência e da temperatura dos materiais no sistema-forno:

- *Evaporação da água não combinada das matérias primas no pré-aquecedor quando a temperatura do material aumenta até 100°C;*
- *Desidratação, quando a temperatura do material aumentar de 100°C a aproximadamente 430°C, no pré-aquecedor, para formar óxidos de sílica, alumínio e ferro;*
- *Calcinação, inicia-se no pré-aquecedor e é completada no forno rotativo, durante a qual o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é liberado, entre 900°C e 982°C, para formar óxido de cálcio (CaO); e*
- *Reação dos óxidos na zona de queima do forno rotativo, para formar o clínquer a uma temperatura de aproximadamente 1 450°C a 1 510°C (USEPA, 1994, p.7, tradução nossa).*

Após deixar o interior do forno rotativo o clínquer é lançado no resfriador, última etapa de seu processo produtivo, no qual é utilizado ar atmosférico para a obtenção de um resfriamento adequado. Sob a ação do rápido resfriamento as fases cristalinas anidras tornar-se-ão metaestáveis nas condições ambientes reagindo prontamente quando hidratadas, caracterizando a propriedade hidráulica do cimento (MARINGOLO, 2001).

#### **4.3.1.5 - Moagem do clínquer para produção do cimento**

A etapa final de fabricação envolve uma seqüência de operações de mistura e moagem que transforma o clínquer em cimento *portland* acabado. O cimento *portland* consiste de uma mistura adequada de clínquer e gesso que é alimentada em moinho de bolas ou vertical, às vezes combinado com moinhos de pressão, para moagem e obtenção do produto final cuja granulometria e demais propriedades têm que estar em conformidade com as Normas Técnicas estabelecidas pelos organismos controladores.

São também produzidos os chamados cimentos compostos, os quais utilizam adicionalmente escória de alto forno em proporção que pode chegar a 70% em peso, calcário até 5%, pozolanas de 15% a 25% e demais aditivos dosados de acordo com as especificações requeridas. O gesso ou

anidrido natural é introduzido no processo numa proporção de até 5% para controle do tempo de pega do cimento e outros materiais são adicionados para conferir propriedades específicas ao produto.

A finalização do processo é realizada em sistema de circuito fechado com a classificação granulométrica do cimento também realizada através de separadores dinâmicos, acionados por sistemas pneumáticos, que separam as partículas mais finas daquelas mais grosseiras, as quais retornam ao processo para continuidade da moagem.

#### **4.3.1.6 - Armazenamento e Expedição**

O cimento acabado é transferido para silos de armazenagem, dos quais normalmente é extraído para ensaque ou expedição a granel. Para transferência do cimento aos silos podem ser usados sistemas de transporte mecânico (esteiras) ou pneumático (calhas). O uso de uma combinação de aerodeslizadores ou transportadores de rosca com elevadores de canecas têm sido comum atualmente.

Para a estocagem do cimento vários silos, normalmente, são necessários em razão das características diversas dos tipos produzidos. Entretanto, os novos projetos de silos, conhecidos como silos multi-câmaras, permitem o armazenamento de mais de um tipo de cimento, utilizando-se a mesma estrutura, em razão de ser compartimentado. Comenta-se ainda a possibilidade de armazenamento das várias matérias-primas e aditivos previamente moídos nas faixas granulométricas de interesse, para posterior mistura nas proporções pré-estabelecidas obtendo-se os cimentos com as características desejadas.

Normalmente os equipamentos de despoeiramento, tanto dos sistemas de transporte, dos pontos de transferência e de descarregamento do produto, como dos pontos de abastecimento das ensacadeiras ou de caminhões graneleiros, são constituídos por baterias de filtros de mangas.

#### **4.3.2 - O sistema-forno**

As principais características inerentes ao processo de produção de clínquer resumem-se aos elevados tempos de residência dos gases e matérias-primas, às altas temperaturas, alta turbulência, atmosfera alcalina e ambiente oxidante no interior do forno. As altas temperaturas decorrem da queima do combustível no maçarico principal e do calor radiante a partir do refratário da fornalha rotativa. Os tempos de residência devem-se tanto ao trajeto percorrido pelas matérias-primas, desde a alimentação no pré-aquecedor até a descarga do produto no resfriador de clínquer, como àquele percorrido pelos gases quentes através do forno e pré-aquecedor.

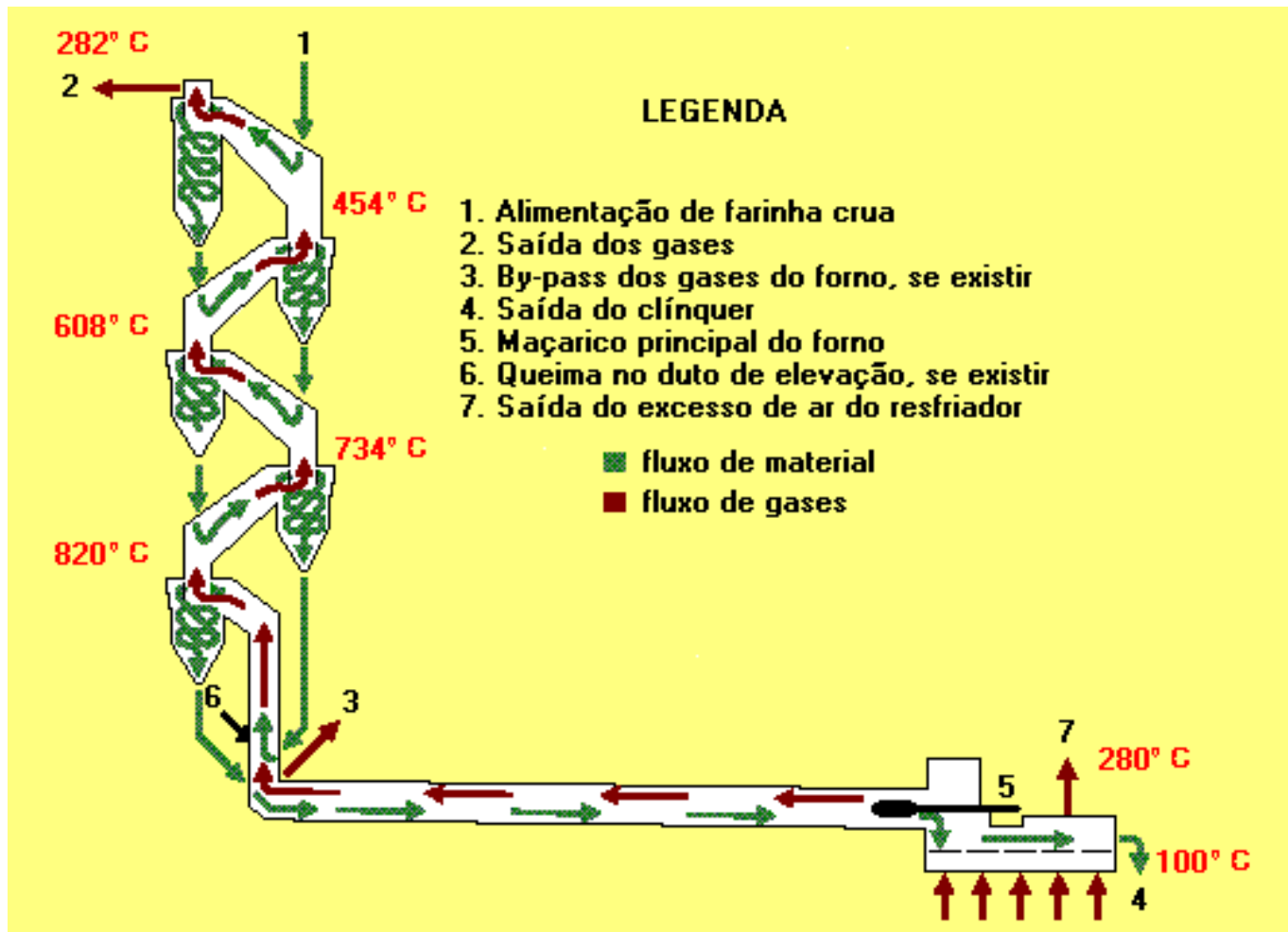
Fornos pré-calcinadores utilizam um segundo queimador para facilitar a calcinação da *farinha* num recipiente separado, porém, ligado ao pré-aquecedor de ciclones. O calcinador utiliza ar de combustão pré-aquecido, proveniente do resfriador de clínquer ou gases de saída do forno, denominado ar terciário. Nesse sistema o calor é gerado através da queima de aproximadamente 60% do consumo total de combustível no queimador secundário e o restante no maçarico principal do forno para completar as reações de clinquerização.

O ambiente oxidante é devido ao excesso de ar necessário às adequadas condições de combustão e o ambiente alcalino é resultado da decomposição de elementos constituintes da *farinha*. Como já comentado a alta turbulência é proporcionada pelas condições fluidodinâmicas no interior do forno rotativo.

No interior do sistema-forno de manufatura de clínquer são caracterizados dois fluxos: um de material sólido e um gasoso.

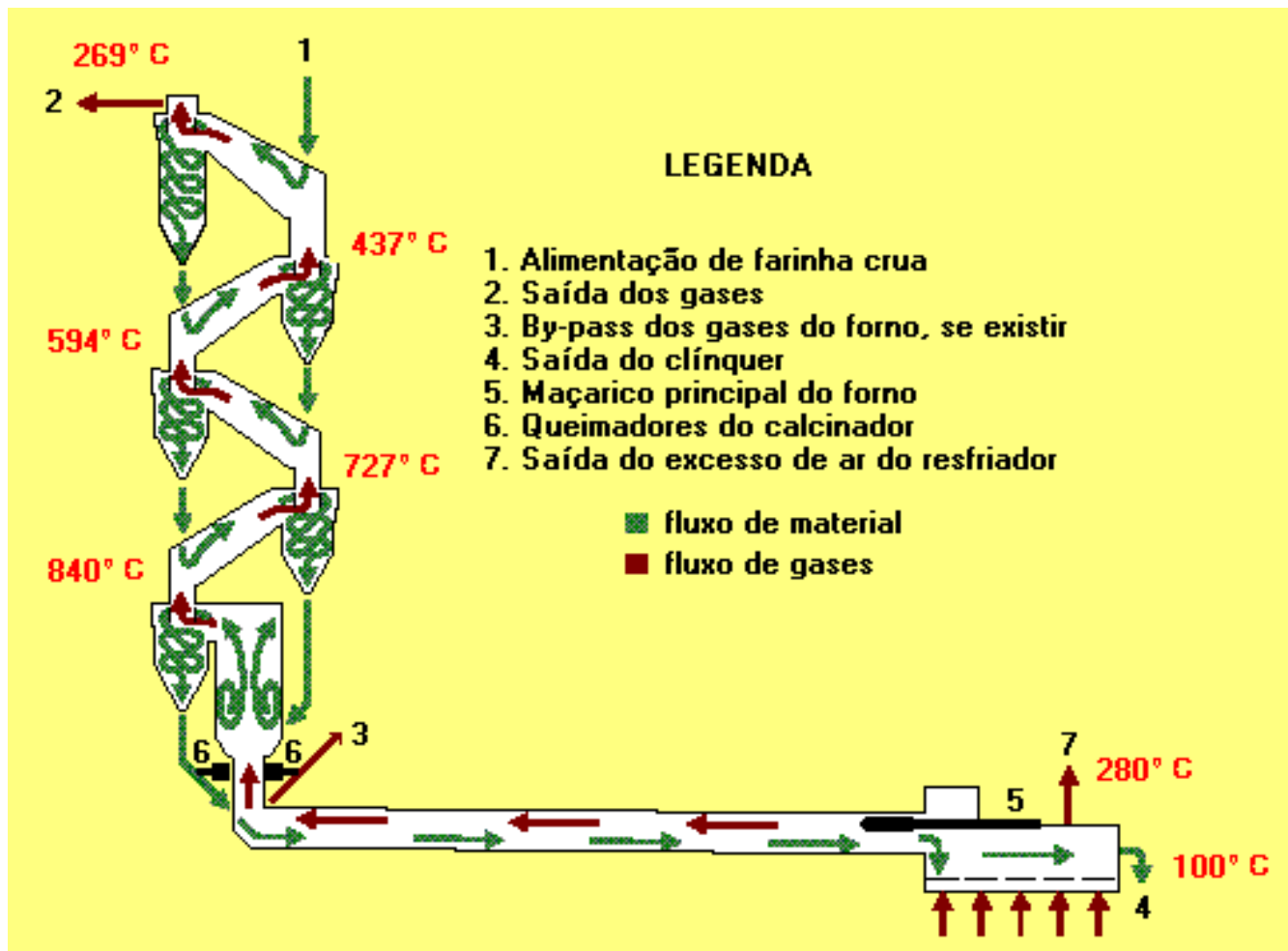
Nas Figuras 4.4 e 4.5 são mostrados, respectivamente, os cortes esquemáticos de sistemas-fornos pré-aquecedor e pré-calcinador, ilustrando os processos de troca de calor em contra-corrente dos gases de combustão, gerados nos maçaricos principal e secundário, com as matérias-primas cruas alimentadas nas torres de ciclones.

Na Figura 4.6 são apresentados os perfis característicos das temperaturas dos fluxos de matérias-primas e dos gases de combustão gerados num sistema-forno de via seca com pré-aquecedor e pré-calcinador.



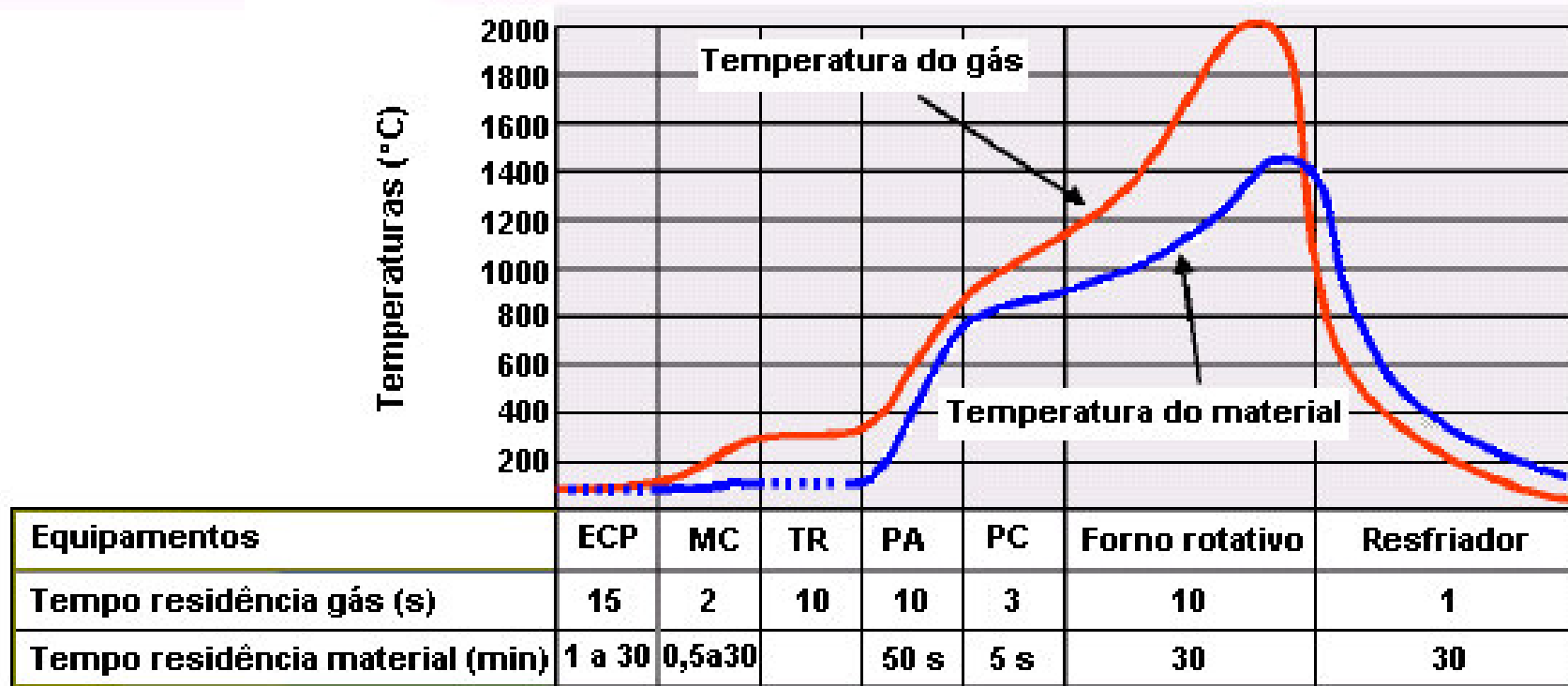
**Figura 4.4** – Fluxos das matérias-primas cruas e dos gases gerados num forno de via seca com pré-aquecedor de ciclones  
 Fonte: Smidth (2004), adaptada pelo autor





**Figura 4.5** – Fluxos das matérias-primas cruas e dos gases gerados num forno de via seca com pré-aquecedor de ciclones e pré-calcinador

Fonte: Smidth (2004), adaptada pelo autor



Legenda: ECP - Equipamento de controle de poluição atmosférica;  
 MC - Moinho de cru;  
 TR - Torre de resfriamento dos gases;  
 PA - Pré-aquecedor – Torre de ciclones;  
 PC - Pré-calcinador

**Figura 4.6** – Perfís de temperaturas dos gases e materiais sólidos num sistema-forno equipado com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones, e pré-calcinador

Fonte: CEMBUREAU (1999), adaptada pelo autor

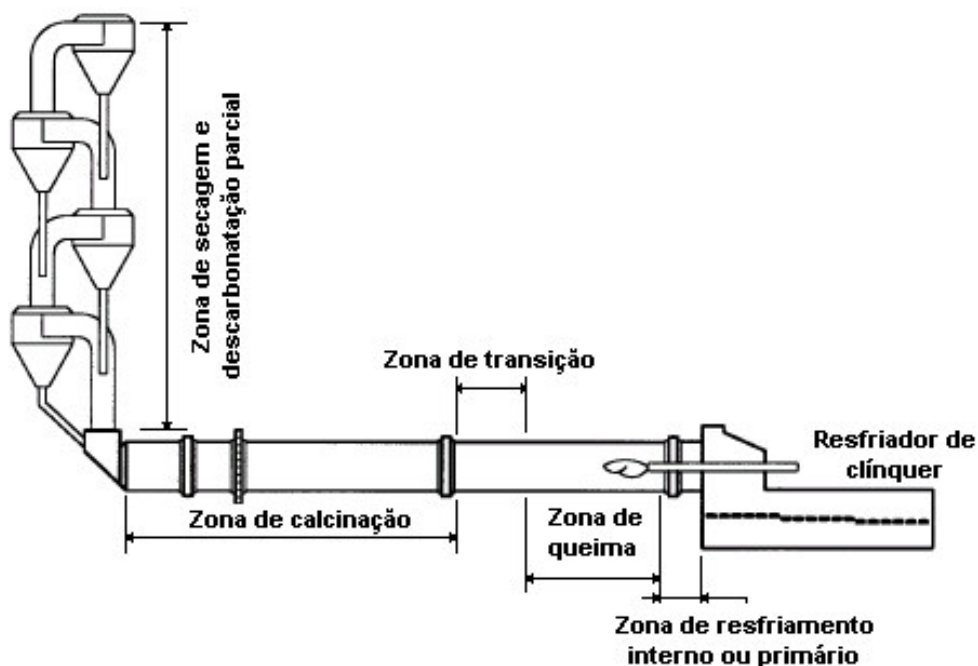
#### 4.3.2.1 - Fluxo de material sólido

Conforme apresentado nas Figuras 4.2, 4.4 e 4.5 verifica-se que acoplado na extremidade alta (fria) do forno rotativo encontra-se instalada a torre de ciclones para a secagem e pré-aquecimento da *farinha*.

Essa torre é constituída por um conjunto de 4 a 6 ciclones sobrepostos verticalmente, também revestidos com tijolos refratários. A *farinha* homogeneizada é alimentada na parte superior do pré-aquecedor, com temperatura entre 20°C a 40°C e controlada por dosador gravimétrico. À medida que a *farinha* desce pelos ciclones, por ação da gravidade, encontra os gases quentes de combustão em contra-corrente. Através da troca térmica se aquece gradativamente até chegar à parte mais alta do forno com temperaturas na faixa de 810°C a 900°C, sendo lançada em seu interior parcialmente calcinada.

Nos fornos equipados com pré-calcinador, instalado nos estágios inferiores da torre de ciclones, pode-se calcinar quase que integralmente a *farinha* antes de sua introdução no forno, atingindo até 95% da calcinação dos carbonatos. O surgimento dessa tecnologia propiciou o desenvolvimento de projetos de fornos com menores comprimentos e consumos térmicos, além da possibilidade de utilização de combustíveis menos nobres no pré-calcinador. Devido ao movimento giratório e à inclinação do cilindro a *farinha* é deslocada lentamente da entrada para a parte mais baixa do forno rotativo, através do escorregamento da carga. A carga é definida em função da inclinação, não devendo exceder 13% da seção transversal da fornalha para maximizar a transferência de calor para as matérias-primas (MARINGOLO, 2001).

À medida em que avança no contra-fluxo aos gases quentes a *farinha* é aquecida até atingir as faixas adequadas de temperaturas nas quais se processam as reações de clinquerização. As reações químicas apresentadas e os processos físicos que caracterizam a transformação dos materiais alimentados, apesar de complexos, podem ser simplificada e indicados quanto ao local de ocorrência no sistema-forno pelas etapas discriminadas a seguir e ilustradas na Figura 4.7.



**Figura 4.7** – Caracterização das zonas integrantes do processo de produção de clínquer em sistema-forno de via seca com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones

Fonte: CEMBUREAU (1999), adaptada pelo autor

### Zona de Secagem e Descarbonatação Parcial

A primeira etapa do processo de manufatura do clínquer ocorre no pré-aquecedor e consiste na evaporação da umidade residual e no início da descarbonatação da *farinha*, aquecida pelos gases de combustão em contracorrente.

### Zona de Calcinação

Na parte mais alta do forno, à entrada da *farinha* pré-aquecida, ocorre a segunda etapa da fabricação do clínquer com a completa dissociação dos carbonatos de cálcio e de magnésio, produzindo os óxidos de cálcio (sólido), de magnésio (sólido) e o dióxido de carbono (gás). As características dessa zona são também dependentes da existência de pré-calcinador.

### **Zona de Transição**

Na parte intermediária do forno começam a ocorrer as primeiras reações de clinquerização com formação de fase líquida, quando são produzidos os compostos de cálcio com alumínio e ferro, que resultarão no ferro-aluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) e aluminato-tricálcico ( $C_3A$ ). Também se inicia a formação do silicato dicálcico ( $C_2S$  - belita).

### **Zona de Queima ou Clinquerização**

À medida que o material continua se deslocando até a região mais quente do forno intensifica-se a formação e o crescimento de partículas de alita ( $C_3S$ ) proveniente da reação do silicato dicálcico ( $C_2S$ ) com os óxidos de cálcio ( $CaO$ ) remanescentes e sua sinterização.

Todo o consumo térmico no sistema-forno é necessário para propiciar a ocorrência da reação (4.10) da qual resultará a produção de alita que é o componente que confere maior resistência ao cimento.

### **Zona de resfriamento interno ou primário**

Após ultrapassar a zona de queima o clínquer experimenta a primeira etapa de resfriamento, ainda dentro do forno, sendo lançado no resfriador a uma temperatura de aproximadamente  $1\ 100^{\circ}C$  a  $1\ 400^{\circ}C$ , dependendo do tipo de equipamento utilizado nessa operação.

A taxa de resfriamento do clínquer juntamente com as características da atmosfera do forno influenciam o desenvolvimento da resistência e definição do comportamento do cimento. Publicações antigas já demonstravam, unanimemente, que o rápido resfriamento do clínquer geralmente levava a maiores valores da resistência inicial e final do cimento.

Estudos recentes têm mostrado que o resfriamento numa atmosfera contendo oxigênio geralmente leva a valores finais de resistência maiores que o resfriamento em atmosfera redutora.

O rápido rebaixamento da temperatura de sinterização é requerido afim de prevenir a redução do conteúdo de  $C_3S$  pela reabsorção, a qual poderia levar a um acréscimo do conteúdo de  $C_2S$  e  $C_3A$ . É também requerido para evitar a decomposição do  $C_3S$  para  $C_2S$  e  $CaO$  e para obter uma granulometria fina da cristalização do periclásio ( $MgO$ ) (SPRUNG, 1979).

#### 4.3.2.2 - Fluxo de Gases

Os gases de combustão percorrem o forno e ascendem no pré-aquecedor em contra-corrente com a *farinha*. Eles arrastam material particulado que é recuperado, por meio de separação centrífuga, numa bateria de ciclones instalada na saída (dos gases) do pré-aquecedor para posterior realimentação no forno rotativo.

Os gases provenientes do pré-aquecedor podem ser, total ou parcialmente, aproveitados para promover a secagem das matérias-primas alimentadas no moinho de cru. Mesmo que o moinho não esteja em operação os gases provenientes do sistema-forno podem ser integralmente direcionados para a torre de resfriamento ou arrefecimento, para condicionamento, mediante a aspersão de água sobre o fluxo gasoso. Através dessa operação controlam-se, principalmente, a temperatura e umidade dos gases para sua introdução nos equipamentos de controle de poluição (ECP's), bem como abate-se parcialmente o material particulado arrastado. Os gases resfriados são então direcionados aos ECP's constituídos, normalmente, por precipitadores eletrostáticos ou baterias de filtros de mangas.

Os filtros de mangas utilizam um meio filtrante para separar o particulado contido no fluxo gasoso. Enquanto o gás passa através das mangas de tecidos de fibras naturais ou sintéticas, as partículas de poeira são retidas entre os vazios das tramas.

Os precipitadores eletrostáticos ou eletrofiltros baseiam-se na utilização de forças eletrostáticas para separar o material particulado do fluxo gasoso. Descargas de eletrodos sob altas voltagens emitem elétrons os quais carregam negativamente as partículas de poeira. Devido ao campo elétrico formado entre os eletrodos de descarga e os de coleta as partículas

eletricamente carregadas são atraídas e removidas do fluxo gasoso. O condicionamento dos gases, através da torre de resfriamento, é imprescindível para se alcançar a máxima eficiência do ECP em função, dentre outras variáveis, da adequação da temperatura do fluxo gasoso e da resistividade das partículas.

Dependendo de características específicas dos gases, podem ser utilizados pré-coletores, geralmente constituídos por baterias de ciclones, antecedendo os equipamentos principais de alta eficiência, para remoção da fração mais grosseira de particulados.

Parte do gás quente pode também ser usado no processo de secagem/moagem de carvão ou coque de petróleo. O fluxo de gás utilizado no moinho de cru é posteriormente direcionado ao ECP juntamente com os gases provenientes da torre de resfriamento para a remoção do pó em suspensão e lançamento na atmosfera.

Maringolo (2001) comenta que a instalação de coletores de pó é importante não apenas do ponto de vista ambiental, mas sobretudo do econômico, visto que o pó retido representa de 20% a 30% da produção e pode retornar ao sistema como matéria-prima. As fábricas nacionais normalmente não necessitam de instalação de *by-pass* em razão dos baixos teores de álcalis nos materiais utilizados, propiciando, em grande parte, a integral reutilização dos pós retidos nos equipamentos de controle de poluição.

No entanto, dependendo das características qualitativas das matérias-primas pode ser necessária a instalação de um duto de *by-pass* na saída do forno rotativo para remoção de parte do fluxo gasoso do processo.

Essa parcela pode chegar a 15% em volume e minimiza a geração de colagens nos ciclones do pré-aquecedor devido às reações dos gases ácidos e os álcalis (óxidos de sódio e potássio) presentes da *farinha*. Nessas plantas são então geradas quantidades consideráveis de resíduos sólidos, cuja denominação em inglês, *cement kiln dust* (CKD) é traduzida como pó de forno de cimento. Esses resíduos, normalmente, não podem ser reintroduzidos no sistema devido aos altos teores de álcalis e cal livre que prejudicam a resistência do cimento.

Rhesi e Garg (1986) estudaram em escala de laboratório a produção de cimento usando pó de forno gerado em plantas produtivas da Índia. Essa iniciativa buscava alternativas para o gerenciamento do resíduo gerado numa

faixa de 8% a 12% da produção de clínquer em processos de via úmida e de 10% a 15% em processos de via seca. Os autores concluíram que o cimento *portland* comum poderia ser produzido através da utilização desses pós contendo até 1,5% de álcalis numa temperatura de 1 250°C, a partir da moagem do clínquer resultante com 4% em peso de gesso. Ressaltaram que a produção de clínquer na temperatura de 1 250°C contra 1 400°C a 1 450°C normalmente empregada para uma mistura convencional poderia resultar em considerável economia no consumo de combustíveis.

Kessler (1995) pesquisou a geração de pó de forno de cimento em processos de produção de clínquer referindo que a média nacional dos Estados Unidos em 1990 era de 9 toneladas para cada 100 t clínquer produzido. O índice médio de geração para as plantas de via úmida era de 11,5%, para os fornos longos de via seca 10,5% e para os fornos pré-aquecedores/pré-calcinadores de 4% da produção de clínquer.

O autor relatou que esse resíduo causa perda de rendimento da produção de clínquer, estimando que cada ponto percentual de pó residual aumenta o consumo específico de calor em aproximadamente 0,7% e diminui a produção de clínquer em aproximadamente 0,5%. Ele apresentou uma estratégia organizada para minimizar a geração de pó de forno contemplando o monitoramento e controle do processo, a otimização das matérias-primas e combustíveis, o aperfeiçoamento da combustão, a alteração das matérias-primas e o reprocessamento do pó gerado.

### **4.3.3 – Resfriamento secundário de clínquer**

Segundo Buzzi e Sassone (1993), o primeiro resfriador projetado e construído entre os anos de 1890 a 1900 era um tubo rotativo separado do forno, que tornou possível resfriar o clínquer para a realização da moagem da mistura de clínquer, gesso e aditivos, última etapa do processo de fabricação do cimento. Estimam que naquela época a temperatura do clínquer resfriado era menor que 350°C. Os autores mencionam que o resfriador planetário foi inventado aproximadamente 30 anos mais tarde, seguido finalmente pelo resfriador de grelhas durante os anos 40 do século 20.



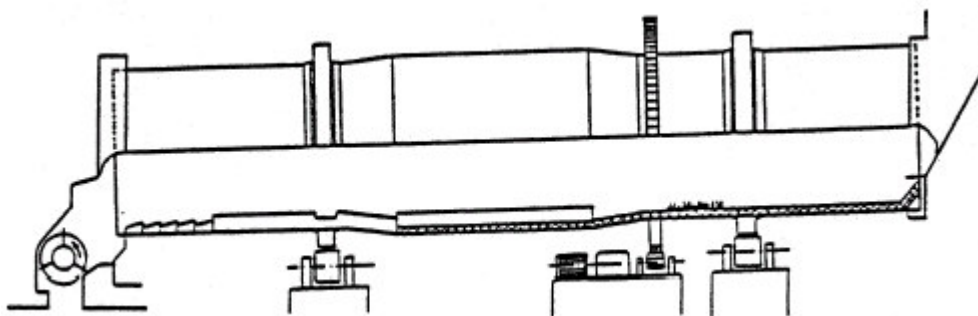
Os processos modernos de fabricação de clínquer podem, teoricamente, utilizar resfriadores rotativos, planetários e de grelhas, os quais necessitam satisfazer algumas funções principais:

- *proporcionar uma ótima recuperação do calor sensível do clínquer (1 200 a 1 500 kJ/kg de clínquer);*
- *aquecer o ar secundário e possivelmente também o ar terciário, requeridos como ar de combustão, nas temperatura mais altas possíveis para minimizar o consumo de combustível;*
- *adequar a taxa de resfriamento do clínquer aos requisitos de qualidade;*
- *resfriar o clínquer nas temperaturas mais baixas possíveis, levando em consideração o transporte, estocagem e moagem do cimento (BUZZI e SASSONE, 1993, p.297-298, tradução nossa).*

Na Tabela 4.4 são apresentados alguns dos principais parâmetros técnicos e tecnológicos para fins de comparação entre os três tipos de resfriadores de clínquer citados.

No resfriador consegue-se recuperar até 30% do calor gerado pela queima de combustíveis no sistema-forno tornando possível o manuseio do clínquer com os equipamentos convencionais de transporte (USEPA, 1994).

O resfriador rotativo (Figura 4.8) pode ser construído como uma continuação do forno ou, por razões de espaço, na direção oposta. Em 1993 estimava-se que somente 5% dos resfriadores de clínquer em uso por todo o mundo eram desse tipo (BUZZI e SASSONE, 1993).



**Figura 4.8** – Corte esquemático de um resfriador de clínquer rotativo  
Fonte: CEMBUREAU (1999), adaptado pelo autor

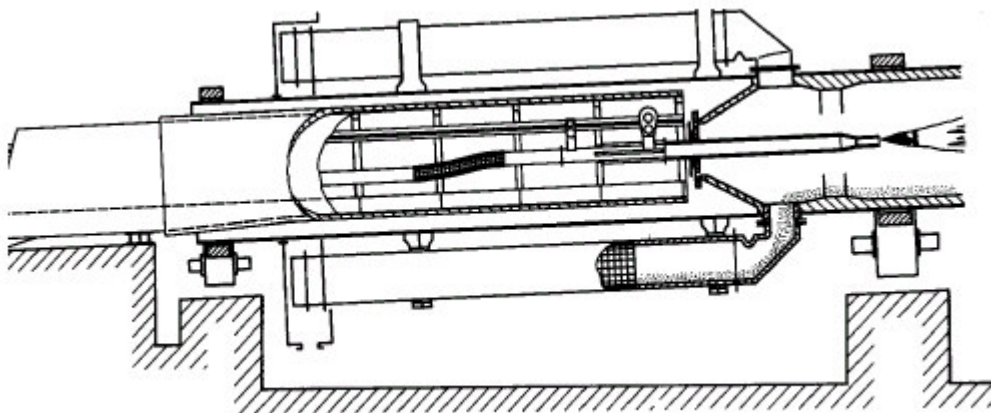
**Tabela 4.4** – Parâmetros técnicos e tecnológicos dos resfriadores de clínquer

Discriminação	Unidades	Valores numéricos		
		Rotativo	Planetário	Grelhas
Rendimento	t/d	<2 000 a 4 500	<3 000 a 4 000	700 a >10 000
Razão L/D (comprimento/diâmetro)	-	aprox. 10:1	9 a 12	
Faixa de velocidade	rpm	1 a 3		
Área de carregamento da grelha	t/m <sup>2</sup> d			26 a 55
Inclinação	% ou °	3 a 5%		até 10°
Volume específico de ar de resfriamento	Nm <sup>3</sup> /kg clínquer	0,8 a 1,1	0,8 a 1,0	1,6 a 2,6
Temperatura de entrada do clínquer	°C	1 200 a 1 400	1 100 a 1 250	1 300 a 1 400
Temperatura do clínquer resfriado	°C	200 a 400	200 a 300	70 a 120
Eficiência da área de resfriamento	%	56 a 70	60 a 68	60 a 75

Fonte: BUZZI e SASSONE (1993), organizada pelo autor

Durante o período de 1980 a 1986 os resfriadores planetários (Figura 4.9) equipavam aproximadamente 10% das novas instalações produtoras de cimento. O resfriador planetário consiste de 9 ou 11 tubos de resfriamento individuais instalados rígida e simetricamente ao redor do forno, em sua extremidade quente.

Após completar a etapa de sinterização o clínquer quente é lançado nos cilindros resfriadores através de aberturas existentes no casco do forno. A quantidade de ar de resfriamento é determinada pela necessidade de ar de combustão e entra através de cada cilindro a partir da extremidade de descarga do produto.



**Figura 4.9** – Corte esquemático de um resfriador de clínquer de satélites ou planetário

Fonte: CEMBUREAU (1999)

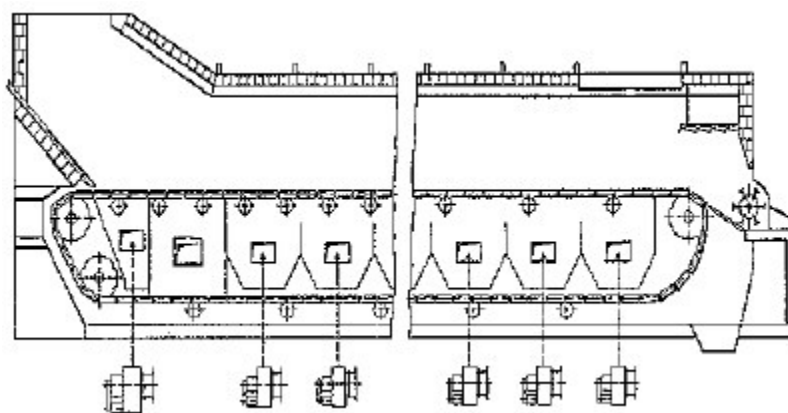
Semelhante ao resfriador rotativo, a transferência de calor ocorre através do fluxo de ar em contra-corrente ao clínquer, assim como, predominantemente na região interna dos tubos resfriadores, pelo fluxo transversal. Apresenta a desvantagem de não dispor, até o momento, de nenhuma forma comprovada de extração de ar terciário necessário para a operação de pré-calcinador, restringindo a possibilidade de otimização do processo.

Avaliações efetuadas em plantas industriais indicam que a eficiência dos resfriadores rotativos e planetários é fortemente dependente do tamanho das partículas do clínquer, fato não observado em resfriadores de grelhas, cujo rendimento independe, em grande medida, desse parâmetro.

O resfriador de grelhas é o tipo mais amplamente usado, estimando-se que entre 1980 a 1986 foi responsável por aproximadamente 85% do mercado. Entre os anos de 1978 a 1983 o desenvolvimento do resfriador de grelhas foi determinado predominantemente pela tendência de aumento das capacidades produtivas das plantas de cimento e atualmente as maiores unidades podem resfriar até 10 000 toneladas diárias de clínquer.

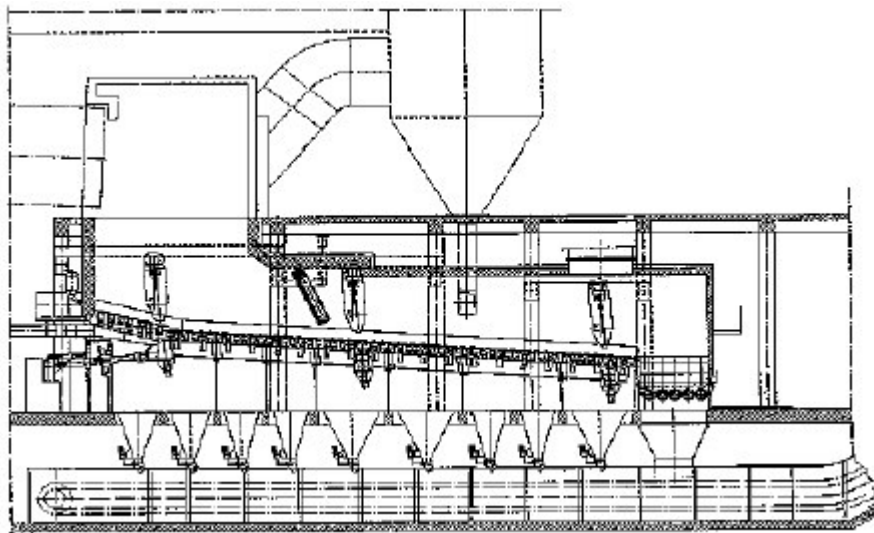
Duas formas de transporte do clínquer são aplicadas nesses resfriadores: grelhas móveis de circulação contínua (Figura 4.10) e grelhas convencionais (4.11) com movimentos alternados para frente e para trás (*reciprocating action*). Podem ser construídos inclinados, horizontais, combinados ou com grelhas escalonadas.

Devido à complexidade do mecanismo e à deficiente recuperação de calor o projeto de circulação contínua foi abandonado por volta do ano de 1980, no entanto, os resfriadores de grelhas ainda em uso incluem ambos os tipos.



**Figura 4.10** – Corte esquemático de um resfriador de clínquer de grelhas móveis

Fonte: CEMBUREAU (1999)



**Figura 4.11** – Corte esquemático de um resfriador de clínquer de grelhas (convencional)

Fonte: CEMBUREAU (1999)

Resfriadores de grelhas são normalmente operados através do fornecimento de ar frio proveniente de potentes ventiladores instalados por debaixo das grelhas, os quais são necessários para manter o perfil de pressão.

Duas zonas distintas de resfriamento podem ser identificadas nesse tipo de equipamento:

- a zona de recuperação, a partir da qual o ar quente é usado como ar de combustão para queima do combustível no maçarico principal (ar secundário) e no pré-calcinador (ar terciário); e
- zona de pós-resfriamento, onde ar de resfriamento adicional garante as menores temperaturas de saída do clínquer (CEMBUREAU, 1999, p.120, tradução nossa).

Por volta de 1983 foi iniciado o desenvolvimento de modernas tecnologias para resfriadores de grelhas, eliminando os problemas anteriores do sistema convencional otimizando-se a troca de calor. Também tornaram-se mais compactos requerendo menores quantidades de ar de resfriamento e menores equipamentos de despoejamento (BUZZI e SASSONE, 1993; USEPA, 1994; CEMBUREAU, 1999).

#### 4.3.4 - Principais parâmetros de controle do processo produtivo

Kihara (1999) menciona que o forno rotativo de produção de clínquer é um reator químico de alta eficiência que opera em condições de alta temperatura e tempo de residência, ambiente oxidante e em regime de alta turbulência. Os parâmetros relacionados a seguir são citados por Marques<sup>11</sup> (2000 apud Forster, 1997, p.34) para fins de controle do processo de produção de clínquer, os quais podem ser vistos como indicadores de desempenho da combustão:

- **emissão de monóxido de carbono:** tem a concentração monitorada na saída da torre de ciclones, pois é indicativa das condições da combustão no interior do forno;
- **emissão de óxidos de nitrogênio:** tem a concentração monitorada devido à estreita dependência, na sua formação, da temperatura da chama e do ambiente oxidante na região da chama e pela sensibilidade às alterações das condições da combustão;
- **CaO livre no clínquer:** é um indicativo do grau em que se complementam as reações das matérias-primas no interior do forno, sendo determinado através de análise específica;
- **depressão na torre de ciclones:** a alteração da perda de carga entre os estágios do pré-aquecedor pode indicar a ocorrência de situações anormais nos processos de troca térmica, transporte de massa e de gases. A presença de materiais de baixa volatilidade no processo pode resultar em circulações internas de voláteis levando a incrustações provocadas pela condensação desses compostos em zonas mais frias do sistema-forno;
- **torque do forno:** a maior formação de fase líquida gera maior pressão sobre o rolo de assentamento do forno exigindo maior torque para que possa realizar uma revolução completa;
- **peso-litro do clínquer:** um clínquer denso indica que a “queima” do clínquer foi energética. Um valor muito baixo, ao contrário, indica que a “queima” foi insuficiente necessitando adequação das variáveis de controle do processo.

---

<sup>11</sup> MARQUES, L.M.L. (2000). *Co-processamento de resíduos industriais em fornos de clínquer – aspectos do desempenho ambiental associados aos metais pesados*. 122p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2000 apud FORSTER, H. (1997) *Processo de fabricação de cimento. Indústria de cimento: fabricação, co-processamento e meio ambiente*. ABCP, FEEMA, Rio de Janeiro. p.21-55, 1995.

#### 4.4 - Emissão de poluentes no processo de produção de clínquer

O gás gerado no sistema-forno não contém somente CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub> e vapor d'água mas também particulados da alimentação do pré-aquecedor e inúmeros outros compostos gasosos e vapores. Ele pode conter também compostos alcalinos, enxofre, cloretos e fluoretos os quais são formados a partir dos constituintes das matérias-primas e combustíveis alimentados no forno, vaporizados e dissociados pelas reações na fase gás.

São apresentados nesta seção, de maneira resumida, os principais poluentes gerados durante o processamento das matérias-primas usadas na fabricação do clínquer para cimento. Paralelamente, quando oportuno, serão também abordadas as formas de controle aplicáveis a cada tipo de poluente para minimização das emissões lançadas na atmosfera.

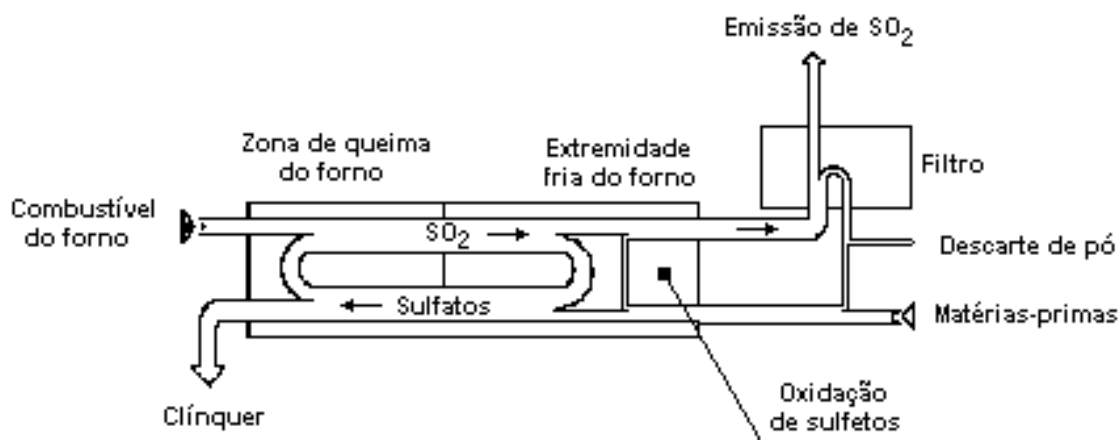
Justifica-se dessa forma a citação inicial dos três critérios básicos disponíveis para efetivar tais reduções conforme proposto em CEMBUREAU, (1999):

- *manter o processo existente, porém, reduzindo a entrada de precursores das emissões no sistema;*
- *modificar o processo existente, caracterizando as medidas de redução primárias ou integradas; e*
- *manter o processo existente, porém, adicionando uma unidade específica de limpeza dos gases exauridos, caracterizando as medidas de redução secundárias (CEMBUREAU, 1999, p.155, tradução nossa).*

##### 4.4.1 - Compostos de enxofre

A formação e a emissão de SO<sub>x</sub> está associada tanto às características do combustível (composição, propriedades físicas, taxa de pirólise) quanto às condições de combustão por meio dos parâmetros aerodinâmicos da chama: turbulência, distribuição das zonas de recirculação e ritmo de queima (GRECO, 1999). Segundo o autor a produção dos óxidos de enxofre em forno rotativo de produção de clínquer tem uma natureza complexa em razão dos complicados mecanismos envolvidos na sua formação e decomposição.

Bech e Gundtoft (1998) advertem que quando da investigação da emissão de  $\text{SO}_2$  através de fornos de clínquer é necessário tratar separadamente os processos produtivos de via úmida e longos de via seca dos sistemas-fornos pré-aquecedores. Os autores referem que os fornos de via úmida e os longos de via seca são sistemas abertos nos quais parte dos componentes vaporizados na zona de queima percorrem toda a extensão do forno juntamente com os gases de combustão até atingir a chaminé (Figura 4.12).



**Figura 4.12** – Ciclo do enxofre num sistema-forno de via úmida

Fonte: Smart, Jenkins e VAN de Kamp (1999), adaptada pelo autor

Esses fornos não dispõem de pré-aquecedores, os quais são responsáveis pela maior recirculação de componentes voláteis, visto que todas as etapas da produção do clínquer ocorrem no interior da fornalha rotativa. Os fornos equipados com pré-aquecedores, porém, são sistemas necessariamente fechados devido às altas concentrações de material particulado seco finamente dividido existente na torre de ciclones fruto da alimentação da *farinha*.

A existência dessa alta concentração de poeira no interior do pré-aquecedor promove uma verdadeira “lavagem” do fluxo gasoso que avança em contra-corrente, através da condensação de voláteis na superfície sólida, favorecendo a reintrodução desses compostos no sistema produtivo e minimizando as emissões atmosféricas. A observação dos autores é dessa



maneira justificada em razão das dinâmicas diferenciadas de recirculação dos compostos de enxofre nesses sistemas.

Nielsen e Jepsen (1991), considerando a circulação interna e as taxas de evaporação e absorção dos óxidos de enxofre em fornos de via úmida, relatam que aproximadamente 30% do enxofre introduzido nesses sistemas é emitido como  $\text{SO}_2$ . Essas emissões aumentam proporcionalmente à introdução no forno dos compostos de enxofre nos combustíveis e nas matérias-primas e são agravadas nos processos de via úmida devido ao maior consumo térmico específico quando comparado com os processos de via seca.

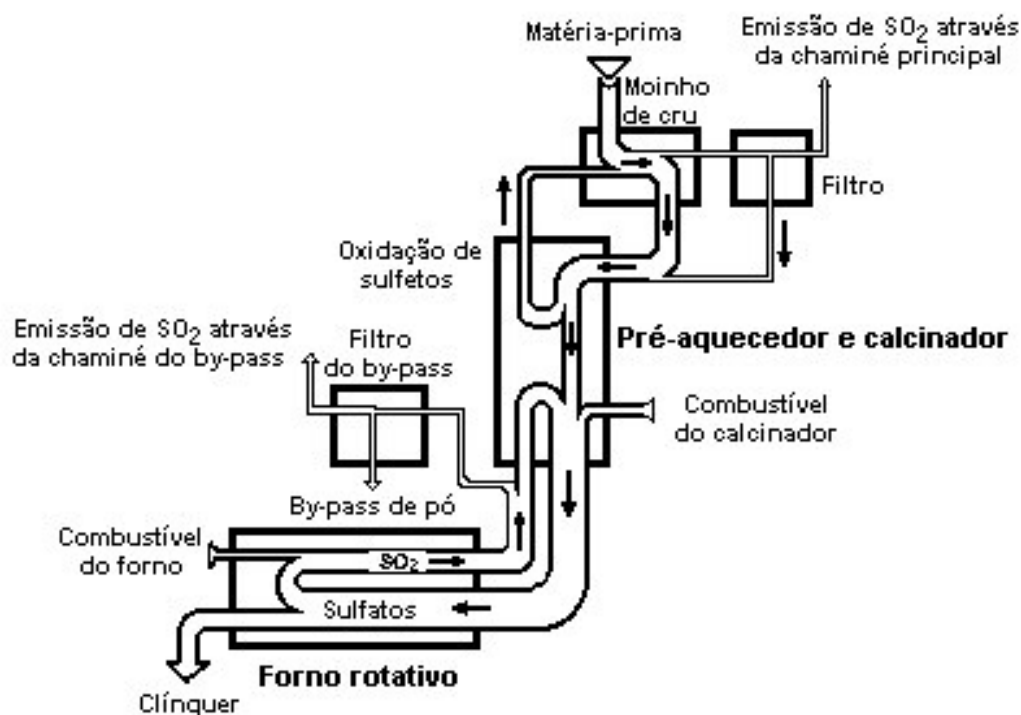
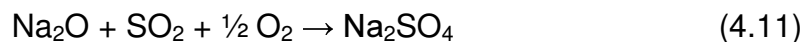
Os autores citam que o enxofre entra no processo principalmente na forma de sulfatos, sulfetos e compostos orgânicos sulfurosos, os quais podem ser reduzidos ou oxidados para o estado gasoso na forma de  $\text{SO}_2$ .

Os sulfatos nas matérias-primas são termicamente estáveis até temperaturas próximas a  $1\ 200^\circ\text{C}$  e os sulfetos são decompostos e oxidados em temperaturas moderadas, na faixa de  $400^\circ\text{C}$  a  $600^\circ\text{C}$ , para produzir  $\text{SO}_2$  quando aquecidos pelos gases oriundos do forno (CEMBUREAU, 1999).

Greco (1999) descreve que o ciclo do enxofre em fornos rotativos se inicia com a decomposição, em alta temperatura, dos sulfatos e sulfitos e assim, na zona de queima, uma parte desses compostos se decompõe e libera  $\text{SO}_2$  para a fase gasosa. Na zona fria do forno esse dióxido de enxofre combina-se com os óxidos alcalinos (Ca e Mg) da *farinha* através de uma reação que depende tanto da concentração do dióxido de enxofre quanto da disponibilidade da área de superfície reativa na fase sólida. Smart, Jenkins e VAN de Kamp (1999) ilustram o esquema de circulação do enxofre em forno de via seca, conforme apresentado na Figura 4.13.

O uso de matérias-primas ricas em álcalis (Na e K) leva a um aumento da absorção de enxofre no clínquer, além de representar uma efetiva medida corretiva na produção (SPRUNG, 1979).

Nielsen e Jepsen (1991) estudaram o comportamento das emissões de enxofre em fornos de clínquer de via seca com pré-aquecedor e relataram, conforme já exposto por Greco (1999) e CEMBUREAU (1999), que o  $\text{SO}_2$  vindo do forno e colocado em contato com a cal livre ( $\text{CaO}$ ) proveniente da descarbonatação da matéria-prima crua, constituída basicamente por  $\text{CaCO}_3$ , concorre para a formação de sulfato de cálcio segundo as reações:



**Figura 4.13** - Ciclo do enxofre num sistema-forno de via seca com pré-aquecedor e pré-calcinador

Fonte: Smart, Jenkins e VAN de Kamp (1999), adaptada pelo autor

Dessa forma, quase todo o  $\text{SO}_2$  formado no forno é absorvido pela *farinha* crua e reintroduzido no sistema. Emissão significativa de  $\text{SO}_2$  em fornos pré-aquecedores somente ocorrerá se as matérias-primas contendo não sulfatos, tal como pirita ( $\text{FeS}_2$ ), forem alimentadas nos estágios superiores da torre de ciclones. Nessa fase do processo a temperatura e a concentração de

cal livre e de materiais alcalinos não são altas o suficiente para assegurar a completa reabsorção do  $\text{SO}_2$  que é formado.

O sulfeto na forma de  $\text{FeS}_2$  e o enxofre orgânico presente na *farinha* começam a formar  $\text{SO}_2$  em temperaturas ao redor de  $300^\circ\text{C}$  e normalmente de 30% a 50% do enxofre na forma de pirita poderá ser emitido pela seção do pré-aquecedor como  $\text{SO}_2$  gasoso em razão das condições mencionadas (BECH e GUNDTTOFT, 1998; NIELSEN e JEPSEN, 1999 e CEMBUREAU, 1999).

Uma parcela desses compostos é absorvida no moinho de cru, devido o direcionamento de parte dos gases quentes do forno para a secagem das matérias-primas, através de vigorosa movimentação do material pulverulento que maximiza o contato dos compostos de enxofre com aqueles alcalinos da *farinha* crua. Por esse mesmo mecanismo uma parte do  $\text{SO}_2$  pode também ser absorvida pelo contato com os pós no interior do equipamento de controle de material particulado.

Em baixas temperaturas o  $\text{SO}_2$  pode ser mais oxidado para formar  $\text{SO}_3$  (gasoso). Entretanto, devido às temperaturas de lançamento dos gases do forno de clínquer e sua passagem pelo moinho de cru, onde aproximadamente 40% do  $\text{SO}_2$  pode ser absorvido pela fase sólida, mais de 99% do enxofre emitido via chaminé será na forma de  $\text{SO}_2$ . Então, na emissão do sistema-forno é desnecessário controlar componentes de enxofre outros que não o  $\text{SO}_2$  (NIELSEN e JEPSEN, 1991; BECH e GUNDTTOFT, 1998).

Greco (1999) comenta que de modo geral a quantidade de óxido de enxofre expurgada com o clínquer depende de quatro fatores:

- *teor de enxofre no combustível;*
- *teores de enxofre e álcalis na matéria-prima;*
- *tempo de permanência e temperaturas da fase sólida na zona de alta temperatura do forno - fator esse que está interligado às velocidades de aquecimento e de resfriamento do clínquer e, portanto, à forma da chama; e*
- *processo de fabricação do clínquer (GRECO, 1999, p.4).*

Segundo Nielsen e Jepsen (1991), e como já caracterizado por CEMBUREAU (1999), para se obter a redução da emissão de  $\text{SO}_2$  num sistema de piro-processamento, as ações possíveis se resumem a:

- ***manter o processo existente promovendo a redução da entrada de enxofre no sistema:*** medida que implica na aceitação de considerável aumento no custo do combustível com baixo teor de enxofre, visto que a redução do teor nas matérias-primas é quase impossível em face das fontes disponíveis;

- **modificar o processo existente:** o que implica na aceitação de que maiores investimentos de capital serão freqüentemente necessários no sistema de piro-processamento para redução da emissão de  $SO_2$ ;
- **manter o processo existente e adicionar uma unidade de tratamento do gás exaurido:** uma alternativa que poderia ser adotada para fornos de via úmida e longos de via seca existentes seria a instalação de unidades separadas de dessulfurização do fluxo gasoso (NIELSEN e JEPSEN, 1991, p.434, tradução nossa).

#### 4.4.2 - Compostos de nitrogênio

Os óxidos de nitrogênio, genericamente denominados  $NO_x$ , representam uma família de sete compostos (Tabela 4.5). A USEPA (1999) regulamenta somente o nível de dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), como um substituto dessa família, devido tratar-se da forma preponderante na atmosfera e que é gerada por atividades antropogênicas.

**Tabela 4.5** - Famílias de compostos de  $NO_x$  e suas propriedades

Fórmula	Nome	Valência do N	Propriedades
$N_2O$	óxido nitroso	1	gás incolor solúvel em água
$NO$	óxido nítrico	2	gás incolor
$N_2O_2$	dióxido dinitrogênio		levemente solúvel em água
$N_2O_3$	trióxido dinitrogênio	3	sólido negro, solúvel e se decompõe na água
$NO_2$	dióxido de nitrogênio	4	gás marron-avermelhado,
$N_2O_4$	tetróxido dinitrogênio		muito solúvel e se decompõe na água
$N_2O_5$	Pentóxido dinitrogênio	5	sólido branco, muito solúvel e se decompõe na água

Fonte: USEPA (1999)

O dióxido de nitrogênio não é um poluente atmosférico importante somente por ele mesmo, mas também porque reage na presença do ar e dos

raios ultravioleta da luz solar para formar ozônio e óxido nítrico (NO) e porque na presença de umidade favorece a formação de chuva ácida. O NO formado reage com os radicais de hidrocarbonetos livres na atmosfera, os quais são também gerados pela ação dos raios ultravioleta sobre os compostos orgânicos voláteis (COV's). Esses radicais livres reciclam o NO para NO<sub>2</sub> e nessa via cada molécula de NO pode produzir ozônio múltiplas vezes. Isso continuará até que os compostos orgânicos voláteis sejam reduzidos a compostos de carbono de cadeia curta que deixam de ser foto-reativos.

A chuva ácida, que também pode ser provocada pela presença de alta concentração de óxidos de enxofre na atmosfera, juntamente com névoa e deposição seca afetam severamente certos ecossistemas e alguns segmentos econômicos. Fica evidenciada, portanto, a necessidade da implementação de ações de controle para redução das emissões de NO<sub>x</sub>.

O óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), o óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) são os mais abundantes óxidos de nitrogênio presentes no ar atmosférico.

O trióxido dinitrogênio (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e tetróxido dinitrogênio (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) existem numa concentração muito baixa nos gases de chaminés aparecendo também em baixas concentrações na atmosfera de maneira que suas presenças e seus efeitos são frequentemente ignorados. O N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> é composto por duas moléculas de NO<sub>2</sub> coligadas que reagem semelhantemente ao dióxido de nitrogênio permitindo que a presença do N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> seja mascarada pelo mais abundante NO<sub>2</sub>.

O pentóxido dinitrogênio (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) é a forma mais altamente ionizada de óxido de nitrogênio, sendo gerado numa concentração muito pequena na atmosfera, a menos que seja emitido por um processo específico, tal como uma instalação de produção de ácido nítrico. O N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> é altamente reativo e forma ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) quando decomposto em água.

O NO e NO<sub>2</sub> certamente são as formas mais abundantes de NO<sub>x</sub> e são largamente, mas não exclusivamente, provenientes de fontes antropogênicas (USEPA,1999).

Smart, Jenkins e VAN de Kamp (1999) comentam que os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) são formados em concentrações variáveis em todos os processos de combustão, sendo essas emissões no fluxo de gases geralmente reportadas como a soma de NO e NO<sub>2</sub>.

Gardiner (2000) refere que o interesse na química da combustão dos compostos de nitrogênio deriva da função dos óxidos de nitrogênio no ambiente e dos rigorosos regulamentos ambientais que requerem progressivamente abordagens sofisticadas para o controle da formação desses poluentes. Apresenta o cenário para as considerações das reações elementares específicas necessárias à discussão dos mecanismos para a produção e remoção do NO, a espécie primária de NO<sub>x</sub> produzida na combustão.

Cita que o NO é reconhecido ser formado através de diversas vias conforme discriminado a seguir:

- *NO térmico ou de Zeldovich que é reconhecidamente formado de chamas de altas temperaturas;*
- *NO prompt ou de Fenimore que é gerado quase que de imediato na frente de chama e auxiliado pela presença de radicais;*
- *NO do combustível que resulta da conversão dos compostos contendo nitrogênio do combustível em NO;*
- *Mecanismo do N<sub>2</sub>O ou de Wolfrum que pode ser importante em chamas de alta pressão; e*
- *Mecanismo NNH que é ativo na frente da chama onde aparecem altas concentrações atômicas dos reagentes (GARDINER, 2000, p.126-128, tradução nossa).*

O autor comenta ainda que todos os mecanismos relacionados, exceto o terceiro, convertem o nitrogênio atmosférico em NO e se referem a todos os combustíveis. O NO do combustível, no entanto, diz respeito à combustão do petróleo, carvão e biomassa.

Battye, Walsh e Lee-Greco (2000) discorrem sobre a geração dos óxidos de nitrogênio relatando que condições favoráveis para a formação de NO<sub>x</sub> são rotineiramente alcançadas em fornos de produção de clínquer para cimento em razão das altas temperaturas intrínsecas ao processo produtivo. Referem que embora existam outras operações que utilizam gases quentes na planta industrial, como por exemplo a secagem de matérias-primas e combustíveis, como carvão ou coque de petróleo, elas freqüentemente reaproveitam o calor gerado no forno tornando essas contribuições desprezíveis para as emissões totais de NO<sub>x</sub>.

Nesses fornos as emissões dos óxidos de nitrogênio são formadas durante a queima de combustíveis por dois dos principais mecanismos referidos:

- a oxidação do nitrogênio molecular presente no ar de combustão;
- e
- a oxidação dos compostos de nitrogênio presentes no próprio combustível.

As autoras observam que às vezes o material cru alimentado no forno também contém significativas quantidades de compostos nitrogenados que podem levar à formação de óxidos de nitrogênio em processo parecido com o do  $\text{NO}_x$  do combustível. Destacam que os fornos rotativos de vias úmida e seca e a maioria dos fornos pré-aquecedores dispõem de somente uma zona de queima do combustível, denominada de zona de queima primária.

Os modernos fornos pré-aquecedores/pré-calcinadores e os fornos pré-aquecedores com sistema de queima no duto de ascensão dos gases dispõem de duas zonas de queima, podendo, os fornos pré-calcinadores contarem, ainda, com três zonas de queima. Como as temperaturas características nessas zonas de queima são diferentes, os fatores que afetam a formação dos óxidos de nitrogênio são também um tanto diversas para cada condição de combustão.

Na zona de combustão primária localizada na extremidade quente do forno, as altas temperaturas dos gases, usualmente acima de  $1\ 700^\circ\text{C}$ , levam à formação predominante do  $\text{NO}_x$  térmico, enquanto as temperaturas mais baixas na zona secundária de queima limitam a formação por esse mecanismo.

Com respeito ao  $\text{NO}_x$  proveniente da oxidação no nitrogênio do ar atmosférico Gardiner (2000) e Batty, Walsh e Lee-Greco (2000) comentam que é formado pela reação homogênea do nitrogênio e oxigênio na fase gasosa em altas temperaturas através das principais reações básicas de Zeldovich apresentadas a seguir:





Os autores comentam que no mecanismo completo de reações proposto por Zeldovich as duas etapas mais importantes na formação do NO térmico são dadas pelas reações (4.16) e (4.17), as quais às vezes são usadas para caracterizar o “mecanismo de Zeldovich”. Gardiner (2000) cita que a inclusão da reação (4.18) refere-se ao “mecanismo estendido de Zeldovich”.

As duas primeiras reações compõem a sequência normal, de modo que uma pequena quantia de oxigênio atômico pode produzir uma grande quantidade de NO. A reação (4.16) tem a sua taxa limitada por causa da alta energia de ativação necessária, de aproximadamente 320 kJ/mol (76,4 kcal/mol). O “mecanismo de Zeldovich” é muito sensível a temperatura não somente por causa da alta energia de ativação requerida pela reação (4.16), mas também por causa da concentração de átomos de oxigênio nas chamas aumentar rapidamente com a temperatura crescente.

Os fatores determinantes para a formação de NO<sub>x</sub> térmico em forno rotativo de produção de clínquer são:

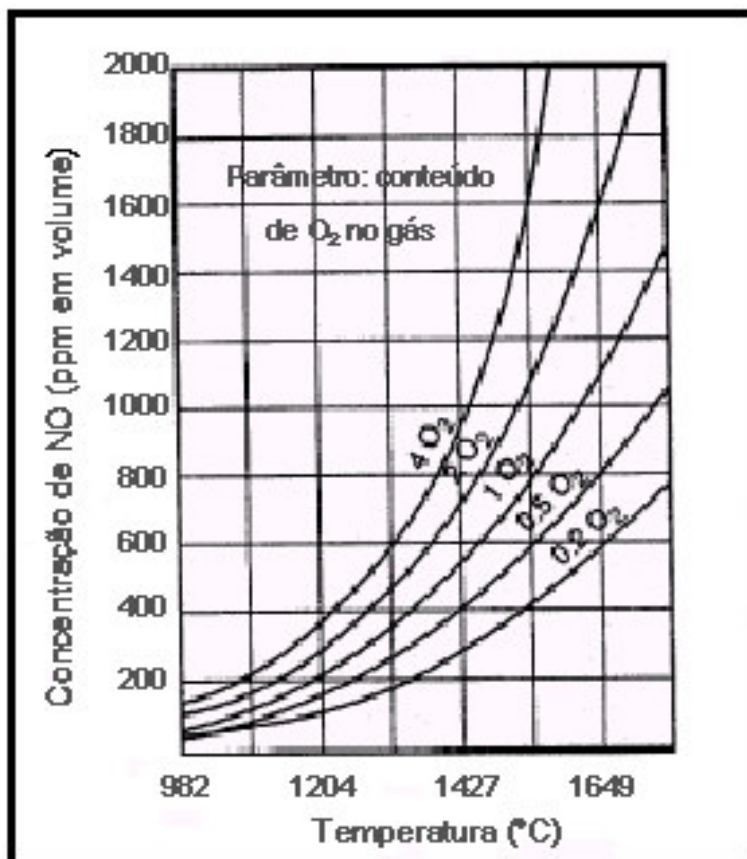
- a estabilidade da temperatura;
- a estabilidade da taxa de alimentação;
- a queimabilidade da mistura crua;
- a temperatura adiabática de chama;
- o formato da chama;
- a taxa de excesso de ar;
- os tempos de retenção do material e dos gases na zona de queima; e
- o controle dos álcalis e do enxofre.

Tais fatores resumem-se então a parâmetros relacionados com o tipo de combustível, equipamentos e processo produtivo utilizado (BECH e GUNDTTOFT, 1998; GRECO, 1999; BATTYE, WALSH e LEE-GRECO, 2000).

Na Figura 4.14 são mostradas as concentrações teóricas de equilíbrio do óxido nítrico em chaminé para diferentes níveis de excesso de ar. Como pode ser observado as concentrações de NO acima de 1 000 ppm



podem possivelmente ser formadas em temperaturas típicas da carga do forno na faixa de 1 430°C a 1 480°C, enquanto as temperaturas correspondentes à fase gasosa encontram-se na faixa de aproximadamente 1 650°C.



**Figura 4.14** – Concentrações teóricas de equilíbrio de óxido nítrico no gás de combustão mantido no ar

Fonte: Battye, Walsh e Lee-Greco (2000), adaptada pelo autor

O segundo principal mecanismo de formação de óxidos de nitrogênio em processo de manufatura de clínquer refere-se ao NO<sub>x</sub> do combustível. A maioria dos combustíveis, diferentemente dos gases, contém nitrogênio ligado a compostos orgânicos, os quais, durante a combustão são convertidos numa variedade de espécies de cianeto e aminas que são subsequenteemente oxidadas para NO<sub>x</sub> dependendo da disponibilidade local de oxigênio (SMART, JENKINS e VAN DE KAMP, 1999 e GARDINER, 2000).

Os autores referem que, freqüentemente, é assumido que a maior parte do nitrogênio do combustível é rapidamente convertido a HCN nas chamas. As cinéticas subsequentes do HCN são geralmente similares àquelas que se aplicam para HCN na formação do NO prompt, conforme representada pela reação (4.19).



O nitrogênio atômico produzido pode formar uma molécula de NO a partir das reações (4.17) ou (4.18), enquanto o HCN pode levar a uma segunda molécula de NO através de uma série de outras reações. Os mecanismos através dos quais o NO<sub>x</sub> é formado a partir dos compostos nitrogenados do combustível são extremamente complexos. Nem todo o nitrogênio do combustível é convertido a NO<sub>x</sub> durante a combustão sendo que parte é convertido a nitrogênio molecular (SMART, JENKINS e VAN DE KAMP, 1999 e GARDINER, 2000).

Na zona secundária de queima de fornos pré-aquecedores e pré-calcinadores, onde a temperatura varia de 820°C a 1 100°C, as seguintes reações podem ocorrer, conforme apresentado por Nielsen e Jepsen (1991):



onde “N” é o nitrogênio originário dos compostos nitrogenados do combustível.

A reação (4.20) mostra que a formação de NO na zona de queima secundária dependerá do conteúdo de nitrogênio no combustível e do nível de oxigênio na zona de queima. Por outro lado, a reação (4.21) indica que se o NO já estiver presente no gás introduzido na zona secundária de queima pode ocorrer uma diminuição desse óxido devido à ação do nitrogênio do combustível como um agente redutor. Conseqüentemente, a formação líquida

de NO na zona secundária de queima também dependerá da concentração inicial do NO no gás de combustão.

Os autores citam ainda que medições têm mostrado que o conteúdo volátil de combustível (sólido) e a temperatura na zona secundária de queima também influenciam a formação do óxido nítrico. Com o aumento do conteúdo volátil no combustível a razão de conversão do nitrogênio para NO parece diminuir e a taxa de reação (4.21) aumenta mais rapidamente com a temperatura que com a reação (4.20). Com isso um aumento na temperatura da zona secundária de queima talvez reduza a formação líquida de NO<sub>x</sub>.

Battye, Walsh e Lee-Greco (2000) citam que adicionalmente aos mecanismos específicos de formação do NO<sub>x</sub>, a eficiência energética do processo de fabricação do clínquer é também importante à medida que ela determina a quantidade de entrada de calor necessária para a produção de uma quantidade unitária do produto. Uma alta eficiência térmica leva a um menor consumo de calor e, conseqüentemente, de combustível produzindo emissões menores de NO<sub>x</sub> por tonelada de clínquer.

As autoras citam que as abordagens de controle de NO<sub>x</sub> aplicáveis para a indústria cimenteira podem ser agrupadas em três categorias:

- **modificações do processo nas quais a ênfase é sobre o aumento da eficiência energética e produtividade, mediante:** controle de temperatura e nível de excesso de ar na zona de queima; controle da composição da mistura alimentada no sistema-forno; combustível do forno; aumento da eficiência térmica;
- **controle da combustão onde a ênfase é sobre a redução da formação do NO<sub>x</sub> através de:** combustão estagiada do ar através de recirculação do gás da chaminé e uso de queimadores de baixo NO<sub>x</sub>; combustão estagiada do combustível através do uso de pré-aquecedores e pré-calcinadores e combustível derivado de pneus, assim como de pré-calcinadores de baixo NO<sub>x</sub> e queima no meio do forno;
- **sistemas de controle para remoção do NO<sub>x</sub> formado no processo de combustão através de:** redução seletiva catalítica com uso de amônia anidra, diluída com ar ou vapor na presença de um catalisador (TiO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, entre outros) para injeção no fluxo gasoso (esse sistema é grandemente utilizado em incineradores e usinas de geração de energia); redução seletiva

não catalítica com o uso de amônia ou uréia sem a presença de catalisador. Essa técnica requer a injeção dos reagentes no interior do forno em temperaturas entre 870°C e 1 090°C para decompor a uréia produzindo amônia. Pode também ser usada a injeção de bio-sólidos desidratados provenientes de estação de tratamento de esgotos. O princípio básico é utilizar o conteúdo natural de amônia presente no lodo desidratado, sem uso de calor.

Greco (1999) cita que os recursos mais usuais para reduzir a emissão de NO<sub>x</sub> em fornos rotativos incluem:

- ♦ **redução da relação de ar primário** - com este recurso diminui-se a quantidade de oxigênio disponível para reagir com o nitrogênio e outros compostos nitrogenados nas vizinhanças do pico de temperatura;

- ♦ **estagiamento da chama** - pelo controle das distribuições de massas e velocidades dos diversos fluxos de ar é possível fazer com que a relação temperatura/quantidade de oxigênio disponível tenha um valor adequado para inibir a formação de NO<sub>x</sub>, num mecanismo que se realiza em duas etapas:

- ♣ a primeira que corresponde a uma rápida ignição em alta temperatura e com baixa concentração de oxigênio; nela pode ocorrer formação de monóxido de carbono o qual inibe ainda mais a formação de NO<sub>x</sub>;

- ♣ a segunda etapa que ocorre em temperaturas mais baixas e com alta concentração de oxigênio; nela ocorre a transformação do monóxido de carbono formado na primeira etapa para dióxido de carbono;

- ♦ **injeção de líquidos e gases inertes** - com este recurso consegue-se o abaixamento dos picos de temperatura e/ou a expulsão do oxigênio das regiões com alta concentração de compostos nitrogenados; o procedimento é normalmente realizado por meio da injeção, no forno, de água, líquidos de alta volatilidade ou gases com baixa concentração de oxigênio (recirculados da saída do forno ou da torre);

- ♦ **injeção de amônia na região fria do forno, isto é, a jusante da chama** - com este recurso se consegue decompor o NO<sub>x</sub> em água e nitrogênio gasoso como resultado da reação entre a amônia e o NO<sub>x</sub>.

#### 4.4.3 - Emissões de CO<sub>2</sub>

Segundo a *United Nations Environment Programme* (UNEP) (2001), a concentração de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na atmosfera terrestre antes da Era Industrial, por volta do ano 1750, era de  $280 \pm 10$  partes por milhão (ppm) por milhares de anos. Desde então ela aumentou, de início, lenta e depois progressiva e mais rapidamente atingindo 367 ppm em 1999, resultando numa taxa de crescimento sem precedentes durante o século passado. As concentrações de  $\text{CO}_2$  foram medidas com alta precisão desde o ano de 1957 e essas medições concordavam com as avaliações feitas em amostras de gelo.

A entidade de pesquisa relata também que aproximadamente três quartos (3/4) dessas emissões são devidas à queima de combustíveis fósseis, representando  $6,3 \pm 0,4$  petagrama<sup>12</sup> (Pg) de carbono por ano durante o período de 1990 a 1999, equivalente à média diária de aproximadamente 17,3 milhões de toneladas.

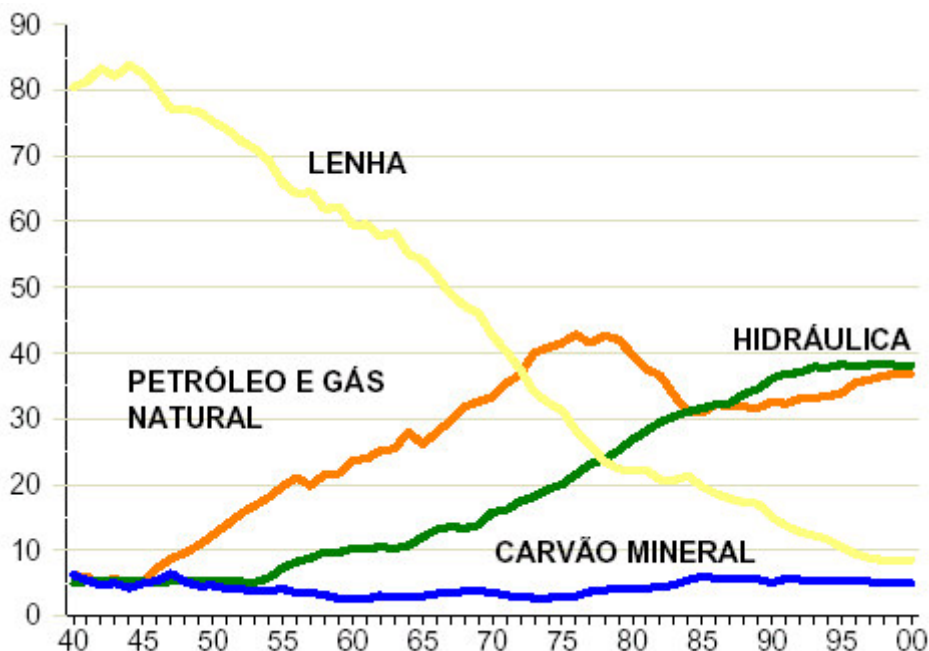
Essa situação reflete também a condição nacional em matéria de consumo energético, conforme pode ser observado na Figura 4.15, que mostra a evolução das disponibilidades relativas de energia no período de 1940 a 2000. Verifica-se, com relação à lenha, a acentuada e crescente redução da disponibilidade com a conseqüente redução do consumo dessa energia renovável. Observa-se também o gradativo crescimento, até a década de 80, das disponibilidades energéticas de derivados de petróleo, acompanhando a tendência mundial. Registre-se que a lenha consumida não foi replantada, providência essa desejável para que o  $\text{CO}_2$  liberado como produto de combustão fosse removido da atmosfera.

No processo produtivo de clínquer, além das emissões de  $\text{CO}_2$  devidas à queima de combustíveis, destaca-se a calcinação dos carbonatos de cálcio e magnésio como fonte significativa de liberação do poluente na atmosfera. As emissões resultantes da calcinação da *farinha*, ao contrário daquelas provenientes da queima de combustíveis, pouco podem ser influenciadas por intervenções na rotina operacional ou de processo. Em razão da imperiosa necessidade de redução dos custos de produção a indústria cimenteira minimizou progressivamente o consumo de energia resultando em

---

<sup>12</sup> Petagrama: equivalente a  $1 \times 10^{15}$  grama.

níveis de emissão de CO<sub>2</sub>, em média 30% menores nos últimos 25 anos (CEMBUREAU, 1999).



**Figura 4.15** – Oferta interna de energia (%), no Brasil, no período de 1940 a 2000

Fonte: BRASIL (2001), modificada pelo autor

Afim de parar a tendência de crescimento do nível de dióxido de carbono na atmosfera, ou pelo menos diminuí-la, as tentativas continuam sendo feitas não somente em relação aos combustíveis, mas também, segundo Menon (1993a), em relação à substituição das matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento. Estima-se que mais de 60% do CO<sub>2</sub> emitido pelas instalações de produção de clínquer origina-se da descarbonatação do calcário, então a redução dessa fonte fica restrita à substituição parcial dos materiais crus carbonatos por materiais residuais com características qualitativas semelhantes e adequadas à preparação da *farinha*.

#### 4.4.4 - Emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos totais

Dellinger, Pershing e Sarofim (1993) citam que os níveis de emissão de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos totais (HCT) são usados como parâmetros de monitoramento contínuo em incineradores de resíduos perigosos e que os mesmos têm sido propostos para monitorar as emissões de fornos de clínquer.

No entanto, as emissões de CO são também fortemente relacionadas com as reações de oxidação da matéria orgânica existente na mistura crua, especialmente em áreas do forno onde ocorrem níveis mais baixos de oxigênio e/ou temperaturas não muito elevadas. Nessas condições maximiza-se a possibilidade da ocorrência de oxidação incompleta dos compostos orgânicos voláteis das matérias-primas utilizadas na produção do clínquer (CEMBUREAU, 1999).

Araújo (2002) menciona que o monóxido de carbono é o principal produto da queima incompleta de combustíveis motivando, muitas vezes, o uso de sua concentração como instrumento de normatização por parte das agências de controle de poluição. No entanto, a viabilidade de utilização desses parâmetros, CO e HCT, como indicadores de boas condições de combustão em processos de produção de clínquer é muitas vezes questionada. Isso se deve à geração de CO também na etapa de calcinação do  $\text{CaCO}_3$ , cujos níveis podem superar aqueles provenientes da queima de combustíveis na maioria dos fornos rotativos de clínquer. É ainda referido que os níveis de HCT gerados pelo aquecimento da *farinha* crua alimentada nesses sistemas podem também superar aqueles gerados no processo de combustão (DELLINGER, PERSHING e SAROFIM, 1993; CEMBUREAU, 1999).

#### **4.4.5 - Emissões de ácido clorídrico e gás cloro**

Barros, Tenório e Espinosa (2002) simularam as condições de produção de clínquer de cimento *portland* num reator em escala de laboratório, buscando uma nova abordagem para o entendimento da fixação de metais no processo de clinquerização. O trabalho estudou a incorporação de óxidos de cromo e de níquel em clínquer sintético, bem como a influência de adições de cloretos sobre a retenção desses compostos.

O cloro é normalmente introduzido nos fornos de clínquer através das matérias-primas. Em argilas encontra-se, normalmente, entre 15 ppm a 450 ppm e no calcário entre 50 ppm a 240 ppm, usualmente na forma de cloreto de sódio. Os combustíveis podem conter até 1.100 ppm de cloro. A presença de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) é comum nas matérias-primas utilizadas na produção do clínquer. Esses óxidos são incorporados numa proporção de aproximadamente 50%. Esses compostos são voláteis e sob as temperaturas de clínquerização volatilizam e se condensam nas regiões frias do sistema-forno (abaixo de  $700^\circ\text{C}$ ) formando anéis que podem comprometer a operação produtiva. O cloro nos combustíveis e matérias-primas ocorre na forma iônica ou forma composta.

Durante a combustão o cloro forma gás cloro ( $\text{Cl}_2$ ) e cloreto de hidrogênio ( $\text{HCl}$ ) e sob a temperatura e turbulência dentro do forno. esses gases convertem todo o  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  para  $\text{NaCl}$  e  $\text{KCl}$ . Cloretos de sódio e potássio são mais voláteis que seus óxidos; adições de cloreto de cálcio podem ser usadas para eliminar álcalis no processo de produção de cimento. Então pode-se concluir que dentro do forno, o cloro toma a forma de  $\text{NaCl}$  ou  $\text{KCl}$ .

Os cloretos de sódio e potássio também condensam nas regiões frias do sistema-forno de clínquer, além do fato de que eles têm um longo tempo de residência dentro do forno. No forno de clínquer o conteúdo máximo admitido de cloreto na carga é de 0,02% (200 ppm).

Em linhas produtivas equipadas com pré-aquecedores e pré-calcinadores os cloretos deixam o sistema antes de entrar, propriamente, no forno, minimizando o risco da formação de material condensado e um maior conteúdo de cloreto é admitido na carga. Todavia, o conteúdo máximo de cloretos torna-se uma função da eficiência do sistema de controle de particulado.

Mantus (1992) refere que quando compostos clorados são incinerados o cloreto de hidrogênio ( $\text{HCl}$ ) ou cloro ( $\text{Cl}_2$ ) é formado dependendo das condições do processo de combustão. Araújo (2002) cita que todos os halogêneos quando alimentados no forno de clínquer produzem substâncias ácidas que são facilmente neutralizadas pelo óxido de cálcio e incorporadas ao produto.

Sprung (1979) refere que ao contrário dos menos voláteis sulfatos alcalinos, os cloretos alcalinos evaporam mais facilmente. Os cloretos alcalinos alimentarão, então, frequentemente, a circulação interna no forno e podem ser



removidos através de um *by-pass*, se necessário. O autor refere que a concentração de cloreto na entrada do forno pode aumentar favorecendo a formação de colagens e anéis no próprio forno e na região do estágio mais baixo do pré-aquecedor. Contrariamente às reações do enxofre, os cloretos e vapor d'água na atmosfera do forno levam a um aumento na volatilidade dos álcalis. É então possível volatilizar os álcalis (Na e K) pela adição de cloro favorecendo a remoção dos cloretos alcalinos via *by-pass* e reduzindo suas concentrações no clínquer. Adicionalmente os cloretos alcalinos reduzem a eficiência do precipitador eletrostático resultando no aumento das emissões de particulados.

Moir e Glasser (1992) referem que além do cloro, também o bromo e o iodo têm alta volatilidade no processo de manufatura de clínquer, volatilizando na zona de queima, normalmente como haletos alcalinos e condensando nas partes frias do sistema formando depósitos que prejudicam o desempenho produtivo. Referem que como guia geral para uma eficiente operação de fornos pré-aquecedores e pré-calcinadores a entrada de cloretos, expressa como um percentual sobre o clínquer, deve ficar abaixo de 0,03% e 0,04%, respectivamente. Comentam que os níveis de Br e I encontrados nas matérias-primas e combustíveis são muito menores que aqueles do cloro.

#### **4.4.6 - Emissões de material particulado**

O processo de produção de cimento tem um potencial reconhecidamente alto no que se refere às emissões atmosféricas de material particulado. As três principais fontes de emissão de pós no processo de produção de clínquer e cimento são representadas pelo forno rotativo, incluindo as operações de moagem do cru; pelo resfriador de clínquer e pelos moinhos de cimento. Em todas essas etapas os gases exauridos do forno ou o ar atmosférico utilizado no resfriador de clínquer entram em contato direto com as fases sólidas do processo impossibilitando a adoção de medidas primárias de redução das emissões (CEMBUREAU, 1999).

Mantus (1992) refere que a queima de resíduos clorados em fornos de clínquer potencialmente aumenta as emissões de particulados em sistemas fornos equipados com precipitadores eletrostáticos em decorrência da

formação do cloreto de hidrogênio. Esse gás ácido forma sais ao reagir com os componentes alcalinos no forno os quais se volatilizam nas altas temperaturas da zona de queima e se condensam na extremidade fria. Os gases transportam essas partículas para o equipamento de controle de material particulado onde são coletadas. Entretanto, como os sais alcalinos são partículas finas com uma resistividade diferente dos particulados normalmente gerados, a eficiência do ECP pode ser afetada resultando em maiores níveis de emissão para a atmosfera.

Além dessas, outras fontes potenciais de emissão podem ser identificadas desde as etapas de extração, britagem e transferência dos minérios para os sistemas de pré-homogeneização e na sua retomada para a preparação da mistura crua utilizada na produção da *farinha* ou mesmo nos demais pontos de transferência de materiais pulverulentos.

As poeiras ressuspensas devidas à ação de ventos e da movimentação de máquinas e veículos também representam significativo potencial poluidor. As formas de controle adotadas resumem-se à pavimentação de pátios e vias de trânsito ou a implementação de rotinas de humectação ou varrição com equipamentos motorizados.

Intercorrências normais durante o processo produtivo como por exemplo queda de colagens no interior do forno ou nos ciclones do pré-aquecedor podem também maximizar a geração de poeira no sistema.

O controle do material particulado proveniente do forno rotativo e pré-aquecedor é obtido mediante o condicionamento dos gases numa torre de resfriamento a partir da pulverização de água sob alta pressão, através de bicos aspersores, após a sua saída do pré-aquecedor. Os gases são resfriados até a faixa de temperatura especificada no projeto do ECP para obter seu máximo desempenho. Após passar pelo sistema de despoeiramento os gases limpos são lançados na atmosfera através da chaminé do forno e os pós coletados no ECP são realimentados no processo. Através desses sistemas de controle obtém-se também a remoção de parte dos metais pesados que não foram incorporados à estrutura do clínquer, os quais podem estar adsorvidos no material particulado em suspensão no fluxo gasoso exaurido. Os pós provenientes do resfriador de clínquer são também submetidos a processo de despoeiramento utilizando precipitadores eletrostáticos ou filtros de mangas.

Nas operações da moagem de cimento, última etapa do processo produtivo, utiliza-se, normalmente filtros de mangas para controle das emissões de material particulado.

#### 4.4.7 - Emissões de metais pesados

Dellinger, Pershing e Sarofim (1993) comentam que o princípio da conservação requer que a massa de todos os metais introduzidos num forno de clínquer seja igual à massa saindo do sistema. Os metais podem entrar no sistema-forno junto com os combustíveis, matérias-primas ou resíduos combustíveis e devem sair incorporados no clínquer, adsorvidos no pó de forno ou como emissões atmosféricas pelo equipamento de controle de poluição. Tais emissões podem ser sólidas ou gasosas dependendo da volatilidade do metal pesado.

Sprung e Rechenberg, (1984) referem que o regulamento alemão TA-Luft inclui arsênio (As), berílio (Be), chumbo (Pb), cádmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni), mercúrio (Hg), selênio (Se), telúrio (Te), tálio (Tl), vanádio (V) e zinco (Zn) dentre os elementos traços de relevância ambiental.

Nas matérias-primas naturais da *farinha* os metais pesados ocorrem em quantidades traços (<100 ppm). Esses elementos também estão contidos nos resíduos utilizados como combustíveis suplementares ou alternativos e então quantidades maiores podem ser alimentadas no forno rotativo. Os metais pesados introduzidos nesse sistema são quase completamente incorporados no clínquer ou nos pós do forno e, normalmente, não afetam de forma mensurável as propriedades do cimento quando a concentração deles não excede 300 ppm a 400 ppm. É necessário, portanto, investigar o comportamento de elementos traços em fornos de clínquer não somente introduzidos com as matérias-primas e combustíveis convencionais, mas também aqueles contidos nos produtos residuais utilizados (SPRUNG, 1979, 1985, 1993).

Conforme referido em CEMBUREAU (1999), nem todos os metais pesados são tóxicos e nem todos os metais tóxicos têm a mesma toxicidade. É citado o exemplo do TA-Luft que diferencia os metais pesados através da

divisão em classes de toxicidade apresentadas na Tabela 4.6. Nas classes I e III estão indicados os metais pesados avaliados como os mais e os menos tóxicos, respectivamente.

Moir e Glasser (1992) consideram importante distinguir os componentes essencialmente não voláteis (ou refratários) encontrados no processo de fabricação de clínquer (MgO, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BaO, SrO, NiO, Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, entre outros) daqueles de baixa volatilidade (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e F) e daqueles altamente voláteis (SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, ZnO, Cl, PbO, CdO e Tl<sub>2</sub>O).

Os autores ressaltam a importância da volatilidade para:

- a operação do processo, particularmente a tendência para formar depósitos nas partes frias do sistema-forno;
- ao potencial para menor nível no clínquer pela operação de by-pass dos gases do forno;
- o potencial de emissões prejudiciais ao meio ambiente; e
- a ocorrência de ciclos voláteis levando a maiores níveis de concentração desses componentes no forno que nas matérias-primas (MOIR e GLASSER, 1992, p.126, tradução nossa).

**Tabela 4.6** - Classificação de metais pesados instituída pelo TA-Luft, segundo o grau de toxicidade

Classe de toxicidade	Metais pesados
I	Cd, Hg e Tl
II	As, Co, Ni, Se, Te
III	Pb, Cr, Cu, Pt, V, Sn, Pd, Sb, Mn, Rh

Fonte: CEMBUREAU (1999), organizada pelo autor

Os metais pesados podem então ser agrupados nas três classes de comportamento observado nos sistemas-fornos de produção de clínquer, porém, com algumas diferenciações conforme o autor consultado, exemplificadas através da Tabela 4.7.

O conceito de volatilidade caracteriza o comportamento dos elementos maiores, menores e traços na entrada de materiais fornecidos ao processo de fabricação de clínquer. Nas altas temperaturas requeridas pelo

processo a ligação desses elementos nos materiais utilizados é parcial ou completamente destruída.

**Tabela 4.7** - Classificação de metais pesados, segundo a volatilidade, conforme o autor indicado

Classe	CEMBUREAU (1999)	USEPA (1994)	DELLINGER et al. (1993)	Comuns a todos
Refratários ou não voláteis	Be, Co, Mo, Sb, Se, Te, Zn	Ag, Ba, Ni	Ag, Al, Ba, Be, Ca, Fe, Ni, Ti	As, Cr, Cu, Mn, V
Semi-voláteis	Tl	K, Na, Sb, Se, Zn	K, Na, Sb, Se, Zn	Cd, Pb
Voláteis	-	Tl	Tl	Hg

Fonte: elaborada pelo autor com base nas fontes indicadas

Grande parte dos elementos não voláteis entra na formação das fases do clínquer por meio das reações sólidas ou via fase líquida. Uma pequena proporção dos elementos vaporiza e passa para a fase gás. Na fase gasosa novos compostos são formados os quais se condensam nas partes frias do forno ou do pré-aquecedor ou em outros pontos do sistema e são precipitados no material alimentado ou nos pós circulantes.

Como resultado, ciclos internos e externos se desenvolvem no sistema-forno fechado (Figura 4.16). Quando as substâncias precipitadas são carregadas novamente para o interior das partes mais quentes do forno, onde elas novamente volatilizam, caracteriza-se o ciclo interno.

Ciclo interno é, portanto, o padrão de comportamento cíclico de determinado elemento ou composto que se concentra no forno ou principalmente no pré-aquecedor como consequência dos processos de volatilização e condensação.

O ciclo externo define o fluxo de massa de um elemento ou composto que é conduzido para fora do pré-aquecedor com o gás exaurido, o qual, através do processo de secagem e moagem das matérias-primas ou da

reciclagem do pó coletado no ECP é retornado para o silo de *farinha* e novamente alimentado no sistema-forno.

Para elucidação do comportamento de elementos traços durante o processo de produção de clínquer recorre-se, normalmente, às medições de balanços de massas.

Estabelecendo limites adequados para essas medições consegue-se determinar a magnitude dos fluxos de entrada e saída do sistema, bem como a percepção da volatilidade dos elementos circulantes sob as condições prevalentes no sistema-forno.

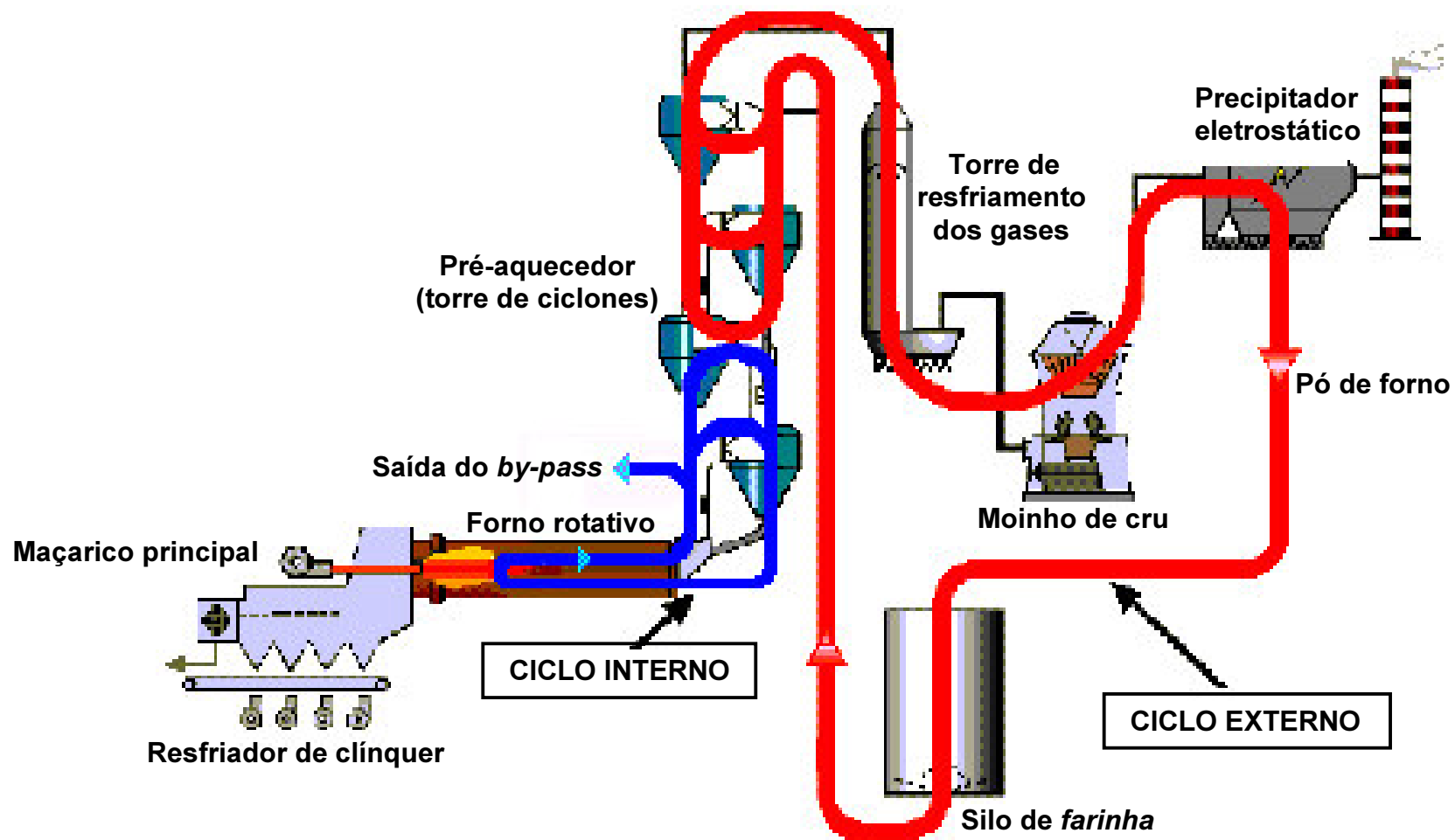
O balanço material de um sistema-forno pode ser dividido entre um balanço interno e um balanço externo.

O balanço externo refere-se ao sistema de produção de clínquer como um todo, e permite aferir o equilíbrio de determinado elemento entre os teores de entrada e de saída do sistema-forno.

Os itens de entrada devem contemplar a alimentação do forno incluindo combustíveis, *farinha* e pós reciclados. Os itens de saída devem considerar o clínquer, os pós coletados e os gases e pós emitidos pelas chaminés. Um déficit sistemático na saída do balanço externo indica que o elemento analisado é volátil e acumula-se nos ciclos ou na formação de colagens.

O balanço interno refere-se ao forno, resfriador e pré-aquecedor. Os itens de entrada consideram os combustíveis e a *farinha*, e os itens de saída consideram o clínquer, os pós coletados, os gases e pós emitidos, e os pós e gases brutos. Déficit de saída do balanço interno significa que há concentração do elemento avaliado no forno ou pré-aquecedor.

Para elementos com alta volatilidade, como regra, balanços de equilíbrio não podem ser estabelecidos. A característica nesses balanços é um déficit sistemático no lado de saída do balanço, níveis menores de incorporação no clínquer e um crescimento da circulação forno/pré-aquecedor com o tempo (SPRUNG e RECHENBERG, 1984; SPRUNG, 1985, 1988).



**Figura 4.16** – Croqui esquemático identificando os ciclos internos e externos de componentes voláteis no sistema-forno com pré-aquecedor – tipo torre de ciclones

Fonte: CEMBUREAU (1999), adaptada pelo autor

Dellinger, Perskin e Sarofim (1993) comentam que a ação de lavagem da alta carga de sólidos alimentada e o alto conteúdo de álcalis nos fornos rotativos favorecem a alta retenção de compostos metálicos no clínquer e no material particulado coletado nos equipamentos de controle de poluição atmosférica incluindo o pó de forno. Os autores citam que as emissões de compostos de metais refratários estão geralmente abaixo de 0,1% da massa alimentada podendo ser tão baixos quanto 0,001% para os compostos metálicos menos voláteis. As emissões de compostos metálicos semi-voláteis geralmente situam-se abaixo de 0,5% da quantidade alimentada.

Comentam também que os dados relativos à retenção do mercúrio nas fases sólidas são altamente variáveis e cercados de incertezas devido às dificuldades de análise das concentrações traços do metal nessas matrizes, bem como às dificuldades de coleta dos constituintes vaporizados nos gases emitidos. Consideram prudente a prática atual adotada pelas indústrias, de não introduzir os compostos contendo mercúrio nos fornos, devendo ser mantida.

Ainda que a partição desses grupos de metais seja afetada pelas condições de operação do forno, os metais refratários tendem a se concentrar no clínquer, enquanto os metais voláteis e semi-voláteis tendem a ser descarregados através dos sistemas de exaustão.

#### **4.4.8 - Emissões de orgânicos**

A principal fonte de emissão de compostos orgânicos voláteis em chaminés de fornos de clínquer é a matéria orgânica presente ou ligada à matéria-prima, da qual uma parte é liberada quando exposta ao calor no sistema-forno. Alguns dos compostos orgânicos expelidos são oxidados, mas outros saem do forno como emissões orgânicas (CEMBUREAU, 1999).

Araújo (2002) refere que a exemplo do monóxido de carbono, as emissões de hidrocarbonetos são atribuídas à queima incompleta de combustíveis, a qual ocorre quando há deficiência de oxigênio no processo de combustão ou o abaixamento da temperatura da chama. Outros fatores podem também provocar a formação de hidrocarbonetos no processo de queima como



a baixa turbulência e o insuficiente tempo de residência dos gases no interior da câmara de combustão.

Dellinger, Pershing e Sarofim (1993) relatam que existe uma considerável quantidade de dados indicando que os fornos de clínquer podem destruir qualquer composto orgânico líquido alimentado atomizado na zona de queima com uma eficiência maior que 99,9999%, sem levar em consideração a sua estabilidade térmica, sinônimo de sua dificuldade de destruição. Esse nível de eficiência é teoricamente razoável devido às altas temperaturas e longo tempo de residência da fase gás nesses fornos. As condições extremas de combustão no processo de manufatura do clínquer rapidamente superam qualquer deficiência nas concentrações de oxigênio.

Os autores consideram ainda que quando a combustão ocorre fora das condições ideais favorece a formação dos produtos de combustão incompleta (PIC's), que podem resultar na geração de milhares de compostos orgânicos diferentes.

Araújo (2002) comenta que dentre a grande variedade de hidrocarbonetos gerados em processos de combustão os de maior destaque são os aromáticos, compostos cíclicos que formam anéis de benzeno, os quais podem estar combinados com outros compostos orgânicos e inorgânicos ou com outros anéis.

#### **4.4.9 - Dioxinas e furanos**

Araújo (2002) cita que esses compostos são formados de maneira não intencional em todos os processos de combustão onde estão presentes o carbono, o oxigênio e o cloro. Também refere que eles estão entre aqueles mais danosos à saúde humana já produzidos por atividades antropogênicas, segundo a própria USEPA.

As moléculas de dioxinas e furanos propriamente ditas são simples e inofensivas, cujas fórmulas químicas são  $H_4C_4O_2$  e  $H_4C_4O$ , respectivamente. Suas fórmulas estruturais são representadas na Figura 4.17.



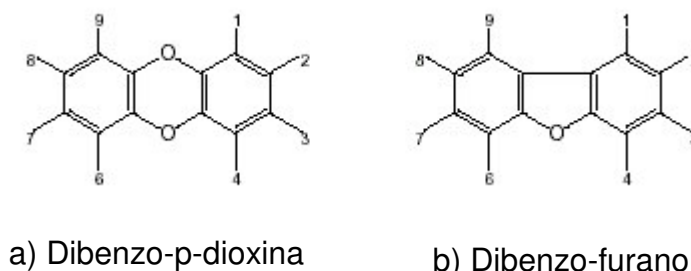
**Figura 4.17** - Representação estrutural de dioxinas e furanos

Fonte: Araújo (2002) modificada pelo autor

Usualmente, porém, as denominações dadas às dioxinas e furanos referem-se, na verdade, aos congêneres clorados de dibenzo-p-dioxinas e dibenzofuranos. Teoricamente de um a oito átomos de cloro podem ocupar as posições substituíveis da dioxina resultando em 75 possíveis congêneres de dioxinas cloradas, o mesmo ocorrendo com o furano possibilitando a ocorrência de 135 congêneres de furanos clorados. Do ponto de vista de perigo à saúde humana as dibenzo-p-dioxinas policloradas (PCDD's) e os dibenzofuranos policlorados (PCDF's) são os mais importantes (DEMPSEY e OPPELT, 1999).

As condições necessárias à formação das dioxinas e furanos são diferentes daquelas para a formação de compostos orgânicos voláteis, podendo ocorrer a formação através da *síntese de novo* pelas reações entre as fases gasosas em temperaturas entre 350°C e 450°C no sistema de exaustão de poluentes desde que os precursores e outros componentes necessários estejam disponíveis (CEMBUREAU, 1999).

Na Figura 4.18 são mostradas as fórmulas estruturais genéricas das dioxinas e furanos e a numeração sistematizada dos átomos de carbono.



**Figura 4.18** - Representação estrutural de dibenzo-p-dioxinas e dibenzo furanos

Fonte: Araújo (2002)

Dentre os isômeros, os compostos contendo 4 átomos de cloro (tetracloro dibenzodioxinas – TCDD's) são os de maior importância ambiental e toxicológica. O mais tóxico desses compostos é o 2,3,7,8-TCDD, com átomos de cloro nas posições 2, 3, 7 e 8 da estrutura mostrada na Figura 4.18 (a). A USEPA classifica esse composto como um provável carcinogênico humano (Classificação B2) e o considera o mais poderoso químico carcinogênico já avaliado pelo EPA (OFFICE OF THE SCIENCE ADVISOR GUIDANCE (OSA), 1992).

A Convenção de Estocolmo para controle de produtos orgânicos perigosos cita o co-processamento de resíduos perigosos em fornos de clínquer como uma das fontes potenciais de emissão de dioxinas e furanos.

Muitos estudos de avaliação das emissões de produtos de combustão incompleta são focados nas emissões de dioxinas e furanos, sendo vários deles conduzidos para elucidar os efeitos tóxicos do 2,3,7,8-TCDD (MANTUS, 1992; DEMPSEY e OPPELT, 1999).

Vários grupos de cientistas tentaram relacionar a potencialidade tóxica dos PCDD's e PCDF's àquela do 2,3,7,8-TCDD através do uso de informação de base de dados de toxicidade para essa classe de compostos. O mais recente esforço é o método I-TEF/89 (Fator de Toxicidade Equivalente Internacional) desenvolvido pela USEPA em conjunto com cientistas de outros países desenvolvidos sob os auspícios do Comitê para os Desafios da Sociedade Moderna da Organização do Tratado do Atlântico Norte.

O método I-TEF fornece os fatores de toxicidade equivalente que podem ser usados para calcular as concentrações de 2,3,7,8-TCDD. O Fator de Toxicidade Equivalente representa uma relação da toxicidade de um isômero 2,3,7,8 PCDD ou PCDF para aquele de 2,3,7,8-TCDD. Com o uso dos Fatores de Toxicidade Equivalente a concentração de isômeros PCDD ou PCDF podem ser convertidos para concentrações equivalentes de 2,3,7,8-TCDD (OSA GUIDANCE, 1992).

Na Tabela 4.8 estão apresentados os fatores internacionais de toxicidade equivalente (I-TEF).

**Tabela 4.8** – Fatores internacionais de toxicidade equivalente (I-TEF)

<b>Composto</b>	<b>I-TEF</b>	<b>Composto</b>	<b>I-TEF</b>
Mono-, Di-, e Tri-CDDs	0	Mono-, Di-, e Tri-CDFs	0
2,3,7,8-TCDD	1	2,3,7,8-TCDF	0,1
Outros TCDDs	0	Outros TCDFs	0
2,3,7,8-PeCDD	0,05	1,2,3,7,8-PeCDF	0,05
		2,3,4,7,8-PeCDF	0,5
Outros PeCDDs	0	Outros PeCDFs	0
2,3,7,8-HxCDD	0,1	2,3,7,8-HxCDF	0,1
Outros HxCDDs	0	Outros HxCDFs	0
2,3,7,8-HpCDD	0,01	2,3,7,8-HpCDF	0,01
Outros HpCDDs	0	Outros HpCDFs	0
OCDD	0,001	OCDF	0,001

Fonte: OSA GUIDANCE (1992)

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, S. (2002). *Estudo da formação e destruição de dioxinas e furanos em fornos rotativos de produção de clínquer utilizados no co-processamento de resíduos*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2002.

BATTYE, R.; WALSH, S.; LEE-GRECO, J. (2000). *NOx control technologies for the cement industry: final report*.

BECH, C.; GUNDTOFT, L. (1998). Study of NOx, SOx, & CO mechanisms based on actual plant data. In: IEEE/PCA CEMENT INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE, 40., 1998, Rapid City. *Proceedings...* New York: IEEE. p.141-154.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (2001). *Balanco energético nacional 2001 (ano base 2000)*. Brasília, DF. Disponível em:<[www.brazil-rounds.gov.br/geral/balanco\\_energetico/ben\\_p00.pdf](http://www.brazil-rounds.gov.br/geral/balanco_energetico/ben_p00.pdf)>. Acesso em: 9 abr. 2004.

BUZZI, S.; SASSONE, G. (1993). Optimization of clinker cooler operation. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF ASSOCIATION OF GERMAN CEMENT WORKS, 4., 1993, Düsseldorf. *Proceedings...* [S.l.:s.n.]. p.296-304.

CENTURIONE, S. L. et al. (1999). Perfil do clínquer portland brasileiro de 1970 a 1999. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 5., 1999, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP. 1 CD-ROM.

DELLINGER, H.B.; PERSHING, D.W.; SAROFIM, A.F. (1993). *Evaluation of the origin, emissions and control of organic and metal compounds from cement kilns co-fired with hazardous wastes*. Washington: Scientific Advisory Board on Cement Kiln Recycling - SAB.

DEMPSEY, C.R.; OPPELT, E.T. (1999). *Incineração de resíduos perigosos: uma revisão crítica*. Tradução de Milton Norio Sogabe. São Paulo: A & WMA – Seção Brasil.

ERHARD, V. H. S.; SCHEUER, A. (1993). Burning technology and thermal economy. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF ASSOCIATION OF GERMAN CEMENT WORKS, 4., 1993, Düsseldorf. *Proceedings...* [S.l.:s.n.]. p.278-295.

THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION (1997). *Alternative fuels in cement manufacture*. Disponível em:<<http://www.cembureau.be/Documents/Publications>>. Acesso em: 8 Oct. 2003.

\_\_\_\_\_. (1999). *Best available techniques for the cement industry*. Disponível em:<<http://www.cembureau.be/Documents/Publications>>. Acesso em: 8 June. 2004.

GARDINER, W. C. (2000). *Gas-phase combustion chemistry – combustion chemistry of nitrogen*. Berlin: Springer.

GRECO, C. (1996). *Combustão em fornos rotativos: controle de processo em fornos rotativos através de modelagem de chama multi-combustível*. São Paulo: G.Greco – Térmica e Fluídos Consultoria. Relatório técnico.

\_\_\_\_\_. (1999). *As emissões de SOx e NOx em fornos de cimento*. G.Greco – Térmica e Fluídos Consultoria Ltda - Informativo, São Paulo, ano 2, n. 6, maio.

KEMESIS, P. (1993). EPA gets heat on hazardous-waste kilns. *ENR Environmental Update*, n.6, Sept.

KESSLER, G.R. (1995). Cement kiln dust (CKD) methods for reduction and control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, New York, v.31, n.2, p.407-412, Mar./Apr.

KIHARA, Y. (1999). *Co-processamento de resíduos em fornos de cimento: tendências*. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1999, São Paulo. *Anais...* São Paulo: IBRACON.

LIMA, L. R. (1974). *Elementos básicos de engenharia química - conceitos básicos, balanço material, combustão e combustíveis, vapor d'água, fluídos na indústria*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.

MANTUS, E.K. (1992). *All fired up: burning hazardous waste in cement kilns*. Seattle: Environmental Toxicology International.

MARCIANO, JR. E.; KIHARA, Y. (1997). Looking green. *World Cement*, Farnham, v.28, n.4, p.82-88, Apr.

MARCIANO JR., E.; KIHARA, Y.; ESPER, M. W. (1996). A questão ambiental no setor cimenteiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4., 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP.

MARINGOLO, V. (2001). *Clínquer co-processado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento*. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001.

MENON, G. J. et al. (1993a). Estudo do processo de combustão nos fornos rotativos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 3., 1993, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP. p.479-497.

MENON, G. J.; SILVA, R. J.; OLIVEIRA, M. (1993). Avaliação da espessura dos refratários e da transferência de calor em fornos rotativos de cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 3., 1993, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP. p.245-260.

MOIR, G. K.; GLASSER, F. P. (1992). Mineralisers, modifiers and activators in the clinkering process. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 9., 1992, New Delhi. *Proceedings...* [S.l.:s.n.]. p.125-152.

NIELSEN, P.B.; JEPSEN, O.L. (1991). An Overview of the formation of SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> in various pyroprocessing systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, New York, v.27, n.3, p.431-439, May/June.

OFFICE OF THE SCIENCE ADVISOR GUIDANCE (1992). *A toxicity equivalency factor procedure for estimating 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin equivalents in mixtures of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans*. Disponível em <<http://www.dtsc.ca.gov/ScienceTechnology/ftp/chap9.pdf>>. Acesso em: 12 Sept. 2004.

RHESI, S.S.; GARG, S.K. (1986). Production of cement from cement kiln dust. *Indian Concrete Journal*, Bombay, v.60, p.37-39, Feb.

RITZMANN, H. (1974). How to keep alkalis from stealing preheater efficiency. *Rock Products*, Chicago, v.77, n.2, p.66-69, Feb.

SALOMON, V. G. et al. (1999). Influência dos elementos secundários presentes nos resíduos co-processados na qualidade do cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 5., 1999, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP. 1 CD-ROM.

SMART, J.P.; JENKINS, B.G.; VAN DE KAMP, W.L. (1999). An Investigation into NO<sub>x</sub> emissions from the high-temperature rotary cement kiln. *Journal of the Institute of Energy*, London, v.72, p.99-109, Sept.

SMART, J.P.; MULINGER, P.J.; JENKINS, B.G. (1998). Combustion, heat transfer and NO<sub>x</sub>. *World Cement*, Farmnham, v.19, n.12, p.14-25, Dec.1998.

SMIDTH, F.L. (2004). *Dry process kiln systems*. Disponível em:<<http://www.flsmidth.com/f.l.smidth/English/contact/brochures+and+info/brochures/kilns+and+firing+/dryprocesskiln.pdf>>. Acesso em: 9 Sept.

SPRUNG, S. (1979). *Effect of the burning process on the formation and properties of the clinker*. Düsseldorf: [s.n.]. p.17.

\_\_\_\_\_. (1985). *Technological problems in pyroprocessing cement clinker: cause and solution*. Translation by T.V. Brodek. Düsseldorf: Benton-Verlag GmbH. p.132.

\_\_\_\_\_. (1988). Trace elements - concentration build-up and measures for reduction. *Zement kalk gips*, Düsseldorf, p.172-176, July. (Translation ZKG n. 5/88, p. 251-257).

\_\_\_\_\_. (1993). Effect of energy consumption and environmental control measures on clinker properties. In: BRAZILIAN CONGRESS ON PORTLAND CEMENT, 3., 1993, São Paulo. *Proceedings...* [S.l.:s.n.]. p.1-42.

SPRUNG, S.; KIRCHNER, G.; RECHENBERG, W. (1984). Reactions of poorly volatile trace elements in cement clinker burning. *Zement kalk gips*, Düsseldorf, p.279-283, Dec. (Translation ZKG n. 10/84, p. 513-518).

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1994). *Emission factor documentation for AP-42*, section 11.6, portland cement manufacturing. Final Report. Disponível em:<<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/final/c11s07.pdf>>. Acesso em: 4 Apr. 2004.



\_\_\_\_\_. (1999). *Nitrogen oxides (NOx), why and how they are controlled*. Disponível em:<<http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/fnoxdoc.pdf>>. Acesso em: 21 Mar. 2004.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2001). *Climate change 2001: the scientific basis - the carbon cycle and atmospheric carbon dioxide*. Disponível em:<<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 2 Aug. 2004.

WITTMANN, T. J.; KOESTER, F. W. (1988). The co-processing of wastes in the cement manufacturing plant. In: IEEE CEMENT INDUSTRY CONFERENCE, 1988, Quebec. *Proceedings...* New York: IEEE. p.479-510.

## CAPÍTULO 5 – CO-PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS

### 5.1 - Introdução

Wittmann e Koester (1988), referindo-se à experiência norte-americana em controle ambiental, mencionam que, inicialmente, as preocupações foram voltadas ao equacionamento dos problemas de poluição do ar e das águas. Em meados dos anos 70 a atenção foi direcionada à maneira pela qual os resíduos sólidos e perigosos eram devolvidos ao meio ambiente. Relatam que em 1976 o Congresso americano promulgou o *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA) que estimulava, sempre que possível, a recuperação, o reuso e a reciclagem dos resíduos e a disposição segura daqueles que não pudessem ser, dessa forma, gerenciados.

Norteados por essa diretriz tecem suas considerações relativas ao uso de uma planta de manufatura de cimento para gerenciar resíduos, simultaneamente à fabricação de um produto comercial. Referem-se a esse conceito como **co-processamento**, definindo-o como o uso de um determinado processo industrial para reciclar, reusar, tratar ou destruir resíduos simultaneamente à manufatura de um produto numa operação simples e combinada.

Os autores comentam que até 1988 o exemplo mais comum era o da utilização de resíduos líquidos, com alto conteúdo energético, como substitutos de uma parcela dos combustíveis convencionais em fornos industriais, resultando em dois benefícios: os resíduos eram destruídos e a energia recuperada. Referem-se a essa prática como co-incineração, destacando, no entanto, que as oportunidades de manejo de resíduos durante

a produção, por exemplo, do cimento são muito mais diversificadas envolvendo operações não térmicas na planta industrial complementarmente à sua combustão na fornalha rotativa.

Da avaliação da evolução do controle ambiental no Estado de São Paulo, muitas vezes tomado como referência para comparações com outras regiões brasileiras, verifica-se que apresentou trajetória semelhante àquela referida por Wittmann e Koester (1988). Com a aprovação do Regulamento da Lei Estadual nº 997/76, através do Decreto Estadual nº 8468/76 (SÃO PAULO (Estado), 1976a, 1976), foram definidas as diretrizes para o controle de poluição no território paulista. A sua implementação, no entanto, obedeceu à ordem de prioridades definidas pelo órgão ambiental concentrando-se, inicialmente, no controle da poluição atmosférica e hídrica, conforme a região considerada e, posteriormente, no controle da destinação de resíduos sólidos.

Os regulamentos, brasileiro e paulista, normatizadores da atividade relacionada ao uso de resíduos como insumos para processos de manufatura de clínquer (BRASIL, 1999; CETESB, 2003) não definem de forma explícita o significado do termo co-processamento. No entanto, da análise dos critérios básicos estabelecidos, observa-se que contemplam a utilização de resíduos concomitante à produção de clínquer em fornos rotativos com o propósito de reaproveitamento de energia ou como substitutos de matérias-primas.

Foi referido por Kihara (1999) que as primeiras experiências de sucesso nesse campo ocorreram no Canadá, na década de 70, de 1974 a 1976, em fornos de via úmida, objetivando o estudo da eficiência de destruição de resíduos clorados, seguidas pela França e Suécia em 1978 e Estados Unidos em 1979. Ottoboni et al. (1998), por sua vez, destacam que o primeiro teste de queima nesse tipo de forno foi realizado nos Estados Unidos em 1970 e que posteriormente essa técnica foi empregada na Europa e Ásia.

Senior, Sarofim e Eddings (2003) também referem que as indústrias cimenteiras dos EUA vêm co-processando resíduos perigosos juntamente com outros combustíveis há 30 anos, a maioria em fornos de via úmida, cujos consumos específicos de energia térmica, já referidos, são maiores que os de via seca. Como esse consumo representa parcela significativa dos custos de produção, variando de 40% a 50%, sobretudo nos processos de via úmida, os

autores observam que a queima de “combustíveis” que gerem rendimentos financeiros ao empreendimento auxilia na redução dos custos operacionais.

Em 1989 mais de 200 milhões de galões (757 082 m<sup>3</sup>) de resíduos perigosos combustíveis foram usados em fornos de clínquer nos Estados Unidos, representando uma redução no uso de carvão de, no mínimo, 800 000 t com economia de aproximadamente 24 milhões de dólares para o país. Oito fábricas estavam usando resíduos como combustível primário nos Estados Unidos no ano 2000 e outras cinqüenta e uma os utilizavam como combustível complementar nesse mesmo ano (GABBARD e GROSSMAN, 1990). Baseado nesses relatos conclui-se que a implementação da atividade de co-processamento de resíduos nesse setor relaciona-se mais com os aspectos econômicos que com os de produção.

No Brasil a indústria cimenteira tem usado numerosos sub-produtos industriais como aditivos desde 1952, destacando-se a utilização da escória granulada de altos-fornos, as cinzas volantes de usinas termelétricas e o gesso. Iniciou-se também na década de 70 o uso de combustíveis alternativos como palha de arroz, casca de coco babaçu, moinha de carvão vegetal, pneus e carvão com alto teor de cinzas. A crise do petróleo nos anos 70 e 80, ao contrário das previsões catastróficas iniciais, trouxe inúmeros ensinamentos para o setor a partir da substituição de óleo combustível por carvão nacional de baixa qualidade e outros materiais energéticos alternativos (MARCIANO, KIHARA e ESPER, 1996).

Esses autores referem que a modernidade tecnológica do parque industrial brasileiro, a grande tradição no âmbito da normalização e do autocontrole, a larga experiência na utilização e valorização de subprodutos industriais e energéticos alternativos, além da busca constante pela otimização do processo e racionalização do consumo de combustíveis representam variáveis que deveriam facilitar a condução e viabilização do processo no país.

Kihara (1999a) cita a estimativa de 300 000 t de resíduos co-processados em fornos de clínquer brasileiros no período de 1991 a 1998. Comenta que em condições favoráveis é previsto que até 30% das fábricas nacionais estarão envolvidas com essa atividade no período de 1999 a 2009, co-processando entre 500 000 t e 600 000 t de resíduos por ano.

Observa-se que a utilização de resíduos e materiais inservíveis pelo setor cimenteiro teve início há muitos anos em razão, dentre outros motivos, da constante necessidade de redução dos custos de produção devido ao mercado sempre competitivo, agora maximizada pelos efeitos da economia globalizada.

## 5.2 - Resíduos como fonte energética

A NBR 10.004/87 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (1987) define resíduos sólidos como:

*Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento em rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 1987, p.1).*

Essa norma classifica como perigosos (Classe I) os resíduos que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas podem apresentar risco à saúde pública ou ao meio ambiente ou apresentam pelo menos uma das seguintes características:

- inflamabilidade;
- corrosividade;
- reatividade;
- toxicidade; ou
- patogenicidade.

Resíduos que submetidos a contato estático ou dinâmico com água deionizada à temperatura ambiente não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água são classificados como inertes (Classe III). Aqueles que não se enquadram na classe I ou classe III são classificados como não inertes (Classe II), e podem ter propriedades tais como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

A legislação brasileira relacionada com o gerenciamento e destinação de resíduos adota definições específicas, dependendo da área de abrangência do regulamento, nem sempre rigorosamente vinculadas à normatização referida. Pode-se citar como exemplos os casos das Resoluções CONAMA nº 264/99 e nº 316/99 (Brasil, 1999; 2002) relacionadas, respectivamente, à regulamentação do desenvolvimento de atividades de co-processamento de resíduos em fornos de clínquer e das demais modalidades de destruição térmica de resíduos.

Seebach e Tseng (1993) afirmam que quando combustíveis de resíduos perigosos são usados, em substituição aos combustíveis convencionais em processo de piro-processamento para a produção de clínquer para cimento, os elementos ou substâncias introduzidos na fornalha rotativa não são inteiramente novos. Os elementos orgânicos presentes nos resíduos perigosos combustíveis, consistindo essencialmente de carbono e hidrogênio, são basicamente os mesmos presentes nos combustíveis fósseis, porém, com diferentes configurações.

Os autores referem que eles podem ser mais difíceis de queimar, requisitando temperaturas mais elevadas e tempos de residência maiores, mas que os níveis exigidos para sua combustão e destruição situam-se, normalmente, abaixo daqueles disponíveis no forno de clínquer. Além disso as quantidades e a composição das misturas de resíduos perigosos usadas como combustíveis suplementares são cuidadosamente controladas.

Sprung (1993) cita que muitas experiências são referidas na literatura sobre a utilização desses combustíveis em fornos de produção de clínquer. Comenta que eles podem ser obtidos de produtos sintéticos, como por exemplo pneus usados, resíduos oleosos, solventes, plásticos, papéis, entre outros e resíduos de processamento de materiais naturais como restos de madeira ou cascas de arroz. O autor relata que tem sido demonstrado que os combustíveis suplementares derivados de resíduos somente podem ser usados em operação contínua se:

- *a quantidade requerida está disponível normalmente;*
- *a composição deles é tão uniforme quanto possível; e*
- *eles estão disponíveis num alto grau de uniformidade (SPRUNG, 1993, p.12, tradução nossa).*

O poder calorífico de combustíveis suplementares deve ser de, no mínimo, 12 600 kJ/kg a 16 800 kJ/kg (3 000 kcal/kg a 4 000 kcal/kg). No geral tais combustíveis são adequados para produzir de 10% a 30% do calor fornecido ao sistema-forno (SPRUNG, 1979). Mantus (1992) acrescenta que uma planta de manufatura de clínquer não irá queimar um resíduo que seja corrosivo, reativo ou tóxico a menos que ele também resulte em significativo aporte de energia ao sistema. Mesmo atendendo a esse pré-requisito, resíduos altamente corrosivos e reativos geralmente são evitados, pois podem causar prejuízos ao forno e demais sistemas integrantes do processo produtivo.

Outras restrições além da inflamabilidade e disponibilidade energética são também importantes destacando-se que deve ser avaliada se e em que concentrações os elementos menores estão presentes no resíduo combustível. Como visto, ciclos de enxofre e de cloro são responsáveis por perturbações do processo devido à formação de colagens e anéis no forno e no pré-aquecedor de ciclones. O uso de resíduos é também motivo de preocupação com relação aos teores de metais pesados presentes no combustível suplementar alimentado no forno.

A natureza e as concentrações dos elementos menores e traços podem servir de base para o estabelecimento de critérios para a rejeição da utilização de determinados resíduos no processo produtivo. Por razões de compatibilidade ambiental do produto e de aceitação pelo mercado, a tendência é que sejam estabelecidas limitações das quantidades de metais pesados incorporados no clínquer aos níveis obtidos quando são usadas exclusivamente matérias-primas naturais. Para uso de materiais secundários no processo de produção de clínquer para cimento, em princípio, os mesmos requisitos e critérios de seleção para uso de combustíveis suplementares são aplicáveis (MANTUS, 1992; SPRUNG, 1993; THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION (CEMBUREAU), 1999).

Como as propriedades do cimento podem sofrer efeitos adversos quando a concentração de determinados componentes excede os limites pré-estabelecidos, estes devem ser rigorosamente controlados na alimentação do forno afim de satisfazer aos padrões de qualidade e de desempenho do produto final. Conseqüentemente a indústria limitará o uso de determinadas correntes de resíduos, citando-se o exemplo do setor cimenteiro dos Estados

Unidos que optou por não utilizar bifenilas policloradas (PCB's), ou seja, resíduos contendo teores maiores que 50 ppm do composto, como forma de evitar a ocorrência de episódios que poderiam afetar o desempenho do processo produtivo (MANTUS, 1992).

Diante dessas limitações fica evidente que somente uma parte dos resíduos industriais pode ser selecionada para uso em substituição parcial aos combustíveis fósseis em fornos de clínquer. As principais características exigidas desses resíduos referem-se à disponibilidade de elevados conteúdos energéticos, baixos teores de cloro e de metais pesados.

Kihara (1999) relata que o espectro de resíduos co-processados na indústria de cimento é bastante variado, incluindo os solventes químicos, óleos usados, resíduos de destilação petroquímica, pó de grafite, borra de tintas, plásticos e lodos de tratamento, além dos combustíveis alternativos utilizados desde as décadas passadas. Na Tabela 5.1 são apresentados alguns resíduos passíveis de utilização em atividades de co-processamento, como substitutos energéticos ou de matérias-primas, segundo o setor industrial gerador.

**Tabela 5.1** - Resíduos co-processáveis provenientes de diferentes setores industriais

<b>Setor</b>	<b>Resíduos</b>
Siderurgia	Borra de alimentação, emulsão e óleos residuais, graxas, escórias
Tratamento de superfície	Lodo, borra de tintas, vernizes
Alumínio	Borra de alumínio, borra de oxalato de sódio, borra de skimming, bloco catódico
Borracha	Pneus, perfis e rebarbas
Petroquímica	Solvente, borra neutra, borra de petróleo, borra ácida, catalisadores
Indústria automobilística	Borra de tintas, borra de solventes, borra de fosfato, plásticos, mantas
Embalagens	PET, plásticos, exceto PVC
Construção civil	Entulhos de construção

Fonte: Kihara (1999), adaptada pelo autor



### 5.3 - Co-processamento em fornos rotativos de produção de clínquer

#### 5.3.1 - O forno de clínquer como equipamento de destruição de resíduos

Uma questão sempre discutida no co-processamento se refere às condições oferecidas pelos fornos de clínquer para a adequada combustão de resíduos promovendo a sua completa destruição, em face das argumentações relativas à sua concepção como equipamento produtivo e não como incinerador. As principais características do sistema-forno, exigíveis para a produção de clínquer, também o torna um equipamento com condições teóricas suficientes para promover a integral destruição de resíduos industriais para fins de recuperação energética ou substituição de matérias-primas. Essas características são descritas por Mantus (1992); Dellinger, Pershing e Sarofim, (1993); USEPA (1994); Kihara (1999); CEMBUREAU (1999) e Maringolo (2001) e discriminadas a seguir:

- **altas temperaturas:** a temperatura da chama está próxima a 2 000°C e a temperatura dos sólidos de 1 450°C a 1 510°C na zona de queima, condição inerente ao processo produtivo para viabilizar a ocorrência das reações químicas formadoras dos componentes do clínquer;
- **tempo de residência:** na faixa de 6 segundos a 10 segundos, superior ao tempo de residência de um incinerador típico que opera na faixa de até 3 segundos;
- **atmosfera oxidante:** decorrente do processo de combustão ser realizado com excesso de ar para garantia de uma queima adequada;
- **ambiente alcalino natural:** a decomposição dos carbonatos de cálcio e magnésio, integrantes das matérias-primas básicas utilizadas na preparação da *farinha* crua, propicia as condições necessárias para a neutralização dos gases ácidos formados no interior do sistema-forno;
- **estabilidade térmica:** devido às dimensões e características térmicas do forno, mesmo em situações de interrupção do processo de combustão a energia acumulada é suficiente para promover a adequada destruição dos resíduos alimentados na fornalha rotativa;
- **alta turbulência:** a turbulência expressa em número de Reynolds supera 100 000 para um forno de clínquer, valor comparativamente

mais elevado que o de um incinerador típico (>10 000), com um maior turbilhonamento dos gases favorecendo a mistura do combustível com o oxigênio garantindo a eficiência na destruição dos compostos orgânicos;

- **carga do resíduo:** fornos de clínquer têm em média uma capacidade de alimentação de matérias-primas de 100 t/hora e carga de resíduos normalmente menor que 5% da alimentação o que pode resultar, tipicamente, na queima de 2 t/hora a 3 t/hora de combustíveis complementares;

- **não geração de cinzas:** o intenso contato entre os gases e o material fino da *farinha* proporciona as condições para destruição dos compostos orgânicos e os inorgânicos são incorporados nas estruturas cristalinas dos componentes do clínquer;

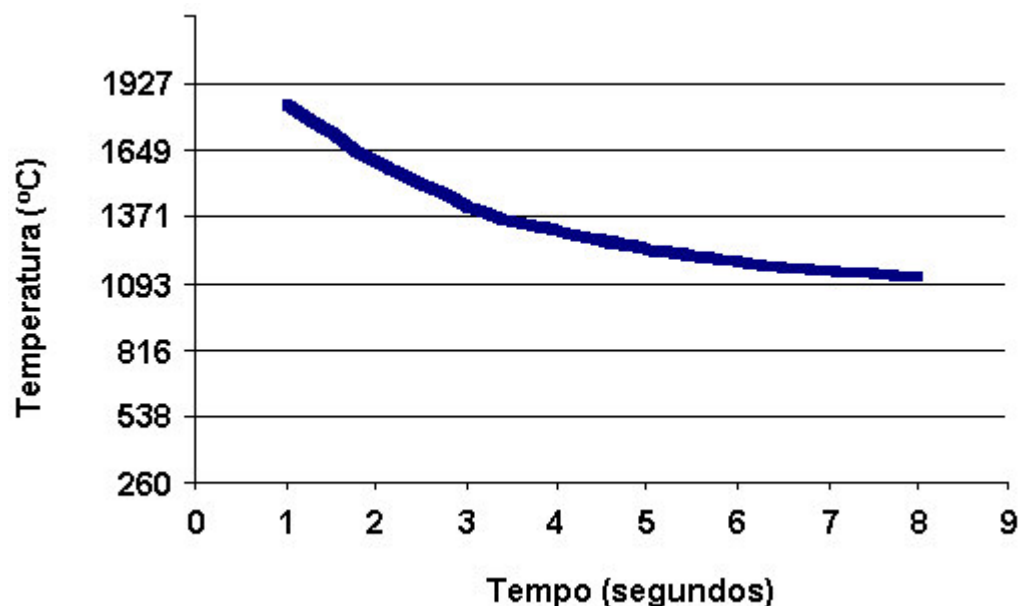
- **sistemas de controle de alta eficiência:** o processo gera gases, vapores de metais pesados, óxidos metálicos e material particulado. A fração sólida que não retorna ao forno é coletada no equipamento de controle de poluição, normalmente constituído por filtro de mangas ou precipitador eletrostático, cujas eficiências atingem de 99,95% a 99,99%.

Devido à importância dos perfis de temperaturas e tempos de residência no sistema-forno, tais características foram objeto de pesquisa de campo cujos resultados foram apresentados por Mantus<sup>13</sup> (1992 apud Weitzmann, 1983). Essa investigação foi conduzida para a determinação do tempo de residência cumulativo *versus* perfil de temperatura dos gases num forno de clínquer de via seca de diâmetro de 3,5 m a 4,1 m e comprimento de 174 m.

Segundo os resultados obtidos pelo autor os gases no forno rotativo passam aproximadamente 3 s em temperaturas iguais ou superiores a 1 204°C (2 200° F), conforme mostrado na Figura 5.1, excedendo os requisitos de tempo e temperatura necessários para a destruição tanto de compostos halogenados como de não halogenados. Essas condições também excedem aquelas típicas de operação de um incinerador de resíduos perigosos levando o autor à conclusão de que o forno de clínquer é mais que adequado para a destruição de compostos orgânicos tais como PCB's.

---

<sup>13</sup> MANTUS, E.K. (1992). *All Fired up: burning hazardous waste in cement kilns*. Seattle: Environmental Toxicology International apud WEITZMAN, L. (1983). Cement kilns as hazardous waste incinerators. *Environmental Progress* 2(1):10-14.



**Figura 5.1** – Tempo de residência cumulativo dos gases *versus* temperatura para um forno de clínquer

Fonte: Mantus, 1992 apud Weitzmann, 1983, adaptada pelo autor

Na Tabela 5.2 são apresentados alguns parâmetros comparativos das condições de operação de um forno rotativo de produção de clínquer para cimento e de um incinerador convencional de resíduos perigosos.

Apesar do co-processamento contemplar a utilização de resíduos como substitutos energéticos ou de parte das matérias-primas, este trabalho abordará a sua utilização como substituto parcial dos combustíveis primários ou convencionais.

### **5.3.2 - Principais emissões atmosféricas decorrentes do co-processamento**

O processo de produção de clínquer e cimento apresenta significativo potencial poluidor. Foram destacadas no capítulo 4 as emissões de material particulado e dos compostos gasosos, dentre os quais os óxidos de enxofre e de nitrogênio, gases ácidos, orgânicos voláteis e outros. Nesta etapa

serão enfatizados alguns aspectos relacionados às emissões de compostos inorgânicos, principalmente os metais pesados<sup>14</sup>, e orgânicos decorrentes da alimentação de resíduos como combustíveis suplementares em forno rotativo de clínquer.

**Tabela 5.2** – Parâmetros comparativos entre as características do forno de clínquer e do incinerador de resíduos perigosos

Parâmetro	Forno de clínquer típico	Incinerador típico de resíduos perigosos
Temperatura máxima do gás	>2 000°C	≤1 500°C
Temperatura máxima dos sólidos	1 450 °C a 1 500°C	≤1 300°C
Tempo de retenção do gás a T ≥ 1 100°C	6 a 10 segundos	0-3 segundos
Turbulência (número de Reynolds)	>100 000	>10 000
Taxa de alimentação do gás	100 000 a 130 000 Nm <sup>3</sup> /h (média)	25 000 a 30 000 Nm <sup>3</sup> /h (média)
Processamento de matéria-prima	100 t/h	Nenhuma
Dimensões	50 a 230 m de comprimento e 3 a 8 m de diâmetro e 1 a 3 rpm	5 a 18 m de comprimento, 3 a 6 m de diâmetro e 0,5 a 2 rpm
Carga de resíduos	Tipicamente menor que 5%. Combustível de resíduos 5 t/h	100%
Produto manufaturado	clínquer	nenhum

Fonte: Marciano, Jr; Kihara e Esper (1996), adaptada pelo autor

### 5.3.2.1 - Emissões de metais pesados

Uma questão que suscita importantes discussões decorrente da alimentação de resíduos em fornos de clínquer se refere ao potencial para as emissões atmosféricas de metais pesados. Os resíduos industriais frequentemente se apresentam com teores variáveis de inorgânicos, os quais, embora possam ter seus compostos alterados quando submetidos ao processo

<sup>14</sup> Conforme citação da Associação Européia de Cimento em CEMBUREAU (1999), todos os metais mais pesados que o titânio (4,51g/cm<sup>3</sup>) são considerados metais pesados.

de combustão, semelhante a qualquer outro elemento, não são destruídos (MANTUS, 1992). Vários são os estudos realizados acerca do comportamento dos metais pesados submetidos a processos de tratamento térmico em fornos de clínquer (SPRUNG, 1988).

O processo de produção nesses sistemas-fornos está sujeito à recirculação de gases e, conseqüentemente, de elementos químicos que são volatilizados nas regiões de altas temperaturas e que ao se condensarem em regiões frias retornam ao circuito de alimentação adsorvidos no material particulado caracterizando os ciclos químicos. Esses ciclos dependem das características qualitativas das matérias-primas e dos combustíveis, assim como dos resíduos utilizados em atividades de co-processamento. O tipo de processo e as características das instalações, bem como aspectos operacionais também influenciam a dinâmica dos ciclos internos e externos.

Sprung (1985) comenta que a comparação das composições químicas dos resíduos com aquelas das matérias-primas naturais e dos combustíveis normalmente utilizados no processo de manufatura do clínquer indica que uma série desses elementos químicos é comum a todas essas correntes de alimentação. As concentrações nas matérias-primas e combustíveis são, no entanto, geralmente mais baixas. Todavia, quantidades significativas de elementos traços podem ser fornecidas ao sistema-forno visto que grandes quantidades de *farinha* e combustíveis são requeridas para a manufatura do clínquer *portland*. Dentre os elementos traços presentes nessas correntes o autor avaliou o comportamento do arsênio, cádmio, cromo, chumbo, níquel, tálio e zinco.

Baseado em 32 medições de balanço de massa realizadas sem o uso de resíduos, obteve que em média 14 mg Pb/kg clínquer e 52 mg Zn/kg de clínquer são alimentadas no forno rotativo provenientes das matérias-primas naturais e do combustível convencional. Como regra o autor considera que as matérias-primas naturais respondem por mais de 80% da massa total de chumbo e zinco alimentadas no processo de manufatura do clínquer.

Quando resíduos combustíveis são utilizados o fluxo de massa do chumbo aumentou em 2,5 vezes, atingindo a média de 35 mg Pb/kg clínquer. Para o zinco obteve uma média de 205 mg Zn/kg clínquer, equivalente a 3,9

vezes a média atingida sem o uso de resíduos. O aumento do conteúdo de zinco foi devido, basicamente, à queima de pneus velhos, os quais, normalmente, apresentam altas concentrações do metal. As medições de balanço de massa indicaram que a maior parcela do chumbo e zinco alimentado em fornos com pré-aquecedores de ciclones foi incorporada no clínquer e nos pós do forno (Tabelas 5.3 e 5.4).

**Tabela 5.3** – Zinco no clínquer de cimento e no pó com e sem (números entre parênteses) o uso de resíduos

Correntes avaliadas	Zinco incorporado (Zn)			
	Variação	Média	Variação	Média
	mg/kg clínquer		% do balanço total	
<b>17 fornos com pré-aquecedores de ciclones</b>				
Clínquer	29,0 a 531,0	113,7 (45,7)	74 a 99	87 (86)
Pó do precipitador eletrostático	1,9 a 13,0	5,0 (4,4)	1 a 19	7 (8)
Pó emitido	0,003 a 0,073	0,022 (0,026)	0,0 a 0,2	0,02

Fonte: Sprung (1985), adaptada pelo autor

Os resultados obtidos mostraram que a incorporação do zinco no clínquer variou de 74% a 99% do balanço interno, com médias de 87% e 86% para as duas condições avaliadas, com e sem o uso de resíduos, respectivamente. O autor comenta que se a alimentação de zinco no sistema-forno aumenta devido ao uso de resíduos, o conteúdo absoluto do metal no clínquer se eleva proporcionalmente e o nível de incorporação não se modifica substancialmente.

O pó coletado no precipitador eletrostático e recirculado no circuito externo indicou a incorporação de 7% e 8% de zinco em relação ao balanço total, respectivamente, com e sem o uso de resíduos. Esses resultados mostraram que o zinco é amplamente incorporado no clínquer e no pó do forno,

com média de 94% do balanço interno, independentemente da utilização ou não de combustíveis derivados de resíduos.

Segundo as pesquisas realizadas os valores obtidos nas avaliações de balanço de massa indicaram que as quantidades de chumbo reagindo no forno eram menores que aquelas do zinco por um fator de 4 a 6. Como no caso do zinco, a maior proporção do chumbo se incorporou no clínquer variando de 73% a 96% do balanço interno atingindo as médias de 85% e 86%, respectivamente, com e sem o uso de resíduos. Os pós do precipitador eletrostático incorporaram de 2% a 22% de chumbo atingindo a média de 8% independente da utilização ou não de resíduos. Também neste caso os resultados demonstraram que o chumbo é amplamente incorporado no clínquer e no pó do forno, com média de 93% e 94% do balanço interno, respectivamente, com e sem a utilização de resíduos. O chumbo incorporado no clínquer aumentou proporcionalmente à entrada do metal no forno.

**Tabela 5.4** – Chumbo no clínquer de cimento e no pó com e sem (números entre parenteses) o uso de resíduos

Correntes avaliadas	Chumbo incorporado (Zn)			
	Varição	Média	Varição	Média
	mg/kg clínquer		% do balanço total	
<b>16 fornos com pré-aquecedores de ciclones</b>				
Clínquer	6,4 a 105,0	19,4 (14,3)	73 a 96	85 (86)
Pó do precipitador eletrostático	0,4 a 31,0	3,3 (1,7)	2 a 22	8 (8)
Pó emitido	0,001 a 0,032	0,014 (0,015)	0,0 a 0,2	0,05

Fonte: Sprung (1985), adaptada pelo autor

O autor refere ainda que um déficit sistemático de 6% a 7% é característico no lado de saída do balanço, tanto para o chumbo como para o zinco, no entanto, essas quantidades de metais não são lançadas na atmosfera juntamente com os pós, como mostram as emissões obtidas. Esses déficits no

forno e pré-aquecedor, semelhante ao cloreto, indicam que circulações internas ocorrem naquele circuito levando ao enriquecimento dos metais ao longo do tempo. Foram também encontradas quantidades desprezíveis de chumbo e zinco ligadas ao refratário do forno, as quais não interferiram nos balanços de massas.

A quantidade de chumbo alimentado no sistema-forno foi menor que a do zinco numa relação de 4 para 6. Os pós emitidos com os gases filtrados provenientes de fornos pré-aquecedores suspensos mostraram quase a mesma magnitude de chumbo, assim como de zinco, com média de 14 mg/kg de clínquer, indicando a maior volatilidade do chumbo em comparação com o zinco.

Foram também efetuadas medições da incorporação de chumbo e zinco mediante a adição de cloreto de cálcio no forno. Como conclusão dos testes confirmou que, em comparação ao zinco, o chumbo é mais volátil e que o cloreto aumenta a volatilidade desse metal pesado.

Sprung e Rechenberg (1983) afirmam que os compostos de chumbo e zinco introduzidos no forno de clínquer com as matérias-primas ocorrem principalmente como sulfetos, os quais são oxidados pelo oxigênio em temperaturas acima de 500°C. O sulfeto de chumbo é dessa forma geralmente oxidado diretamente para óxido de chumbo e dióxido de enxofre, enquanto que o sulfeto de zinco primeiro forma sulfato de zinco, o qual em temperatura de 770°C experimenta a decomposição em óxido de zinco e dióxido de enxofre. Os autores referem que a volatilidade dos metais depende da pressão de vapor que os elementos ou os seus compostos desenvolvem em função da temperatura.

Compostos contendo chumbo formando óxido, sulfato, carbonato, fosfato ou silicato volatilizam mais facilmente que os correspondentes compostos de zinco. Assim, o PbO exibe substanciais perdas devidas à volatilização a 750°C, enquanto que com o ZnO tais perdas somente ocorrem a 1300°C. Os autores citam que o PbO pode volatilizar sem primeiro se decompor, enquanto que o ZnO é sucessivamente decomposto em seus elementos constituintes para passar para a fase gasosa. Além dos óxidos esses dois metais podem formar cloretos e sulfatos no forno de clínquer.

Sprung (1985) também refere que em comparação ao chumbo, o cromo e níquel provaram ser elementos relativamente não voláteis. O níquel fornecido ao sistema-forno foi largamente incorporado ao clínquer. O nível de



incorporação variou de 93% a 97% do balanço interno em fornos pré-aquecedores de ciclones. O autor refere que aproximadamente 3% do balanço é incorporado no pó do gás não filtrado (circuito composto pelo forno/secagem-moagem), não havendo o crescimento da concentração de níquel no circuito forno/pré-aquecedor no decorrer do tempo. Esses fatores caracterizam a baixa volatilidade do níquel. Devido ao alto nível de incorporação de níquel no clínquer as emissões através dos pós do gás filtrado foram desprezíveis. A partir das medições realizadas o autor verificou que as emissões variaram de 0,001% a 0,01% do balanço interno ou de 0,0002 mg/kg a 0,004 mg/kg clínquer.

É também referido que o cromo se comporta de maneira semelhante ao níquel. O nível de cromo incorporado no clínquer variou de 77% a 93% referente à soma do balanço interno. No circuito composto pelo forno/secagem-moagem variou de 5% a 8%. Não foi verificada a ocorrência de enriquecimento de cromo no circuito forno/pré-aquecedor ao longo do tempo. A baixa volatilidade e grande incorporação no clínquer resultou em emissões de cromo variando de 0,004% a 0,03% da soma do balanço interno, representando de 0,0004 mg/kg a 0,004 mg/kg através dos pós dos gases filtrados. Em termos de impacto ambiental, somente a proporção de cromo hexavalente no pó do gás filtrado é de significância.

As investigações de dois fornos pré-aquecedores de ciclones indicou que grande parcela do arsênio alimentado foi incorporada no clínquer. O nível de incorporação referente ao balanço interno variou entre 83% e 91%. Outros 7% a 9% do arsênio foram incorporados ao pó do gás não filtrado. Sprung (1985) comenta que a razão para os altos níveis de incorporação poderia ser a formação de arseniatos como produtos intermediários possuindo uma baixa pressão de vapor. Conseqüentemente somente pequenas quantidades de arsênio foram emitidas com o pó do gás filtrado, variando de 0,001% a 0,005% do balanço interno total ou 0,0002 mg/kg a 0,001 mg/kg clínquer.

Comparado ao zinco, cromo, níquel e chumbo, o cádmio está contido em concentrações muito menores nas matérias-primas do cimento. Mas semelhante aos outros elementos pode estar concentrado nos resíduos e dessa forma entrar no forno de clínquer em maiores quantidades. O autor descreve que o cádmio é largamente incorporado ao clínquer, atingindo níveis

que variaram de 51% a 88% do balanço interno em sistemas-fornos pré-aquecedores de ciclones.

Similarmente ao chumbo a quantidade de cádmio coletada e circulada na seção do pré-aquecedor foi substancialmente maior que a quantidade de cádmio no circuito composto forno/secagem-moagem, resultando num déficit no lado da saída do balanço de massa. O desequilíbrio existente entre a entrada e saída de cádmio no sistema demonstra a ocorrência de enriquecimento do metal ao longo do tempo no circuito forno/pré-aquecedor. Não obstante o enriquecimento relativamente acentuado de cádmio no circuito interno, nenhuma emissão particularmente alta foi medida em fornos pré-aquecedores suspensos.

As emissões relativas ao balanço interno variaram de 0,03% a 0,07% ou aproximadamente 0,0001 mg Cd/kg clínquer. A emissão de chumbo no mesmo forno atingiu somente 0,002 mg/kg a 0,003 mg/kg de clínquer apesar de sua alimentação no sistema ter sido 70 vezes maior que a do cádmio. Com a alimentação maior de cádmio, um maior enriquecimento no pó pode ser esperado devido à maior volatilidade do metal. A maior concentração de cádmio no pó do gás filtrado encontrada em sistemas de pré-aquecedor suspenso foi de 0,026 mg/kg clínquer.

Sprung (1985) refere também que como regra, mais de 90% do tálio introduzido num forno de clínquer é derivado das matérias-primas naturais. Os resultados disponíveis nas avaliações de balanços de massa mostram que o tálio tem a maior volatilidade dos elementos testados até aqui. O balanço externo efetuado em forno pré-aquecedor suspenso com operação composta (utilização dos gases quentes para secagem das matérias-primas) mostra que somente 4,5% do balanço externo de 44,1 g Tl/h (0,864 mg/kg clínquer) é incorporado ao clínquer.

Em relação ao balanço interno o autor obteve que o nível de incorporação foi de 0,5%. O déficit do balanço externo totalizou aproximadamente 95%. Outras investigações de balanço mostraram que a incorporação do tálio ao clínquer freqüentemente é menor que 5% relativamente ao balanço externo. Comparado ao balanço interno, os níveis de incorporação variaram entre 0,1% e 2,2%. O tálio, dessa forma, comporta-se similarmente ao cloreto, o qual também é somente incorporado em baixa

proporção no clínquer. A emissão de tálio através do pó do gás limpo, a despeito do baixo nível de incorporação no clínquer, foi de somente 0,3 g/h ou 0,006 mg/kg clínquer, correspondente a 0,7% do balanço externo.

Nesse balanço há uma diferença entre a entrada e saída de tálio de aproximadamente 41,8 g/h (0,820 mg Tl/kg de clínquer). Essa quantia de tálio permanece no forno e aumenta com a circulação ao longo do tempo. O autor relata que a quantidade de tálio encontrada no pó do gás não filtrado (aproximadamente 7,6 mg/kg clínquer) foi quase 10 vezes maior que a o valor total de tálio alimentado via correntes de entrada no sistema (0,864 mg/kg clínquer). Adicionalmente uma circulação interna se desenvolveu no forno e pré-aquecedor a qual cresceu em média horária de 0,826 mg/kg clínquer durante o tempo de duração do teste. Essa quantia correspondeu à magnitude do déficit dos balanços externo e interno.

Testes adicionais de amostras extraídas de 04 fornos pré-aquecedores de ciclones forneceram informações relativas às quantidades de tálio, assim como as proporções de outros elementos no material alimentado passando através do pré-aquecedor. De acordo com esses dados as concentrações de tálio cresceram de aproximadamente 500 ppm na alimentação do forno para 4000 ppm no primeiro estágio dos ciclones (Tabela 5.5).

**Tabela 5.5** – Componentes traços e secundários na alimentação do forno e pré-aquecedor tipo torre de ciclones e no clínquer de sistema-forno com operação composta

Etapa	K <sub>2</sub> O	Cloro	Chumbo	Zinco	Cádmio	Tálio
	kg/h		g/h			
Alimentação do forno	761	24	200	2 085	11	433
Ciclone I	903	97	620	5 179	32	3 200
Ciclone II	1 106	198	1 356	4 264	61	1 523
Ciclone III	1 685	436	2 418	4 852	165	436
Ciclone IV	2 700	942	8 431	7 241	553	209
Total I a IV	6 394	1 674	12 825	21 536	811	5 368
Clínquer	761	8	327	17 294	14	2

Fonte: Sprung (1985)

Na entrada do forno (quarto estágio) a concentração de tálio, de aproximadamente 300 ppm, havia caído para um valor abaixo daquela da alimentação do forno. A concentração máxima de tálio estava, portanto, na área do primeiro ciclone. Ao contrário de outros elementos, os compostos de tálio podem condensar sobre as partículas frias do material alimentado somente nas temperaturas existentes na área do primeiro estágio dos ciclones pré-aquecedores.

A diminuição da concentração de tálio no material coletado no quarto estágio dos ciclones mostra que, dada a temperatura do material prevalente naquele ponto, a maior proporção de tálio vindo dos estágios superiores do ciclone já estava revolatilizado. Ou seja, na medida em que a matéria-prima desce pelos ciclones, o tálio condensado nas partículas de *farinha* revolatiliza nas faixas de temperaturas existentes no pré-aquecedor devido à sua alta volatilidade, não sendo necessário atingir as altas temperaturas do interior do forno rotativo para ocorrer a revolatilização do metal.

O autor concluiu que a temperatura na qual o maior enriquecimento do material alimentado foi obtido é característica para cada composto e que, nesse sistema-forno, a temperatura, para a máxima concentração de tálio, variou de, aproximadamente, 200°C a 400°C.

Ao contrário, as maiores concentrações de cádmio, chumbo, cloreto e álcalis foram encontradas sem qualquer diferença mensurável entre 800°C e 900°C. Essa é a faixa de temperatura na qual o material alimentado passa do pré-aquecedor para o forno.

A distribuição da concentração de zinco claramente diferiu do padrão. Essa peculiaridade foi devida ao significativo enriquecimento do zinco que se desenvolveu na área de entrada do forno por causa da queima de pneus (queima secundária). Parte do zinco volatilizado estava entrando nos estágios mais frios do ciclone junto com os gases de exaustão do forno precipitando-se no material alimentado na faixa de temperatura de 300°C a 400°C semelhante ao tálio. Quando reentrando nas áreas de temperaturas mais elevadas, o zinco ao contrário do tálio, não revolatiliza, incorporando-se ao clínquer.

Conforme relatado por Maringolo (2001), balanços de massas mostram que sob as condições de clínquerização arsênio, berílio, cromo, níquel, vanádio e zinco comportam-se de maneira semelhante aos elementos

maiores cálcio, silício, alumínio, ferro e magnésio, à exceção da volatilidade relativamente mais alta. O autor refere que esses metais se incorporam predominantemente ao clínquer e em menor proporção aos pós circulantes no forno, resultando na mínima emissão na forma particulada.

Outros pesquisadores também estudaram o comportamento de metais pesados, tais como Seebach e Tompkins (1991), a partir da utilização de combustíveis convencionais e de resíduos perigosos em fornos pré-aquecedores, pré-calcinadores e de via úmida nos quais as circulações externas dos elementos principais também se desenvolveram em razão da realimentação dos pós retidos nos sistemas de desempoeiramento. A avaliação dos sistemas-fornos foi realizada através de amostragens horárias de todos os fluxos de massas por período mínimo de oito horas.

Essas amostras foram juntadas numa mesma amostra composta e analisadas para os metais pesados de interesse. Durante os períodos de amostragem foram também coletadas amostras de particulados das emissões das chaminés para análises. Os autores ressaltam que a acurácia dos balanços de massas de entrada e saída de elementos traços em fornos de clínquer é determinada mais pela precisão da digestão e análise dos elementos químicos que pela estabilidade do sistema-forno.

Esses balanços foram executados a partir das concentrações de entrada e saída de elementos traços no sistema-forno com o propósito de avaliar os percentuais de incorporação de cromo, chumbo, bário, cádmio, arsênio, berílio, selênio, prata, níquel, antimônio, zinco, vanádio, mercúrio e tálio na fase sólida, bem como a influência da adição de cloro nos níveis de retenção de chumbo e cádmio. Referem também que as emissões de metais freqüentemente se mostraram abaixo dos limites de detecção do método analítico, assumindo-se nesses casos, esses limites como representativos dos níveis de emissão numa aproximação mais conservativa.

Conforme descrito por Sprung (1985) e Sprung, Kirchner e Rechenberg (1984) mais de 99,9% em massa dos elementos principais e traços alimentados no processo produtivo de clínquer são incorporados na fase sólida (clínquer e pós do forno). Seebach e Tompkins (1991) encontraram valores de retenção de metais pesados (Tabela 5.6) compatíveis com o percentual citado, excetuando os casos do mercúrio, selênio e tálio.

Os autores comentam que poderia se esperar que a porção do metal retido nos sólidos apresentasse correlação com a volatilidade do elemento químico. Entretanto, esse fato não ficou evidenciado uma vez que o cromo, que não é altamente volátil, resultou numa incorporação de 99,855%, enquanto que o chumbo, mais volátil, atingiu a retenção de 99,853% na fase sólida.

Referem que mesmo com a grande variação imposta na alimentação, superior a uma ordem de grandeza, a incorporação de um metal específico na fase sólida de um sistema-forno foi similar para todos os outros sistemas avaliados. Citam que o percentual de retenção de cada metal em relação à alimentação total parece ser uma característica inerente a cada elemento, não sendo relevante a corrente de entrada, isto é, a *farinha*, o combustível ou resíduos.

**Tabela 5.6** - Emissão e retenção relativas de metais pesados

Metal	Variação na alimentação (lb/h)	(%)	
		Emissão	Retenção
Cr	de 0,5642 a 10,1974	0,128	99,8553 ± 0,3990
Pb	de 1,5761 a 42,2842	0,167	99,8531 ± 0,2008
Ba	de 33,1177 a 75,9640	0,030	99,8781 ± 0,2939
Cd	de 0,0864 a 0,3945	0,440	≥ 99,5550 ± 0,4418
As	de 0,0151 a 6,5910	0,022	≥ 99,8868 ± 0,2916
Be	de 0,0003 a 0,7172	0,114	≥ 99,8681 ± 1,3278
Se	de 0,0072 a 1,3410	0,298	≥ 95,4002 ± 1,7779
Ag	de 0,0439 a 0,4975	0,163	≥ 99,8420 ± 0,1839
Ni	de 1,9490 a 5,0261	0,048	≥ 99,9574 ± 0,0108
Sb	de 0,3532 a 0,6640	0,266	≥ 99,7690 ± 0,0785
Zn	de 9,1751 a 35,8034	0,220	99,7869 ± 0,2598
V	de 4,9594 a 31,3130	0,004	≥ 99,9922 ± 0,0007
Hg	de 0,0047 a 0,0938	de 10 a 90%	≥ 61,3 ± 32,5
Tl	de 0,0180 a 0,7357	de 10 a 20%	90,1219 ± 10,7113

Fonte: Seeback e Tompkins (1991), adaptada pelo autor

Foi também avaliada a retenção de metais na fase sólida de um sistema-forno com diferentes níveis de alimentação de cloro (Tabela 5.7).

Os resultados mostram que essas taxas de alimentação de cloro no forno não resultaram na redução do nível de incorporação dos metais testados nas fases sólidas. Os autores supõem que esses resultados sejam válidos somente para uma estreita faixa de dosagem do halogênio que não exceda os limites operacionais. Referem também que, condizente com as faixas de temperaturas de operação dos sistemas de controle de poluição do ar, nenhum dos metais avaliados foi emitido como metal ou vapor livre, mas sim adsorvido no material particulado.

**Tabela 5.7** – Retenção dos metais cádmio e chumbo mediante o incremento da alimentação de cloro no sistema-forno

Metal	Retenção	
	com 45,36 kg Cl/h	com 81,65 kg Cl/h
Cd	99,55	99,87
Pb	99,85	99,98

Fonte: Seebach e Tompkins (1991), adaptada pelo autor

Seebach e Tompkins (1991) concluíram, a partir das avaliações realizadas, que não foram identificadas diferenças entre as emissões de metais pesados de sistemas-fornos utilizando combustíveis convencionais e resíduos suplementares derivados de resíduos daqueles utilizando somente os combustíveis convencionais.

CEMBUREAU (1999) destaca a importância dos metais voláteis introduzidos nas correntes de alimentação de fornos de clínquer visto que uma parcela sempre permanece na fase gasosa, não ligada às partículas de poeira. Essa característica impossibilita o controle desses metais pela remoção do pó existente no gás exaurido do sistema-forno. Considera que o mais importante e único exemplo de relevância para a indústria do cimento é o mercúrio, o qual suspeita-se de ser emitido em larga escala na forma de vapor. Quanto menor a

temperatura do gás exaurido, na entrada do sistema de controle de poluição, maior será a proporção de Hg ligado às partículas de poeira que poderá ser removido do fluxo gasoso.

Em relação a esse metal, Senior, Sarofim e Eddings (2003) relatam que grande parte do mercúrio se apresenta na forma de sais inorgânicos ou compostos orgânicos na água, solo, sedimentos, plantas e animais. Na atmosfera a maior parte do mercúrio é constituída de vapor de mercúrio primário, embora exista uma moderada quantia na forma não elementar, às vezes chamado Mercúrio Gasoso Reativo, o qual é semelhante a um sal inorgânico.

A deposição úmida é a principal forma de transporte do mercúrio na atmosfera ou para a remoção de partículas contendo mercúrio ou sais de mercúrio gasoso. O tempo de permanência do mercúrio primário na atmosfera pode chegar a um ano, enquanto as formas oxidadas têm tempos de vida de poucos dias ou menos como resultado da maior solubilidade do  $\text{Hg}^{+2}$  na umidade atmosférica. O mercúrio primário pode ser transportado para longas distâncias, enquanto que mercúrio oxidado e particulado depositam-se próximos às fontes de emissão.

A importância do controle do mercúrio é ressaltada, uma vez que, tal como as dioxinas, esse metal persiste no meio ambiente e bioacumula na cadeia alimentar afetando principalmente o sistema nervoso de humanos e animais, bem como apresenta importante função na química da atmosfera e de outros compartimentos ambientais (SENIOR, SAROFIM e EDDINGS, 2003; PACYNA, PACYNA e PIRRONE, 2001).

Senior, Sarofim e Eddings, (2003) citam que o carvão utilizado em cimenteiras apresentam baixas concentrações de Hg e em certos resíduos encontram-se em concentrações variadas. Nas altas temperaturas de combustão todo o mercúrio do combustível é vaporizado como mercúrio metálico. No processo de produção de clínquer por via úmida o mercúrio emitido pode ser oxidado e/ou condensar sobre as matérias-primas cruas na faixa de temperatura existente na saída do gás. Em forno de via seca esses gases atingem temperaturas mais elevadas sendo provável que o mercúrio deixe o forno na forma gasosa, mas na torre pré-aquecedora pode ser adsorvido na *farinha* enriquecendo a alimentação do forno e os pós retidos no sistema de controle de poluição.



Esses autores examinaram um conjunto de dados relativo a fornos de clínquer utilizando combustível convencional e um outro referente a fornos de via úmida queimando resíduos perigosos. Na primeira condição foram analisados 35 relatórios diferentes com um total de 50 campanhas de amostragens contemplando vários tipos de fornos, combustíveis e equipamentos de controle de poluição.

As análises estatísticas dos resultados não revelaram diferenças significativas entre as emissões em função do tipo de processo, mas a emissão média de mercúrio foi maior para os fornos equipados com filtros de mangas quando comparado com aqueles com precipitador eletrostático. Talvez devido ao fato de que a temperatura do fluxo gasoso para controle por esses equipamentos é mais baixa, permitindo a coleta do Hg.

No caso dos precipitadores eletrostáticos, onde a temperatura dos gases pode ser maior, talvez o mercúrio seja emitido na forma gasosa e em razão das dificuldades de coleta não seja possível a amostra representativa das emissões.

Surpreendeu o baixo número de resultados com emissões acima de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $20^\circ\text{C}$ , 1 atm, 7% $\text{O}_2$ ). Para a segunda condição foram considerados 13 diferentes fornos de via úmida somando 60 resultados de amostragens. Embora os autores ressaltem que comparações absolutas não podem ser feitas entre os resultados obtidos, em razão de que as composições dos resíduos variaram, as emissões dos fornos utilizando resíduos apresentou média e mediana de, aproximadamente, o dobro do valor daquelas dos fornos alimentados com combustíveis convencionais.

Existe uma reciclagem de metais voláteis para dentro do forno devida à recirculação de pó contendo mercúrio e aos amplos gradientes de temperaturas (em fornos de via úmida), requerendo um longo tempo para que seja alcançado o estado estável de equilíbrio no processo. Isto torna difícil a medição precisa do balanço de massa do mercúrio, particularmente quando é somente alimentado no sistema-forno por curtos períodos de tempo ou quando suas concentrações são rapidamente alteradas na corrente de alimentação.

A medição de Hg em sistemas de combustão tem se mostrado difícil devido ao ambiente no gás da chaminé, as baixas concentrações de mercúrio

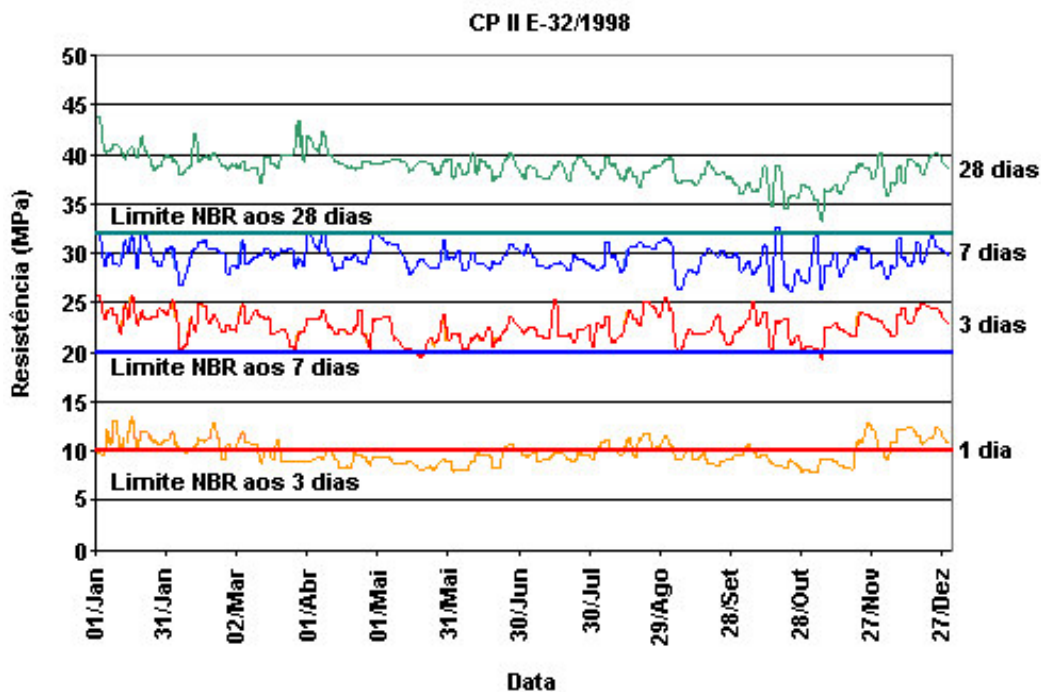
tipicamente presentes e às várias formas de mercúrio presentes no fluxo gasoso (SENIOR, SAROFIM e EDDINGS, 2003).

Pacyna, Pacyna e Pirrone (2001) estimaram que as emissões de mercúrio de fontes antropogênicas na Europa em 1995 eram de aproximadamente 342 toneladas, representando uma redução de 45% quando comparadas a 1990. Verificaram que a queima de combustíveis, particularmente de carvão, se mantém como a principal fonte contribuindo com mais da metade das emissões totais. As emissões devidas às plantas produtoras de cimento foram estimadas em 28,70 t (8,40% do total).

A USEPA (1997) apresentou relatório ao Congresso americano com inventário de fontes de emissão de mercúrio, relativo aos anos de 1994 e 1995, estimando-a em 158 t/ano. As fontes pontuais foram responsáveis por 97,8% das emissões totais (154,7 t/ano) e as fontes área por 2,2% equivalente a 3,4 t/ano. Os processos industriais responderam por 10% do total das emissões pontuais e dessas a produção de cimento foi responsável por 3,1% (4,8 t/ano). As fontes de combustão contribuíram com 86,9% das emissões totais (137,7 t/ano) e fontes diversificadas por 0,9% (1,4 t/a).

Maringolo (2001) estudou o comportamento de cimentos produzidos no período de 1996 a 1998 pela Companhia de Cimento Ribeirão Grande (CCRG) com e sem a utilização de um *blend* de resíduos como substituto energético parcial alimentado no queimador principal de fornos rotativos de via seca. Suas pesquisas incluíram também a avaliação de clínqueres experimentais dopados com compostos de zinco (ZnO), vanádio ( $\text{NH}_4\text{VO}_3$ ) e chumbo ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ). O autor verificou que a entrada dos clínqueres industriais co-processados na produção do cimento não foi percebida nas curvas de resistências (Figura 5.2), concluindo que a qualidade do produto não sofreu qualquer alteração devido à substituição parcial do combustível fóssil pela mistura de resíduos.

Ensaio de lixiviação de metais pesados com cimentos preparados em laboratório com clínqueres co-processados indicaram teores de 84% a 99% inferiores aos limites normativos, sendo que As, Be, Ag e Tl não foram detectados no extrato lixiviado. Quanto às análises químicas dos clínqueres experimentais verificou que Zn, V e Pb foram incorporados à estrutura cristalina de alita e belita.



**Figura 5.2** – Curvas de resistências mecânicas a 1, 3, 7 e 28 dias de cimentos industriais de 1998 da CCRG. As linhas divisórias correspondem aos limites normativos a 3, 7 e 28 dias

Fonte: Maringolo (2001), adaptada pelo autor

Barros, Tenório e Espinosa (2002) simularam as condições de produção de clínquer de cimento *portland* num reator em escala de laboratório, buscando uma nova abordagem para o entendimento da incorporação de metais no processo de clinquerização. O trabalho estudou a incorporação de óxidos de cromo e de níquel em clínquer sintético a partir de adições na *farinha* crua, bem como a influência de cloretos sobre a retenção desses compostos.

Concluíram que esses óxidos quando adicionados na mistura crua do clínquer não evaporam durante o processo de queima, sendo totalmente incorporados nas fases cristalinas. As adições de NaCl e KCl não interferiram na razão de incorporação dos óxidos de cromo e níquel e evaporaram inteiramente durante o processo de calcinação. Relataram que as adições de resíduos contendo óxidos de cromo e níquel nas matérias-primas do clínquer, até 1,0% de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e 1,0% de NiO poderiam não afetar as taxas de emissão desses metais, mesmo se os resíduos tivessem cloretos. Esses óxidos poderiam ser totalmente incorporados ao clínquer.

Ract, Espinosa e Tenório (2003) estudaram a possibilidade de co-processamento de lama galvânica, resíduo classificado como perigoso pela norma brasileira, por conter metais pesados como cobre e níquel, em processo de fabricação de clínquer. Avaliaram o percentual de incorporação dos metais e a influência das adições da lama nas reações de clínquerização realizadas em equipamento de laboratório para simulação do ciclo térmico imposto às matérias-primas. Os autores concluíram que adições de até 2% em peso de lama galvânica contendo 2,4% de cobre e 1,2% de níquel em peso na matéria-prima do clínquer não afetaram as reações de clínquerização.

Adições da lama galvânica na matéria-prima do clínquer reduziram as temperaturas de reação de belita -  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  ( $\text{C}_2\text{S}$ ) e de formação da fase líquida. Todo o níquel e mais de 99% do cobre foram incorporados ao clínquer durante o processo de queima. Não foram observadas saturações de cobre e níquel para as adições estudadas de lama galvânica.

Miura et al. (2001) relatam suas preocupações com a crescente geração de resíduos decorrentes do desenvolvimento econômico japonês e a disposição da maior parte em aterros, cuja disponibilidade tem se tornado extremamente reduzida nos últimos anos. Os autores pesquisaram a produção de um novo tipo de cimento *portland*, denominado Eco-cimento, manufaturado a partir da substituição de aproximadamente 50% das matérias-primas naturais por cinzas de incineração de resíduos e lodo de tratamento de esgoto.

Para fechamento do circuito de reciclagem idealizaram a extração dos metais pesados incorporados no pó do forno coletado no equipamento de controle de poluição através de solução ácida para sua recuperação e refino em unidade de fundição. Em razão das dificuldades de investigação do comportamento do pó do forno a partir dos dados reais, devido os baixos conteúdos de metais pesados nas cinzas volantes de incineradores municipais e considerável flutuação de sua composição, propuseram a realização de cálculos termodinâmicos através do método da mínima energia livre.

Esses cálculos foram realizados para simular a distribuição dos componentes de cobre, chumbo e zinco entre o pó de forno e o clínquer no processo de manufatura de cimento *portland*. Os autores confirmaram a utilidade do cálculo termodinâmico para elucidar aspectos relacionados à produção do eco-cimento. Os resultados indicaram a volatilização de 95% do chumbo na

temperatura de sinterização da *farinha* (1 400°C), a maior entre os três metais avaliados. A volatilização do cobre chegou à razão de 52% e para o zinco 25%.

Concluíram que cada componente reage com  $\text{CaCl}_2$  e é vaporizado, principalmente, como  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{CuCl}$  e  $\text{PbCl}_2$  em atmosfera oxidante a 1 400°C. Referiram também que os graus de volatilização do cobre e zinco são diferentes dependendo, inversamente, se a atmosfera é oxidante ou redutora. A proporção de volatilização do cobre é maior que a do zinco sob condição oxidante, por outro lado, o zinco é muito mais volátil sob condição redutora, situação na qual o cobre é fixado como sulfeto.

Guo e Eckert (1996) analisaram as emissões de metais pesados na chaminé principal, no clínquer e no pó retido no ECP obtidas em 1992 num forno de via úmida, no qual resíduos perigosos sólidos e líquidos foram usados como substitutos do combustível principal (carvão) com taxas de alimentação de até 100%. Com a alimentação dos resíduos na mais alta taxa de substituição pretendida as concentrações medidas de arsênio, berílio, cádmio, cromo e chumbo no pó de forno removido do sistema, foram, respectivamente, 68, 10, 72, 18 e 68 vezes maiores que aquelas previstas sem o uso dos combustíveis suplementares. Os autores atribuíram esses aumentos ao maior conteúdo de metais por unidade de energia térmica no combustível de resíduos perigosos em comparação ao combustível fóssil.

Na taxa máxima de alimentação de resíduos pretendida as concentrações dos metais Be, Cd, Cr e Pb no extrato lixiviado do pó de forno removido do sistema excederiam significativamente os limites impostos pela legislação americana. Os autores referem que os dados muito limitados da USEPA parecem indicar que o uso de combustíveis de resíduos perigosos em fornos de clínquer aumentariam não somente o conteúdo de metais, mas também as quantidades lixiviáveis de metais no clínquer de cimento. Em conjunção com outros estudos de comportamento de metais no forno de clínquer, recomendaram mais pesquisas relativas à lixiviação de metais pesados provenientes do pó de forno e dos produtos feitos com cimento co-processado.

### **5.3.2.2 - Emissão de orgânicos**

Teoricamente a combustão completa de um composto orgânico constituído somente de carbono e hidrogênio produz dióxido de carbono e água. Se ele contém cloro, então ácido clorídrico e gás cloro também são produzidos dependendo das condições da combustão. Adicionalmente, se o composto orgânico contém nitrogênio ou enxofre, então óxidos desses elementos são produzidos. Se os produtos referidos são os únicos gerados na combustão de um orgânico, pode-se considerar que ele foi destruído.

Se as condições de combustão não são adequadas para a destruição completa dos compostos orgânicos, produtos de combustão incompleta (PCI's) poderão ser emitidos. Saxena e Jotshi (1996) definem os PCI's como os compostos orgânicos presentes nas emissões de processos de incineração os quais não estavam presentes ou detectáveis no combustível ou ar alimentado para o incinerador. Referem ser possível a identificação de centenas ou milhares de compostos com o uso de cromatógrafo a gás, dependendo do limite de detecção. Afirmam que os PCI's podem ser formados mesmo sob boas condições de combustão e que emissões em quantidades traços ocorrem em todos os processos de combustão, não existindo, conforme os dados disponíveis, diferenças básicas entre aquelas geradas na combustão de resíduos perigosos e de combustíveis fósseis.

Uma das etapas fundamentais para a certificação da adequada capacidade de um sistema-forno para realizar o co-processamento de resíduos perigosos é a demonstração da eficiência de destruição e remoção (EDR) dos componentes orgânicos. Já foi apresentado, segundo o ELETROIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS (e-CFR, 2003), que a EDR é dada pela equação:

$$EDR = \left[ 1 - \frac{m_{sai}}{m_{ent}} \right] \times 100 \quad (5.1)$$

onde:

$m_{ent}$ : é a taxa alimentada em massa de um PCOP no resíduo perigoso queimado na caldeira ou forno industrial, e

$m_{sai}$ : é a taxa de emissão em massa do mesmo PCOP detectado no gás da chaminé antes da liberação para a atmosfera

Os procedimentos para a determinação da EDR foram desenvolvidos originalmente para os incineradores de resíduos perigosos. Para a utilização em fornos de clínquer esse método pode apresentar problemas significativos uma vez que os constituintes orgânicos estão presentes não somente nos resíduos alimentados no equipamento de combustão, mas também nas matérias-primas e no combustível convencional. Se essas correntes de alimentação contêm o composto selecionado para a avaliação da EDR, a massa do orgânico entrando no forno será subestimada pela consideração somente da massa alimentada através do resíduo, resultando numa eficiência de destruição e remoção artificialmente baixa.

Adicionalmente se o composto está presente na *farinha* alimentada no pré-aquecedor, uma quantidade adicional poderá ser volatilizada nos estágios superiores da torre de ciclones, mais que destruída, resultando numa maior concentração nos gases da chaminé induzindo ao cálculo de uma EDR menor.

Exemplificando o fenômeno descrito, Mantus<sup>15</sup> (1992 apud Lauber, 1987) cita o caso ocorrido em 1976 no Estado de Michigan durante a realização de testes para verificar se os PCB's seriam seguramente destruídos num forno de clínquer de via úmida. Os compostos clorados foram detectados nos gases da chaminé, mesmo quando o resíduo não estava sendo alimentado no forno, sendo posteriormente identificado que a água usada no preparo da pasta estava contaminada com PCB's. Como a lama foi alimentada na extremidade fria do forno a maior parte dos clorados volatilizaram e foram emitidos pela chaminé ao invés de serem destruídos, resultando na baixa EDR obtida.

Oppelt (1986) citou num artigo técnico que incineradores, caldeiras industriais ou sistemas-fornos, desde que bem operados, poderiam alcançar uma EDR de 99,99%, estabelecida como indicador de performance na destruição de compostos orgânicos. Referiu que baixas concentrações desses compostos nas chaminés freqüentemente resultavam em baixas eficiências calculadas de remoção e destruição. Esses resultados poderiam ser devidos às limitações das técnicas de amostragem e análises ou ainda porque nesses baixos níveis de emissão quantidade suficiente do composto selecionado como

---

<sup>15</sup> MANTUS, E.K. (1992). *All Fired up: burning hazardous waste in cement kilns*. Seattle: Environmental Toxicology International apud LAUBER, J. D. (1987). *Disposal and destruction of waste PCBs*. In *PCBs and the environment*. Ed. J.s. Waid. Vol.III, chapter 5. p.83-151. CRC Press, Boca Raton, FL.

o principal composto orgânico perigoso (PCOP) poderia, na verdade, ser formado como produto da combustão incompleta ou recombinação de outros constituintes dos resíduos.

Relatou que a análise de um conjunto de dados do programa de testes de incineradores revelou não haver nível absoluto de temperatura média de combustão, tempo de residência médio da fase gás ou concentração de emissão de monóxido de carbono que pudessem ser correlacionados com a performance de EDR de 99,99%. O autor argumentou também que o relacionamento entre a EDR e esses parâmetros são, provavelmente, específicos para cada equipamento testado e que as características dos resíduos, condições de atomização e mistura na câmara de combustão são igualmente importantes para alcançar uma alta eficiência de destruição. Em outras palavras, o monitoramento contínuo específico para níveis de emissão absoluta de monóxido de carbono, oxigênio e carbono orgânico total halogenado não garante que a EDR de 99,99% está sendo alcançada.

Hart (1994) analisou os resultados de três testes não controlados pelo órgão ambiental realizados em forno longo de via seca no Estado da Califórnia nos anos de 1982, 1984, 1989 e 1990. Foram utilizados carvão (1982) e coque de petróleo (demais testes) como combustíveis principais e resíduos perigosos de solventes como combustível complementar para substituição de 15%, 25% e 40% da energia térmica necessária, alimentados na zona de queima através de um mesmo queimador. Os resíduos utilizados apresentaram composição básica com 3% de cloro, 20% de oxigênio, 10% de hidrogênio e 60% de carbono. O poder calorífico geralmente estava próximo de 27 912 kJ/kg (6 667 kcal/kg). O coque de petróleo era composto tipicamente por 2% de oxigênio, 4% de hidrogênio e 88% de carbono (com baixos percentuais de enxofre, nitrogênio e cloro). O maior poder calorífico do coque era de aproximadamente 34 890 kJ/kg (8 333 kcal/kg).

O autor refere que a queima de combustíveis sólidos apresenta maior potencial para emissões de orgânicos ou PCI's que combustíveis de resíduos líquidos. Cita também que a entrada de outras impurezas tais como metais pesados e conteúdo de cloro podem ser melhor controladas num resíduo perigoso líquido que em combustíveis convencionais devido às exigências previstas no *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA).



As emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos monitoradas em chaminés, durante os testes de 1982 e 1984, indicaram níveis mais baixos com o uso de resíduos comparadas ao uso dos combustíveis fósseis.

Hart (1994) comenta que pode-se concluir, a partir dos resultados obtidos, que as emissões atmosféricas tóxicas são reduzidas quando resíduos perigosos líquidos são utilizados como combustíveis em substituição ao coque de petróleo ou carvão dentro das faixas testadas. Essa constatação também implica que o risco à saúde é menor quando queimando resíduos perigosos líquidos sob as condições testadas. O autor refere que em estudos em escala natural a EDR normalmente não se correlaciona com quaisquer emissões contínuas ou parâmetro de processo, exceto a taxa de fluxo do resíduo perigoso. Arrisca que isso pode ser explicado pelo aumento na taxa de reação química com o aumento da concentração.

A esse respeito cabe ressaltar que Saxena e Jotshi (1996) referem que todos os incineradores testados pela *U. S. Environmental Protection Agency* (USEPA) alcançaram os valores de EDR de 99,99% para o composto orgânico selecionado alimentado em concentração maior que 1 200 ppm na corrente de resíduo. Entretanto, para concentrações entre 1 200 e 200 ppm a EDR de 99,99% foi menos freqüentemente alcançada, enquanto para os valores abaixo de 200 ppm não foi atendido o limite estabelecido. Os autores citam que duas razões foram propostas para explicar o fenômeno. Primeiro, em razão das limitações das metodologias de amostragem em chaminé e técnicas de análises para baixos níveis de compostos orgânicos; segundo, que os compostos orgânicos utilizados para a medida da EDR poderiam ser formados como numa combustão incompleta.

Hart (1994) comenta que uma área de incerteza nos testes realizados em processos de manufatura de clínquer é que o material orgânico algumas vezes está contido nas matérias-primas alimentadas ao sistema, podendo levar a um curto circuito dessas emissões medidas na saída do forno. O autor concluiu que as emissões de orgânicos nos testes realizados foram geralmente menores quando o resíduo perigoso líquido foi queimado no forno, em comparação aos combustíveis sólidos convencionais, e que as pequenas emissões de orgânicos detectadas nos gases exauridos do forno poderiam ser devidas às matérias-primas alimentadas na extremidade fria do forno.

Lamb et al. (1994) analisaram os efeitos dos parâmetros de projeto e operação de um forno de clínquer com pré-aquecedor suspenso de quatro estágios de via seca, sem pré-calcinador e com *by-pass*, sobre as emissões de sub-produtos tóxicos de combustão. Os testes foram realizados a partir das misturas de seis PCOP's com um combustível comercial de resíduos líquidos perigosos alimentadas no maçarico principal do forno. Os compostos orgânicos selecionados para os testes foram: hexafluoreto de enxofre, tetracloreto de carbono, monoclorobenzeno (MCBz), tetracloroetileno, triclorobenzeno e tetraclorobenzeno.

Os PCOP's escolhidos para os testes foram projetados para responder aos diferentes modos possíveis de falhas, as quais podem ser temporais ou espaciais correspondendo a desvios dos 3 T's da combustão (tempo, temperatura e turbulência ou mais precisamente, mistura) de seus valores normais. Tal conceito está baseado na hipótese de que, em condições normais de combustão, o forno de clínquer, de longe excede aquelas requeridas para a completa destruição ( $DRE > 99,9999\%$ ) de qualquer composto orgânico conhecido. O autor assumiu que qualquer emissão mensurável dos compostos testados seria resultado de um desvio da condição ideal de combustão, ou seja, decorrente de uma falha do sistema.

O monoclorobenzeno (MCBz), o triclorobenzeno e o tetraclorobenzeno são compostos altamente estáveis e por causa de sua principal rota de reação ser a oxidação se mostram mais suscetíveis às falhas de mistura. O hexafluoreto de enxofre, o tetracloreto de carbono e o tetracloroetileno foram selecionados por serem sensíveis às falhas de temperatura ou de tempo de residência em razão de serem mais resistentes à oxidação.

As EDR's obtidas para cinco dos PCOP's testados a partir das emissões totais nas chaminés do forno e do *by-pass*, variaram entre  $>99,9992\%$  e  $>99,9999\%$ , exceto para o monoclorobenzeno cujas eficiências totais de destruição e remoção ficaram entre  $>99,9693\%$  e  $>99,9876\%$ . Foi verificado que as EDR's de monoclorobenzeno calculadas com base nas emissões medidas somente no *by-pass* variaram de  $>99,9991\%$  a  $>99,9997\%$  demonstrando que a combustão do composto no forno se mostrou eficiente.

Diferentemente todos os demais PCOP's testados apresentaram EDR's menores quando calculadas somente com base nas emissões do *bypass* sugerindo que o tempo de residência adicional nas altas temperaturas do pré-aquecedor resultaram num efeito pós-queimador.

Os resultados obtidos para o MCBz indicam que esse composto foi formado no pré-aquecedor contradizendo a crença existente de que o ambiente alcalino dos fornos de clínquer limpa todo o cloro disponível tornando-o indisponível para reações de cloração. Tais constatações aparentemente também contradizem a esperada emissão de cloro como HCl saindo da zona de calcinação do forno, visto que, devido à resistência de sua ligação, esta molécula não é rapidamente decomposta nas temperaturas da zona do pré-aquecedor. Os testes demonstraram que para um forno de clínquer com pré-aquecedor de ciclones com injeção de resíduo combustível líquido atomizado na extremidade "quente", EDR's maiores que 99,99% para todos os PCOP's podem ser alcançadas.

Os autores concluíram pela necessidade de mais pesquisas para estudar os processos de combustão no sistema-forno, visto que partes do pré-aquecedor atuaram como um pós-queimador, enquanto nas seções mais frias claramente ocorreu a formação de MCBz. Comentam que esses processos necessitam ser completamente entendidos de modo que possam ser evitadas as condições que propiciem a formação de níveis excessivos de hidrocarbonetos clorados nessas operações. A completa avaliação de risco de múltiplas vias mostrou que não há diferença significativa no risco quando somente carvão ou carvão suplementado com combustível líquido derivado de resíduo perigoso e pneus são queimados no forno rotativo.

Seebach e Tompkins (1991) estudaram a eficiência de destruição e remoção de compostos orgânicos num sistema forno pré-aquecedor com capacidade produtiva de 2 132 t clínquer por dia que utilizava carvão pulverizado como combustível principal. Foram utilizados o tetracloreto de carbono e triclorobenzeno como os PCOP's nas avaliações da EDR em razão da substituição energética parcial do carvão por combustíveis de resíduos líquidos. Uma série de testes envolveu a alimentação dos compostos orgânicos na zona de queima do forno como parte do combustível suplementar. Nos

testes seguintes os PCOP's foram introduzidos na entrada do forno juntamente com pneus inservíveis.

Os resultados apresentados indicaram EDR's maiores que 99,999% para o tetracloreto de carbono e maiores que 99,996% para o triclorobenzeno. Os pesquisadores comentaram que essas EDR's foram obtidas, mais precisamente, a partir dos limites de detecção dos compostos orgânicos nos gases da chaminé que como efeito dos resultados reais de PCOP's não destruídos. Relataram que na verdade os PCOP's não foram detectados nos gases amostrados.

Lee, Huffman e Mao (1996) elaboraram uma listagem para comparar os produtos químicos regulamentados pela *Clean Air Act Amendments* (CAAA) de 1990 e RCRA de 1976 dos Estados Unidos com os produtos de combustão incompleta obtidos em programa de pesquisa de incineradores e de análises de risco em processos de autorização para a operação de incinerador. Ressaltam que o CAAA foi implementado para regulamentar as emissões atmosféricas das principais fontes e que o RCRA tem por objetivo a proteção da saúde humana e o meio ambiente a partir do gerenciamento de resíduos sólidos, particularmente da incineração de resíduos.

Os autores referem que pesquisadores, em estudos conduzidos para a USEPA, têm concluído que a formação de PIC's pode resultar de qualquer uma das seguintes hipóteses:

- *PIC's são uma consequência natural da degradação térmica de resíduos tóxicos;*
- *as taxas de emissão de PIC's são cineticamente, não termodinamicamente, controladas; e*
- *desvios das condições médias normais de operação são responsáveis pela maior parte das emissões de PIC's (Lee, Huffman e Mao, 1996, p.203, tradução nossa).*

Apresentaram também uma relação dos PCI's detectados em emissões em escala real de incineradores queimando resíduos perigosos, caldeiras e fornos de clínquer relatando que a maior parte dos componentes era emitida não frequentemente e em níveis relativamente baixos. Geralmente os PCI's voláteis eram emitidos mais frequentemente e em níveis mais altos que os semi-voláteis. As taxas de emissão para vários PCI's semi-voláteis, particularmente, benzeno e tolueno eram similares às dos incineradores de

resíduos perigosos. Baseado nos dados revisados observaram que não havia correlação direta entre os PCOP's testados e os PCI's emitidos.

Observe-se que dos cinquenta e três (53) PCI's identificados dentre os quinhentos e oitenta e oito (588) compostos químicos relacionados pelos autores, quinze (15) foram detectados em emissões de fornos de clínquer. São eles: benzeno ( $C_6H_6$ ), tetracloreto de carbono ( $CCl_4$ ), clorobenzeno ( $C_6H_5Cl$ ), clorofórmio ( $CHCl_3$ ), metil etil cetona ( $CH_3COCH_2CH_3$ -MEK), cloreto de metileno ( $CH_2Cl_2$ ), nafatleno ( $C_{10}H_8$ ), fenol ( $C_6H_6O$ ), fenil (1-) etanol, ftalato, tetracloroetileno, tolueno ( $C_7H_8$ ), 1,2,4-ticlorobenzeno, 1,1,1-tricloroetano e tricloroetileno ( $C_2HCl_3$ ).

Ueno et al. (1997) relataram os resultados obtidos em experimento de queima de clorofluorcarbonos (CFC's) realizado em Chichibu (Japão) em 1995 e 1996, em consonância o Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas para eliminação de substâncias que destroem a camada de ozônio. Foi usado um forno rotativo de via seca, equipado com pré-aquecedor suspenso com capacidade produtiva de aproximadamente 5 000 t clínquer por dia utilizando carvão como combustível principal e resíduos de pneus e de óleo usado como combustível alternativo.

Os CFC's foram injetados no forno através do queimador principal. No gás da chaminé foram medidos CFC's, HCl, HF, compostos orgânicos voláteis clorados e clorobenzenos, dibenzo-p-dioxinas policloradas (PCDD's), dibenzo furanos (PCDF's) e foscênio. Os autores concluíram que os CFC's alimentados no forno foram quase que totalmente destruídos; o HCl e HF gerados pela decomposição do CFC foram predominantemente absorvidos pelas matérias-primas do clínquer. Nenhum poluente secundário tais como compostos orgânicos clorados semelhantes a dibenzo-p-dioxinas policloradas e dibenzofuranos policlorados (PCDD's-PCDF's) foi gerado pela destruição de CFC's. Relatam que após treze dias de destruição contínua dos CFC's nenhum problema significativo tinha sido observado confirmando que o método de destruição estava pronto para uso prático.

Sidhu et al. (2001) referem que as plantas produtoras de clínquer para cimento têm sido identificadas pela USEPA como as fontes principais de emissões de poluentes atmosféricos perigosos, incluindo hidrocarbonetos, ácido clorídrico e PCDD's-PCDF's. Resultados de experimentos laboratoriais

anteriores dos autores indicaram que a *farinha* crua utilizada para a produção de clínquer contém uma grande variedade de compostos orgânicos incluindo: benzeno, tolueno, naftataleno, alcanos, ácidos carboxílicos, ftalatos e seus derivados e produtos naturais semelhantes ao colesterol. Esses resultados também mostraram que a maioria dos orgânicos foram desorvidos entre temperaturas de 250°C a 500°C equivalentes aos dois primeiros estágios dos ciclones pré-aquecedores.

Nesta oportunidade os autores realizaram experimentos em laboratório a partir de amostra de *farinha* crua obtida numa planta produtora de clínquer com forno pré-aquecedor. Foram realizadas análises semi-quantitativas da *farinha* e pó do forno, assumindo-se que todos os elementos estavam presentes como óxidos. A *farinha* apresentou pequenas quantidades de cloro (0,2% em peso) e traços de enxofre. Para investigar as reações de formação de poluentes atmosféricos perigosos (PAP) provenientes dos orgânicos da matéria-prima um condensado foi coletado através da dessorção dos hidrocarbonetos da *farinha* crua. O gás de transporte utilizado foi uma mistura de 4% de oxigênio com hélio aquecido numa taxa ajustada para simular a taxa de aquecimento num forno longo de via seca (730°C em 25 minutos).

Os autores referem que os resultados iniciais foram inconsistentes, devido à existência de duas fases no condensado (água e orgânicos). Para superar os problemas associados com a água foram usadas misturas de benzeno e ácido mirístico. Dentre outras conclusões, os autores referem que os orgânicos da *farinha* crua podem reagir com espécies cloradas no pré-aquecedor do sistema-forno para formar poluentes atmosféricos perigosos semelhantes a benzenos, fenóis, metanos e etilenos. Esses resultados foram também consistentes com aqueles obtidos por Lamb et al. (1994) que usaram monoclorobenzeno como PCOP em teste para a certificação de conformidade da substituição de combustível convencional por resíduo sólido.

Araújo (2002) analisou a formação e emissão de dioxinas e furanos em processos de combustão de fornos de clínquer, especialmente aqueles co-processando resíduos industriais, utilizando dados cinéticos de formação das principais moléculas desses compostos. Concluiu que o estudo termodinâmico

da formação de dioxinas e furanos mostrou que as reações de condensação<sup>16</sup> de clorobenzenos e de clorofenóis são termodinamicamente possíveis dentro da faixa de temperatura de operação do pré-aquecedor (327°C a 927°C).

Os resultados obtidos nos cálculos realizados mostraram que há tendência de não formação por condensação nas regiões com temperaturas mais elevadas, como por exemplo na entrada do forno, onde resíduos são alimentados em meio a gases com temperaturas superiores a 1 273°C.

O autor referiu ser importante manter boas condições de combustão no forno para reduzir as possibilidades de formação de PCI's contribuindo para a minimização de ocorrência de fuligem, portadora de macro moléculas de carbono, impedindo que haja condições para ocorrência do fenômeno de condensação. Afirma também que, para minimizar as possibilidades de formação de dioxinas e furanos, a ausência de cloro no combustível, no resíduo e nas matérias-primas utilizados na produção do clínquer é condição suficiente.

Considera também que a alimentação de resíduos na zona de queima do forno rotativo parece ser opção melhor que a caixa de fumaça, visto que os compostos estarão sujeitos a temperaturas mais elevadas e maiores tempos de residência para destruição de possíveis precursores.

Os efeitos potenciais de PCDD's, PCDF's e PCB's são considerados sérios o suficiente para justificar medidas de redução das fontes para salvaguardar a saúde humana e ambiental, segundo comentário de Alcock, Gemmill e Jones (1999) em estudo desenvolvido para avaliar os dados atualizados dessas emissões divulgados pela Agência Ambiental do Reino Unido. As emissões de fornos de clínquer variaram de 0,012 ng a 0,423 ng I-TEQm<sup>-3</sup> colocando estas instalações juntamente com incineradores de lodo de esgoto e plantas de sinterização entre as unidades industriais de menor emissão.

Lohman e Seigneur (2001) investigaram frações relativas de emissões de dibenzo-p-dioxinas e dibenzo-furanos (PCDD/F) depositadas

---

<sup>16</sup> Condensação de precursores é o nome dado às reações nas quais duas moléculas de anéis aromáticos se unem formando um composto poli-aromático de dioxinas e furanos, ou mesmo uma bifenila que, posteriormente, pode criar uma nova ligação interna com oxigênio e tornar-se um furano ou uma dioxina no caso de duas ligações. Essas moléculas podem ser os fenóis ou benzenos clorados.

localmente (raio de 100 km da fonte) e transportadas em escala regional/global (além de 100 km da fonte), usando modelos de simulação. Consideraram oito diferentes categorias de fontes, incluindo plantas produtoras de cimento e seis diferentes localizações. As categorias de fontes diferiram em termos de altura de chaminé, ascensão da pluma, perfil de congêneres de PCDD/F e distribuição de tamanho de partículas. As localizações diferiram em termos do terreno, meteorologia e ambiente urbano e rural.

Concluíram que para todas as fontes, com exceção de incinerador de resíduos de saúde, mais de 70% das emissões de PCDD/F eram transportadas para além de 100 km da fonte. Fontes com altas chaminés e/ou elevada altura de pluma tinham uma fração maior das emissões transportadas além dos 100 km, como as fábricas de cimento, com 94% a 97%.



## REFERÊNCIAS

ALCOCK, R.E.; GEMMILL, R.; JONES, K.C. (1999). Improvements to the UK PCDD/F and PCB atmospheric emission inventory following an emissions measurement programme. *Chemosphere*, Oxford, v.38, n.4, p.759-770, Feb.

ARAÚJO, S. (2002). *Estudo da formação e destruição de dioxinas e furanos em fornos rotativos de produção de clínquer utilizados no co-processamento de resíduos*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR 10004: Resíduos sólidos - classificação*. Rio de Janeiro.

BARROS, A.M.; TENÓRIO, J.A.S.; ESPINOSA, D.C.R. (2002). Chloride influence on the incorporation of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and NiO in clinker: a laboratory evaluation. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v.93, n.2, p.221-232, July.

BRASIL (1999). Resolução CONAMA n.264, de 26 de agosto de 1999. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 20 mar. 2000. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (2002). Resolução CONAMA n.316, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre os procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 20 nov. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (2003). *Procedimento para utilização de resíduos em fornos de clínquer – norma P4.263* São Paulo.

DELLINGER, H.B.; PERSHING, D.W.; SAROFIM, A.F. (1993). *Evaluation of the origin, emissions and control of organic and metal compounds from cement kilns co-fired with hazardous wastes*. Washington: Scientific Advisory Board on Cement Kiln Recycling - SAB.

ELECTRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS (2003). In: Title 40: Protection of Environment. Part 266. Subpart H-Hazardous waste burned in boilers and industrial furnaces - BIF. Disponível em <<http://www.gpoaccess.gov/ecfr/>>. Acesso em: 09 Dec.

THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION (1999). *Best available techniques for the cement industry*. Disponível em:<<http://www.cembureau.be/Documents/Publications>>. Acesso em: 8 June 2004.

GABBARD, W.D.; GROSSMAN, D. (1990). Hazardous waste fuels and the cement kiln - the incineration alternative. *ASTM Standardization News*, Philadelphia, v.18, n.9, p.38-41, Sept.

GUO, Q.; ECKERT JR., J.O. (1996). Heavy metals outputs from a cement kiln co-fired with hazardous waste fuels. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v.51, n.1/3, p.47-65, Nov.

HART, J.R. (1994). Comparison of emissions from burning hazardous waste in a dry-process cement kiln with emissions from burning conventional fossil fuel. *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, v.11, n.1, p.193-199.

KIHARA, Y. (1999). Co-processamento de resíduos em fornos de cimento: tendências. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1999, São Paulo. *Anais...* São Paulo: IBRACON.

\_\_\_\_\_. (1999a). Impacto da normalização do co-processamento de resíduos em fornos de clínquer. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 5., 1999, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP. 1 CD-ROM

LAMB, C.W. et al. (1994). Detailed determination of organic emissions from preheater cement kiln co-fired with liquid hazardous wastes. *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, v.11, n.1, p.201-216.

LEE, C.C.; HUFFMAN, G.L.; MAO, Y.L. (1996). A comparison of regulated chemicals versus emitted PICs and PICs for risk analysis. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v.50, n.2/3, p.199-225, Oct.

LOHMAN, K.; SEIGNEUR, C. (2001). Atmospheric fate and transport of dioxins: local impacts. *Chemosphere*, Oxford, v.42, n.2, p.161-171, Oct.

MANTUS, E.K. (1992). *All Fired up: burning hazardous waste in cement kilns*. Seattle: Environmental Toxicology International.

MARCIANO JR., E.; KIHARA, Y.; ESPER, M.W. (1996). A questão ambiental no setor cimenteiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4., 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP.

MARINGOLO, V. (2001). *Clínquer co-processado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento*. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001.

MIURA, K. et al. (2001). Thermodynamic consideration on the kiln dust generated from eco-cement production. *Materials Transactions, Japan*, v.42, n.12, p.2523-2530.

OPPELT, E.T. (1986). Hazardous waste destruction. *Environmental Science Technology*, Easton, v.20, n.4, p.312-318.

OTTOBONI, A.P. et al. (1998). Efficiency of destruction of waste used in the co-incineration in the rotaty kilns. *Energy Conversion and Management*, Amsterdam, v.39, n.16/18, p.1899-1909, Nov.

PACYNA, E.G.; PACYNA, J.M.; PIRRONE, N. (2001). European emissions of atmosphere mercury from anthropogenic sources in 1995. *Atmospheric Environment*, Oxford, v.35, n.17, p.2987-2996, June.

RACT, P.G.; ESPINOSA, D.C.R.; TENÓRIO, J.A.S. (2003). Determination of Cu and Ni incorporations ratios in portland cement clinker. *Waste Management*, Amsterdam, v.23, n.3, p.281-285.

SÃO PAULO (Estado) (1976). Decreto n.8.468, de 8 de setembro de 1976. Aprovou o regulamento da lei n.997, de 31 de maio de 1976. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo. Disponível em:<[http://www.ambiente.sp.gov.br/leis\\_internet/76\\_8468.doc](http://www.ambiente.sp.gov.br/leis_internet/76_8468.doc)>. Acesso em: 17 nov. 2003.

SAXENA, S.C.; JOTSHI, C.K. (1996). Management and combustion of hazardous wastes. *Progress in Energy and Combustion Science*, Oxford, v.22, n.5, p.401-423.

SEEBACH, M.V.; TOMPKINS, J.B. (1991). Metal emissions are predictable. *Rock Products*, Chicago, v.94, p.31-35, Apr.

SEEBACH, V. H. M.; TSENG, H. (1993). The suitability of cements manufactured with hazardous waste derived fuels and with fossil fuels for drinking water applications. In: *INTERNATIONAL CONGRESS OF ASSOCIATION OF GERMAN CEMENT WORKS*, 4., 1993, Düsseldorf. *Proceedings...* [S.l.:s.n.]. p.101-111.

SENIOR, C.; SAROFIM, A.; EDDINGS, E. (2003). Behavior and measurement of mercury in cement kilns. In: *IEEE-IAS/PCA CEMENT INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE*, 45., 2003, Dallas. *Proceedings...* New York: IEEE. p.233-248.

SIDHU, S. et al. (2001). Hazardous air pollutants formation from reactions of raw meal organics in cement kilns. *Chemosphere*, Oxford, v.42, n.5/7, p.499-506, Feb.

SPRUNG, S. (1979). *Effect of the burning process on the formation and properties of the clinker*. Düsseldorf: [s.l.]. p.17.

\_\_\_\_\_. (1985). *Technological problems in pyroprocessing cement clinker: cause and solution*. Translation by T.V. Brodek. Düsseldorf: Benton-Verlag GmbH. p.132.

\_\_\_\_\_. (1988). Trace elements - concentration build-up and measures for reduction. *Zement kalk gips*, Düsseldorf, p.172-176, July. (Translation ZKG n. 5/88, p. 251-257).

\_\_\_\_\_. (1993). Effect of energy consumption and environmental control measures on clinker properties. In: *BRAZILIAN CONGRESS ON PORTLAND CEMENT*, 3., 1993, São Paulo. *Proceedings...* [S.l.:s.n.]. p.1-42.

SPRUNG, S.; KIRCHNER, G.; RECHENBERG, W. (1984). Reactions of poorly volatile trace elements in cement clinker burning. *Zement kalk gips*, Düsseldorf, p.279-283, Dec. (Translation ZKG n. 10/84, p. 513-518).

SPRUNG, S.; RECHENBERG, W. (1983). Reactions of lead and zinc in cement manufacture. *Zement kalk gips*, Düsseldorf, p.292-296, Dec. (Translation ZKG n. 10/83, p. 539-548).

UENO, H. et al. (1997). Destruction of chlorofluorocarbons in a cement kiln. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Pittsburg, v.47, p.1220-1223, Nov.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (1995). *Technical guidelines on incineration on land*. Disponível em:<<http://www.basel.int>>. Acesso em: 23 Oct. 2003.

\_\_\_\_\_. (2001). *Climate change 2001: the scientific basis - the carbon cycle and atmospheric carbon dioxide*. Disponível em:<<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 2 Aug. 2004.

\_\_\_\_\_. (2002). *Report of the task force on destruction technologies*. Disponível em:<<http://www.teap.org>>. Acesso em: 12 Oct. 2003.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1994). *Emission factor documentation for AP-42*, section 11.6, portland cement manufacturing. Final report. Disponível em:<<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/final/c11s07.pdf>>. Acesso em: 4 Apr. 2004.

\_\_\_\_\_. (1997). *Mercury study report to congress: an inventory of anthropogenic mercury emissions in the United States*. v.2. Disponível em:<<http://www.epa.gov/ttn/oarpg/t3/reports/volume2.pdf>>. Acesso em: 6 Apr. 2004.

WITTMANN, T. J.; KOESTER, F. W. (1988). The co-processing of wastes in the cement manufacturing plant. In: *IEEE CEMENT INDUSTRY CONFERENCE*, 1988, Quebec. *Proceedings...* New York: IEEE. p.479-510.

## CAPÍTULO 6 – EXPERIMENTAL

### 6.1 - Introdução

Este trabalho fundamenta-se na investigação da atividade de co-processamento de resíduos líquidos industriais combustíveis em fornos de produção de clínquer da Companhia de Cimento Ribeirão Grande (CCRG), localizada na zona rural do município de Ribeirão Grande – SP. A mistura de resíduos é preparada na Unidade Central de Armazenamento e Homogeneização (UCAH), instalada no município de Sorocaba, para substituição parcial dos combustíveis fósseis usados nos fornos industriais.

Para atingir os objetivos propostos foram implementadas as etapas discriminadas a seguir, visando a coleta de informações e a recuperação de dados relativas ao desenvolvimento dessa atividade no período de 1995 a 2002:

- entrevistas com técnicos envolvidos nas atividades de preparação e co-processamento da mistura de resíduos para obtenção de informações técnicas referentes aos processos produtivos das unidades mencionadas;
- visitas de campo nas plantas industriais envolvidas nas etapas de preparação da mistura de resíduos e de sua queima nos fornos rotativos;
- coleta de dados operacionais e detalhamento de informações referentes aos procedimentos estabelecidos para o recebimento de resíduos, classificação, preparação, armazenamento na UCAH e transferência da mistura para a CCRG;
- coleta de dados operacionais e detalhamento de informações referentes aos procedimentos de recebimento, alimentação e controles da queima da mistura de resíduos nos fornos rotativos de clínquer;

- recuperação de resultados obtidos em campanhas de amostragens em chaminés, durante a realização de testes com e sem a utilização de resíduos como combustível suplementar, nos fornos de clínquer da CCRG;
- recuperação de resultados das análises laboratoriais realizadas para a caracterização de matérias-primas, combustíveis convencionais e resíduos alimentados nos fornos rotativos e dos clínqueres, pós retidos nos equipamentos de controle de poluição atmosférica (ECP's) e das emissões remanescentes geradas durante o desenvolvimento da atividade de co-processamento;
- tabulação, análises e interpretação dos dados coletados e demais informações obtidas.

Simultaneamente foi desenvolvido amplo trabalho de pesquisa bibliográfica, através dos bancos de dados das universidades USP, UNICAMP e UNESP, junto a bibliotecas técnicas, em documentação existente na Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), consultas a livros, artigos de periódicos, dissertações e teses, bem como pesquisa via Internet, principalmente, junto às Agências Ambientais norte-americana e européia e associações reconhecidamente técnicas ligadas ao setor cimenteiro.

Neste capítulo são caracterizadas as unidades industriais responsáveis pelo projeto de co-processamento mencionado, bem como discriminadas as etapas referentes às medições dos poluentes de interesse, contemplando as metodologias de coleta, preparação e análises das amostras coletadas de todos os fluxos de massas envolvidos.

É conveniente destacar, em razão da complexidade dos métodos de coleta e análises e, conseqüentemente, dos altos custos financeiros envolvidos para a realização das amostragens necessárias à perfeita caracterização das correntes mássicas, que este trabalho baseia-se em dados gerados pelos empreendimentos industriais interessados na implementação da atividade de co-processamento de resíduos. Foram disponibilizados para a pesquisa os resultados por eles obtidos nas campanhas de amostragens realizadas em cumprimento às rígidas e extensas exigências dos órgãos ambientais visando à obtenção das autorizações para a utilização da mistura de resíduos

homogeneizada em substituição parcial aos combustíveis fósseis usados nos processos de manufatura de clínquer *portland* para cimento.

Tal condição, como será evidenciada, restringe o campo de análise requerido sob a ótica do trabalho acadêmico em razão dos fatores mencionados.

## **6.2 - Unidade Central de Armazenamento e Homogeneização (UCAH)**

### **6.2.1 - Preparação da mistura de resíduos (*blend*)**

O projeto de co-processamento iniciado em 1995 pela Companhia de Cimento Ribeirão Grande foi concebido a partir da premissa de que haveria o recebimento da mistura de resíduos já previamente preparada e homogeneizada para injeção no forno rotativo através do queimador principal (CETESB, 1995a).

A unidade de condicionamento e homogeneização da mistura foi implantada em terreno de 53 755 m<sup>2</sup> localizado em bairro industrial do município de Sorocaba, às margens da Rodovia Senador José Ermírio de Moraes, no Distrito de Cajuru do Sul, selecionado pela facilidade de acesso e visando a minimização do tráfego de veículos transportando resíduos em vias urbanas. Contava inicialmente com 6 000 m<sup>2</sup> de áreas construídas destinadas aos galpões de armazenamento de tambores, processo produtivo, laboratório e instalações administrativas e 1 000 m<sup>2</sup> de áreas de atividades ao ar livre (parque de tanques para o armazenamento de resíduos e da mistura homogeneizada).

A concepção da UCAH fundamenta-se na reciclagem de resíduos ou produtos fora de especificação prevendo o preparo do *blend* para utilização como insumo energético ou substituto de matérias-primas, em processos produtivos que demandam significativos consumos térmicos, garantindo o abastecimento regular e homogêneo de fornos industriais para assegurar a sua adequada destruição (CETESB, 1995c).



### 6.2.2 - Seleção dos resíduos

A seleção de resíduos recebidos na UCAH para a preparação do *blend* inicia-se com a etapa de pré-qualificação na qual são coletadas amostras das correntes geradoras identificadas no processo industrial do cliente (gerador). Visa a realização das análises laboratoriais e verificação da processabilidade em face de características físicas, como alta dureza ou resistência à desagregação, que permitirão concluir sobre a adequação ou não de sua utilização para co-processamento em fornos rotativos de produção de clínquer. Essa adequação é definida com base no conceito de elegibilidade de resíduos destinados à preparação do combustível suplementar.

Esse conceito vincula-se a fatores de natureza legal, de riscos à saúde pública e ao meio ambiente, à adequação para uso no processo produtivo e à garantia da qualidade do produto final.

Para enquadramento no critério de elegibilidade o resíduo deve ser compatível para mistura com outros passíveis de aproveitamento na preparação do *blend*. Não pode ser reativo e/ou explosivo, não ser ou conter componentes reconhecidamente cancerígenos ao ser humano, não se constituir em resíduo de serviços de saúde, não conter agentes infecciosos, não ser oriundo de indústria processadora de elementos radioativos e apresentar significativo conteúdo energético.

Complementarmente devem ser também considerados os teores de halogêneos existentes no resíduo, traduzindo-se em fatores determinantes para a elegibilidade, em razão das limitações inerentes a cada sistema-forno que utilize a mistura combustível.

Na etapa de pré-qualificação cada resíduo recebe um código de identificação que o acompanhará por todas as etapas do processo produtivo assegurando o resgate, a qualquer tempo, de quaisquer informações de interesse acerca da amostra coletada, caracterizando um sistema de rastreabilidade da história pregressa de todos os resíduos analisados/utilizados.

### 6.2.3 - Principais características do *blend*

A UCAH tem por princípio fundamental que a adequada destruição térmica dos componentes do *blend* é função da qualidade da preparação dos resíduos de forma a assegurar as condições de homogeneidade e regularidade nos fluxos de abastecimento dos fornos industriais.

Um resíduo condicionado típico é normalmente obtido pela mistura de correntes de líquidos diversos constituídos por solventes usados, tintas (restos ou fora de especificação), resíduos da indústria química, óleos usados não passíveis de recuperação e outros líquidos inflamáveis. São também contemplados alguns resíduos sólidos como resinas, borras de tintas, lodos de sistemas de tratamento de águas contaminadas com óleos e/ou tintas e resinas e borras de fundo de tanques.

Não são passíveis de recebimento na UCAH, para a preparação da mistura combustível, quaisquer materiais, resíduos ou produtos fora de especificação que apresentem, segundo as normas técnicas pertinentes, características tóxicas, agudamente tóxicas, cancerígenas e/ou radioativas. Tais características são passíveis de provocar danos irreparáveis ao meio ambiente, à saúde e à segurança pública.

Através do procedimento de licenciamento ambiental o órgão estadual de controle de poluição estabeleceu condicionantes para autorizar a utilização de mistura de resíduos destacando-se a fixação do limite mínimo do poder calorífico inferior (pci) de 5 000 BTU/lb (11 620 kJ/kg ou 2 775 Kcal/kg), cujo embasamento foi discutido no Capítulo 3. Foi também limitada a utilização de materiais contaminados com, ou considerados como, bifenilas policloradas (PCB's), assim como aqueles reconhecidos como precursores ou formadores de dioxinas e furanos.

### 6.2.4 - Etapas de preparação

Os resíduos são gerenciados conforme a natureza e acondicionamento de acordo com duas categorias de recebimento na UCAH: a granel e entamborados.

**Tabela 6.1** - Características físicas (médias) do *blend* de resíduos

Parâmetro		Valor	Unidade
Poder calorífico inferior	Mínimo	20,93	MJ/kg
	Médio	35,59	
	Máximo	41,87	
Viscosidade cinemática máxima		300	CSt
Teor de sólidos em suspensão		<25	%
Dimensão máxima das partículas sólidas	não deformáveis	3	mm
	deformáveis	8	mm
Ponto de fulgor		<80	°C
Teor de água		35	%
pH		2,5 a 11,0	

Fonte: CETESB (1995c) e GRECO (2000), adaptada pelo autor

Aqueles recebidos a granel são bombeados para os tanques aéreos de armazenamento definidos, previamente, em função da caracterização qualitativa obtida na etapa de pré-qualificação e nas análises de composição e de compatibilidade efetuadas antes da operação de descarga. Esses materiais são condicionados nas etapas subseqüentes mediante mistura formulada e controlada para obtenção das características requeridas do *blend* a ser utilizado nos fornos industriais. Os sistemas de transferência, os tanques utilizados para a recepção dos resíduos e para o armazenamento das misturas prontas para envio à unidade cimenteira dispõem de dispositivos de segurança contra riscos potenciais de contaminação do solo e das águas superficiais ou subterrâneas decorrentes de episódios de vazamentos ou derramamentos acidentais.

Os resíduos recebidos em tambores são descarregados e conduzidos ao local de estocagem intermediária, segregados segundo o estado físico e demais características identificadas na fase de pré-qualificação e arranjados de forma a facilitar sua localização para encaminhamento às etapas de produção do *blend*. O processamento se inicia com a elevação dos tambores às plataformas de descarregamento onde os conteúdos líquidos são

vertidos em moega para alimentação do sistema de mistura e os sólidos descarregados numa outra moega para trituração inicial, visando a adequação granulométrica, para posterior mistura com os constituintes de fase líquida.

As misturas prontas são armazenadas nos tanques aéreos dotados de misturadores mecânicos para manutenção e garantia da homogeneidade das fases constituintes. Cada lote preparado é transferido seqüencialmente para os tanques do sistema de armazenamento da unidade cimenteira, através de caminhões-tanque, afim de assegurar, quando da injeção nos maçaricos dos fornos rotativos, a manutenção das características físico-químicas formuladas.

#### **6.2.5 - Controle de qualidade**

O sistema implantado na UCAH estabelece, dentre outros itens, que todos os materiais destinados à preparação do *blend* sejam submetidos às mesmas etapas previstas no procedimento de controle de qualidade. São realizadas análises físico-químicas, controle de origem e análises das correntes geradoras dos resíduos no processo industrial e rastreadas as informações de interesse. São efetuadas coletas de amostras dos resíduos nas fases de pré-qualificação, assim como para o controle de entrada na UCAH e durante o processo de condicionamento e homogeneização. A mistura pronta é caracterizada quando transferida aos tanques de armazenamento e previamente ao envio à unidade cimenteira.

A planta dispõe de laboratório cujos objetivos principais são controlar o recebimento dos resíduos quanto à sua elegibilidade, não permitindo a entrada daqueles contendo, por exemplo, PCB's e elevados teores de cloretos, bem como controlar a qualidade da mistura expedida para os consumidores finais.

Na recepção de resíduos acondicionados em tambores é investigada visualmente a presença de materiais ou detritos que possam impedir a processabilidade. São também analisados, quanto à presença de PCB's, os recipientes de conteúdo oleoso, através de amostragem composta. São também submetidos a análises amostrais para certificação da coerência dos lotes recebidos com as características obtidas na etapa de pré-qualificação.

Resíduos que apresentem desconformidades com os critérios de elegibilidade estabelecidos para uso no co-processamento em fornos de clínquer são devolvidos ao gerador para definição de outra alternativa de destinação sanitária e ambientalmente adequada.

Durante as etapas de armazenamento e transferência das misturas homogêneas e prontas para envio ao destino final são procedidas análises de controle para determinação dos parâmetros: poder calorífico, porcentagem de íons cloreto, percentual de umidade, pH, peso específico, metais pesados, PCB's e ponto de fulgor, necessárias à caracterização do *blend* e visando a otimização do processo de combustão no forno industrial.

Na Figura 6.1 é apresentado o roteiro básico de análises laboratoriais efetuadas nas várias etapas envolvidas desde a seleção dos resíduos adequados à preparação da mistura até a sua expedição para a unidade de consumo.

<b>Etapas Parâmetros</b>	<b>PREQUAL</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>PROCESSO</b>	<b>SAÍDA</b>
Poder Calorífico Inferior				
% Cloro				
Metais <sup>(1)</sup>				
% H <sub>2</sub> O				
Densidade				
Compatibilidade				
Ponto de fulgor				
Bifenilas policloradas				
CG – Cromatografia gasosa				
Cinzas				
pH				
Sólidos em suspensão				

Nota: 1) antimônio, arsênio, bário, berílio, cádmio, cromo, chumbo, mercúrio, prata, tálio

	Obrigatórias
	Depende do gerador
	Somente em resíduos de aparência oleosa
	Não são realizadas

**Figura 6.1** - Roteiro básico estabelecido para as análises de controle das etapas de processamento de resíduos na UCAH

Fonte: CETESB (1995c), adaptada pelo autor

Na chegada da carga nas instalações da cimenteira novas análises são efetuadas de forma a garantir a qualidade da mistura a ser utilizada na substituição do combustível fóssil para a manufatura do clínquer. Adicionalmente e como parte integrante do sistema de controle de qualidade são realizados, por laboratório próprio e externo, testes confirmatórios periódicos em amostras compostas de *blend* para a avaliação dos parâmetros pci, Cl, pH, H<sub>2</sub>O, densidade, sólidos, cinzas e cromatografia gasosa para análise dos três principais componentes: xileno, metil etil cetona e tolueno.

### **6.3 - Unidade de manufatura de clínquer e cimento**

#### **6.3.1 - Caracterização da planta industrial**

O parque industrial da Companhia de Cimento Ribeirão Grande (CCRG), (Figura 6.2), está localizado na região sudeste do Estado de São Paulo, a aproximadamente 260 km da capital paulista, no município de Ribeirão Grande, no final da Rodovia João Pereira dos Santos Filho, SP-181, Região de Governo de Itapeva. Ocupa uma área de 404.000 m<sup>2</sup>, dispendo de 38.000 m<sup>2</sup> de áreas construídas destinadas às instalações de processamento das matérias-primas, armazenamento de produtos acabados, laboratório, instalações administrativas e 21.375 m<sup>2</sup> de áreas de atividades ao ar livre (pátios de armazenamento de matérias-primas, parque de tanques entre outros setores).

Trata-se de unidade integrada que dispõe de dois fornos rotativos (n<sup>os</sup> 1 e 2) que começaram a ser instalados em 1975, obtendo as licenças ambientais da CETESB em 1978 e 1979, cujas linhas produtivas são parcialmente mostradas nas Figuras 6.3 e 6.4.

Os dois fornos são iguais, cada um com capacidade produtiva diária de 1.400 t clínquer, equipados com resfriador tipo planetário, apresentando consumo térmico específico de aproximadamente 910 kcal/kg de clínquer produzido.



**Figura 6.2** – Vista geral do parque industrial da CCRG  
Fonte: BARBOSA e SANTOS(1999), modificada pelo autor



**Figura 6.3** – Vista parcial das instalações industriais da CCRG, observando-se o forno nº 2 à esquerda e o forno nº 1 à direita. No primeiro plano, à direita, observa-se parte do pré-aquecedor do forno nº 1 e ao fundo, à esquerda, o galpão de clínquer tendo ao lado as instalações de moagem e armazenamento de cimento

Fonte: Foto cedida pela Companhia de Cimento Ribeirão Grande - CCRG



**Figura 6.4** – Vista lateral do forno nº 1 da CCRG, observando-se ao fundo os pré-aquecedores, tipo intercambiadores, integrantes das duas linhas produtivas e atrás os silos de concreto para armazenamento de *farinha*  
Fonte: Foto cedida pela Companhia de Cimento Ribeirão Grande - CCRG

Ambos sistemas-fornos são equipados com unidades independentes de moagem de cru, torres de pré-aquecimento da *farinha*, tipo intercambiadores, torres de resfriamento dos gases e equipamentos para controle das emissões de material particulado constituídos por precipitadores eletrostáticos. Na Tabela 6.2 são apresentadas algumas das principais características dos fornos rotativos da CCRG e na Figura 6.5 uma representação esquemática dos sistemas-fornos.

Originalmente esses fornos consumiam óleo BPF como combustível principal nos queimadores sendo substituído, durante a década de 80, por carvão mineral e, posteriormente, por óleos ultra-viscosos 7A e 9A (BARBOSA e SANTOS, 1999). Estes últimos foram utilizados até o final da década de 90 e atualmente a unidade utiliza, principalmente, o coque de petróleo importado como combustível principal, o qual apresenta as características básicas exibidas na Tabela 6.3.



**Tabela 6.2** - Características principais dos fornos rotativos da CCRG

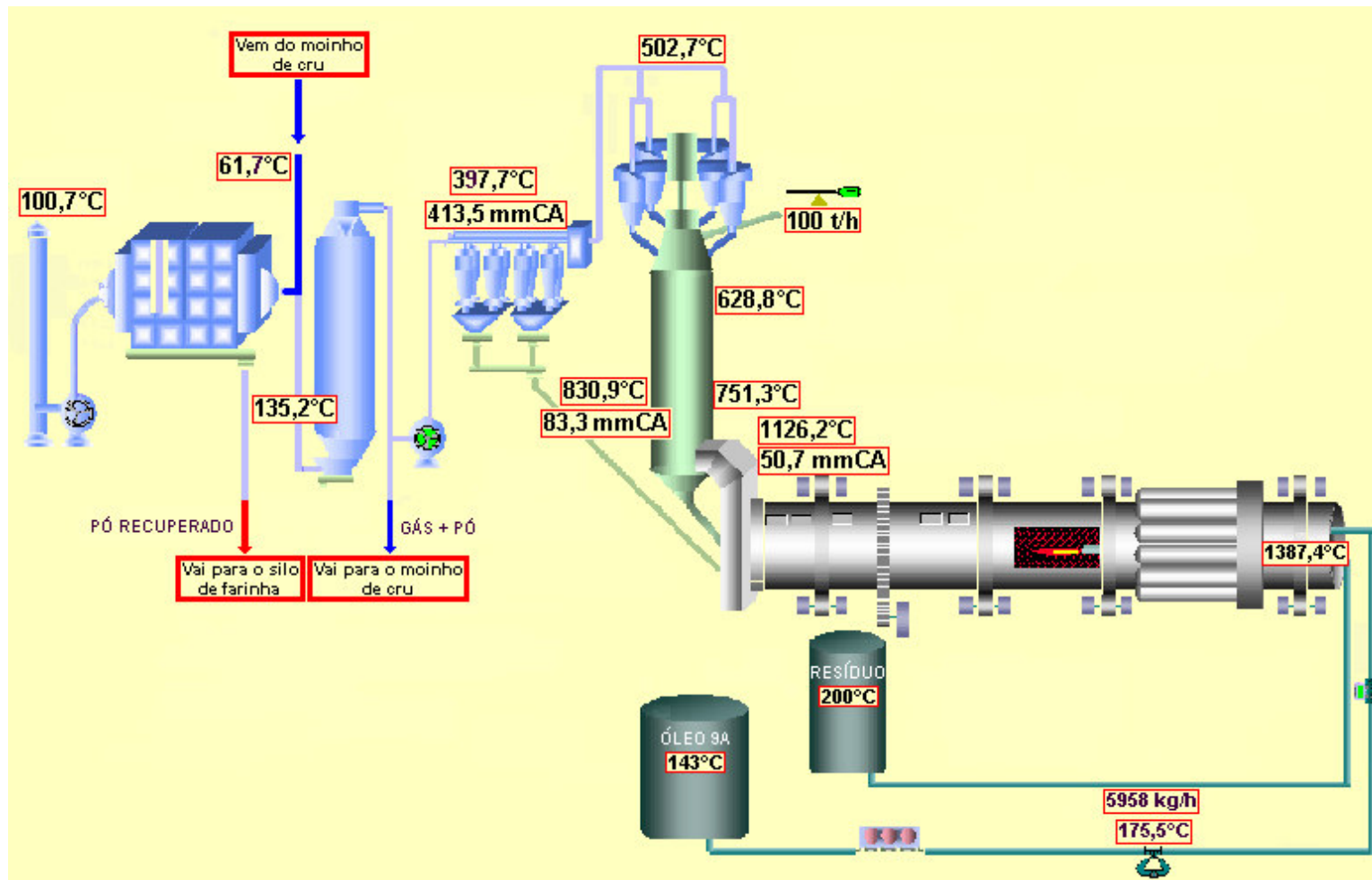
Parâmetros		Valores
Fabricante		Prerov
Forno	Diâmetro	4,3 metros
	Comprimento	72 metros
	Produção	1.400 t clínquer/dia
	Inclinação	2°
	Rotação	2,2 rpm
Chaminé	Diâmetro	3,15 metros
	Altura	40 metros
Energia térmica consumida		41.000 Gcal/forno/mês
Farinha consumida		72.500 toneladas/forno/mês

Fonte: CCRG (2000), adaptada pelo autor

**Tabela 6.3** – Caracterização do coque de petróleo utilizado pela indústria cimenteira brasileira

Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
Umidade	5,5	%	Níquel	30 a 420	ppm
Carbono fixo	80 a 100	%	Cobalto	0,1 a 3	ppm
Cinzas	1 a 4	%	Selênio	0,1 a 10	ppm
Enxofre total	0,5 a 7,0	%	Telúrio	0,1 a 28	ppm
Dureza	30 a 80	HGI	Cromo	1 a 23	ppm
Matéria volátil	9 a 15	%	Cobre	1 a 5	ppm
Hidrogênio	3,5	%	Manganês	1 a 150	ppm
Nitrogênio	1,5	%	Chumbo	1 a 10	ppm
pci	7750 a 8700	kcal/kg	Antimônio	0,1 a 10	ppm
Cádmio	1,0	ppm	Estanho	1 a 30	ppm
Mercúrio	0,1 a 10	ppm	Vanádio	130 a 2300	ppm
Tálio	1 a 80	ppm	Berílio	1 a 7	ppm
Arsênio	0,1 a 10	ppm	Zinco	1 a 85	ppm
			Estrôncio	2 a 18	ppm

Fonte: ABCP (2002), adaptada pelo autor



**Figura 6.5** – Perfil esquemático dos sistemas-fornos de produção de clínquer da CCRG

Fonte: BARBOSA e SANTOS (1999), modificada pelo autor

Para início das operações de co-processamento os fornos da CCRG foram equipados com novas lanças e bicos (Figura 6.6) constituídos por três tubos concêntricos de aço carbono formando três canais para o escoamento dos fluídos usados nos queimadores. O *blend* era injetado na parte central do queimador, de forma a proporcionar a nebulização e queima concêntricas e simultâneas com o óleo pesado, garantindo flexibilidade de operação e manutenção do formato adequado da chama. No anel intermediário era injetado vapor com pressão de 1,5 kgf/cm<sup>2</sup> e no anel externo o óleo tipo 9A com temperatura de 170°C (BARBOSA e SANTOS, 1999; GRECO, 2000).

Posteriormente as lanças e bicos foram readequados para utilização do coque de petróleo. A nova configuração do queimador manteve o escoamento do *blend* através do tubo interno. A injeção de vapor é realizada através do espaço anular formado pelo tubo interno e pelo tubo intermediário destinado à alimentação do óleo combustível utilizado durante a partida do forno e pelo tubo externo escoam o coque de petróleo.

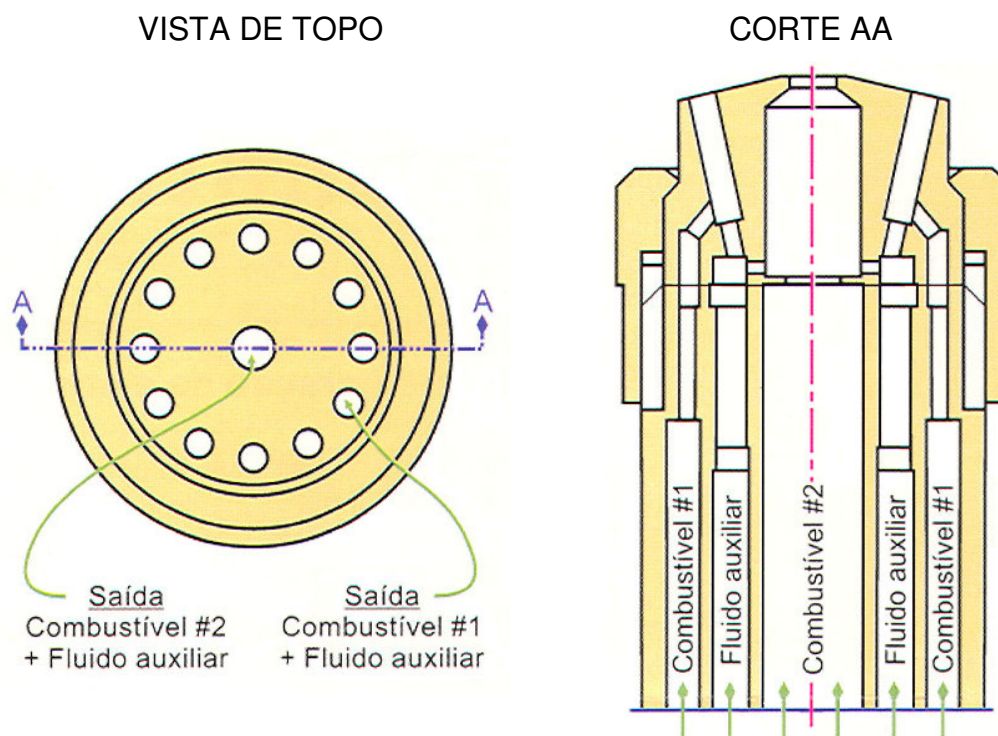
O calcário, componente básico necessário à fabricação do clínquer, é extraído de jazida situada a 2,5 km da planta, dispondo de reservas lavráveis estimadas em 58,5 milhões de toneladas, a qual é suficiente para abastecer a fábrica por aproximadamente 40 anos, com produção média de 120.000 t calcário/ano (CCRG, 2003). As demais matérias-primas utilizadas na produção do clínquer são extraídas em jazidas próprias ou adquiridas de terceiros.

O clínquer produzido nos fornos rotativos é lançado com temperatura de aproximadamente 250°C no britador instalado abaixo da saída do resfriador planetário, de onde é transferido por arrastadoras metálicas ao galpão de armazenamento com capacidade para 25.000 t. O descarregamento do material no galpão é provido de sistema de despoeiramento constituído por baterias de filtros de mangas.

A fábrica dispõe de 2 moinhos de rolos verticais para pré-moagem da mistura de clínquer, escória de alto forno, gesso e calcário que operam em série com 2 moinhos rotativos de bolas para produção do cimento.

Essas linhas de moagem têm capacidades produtivas que variam de 60 a 100 t/hora dependendo do tipo de cimento fabricado. O produto final é armazenado em 04 silos com capacidade para 8.500 t cada um, de onde é extraído para alimentação das ensacadeiras ou para expedição a granel. Todos

esses setores e mais os sistemas de transportes e transferências de materiais pulverulentos são providos de equipamentos de controle para as emissões de material particulado constituídos por baterias de filtros de mangas.



**Figura 6.6** – Concepção da lança e do bico para nebulização de óleo pesado e *blend* nos fornos da CCRG

Fonte: GRECO (2000), adaptada pelo autor

### 6.3.2 - A unidade como co-processadora de resíduos

Em outubro de 1993 a CCRG vislumbrou a possibilidade de utilização de resíduos como substitutos energéticos no processo de produção de clínquer. No começo de 1994 iniciou os contatos com empreendimentos voltados ao gerenciamento de resíduos celebrando contrato, em janeiro de 1995, com a UCAH de Sorocaba para o fornecimento de *blend* com as características referidas (BARBOSA e SANTOS, 1999).

O projeto foi elaborado prevendo o início da atividade de co-processamento da mistura de resíduos no forno de clínquer nº 1, alimentado

via maçarico principal, com taxa de substituição de até 15% da energia térmica necessária ao processo de manufatura, fornecida pelo óleo combustível 9A.

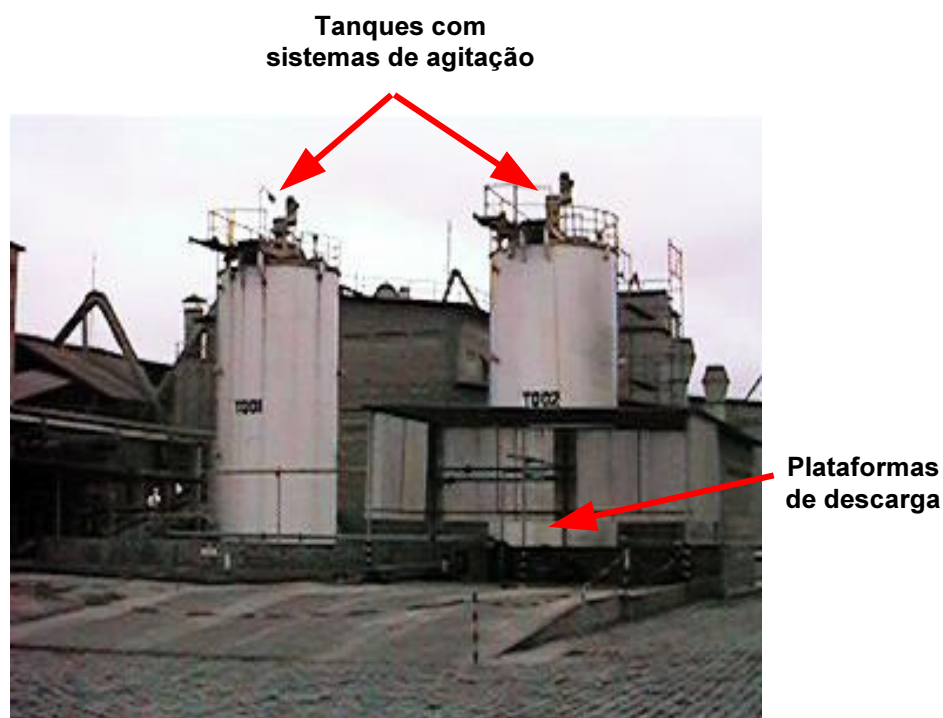
A implementação do projeto exigiu adequações das instalações industriais destacando-se a reestruturação da torre de condicionamento dos gases, revisão do precipitador eletrostático, desenvolvimento e adequação do maçarico para utilização dos dois combustíveis, implantação da unidade de recepção, armazenamento e injeção de *blend* e do sistema de monitoramento contínuo de gases na chaminé do forno rotativo.

Na primeira etapa de utilização da mistura de resíduos com taxa de substituição de 15% resultou a injeção média de 1,1 t/h de *blend* em substituição a 0,8 t horárias de óleo combustível. A segunda etapa visou a alteração da taxa de substituição para 30%, passando a introduzir, em média, 2,5 t de *blend* em substituição a 1,4 t horárias do óleo combustível. A partir de 1997 a empresa investiu na adequação das instalações do forno nº 2 visando a ampliação da atividade prevendo a substituição energética de 30% do combustível fóssil utilizado (BARBOSA e SANTOS, 1999).

O *blend* transportado pelos caminhões-tanque é recebido na cimenteira e transferido para 02 tanques cilíndricos aéreos através do sistema de bombeamento instalado na plataforma de descarga. Cada tanque tem capacidade para armazenamento de 100 m<sup>3</sup> da mistura sendo provido de agitador de eixo vertical para manutenção da homogeneidade da suspensão durante o período de estocagem e até o bombeamento para injeção nos fornos.

O sistema de recepção e armazenamento do *blend* (Figura 6.7) dispõe dos mesmos dispositivos de segurança contra riscos potenciais de contaminação do solo e águas superficiais ou subterrâneas existentes na UCAH.

Dos tanques de armazenamento a mistura de resíduos é bombeada para injeção direta nos queimadores dos fornos através de tubulações que dispõem de sistemas de manobras, medidores de vazão e pontos de coleta de amostras, para análise diária e contra-provas, da mistura processada. As linhas de alimentação dispõem de válvulas de fechamento automático interligadas aos monitores contínuos dos parâmetros de controle de performance da combustão (CO e HCT) e do processo produtivo (NO<sub>x</sub>) e demais itens de intertravamento, além de tubulações de retorno dos excessos de *blend* para os tanques de armazenamento.



**Figura 6.7** – Vista dos tanques de recepção da mistura homogeneizada de resíduos com indicação dos sistemas de agitação e da plataforma de descarga  
Fonte: Barbosa e Santos (1999)

Como a mistura de resíduos contém sólidos em suspensão, todos os sistemas de bombeamento são providos de moinhos de linha, indicado na Figura 6.8, cuja função é propiciar a constante e gradativa redução de tamanho das partículas, a cada operação de transferência, favorecendo o processo de nebulização e combustão.

Os sistemas de monitoramento contínuo instalados nas chaminés dos fornos (Figura 6.9) são microprocessados, atuando diretamente no bloqueio das válvulas de injeção das misturas de resíduos, tendo ainda como características a emissão de sinais de saída para indicação e registro dos eventos: limpeza e calibração automática e auto-diagnóstico de defeitos.

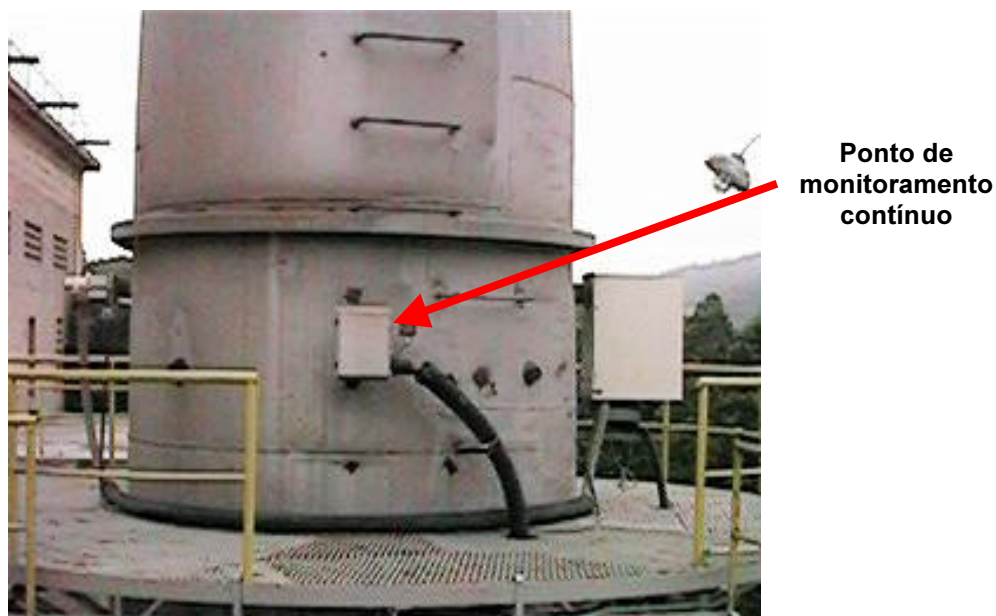


Moinho  
de linha

**Figura 6.8** – Vista do parque de bombas com indicação de um moinho de linha  
Fonte: Barbosa e Santos (1999)

Os fornos dispõem de dispositivos de intertravamento instalados e configurados para interromper automaticamente a alimentação do *blend* nos maçaricos caso ocorram quaisquer das condições seguintes:

- temperatura na zona de queima abaixo de 950°C;
- pressão no cabeçote maior que 0 mmca;
- teor de O<sub>2</sub> na chaminé do forno menor que 7%;
- defeito do Centro de Monitoramento de Emissões - CME;
- falta de energia no CME;
- concentração de CO na chaminé maior que 100 ppm por mais de 10 minutos;
- concentração de CO na chaminé maior que 500 ppm em qualquer instante;
- defeito no equipamento de controle de poluição;
- parada da câmara 1 ou 2 do precipitador eletrostático.



**Figura 6.9** - Plataforma instalada em chaminé do forno rotativo com indicação do ponto de monitoramento contínuo de emissões interligado ao sistema de bloqueio da injeção da mistura de resíduos no queimador  
Fonte: Barbosa e Santos (1999)

## 6.4 - Campanhas de amostragens

### 6.4.1 - Caracterização dos testes realizados

Conforme referido a obtenção dos dados de emissões atmosféricas e de caracterização dos insumos utilizados na produção de clínquer restringiu-se unicamente àqueles gerados, em grande parte, para cumprimento pelos empreendimentos interessados, às exigências das normas regulamentadoras da atividade de co-processamento de resíduos, associados aos controles de qualidade das matérias-primas e produto final.

É oportuno lembrar que um dos princípios da Política Nacional de Meio Ambiente (BRASIL, 1981) prevê o incentivo ao estudo e à pesquisa de tecnologias orientadas para o uso racional e a proteção dos recursos ambientais. Entende-se que o avanço do conhecimento nesse campo, em âmbito nacional, condiciona-se ao financiamento, por parte das instituições de fomento à pesquisa, devido aos altos custos envolvidos.



Os procedimentos estabelecidos para a obtenção das autorizações ambientais visando a utilização de resíduos com objetivo de recuperação energética ou substituição de matérias-primas prevêm a realização de testes sem e com a queima da mistura no equipamento industrial.

Conforme o texto da Resolução CONAMA nº 264/99 (BRASIL, 1999) esses dois tipos de medições caracterizam os Testes em branco (TB) e Teste de queima (TQ), cujas definições foram apresentadas no Capítulo 3.

O TB tem como finalidade precípua comprovar que a unidade produtiva utilizando combustíveis convencionais dispõe de sistemas de controle de poluição ambiental adequados para manter as emissões atmosféricas em conformidade com os padrões legais estabelecidos para a produção de clínquer para cimento. O TQ por sua vez tem por objetivo principal comprovar que o uso de resíduos como substitutos energéticos ou de matérias-primas não incrementa as emissões atmosféricas do processo de produção, mantendo-as em conformidade com os limites legais.

Quando da realização dos TQ's são também avaliados os teores dos metais pesados e demais parâmetros de interesse nos combustíveis e na *farinha* alimentada no forno, nos pós coletados nos equipamentos de controle de poluição e no clínquer produzido para propiciar a avaliação dos fluxos mássicos de entrada e saída no sistema-forno.

A realização dos TQ's também têm por objetivo monitorar e quantificar os principais parâmetros indicadores da performance ambiental e do processo de combustão dos resíduos, conforme descrição abaixo:

- eficiência de destruição e remoção (EDR) dos principais compostos orgânicos perigosos (PCOP);
- emissão de particulados no fluxo gasoso lançado na atmosfera;
- emissão de substâncias inorgânicas no fluxo gasoso;
- emissão de ácido clorídrico;
- emissão de ácido fluorídrico;
- emissão de cianetos;
- produtos da performance da combustão (CO e HCT);
- emissão de dioxinas e furanos.

### 6.4.2 - Metodologias utilizadas

A quantificação dos parâmetros mencionados é obtida através de coletas e análises de amostras das correntes mássicas alimentadas no forno, dos produtos gerados e do fluxo gasoso exaurido do sistema de manufatura de clínquer. Essas correntes são caracterizadas conforme discriminação seguinte:

- **matérias-primas:** a partir das análises de amostras da *farinha* alimentada no forno;
- **combustíveis:** mediante análises de amostras dos combustíveis fósseis e derivados de resíduos (*blend*) alimentados no forno rotativo;
- **emissões atmosféricas:** através das análises das amostras coletadas do fluxo gasoso lançado na atmosfera através da chaminé do forno;
- **pós retidos nos sistemas de controle de poluição atmosférica:** mediante análises das amostras coletadas antes do retorno dos pós aos silos de *farinha* para mistura, homogeneização e realimentação no forno; e
- **clínquer:** através de análises das características químicas do produto final dessa etapa do processo produtivo.

A partir das análises das amostras coletadas determinam-se:

- as concentrações dos inorgânicos classes I, II e III no coque de petróleo, no óleo combustível, no *blend*, na *farinha*, no efluente gasoso da chaminé e no material particulado do efluente gasoso;
- a concentração de cloro total no *blend*, no coque, no óleo combustível e na *farinha*;
- o poder calorífico superior (pcs) do coque de petróleo, do óleo combustível e do *blend*;
- a concentração de cloro total e ácido clorídrico no efluente gasoso;

- a concentração do PCOP no *blend*;
- a concentração do PCOP no efluente gasoso;
- a concentração de material particulado no efluente gasoso;
- a concentração de flúor total e ácido fluorídrico no efluente gasoso;
- a concentração dos produtos da performance da combustão, CO e HCT no efluente gasoso; e
- a concentração de dioxinas e furanos no efluente gasoso.

Na Figura 6.10 é apresentada uma representação esquemática de um *trem* de amostragem utilizado para a coleta de amostras em chaminés visando a determinação das emissões atmosféricas dos poluentes de interesse. Nas Figuras 6.11 e 6.12 estão relacionadas as metodologias utilizadas nas coletas de amostras e para a determinação dos poluentes no fluxo gasoso em chaminé. Na Figura 6.13 constam as metodologias utilizadas na preparação e análise dos demais parâmetros exigíveis pelas normas regulamentadoras da atividade de co-processamento de resíduos.

Os procedimentos básicos que sistematizaram a realização das coletas de amostras das várias correntes de interesse são discriminados na sequência:

- **farinha:** foram coletadas amostras de 1 kg, de hora em hora durante todo o TQ, visando a preparação de uma amostra composta por dia de amostragem destinada à análise de metais pesados, massa bruta e extratos lixiviado e solubilizado. Essas amostras foram coletadas na balança dosadora existente na entrada do forno rotativo;

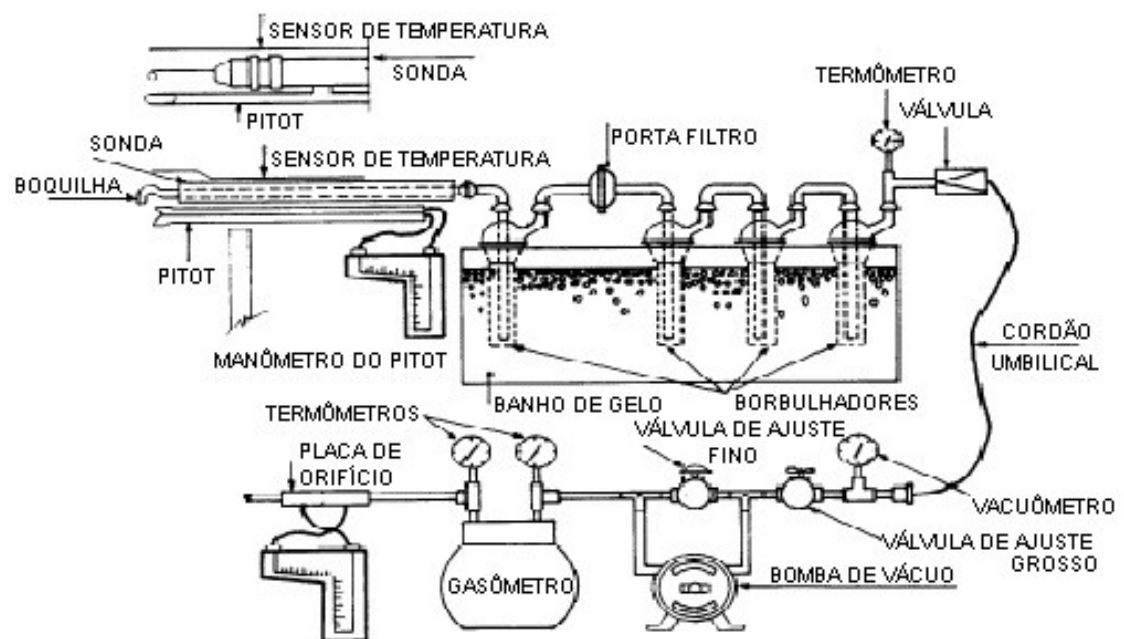
- **blend:** foram coletadas amostras durante a realização de cada uma das três coletas de compostos orgânicos voláteis na chaminé para análise do teor de água, cloro total, pcs e PCOP. Foram também coletadas amostras durante cada uma das três coletas de material particulado e HCl na chaminé para análise de cloro total, pcs e teor de água e mais uma coleta em cada uma das três coletas de inorgânicos classes I, II e III para análise de teor de água, pcs, cloro total e metais. As amostras foram coletadas na tubulação de entrada do maçarico principal contendo aproximadamente 1 L a 2 litros da mistura;

- **óleo combustível e coque de petróleo:** foram coletadas amostras de hora em hora durante todo o TQ para composição de amostras diárias para análise de metais, cloro total, pcs e teor de água. As amostras foram coletadas junto aos sistemas de alimentação contendo aproximadamente 1 kg a 2 kg dos combustíveis;
- **efluente gasoso:** foram coletadas amostras de acordo com as normas técnicas específicas discriminadas na Figura 6.11, para análises de material particulado, substâncias inorgânicas classes I, II e III, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, Cl<sub>2</sub>, HCl, HF, F<sup>-</sup>, CN<sup>-</sup>, PCOP e dioxinas e furanos;
- **clínquer:** foram coletadas amostras de hora em hora durante todo o TQ para composição de amostra diária para análise de metais na massa bruta e nos extratos solubilizado e lixiviado. As amostras de aproximadamente 1 kg a 2 kg foram coletadas no transportador inclinado no ponto de descarga no galpão de armazenamento; e
- **pó do eletrofiltro:** foram coletadas amostras de hora em hora durante todo o TQ para composição de amostra diária para análise de metais na massa bruta e nos extratos solubilizado e lixiviado. As amostras de 1 kg a 2 kg foram coletadas na rosca transportadora existente na parte inferior do precipitador eletrostático, antes do retorno do material para o silo de *farinha*;

As etapas analíticas das amostras coletadas nas amostragens em chaminés, para a quantificação de poluentes, resumem-se basicamente a:

- **material particulado:** obtido através da quantificação das massas coletadas, no filtro instalado no trem de amostragem e nas lavagens da sonda e cordão de coleta, por técnica gravimétrica;
- **óxidos de enxofre:** teor do contaminante obtido através da titulação visual das soluções de amostragem com o titulante perclorato de bário;
- **óxidos de nitrogênio:** teor do contaminante obtido através de técnica colorimétrica pelo método do ácido fenoldissulfônico;
- **substâncias inorgânicas:** obtidas após a digestão ácida das amostras coletadas e análise da solução através de técnicas de espectrometria de emissão de plasma e absorção atômica com geração de hidretos e forno de grafite;

- **cianetos:** obtidos através de técnica potenciométrica com eletrodo seletivo;
- **fluoretos:** obtidos através de técnica potenciométrica com eletrodo seletivo;
- **ácido clorídrico e cloro livre:** teores obtidos através de técnica de cromatografia de ions;
- **principal composto orgânico perigoso (PCOP):**
  - **clorofórmio:** obtido através da dessorção térmica dos cartuchos de resina *Tenax* amostrados, sendo a análise realizada por técnica de cromatografia gasosa acoplada a detector de massa (CG/EM);
  - **tetracloro de carbono:** obtido através de técnica de cromatografia gasosa de detecção de massa (CG/EM "ion trap") e dessorvedor térmico CDS6000. As massas de  $\text{CCl}_4$  obtidas foram relacionadas aos volumes de gases coletados;
- **dioxinas e furanos:** quantificação através de técnica de CG-EM de alta resolução.



**Figura 6.10** - Representação esquemática de um *trem* de amostragem utilizado para a coleta de amostras do fluxo gasoso em chaminés para avaliação das emissões de poluentes atmosféricos

Fonte: CETESB (1995), adaptada pelo autor

Metodologias	Descrição
<b>CETESB</b>	
E16.030 – Mai/95	Dutos e chaminés de fontes estacionárias – Calibração dos equipamentos utilizados na amostragem de efluentes – Método de ensaio
L9.210 – Out/90	Análise dos gases de combustão através do aparelho ORSAT – Método de ensaio
L9.213 – Set/87	Dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação de fluoretos pelo método do eletrodo de ion específico – Método de ensaio
L9.221 – Jul/90	Dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação dos pontos de amostragem – Procedimento
L9.222 – Mai/92	Dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação da velocidade e vazão dos gases – Método de ensaio
L9.223 – Jun/92	Dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação da massa molecular seca e do excesso de ar do fluxo gasoso – Método de ensaio
L9.224 – Ago/93	Dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação da umidade dos efluentes - Método de ensaio
L9.225 – Mar/95	Dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação de material particulado – Método de ensaio
L9.228 – Jun/92	Dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação de dióxido de enxofre, névoas de ácido sulfúrico e trióxido de enxofre – Método de ensaio
L9.229 – Out/92	Dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação de óxidos de nitrogênio - Método de ensaio
L9.232 – Ago/90	Dutos e chaminés de fontes estacionárias – Amostragem de efluentes para a determinação de compostos orgânicos semi-voláteis - Método de ensaio
<b>U.S. EPA</b>	
Method 29	Determination of metals emissions from stationary sources
Method 23	Determination of polychlorinated dibenzo-p-dioxin and polychlorinated dibenzofurans from municipal waste combustors
SW 846-0023A	Sampling Method for Polychlorinated Dibenzo-p-Dioxins and Polychlorinated Dibenzofuran Emissions from Stationary Sources
Method 26A	Determination of hydrogen halide and halogen emissions from stationary sources – isokinetic method
Method 30	Volatile organic sampling train
Method 101A	Determination of particulate and gaseous mercury emissions from sewage sludge incinerators

**Figura 6.11** - Descrição das metodologias utilizadas para a coleta de amostras dos fluxos gasosos em chaminés dos fornos nº 1 e 2 da CCRG, para avaliação de poluentes atmosféricos, nos testes em branco e de queima realizados no período de 1995 a 2002

Fontes: CETESB (1995) e CCRG (2000), elaborada pelo autor

Corrente	Parâmetro	Metodologia	
		Preparação	Analítica
Farinha	metais	SW 846-3050	SW 846-6010
	massa bruta		SW 846 7470A (Hg)
	solubilizado e lixiviado	Std. Methods 3500	Std. Methods 3500
Blend	PCOP	SW 846-8260	SW 846-8260
	cloro total	ASTM-4208-90	ASTM-4208-90
		ASTM-4208-88	ASTM-4208-88
	pcs	ASTM D-4809-90	ASTM D-4809-90
teor de água	ASTM 1744-83	ASTM 1744-83	
Óleo combustível e coque de petróleo	pcs	ASTM D-4809-90	ASTM D-4809-90
	cloro total	ASTM-4208-90	ASTM-4208-90
		ASTM-4208-88	ASTM-4208-88
	metais	SW 846-3050	SW 846-6010
			SW 846-7470A (Hg)
teor de água	ASTM 1744-83	ASTM 1744-83	
Clínquer	metais na massa bruta	SW 846-3050	SW 846-6010
	metais solub/lixiviado	Std. Methods 3500	Std. Methods 3500
Pó do eletrofiltro	metais na massa bruta	SW 846-3050	SW 846-6010
	metais solub/lixiviado	Std . Methods 3500	Std . Methods 3500

**Figura 6.12** – Metodologias utilizadas para a preparação e análises de amostras coletadas nas correntes de entrada e de saída dos sistemas-fornos da CCRG, no período de 1995 a 2002, segundo o parâmetro de interesse  
 Fonte: CCRG (2000), adaptada pelo autor



Metodologias	Descrição
Standard Method 3500	Determination of heavy metals in aqueous solution
ASTM 1744-83	Determination of moisture
ASTM-4809-90	Standard test method for heat of combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter (intermediate precision method)
ASTM-4208-88	Standard test method for total chlorine in coal by the oxygen bomb combustion/ion selective electrode method
ASTM-5058-90	Standard Methods for compatibility of screening analysis of waste
SW 846-3051 <sup>1</sup>	Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils
SW 846-7470A	Mercury in liquid waste (manual cold-vapor technique)
SW 846-3050B	Acid digestion of sediments, sludges, and soils
SW 846-6010B	Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry
SW 846-8290	Polychlorinated dibenzodioxins (PCDD's) and polychlorinated dibenzofurans (PCDF's) by high-resolution gas chromatography/high resolution mass spectrometry (HRGC/HRMS)
SW 846-8260	Volatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS)

Obs.: 1. Este Método substituiu a partir do ano de 2003 o SW 846-3050B

**Figura 6.13** - Identificação das metodologias utilizadas na preparação e análises de amostras coletadas nas correntes avaliadas nos sistemas-fornos da CCRG no período de 1995 a 2002

Fonte: CCRG (2000), adaptada pelo autor

### 6.4.3 - Operacionalização dos testes

Os dados disponibilizados pelas empresas responsáveis pelas atividades de co-processamento foram obtidos em várias campanhas de amostragens realizadas entre os anos de 1995 e 2002, a maior parte acompanhada por técnicos do órgão ambiental e apenas três, nos meses de maio e junho de 1995 e março de 2001, sem esse acompanhamento.

As campanhas foram realizadas com objetivo de atender às demandas dos testes em branco ou dos testes de queima e a de março de 2001 foi executada com a finalidade de coletar informações do sistema-forno em condições operacionais diversas.

Na Figura 6.14 é apresentado o resumo das campanhas de amostragens em chaminés realizadas para avaliação das emissões

atmosféricas remanescentes dos fornos de clínquer nº 1 e 2 da CCRG e que serviram aos propósitos deste trabalho de pesquisa.

Campanhas		Mai/95	Jun/95	Ago/95	Jul/96	Jun/97	Jun/98	Set/98	Out/98	Mar/01	Abr/01	Mai/01	Jun/02	Set/02
Parâmetros	MP	X	X	TBF1	TQF1	TBF2	TQF1	TQF1		PTF2	TBF2	TBF2		TBF1/TQF2
	SO <sub>x</sub>			TBF1	TQF1	TBF2	TQF1	TQF1		PTF2	TBF2			TBF1/TQF2
	NO <sub>x</sub>				TQF1	TBF2	TQF1	TQF1		PTF2	TBF2			TBF1/TQF2
	HCl			TBF1	TQF1	TBF2	TQF1	TQF1			TBF2			TQF2
	Cl <sub>2</sub>			TBF1	TQF1	TBF2	TQF1	TQF1			TBF2			TQF2
	CN'						TQF1		TQF1		TBF2			TQF2
	F'										TBF2			TQF2
	Substâncias inorgânicas				TQF1	TBF2	TQF1	TQF1			TBF2	TBF2		TBF1/TQF2
	Hg										TBF2	TBF2		TBF1/TQF2
	D/F												TBF2	TQF2
	PCOP				TQF1		TQF1			TQF1	PTF2			TQF2

Obs.:1) TQF - Teste de queima do forno 1 ou 2;

2) TBF - Teste em branco do forno 1 ou 2;

3) PTF - Pré-teste do forno 2.

**Figura 6.14** - Disponibilidades de resultados de amostragens em chaminés, segundo o sistema-forno avaliado e tipos de testes realizados pela CCRG, no período de 1995 a 2002

Fonte: ABCP (1998); BIOAGRI AMBIENTAL (2002, 2002a, 2002b), BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001, 2001a, 2001b), CCRG (1998, 2000, 2002), CETESB (1995b, 1996, 1999, 2002, 2003, 2004, 2004a) e TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996, 1997, 1998, 1998a, 1998b)

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1998). *Área de tecnologia* - laboratório. São Paulo. Relatórios de ensaio: 10030, 10045, 10058, 10189, 10315/16, 10468/69, 10504, 10661, 11032, 11491, 11525, 11533 e 11670.

\_\_\_\_\_. (2002). *O Coque de petróleo na indústria de cimento*. São Paulo. Catálogo técnico.

BARBOSA, A. M.; SANTOS, M. C. (1999). Utilização de resíduos industriais na Cimento Ribeirão Grande. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 5., 1999, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP. 1 CD-ROM.

BIOAGRI AMBIENTAL (2002). *Efluentes gasosos da chaminé do forno 1* - teste branco. Piracicaba. Boletim de Análise: 4251/02, Ref. Proposta: 2862/02.

\_\_\_\_\_. (2002a). *Efluentes gasosos da chaminé do forno 2* - teste de queima. Piracicaba. Boletim de Análise: 4071/02, Ref. Proposta: 2010/02.

\_\_\_\_\_. (2002b). *Efluentes gasosos da chaminé do forno 2*. Piracicaba. Boletim de Análise: 2802/02, Ref. Proposta: 1711/02.

BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001). *Efluentes gasosos da chaminé do forno 2* - CCRG - teste branco. Piracicaba. Boletim de Análise: 1237/01, Ref. Proposta: 0288/01 QUI.

\_\_\_\_\_. (2001a). *Efluentes gasosos da chaminé do forno 2* - CCRG. Piracicaba. Boletim de Análise: 0958/01, Ref. Proposta: 0480/01 QUI.

\_\_\_\_\_. (2001b). *Efluentes gasosos da chaminé do forno 2* - CCRG. Piracicaba. Boletim de Análise: 1782/01, Ref. Proposta: 0792/01 QUI.

BRASIL (1981). Lei Federal n. 6938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 02 set. 1981. Disponível em: <<http://www.lei.adv.br/6938-81.htm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. (1999). Resolução CONAMA n.264, de 26 de agosto de 1999. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 20 mar. 2000. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

COMPANHIA DE CIMENTO RIBEIRÃO GRANDE (1998). *Teste de queima do forno 1*. Ribeirão Grande. Resultados condensados das amostragens em chaminé.

\_\_\_\_\_. (2000). *Plano de teste de queima para substituição de 30% de energia no forno de clínquer 2 por blend de resíduos - rev.2*. Ribeirão Grande. p.1-39.

\_\_\_\_\_. (2002). *Teste de queima do forno 2*. Ribeirão Grande. Resultados condensados das amostragens em chaminé.

\_\_\_\_\_. (2003). *Relatório de Impacto ambiental de mineração - RIMA*. São Paulo.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1995). *Coletânea de normas técnicas para amostragens em chaminés*. Sorocaba.

\_\_\_\_\_. (1995a). *Companhia de Cimento Ribeirão Grande - relatório ambiental preliminar*. Sorocaba. Processo administrativo n. 06/00412-95, v.2.

\_\_\_\_\_. (1995b). *Companhia de Cimento Ribeirão Grande - licenciamento do forno 1 para co-processamento de resíduos*. Sorocaba. Processo n.06/00711-95.

\_\_\_\_\_. (1995c). *Resicontrol S/A - relatório ambiental preliminar*. Sorocaba. Processo administrativo n. 06/00319-95, v.2.

\_\_\_\_\_. (1996). *Plano de teste de queima*. São Paulo. Parecer técnico 032/96/EETD.

\_\_\_\_\_. (1999). *Teste de queima*. São Paulo. Parecer técnico n.004/99/EEAR.

\_\_\_\_\_. (2002). *Análise de resultados de teste em branco para co-processamento*. São Paulo. Parecer técnico 416/01/EEAR.

\_\_\_\_\_. (2003). *Resultado de teste em branco do forno de clínquer*. São Paulo. Parecer técnico 542/2003/ETQR.

\_\_\_\_\_. (2004). *Teste de queima do forno 1*. São Paulo. Parecer técnico 128/2004/ETQR/ESRI.

\_\_\_\_\_. (2004a). *Teste de queima do forno 2*. São Paulo. Parecer técnico 137/2004/ETQR/ESRI.

GRECO, C. (2000). *Um projeto bem sucedido de co-processamento em cimenteira*. G.Greco – *Térmica e Fluídos Consultoria Ltda Informativo*, São Paulo, ano 3, n.10, maio.

TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996). *Relatório de estudo - Emissões gasosas da chaminé do forno 1 - teste de queima PCOP*. Paulínia. Referência do responsável: TSQ-96969MA.

\_\_\_\_\_. (1997). *Relatório de estudo - Emissões gasosas da chaminé do forno 2 - teste branco*. Paulínia. Referência do responsável: TSQ-971685.

\_\_\_\_\_. (1998). *Relatório de estudo - Emissões gasosas da chaminé do forno 1*. Paulínia. Referência do responsável: TSQ-981700.

\_\_\_\_\_. (1998a). *Relatório final de estudo - Emissões gasosas da chaminé do forno 1 - teste de queima*. Paulínia. Referência do responsável: TSQ-982716.

\_\_\_\_\_. (1998b). *Relatório final de estudo - Emissões gasosas da chaminé do forno 1 - teste de queima*. Paulínia. Referência do responsável: TSQ-983177/983178-versão 1.

## CAPÍTULO 7 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1 - Introdução

Conforme referido a principal dificuldade para a viabilização deste tipo de estudo reside na obtenção dos dados experimentais, em especial aqueles relativos às emissões atmosféricas e de caracterização dos insumos empregados na fabricação de clínquer e cimento, com o nível de detalhamento desejável em estudos acadêmicos.

Para a realização deste trabalho os dados experimentais foram fornecidos pela Companhia de Cimento Ribeirão Grande (CCRG) e Unidade Central de Armazenamento e Homogeneização (UCAH), a partir dos resultados obtidos nas campanhas de amostragem dos efluentes gasosos emitidos através das chaminés dos fornos rotativos, daqueles resultantes de análises físico-químicas dos combustíveis (fósseis e mistura de resíduos), matérias-primas em geral, *farinha*, clínquer e cimento, assim como de parâmetros operacionais e de processo.

Esses dados foram gerados durante as avaliações efetuadas visando a implementação da atividade de co-processamento de resíduos nos fornos de produção de clínquer para cimento em cumprimento às exigências dos órgãos ambientais licenciadores e das atividades relacionadas ao monitoramento do processo de manufatura para assegurar seu controle e, conseqüentemente, garantir a qualidade do produto final.

Devido à relativa limitação, em termos quantitativos, ficou inviabilizado o tratamento estatístico dos resultados disponíveis. Optou-se, então, alternativamente, pela apresentação e análise desses resultados a partir

dos valores máximos, mínimos e das médias aritméticas dos parâmetros de interesse (ambiental e operacional) relativos ao período de maio de 1995 a setembro de 2002.

Serão ainda apresentados alguns resultados obtidos em campanhas de amostragens em chaminés de outros empreendimentos cimenteiros do Estado de São Paulo, sem a adição de resíduos industriais e com a utilização de pneus inservíveis como substitutos energéticos, visando ilustrar e enriquecer as discussões sobre o tema. Essas medições também foram realizadas em cumprimento aos requisitos de licenciamento ambiental visando a substituição energética parcial de combustíveis fósseis em fornos de clínquer.

Cabe destacar que todas as medições realizadas para a avaliação das emissões atmosféricas remanescentes envolvendo os parâmetros regulamentados, sem ou com a alimentação da mistura de resíduos, foram executadas com taxa máxima de carregamento do sistema de produção e durante operação combinada, ou seja, com o funcionamento do moinho de cru simultaneamente à operação do forno rotativo. A obrigatoriedade da execução das medições nessas condições operacionais vincula-se à necessidade de que contemplem o pior caso, resultando no máximo potencial poluidor do processo produtivo.

É importante também ressaltar que, apesar do integral atendimento aos rigorosos procedimentos estabelecidos para a realização dos trabalhos de coleta, preservação e análise das amostras coletadas em chaminés, há que se considerar o grau de incerteza intrínseco às metodologias utilizadas, quando da análise dos resultados obtidos para os parâmetros avaliados nas várias campanhas de amostragem realizadas.

## **7.2 - Material particulado**

A Tabela 7.1 mostra os resultados obtidos nas campanhas de amostragem de material particulado (MP) realizadas nos fornos rotativos n<sup>os</sup> 1 e 2 de produção de clínquer da CCRG, sem e com a adição de resíduos, durante o período de maio de 1995 a setembro de 2002.

**Tabela 7.1** – Concentrações e taxas de emissão (TE) de material particulado (MP) em chaminés dos fornos n° 1 e 2 da CCRG, com e sem a alimentação de resíduos, no período de maio de 1995 a setembro de 2002

Testes sem alimentação de resíduos					Testes com alimentação de resíduos				
Período	Valores	Far <sup>(1)</sup> (t/h)	TE <sup>(2)</sup> (kg/h)	MP <sup>(3)</sup> (mg/Nm <sup>3</sup> )	Período	Valores	Far <sup>(1)</sup> (t/h)	TE <sup>(2)</sup> (kg/h)	MP <sup>(3)</sup> (mg/Nm <sup>3</sup> )
<b>FORNO n° 1</b>									
MAI/95	min	97,20	9,64	63,91	JUL/96 15% <sup>(4)</sup>	min	98,00	3,54	21,46
	med	97,30	11,60	75,36		med	98,40	4,77	28,49
	max	97,40	16,44	110,37		max	98,50	7,37	42,77
JUN/95	min	76,10	13,40	72,93	JUN/98 30% <sup>(4)</sup>	min		9,97	60,55
	med	90,62	16,00	95,32		med	100,00 <sup>(5)</sup>	12,12	72,69
	max	95,30	21,36	132,86		max		14,90	86,93
AGO/95	min	93,70	9,51	54,26	SET/98 <sup>(6)</sup> 30% <sup>(4)</sup>	min	96,70	3,49	24,10
	med	94,90	12,73	71,29		med	97,20	4,55	32,25
	max	96,00	18,39	100,51		max	97,70	5,61	40,40
SET/02	min	96,30	4,82	27,67					
	med	97,03	5,81	32,03					
	max	97,50	7,02	37,76					
<b>FORNO n° 2</b>									
JUN/97	min		2,75	15,80	SET/02 30% <sup>(4)</sup>	min	99,30	8,14	53,20
	med	100,00 <sup>(5)</sup>	3,72	21,76		med	99,42	10,79	70,15
	max		5,90	35,80		max	99,53	16,00	98,00
ABR/01	min		5,47	30,00					
	med	99,40	6,10	33,92					
	max		6,41	36,60					
MAI/01	min		6,05	30,71					
	med	99,40	7,26	46,60					
	max		8,29	66,83					

Obs.: 1) Far – quantidade de *farinha* alimentada no forno rotativo;

2) TE – taxa de emissão material particulado;

3) concentrações de material particulado (MP) corrigidas a 11% de oxigênio;

4) indica o percentual de substituição energética durante o teste de queima da mistura de resíduos;

5) valor adotado com base na capacidade média dos fornos devido a indisponibilidade da informação;

6) desprezada a 3ª coleta devido ao desligamento do precipitador eletrostático

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002, 2002a), BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001, 2001a, 2001b), CETESB (1995, 1996, 1999, 2002, 2003, 2004a) e TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996, 1997, 1998, 1998a)

Dentre essas campanhas somente a de maio de 1995 não foi acompanhada por técnicos do órgão ambiental por não ter se caracterizado, frente aos procedimentos vigentes na época, como teste em branco (TB) oficial



visando a obtenção de autorização para o co-processamento da mistura de resíduos – *blend*.

À exceção das emissões médias, entre 71,29 mg/Nm<sup>3</sup> a 95,32 mg/Nm<sup>3</sup>, corrigidas a 11% de oxigênio (O<sub>2</sub>), em base seca (bs), obtidas nas campanhas de amostragem realizadas no forno n<sup>o</sup> 1 no ano de 1995 (meses de maio, junho e agosto), sem a adição de resíduos, e em junho de 1998, com a alimentação do *blend*, verificou-se que as outras três mantiveram-se abaixo da média máxima de 32,25 mg/Nm<sup>3</sup>, corrigidas a 11% de O<sub>2</sub>, bs, independentemente do combustível utilizado.

Observe-se que durante a campanha de setembro de 1998 o teor de cloro na mistura de resíduos utilizada foi, deliberadamente, aumentado para fins de testar o limite suportado pelo processo industrial, chegando a atingir níveis de 1,76% a 1,86% em massa durante as coletas de MP. Devido às concentrações que atingiram até 2,06% de cloro (em massa) no *blend* durante todo o período de testes, vários episódios indesejáveis foram registrados. Os mais significativos referiram-se às formações e quedas de colagens no pré-aquecedor e no forno rotativo, associados a outras intercorrências que determinaram, em mais de uma oportunidade, a paralisação do processo produtivo.

O aumento dos níveis de cloretos no interior do sistema-forno, conforme visto no capítulo 5, pode interferir nas condições de operação do precipitador eletrostático, devido à alteração da resistividade das partículas presentes no fluxo gasoso, em razão da formação de sais, reduzindo a eficiência de coleta com a conseqüente elevação dos níveis de emissão de material particulado para a atmosfera. Essa alteração, no entanto, não ficou evidente nos resultados obtidos em setembro de 1998. Na campanha de junho de 1998 verificou-se aumento nos níveis dessas emissões, no entanto, não foi possível resgatar o teor de cloro nos resíduos alimentados.

Os níveis das emissões obtidas nas campanhas realizadas em 1995 podem ser atribuídos, entre outras razões, às questões relacionadas ao início da etapa de adequação do sistema-forno para atingir a conformidade com os parâmetros legais e possibilitar a sua aprovação nos testes exigíveis para obtenção da licença ambiental para co-processamento de resíduos como substituto energético parcial.

Com relação aos resultados obtidos nos testes efetuados no forno nº 2, apesar das mesmas dificuldades de análise em razão do limitado universo de dados disponíveis, pode ser observado que as concentrações médias obtidas nas amostragens sem a utilização de resíduos apresentaram uma tendência de crescimento. A emissão média de material particulado na campanha de maio de 2001 (46,60 mg/Nm<sup>3</sup>) foi maior que o dobro daquela obtida na campanha de junho de 1997 (21,76 mg/Nm<sup>3</sup>). Em relação às amostragens efetuadas em setembro de 2002, com a utilização de resíduos, a média obtida para essas emissões foi de 70,15 mg/Nm<sup>3</sup>.

Da análise das informações disponíveis pelo menos duas hipóteses podem ser formuladas para tentar explicar esses aumentos: 1) o equipamento de controle de poluição (ECP) atmosférica “perdeu” gradativamente a eficiência de coleta ao longo dos períodos decorridos entre essas medições, culminando com a máxima emissão no teste de setembro de 2002, ou 2) a alimentação da mistura de resíduos através do queimador principal do forno teve significativa influência no incremento das emissões de material particulado provenientes do sistema-forno.

Sob o aspecto teórico vale comentar que, quando da consideração da hipótese de perda de eficiência do equipamento de controle é importante também considerar, dentre outras variáveis, a possibilidade de funcionamento inadequado do sistema de resfriamento/condicionamento dos gases provenientes do sistema-forno. Desconformidades verificadas na operação da torre de arrefecimento dos gases podem resultar no lançamento do fluxo gasoso no interior do ECP em condições fora das faixas adequadas, principalmente, em relação à temperatura e umidade, repercutindo sobre a resistividade elétrica das partículas. Para finalidade das análises pretendidas neste estudo, no entanto, e considerando os níveis atuais de controle dos processos produtivos implementados nas plantas de produção de clínquer e cimento, entende-se ser remota essa possibilidade para explicar os resultados obtidos no forno nº 2.

Conforme referido acerca das taxas de carregamento, verificou-se que em todas as campanhas realizadas, tanto no forno nº 1, quanto no forno nº 2, que a alimentação de *farinha* situou-se muito próxima da capacidade nominal que é de 100 toneladas horárias em ambos os sistemas, variando de

90,62 t/h a 99,42 t/h. Em se tratando especificamente do forno nº 2 essa variação foi ainda menor, de 99,40 t/h a 99,42 t/h de *farinha* alimentada.

Considerando que a UCAH parte da premissa do fornecimento uniforme de uma mistura de resíduos homogeneizada para a alimentação nos fornos nº 1 e nº 2, não identificou-se, a partir das informações disponíveis, justificativa plausível para explicar o incremento das emissões do forno nº 2, relacionada à essa substituição parcial, entre as campanhas sem e com a utilização do combustível suplementar. Os resultados obtidos para o forno nº 1 também reforçam esse argumento, visto que em 02 das 03 campanhas com uso da mistura de resíduos as emissões situaram-se no mesmo nível de emissão obtido no teste em branco de setembro de 2002. Portanto, e considerando ainda os aumentos crescentes das emissões de material particulado do forno nº 2, sem a utilização de resíduos, parece que a primeira hipótese tem maior possibilidade de ser a correta.

Na Tabela 7.2 são apresentados os resultados das amostragens realizadas no forno nº 2, em março de 2001, durante período de pré-testes não acompanhados pelo órgão ambiental. Nessa oportunidade foram executadas as avaliações das emissões atmosféricas com o moinho de cru funcionando e fora de operação, com o sistema de limpeza do precipitador eletrostático desligado e com simulação de defeito na segunda câmara elétrica do ECP.

Os resultados obtidos nas condições de operação e de não operação do moinho de cru merecem algumas considerações. Normalmente o sistema de resfriamento dos gases e o equipamento de controle de poluição estão ajustados para a condição de operação combinada, devido à necessidade de preparação da *farinha* crua a ser continuamente alimentada no sistema-forno. Decorrente dessa exigência operacional parte dos gases quentes provenientes do forno é direcionada para o sistema de moagem de cru para secagem das matérias-primas processadas.

Poderia, então, ser esperado um incremento nas emissões de MP através da chaminé do forno, quando da parada do moinho de cru, se todo o fluxo de gases quentes fosse direcionado para a torre de resfriamento sem o ajuste do sistema para essa nova condição, resultando na elevação da temperatura de entrada dos gases no precipitador eletrostático com a conseqüente perda de eficiência do ECP.

**Tabela 7.2** – Concentrações e taxas de emissão (TE) de material particulado (MP) em chaminé do forno nº 2 da CCRG, durante pré-teste realizado em março de 2001, com substituição energética de 30% por mistura de resíduos

Pré-Teste sem resíduo					Pré-Teste com resíduo				
Condição operacional	Valores	Far <sup>(1)</sup> (t/h)	TE <sup>(2)</sup> (kg/h)	MP <sup>(3)</sup> (mg/Nm <sup>3</sup> )	Condição operacional	Valores	Far <sup>(1)</sup> (t/h)	TE <sup>(2)</sup> (kg/h)	MP <sup>(3)</sup> (mg/Nm <sup>3</sup> )
Moinho em operação	min		8,11	48,82	Moinho em operação	min		8,67	47,10
	med	100	8,73	53,34		med	100	10,17	56,16
	max		9,35	57,86		max		10,90	60,10
Moinho Parado	min		5,36	35,00	Moinho Parado	min		7,49	46,00
	med	100	6,23	41,70		med	100	8,63	51,60
	max		7,10	48,40		max		9,77	57,20
Moinho em operação e batedor <sup>(4)</sup> desligado	min		8,26	50,70					
	med	100	8,92	53,60					
	max		9,58	56,50					
Moinho oper. 2ª câmara ECP desligada	min		71,00	389,00					
	med	100	84,10	460,00					
	max		97,20	531,00					

Obs.: 1) Far – quantidade de *farinha* alimentada no forno rotativo;

2) TE – taxa de emissão material particulado;

3) Concentrações de material particulado (MP) corrigidas a 11% de oxigênio;

4) integrante do sistema de remoção do pó das placas do precipitador eletrostático.

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001a)

Por outro lado, se o ajuste das condições operacionais da torre de resfriamento dos gases é mantido em níveis adequados, poderia se esperar uma redução no nível das emissões de MP quando da parada do moinho de cru, visto que foi suprimida uma significativa fonte potencial de geração do poluente.

No entanto, mantida a condição ótima de ajuste da torre de resfriamento dos gases não se espera um aumento das emissões atmosféricas de material particulado quando da operação da moagem de cru, a menos da ocorrência de eventual deficiência do equipamento de controle de poluição.

Para a condição do moinho de cru em operação, sem e com a utilização da mistura de resíduos e considerando-se também as incertezas decorrentes das metodologias de coleta e análise, verifica-se que as emissões de MP situaram-se, praticamente, no mesmo nível (53,34 mg/Nm<sup>3</sup> e 56,16 mg/Nm<sup>3</sup>).

A comparação dos resultados das emissões de MP para a condição – moinho parado, sem e com a utilização dos resíduos, frente àquelas obtidas

com o moinho em operação indica pequena redução nos níveis obtidos. Não é possível concluir acerca dessa tendência em razão das incertezas referidas, bem como devido ao limitado conjunto de dados disponíveis. Pode-se, no entanto, supor que esses resultados demonstram a adequada operação do sistema de arrefecimento dos gases provenientes do sistema-forno.

Apenas para a condição de simulação de ocorrência de defeito no equipamento de controle de poluição atmosférica é que ficou evidente o aumento das emissões de material particulado. Observa-se ainda que os resultados obtidos no pré-teste (sem e com a utilização dos resíduos), com exceção da última condição testada, são semelhantes àqueles obtidos na campanha de amostragem de maio de 2001, apesar da maior amplitude dos dados nesta última.

Na operação com alimentação do combustível derivado de resíduos o funcionamento do moinho de cru parece ter afetado menos ainda os resultados obtidos, e mais importante, os valores médios obtidos foram muito próximos aos da operação sem a adição do *blend*, reforçando a crença na hipótese de eventual perda de eficiência do sistema de retenção de particulados para explicar os resultados das emissões mostradas na Tabela 1.

É conveniente destacar a importância do controle das emissões de material particulado, seja em relação aos efeitos indesejáveis que possam provocar em termos ambientais e de saúde pública, e mesmo em termos financeiros para o empreendedor, não deixando de considerar também o papel que pode representar em relação às emissões de dioxinas e furanos. A esse respeito cabe ressaltar que experimentos realizados com areia finamente moída, numa câmara de combustão com temperatura decrescendo de 430°C a 390°C, com tempo de residência de 4 a 5 segundos, demonstraram a função desse substrato como agente catalisante que aumentou efetivamente a formação de dioxinas e furanos (ARAÚJO, 2002, p.45-46).

### **7.3 - Óxidos de enxofre**

Como visto as emissões desses óxidos são decorrência da introdução do elemento enxofre no sistema-forno a partir das matérias-primas,

combustíveis fósseis e/ou combustíveis derivados de resíduos. Nas Tabelas 7.3 a 7.5 são apresentadas as características básicas das correntes de alimentação dos fornos de clínquer da CCRG, obtidas a partir das informações recuperadas dos testes de queima realizados nos anos de 1996, 1998 e 2002.

**Tabela 7.3** – Características médias do combustível e *blend* utilizados no forno nº 1 da CCRG, durante o teste de queima de julho de 1996, com substituição energética de 15% por mistura de resíduos

Corrente	Parâmetros	Unidades	Valores		
			mínimo	médio	máximo
<i>blend</i>	N	% (massa)	0,04	0,04	0,05
	Cl	% (massa)	0,18	0,18	0,18
	S	% (massa)	0,30	0,34	0,39
	poder calorífico inferior	MJ/kg <sup>(1)</sup>	30,75	32,72	35,41
kcal/kg		7 343,50	7 815,16	8 457,61	
óleo BPF	S	% <sup>(2)</sup> (massa)		0,85	
	Cl	ppm		1,00	
<i>farinha</i>	S	% (massa)		0,40	
	Cl	ppm		109,00	
	alimentação	t/h	98,00	98,40	98,50

Obs.: 1 - 1 MJ equivale a 238,8459 kcal;

2 - 1% equivale a 10000 ppm (partes por milhão)

Fonte: CETESB (1996)

Pode ser observado que os conteúdos de enxofre nas várias correntes de alimentação dos fornos rotativos apresentaram variações bastante restritas nas campanhas de amostragens consideradas. Barbosa e Santos (1999) apresentaram a caracterização de 18600 toneladas de *blend* co-processadas nos fornos da CCRG no período de dezembro de 1997 a agosto de 1998 mostrando que o teor médio de enxofre atingiu 0,45% em massa.

Embora a substituição energética inicialmente pleiteada pela empresa e autorizada pelo órgão ambiental para o forno nº 1 fosse de 15%, a média obtida no período de dezembro de 1997 a agosto de 1998 foi de apenas 9,2%. O poder calorífico inferior (pci) médio da mistura utilizada no período considerado foi de 6 434 kcal/kg (26,94 MJ/kg).

**Tabela 7.4** – Características médias do combustível e *blend* utilizados no forno nº 1 da CCRG, durante o teste de queima de setembro de 1998, com substituição energética de 30% por mistura de resíduos

Parâmetros		Unidade	Blend			Óleo BPF
			Valores			
			mínimo	médio	máximo	médio
Poder calorífico	Superior	MJ/kg <sup>(1)</sup>	24,10	26,25	29,20	42,10
		kcal/kg	5 757,29	6 271,70	6 975,63	10 057,33
	Inferior	MJ/kg	22,04	24,54	27,11	40,20
		kcal/kg	5 263,15	5 860,84	6 473,96	9 603,44
Alimentação		kg/h	2 974,40	3 198,43	3 378,80	4 369,38
Enxofre (S)		% <sup>(2)</sup> (massa)	0,80	0,80	0,80	1,10
Carbono (C)			48,90	53,76	56,90	87,10
Hidrogênio (H)			9,50	10,14	11,10	8,90
Nitrogênio (N)			0,40	0,70	0,90	1,20
Enxofre na <i>farinha</i>		% (massa)	0,36	0,38	0,40	
Alimentação de <i>farinha</i>		kg/h	97,80	98,00	98,20	

Obs.:1 - 1 MJ equivale a 238,8459 kcal;

2 - 1% equivale a 10000 ppm (partes por milhão)

Fonte: CETESB (1999), CCRG (1998)

**Tabela 7.5** – Características médias do combustível e *blend* utilizados no forno nº 2 da CCRG, durante o teste de queima de setembro de 2002, com substituição energética de 30% por mistura de resíduos

Parâmetros		Unidade	Blend			COQUE
			Valores			
			mínimo	médio	máximo	médio
Poder calorífico	Superior	MJ/kg <sup>(1)</sup>	19,49	23,18	25,93	
		kcal/kg	4 655,08	5 537,04	6 193,84	
	Inferior	MJ/kg	17,49	21,14	23,89	
		kcal/kg	4 178,89	5 049,38	5 706,99	
Alimentação		kg/h	2 979,30	3 455,16	3 954,30	5 274,03
Enxofre (S)		% <sup>(2)</sup> (massa)	0,34	0,50	0,95	1,10
Carbono (C)			40,64	50,63	68,26	89,92
Hidrogênio (H)			8,65	9,61	10,43	3,93
Nitrogênio (N)			0,81	1,92	2,38	2,16
Enxofre na <i>farinha</i>			% (massa)	0,26	0,29	0,34
Alimentação de <i>farinha</i>		kg/h	99,20	99,52	100,00	

Obs.:1 - 1 MJ equivale a 238,8459 kcal;

2 - 1% equivale a 10000 ppm (partes por milhão)

Fonte: CETESB (2004a), CCRG (2002)

Observa-se, com relação à caracterização do *blend* alimentado no forno nº 2 durante o teste de queima de setembro de 2002, que o teor médio de enxofre foi de 0,51% em massa, sendo a dosado a 0,95% em massa durante as medições específicas de óxidos de enxofre.

Verificou-se uma aparente tendência de declínio dos valores médios do pci das misturas de resíduos utilizadas durante os períodos estudados. Durante o teste de queima de 1996 o valor médio foi de 7815,16 kcal/kg (32,72 MJ/kg), no de setembro de 1998 atingiu 5860,84 kcal/kg (24,54 MJ/kg) e no de setembro de 2002 chegou a 5049,38 kcal/kg (21,14 MJ/kg) resultando numa redução de 35,39%, entre 1996 e 2002.

Obviamente há sempre que se considerar as limitações das análises apresentadas em razão do universo de dados disponíveis. No entanto, se a tendência for de fato representativa, uma explicação possível pode ser formulada nos seguintes termos: à medida em que foi dominada a técnica de combustão do *blend* com menores poderes caloríficos, misturas mais pobres, em termos energéticos, tornaram-se passíveis de utilização, asseguradas a garantia da qualidade do produto e a conformidade com a limitação imposta pela norma ambiental (2 775 kcal/kg ou 11,62 MJ/kg). Uma análise mais ampla dessa constatação leva à possível repercussão positiva em termos ambientais, à medida em que se visualize a possibilidade de redução dos limites de pci atualmente exigidos, aumentando o espectro de resíduos passíveis de utilização como substitutos energéticos.

As amplitudes verificadas para os vários parâmetros de caracterização das misturas de resíduos utilizadas nas campanhas comentadas permitem inferir que em termos de homogeneidade do *blend*, a proposta da UCAH foi atingida.

Na Tabela 7.6 são apresentados os resultados obtidos para as emissões atmosféricas de óxidos de enxofre nas campanhas de amostragens em chaminés realizadas nos fornos da CCRG com e sem a substituição parcial dos combustíveis fósseis (óleo 7A e 9A e, posteriormente, coque de petróleo) pela mistura de resíduos líquidos.



**Tabela 7.6** – Concentrações médias e taxas de emissão (TE) de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), expressas como SO<sub>2</sub>, em chaminés dos fornos n° 1 e 2 da CCRG, com e sem a alimentação de resíduos

Testes sem alimentação de resíduos				Testes com alimentação de resíduos				
Forno	Valores	TE <sup>(1)</sup> (g/h)	SO <sub>x</sub> <sup>(2)</sup> (mg/Nm <sup>3</sup> )	Forno	Valores	TE <sup>(1)</sup> (g/h)	SO <sub>x</sub> <sup>(2)</sup> (mg/Nm <sup>3</sup> )	
<b>Forno 1</b>								
AGO/95	min	727,99	4,60	JUL/96 15% <sup>(3)</sup>	min	3 223,89	21,02	
	med	1 216,06	7,52		med	3 592,06	23,21	
	max	1 471,34	9,23		max	4 082,47	26,00	
SET/02	min	274,91	1,63	JUN/98 30% <sup>(3)</sup>	min	1 390,38	9,38	
	med	334,02	1,96		med	1 402,09	9,42	
	max	390,89	2,28		max	1 413,80	9,45	
					SET/98 30% <sup>(3)</sup>	min	1 334,99	10,13
						med	2 580,68	20,43
						max	3 407,30	27,43
<b>Forno 2</b>								
JUN/97	min	5 698,71	35,08	SET/02 30% <sup>(3)</sup>	min	243,16	1,75	
	med	6 178,39	38,99		med	317,87	2,30	
	max	6 834,95	44,29		max	383,52	2,76	
ABR/01	min	355,45	2,14					
	med	470,04	2,89					
	max	617,35	3,88					

Obs.: 1) TE - taxa de emissão de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), avaliadas como SO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub>;

2) concentrações de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), expressas como SO<sub>2</sub>, corrigidas a 10% de oxigênio;

3) indica o percentual de substituição energética durante o teste de queima da mistura de resíduos

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002, 2002a), BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001), CETESB (1995, 1996, 1999, 2002, 2003, 2004a) e TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996, 1997, 1998, 1998a)

Da observação dos resultados do forno n° 1 pode surgir a dúvida quanto ao incremento das emissões de óxidos de enxofre devido à substituição parcial de combustíveis fósseis pelo *blend*. Tal conclusão, se óbvia à primeira vista, mostra-se inconsistente com os níveis de enxofre na mistura de resíduos frente aos dos combustíveis substituídos. Importante a essa altura é a verificação dos teores de enxofre nas matérias-primas. A partir das concentrações médias das caracterizações relativas a três testes de queima foi elaborada a Tabela 7.7 que auxilia a entender as possíveis causas das variações das emissões dos óxidos de enxofre nessas oportunidades.

**Tabela 7.7** – Concentrações médias de enxofre nas *farinhas* utilizadas em testes de queima de resíduos realizados nos fornos nº 1 e 2 da CCRG nos anos de 1996, 1998 e 2002

Parâmetros	TESTES DE QUEIMA		
	FORNO1		FORNO 2
	1996	1998	2002
Concentração na <i>farinha</i> – S (ppm)	4 000	3 750	2 900
Alimentação <i>farinha</i> (t/h)	98,40	97,20	99,42
Alimentação S (kg/h)	393,60	364,50	288,32

Fonte: CETESB (1996,1999, 2004a)

Como pode ser observado os teores de enxofre nas matérias-primas se refletem de maneira importante sobre as emissões dos poluentes atmosféricos. No caso apresentado as concentrações variaram de 4000 ppm no teste de 1996 a 2900 ppm no de 2002, apresentando uma tendência de declínio que foi acompanhada pelos níveis de emissão dos óxidos de enxofre obtidos nas amostragens em chaminés.

Os resultados do teste de queima de setembro de 1998 podem também ter sofrido os efeitos das altas dosagens de cloro alimentadas e que resultaram na alteração das condições de operação do sistema-forno.

Há que se levar também em consideração, quando da avaliação dos resultados obtidos no teste com resíduos de julho de 1996, que esta foi a primeira experiência utilizando resíduos como substituto energético pelas empresas envolvidas. Esse fato pode também ter concorrido, em razão da inexperiência das pessoas envolvidas na efetivação dos trabalhos, para a obtenção dos elevados níveis de emissões atmosféricas desse poluente.

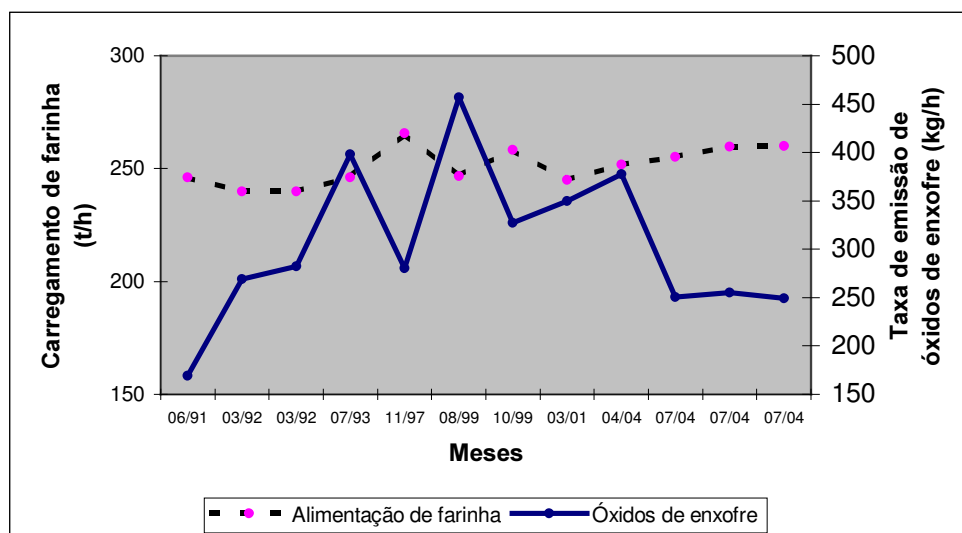
Com relação aos resultados obtidos nos testes do forno nº 2, em especial os de abril de 2001 e de setembro de 2002, nota-se, apesar dos baixos níveis de emissão de óxidos de enxofre que os resultados não apresentaram diferenças significativas. Por outro lado no teste sem resíduos de junho de 1997 observou-se o maior nível de emissão dentre todas as campanhas de amostragens realizadas, não se dispondo, porém, de informações que permitissem a formulação de hipóteses acerca dessa ocorrência.

Novamente cabe ressaltar o papel representado pela alimentação das matérias-primas nos níveis de emissões atmosféricas não somente dos óxidos de enxofre, mas também de outros parâmetros de interesse ambiental.

Essa repercussão deve-se ao elevado fluxo de massa no sistema-forno. A esse respeito destaca-se também a informação da *U. S. Environmental Protection Agency* (USEPA) (1994), de que a existência de bolsões de enxofre, por exemplo de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), em jazidas de calcário, pode provocar o aumento das emissões atmosféricas. Essas emissões, principalmente, de  $\text{SO}_2$ , ocorrem devido às reações de oxidação do enxofre constituinte das matérias-primas da farinha quando alimentado no pré-aquecedor do sistema-forno, estágio no qual não há temperatura, nem cal livre ( $\text{CaO}$ ) suficiente para a formação de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), que normalmente incorpora-se ao clínquer.

A título ilustrativo cabe comentar que dentre as plantas existentes no Estado de São Paulo não é comum a ocorrência de altos níveis de emissão de óxidos de enxofre, porém, uma cimenteira da região de Sorocaba, identificada neste trabalho como empresa “A”, historicamente convive com essa situação. Baseado em informações obtidas junto aos responsáveis pelo Setor de Mineração do empreendimento, nessa unidade pode-se, eventualmente, constatar a ocorrência de bolsões de pirita na jazida de calcário disponível.

Os teores médios de enxofre na matéria-prima são de 0,30% na *farinha* produzida e de 0,52% na *farinha* alimentada no forno, expressos em  $\text{SO}_3$ . Em razão do fluxo de massa (em média de 260 t de *farinha*/hora) resulta a taxa de alimentação de enxofre no sistema-forno de 541,41 kg/hora, via pré-aquecedor de ciclones, propiciando o alto nível das emissões. Na Figura 7.1 é mostrada a evolução das emissões de  $\text{SO}_x$  nesse forno industrial, a partir dos dados disponíveis no período compreendido entre os anos de 1991 a 2004.



**Figura 7.1** - Evolução das emissões de óxidos de enxofre (kg/h), expressas em  $SO_2$ , em planta de produção de clínquer de via seca com pré-aquecedor e resfriador tipo planetário da empresa “A”, localizada no Estado de São Paulo, no período de 1991 a 2004

Fonte: CETESB (1991, 1997)

Essa unidade utilizou carvão mineral até o começo dos anos 90, com teores de enxofre de aproximadamente 2,2% em massa, posteriormente utilizou óleo BPF com teores de enxofre de 2,3% em massa e a partir do final da década de 90 passou a utilizar o coque de petróleo, cujo teor de enxofre total do combustível importado pode variar de 0,5% a 7,0% em massa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP), 2002).

Na fase de transição para uso desse novo combustível, a exemplo de outros empreendimentos cimenteiros, era preparada uma mistura de óleo combustível e coque de petróleo, passando, posteriormente, a utilizar uma mistura de coque importado com coque nacional (com teor de enxofre de aproximadamente 1,0% em massa) e, finalmente, somente o coque de petróleo importado.

Na Tabela 7.8 são apresentados os resultados das emissões de  $SO_x$  obtidos pela CCRG durante a realização dos pré-testes em março de 2001.

**Tabela 7.8** – Concentrações e taxas de emissão (TE) de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), expressas em SO<sub>2</sub>, em chaminé do forno n° 2 da CCRG, durante pré-teste realizado em março de 2001, com substituição energética de 30% por mistura de resíduos

Pré-testes sem alimentação de resíduos				Pré-testes com alimentação de resíduos			
Condição operacional	Valores	TE <sup>(1)</sup> (g/h)	SO <sub>x</sub> <sup>(1)</sup> (mg/Nm <sup>3</sup> )	Condição operacional	Valores	TE <sup>(1)</sup> (g/h)	SO <sub>x</sub> <sup>(2)</sup> (mg/Nm <sup>3</sup> )
Moinho Funcionando	Min			Moinho funcionando	min	101,26	0,62
	med	1 289,04	8,54		med	252,98	1,53
	max				max	661,63	3,95
Moinho Parado	min			Moinho parado	min	190,57	1,29
	med	1 323,37	9,49		med	505,94	3,29
	max				max	821,32	5,30
Moinho func. Batedor <sup>(3)</sup> Desligado	min	1 088,99	7,34				
	med	1 190,86	7,87				
	max	1 292,72	8,39				
Moinho func. 2ª câmara ECP desligada	min	1 346,51	8,11				
	med	1 370,88	8,25				
	max	1 395,24	8,38				

Obs.: 1) TE – taxa de emissão de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) expressas como SO<sub>2</sub>;

2) concentrações de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), expressas como SO<sub>2</sub> corrigidas a 10% de oxigênio;

3) dispositivo integrante do sistema de remoção de pó das placas e eletrodos do precipitador eletrostático.

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001a)

As emissões de SO<sub>x</sub> observadas no teste sem alimentação de resíduos mostraram, como esperado, que não dependem do funcionamento do equipamento de controle de poluição atmosférica, uma vez que esses poluentes são emitidos sobretudo na forma gasosa. Nos testes realizados com a substituição da mistura de resíduos as emissões diminuíram sensivelmente, talvez em consequência do menor teor de enxofre contido no *blend* que substituiu parcialmente os combustíveis fósseis utilizados (óleo e coque).

Para confirmação das causas da variabilidade dos níveis de emissões de óxidos de enxofre provenientes dos fornos testados seria necessário o levantamento pormenorizado das variáveis intervenientes, o que não foi viabilizado no decorrer desta pesquisa.

Apesar da limitação dos dados, os resultados das emissões de SO<sub>x</sub>, sem e com a utilização da mistura de resíduos, resultou em níveis aparentemente menores para a condição – moinho de cru em operação. Essa

possibilidade, em razão do abatimento dos compostos de enxofre quando do intenso contato com as partículas das matérias-primas no moinho de cru, foi relatada no capítulo 5.

#### 7.4 - Óxidos de nitrogênio

Uma parcela das emissões desses óxidos, semelhantemente aos óxidos de enxofre, também sofre os efeitos do conteúdo de nitrogênio presente nas matérias-primas, mas principalmente daquele alimentado pela via dos combustíveis e mistura de resíduos.

Como visto uma parcela significativa das emissões de óxidos de nitrogênio em processos de combustão se deve à formação do  $\text{NO}_x$  térmico, que no caso de fornos de clínquer é maximizado em decorrência das altas temperaturas exigidas pelo processo produtivo associado à necessidade de atmosfera oxidante no interior do forno rotativo.

Na Tabela 7.9 são mostrados os resultados obtidos nas várias campanhas de amostragens efetuadas nos fornos da CCRG com e sem a substituição de combustíveis convencionais pelo *blend*.

O primeiro fator que chama a atenção se refere aos níveis, aparentemente, crescentes das emissões de  $\text{NO}_x$  no forno n° 1 e, principalmente, no forno n° 2 quando utilizando a mistura de resíduos, exceção feita ao resultado da campanha de amostragem de junho de 1998.

Nos testes de queima realizados no forno n° 1, com 15% de substituição energética em julho de 1996, o teor médio de nitrogênio no *blend*, conforme indicado na Tabela 7.3, foi de 0,04% em massa, não estando disponível o teor do elemento no óleo utilizado na época.

Para o teste de queima efetuado no forno n° 1 em setembro de 1998, com taxa de substituição energética de 30%, as concentrações médias de nitrogênio conforme Tabela 7.4, avaliadas para a mistura de resíduos e óleo combustível foram, respectivamente, de 0,70% e 1,20% em massa.

**Tabela 7.9** - Concentrações e taxas de emissão (TE) de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), expressas como NO<sub>2</sub>, em chaminés dos fornos n° 1 e 2 da CCRG, de julho de 1996 a setembro de 2002

Parâmetros	Data	Testes sem resíduos			Data	Testes com resíduos			
		mínimo	médio	máximo		mínimo	médio	máximo	
<b>FORNO 1</b>									
<i>farinha</i> (t/h)					<b>JUL/96</b> 15%	98,20	98,40	98,60	
<i>óleo</i> (kg/h)						4 952,00	5 064,00	5 176,00	
<i>blend</i> (kg/h)						1 040,00	1 064,00	1 088,00	
NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>						216,00	<b>254,06</b>	284,40	
TE (kgNO <sub>x</sub> /h) <sup>(2)</sup>						34,02	40,02	44,79	
O <sub>2</sub> (%) <sup>(3)</sup>							10,00		
<i>farinha</i> (t/h)	<b>SET/02</b>	96,80	97,13	97,30	<b>JUN/98</b> 30%	<sup>(4)</sup> nd	nd	nd	
<i>coque</i> (kg/h)		7 200,00	7 400,00	7 600,00		<sup>(4)</sup> nd	nd	nd	
<i>blend</i> (kg/h)		<sup>(5)</sup> np	np	np		<sup>(4)</sup> nd	nd	nd	
NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>		779,17	<b>953,55</b>	1 078,23		134,00	<b>163,00</b>	179,00	
TE (kgNO <sub>x</sub> /h) <sup>(2)</sup>		131,64	162,19	182,17		19,95	24,27	26,65	
O <sub>2</sub> (%) <sup>(3)</sup>			11,40				10,00		
<i>farinha</i> (t/h)					<b>SET/98</b> 30%	97,80	98,00	98,20	
<i>óleo</i> (kg/h)						4 258,90	4 347,20	4 435,50	
<i>blend</i> (kg/h)						<sup>(6)</sup> 2 679,00	2 819,20	2 959,40	
NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>						116,60	<b>379,74</b>	553,30	
TE (kgNO <sub>x</sub> /h) <sup>(2)</sup>						17,14	52,25	71,45	
O <sub>2</sub> (%) <sup>(3)</sup>							11,30		
<b>FORNO 2</b>									
<i>farinha</i> (t/h)	<b>JUN/97</b>		<sup>(7)</sup> 100,00		<b>MAR/01</b>	100,00	100,00	100,00	
<i>óleo</i> (kg/h)							1 110,00	1 334,68	1 800,00
<i>coque</i> (kg/h)			<sup>(4)</sup> nd	nd		nd	3 400,00	3 400,00	3 400,00
<i>blend</i> (kg/h)							1 890,00	2 680,32	3 107,00
NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>			230,44	<b>265,16</b>		316,92	459,80	<b>485,10</b>	510,40
TE (kgNO <sub>x</sub> /h) <sup>(2)</sup>			36,59	42,11		50,33	75,22	79,36	83,50
O <sub>2</sub> (%) <sup>(3)</sup>			10,10		Pré-teste	11,00			
<i>Farinha</i> (t/h)	<b>ABR/01</b>	99,40	99,40	99,40	<b>MAR/01</b>	100,00	100,00	100,00	
<i>óleo</i> (kg/h)		<sup>(5)</sup> np	np	np			0,00	0,00	0,00
<i>coque</i> (kg/h)		7 236,00	7 236,00	7 236,00			4 700,00	5 155,56	5 650,00
<i>blend</i> (kg/h)		<sup>(5)</sup> np	np	np			2 435,00	3 019,52	3 500,00
NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>		696,30	<b>797,61</b>	854,70			595,10	<b>650,10</b>	705,10
TE (kgNO <sub>x</sub> /h) <sup>(2)</sup>		114,37	130,92	140,28			97,35	106,35	115,35
O <sub>2</sub> (%) <sup>(3)</sup>			10,90		Pré-teste	11,00			
<i>Farinha</i> (t/h)					<b>SET/02</b> 30%	99,30	99,40	99,50	
<i>Coque</i> (kg/h)						4 975,60	5 068,97	5 270,00	
<i>Blend</i> (kg/h)						<sup>(8)</sup> 3 179,00	3 218,70	3 337,00	
NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>						899,74	<b>1 034,29</b>	1 157,89	
TE (kgNO <sub>x</sub> /h) <sup>(2)</sup>						125,79	143,33	157,73	
O <sub>2</sub> (%) <sup>(3)</sup>						13,20	13,27	13,40	

Obs.: 1 - concentrações expressas como NO<sub>2</sub> e corrigidas a 10% de O<sub>2</sub>; 2 - TE - taxa de emissão de NO<sub>x</sub>;  
 3 - teores médios de O<sub>2</sub> nos gases de saída da chaminé dos fornos; 4 - informação não disponível;  
 5 - informação não pertinente; 6 - teor de N no *blend* : 0,7% em massa;  
 7 - valor adotado - média de alimentação dos fornos de clínquer; 8 - teor de N no *blend* : 1,94% em massa

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002, 2002a), BIOAGRI LABORATÓRIOS – DIVISÃO AMBIENTAL (2001, 2001a), CETESB (1996, 1999, 2002, 2003, 2004a) e TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996, 1997, 1998, 1998a)

Para o teste de queima de setembro de 2002 no forno n° 2, com taxa de substituição energética de 30%, os teores médios de nitrogênio no *blend* e no coque de petróleo foram, respectivamente, de 2,34% e 2,16% em massa, quando das coletas das amostras para análise dos óxidos de nitrogênio. Cabe ressaltar que as caracterizações realizadas para o elemento nitrogênio no *blend* e no coque de petróleo ao longo de toda a campanha de amostragens indicaram teores máximos de 2,38% e 3,42% em massa, respectivamente.

Apesar da literatura indicar que a maior parte dos óxidos de nitrogênio formados em processos de combustão em fornos de clínquer se dá pela via térmica, observou-se nos casos analisados que os níveis de concentração de NO<sub>x</sub> indicados na Tabela 7.9 guardam relação, nas campanhas de junho de 1996, setembro de 1998 e setembro de 2002, com os tipos de combustíveis utilizados e, respectivos, teores de nitrogênio presentes.

Da comparação dos resultados obtidos nas avaliações efetuadas por ocasião da execução dos pré-testes no forno n° 2 em março de 2001 verificou-se que quando foram utilizados o óleo combustível, juntamente com o coque de petróleo e a mistura de resíduos, as concentrações de NO<sub>x</sub> foram significativamente menores (25,38%) que quando utilizados apenas o coque (2,16% N em massa) e o *blend* (2,34% N em massa).

Certamente é significativa a parcela dos óxidos de nitrogênio que se forma no interior do forno rotativo em função dos perfis de temperaturas exigidos pelo processo de produção do clínquer, no entanto, os dados analisados parecem confirmar que a geração desses óxidos é também sensível aos teores de nitrogênio alimentado pela via dos combustíveis ou dos resíduos utilizados como combustível suplementar.

Esses aspectos devem ser cuidadosamente considerados quando da escolha dos tipos de combustíveis e resíduos a serem utilizados num processo tão intensivo em consumo de energia térmica em razão de que a maximização das emissões de óxidos de nitrogênio certamente terá grande relevância em termos ambientais, seja em razão dos efeitos inerentes à sua própria emissão, em razão de poder propiciar a geração de chuva ácida, como também por se tratar de um dos precursores da formação do poluente secundário ozônio.



A título ilustrativo serão apresentados (Tabela 7.10) os resultados obtidos, segundo CETESB (2001), em teste de queima realizado em 2001 pela empresa “B”, também localizada no Estado de São Paulo, em forno rotativo equipado com pré-aquecedor de dois ramais com 4 estágios de ciclones, pré-calcinador e resfriador de clínquer tipo grelhas, com alimentação média de *farinha* de 128 t/h e substituição energética por pneus inservíveis de 13%. Os pneus picados (com tamanho médio de 5 cm x 5 cm) foram alimentados no pré-calcinador e os resultados obtidos para as emissões de óxidos de nitrogênio, expressos como NO<sub>2</sub>, indicaram uma redução de até 59% quando comparadas a menor emissão dentre aquelas do teste em branco e a maior obtida no teste de queima.

**Tabela 7.10** – Concentrações e taxas de emissão (TE) de óxidos de nitrogênio, expressas como NO<sub>2</sub>, em chaminé do forno da empresa “B”, localizada no Estado de São Paulo, em teste de queima com pneus inservíveis, em 2001, com substituição energética de 13%

Parâmetros	Valores		
	mínimo	médio	máximo
<i>farinha</i> (t/h)	127,4	128,23	129,7
NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	185,14	293,07	384,03
TE (kgNO <sub>x</sub> /h) <sup>(2)</sup>	37,82	60,36	78,44
O <sub>2</sub> (%) <sup>(3)</sup>		12,6	

Obs.: 1 - concentração expressa em NO<sub>2</sub> corrigida a 10% de O<sub>2</sub>;

2 - TE - taxa de emissão de óxidos de nitrogênio;

3 - teor médio de oxigênio medido nos gases na saída da chaminé do forno

Fonte: CETESB (2001)

Da análise preliminar dos resultados obtidos e considerando-se as condições de combustão normalmente exigidas pelo processo produtivo, pode-se supor que a redução dos níveis de NO<sub>x</sub> ocorreu, em parte, devido ao desenvolvimento da queima dos pneus em atmosfera redutora nas proximidades do pré-calcinador. Essa condição provavelmente foi propiciada em razão do limitado excesso de ar existente na entrada do tubo do forno, que para essa configuração de equipamento varia, normalmente, entre 3% e 4%. Na sequência os gases gerados nesse primeiro estágio de combustão são

exauridos pelo sistema de ventilação passando pela zona de queima secundária (pré-calcinador) na presença de excesso de ar aquecido proveniente do resfriador de clínquer. Dessa forma o monóxido de carbono (CO) formado na combustão com déficit de oxigênio deve ter sido completamente oxidado.

Os níveis de CO monitorados continuamente durante a avaliação das emissões dos óxidos de nitrogênio variaram de 149 ppm a 156 ppm com média de 152 ppm. Essa concentração é inferior àquela que teria implicações em termos de riscos de explosão no interior do precipitador eletrostático, cujos níveis de alarme e desligamento operam, normalmente, na faixa de 0,40% e 0,60% de CO, respectivamente. Informações obtidas junto a empreendimentos cimenteiros referem que atualmente os níveis de desligamento do precipitador eletrostático, em razão da concentração de CO que representaria risco para a operação do ECP, podem chegar até a 1%.

Também a título ilustrativo vale registrar que outros empreendimentos cimenteiros que encontram-se em fase de realização dos testes sem resíduos para fins de co-processamento visando a utilização de combustíveis suplementares apresentaram os resultados para as emissões de óxidos de nitrogênio mostrados na Tabela 7.11.

Os resultados referentes à empresa “A” foram obtidos em forno que dispõe de pré-aquecedor de duplo ramal com 4 estágios de ciclones e resfriador de clínquer tipo planetário. Esse forno opera com excesso de ar medido na caixa de fumaça e representativo das condições no interior do tubo rotativo na faixa de 1,5% a 2,5% de oxigênio, segundo informações obtidas junto aos responsáveis pela sua operação. Já a empresa “C” dispõe de forno com pré-aquecedor de duplo ramal de 4 estágios de ciclones, pré-calcinador e resfriador de clínquer tipo grelhas. As duas empresas realizaram as medições de NO<sub>x</sub> utilizando o coque de petróleo importado como combustível, o qual apresenta teores de enxofre na faixa de 6,5% em massa e, em média, 1,5% de nitrogênio em massa, segundo ABCP (2002).

**Tabela 7.11** - Concentrações e taxas de emissão (TE) de óxidos de nitrogênio, expressas como NO<sub>2</sub>, em chaminés dos fornos das empresas “A” e “C”, localizadas no Estado de São Paulo, em testes em branco de 2004

Parâmetros	Valores					
	Empresa “A”			Empresa “C”		
	mínimo	médio	máximo	mínimo	Médio	máximo
<b>farinha (t/h)</b>	250,60	250,91	251,40	320,40	323,11	326,50
<b>coque (t/h)</b>	15,92	15,97	16,02	15,44	15,53	15,65
<b>NO<sub>x</sub> (mg/Nm<sup>3</sup>)<sup>(1)</sup></b>	651,49	769,41	864,95	781,73	879,14	966,25
<b>TE (kg/h)<sup>(2)</sup></b>	204,55	241,24	271,93	301,16	341,64	370,58
<b>O<sub>2</sub> (%)<sup>(3)</sup></b>	10,20	10,36	10,40	12,00	12,09	12,20

Obs.:1 - concentrações expressas em NO<sub>2</sub>, corrigidas a 10% de oxigênio;

2 - TE - taxa de emissão de óxidos de nitrogênio;

3 - teores de oxigênio medidos nos gases na saída das chaminés dos fornos rotativos

Fonte: CETESB (1997, 2000)

## 7.5 - Substâncias inorgânicas

Dentre esse grupo de substâncias encontram-se os metais pesados, os quais são introduzidos no sistema-forno, principalmente, como elementos traços constituintes das matérias-primas naturais. Podem também ser introduzidos pela via de alimentação dos combustíveis e têm seus teores maximizados na corrente de entrada do processo produtivo de clínquer quando resíduos industriais são utilizados como substitutos energéticos.

Conforme citado, os pontos de fusão ou de ebulição dos compostos metálicos são freqüentemente utilizados como indicadores da volatilidade desses elementos em altas temperaturas, no entanto, como referido por Dellinger, Pershing e Sarofim (1993) o conhecimento das pressões de vapor, como função da temperatura, mostram-se fundamentais para o entendimento desse comportamento.

Além das limitações decorrentes do restrito universo de dados, que inviabilizam qualquer pretensão de realização de balanços de massas dessas substâncias, cabe ressaltar que a literatura especializada destaca que desvios no fechamento desses balanços podem estar relacionados com as variações na alimentação do forno, às dificuldades de coleta de substâncias voláteis e às

dificuldades de análise dessas concentrações, freqüentemente próximas aos limites de detecção dos métodos analíticos disponíveis.

Afim de exemplificar as variações no aporte de substâncias inorgânicas no processo de produção de clínquer, decorrentes das matérias-primas naturais constituintes da *farinha* crua, foi elaborada a Tabela 7.12 apresentando as concentrações médias desses elementos no material alimentado nos fornos da CCRG, baseado em caracterizações disponibilizadas, referentes ao período de maio a dezembro de 1998.

**Tabela 7.12** – Variações das concentrações de substâncias inorgânicas (ppm) em *farinhas* utilizadas para a produção de clínquer nos fornos nº 1 e 2 da CCRG no período de maio a dezembro de 1998

Substâncias Inorgânicas	Meses					Concentrações			Variação	
	Mai/98	Jun/98	Jun/98	Out/98	Dez/98	mínima	média	máxima	Absoluta	<sup>(1)</sup> Razão
Arsênio (As)	4,300	4,100	3,900	4,400	3,900	3,900	4,120	4,400	0,50	1,1
Cromo (Cr)	23,700	32,400	27,800	28,800	25,700	23,700	27,680	32,400	8,70	1,4
Fluoretos (F)	0,130	0,140	0,120	0,100	0,100	0,100	0,118	0,140	0,04	1,4
Manganês (Mn)	0,020	0,020	0,030	0,020	0,020	0,020	0,022	0,030	0,01	1,5
Zinco (Zn)	16,200	16,200	24,000	23,500	24,400	16,200	20,860	24,400	8,20	1,5
Merúrio (Hg)	0,140	0,086	0,078	0,080	0,134	0,078	0,104	0,140	0,06	1,8
Bário (Ba)	0,030	0,030	0,040	0,030	0,020	0,020	0,030	0,040	0,02	2,0
Platina (Pt)	<sup>(2)</sup> ND	ND	8,700	ND	18,300	8,700	13,500	18,300	9,60	2,1
Chumbo (Pb)	5,600	6,800	10,100	8,400	11,900	5,600	8,560	11,900	6,30	2,1
Tálio (Tl)	ND	ND	0,180	0,124	0,274	0,124	0,193	0,274	0,15	2,2
Níquel (Ni)	13,300	11,300	8,700	11,100	19,400	8,700	12,760	19,400	10,70	2,2
Selênio (Se)	0,300	0,200	0,300	0,300	0,600	0,200	0,340	0,600	0,40	3,0
Cádmio (Cd)	0,047	0,034	0,070	0,080	0,120	0,034	0,070	0,120	0,09	3,5
Cloro (Cl)	300,000	700,000	800,000	1100,000	300,000	300,000	640,000	1100,000	800,00	3,7
Enxofre (S)	80,000	70,000	300,000	0,010	100,000	70,000	110,002	300,000	230,00	4,3
Vanádio (V)	19,200	26,400	8,700	16,200	37,500	8,700	21,600	37,500	28,80	4,3
Antimônio (Sb)	0,082	0,044	0,042	0,144	0,033	0,033	0,069	0,144	0,11	4,4
Cobalto (Co)	3,000	2,100	3,600	4,800	9,300	2,100	4,560	9,300	7,20	4,4
Estanho (Sn)	2,200	0,800	ND	0,400	2,000	0,400	1,350	2,200	1,80	5,5
Cobre (Cu)	10,500	3,500	5,800	20,900	14,100	3,500	10,960	20,900	17,40	6,0
Cianetos (CN)	9,100	8,200	ND	ND	0,400	0,400	5,900	9,100	8,70	22,8
Prata (Ag)	0,014	0,010	0,930	0,023	ND	0,010	0,244	0,930	0,92	93,0

Obs.: 1 - Razão entre as maiores e menores taxas médias de alimentação;

2 - ND - não detectada na amostra analisada;

Fonte: ABCP (1998)

Foram definidas linhas de corte para agrupamento das substâncias, segundo ordem crescente de classificação dos níveis de variação relativos obtidos da comparação dos teores mínimos e máximos considerados.

Constatou-se, dentre as 22 substâncias inorgânicas analisadas, que 06 apresentaram variações de concentrações médias na *farinha*, quando comparados os teores avaliados segundo o critério citado, não ultrapassando o limite de 100%. Outras 14 apresentaram variações nas concentrações entre 100% e 500% e para 02 essa variação se mostrou superior a 500%. É importante ressaltar, em função das elevadas quantidades de material cru alimentado no sistema-forno, que, eventualmente, elementos com menores variações percentuais podem repercutir de forma mais significativa que outros sobre as várias correntes de saída do processo produtivo, em relação à qualidade ambiental e do produto.

Tal situação é exemplificada a partir das informações mostradas na Tabela 7.13. Estas resumem-se às magnitudes de variação das taxas alimentadas das substâncias inorgânicas consideradas, calculadas para as condições existentes na planta industrial da CCRG, cujos fornos rotativos têm, cada um, a capacidade nominal para aporte de 100 toneladas horárias de *farinha*.

A partir dos dados apresentados nota-se, por exemplo, a respeito do comentário anterior, que para o caso dessas *farinhas*, o cromo e o zinco apresentaram magnitudes de variação, em termos de taxa alimentada, semelhantes aos cianetos nos fluxos de massa hipotéticos para introdução no sistema-forno, porém, com variações relativas entre as concentrações mínima e máxima de quase 50 vezes menores.

No caso da CCRG, um exemplo concreto pode ser apresentado para ilustrar as conseqüências de possíveis variações qualitativas localizadas das matérias-primas naturais sobre as emissões atmosféricas, não desprezando-se também a importância da participação relativa dos combustíveis utilizados. Os dados apresentados na Tabela 7.14 se referem a campanhas de amostragem com (01) e sem a utilização de resíduos (03) em substituição parcial aos combustíveis fósseis realizadas em chaminé do forno nº 2, para avaliação das emissões atmosféricas de mercúrio.

**Tabela 7.13** - Variações das taxas de alimentação de substâncias inorgânicas (g/h) nos fornos da CCRG, no período de maio a dezembro de 1998, baseada nas concentrações médias presentes nas *farinhas* utilizadas

Substâncias Inorgânicas	Meses					Taxas de alimentação			Variação	
	Mai/98	Jun/98	Jun/98	Out/98	Dez/98	mínima	média	máxima	Absoluta	Relativa (%)
Arsênio (As)	430	410	390	440	390	390	408	440	50	13
Cromo (Cr)	2370	3240	2780	2880	2570	2370	2702	3240	870	37
Fluoretos (F)	13	14	12	10	10	10	12	14	4	40
Manganês (Mn)	2	2	3	2	2	2	2	3	1	50
Zinco (Zn)	1620	1620	2400	2350	2440	1620	2008	2440	820	51
Mercúrio (Hg)	14	9	8	8	13	8	10	14	6	79
Bário (Ba)	3	3	4	3	2	2	3	4	2	100
Platina (Pt)	<sup>(1)</sup> ND	ND	870	ND	1830	870	1350	1830	960	110
Chumbo (Pb)	560	680	1010	840	1190	560	807	1190	630	113
Tálio (Tl)	ND	ND	18	12	27	12	19	27	15	121
Níquel (Ni)	1330	1130	870	1110	1940	870	1208	1940	1070	123
Selênio (Se)	30	20	30	30	60	20	32	60	40	200
Cádmio (Cd)	5	3	7	8	12	3	6	12	9	253
Cloro (Cl)	30000	70000	80000	110000	30000	30000	58333	110000	80000	267
Enxofre (S)	8000	7000	30000	<sup>(2)</sup> 1	10000	7000	10333	30000	23000	329
Vanádio (V)	1920	2640	870	1620	3750	870	1945	3750	2880	331
Antimônio (Sb)	8	4	4	14	3	3	6	14	11	336
Cobalto (Co)	300	210	360	480	930	210	415	930	720	343
Estanho (Sn)	220	80	ND	40	200	40	116	220	180	450
Cobre (Cu)	1050	350	580	2090	1410	350	972	2090	1740	497
Cianetos (CN <sup>-</sup> )	910	820	ND	ND	40	40	590	910	870	2175
Prata (Ag)	1	1	93	2	ND	1	20	93	92	9200

Obs.:1) ND - não detectada.

2) valor desconsiderado por não ser representativo do elemento em questão;

3) para efeito dos cálculos utilizou-se a taxa média de alimentação de *farinha* de 100 t/h

Fonte: Elaborada pelo autor com base nas informações da Tabela 7.12

**Tabela 7.14** - Taxas de emissão atmosférica de mercúrio (Hg) em chaminé do forno n° 2 da CCRG, entre junho de 1997 e setembro de 2002, com e sem a utilização de resíduos

Blend	Emissões médias do forno n° 2		
	Mês	(g/h)	R
Não	abr/01	4,1900	1,0
	jun/97	0,4110	10,2
	mai/01	2,3800	1,8
Sim	set/02	1,8050	2,3

Obs.: R - refere-se às razões entre as taxas de emissão obtidas em comparação com a de abril/01;

Fonte: Elaborada pelo autor

É interessante observar, dentre os quatro resultados disponíveis para essa análise, que o grupo referente às avaliações sem a utilização da mistura de resíduos contemplou a maior e também a menor taxa de emissão atmosférica avaliada. A ocorrência das emissões atmosféricas de mercúrio, variando de 1,8 a 10 vezes, sem a utilização de mistura de resíduos como substituto energético, pode ser assumida como ilustrativa dos reflexos das alterações localizadas das características composicionais das matérias-primas naturais empregadas, sobretudo quando referentes a substâncias inorgânicas voláteis.

A partir da revisão da legislação apresentada no capítulo 3 nota-se que essa possibilidade não foi contemplada, uma vez que o estabelecimento dos valores limites de emissão para as substâncias inorgânicas consideram apenas as situações nas quais os empreendimentos cimenteiros pretendam implementar a atividade de co-processamento de resíduos em fornos rotativos.

Para a estimativa das taxas de aporte das substâncias inorgânicas elencadas nos fluxos de massas do forno rotativo nº 2 da CCRG foram consideradas as taxas de alimentação apresentadas na Tabela 7.15, relativas à *farinha*, o coque de petróleo, o *blend*, e o pó retido no precipitador eletrostático, obtidas a partir dos resultados de análises efetuadas em decorrência do teste de queima realizado em setembro de 2002.

Observe-se que a contribuição relativa proveniente da *farinha* e mistura de resíduos é significativa para a introdução de inorgânicos no sistema. Na verdade a participação da corrente de alimentação da *farinha* é a principal via de entrada dessas substâncias no processo produtivo, visto que no caso do teste em análise, 92% da massa alimentada no sistema-forno vem dessa corrente e os 8% restantes através dos combustíveis principal e suplementar.

Acrescente-se que o pó coletado no precipitador eletrostático e recirculado como material de alimentação atinge, no caso da CCRG, o máximo de 6% em massa da *farinha* introduzida no forno, integrando os 92% da matéria-prima utilizada na fabricação do clínquer.

**Tabela 7.15** - Caracterização das correntes de entrada de substâncias inorgânicas no forno nº 2 da CCRG, durante teste de queima de resíduos, em setembro de 2002, com substituição energética de 30%

Substâncias inorgânicas	Taxa de alimentação de substâncias inorgânicas (g/h)				
	Farinha	Coque	Blend	Pó recirculado	Total
Antimônio	19,93	1,04	265,37	1,73	288,07
Chumbo	88,67	4,36	2519,46	53,50	2666,00
Cobre	10760,40	0,56	1980,44	93,85	12835,26
Cromo	152,44	0,74	2038,98	8,37	2200,53
Estanho	191,30	9,97	1079,87	11,48	1292,61
Manganês	27,90	487,96	360,08	848,88	1724,82
Platina	59,78	3,11	959,85	3,59	1026,33
Paládio	10,76	0,56	0,32	0,65	12,29
Ródio	113,58	5,92	3,42	6,81	129,74
Vanádio	12,75	2076,44	0,38	0,77	2090,34
Arsênio	418,46	1,04	248,74	36,59	704,82
Cobalto	856,85	1,45	0,84	107,01	966,15
Níquel	29,89	778,67	419,73	54,70	1282,98
Selênio	149,45	1,04	4,50	2,33	157,32
Telúrio	350,71	18,27	10,56	21,04	400,59
Cádmio	6,78	0,35	0,20	0,41	7,74
Mercúrio	49,82	0,52	0,60	0,60	51,53
Tálio	79,71	4,15	2,40	4,78	91,04
Bário	0,00	207,64	0,00	239,12	446,76
Zinco	0,00	22,06	0,00	127,33	149,39
Enxofre	288936,67	57102,10	10390,85	29890,00	386319,62
Fluoretos	2480,87	NA	579,54	448,35	3508,76
Cianetos (CN)	99,63	6,23	53,79	7,83	167,48

Fonte: CETESB (2004a)



**Tabela 7.16** - Participação relativa de substâncias inorgânicas nas correntes integrantes dos fluxos de massas do forno nº 2 da CCRG, durante teste de queima de resíduos, em setembro de 2002, com substituição energética de 30%

FLUXOS DE MASSAS DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS											
Entrada (%)				Saída (%)							
Farinha	Coque	Blend	Pó do forno	Clínquer	Emissão						
96,7	Hg	99,3	V	94,5	Pb	85,2	Zn	528,5	Mn	13,1	Pd
95,0	Se	60,7	Ni	93,5	Pt	53,5	Ba	158,5	Co	5,2	Zn
88,7	Co	46,5	Ba	92,7	Cr	49,2	Mn	145,4	V	4,2	Cd
87,5	TI	28,3	Mn	92,1	Sb	12,8	F <sup>-</sup>	138,1	Cr	3,5	Hg
87,5	Pd	14,8	S	83,5	Sn	11,1	Co	101,2	As	2,2	As
87,5	Rh	14,8	Zn	35,3	As	7,7	S	82,3	S	1,2	Rh
87,5	Te	4,6	TI	32,7	Ni	5,3	TI	59,0	Hg	1,0	CN <sup>-</sup>
87,5	Cd	4,6	Pd	32,1	CN <sup>-</sup>	5,3	Te	57,9	Se	0,4	TI
83,8	Cu	4,6	Te	20,9	Mn	5,3	Pd	53,9	F <sup>-</sup>	0,3	F <sup>-</sup>
74,8	S	4,6	Rh	16,5	F <sup>-</sup>	5,3	Rh	53,4	Pd	0,3	Mn
70,7	F <sup>-</sup>	4,6	Cd	15,4	Cu	5,3	Cd	53,4	Te	0,2	Pb
59,5	CN <sup>-</sup>	3,7	CN <sup>-</sup>	2,9	Se	5,2	As	53,4	TI	0,2	Se
59,4	As	1,0	Hg	2,7	S	4,7	CN <sup>-</sup>	53,4	Rh	0,2	Ni
14,8	Sn	0,8	Sn	2,6	TI	4,3	Ni	53,4	Cd	0,2	Pt
6,9	Cr	0,7	Se	2,6	Pd	2,0	Pb	51,1	Cu	0,1	Sb
6,9	Sb	0,4	Sb	2,6	Rh	1,5	Se	44,3	Pb	0,1	V
5,8	Pt	0,3	Pt	2,6	Te	1,2	Hg	36,3	CN <sup>-</sup>	0,1	Cr
3,3	Pb	0,2	Pb	2,6	Cd	0,9	Sn	9,0	Sn	0,1	Te
2,3	Ni	0,2	Co	1,2	Hg	0,7	Cu	6,8	Sb	0,1	Sn
1,6	Mn	0,1	As	0,1	Co	0,6	Sb	3,6	Pt	0,0	Co
0,6	V	0,0	Cr	0,0	V	0,4	Cr	1,4	Ni	0,0	Cu
0,0	Ba	0,0	Cu	0,0	Ba	0,3	Pt	0,0	Ba	0,0	Ba
0,0	Zn	0,0	F <sup>-</sup>	0,0	Zn	0,0	V	0,0	Zn	0,0	S

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002a), CETESB (2004a) e CCRG (2002)

**Tabela 7.17** - Substâncias inorgânicas nas correntes integrantes dos fluxos de massas do forno nº 2 da CCRG, durante teste de queima de resíduos, em setembro de 2002, com substituição energética de 30%

FLUXOS DE MASSAS DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS						
Inorgânicos	Entrada (%)				Saída (%)	
	Farinha	Coque	Blend	Pó do forno	Clínquer	Emissão
<b>Arsênio</b>	59,4	0,1	35,3	5,2	101,2	2,2
<b>Bário</b>	0,0	46,5	0,0	53,5	0,0	0,0
<b>Cádmio</b>	87,5	4,6	2,6	5,3	53,4	4,2
<b>Cianeto</b>	59,5	3,7	32,1	4,7	36,3	1,0
<b>Cobalto</b>	88,7	0,2	0,1	11,1	158,5	0,0
<b>Cromo</b>	6,9	0,0	92,7	0,4	138,1	0,1
<b>Cobre</b>	83,8	0,0	15,4	0,7	51,1	0,0
<b>Fluoreto</b>	70,7	0,0	16,5	12,8	53,9	0,3
<b>Mercúrio</b>	96,7	1,0	1,2	1,2	59,0	3,5
<b>Manganês</b>	1,6	28,3	20,9	49,2	528,5	0,3
<b>Níquel</b>	2,3	60,7	32,7	4,3	1,4	0,2
<b>Chumbo</b>	3,3	0,2	94,5	2,0	44,3	0,2
<b>Paládio</b>	87,5	4,6	2,6	5,3	53,4	13,1
<b>Platina</b>	5,8	0,3	93,5	0,3	3,6	0,2
<b>Ródio</b>	87,5	4,6	2,6	5,3	53,4	1,2
<b>Enxofre</b>	74,8	14,8	2,7	7,7	82,3	0,0
<b>Antimônio</b>	6,9	0,4	92,1	0,6	6,8	0,1
<b>Selênio</b>	95,0	0,7	2,9	1,5	57,9	0,2
<b>Estanho</b>	14,8	0,8	83,5	0,9	9,0	0,1
<b>Telúrio</b>	87,5	4,6	2,6	5,3	53,4	0,1
<b>Tálio</b>	87,5	4,6	2,6	5,3	53,4	0,4
<b>Vanádio</b>	0,6	99,3	0,0	0,0	145,4	0,1
<b>Zinco</b>	0,0	14,8	0,0	85,2	0,0	5,2

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002a), CETESB (2004a) e CCRG (2002)

É interessante observar, apesar do estabelecimento aleatório das linhas de corte indicadas na Tabela 7.16, a destacada participação da *farinha* na introdução de substâncias inorgânicas no sistema-forno. Verifica-se, dentre as 23 substâncias inorgânicas caracterizadas, que a *farinha* é responsável pelo aporte de mais de 50% da massa alimentada referente a 13 desses inorgânicos, destacando-se também a participação da mistura de resíduos.

Na Tabela 7.17 essa mesma informação é apresentada de forma a facilitar a visualização da participação de cada substância considerada em relação às várias correntes de entrada no sistema-forno.

Fica dessa forma demonstrada, apesar da limitação dos dados disponíveis, a importância quali-quantitativa das matérias-primas utilizadas no processo de produção de clínquer para cimento enquanto fonte para o aporte das substâncias inorgânicas ao sistema-forno, maximizada, pela recirculação do pó de forno que, por sua vez, tem a tendência de concentrar elementos semi-voláteis, conforme comprovado pela literatura disponível.

**Tabela 7.18** - Comparativo entre as taxas de emissão de metais pesados no forno nº 2 da CCRG, durante teste de queima de setembro de 2002, e aquelas obtidas por Seebach e Tompkins (1991)

Metais Pesados	Forno 2 (30%)				Seebach e Tompkins (1991)		
	Alimentação (g/h)		Emissão (%)		Alimentação (g/h)		Emissão (%)
Antimônio <sup>(2)</sup>	23,53	288,07	<sup>(4)</sup> 0,135	<sup>(4)</sup> 1,656	160,21	301,19	0,266
Chumbo <sup>(2)</sup>	631,17	2666,00	0,219	0,925	714,91	19179,79	0,167
Cromo <sup>(1)</sup>	183,62	2200,53	0,094	1,131	255,92	4625,46	0,128
Vanádio <sup>(1)</sup>	2090,34	2536,55	0,110	0,133	2249,55	14203,34	0,004
Arsênio <sup>(1)</sup>	463,31	704,82	2,177	3,311	6,85	2989,63	0,022
Níquel <sup>(1)</sup>	917,79	1282,98	<sup>(4)</sup> 0,166	<sup>(4)</sup> 0,232	884,05	2279,80	0,048
Selênio <sup>(2)</sup>	152,59	157,32	<sup>(4)</sup> 0,208	<sup>(4)</sup> 0,215	3,27	608,27	0,298
Cádmio <sup>(2)</sup>	7,74	29,92	<sup>(4)</sup> 1,094	<sup>(4)</sup> 4,230	39,19	178,94	0,44
Mercúrio <sup>(3)</sup>	51,42	51,59	3,501	3,513	2,13	42,55	de 10 a 90
Tálio <sup>(3)</sup>	88,34	91,04	<sup>(4)</sup> 0,360	<sup>(4)</sup> 0,371	8,16	333,71	de 10 a 20
Zinco <sup>(2)</sup>	148,35	149,39	5,166	5,203	4161,76	16240,15	0,22

Obs.: 1 - metais pesados refratários ou não voláteis;

2 - metais pesados semi-voláteis;

3 - metais pesados voláteis;

4 - referem-se a substâncias não detectadas, sendo considerados os limites de detecção dos métodos analíticos utilizados;

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002a), CETESB (2004a), CCRG (2002) e SEEBACH e TOMPKINS (1991)

Da mesma maneira que verificado por Seebach e Tompkins (1991), observou-se que grande parte dos metais pesados avaliados nos testes em branco ou de queima, muitas vezes apresentam emissões não detectáveis através das metodologias disponíveis. Neste caso, para fins de estimar os fluxos

de massas das substâncias inorgânicas alimentadas no sistema-forno, numa análise mais conservativa, esses limites foram adotados como representativos das emissões atmosféricas dos metais pesados avaliados. Obviamente que em razão das limitações do trabalho experimental esse exercício de cálculo não tem a pretensão de caracterizar um balanço dos fluxos de massas decorrentes das várias correntes de entrada e de saída do forno rotativo.

De modo geral as taxas de alimentação dos metais pesados no forno da CCRG apresentaram-se dentro de faixas razoáveis de aproximação daquelas obtidas pelos pesquisadores referidos, à exceção do arsênio, selênio, cádmio e zinco. Já com relação às emissões atmosféricas relativas às taxas alimentadas no sistema-forno, nota-se que apenas o antimônio, chumbo, cromo, níquel e selênio se mostraram em níveis semelhantes aos utilizados para comparação, em que pese as condições de análise referidas.

**Tabela 7.19** - Taxas médias de emissão de metais pesados em chaminés dos fornos n<sup>os</sup> 1 e 2 da CCRG, no período de junho de 1997 a setembro de 2002, sem a utilização de resíduos

Metais	Taxas médias de emissão em testes sem resíduos (g/h)							Razão max/min
	Forno				Variabilidade			
	1	2			mínima	média	máxima	
Pesados	SET/02	JUN/97	ABR/01	MAI/01				
<b>Manganês</b>	3,1	6,14	9,72	7,2	3,10	6,54	9,72	3,1
<b>Cobre</b>	11,42	3,53	3,54	6,78	3,53	6,32	11,42	3,2
<b>Cromo</b>	0,81	1,16	3,38	1,98	0,81	1,83	3,38	4,2
<b>Mercúrio</b>	1,07	<sup>(1)</sup> <b>0,41</b>	4,1	2,37	1,07	2,51	4,10	3,8
<b>Chumbo</b>	1,48	2,89	17,22	1,55	1,48	5,79	17,22	11,6
<b>Cádmio</b>	<b>0,31</b>	0,87	4,35	0,63	0,63	1,95	4,35	6,9
<b>Níquel</b>	<sup>(1)</sup> <b>0,35</b>	6,67	12,98	4,42	4,42	8,02	12,98	2,9
<b>Arsênio</b>	<b>0,31</b>	5,7	98,57	1,78	1,78	35,35	98,57	55,4

Obs.: 1 - parte das amostras no limite de detecção do método analítico e parte acima desse valor;

2 - resultados em negrito - emissão considerada no limite de detecção do método analítico

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002), BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001), CETESB (2002, 2003) e TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1997)

A Tabela 7.19 foi elaborada a partir da análise dos resultados das amostras do fluxo gasoso coletadas em chaminés dos fornos de clínquer n<sup>os</sup> 1

e 2 da CCRG, durante a realização de testes sem a alimentação de resíduos - Testes em branco (TB), em atendimento às exigências das normas de licenciamento ambiental.

Para a composição do grupo de dados foram considerados os parâmetros que dispunham de pelo menos três resultados de emissões atmosféricas medidos em chaminé e com concentrações superiores aos limites de detecção dos métodos analíticos utilizados, dentre as quatro campanhas realizadas. Por não se dispor de informações operacionais detalhadas relativas ao integral desenvolvimento das campanhas optou-se por não excluir os dados que, aparentemente, se mostraram não representativos das condições normais de funcionamento do processo produtivo.

A partir da tabulação dos dados para obtenção das variabilidades das taxas médias de emissão de cada um dos metais pesados selecionados, foi possível calcular a razão entre os máximos e mínimos valores médios dessas emissões, desconsiderando-se valores no limite de detecção do método de análise, e classificar os resultados obtidos.

Chama a atenção, particularmente, os resultados obtidos para os metais pesados chumbo e arsênio. O chumbo, pelas características próprias de sua média volatilidade, conforme classificação por parte dos autores pesquisados e referidos no capítulo 4, não causa estranheza por exibir alta variabilidade, expressa segundo o critério adotado. No entanto, a taxa média de emissão na campanha de abril de 2001, mostra-se bastante acima da média das duas outras consideradas.

Chama também a atenção, guardadas as devidas considerações por se tratar de análise sem o rigor estatístico, o comportamento apresentado pelo metal refratário ou não volátil arsênio, com variabilidade da ordem de 55 vezes. Analisando-se esses resultados de maneira mais cuidadosa percebe-se que o valor da taxa média de emissão que fugiu da normalidade refere-se à mesma campanha já comentada, quando da explanação relativa ao mercúrio e agora há pouco em relação ao chumbo. Visto sob esse aspecto percebe-se que o níquel também exibe um comportamento que não seria de se esperar de um metal refratário, com taxa média de emissão nessa mesma campanha maior que duas vezes a média das outras duas consideradas.

Baseado nessas análises e considerando-se os resultados das emissões atmosféricas do mercúrio, anteriormente discutido, coloca-se a possibilidade de que as emissões do arsênio, níquel, chumbo e mesmo do manganês possam ter sofrido alterações decorrentes de características localizadas da jazida de matérias-primas utilizadas na época dessas avaliações.

**Tabela 7.20** - Taxas médias de emissão de metais pesados em chaminés dos fornos n<sup>os</sup> 1 e 2 da CCRG, no período de julho de 1996 a setembro de 2002, utilizando resíduos como substitutos energéticos parciais

Substâncias	Taxas médias de emissão em testes com resíduos (g/h)						Razão max/min	
	1	1	1	2	Variabilidade			
inorgânicas	JUL/96	JUN/98	SET/98	SET/02	30,0%			
	15,0%	30,0%			mínima	média	máxima	
<b>Antimônio</b>	<b>1,25</b>	<b>0,55</b>	<b>0,59</b>	<sup>(2)</sup> <b>0,39</b>	0,39	0,51	0,59	<1,5
<b>Arsênio</b>	<b>1,25</b>	<b>0,55</b>	<b>0,59</b>	15,34		15,34		np
<b>Chumbo</b>	<sup>(2)</sup> <b>1,25</b>	9,6	24,58	5,84	5,84	13,34	24,58	4,2
<b>Cobre</b>	<sup>(2)</sup> <b>1,25</b>	2,76	<sup>(2)</sup> <b>2,76</b>	2,2	2,20	2,48	2,76	1,3
<b>Cromo</b>	1,51	4,87	1,72	2,08	1,72	2,89	4,87	2,8
<b>Manganês</b>	2,08	7,77	2,47	5,31	2,47	5,18	7,77	3,1
<b>Níquel</b>	<b>1,92</b>	44,03	<sup>(2)</sup> <b>0,76</b>	2,13	2,13	23,08	44,03	20,7

Obs.: 1 - np – não pertinente;

2 - parte das amostras no limite de detecção do método analítico e parte acima desse valor;

3 - resultados em negrito emissão considerada no limite de detecção do método analítico

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002a), BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001b), CETESB (1996, 1999, 2004, 2004a) e TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996, 1998, 1998a)

Novamente foi adotado o critério de seleção dos resultados que se mostraram acima dos limites de detecção dos métodos analíticos utilizados. No entanto, devido à escassez de dados, foram considerados, no mínimo dois resultados dentre os três possíveis, que atendessem ao critério, visto que para efeito de cálculo da variabilidade não foi incluída a campanha de julho de 1996, cuja substituição de combustível pela mistura de resíduos foi efetuada em taxa menor (15%).

Em relação aos resultados do teste de julho de 1996 não há possibilidade de se efetuar qualquer análise. Com relação aos demais resultados nota-se, nas campanhas de junho e setembro de 1998, significativas

alterações nas taxas médias de emissão, respectivamente, para níquel e chumbo, e de arsênio em setembro de 2002. Dada à limitação de dados não há muitas possibilidades de análise, no entanto, considerando-se a hipótese levantada em relação aos testes sem utilização de resíduos, fica colocada a possível contribuição das matérias-primas naturais, em decorrência de alterações localizadas das características químicas.

**Tabela 7.21** – Razões entre as taxas médias de emissão de metais pesados (g/h), mínimas, médias e máximas, relativas às variabilidades obtidas em testes com e sem a utilização de resíduos nos fornos n<sup>os</sup> 1 e 2 da CCRG, no período de junho de 1997 a setembro de 2002

Metais Pesados	Variabilidade						Razões entre as taxas de emissão médias		
	Testes						Min	Med	Max
	sem resíduos			com resíduos					
	min	med	max	Min	Med	Max	min	med	max
<b>Manganês</b>	3,10	6,54	9,72	2,47	5,18	7,77	0,8	0,8	0,8
<b>Cobre</b>	3,53	6,32	11,42	2,2	2,48	2,76	0,6	0,4	0,2
<b>Cromo</b>	0,81	1,83	3,38	1,72	2,89	4,87	2,1	1,6	1,4
<b>Chumbo</b>	1,48	5,79	17,22	5,84	13,34	24,58	3,9	2,3	1,4
<b>Níquel</b>	4,42	8,02	12,98	2,13	23,08	44,03	0,5	2,9	3,4
<b>Arsênio</b>	1,78	35,35	98,57		15,34			0,4	

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002, 2002a), BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001, 2001b), CETESB (1996, 1999, 2002, 2003, 2004, 2004a) e TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996,1997, 1998, 1998a)

Da observação dos resultados mostrados na Tabela 7.21, em relação às razões obtidas entre as várias taxas médias de alimentação dos metais pesados selecionados para as condições de teste com e sem a utilização de resíduos como substitutos energéticos parciais, verifica-se que o manganês, em todas as campanhas realizadas apresentou a mesma proporção de redução das emissões quando utilizando a mistura de resíduos em comparação com a utilização dos combustíveis fósseis tradicionais. Tomando por base as taxas de alimentação das correntes de entrada apresentadas na Tabela 7.15, para exemplificar a razão dessa redução, nota-se que a taxa do

metal alimentada pela corrente do *blend* era, em média, 35,3% menor que pela via do coque de petróleo.

No caso do níquel o que se observa é que o aporte do metal pelas vias da *farinha* crua ou do pó recirculado no forno apresentam-se numa mesma magnitude de contribuição mássica, porém, algo em torno de 14 vezes menor que a participação do coque. Este por sua vez exhibe, no caso analisado, contribuição que é quase o dobro do aporte do metal pelo *blend*. Esse fato, de certa forma explicaria a redução observada quando comparados os dados das menores médias com e sem a utilização do resíduo. Maiores investigações e informações mais detalhadas acerca das características das correntes de alimentação, bem como sobre eventual alteração momentânea da qualidade da *farinha* seriam necessárias afim de elucidar o comportamento apresentado pelo metal. Os resultados apresentados pelo chumbo não deixam margem para discussão, tanto pelo fato de tratar-se de metal semi-volátil, bem como pela participação relativa do *blend* nas correntes de alimentação do metal no forno.

## 7.6 – Emissões de ácido clorídrico e cloro

Em relação às emissões de ácido clorídrico (HCl) e cloro livre (Cl<sub>2</sub>) relativas à campanha do mês de agosto de 1995, sem a utilização de resíduos, os resultados apesar de mostrarem certa coerência entre as três amostras coletadas, atingiram níveis muito mais elevados que as demais avaliações realizadas. Dentre as informações pesquisadas não estavam disponíveis os teores de cloro nas correntes alimentadas no forno rotativo, impossibilitando qualquer análise.

A mesma falta de informações pode ser referida com respeito à campanha de junho de 1998, com alimentação do *blend*, cujas emissões também se mostraram coerentes entre as amostras coletadas, porém, sem que houvesse parâmetros para sua correlação com os demais resultados apresentados.

Com relação às campanhas de julho de 1996 e setembro de 1998 observa-se nesta última, em razão do teor médio de cloro ser 10,3 vezes maior que a primeira, que os níveis de emissão de ácido clorídrico e cloro livre se



mostraram, como seria de se esperar, significativamente mais elevados. Vale observar que na primeira campanha referida a taxa de substituição do combustível fóssil pela mistura de resíduos foi planejada para atingir 15% e na segunda 30%. No caso do HCl os níveis de emissão na campanha de 1998 foram aproximadamente 22,2 vezes maiores que aquelas de 1996, enquanto que as emissões de Cl<sub>2</sub> chegaram a ser em média 13,3 vezes maiores.

**Tabela 7.22** – Concentrações e taxas de emissão (TE) de ácido clorídrico (HCl) e cloro livre (Cl<sub>2</sub>) em chaminé do forno n° 1 da CCRG, sem e com a utilização de resíduos em substituição energética parcial, no período de agosto de 1995 a setembro de 1998

Parâmetros	FORNO 1												
	Teste sem resíduos			Testes com resíduos									
	AGO/95			JUL/96 – 15%			JUN/98 – 30%			SET/98 – 30%			
	min	med	max	min	med	max	min	med	max	min	med	max	
HCl (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,09	0,30	0,30	0,30	1,65	1,95	2,44	
TE HCl (g/h) <sup>(2)</sup>	0,00	0,00	0,00	12,84	13,33	14,10	45,68	46,00	46,31	266,50	295,58	345,64	
Cl <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>(3)</sup>	11,58	13,50	15,02	0,08	0,15	0,30	0,30	0,30	0,30	1,04	2,05	3,49	
TE Cl <sub>2</sub> (g/h) <sup>(4)</sup>	2020,00	2346,67	2610,00	12,84	23,63	45,02	45,68	46,00	46,31	167,47	313,65	542,11	
O <sub>2</sub> (%) <sup>(5)</sup>	9,00	9,27	9,50	9,80	10,07	10,20	9,60	9,80	10,00	8,80	9,20	9,80	
farinha (t/h)	93,70	94,90	96,00	98,20	98,40	98,60		nd		97,80	98,00	98,20	
óleo (kg/h)		<sup>(6)</sup> nd		4952,00	5064,00	5176,00		nd		4258,90	4347,20	4435,50	
coque (kg/h)		<sup>(6)</sup> nd						nd		0,00	0,00	0,00	
blend (kg/h)		<sup>(7)</sup> np		1040,00	1064,00	1088,00		nd		2679,00	2819,20	2959,40	
cloro (%) <sup>(8)</sup>	np	<sup>(7)</sup> np		0,18	0,18	0,18		nd		1,71	1,85	2,06	

Obs.:1 - concentração de ácido clorídrico, corrigida a 10% de O<sub>2</sub>;

2 - TE - taxa de emissão de ácido clorídrico;

3 - concentração de cloro livre, corrigida a 10% de O<sub>2</sub>;

4 - TE - taxa de emissão de cloro livre;

5 - concentração de oxigênio na chaminé do forno rotativo;

6 - informação não disponível;

7 - informação não pertinente;

8 - teor de cloro no *blend*, expresso em massa

Fonte: CETESB (1996, 1999) e TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996, 1998, 1998a)

O teor médio de cloro na *farinha* alimentada durante as medições de julho de 1996 foi de 109 ppm, resultando na alimentação média de cloro por essa corrente no sistema-forno de aproximadamente 10,73 kg Cl/hora, ou 84,85% da entrada total do halogênio pelas vias da *farinha* mais a mistura de

resíduos. A título ilustrativo, se for considerado que a *farinha* alimentada durante as medições da campanha de amostragem de setembro de 1998 também apresentasse teor médio de cloro de 109 ppm a entrada por essa via mássica representaria 10,68 kg/hora ou somente 17,00% do total, enquanto que a mistura de resíduos responderia por 52,16 kg Cl/hora ou 83,00% do total alimentado.

**Tabela 7.23** – Concentrações e taxas de emissão (TE) de ácido clorídrico (HCl) e cloro livre (Cl<sub>2</sub>) em chaminé do forno n<sup>o</sup> 2 da CCRG, sem e com a utilização de resíduos em substituição energética parcial, no período de junho de 1997 a setembro de 2002

Parâmetros	FORNO 2								
	Testes sem resíduos						Teste com resíduos		
	JUN/97			ABR/01			SET/02 – 30%		
	min	med	max	min	med	max	min	med	max
HCl (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	0,07	0,07	0,08	0,38	0,40	0,44	0,53	0,61	0,67
TE (g/h) <sup>(2)</sup>	11,38	11,45	11,56	60,91	61,53	62,34	77,32	77,70	78,21
Cl <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>(3)</sup>	0,07	0,07	0,08	0,38	0,40	0,44	0,53	0,61	0,67
TE (g/h) <sup>(4)</sup>	11,38	11,45	11,56	60,91	61,53	62,34	77,32	77,70	78,21
O <sub>2</sub> (%) <sup>(5)</sup>	9,80	10,27	11,00	11,20	11,47	12,00	12,80	13,70	14,30
<i>farinha</i> (t/h)		<sup>(6)</sup> nd			99,40		99,50	99,57	99,70
óleo (kg/h)		<sup>(6)</sup> nd			7236,00			np	
coque (kg/h)		<sup>(6)</sup> nd			np		5204,30	5477,63	5924,30
<i>blend</i> (kg/h) <sup>(7)</sup>		<sup>(7)</sup> np			nd		3344,60	3505,43	3654,10
cloro (%) <sup>(8)</sup>							0,34	0,51	0,95

Obs.: 1 - concentração de ácido clorídrico, corrigida a 10% de O<sub>2</sub>;

2 - TE - taxa de emissão de ácido clorídrico;

3 - concentração de cloro livre, corrigida a 10% de O<sub>2</sub>;

4 - TE - taxa de emissão de cloro livre;

5 - concentração de oxigênio na chaminé do forno rotativo;

6 - informação não disponível;

7 - informação não pertinente;

8 - teor de cloro no *blend*, expresso em massa

Fonte: CETESB (2002, 2004a), BIOAGRI AMBIENTAL (2002a), BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001) e TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1997)

Com relação aos resultados obtidos nas amostragens do forno n<sup>o</sup> 2, novamente a análise ficará prejudicada, pois nas campanhas de junho de 1997 e abril de 2001 não foram disponibilizados os teores de cloro nas correntes mássicas alimentadas. No entanto, observa-se que os resultados em cada uma dessas séries amostradas se mostraram coerentes entre si.

No teste de queima de setembro de 2002, apesar do teor médio de cloro dosado na mistura de resíduos ser de 0,51% em massa, durante as coletas das amostras para avaliação dos parâmetros HCl e Cl<sub>2</sub> o teor médio do halogênio no *blend* foi de 0,39% em massa.

Apesar da falta de maiores elementos para propiciar uma análise mais abrangente acerca desses parâmetros, pode-se verificar pelos resultados obtidos nos testes sem alimentação de resíduos realizado em abril de 2001 e naquele com alimentação de resíduos em setembro de 2002 que as emissões de ácido clorídrico e de cloro livre mostraram-se bastante próximas, permitindo afirmar, dentro das limitadas condições da análise que, aparentemente, a utilização dos resíduos em substituição parcial ao combustível fóssil não resultou em incremento significativo às emissões atmosféricas.

## 7.7 – Emissões de ácido fluorídrico e flúor total

**Tabela 7.24** – Concentrações e taxas de emissão (TE) de ácido fluorídrico (HF) e fluoretos totais (F<sup>-</sup>) em chaminé do forno n<sup>o</sup> 2 da CCRG, sem e com a utilização de resíduos em substituição energética parcial, em abril de 2001 e setembro de 2002

Parâmetros	FORNO 2					
	Teste sem resíduos			Teste com resíduos		
	ABR/01			SET/02 – 30%		
	mínima	média	máxima	mínima	média	máxima
F <sup>-</sup> total (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	0,02	0,03	0,03	0,06	0,07	0,08
TE (g/h) <sup>(2)</sup>	<b>3,24</b>	<b>3,65</b>	<b>4,39</b>	<b>9,52</b>	<b>11,24</b>	<b>12,33</b>
HF (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>(3)</sup>	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
TE (g/h) <sup>(4)</sup>	<b>1,71</b>	<b>2,12</b>	<b>2,91</b>	<b>3,27</b>	<b>4,79</b>	<b>5,83</b>
O <sub>2</sub> (%) <sup>(5)</sup>	12,00	12,40	12,80	11,90	12,23	12,60
Farinha (t/h)	<sup>(6)</sup> nd	99,40	nd	99,20	<sup>(7)</sup> 99,30	99,50
Coque (kg/h)	<sup>(6)</sup> nd	7236,00	nd	5028,00	5120,33	5205,00
Blend (kg/h)		<sup>(8)</sup> np		3237,80	<sup>(9)</sup> 3608,27	3816,00

Obs.:1 - concentração de fluoretos totais, corrigida a 10% de O<sub>2</sub>;

2 - TE - taxa de emissão de fluoretos;

3 - concentração de ácido fluorídrico, corrigida a 10% de O<sub>2</sub>;

4 - TE - taxa de emissão de ácido fluorídrico;

5 - concentração de oxigênio na chaminé do forno rotativo;

6 - informação não disponível;

7 - teor médio de flúor na *farinha* de 24,9 ppm;

8 - informação não pertinente;

9 - teor médio de flúor no *blend* de 193 ppm

Fonte: CETESB (2002, 2004a), BIOAGRI AMBIENTAL (2002a) e BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001)

Da verificação dos resultados obtidos nas amostragens efetuadas para os parâmetros ácido fluorídrico (HF) e fluoretos totais (F<sup>-</sup>) poder-se-ia, inadvertidamente pensar que a utilização da mistura de resíduos incrementou as emissões atmosféricas. Tal afirmação baseada simplesmente no fato de que as emissões de F<sup>-</sup> e de HF, avaliadas com base nas taxas de emissão foram, respectivamente, 3,1 e 2,3 vezes maiores quando utilizada a mistura de resíduos, estará desconsiderando os teores do halogênio presentes na matéria-prima. Para os testes realizados em setembro de 2002, nos quais o teor médio de flúor na *farinha* era de 24,9 ppm, a alimentação do halogênio, em decorrência do fluxo de massa considerado, representou mais de 78% em massa do total entrando no sistema pelas vias das matérias-primas e mistura de resíduos (22%). Essa relação é da ordem de 3,6 vezes, e portanto, poderia justificar as diferenças entre as duas séries de teste, a depender do teor de flúor na *farinha* alimentada na campanha de abril de 2001.

### **7.8 - Emissões de compostos orgânicos perigosos**

Ao longo do trabalho discutiu-se as características do sistema-forno de produção de clínquer que permitem considerá-lo, do ponto de vista teórico, como um processo com todas as condições técnico-operacionais e, portanto, adequado para destruir as frações orgânicas dos resíduos alimentados, via maçarico principal, como substitutos energéticos parciais.

Os resultados obtidos nas campanhas de amostragens utilizando os PCOP's de escolha, confirmaram a eficiência dos sistemas-fornos testados em promover adequadamente a oxidação das frações orgânicas alimentadas, conforme indicadores de EDR mostrados na Tabela 7.25.

Nas Tabelas 26 e 27 são apresentadas informações básicas relativas às emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos totais verificadas durante alguns dos testes realizados. Cabe aqui observar que para o monitoramento contínuo dos parâmetros indicadores da performance da combustão (CO e HCT) e de controle do processo (NO<sub>x</sub>) a CCRG dispõe de instrumentação e *software* que corrige continuamente essas emissões a 7% de oxigênio, em base seca.

**Tabela 7.25** – Resultados obtidos em testes de eficiência de destruição e de remoção (EDR) de compostos orgânicos, nos fornos n<sup>os</sup> 1 e 2 da CCRG, no período de julho de 1996 a setembro de 2002

Sistema testado			FORNO 1		FORNO 2	
Taxa de substituição energética			15%	30%	30%	30%
Data			JUL/96	SET/98	MAR/01	SET/02
PCOP <sup>(1)</sup> utilizado			<sup>(2)</sup> CCl <sub>4</sub>	CCl <sub>4</sub>	CCl <sub>4</sub>	<sup>(3)</sup> CHCl <sub>3</sub>
<b>Concentração de PCOP no blend</b>	mg/kg	min	180,90	108,00	199,30	332,00
		med	191,53	240,00	421,18	429,00
		max	199,10	464,00	628,30	523,00
<b>Alimentação de blend</b>	kg/h	min	919,00	2679,00	2665,00	3468,00
		med	1064,00	2819,20	2849,92	3544,72
		max	1111,00	2959,40	3005,00	3584,00
<b>Alimentação de Óleo/coque</b>	kg/h	min	4891,00	4258,90	4796,00	5460,00
		med	5064,00	4347,20	4945,12	5490,00
		max	5262,00	4435,50	5350,00	5510,00
<b>farinha</b>	t/h	min	98,00	97,80	100,00	99,30
		med	98,40	98,00	100,00	99,56
		max	98,50	98,20	100,00	99,90
<b>Emissão de PCOP</b>	ng/Nm <sup>3</sup>	min	5,76	95,90	59,00	52,68
		med	5,97	123,97	59,75	233,35
		max	6,06	319,00	60,00	855,40
<b>EDR<sup>(4)</sup></b>	%	min	>99,9995	99,9913	>99,9985	99,9892
		med	>99,9995	>99,9965	>99,9991	99,9970
		max	>99,9996	>99,9989	>99,9994	>99,9992
<b>Vazão dos gases</b>	Nm <sup>3</sup> /h	med	155523	145995	179948	194774

Obs.: 1 - PCOP - principal composto orgânico perigoso;

2 - CCl<sub>4</sub> - tetracloreto de carbono;

3 - CHCl<sub>3</sub> - clorofórmio;

4 - EDR - Eficiência de Destruição e Remoção

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002a), BIOAGRI LABORATÓRIOS – DIVISÃO AMBIENTAL (2001), CETESB (2004a) e TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996, 1998, 1998b)

**Tabela 7.26** – Concentrações de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos totais (HCT) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), expressas em partes por milhão (ppm), e de oxigênio (O<sub>2</sub>), expressas em percentual (%), durante testes em branco e de queima realizados no forno n° 1 da CCRG, no período de 1996 a 2002

FORNO 1																
S/BLEND								C/BLEND								
TB F1 - SET/02								TQ F1 - JUL/96 - 15%								
Conc.	Far (t/h)	Óleo (/h)	Coque (t/h)	CO	O <sub>2</sub>	HCT	NO <sub>x</sub>	Conc.	Far (t/h)	Óleo (kg/h)	Coque (kg/h)	Blend (kg/h)	CO	O <sub>2</sub>	HCT	NO <sub>x</sub>
Mínima	96,30		7200	8,00	11,00	0,39	137,50	Mínima	98,00	4891		919	23,20	8,30	0,24	ND
Média	97,06		7511	39,83	12,28	0,72	267,75	Média	98,40	5064		1064	28,00	8,90	0,63	ND
Máxima	97,60		7900	57,00	13,60	0,94	389,71	Máxima	98,50	5262		1111	37,90	9,40	1,18	ND
TQ F1 - OUT/98 - 30%																
Conc.	Far (t/h)	Óleo (kg/h)	Coque (kg/h)	Blend (kg/h)	CO	O <sub>2</sub>	HCT	NO <sub>x</sub>								
Mínima	97,80	4259		2679	20,10	8,50	1,18	128,78								
Média	98,00	4347		2819	22,40	8,90	1,41	204,29								
Máxima	98,20	4436		2959	24,70	9,30	1,65	279,79								

Obs.: ND – dado não disponível

Fonte: CETESB (1996, 1999, 2003)

**Tabela 7.27** – Concentrações de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos totais (HCT) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), expressas em partes por milhão (ppm), e de oxigênio (O<sub>2</sub>), expressas em percentual (%), durante pré-testes, testes em branco e de queima realizados no forno n° 2 da CCRG, no período de 2001 a 2002

FORNO 2																
S/BLEND								C/BLEND								
PT F2 – MAR/01								PT F2 – MAR/01								
Conc.	Far (t/h)	Óleo (/h)	Coque (t/h)	CO	O <sub>2</sub>	HCT	NO <sub>x</sub>	Conc.	Far (t/h)	Óleo (kg/h)	Coque (kg/h)	Blend (kg/h)	CO	O <sub>2</sub>	HCT	NO <sub>x</sub>
Mínima	100,00	1400	5000	36,40	12,00	0,63	234,93	Mínima	100,00	1110	3400	1890	33,70	9,20	0,79	111,57
Média	100,00	1413	5068	40,80	13,05	0,90	286,98	Média	100,00	1335	3400	2680	54,60	11,44	1,05	198,65
Máxima	100,00	1418	5170	44,70	14,20	1,10	322,93	Máxima	100,00	1800	3400	3107	123,00	13,60	1,34	321,36
PT F2 – MAR/01								PT F2 – MAR/01								
Conc.	Far (t/h)	Óleo (/h)	Coque (t/h)	CO	O <sub>2</sub>	HCT	NO <sub>x</sub>	Conc.	Far (t/h)	Óleo (kg/h)	Coque (kg/h)	Blend (kg/h)	CO	O <sub>2</sub>	HCT	NO <sub>x</sub>
Mínima	100,00		6550	53,00	10,80	1,65	313,50	Mínima	100,00		4700	2435	22,20	10,70	0,39	140,64
Média	100,00		6681	70,60	12,22	1,87	381,70	Média	100,00		5156	3020	38,47	12,75	0,90	209,20
Máxima	100,00		6930	90,60	13,60	2,20	458,86	Máxima	100,00		5650	3500	51,00	13,80	1,18	281,29
PT- F2 – MAR/01								TQ F2 - SET/02 - 30%								
Conc.	Far (t/h)	Óleo (/h)	Coque (t/h)	CO	O <sub>2</sub>	HCT	NO <sub>x</sub>	Conc.	Far (t/h)	Óleo (kg/h)	Coque (kg/h)	Blend (kg/h)	CO	O <sub>2</sub>	HCT	NO <sub>x</sub>
Mínima	100,00		6550	51,20	13,00	1,10	308,79	Mínima	98,30		1960	2864	15,40	12,90	0,71	91,14
Média	100,00		6704	55,41	13,26	1,25	379,79	Média	99,52		5204	3404	40,54	15,79	1,56	223,38
Máxima	100,00		6850	58,40	13,60	1,41	424,29	Máxima	100,80		5970	4122	108,00	19,40	2,99	638,79
TB F2 – MAI/01																
Conc.	Far (t/h)	Óleo (/h)	Coque (t/h)	CO	O <sub>2</sub>	HCT	NO <sub>x</sub>									
Mínima	100,00		6730	24,00	13,30	0,71	168,14									
Média	100,00		6857	44,00	16,64	1,13	293,84									
Máxima	100,00		6960	50,00	17,20	1,49	347,29									
TB F2 – JUN/01																
Conc.	Far (t/h)	Óleo (/h)	Coque (t/h)	CO	O <sub>2</sub>	HCT	NO <sub>x</sub>									
Mínima	100,00		6900,00	37,00	16,00	1,18	201,93									
Média	100,00		7028,00	43,87	16,50	1,33	326,46									
Máxima	100,00		7200,00	50,00	17,00	1,41	376,36									

Obs.: ND – dado não disponível

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001, 2001a, 2001b), CCRG (2002), CETESB (2002, 2004a)

Durante os testes realizados no forno nº 1 o maior valor médio de emissão de monóxido de carbono foi de 39,83 ppm<sub>v</sub>, sem a utilização da mistura de resíduos, ao longo do teste em branco de setembro de 2002. Nessa mesma oportunidade obteve-se também a maior concentração de CO registrada dentre todos os testes realizados nesse forno, atingindo 57,00 ppm<sub>v</sub>. Para o parâmetro hidrocarbonetos totais a maior média foi de 1,80 ppm<sub>v</sub> e a máxima concentração foi de 2,10 ppm<sub>v</sub>, com utilização de 30% de substituição energética pela mistura de resíduos em teste de queima de outubro de 1998.

Observe-se que para efeito de verificação da conformidade com os limites legais máximos permitidos esses resultados (HCT) foram corrigidos a 10% de oxigênio, resultando, respectivamente, nas concentrações de 1,41 ppm<sub>v</sub> e 1,65 ppm<sub>v</sub>, as quais apresentaram-se muito abaixo do valor limite de 20 ppm<sub>v</sub>.

Para o forno nº 2 obteve-se como maior concentração média de CO e de HCT, respectivamente, 70,60 ppm<sub>v</sub> e 2,38 ppm<sub>v</sub>, durante o pré-teste realizado sem a utilização dos resíduos em março de 2001. Os valores máximos de concentração registrados para esses parâmetros foram de 123,00 ppm<sub>v</sub> para o monóxido de carbono durante o pré-teste com substituição energética de 30% pela mistura de resíduos e de 3,80 ppm<sub>v</sub> de hidrocarbonetos totais durante o teste de queima de setembro de 2002. Os valores de HCT corrigidos a 10% de O<sub>2</sub> resultaram, respectivamente, em 2,20 ppm<sub>v</sub> e 2,99 ppm<sub>v</sub>.

Conclui-se, portanto, que os níveis de emissão para esses parâmetros, independentemente da utilização ou não de resíduos, apresentaram-se bastante abaixo dos limites internacionalmente aceitos (CO – 100 ppm<sub>v</sub> e HCT – 20 ppm<sub>v</sub>, corrigidos a 7% de O<sub>2</sub>, bs) como indicadores da performance da combustão dos sistemas testados, ainda que, conforme comentado, pudessem sofrer a influência da presença de matéria orgânica integrante da *farinha* alimentada. As eficiências de destruição e remoção dos compostos orgânicos testados atingiram níveis considerados seguros do ponto de vista da manutenção da segurança ambiental e da saúde pública.

## 7.9 - Emissões de dioxinas e furanos



Segundo as análises efetuadas pelo órgão ambiental, os resultados obtidos nas amostragens em chaminés para avaliação das emissões de dioxinas e furanos apresentaram algumas inconsistências. Essas poderiam, segundo as hipóteses levantadas, estarem relacionadas a problemas ocorridos durante a coleta e/ou análises das amostras devido à massa de alguns isômeros presentes nas provas em branco de campo terem se mostrado com valores superiores às massas obtidas naquelas coletadas em chaminé.

**Tabela 7.28** – Massas coletadas (ng) em amostragens em chaminé do forno nº 2 da CCRG nos meses de junho e setembro de 2002 para avaliação das emissões atmosféricas equivalentes de dioxinas e furanos

Parâmetros	FORNO 2										
	Branco	JUN/02				SET/02					
		Com resíduo		Sem resíduo		Com resíduo (30%)					
		30%		Am1	Am2	Am 1		Am 2		Am 3	
		Am1	Am2			Am	Branco	Am	Branco	Am	Branco
2,3,7,8 TCDD	0,04	0,0400	0,0089	0,0025	0,0400	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
2,3,7,8 PeCDD	0,12	0,1200	0,0026	0,0026	0,1200	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026
2,3,7,8 HxCDD	0,12	0,1200	0,0090	0,0090	0,1200	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090
2,3,7,8 HpCDD	0,12	0,1200	0,0280	0,0030	0,1200	0,0079	0,0057	0,0025	0,0025	0,0089	0,0210
OCDD	0,24	0,2400	0,0480	0,0250	0,2400	0,0220	0,0140	0,0230	0,0170	0,0200	0,0110
2,3,7,8 TCDF	0,04	0,0400	0,1300	0,0600	0,0400	0,2900	0,3000	0,1100	0,1100	0,2600	0,0810
1,2,3,7,8 PeCDF	0,1	0,1000	0,0300	0,0120	0,1000	0,0520	0,0550	0,0200	0,0210	0,0460	0,0160
2,3,4,7,8 PeCDF	0,1	0,1000	0,0510	0,0026	0,1000	0,2800	0,1300	0,0780	0,1200	0,2400	0,0910
2,3,7,8 HxCDF	0,12	0,1200	0,0530	0,0165	0,1200	0,3860	0,4210	0,0999	0,1550	0,3070	0,1180
2,3,7,8 HpCDF	0,12	0,1200	0,0580	0,0060	0,1200	0,2120	0,2500	0,0059	0,0930	0,1860	0,0660
OCDF	0,36	0,3600	0,0310	0,0100	0,3600	0,2900	0,3300	0,0730	0,1200	0,2500	0,0630
Dioxinas e	0,19	0,1900	0,0573	0,0144	0,1900	0,2170	0,1470	0,0660	0,0930	0,1859	0,0718
O <sub>2</sub> (%)		11,4	11,4	11,2	11,2	11,9		14,0		12,0	
Volume (Nm <sup>3</sup> )		3,2577	2,9708	2,9709	3,0052	2,3075		2,3575		2,3393	

Obs.: resultados em negrito indicam que os valores obtidos estavam no limite de detecção do método analítico

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002b) e CETESB (2004a)

Ainda que tais valores não tenham sido validados pelo órgão ambiental, frente aos limites legais exigíveis, do ponto de vista do trabalho acadêmico optou-se por sua apresentação, através das Tabelas 7.28, 7.29 e 7.30, em razão de serem ilustrativos das emissões dessas fontes industriais e servirem para dar uma visão de seus níveis ainda que considerados os problemas eventualmente ocorridos durante as amostragens.

**Tabela 7.29** – Concentrações de dioxinas e furanos (ng/Nm<sup>3</sup> corrigidas a 11% de oxigênio) obtidas em amostragens em chaminé do forno nº 2 da CCRG nos meses de junho e setembro de 2002

Isômeros	FORNO 2							FTEQ	TOXICIDADE EQUIVALENTE À 2,3,7,8 TCDD						
	JUN/02				SET/02				JUN/02			SET/02			
	Com resíduo (30%)		Sem resíduo		Com resíduo (30%)				Com resíduo (30%)		Sem resíduo		Com resíduo (30%)		
	Am1	Am2	Am1	Am2	Am 1	Am 2	Am 3		Am1	Am2	Am1	Am2	Am 1	Am 2	Am 3
<b>2,3,7,8 TCDD</b>	<b>0,0130</b>	0,0031	<b>0,0009</b>	<b>0,0140</b>	0,0012	0,0015	0,0012	<b>1</b>	<b>0,0130</b>	0,0031	<b>0,0009</b>	<b>0,0140</b>	0,0012	0,0015	0,0012
<b>2,3,7,8 PeCDD</b>	<b>0,0380</b>	<b>0,0009</b>	<b>0,0009</b>	<b>0,0410</b>	0,0012	0,0016	0,0012	<b>0,5</b>	<b>0,0190</b>	<b>0,0005</b>	<b>0,0005</b>	<b>0,0205</b>	0,0006	0,0008	0,0006
<b>2,3,7,8 HxCDD</b>	<b>0,0380</b>	<b>0,0032</b>	<b>0,0031</b>	<b>0,0410</b>	0,0043	0,0055	0,0043	<b>0,1</b>	<b>0,0038</b>	<b>0,0003</b>	<b>0,0003</b>	<b>0,0041</b>	0,0004	0,0006	0,0004
<b>2,3,7,8 HpCDD</b>	<b>0,0380</b>	0,0098	<b>0,0010</b>	<b>0,0410</b>	0,0014	0,0015	0,0032	<b>0,01</b>	<b>0,0004</b>	0,0001	<b>0,0000</b>	<b>0,0004</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>OCDD</b>	<b>0,0770</b>	0,0168	0,0086	<b>0,0810</b>	0,0038	0,0036	0,0043	<b>0,001</b>	<b>0,0001</b>	0,0000	0,0000	<b>0,0001</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>2,3,7,8 TCDF</b>	<b>0,0130</b>	0,0456	0,0206	<b>0,0140</b>	0,0014	0,0018	0,0850	<b>0,1</b>	<b>0,0013</b>	0,0046	0,0021	<b>0,0014</b>	0,0001	0,0002	0,0085
<b>1,2,3,7,8 PeCDF</b>	<b>0,0320</b>	0,0105	0,0041	<b>0,0340</b>	0,0012	0,0015	0,0142	<b>0,05</b>	<b>0,0016</b>	0,0005	0,0002	<b>0,0017</b>	0,0001	0,0001	0,0007
<b>2,3,4,7,8 PeCDF</b>	<b>0,0320</b>	0,0179	<b>0,0009</b>	<b>0,0340</b>	0,0714	0,0016	0,0708	<b>0,5</b>	<b>0,0160</b>	0,0090	<b>0,0005</b>	<b>0,0170</b>	0,0357	0,0008	0,0354
<b>2,3,7,8 HxCDF</b>	<b>0,0380</b>	0,0186	0,0057	<b>0,0410</b>	0,0057	0,0073	0,0898	<b>0,1</b>	<b>0,0038</b>	0,0019	0,0006	<b>0,0041</b>	0,0006	0,0007	0,0090
<b>2,3,7,8 HpCDF</b>	<b>0,0380</b>	0,0203	<b>0,0021</b>	<b>0,0410</b>	0,0029	0,0036	0,0570	<b>0,01</b>	<b>0,0004</b>	0,0002	<b>0,0000</b>	<b>0,0004</b>	0,0000	0,0000	0,0006
<b>OCDF</b>	<b>0,1150</b>	0,0109	0,0034	<b>0,1220</b>	0,0014	0,0018	0,0888	<b>0,001</b>	<b>0,0001</b>	0,0000	0,0000	<b>0,0001</b>	0,0000	0,0000	0,0001
<b>Dioxinas e Furanos</b>									<b>0,0595</b>	<b>0,0201</b>	<b>0,0050</b>	<b>0,0638</b>	0,0387	0,0047	0,0565

Obs.: resultados em negrito indicam que os valores obtidos estavam no limite de detecção do método analítico

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002b) e CETESB (2004a)

**Tabela 7.30** – Taxas de emissão (TE) de dioxinas e furanos obtidas em amostragens em chaminé do forno nº 2 da CCRG nos meses de junho e setembro de 2002

Isômeros	Unidade	FORNO 2						
		JUN/02				SET/02		
		Com resíduo		Sem resíduo		Com resíduo (30%)		
		Am1	Am2	Am1	Am2	Am1	Am2	Am3
<b>2,3,7,8 TCDD</b>	ug/h	<b>2,47</b>	0,59	<b>0,17</b>	<b>2,68</b>	0,21	0,21	0,21
<b>2,3,7,8 PeCDD</b>	ug/h	<b>7,40</b>	<b>0,17</b>	<b>0,18</b>	<b>8,04</b>	0,22	0,22	0,22
<b>2,3,7,8 HxCDD</b>	ug/h	<b>7,40</b>	<b>0,59</b>	<b>0,61</b>	<b>8,04</b>	0,75	0,76	0,76
<b>2,3,7,8 HpCDD</b>	ug/h	<b>7,40</b>	1,85	<b>0,20</b>	<b>8,04</b>	0,25	0,21	0,57
<b>OCDD</b>	ug/h	<b>14,80</b>	3,17	1,69	<b>16,10</b>	0,67	0,51	0,76
<b>2,3,7,8 TCDF</b>	ug/h	<b>2,47</b>	8,57	4,05	<b>2,68</b>	0,25	0,25	15,00
<b>1,2,3,7,8 PeCDF</b>	ug/h	<b>6,17</b>	1,98	0,81	<b>6,70</b>	0,21	0,21	2,52
<b>2,3,4,7,8 PeCDF</b>	ug/h	<b>6,17</b>	3,36	<b>0,18</b>	<b>6,70</b>	12,50	0,22	12,50
<b>2,3,7,8 HxCDF</b>	ug/h	<b>7,40</b>	3,50	1,11	<b>8,04</b>	1,00	1,01	15,90
<b>2,3,7,8 HpCDF</b>	ug/h	<b>7,40</b>	3,83	<b>0,41</b>	<b>8,04</b>	0,50	0,51	10,10
<b>OCDF</b>	ug/h	<b>22,20</b>	2,04	0,68	<b>24,10</b>	0,25	0,25	15,70
<b>Dioxinas e furanos</b>	<b>ug/h</b>	<b>11,48</b>	<b>3,78</b>	<b>0,97</b>	<b>12,46</b>	6,79	0,65	9,99

Obs.: resultados em negrito indicam que os valores obtidos estavam no limite de detecção do método analítico

Fonte: Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002b) e CETESB (2004a)

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, S. (2002). *Estudo da formação e destruição de dioxinas e furanos em fornos rotativos de produção de clínquer utilizados no co-processamento de resíduos*. 116p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1998). *Área de tecnologia* - laboratório. São Paulo. Relatórios de ensaio: 10030, 10045, 10058, 10189, 10315/16, 10468/69, 10504, 10661, 11032, 11491, 11525, 11533 e 11670.

\_\_\_\_\_. (2002). *O Coque de petróleo na indústria de cimento*. São Paulo. Catálogo técnico.

BARBOSA, A. M.; SANTOS, M. C. (1999). Utilização de resíduos industriais na Cimento Ribeirão Grande. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 5., 1999, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP. 1 CD-ROM.

BIOAGRI AMBIENTAL (2002). *Efluentes gasosos da chaminé do forno 1 - teste branco*. Piracicaba. Boletim de Análise: 4251/02, Ref. Proposta: 2862/02.

\_\_\_\_\_. (2002a). *Efluentes gasosos da chaminé do forno 2 - teste de queima*. Piracicaba. Boletim de Análise: 4071/02, Ref. Proposta: 2010/02.

\_\_\_\_\_. (2002b). *Efluentes gasosos da chaminé do forno 2*. Piracicaba. Boletim de Análise: 2802/02, Ref. Proposta: 1711/02.

BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001). *Efluentes gasosos da chaminé do forno 2 - CCRG - teste branco*. Piracicaba. Boletim de Análise: 1237/01, Ref. Proposta: 0288/01 QUI.

\_\_\_\_\_. (2001a). *Efluentes gasosos da chaminé do forno 2 - CCRG*. Piracicaba. Boletim de Análise: 0958/01, Ref. Proposta: 0480/01 QUI.

\_\_\_\_\_. (2001b). *Efluentes gasosos da chaminé do forno 2 - CCRG*. Piracicaba. Boletim de Análise: 1782/01, Ref. Proposta: 0792/01 QUI.

COMPANHIA DE CIMENTO RIBEIRÃO GRANDE (1998). *Teste de queima do forno 1*. Ribeirão Grande. Resultados condensados das amostragens em chaminé.

\_\_\_\_\_. (2002). *Teste de queima do forno 2*. Ribeirão Grande. Resultados condensados das amostragens em chaminé.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1991). S.A. *Indústrias Votorantim (Fábrica de Santa Helena)* - Votorantim - amostragem em chaminé forno 2 e 1. Sorocaba. Processo n.06/00351-91, 3v.

\_\_\_\_\_. (1992). S.A. *Indústrias Votorantim (Fábrica de Santa Helena)* - Votorantim - incineração de resíduos. Sorocaba. PA-1042-01.

\_\_\_\_\_. (1995). *Companhia de Cimento Ribeirão Grande* - licenciamento do forno 1 para co-processamento de resíduos. Sorocaba. Processo n.06/00711-95.

\_\_\_\_\_. (1996). *Plano de teste de queima*. São Paulo. Parecer técnico 032/96/EETD.

\_\_\_\_\_. (1997). S.A. *Indústrias Votorantim (Fábrica de Cimento Votorantim unidade 1)* - Votorantim - relatórios de amostragens em chaminé forno 2. Sorocaba. PA-0429-01.

\_\_\_\_\_. (1999). *Teste de queima*. São Paulo. Parecer técnico n.004/99/EEAR.

\_\_\_\_\_. (2000). *Cimento Rio Branco S/A (Fábrica de Salto de Pirapora)* - Salto de Pirapora - amostragem em chaminé forno 4. Sorocaba. PA-0053-2000. v.3/3.

\_\_\_\_\_. (2001). *Resultado de teste de queima de borracha de pneus em forno de clínquer*. São Paulo. Parecer técnico 084/2002/EEAR.

\_\_\_\_\_. (2002). *Análise de resultados de teste em branco para co-processamento*. São Paulo. Parecer técnico 416/01/EEAR.

\_\_\_\_\_. (2003). *Resultado de teste em branco do forno de clínquer*. São Paulo. Parecer técnico 542/2003/ETQR.

\_\_\_\_\_. (2004). *Teste de queima do forno 1*. São Paulo. Parecer técnico 128/2004/ETQR/ESRI.

\_\_\_\_\_. (2004a). *Teste de queima do forno 2*. São Paulo. Parecer técnico 137/2004/ETQR/ESRI.

TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996). *Relatório de estudo - Emissões gasosas da chaminé do forno 1 - teste de queima PCOP*. Paulínia. Referência do responsável: TSQ-96969MA.

\_\_\_\_\_. (1997). *Relatório de estudo - Emissões gasosas da chaminé do forno 2 - teste branco*. Paulínia. Referência do responsável: TSQ-971685.

\_\_\_\_\_. (1998). *Relatório de estudo - Emissões gasosas da chaminé do forno 1*. Paulínia. Referência do responsável: TSQ-981700.

\_\_\_\_\_. (1998a). *Relatório final de estudo - Emissões gasosas da chaminé do forno 1 - teste de queima*. Paulínia. Referência do responsável: TSQ-982716.

\_\_\_\_\_. (1998b). *Relatório final de estudo - Emissões gasosas da chaminé do forno 1 - teste de queima*. Paulínia. Referência do responsável: TSQ-983177/983178-versão 1.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1994). *Emission Factor documentation for AP-42, Section 11.6, Portland Cement Manufacturing - Final Report*. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/final/c11s07.pdf>>. Acesso em: 04 Apr. 2004.

## CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 8.1 - Conclusões

Em conformidade com as limitações determinadas pelo universo de dados disponíveis, no que concerne aos aspectos quali-quantitativos, pode-se formular as seguintes conclusões:

- não ficou evidenciado o incremento das emissões de material particulado através das chaminés dos fornos de clínquer em quantidades que pudessem ser atribuídas, inquestionavelmente, aos resíduos alimentados;
- o aumento das emissões médias remanescentes de material particulado provenientes do forno nº 2, aparentemente, correlacionam-se à perda da eficiência do equipamento de controle de poluição atmosférica e não ao uso da mistura de resíduos;
- no pré-teste efetuado no forno nº 2, em março de 2001, com a utilização da mistura de resíduos, não ficou evidenciada alteração nas quantidades de material particulado emitidas à atmosfera para as condições testadas com o equipamento de controle operando em condições normais;
- a partir dos resultados obtidos nos testes com alimentação de resíduos não ficou caracterizado o incremento das emissões de óxidos de enxofre que pudesse ser atribuído à substituição do componente energético. Foi possível verificar, dadas às características inerentes ao processo produtivo, a tendência de incorporação da parcela proveniente da queima de combustíveis e *blend* às estruturas químicas do clínquer, não repercutindo nas emissões atmosféricas;

- ficou evidenciada a relação das emissões de óxidos de enxofre com os teores do elemento presentes nas *farinhas* alimentadas através dos pré-aquecedores - torre de ciclones, dos sistemas-fornos amostrados;
- em relação às emissões de óxidos de nitrogênio ficou evidenciada a importância dos teores de nitrogênio presentes nos combustíveis e mistura de resíduos, em que pese os perfis de temperaturas que se desenvolvem no interior do forno e que favorecem a formação do NO<sub>x</sub> térmico. Vale destacar, com base nos resultados apresentados de queima de pneus como substituto energético, que essa pode ser uma alternativa promissora para a minimização das emissões de NO<sub>x</sub> provenientes de sistemas-fornos de produção de clínquer, bem como para promover a eliminação de importante passivo existente no país, com reflexos positivos sobre a saúde pública e meio ambiente, desde que mantidas adequadas condições de combustão no forno rotativo para completa oxidação dos materiais alimentados;
- apesar das baixas emissões atmosféricas de substâncias inorgânicas verificadas e do papel representado pela alimentação da mistura de resíduos no aporte de metais pesados nos sistemas-fornos testados, ficou evidenciada a importância das matérias-primas naturais no incremento, principalmente, de metais pesados na alimentação do forno rotativo, o qual é de difícil controle por estar associado às características qualitativas dos minerais disponíveis nas jazidas existentes;
- apesar das limitações relativas ao universo de dados foi possível identificar comportamentos semelhantes de determinados metais pesados alimentados nos fornos rotativos quando comparados a trabalhos de pesquisa realizados atendendo ao necessário rigor estatístico;
- a partir dos resultados obtidos nos testes de queima de compostos orgânicos perigosos ficou comprovada, para as condições avaliadas, a capacidade dos sistemas-fornos em promover suas destruições em níveis internacionalmente aceitos como suficientes para não repercutirem negativamente sobre o meio ambiente e a saúde pública;
- os dados disponíveis de emissão de monóxido de carbono e hidrocarbonetos totais permitiram concluir que os fornos n<sup>o</sup> 1 e n<sup>o</sup> 2 apresentaram adequadas condições de combustão, mantendo



consideráveis regularidades no transcorrer das campanhas de amostragens em chaminés analisadas;

- apesar dos posicionamentos não convergentes dos autores pesquisados quanto ao mínimo poder calorífico recomendado para substituição energética em processo de co-processamento, ficou evidenciada a gradual redução do poder calorífico da mistura de resíduos utilizada como combustível suplementar, limitada aos níveis impostos pelas normas ambientais regulamentadoras, sem aparentes reflexos nos níveis das emissões atmosféricas avaliadas, bem como nos parâmetros indicadores de performance da combustão;
- ficou evidenciada a viabilidade ambiental da prática do co-processamento em fornos de clínquer, a qual, desde que implementada segundo critérios e procedimentos técnicos, poderá se constituir numa importante ferramenta auxiliar no gerenciamento de determinados passivos e correntes geradoras de resíduos sólidos no país.

## 8.2 - Recomendações

Considera-se que alguns dos pontos abordados no decorrer deste trabalho de pesquisa merecem maior atenção:

- sugere-se o aprofundamento da discussão acerca das limitações impostas para o poder calorífico dos resíduos passíveis de utilização como substitutos energéticos em fornos de produção de clínquer, fundamentado em aspectos técnicos, de risco ao meio ambiente e à saúde da população, de maneira a buscar os elementos que possam confirmar a viabilidade da utilização dessa alternativa como instrumento de gestão de resíduos sólidos, não excluindo, de antemão, correntes que poderiam receber adequada destinação pela via do co-processamento;
- o aporte de substâncias inorgânicas no processo de produção de clínquer *portland* para cimento pode ser significativamente afetado pela corrente de alimentação das matérias-primas naturais, através, principalmente da

*farinha*. À exceção das normas específicas regulamentadoras da atividade de co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer, não foi identificada, na legislação nacional pesquisada, nenhuma diretriz específica relativa ao controle das emissões de substâncias inorgânicas provenientes do desenvolvimento da atividade cimenteira sem o uso de resíduos. Sugere-se a discussão desse potencial poluidor de forma a adequar as ações de controle, eventualmente, necessárias visando a garantia da qualidade ambiental e da saúde pública local e nas áreas de influência desses empreendimentos;

- a atividade cimenteira apresenta alto potencial para a emissão de óxidos de nitrogênio, um dos precursores da formação de ozônio. Propõe-se a discussão de alternativas e planos de metas objetivando a gradual redução dessas emissões, atendendo também a capacidade de suporte financeiro dos empreendimentos, visto que tais emissões decorrem, em grande parte, das condições inerentes ao processo produtivo. A esse respeito cabe destacar os resultados iniciais apresentados e, aparentemente, promissores obtidos quando da utilização de pneus inservíveis como substitutos energéticos parciais em sistema-forno de produção de clínquer;
- outro ponto entendido como merecedor de destaque, sob a ótica da garantia da qualidade ambiental e por consequência da saúde pública, e que transcende a discussão específica acerca do co-processamento de resíduos diz respeito à necessidade do conhecimento das magnitudes das emissões de dioxinas e furanos provenientes dos sistemas-fornos de produção de clínquer. A partir dessas informações poderão ser estabelecidas as estratégias cabíveis para o controle das emissões ou a manutenção dos níveis verificados, de forma a garantir a proteção da saúde pública e do meio ambiente, hoje e das futuras gerações.

**ANEXO A – Caracterização das correntes mássicas de  
entrada e saída dos sistemas-fornos de  
produção de clínquer da CCRG**

OBS.: A bibliografia citada refere-se àquela relacionada no Capítulo 7

TABELA 1

## TESTE DE QUEIMA DO FORNO 1 DA CCRG COM TAXA DE SUBSTITUIÇÃO DE 30% - SETEMBRO DE 1998

Substâncias inorgânicas	LD (ppm)	Blend (ppm)			Alimentação inorgânicos (g/h)				Farinha (ppm)			OC (ppm)	Pó coletado (ppm)			Clinker (ppm)		
		Am1	Am2	Am3	2,820	2,850	2,930	Média	Am1	Am2	Am3		Am1	Am2	Am3	Am1	Am2	Am3
<b>Sb</b>	1,600	20,000	20,000	20,000	56,400	57,000	58,600	57,33	<b>1,600</b>	<b>1,600</b>	<b>1,600</b>		<b>1,600</b>	<b>1,600</b>	<b>1,600</b>	<b>1,600</b>	<b>1,600</b>	<b>1,600</b>
<b>Pb</b>	2,000	1140,00	1100,00	960,000	3214,80	3135,00	2812,80	3054,20	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>		50,000	75,000	50,000	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	<b>25,000</b>
<b>Cu</b>	0,270	1780,00	1580,00	1290,00	5019,60	4503,00	3779,70	4434,10	<b>0,270</b>	<b>0,270</b>	<b>0,270</b>		<b>0,270</b>	25,000	<b>0,270</b>	50,000	50,000	50,000
<b>Cr</b>	0,305	1250,00	1300,00	1030,00	3525,00	3705,00	3017,90	3415,97	<b>0,305</b>	<b>0,305</b>	<b>0,305</b>		<b>0,305</b>	<b>0,305</b>	<b>0,305</b>	50,000	50,000	25,000
<b>Sn</b>	2,150	20,000	20,000	30,000	56,400	57,000	87,900	67,10	<b>2,150</b>	<b>2,150</b>	<b>2,150</b>		<b>2,150</b>	<b>2,150</b>	<b>2,150</b>	<b>2,150</b>	<b>2,150</b>	50,000
<b>Mn</b>	0,070	280,000	320,000	250,000	789,600	912,000	732,500	811,37	200,000	200,000	175,000		200,000	225,000	200,000	200,000	250,000	275,000
<b>Pt</b>	1,500	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	2,820	2,850	2,930	2,87	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	na	na	na	na	na	na
<b>Pd</b>	2,000	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	2,820	2,850	2,930	2,87	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	na	na	na	na	na	na
<b>Rh</b>	2,000	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	5,640	5,700	5,860	5,73	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>		<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>
<b>V</b>	0,250	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>	0,7050	0,7125	0,7325	0,72	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>		<b>0,250</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>
<b>As</b>	3,000	20,000	20,000	30,000	56,400	57,000	87,900	67,10	<b>3,000</b>	<b>3,000</b>	<b>3,000</b>		<b>3,000</b>	<b>3,000</b>	<b>3,000</b>	<b>3,000</b>	<b>3,000</b>	<b>3,000</b>
<b>Co</b>	0,300	<b>0,300</b>	<b>0,300</b>	<b>0,300</b>	0,846	0,855	0,879	0,86	<b>0,300</b>	<b>0,300</b>	<b>0,300</b>		<b>0,300</b>	<b>0,300</b>	<b>0,300</b>	<b>0,300</b>	<b>0,300</b>	<b>0,300</b>
<b>Ni</b>	0,500	140,000	140,000	120,000	394,800	399,000	351,600	381,80	<b>0,500</b>	<b>0,500</b>	<b>0,500</b>		<b>0,500</b>	<b>0,500</b>	<b>0,500</b>	<b>0,500</b>	<b>0,500</b>	<b>0,500</b>
<b>Se</b>	3,750	<b>3,750</b>	<b>3,750</b>	<b>3,750</b>	10,575	10,688	10,988	10,75	<b>3,750</b>	<b>3,750</b>	<b>3,750</b>		<b>3,750</b>	<b>3,750</b>	<b>3,750</b>	<b>3,750</b>	<b>3,750</b>	<b>3,750</b>
<b>Te</b>	2,050	<b>2,050</b>	<b>2,050</b>	<b>2,050</b>	5,781	5,843	6,007	5,88	<b>2,050</b>	<b>2,050</b>	<b>2,050</b>		<b>2,050</b>	<b>2,050</b>	<b>2,050</b>	<b>2,050</b>	<b>2,050</b>	<b>2,050</b>
<b>Cd</b>	0,125	<b>0,125</b>	<b>0,125</b>	<b>0,125</b>	0,353	0,356	0,366	0,36	<b>0,125</b>	<b>0,125</b>	<b>0,125</b>		<b>0,125</b>	<b>0,125</b>	<b>0,125</b>	<b>0,125</b>	<b>0,125</b>	<b>0,125</b>
<b>Hg</b>	1,000	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	2,820	2,850	2,930	2,87	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	na	na	na	na	na	na
<b>Tl</b>	2,000	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	5,640	5,700	5,860	5,73	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>		<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>
<b>Ba</b>	0,065	4720,0	4800,0	5540,0	13310,4	13680,0	16232,2	14407,5	<b>0,065</b>	<b>0,065</b>	<b>0,065</b>		<b>0,065</b>	<b>0,065</b>	<b>0,065</b>	275,000	275,000	225,000
<b>Zn</b>	0,100	2100,0	2360,0	1820,0	5922,0	6726,0	5332,6	5993,53	25,000	<b>0,100</b>	50,000		50,000	25,000	50,000	100,000	100,000	75,000
<b>Ag</b>	0,350	<b>0,350</b>	<b>0,350</b>	<b>0,350</b>	0,987	0,998	1,026	1,00	<b>0,350</b>	<b>0,350</b>	<b>0,350</b>		<b>0,350</b>	<b>0,350</b>	<b>0,350</b>	<b>0,350</b>	<b>0,350</b>	<b>0,350</b>
<b>Be</b>	0,014	<b>0,014</b>	<b>0,014</b>	<b>0,014</b>	0,038	0,038	0,040	0,04	<b>0,014</b>	<b>0,014</b>	<b>0,014</b>		<b>0,014</b>	<b>0,014</b>	<b>0,014</b>	<b>0,014</b>	<b>0,014</b>	<b>0,014</b>
<b>S</b>		6330,0	7890,0	6140,0	17850,6	22486,5	17990,2	19442,4	4000,000	3625,000	3625,000		10450,0	15240,0	11650,0	0,300	0,460	0,575
<b>F</b>		5,700	2,400	5,400	16,074	6,840	15,822	12,912	4,200	4,900	4,900	<b>1,000</b>	na	na	na	na	na	na
<b>CN</b>		105,000	95,100	96,400	296,100	271,035	282,452	283,196	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>						

Obs.: números em negrito indicam que foi considerado o limite de detecção do método analítico

Fonte: CCRG (1998)

**TABELA 2**  
**TESTE DE QUEIMA DO FORNO 2 DA CCRG COM TAXA DE SUBSTITUIÇÃO DE 30% - SETEMBRO DE 2002**

Base para a estimativa das correntes de entrada e saída de substâncias inorgânicas/metais pesados no sistema-forno

Alimentação		Valores			Alimentação de blend		
		min	med	max			
Farinha	medido (t/h)	99,50	100,00	99,40	1 <sup>a</sup>	2982,30	kg/h
	Variação	99,40	99,60	100,00	2 <sup>a</sup>	3000,80	kg/h
Coque	medido (kg/h)	5112,20	5133,30	5327,80	3 <sup>a</sup>	3018,90	kg/h
	Variação	5112,20	5191,10	5327,80	Teores médios (% em massa)		
Blend	medido (kg/h)	2996,70	2979,30	2992,80	CI	S	N
	Variação	2979,30	2989,60	2996,70	0,82	0,51	1,94

Relação farinha/clínquer	
0,59	com dados CEMBUREAU (1999)
0,65	com dados CCRG-MARINGOLO (2002)
0,61	valor obtido com Eng. Antonio Mauro em 09/11/2004 - 17:10 horas
percentual de retorno do pó do eletrofiltro varia mas no máximo chega a 6%	

Subst. Inorgânicas	CORRENTES DE ENTRADA DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS E METAIS PESADOS NO SISTEMA-FORNO											Circulação externa			Saída				
	BLEND								FARINHA		COQUE			PÓ DO ELETROFILTRO			CLÍNQUER		
	Inorgânicos no blend (mg/kg)				Alimentação inorgânicos (g/h)				Teor médio (mg/kg)	Alimentação (g/h)	(mg/kg)			Alim (g/h)	Teor (mg/kg)			6%	(mg/kg)
	Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média			CETESB	CCRG	MVD		CETESB	CCRG	MVD	(g/h)	CCRG
Sb	86,00	108,00	71,40	88,47	256,48	324,09	215,55	<b>265,37</b>	0,200	19,93	0,200	0,200	0,200	1,04	0,29	0,20	0,29	1,73	0,320
Pb	960,00	780,00	780,00	840,00	2863,01	2340,62	2354,74	<b>2519,46</b>	0,890	88,67	50,000	0,840	0,840	4,36	50,00	8,95	8,95	53,50	19,420
Cu	660,00	660,00	660,00	660,00	1968,32	1980,53	1992,47	<b>1980,44</b>	108,000	10760,40	5,000	0,108	0,108	0,56	15,70	108,00	15,70	93,85	108,000
Cr	840,00	600,00	600,00	680,00	2505,13	1800,48	1811,34	<b>2038,98</b>	1,530	152,44	30,000	0,142	0,142	0,74	30,00	1,40	1,40	8,37	50,000
Sn	420,00	300,00	360,00	360,00	1252,57	900,24	1086,80	<b>1079,87</b>	1,920	191,30	130,000	1,920	1,920	9,97	130,00	1,92	1,92	11,48	1,920
Mn	120,00	120,00	120,00	120,00	357,88	360,10	362,27	<b>360,08</b>	0,280	27,90	94,000	0,280	94,000	487,96	142,00	0,28	142,00	848,88	150,000
Pt	360,00	300,00	300,00	320,00	1073,63	900,24	905,67	<b>959,85</b>	0,600	59,78	na	0,600	0,600	3,11	na	0,60	0,60	3,59	0,600
Pd	0,108	0,108	0,108	0,11	0,32	0,32	0,33	0,32	0,108	10,76	na	0,108	0,108	0,56	na	0,108	0,11	0,65	0,108
Rh	1,14	1,14	1,14	1,14	3,40	3,42	3,44	3,42	1,140	113,58	na	1,140	1,140	5,92	na	1,14	1,14	6,81	1,140
V	0,128	0,128	0,128	0,13	0,38	0,38	0,39	0,38	0,128	12,75	170,000	400,000	400,000	2076,44	170,00	0,128	0,13	0,77	50,000
As	76,70	81,70	90,20	82,87	228,74	245,17	272,30	<b>248,74</b>	4,200	418,46	0,200	0,400	0,200	1,04	6,02	6,12	6,12	36,59	11,740
Co	0,28	0,28	0,28	0,28	0,84	0,84	0,85	0,84	8,600	856,85	15,000	0,280	0,280	1,45	15,00	17,90	17,90	107,01	25,200
Ni	180,00	120,00	120,00	140,00	536,81	360,10	362,27	<b>419,73</b>	0,300	29,89	16,300	150,000	150,000	778,67	9,15	0,30	9,15	54,70	0,300
Se	1,50	1,50	1,50	1,50	4,47	4,50	4,53	4,50	1,500	149,45	0,200	1,500	0,200	1,04	0,39	1,50	0,39	2,33	1,500
Te	3,52	3,52	3,52	3,52	10,50	10,56	10,63	10,56	3,520	350,71	na	3,520	3,520	18,27	na	3,52	3,52	21,04	3,520
Cd	0,068	0,068	0,068	0,068	0,20	0,20	0,21	0,20	0,068	6,78	0,700	0,068	0,068	0,35	0,70	0,068	0,07	0,41	0,068
Hg	0,20	0,20	0,20	0,20	0,60	0,60	0,60	0,60	0,500	49,82	0,100	0,500	0,100	0,52	0,10	0,50	0,10	0,60	0,500
Tl	0,80	0,80	0,80	0,80	2,39	2,40	2,42	2,40	0,800	79,71	na	0,800	0,800	4,15	na	0,80	0,80	4,78	0,800
Ba									na		40,000	na	40,000	207,64	40,00	na	40,00	239,12	na
Zn									na		4,250	na	4,250	22,06	21,30	na	21,30	127,33	na
Ag														0,00				0,00	
Be														0,00				0,00	
S	3540	3550	3300	3463,33	10557,34	10652,84	9962,37	<b>10390,85</b>	2900,000	288936,70	na	11000	11000	57102	na	5000	5000	29890	5233,000
F	174	163	242	193,00	518,92	489,13	730,57	<b>579,54</b>	24,900	2480,87	na	na	na	0,00	na	75,00	75,00	448,35	31,100
CN	19,60	18,40	15,80	17,93	58,45	55,21	47,70	<b>53,79</b>	1,000	99,63	1,200	na	1,200	6,23	1,20	1,31	1,31	7,83	1,000

Obs.: 1 - MVD - menor valor obtido dentre as análises realizadas;

- se os dois valores se referiam aos LD's dos métodos utilizados, adotou-se o menor;

- entre o valor do LD do método utilizado e valor maior que o LD, adotou-se o maior;

2 - números em negrito se referem aos valores adotados com base nos LD's dos métodos analíticos utilizados.

Fonte: CETESB (2004a) e CCRG (2002)

TABELA 3

## MONITORAMENTO DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS NA FARINHA UTILIZADA NOS FORNOS DA CCRG DE MAI A DEZ/1998

Forno	Unidade	1	1	1	1	2
% Subst. Resíduos		0	30	30	30	30
Inorgânicos		26/5/98	06/6/98	20-21/06/1998	22-23/10/1998	09/12/98
As	mg/kg	4,300	4,100	3,900	<b>4,400</b>	<b>3,900</b>
Cr	mg/kg	<b>23,700</b>	<b>32,400</b>	27,800	28,800	25,700
F <sup>-</sup>	mg/kg	0,130	<b>0,140</b>	0,120	<b>0,100</b>	0,100
Mn	mg/kg	0,020	<b>0,020</b>	<b>0,030</b>	0,020	0,020
Zn	mg/kg	16,200	<b>16,200</b>	24,000	23,500	<b>24,400</b>
Hg	mg/kg	<b>0,140</b>	0,086	<b>0,078</b>	0,080	0,134
Ba	mg/kg	0,030	0,030	<b>0,040</b>	0,030	<b>0,020</b>
Pt	mg/kg			<b>8,700</b>		<b>18,300</b>
Pb	mg/kg	<b>5,600</b>	6,800	10,100	8,400	<b>11,900</b>
Tl	mg/kg			0,180	<b>0,124</b>	<b>0,274</b>
Ni	mg/kg	13,300	11,300	<b>8,700</b>	11,100	<b>19,400</b>
Se	mg/kg	0,300	<b>0,200</b>	0,300	0,300	<b>0,600</b>
Cd	mg/kg	0,047	<b>0,034</b>	0,070	0,080	<b>0,120</b>
Cl	mg/kg	300,000	700,000	800,000	<b>1100,000</b>	<b>300,000</b>
S	mg/kg	80,000	<b>70,000</b>	<b>300,000</b>	0,010	100,000
V	mg/kg	19,200	26,400	<b>8,700</b>	16,200	<b>37,500</b>
Sb	mg/kg	0,082	0,044	0,042	<b>0,144</b>	<b>0,033</b>
Co	mg/kg	3,000	<b>2,100</b>	3,600	4,800	<b>9,300</b>
Sn	mg/kg	<b>2,200</b>	0,800		<b>0,400</b>	2,000
Cu	mg/kg	10,500	<b>3,500</b>	5,800	<b>20,900</b>	14,100
CN <sup>-</sup>	mg/kg	<b>9,100</b>	8,200			<b>0,400</b>
Ag	mg/kg	0,014	<b>0,010</b>	<b>0,930</b>	0,023	

Fonte: Relatórios de controle de produção da CCRG

**TABELA 4**

MONITORAMENTO DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS NOS PÓS DOS PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS DOS FORNOS DA CCRG DE MAI A DEZ/1998

Forno	Unidade	1	1	1	1	2
% Subst. Resíduos		0	30	30	30	30
Inorgânicos		26/05/1998	06/06/1998	20-21/06/1998	22-23/10/1998	09/12/1998
Sb	mg/kg	0,14	0,08	0,10	0,15	0,09
Pb	mg/kg	12,40	13,20	142,00	79,50	118,70
CN <sup>-</sup>	mg/kg	3,10	2,50	nd	nd	26,60
Cu	mg/kg	8,50	9,90	10,60	28,00	13,50
Cr	mg/kg	36,00	28,40	39,30	37,50	41,60
Sn	mg/kg	0,90	0,70	10,60	0,20	4,00
F <sup>-</sup>	mg/kg	0,18	0,18	0,15	0,12	0,11
Mn	mg/kg	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
Pt	mg/kg	nd	0,80	14,30	nd	26,10
Pd	mg/kg	0,04	nd	nd	nd	nd
Rh	mg/kg					nd
V	mg/kg	31,20	23,80	10,20	18,40	35,20
As	mg/kg	6,20	4,40	5,00	5,50	7,30
Co	mg/kg	4,30	2,20	3,90	5,50	11,50
Ni	mg/kg	21,00	12,70	12,20	19,40	32,10
Se	mg/kg	1,80	1,10	3,30	3,00	6,90
Te	mg/kg	nd	nd	nd	nd	nd
Cd	mg/kg	0,10	0,05	0,25	0,52	0,41
Hg	mg/kg	0,78	0,31	0,46	0,66	0,97
Tl	mg/kg	nd	nd	0,52	0,50	0,59
Cl	mg/kg	3700,00	6900,00	25000,00	26500,00	8800,00
Ba	mg/kg	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03
S	mg/kg	150,00	140,00	900,00	100,00	100,00
Ag	mg/kg	0,05	0,03	0,15	0,51	0,23
Be	mg/kg	nd	nd	nd	nd	nd
Zn	mg/kg	22,50	15,10	27,10	22,20	29,50

Obs.: nd - não detectado

Fonte: Relatórios de controle da

TABELA 5

MONITORAMENTO DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS EM CLÍNQUERES PRODUZIDOS COM E SEM UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NOS FORNOS DA CCRG DE DEZ/1997 A JAN/1999

Forno	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	2
% subst. Res	30	30	15	0	0	0	30	30	30	0	0/30	0/30	0	0/30	30	0/30	0	0/30	30	0	0/30	0
Data	30/12/97	18/2/98	27/4/98	27/4/98	26/5/98	01/5/98	06/6/98	20-21/06/98	01/6/98	01/6/98	01/7/98	01/8/98	01/8/98	01/9/98	22-23/10/98	01/10/98	01/10/98	01/11/98	09/12/98	01/12/98	01/12/98	01/1/99
Inorgânicos																						
<b>Sb</b>	0,109	0,172	nd	nd	0,046	0,016	0,020	0,130	0,050	0,014	0,064	0,063	0,022	0,086	0,070	0,077	0,064	0,054	0,054	0,046	0,042	0,016
<b>Pb</b>	3,300	23,100	14,400	10,900	8,000	4,300	4,600	17,500	11,800	14,500	8,200	2,800	1,900	7,200	7,800	12,400	16,900	1,300	4,100	8,200	7,100	8,800
<b>CN<sup>-</sup></b>	0,000	0,000	nd	nd	3,900	3,900	2,800	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	5,800	nd			nd
<b>Cu</b>	28,000	26,200	49,000	29,600	5,000	7,000	10,700	23,300	14,600	10,800	17,300	26,300	14,800	32,300	25,800	13,000	11,100	23,200	80,200	12,300	11,200	17,900
<b>Cr</b>	42,400	45,200	155,400	174,400	39,800	50,100	53,500	53,200	44,400	43,700	41,900	56,900	60,800	53,600	47,600	44,700	44,000	50,700	99,200	47,500	43,800	63,300
<b>Sn</b>	1,000	1,300	2,400	2,100	1,100	1,800	1,700	0,700	1,500	0,600	0,000	0,000	0,000	12,400	6,300	27,200	3,100	6,600	15,300	5,600	9,300	2,400
<b>F<sup>-</sup></b>	0,200	0,200	0,180	0,160	0,210	0,240	0,220	0,170	0,270	0,270	0,160	0,150	0,140	0,000	0,170	0,130	0,150	0,140	0,160	0,140	0,150	0,150
<b>Mn</b>	0,050	0,040	0,040	0,040	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,040	0,030	0,030	0,040
<b>Pt</b>	0,700	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	2,300	1,500	10,300	6,700	3,700	nd	nd	9,300	3,200	1,900	12,500	39,200	20,700	2,800
<b>Pd</b>	0,700	0,700	nd	nd	0,101	0,116	0,172	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,179	0,118	nd	nd	nd	nd	nd
<b>Rh</b>																nd	nd	nd	nd	nd	nd	10,200
<b>V</b>	29,300	26,300	47,700	48,000	23,600	25,600	46,700	17,900	21,400	22,300	28,600	26,300	27,800	22,900	25,700	78,300	75,600	39,100	64,300	54,500	46,400	46,400
<b>As</b>	5,800	8,600	5,600	4,900	6,400	5,500	5,800	7,200	5,800	5,600	5,100	8,200	6,700	6,700	6,200	6,000	5,900	5,000	5,600	5,800	5,700	4,500
<b>Co</b>	13,700	10,700	67,200	43,800	19,400	63,100	11,400	38,600	11,500	10,600	13,600	24,700	23,100	10,100	30,000	26,400	24,500	12,000	17,000	14,700	15,100	58,100
<b>Ni</b>	17,100	14,100	17,100	19,100	24,000	22,900	18,700	19,800	15,500	18,200	14,200	29,600	30,400	32,000	28,900	10,200	11,800	45,900	61,300	31,400	35,000	37,400
<b>Se</b>	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,104	0,097	0,135	0,300	0,182	0,192	0,358
<b>Te</b>	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
<b>Cd</b>	0,072	0,162	0,149	0,060	0,036	0,026	0,054	0,094	0,118	0,154	0,061	0,049	0,031	0,070	0,098	0,050	0,050	0,023	0,062	0,080	0,072	0,187
<b>Hg</b>	nd	nd	nd	nd	0,040	0,044	0,026	0,050	0,040	0,025	0,023	nd	nd	0,038	0,052	0,082	0,045	0,038	0,072	0,054	0,056	0,043
<b>Tl</b>	nd	nd	0,228	0,119	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,024	0,062	nd	nd	nd
<b>Cl</b>	50,000	100,000	20,000	20,000	60,000	200,000	300,000	200,000	100,000	80,000	100,000	160,000	80,000	0,000	200,000	40,000	30,000	10,000	100,000	70,000	50,000	0,010
<b>Ba</b>	0,030	0,030	0,070	0,070	0,050	0,060	0,060	0,070	0,060	0,060	0,030	0,050	0,040	0,050	0,040	0,050	0,040	0,030	0,040	0,040	0,040	0,070
<b>S</b>	60,000	70,000	290,000	340,000	70,000	70,000	40,000	200,000	300,000	200,000	100,000	50,000	80,000	0,000	0,020	200,000	100,000	300,000	200,000	400,000	200,000	200,000
<b>Ag</b>	0,054	0,064	0,014	0,010	0,031	0,014	0,013	0,340	0,051	nd	0,028	0,550	0,012	0,030	0,031	0,250	0,054	0,844	nd	0,296	0,068	0,098
<b>Be</b>	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
<b>Zn</b>	53,300	42,500	67,000	29,100	27,300	29,300	27,000	64,200	60,000	42,600	65,900	57,600	27,900	76,200	78,500	65,400	49,600	94,500	158,400	34,200	103,600	36,800

Obs.: nd - não detectado

Fonte: Relatórios de controle da CCRG



**TABELA 6****MONITORAMENTO DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS EM CIMENTOS PRODUZIDOS PELA CCRG, COM E SEM A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS, DE FEV A DEZ/1998**

<b>Forno</b>	<b>Unidade</b>	<b>1 e 2</b>	<b>1 e 2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>% subst. Res</b>		<b>0/15</b>	<b>0/15</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>Inorgânicos</b>		<b>19/2/98</b>	<b>28/4/98</b>	<b>20/5/98</b>	<b>26/5/98</b>	<b>06/6/98</b>	<b>20-21/6/98</b>	<b>09/12/98</b>
<b>Sb</b>	mg/kg	0,090	0,093	0,088	0,045	0,043	0,114	0,028
<b>Pb</b>	mg/kg	11,600	6,200	5,000	5,700	7,100	17,000	2,000
<b>CN'</b>	mg/kg	nd	nd	nd	10,900	11,000	nd	2700,000
<b>Cu</b>	mg/kg	9,300	12,000	10,300	5,800	13,300	17,700	47,900
<b>Cr</b>	mg/kg	14,000	12,900	19,100	54,500	76,600	72,000	145,000
<b>Sn</b>	mg/kg	14,000	1,000	0,500	14,300	2,100	nd	10,200
<b>F</b>	mg/kg	0,170	0,170	0,170	0,220	0,230	0,230	0,120
<b>Mn</b>	mg/kg	0,080	0,090	0,090	0,080	0,080	0,080	0,060
<b>Pt</b>	mg/kg	nd	nd	nd	nd	3,400	7,800	18,500
<b>Pd</b>	mg/kg	nd	nd	nd	nd	0,044	nd	nd
<b>Rh</b>	mg/kg							nd
<b>V</b>	mg/kg	40,600	38,000	36,900	45,200	37,200	15,000	43,100
<b>As</b>	mg/kg	5,400	4,200	4,000	4,900	4,500	5,600	4,600
<b>Co</b>	mg/kg	7,200	6,800	8,000	2,800	2,400	7,900	12,100
<b>Ni</b>	mg/kg	22,700	22,200	25,800	21,600	15,900	15,600	58,300
<b>Se</b>	mg/kg	0,470	0,424	0,278	nd	nd	nd	0,600
<b>Te</b>	mg/kg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
<b>Cd</b>	mg/kg	0,059	0,079	0,037	0,018	0,054	0,100	0,038
<b>Hg</b>	mg/kg	nd	nd	nd	0,070	0,022	0,016	0,068
<b>Tl</b>	mg/kg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,028
<b>Cl</b>	mg/kg	50,000	30,000	20,000	400,000	300,000	200,000	100,000
<b>Ba</b>	mg/kg	0,070	0,060	0,080	0,110	0,100	0,100	0,060
<b>S</b>	mg/kg	1200,000	1300,000	1300,000	1300,000	1400,000	1000,000	1600,000
<b>Ag</b>	mg/kg	0,046	0,808	0,036	0,032	0,030	0,140	nd
<b>Be</b>	mg/kg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
<b>Zn</b>	mg/kg	31,500	34,200	21,800	21,300	18,900	50,600	114,900

Obs.: nd - não detectado

Fonte: Relatórios de controle da CCRG

## **ANEXO B – Resultados de amostragens em chaminés nos fornos da CCRG**

OBS.: A bibliografia citada refere-se àquela relacionada no Capítulo 7

**TABELA 7.1**  
**RESULTADOS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DO FORNO DE CLÍNQUER 1 DA CCRG, NO PERÍODO DE MAI A AGO/95**

Parâmetro	Condição	Unidade	F1MAI95				F1MAI95				TBF1JUN95					TBF1AGO95						
			Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Am4	Am5	Média	Am1	Am2	Am3	Am4	Média	
<b>Material Particulado</b>			MP				MP				MP											
Concentração	chaminé	mg/m <sup>3</sup>																				
Concentração	CN bs	mg/Nm <sup>3</sup>	102,64	75,24	60,10	79,33	61,35	63,08	67,23	63,89	77,31	134,19	98,79	78,97	98,13	97,48	110,56	65,00	59,14	62,30	74,25	
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	154,50	107,50	91,46	117,82	89,47	91,04	99,08	93,20	102,11	186,01	141,13	108,39	129,61	133,45	140,71	82,73	75,96	80,02	94,85	
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>																				
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	110,37	76,78	65,33	84,16	63,91	65,03	70,77	66,57	72,93	132,86	100,81	77,42	92,58	95,32	100,51	59,09	54,26	57,16	67,75	
Taxa de emissão	chaminé	kgMP/hora	16,44	12,66	9,64	12,91	10,00	9,91	10,97	10,29	13,40	21,36	15,55	13,43	16,24	16,00	18,39	10,28	9,51	10,10	12,07	
Carregamento		t/h	97,40	97,20	97,20	97,27	97,30	97,30	97,40	97,33	94,50	95,10	92,10	95,30	76,10	90,62	95,00	96,00	93,70		94,90	
<b>Névoa Sulfúrica</b>	SO <sub>3</sub>																					
Concentração	CN bs	mg /Nm <sup>3</sup>															5,25	1,13			3,19	
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>																				
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>																				
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>																				
Taxa de emissão	chaminé	g SO <sub>3</sub> /hora															873,21	178,67			525,94	
<b>Dióxido de Enxofre</b>	SO <sub>2</sub>																					
Concentração	CN bs	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>															4,51	3,70	9,15		5,79	
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>																				
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>															4,51	3,70	9,23		5,81	
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>																				
Taxa de emissão	chaminé	g SO <sub>2</sub> /hora															750,13	585,02	1471,30		935,50	
<b>Óxidos de Enxofre</b>	SO <sub>x</sub>																					
Concentração	CN bs	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>															8,71	4,60	9,15		7,49	
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>																				
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>															8,71	4,60	9,23		7,52	
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>																				
Taxa de emissão	chaminé	g SO <sub>2</sub> /hora															1448,70	727,96	1471,34		1216,00	
Vazão do gás	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	160171	168262	160399	162944	162999	157102	163171	161091	173328	159177	157405	170065	165495	165094	166326	158114	160802	162050	161823	
<b>Composição gases</b>																						
Dióxido de carbono		%CO <sub>2</sub> v/v																				
Oxigênio		%O <sub>2</sub> v/v	11,70	11,20	11,80	11,57	11,40	11,30	11,50	11,40	10,40	10,90	11,20	10,80	10,40	10,74	10,00	10,00	10,10	10,10	10,05	
Nitrogênio		%N <sub>2</sub> v/v																				
<b>Gerais</b>																						
Data		d/m/a	24/5/95	24/5/95	24/5/95		24/5/95	24/5/95	24/5/95								1/8/95	1/8/95	1/8/95	3/8/95		
hora início		h:m																				
hora término		h:m																				
P <sub>atm</sub>		mm Hg																				
P <sub>estática</sub> chaminé		mm Hg																				

Fonte: CETESB (1995)

Fonte: CETESB (1995)

Fonte: CETESB (1995)

Fonte: CETESB (1995)

**TABELA 7.2**  
**RESULTADOS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DE CLÍNQUER 1 E 2 DA CCRG, NO PERÍODO DE JUN/97 A SET/02**

Parâmetro	Condição	Unidade	TBF1SET02				TBF2JUN97				TBF2ABR01											
			Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média								
<b>Material Particulado</b>			MP/SOx				MP/METAIS				MP/SOx											
Concentração	chaminé	mg/m³																				
Concentração	CN bs	mg/Nm³	30,70	35,00	37,00	34,23	24,90	26,20	26,80	25,97	29,20	19,10	20,00	22,77	35,80	17,90	17,70	23,80	36,60	36,20	29,70	34,17
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg/Nm³									38,20	23,70	25,90	29,27	50,10	22,70	22,20	31,67				
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg/Nm³																				
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg/Nm³	31,98	36,46	37,76	35,40	27,67	27,87	30,45	28,66	27,29	16,90	18,52	20,90	35,80	16,27	15,80	22,63	36,60	35,15	30,00	33,92
Taxa de emissão	chaminé	kgMP/hora	6,02	6,81	7,02	6,62	4,82	5,03	5,13	4,99	4,63	3,03	3,24	3,63	5,90	2,75	2,77	3,81	6,41	6,41	5,47	6,10
<b>Névoa Sulfúrica</b>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>																					
Concentração	CN bs	mg/Nm³	1,77	1,09	1,11	1,32													0,358	1,38	0,77	0,84
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg/Nm³																				
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg/Nm³																				
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg/Nm³	1,84	1,14	1,13	1,37													0,358	1,34	0,778	0,83
Taxa de emissão	chaminé	g H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /hora	347,8	212,0	210,5	256,1													62,64	244,48	141,89	149,48
<b>Névoa Sulfúrica</b>	SO <sub>3</sub>																					
Concentração	CN bs	mg/Nm³									9,35	2,42	5,39	5,72								
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg/Nm³									12,20	3,00	6,98	7,39								
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg/Nm³																				
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg/Nm³																				
Taxa de emissão	chaminé	g SO <sub>3</sub> /hora									1483,	382,6	876,6	914,2								
<b>Dióxido de Enxofre</b>	SO <sub>2</sub>																					
Concentração	CN bs	mg SO <sub>2</sub> /Nm³	0,84	1,02	0,73	0,86					35,60	34,10	32,60	34,10					3,30	1,57	1,43	2,10
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm³									46,60	42,30	42,20	43,70								
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm³																				
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm³	0,88	1,06	0,74	0,89													3,30	1,53	1,44	2,09
Taxa de emissão	chaminé	g SO <sub>2</sub> /hora	165,0	198,0	138,0	167,0					5647,	5392,	5302,	5447,					577	279	263	373,00
<b>Dióxido de Enxofre</b>	SO <sub>2</sub>																					
Concentração	CN bs	mg SO <sub>2</sub> /Nm³	1,99	1,73	1,45	1,72					43,08	36,04	36,91	38,7					3,53	2,47	1,93	2,64
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm³																				
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm³	2,28	1,98	1,63	1,96					44,29	35,08	37,60	39,00					3,88	2,64	2,14	2,89
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm³	2,08	1,80	1,48	1,79													3,53	2,40	1,95	2,63
Taxa de emissão	chaminé	g SO <sub>2</sub> /hora	391,1	336,5	275,0	334,2					6834,	5698,	6003,	6178,					617,6	437,58	355,65	470,30
Vazão do gás	CN bs	Nm³/hora	19654	19451	18971	19359	193565	192204	191466	192412	15864	15813	16264	15980	16510	15412	156305	158514	17497	17715	184273	178802
Vazão do gás	C chaminé	m³/hora	33455	33351	32537	33114	330356	325685	327914	327985	28364	28006	28882	28417	27637	27248	274995	274618	30621	31171	320564	312829
Isocinética média		%	95,90	99,80	100,4	98,70	99,10	99,20	99,00	99,10	96,70	93,00	93,40	94,37	93,6	93,00	94,20	93,60	98,20	99,10	97,60	98,30
Velocidade média gás		m/s	11,90	11,90	11,60	11,80	11,80	11,60	11,70	11,70	10,10	9,98	10,30	10,13	9,85	9,71	9,80	9,79	10,90	11,10	11,40	11,13
Umidade do gás		%v/v	13,70	12,40	13,90	13,33	13,50	13,30	13,30	13,37	16,70	15,50	15,60	15,93	11,3	15,40	14,90	13,87	14,90	15,60	14,90	15,13
Temperatura chaminé		C	99,50	107,8	101,3	102,8	101,00	99,30	103,00	101,10	104,2	106,0	106,7	105,6	103,3	105,8	106,54	105,25	102,0	101,25	102,08	101,80
<b>Composição gases</b>																						
Dióxido de carbono		%CO <sub>2</sub> v/v	17,60	17,00	18,80	17,80	15,20	17,80	14,80	15,93	16,20	16,30	16,20	16,23	17,00	17,40	17,00	17,13	15,20	16,00	17,90	16,37
Oxigênio		%O <sub>2</sub> v/v	11,40	11,40	11,20	11,33	12,00	11,60	12,20	11,93	10,30	9,70	10,20	10,07	11,00	10,00	9,80	10,27	11,00	10,70	11,10	10,93
Nitrogênio		%N <sub>2</sub> v/v	71,00	71,60	70,00	70,87	72,80	70,60	73,00	72,13	73,50	74,00	73,60	73,70	72,00	72,60	73,20	72,60	73,80	73,30	71,00	72,70
<b>Gerais</b>																						
data		d/m/a	23/9/02	24/9/02	24/9/02		25/9/02	25/9/02	25/9/02		25/6/97	25/6/97	25/6/97		26/6/97	26/6/97	26/6/97		18/4/01	18/4/01	19/4/01	
hora início		h:m	14:30	08:55	13:10		08:00	10:25	14:00		08:50	11:30	14:16		07:50	11:25	14:20		08:50	12:48	08:30	10:02
hora término		h:m	16:36	11:00	15:14		10:05	12:28	16:05		11:01	13:40	16:20		10:15	13:40	16:25		11:00	14:50	10:35	12:08
P <sub>atm</sub>		mm Hg	705,0	705,0	705,0	705,0					705,0	705,0	705,0	705,0	705,0	705,0	705,00	705,00	701,0	701,0	705,00	702,33
P <sub>estática</sub> chaminé		mm Hg	0,40	0,40	0,40	0,40					0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40				

Fonte: BIOAGRI AMAMBIENTAL (2002)

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1997)

**TABELA 7.3**  
**RESULTADOS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DE CLÍNQUER 1 E 2 DA CCRG, NO PERÍODO DE JUL/96 A SET/98**

Parâmetro	Condição	Unidade	TBF2MAI01				TQF1JUL96								TQF1JUN98									
			Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Média	Am1	Am2	Média				
<b>Material Particulado</b>			MP/Metais				MP/SOx				MP/METAIS				MP/HCl				MP/SOx		MP/HCl			
Concentração	chaminé	mg/m <sup>3</sup>					14,60	13,43	17,29	15,10	25,24	21,85	18,13	21,74	15,32	14,178	12,687	14,06	41,80	37,60	39,70	57,10	47,20	52,15
Concentração	CN bs	mg/Nm <sup>3</sup>	48,12	34,7	42,27	41,70	26,57	24,02	31,52	27,37	46,19	39,64	32,70	39,51	27,42	25,51	23,18	25,37	73,50	66,60	70,05	99,10	84,10	91,60
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>					35,04	30,57	40,86	35,49	60,05	51,53	42,51	51,36	34,27	33,07	30,04	32,46	93,60	84,80	89,20	122,0	107,0	114,50
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>																						
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	66,83	30,71	42,27	46,60	25,07	21,84	29,19	25,36	42,77	37,40	30,56	36,91	24,48	23,62	21,46	23,19	66,82	60,55	63,68	86,93	76,45	81,69
Taxa de emissão	chaminé	kgMP/hora	8,29	6,05	7,46	7,26	4,23	3,77	4,92	4,31	7,37	5,76	4,76	5,96	4,58	4,01	3,54	4,04	10,90	9,97	10,44	14,90	12,70	13,80
Carregamento		t/h																						
<b>Névoa Sulfúrica</b>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>																							
Concentração	CN bs	mg /Nm <sup>3</sup>																						
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>																						
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>																						
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>																						
Taxa de emissão	chaminé	g H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /hora																						
<b>Névoa Sulfúrica</b>	SO <sub>3</sub>																							
Concentração	CN bs	mg /Nm <sup>3</sup>					9,97	19,00	9,30	12,76									0,86	0,74	0,80			
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>					13,17	24,18	12,06	16,47									1,10	0,94	1,02			
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>																						
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>																						
Taxa de emissão	chaminé	g SO <sub>3</sub> /hora					1589,0	2984,1	1453,0	2009,9									128,04	110,42	119,27			
<b>Dióxido de Enxofre</b>	SO <sub>2</sub>																							
Concentração	CN bs	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>					13,80	10,80	13,20	12,60									8,69	8,86	8,78			
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>					18,23	13,75	17,11	16,36									11,10	11,30	11,20			
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>																						
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>																						
Taxa de emissão	chaminé	g SO <sub>2</sub> /hora					2199,5	1696,2	2062,3	1985,2									1289,3	1325,6	1307,4			
<b>Oxidos de Enxofre</b>	SO <sub>x</sub>																							
Concentração	CN bs	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>					21,78	26,00	20,64	22,81									9,38	9,45	9,42			
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>																						
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>					22,60	26,00	21,02	23,21									9,38	9,45	9,42			
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>																						
Taxa de emissão	chaminé	g SO <sub>2</sub> /hora					3470,7	4083,6	3224,6	3593,0									1391,6	1413,9	1402,8			
Vazão do gás	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	17224	17423	17642	17429	15938	15706	15623	15755	15955	14521	14560	15012	16693	15707	15265	15888	14836	14962	14899	15001	15139	150708
Vazão do gás	C chaminé	m <sup>3</sup> /hora	30232	30367	30956	30518	28999	28096	28482	28526	29206	26340	26255	27267	29876	28261	27880	28672	26095	26543	26319	26051	26955	265038
Isocinética média		%	99,40	98,40	98,70	98,83	93,29	92,95	95,21	93,82	97,55	97,51	96,21	97,09	94,361	95,815	94,629	94,94	105,10	104,40	104,75	103,8	105	104,40
Velocidade média gás		m/s	10,80	10,80	11,00	10,87	10,34	10,02	10,15	10,17	10,41	9,39	9,36	9,72	10,649	10,074	9,9379	10,22	9,30	9,46	9,38	9,29	9,61	9,45
Umidade do gás		%v/v	14,60	14,10	14,70	14,47	17,02	15,78	17,93	16,91	18,00	17,26	16,55	17,27	17,24	17,26	17,76	17,42	14,00	15,20	14,60	12,7	15,2	13,95
Temperatura chaminé		C	105,0	104,0	104,0	104,33	109,54	108,75	106,08	108,12					102,25	104,21	107,54	104,67	110,50	108,08	109,29	111,33	109,75	110,54
<b>Composição gases</b>																								
Dióxido de carbono		%CO <sub>2</sub> v/v	16,70	16,00	15,60	16,10	16,40	16,40	16,20	16,33	16,20	15,90	15,90	16,00	15,80	16,00	16,00	15,93	18,00	17,80	17,90	17,80	17,80	17,80
Oxigênio		%O <sub>2</sub> v/v	13,80	9,70	11,00	11,50	10,40	10,00	10,20	10,20	10,20	10,40	10,30	10,30	9,80	10,20	10,20	10,07	10,00	10,00	10,00	9,60	10,00	9,80
Nitrogênio		%N <sub>2</sub> v/v	69,50	74,30	73,40	72,40	73,20	73,60	73,60	73,47	73,60	73,70	73,80	73,70	74,40	73,80	73,80	74,00	72,00	72,20	72,10	72,60	72,20	72,40
<b>Gerais</b>																								
Data		d/m/a	29/5/01	29/5/01	29/5/01		29/7/96	30/7/96	30/7/96						23/7/96	23/7/96	31/7/96		21/6/98	21/6/98		20/6/98	20/6/98	
hora início		h:m	09:50	12:30	15:00		14:47	09:03	12:48						12:32	14:53	11:10		09:20	10:55		18:15	19:50	
hora término		h:m	11:56	14:35	17:04		16:52	11:08	14:55						14:36	16:59	13:14		10:30	12:03		19:25	21:00	
P <sub>atm</sub>		mm Hg					705,0	705,0	705,0	705,0					705,0	705,0	705,0	705,0	705,0	705,0	705,0	705,0	705,0	705,0
P <sub>estática</sub> chaminé		mm Hg					0,25	0,25	0,25	0,25					0,25	0,25	0,25	0,25	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS-DIVISÃO AMBIENTAL (2001b)

Fonte: TASQA SERVICOS ANALÍTICOS (1996)

Fonte: TASQA SERVICOS ANALÍTICOS (1998)

**TABELA 7.4**  
**RESULTADOS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DE CLÍNQUER 1 E 2 DA CCRG, NO PERÍODO DE MAR/01 A SET/02**

Parâmetro	Condição	Unidade	PRÉ-TESTE F2 MAR/01 SEM USO DE RESÍDUOS																							
			TQF1SET98				TQF2SET02				MOINHO OPERANDO			MOINHO Ñ OPERANDO			BAT DESL			CÂMARA PRECIP DESL						
			Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Média	Am1	Am2	Média	Am1	Am2	Média	Am1	Am2	Média	Am1	Am2	Média	
<b>Material Particulado</b>			MP/SO <sub>x</sub>												MP/METAIS											
Concentração	Chaminé	mg/m <sup>3</sup>	21,70	13,40	72,20	35,77																				
Concentração	CN bs	mg/Nm <sup>3</sup>	39,60	24,10	130,00	64,57	42,21	41,48	42,28	41,99	76,50	55,10	63,20	64,93	56,70	49,80	53,25	37,80	50,30	44,05	56,50	48,60	52,55	385,00	531,00	458,00
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>																								
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	40,40	24,10	104,00	56,17	54,10	53,20	55,60	54,30	98,00	81,00	79,00	86,00	57,86	48,82	53,34	35,00	48,40	41,70	56,50	50,70	53,60	389,00	531,00	460,00
Taxa de emissão	Chaminé	kgMP/hora	5,61	3,49	18,90	9,33	8,26	8,14	8,43	8,28	16,00	11,40	12,50	13,30	9,35	8,11	8,73	5,36	7,10	6,23	9,58	8,26	8,92	71,00	97,20	84,10
Carregamento		t/h													100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
<b>Névoa Sulfúrica</b>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>																									
Concentração	CN bs	mg /Nm <sup>3</sup>					1,42	0,63	1,25	1,10					3,90	3,90	4,68			4,68	3,82	3,35	3,59	3,86	3,45	3,66
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>																								
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>					1,82	0,81	1,65	1,43					3,82	3,82	4,33			4,33	3,82	3,49	3,66	3,90	3,45	3,68
Taxa de emissão	chaminé	g H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /hora					278,00	124,00	250,00	217,33					634,75	634,75	664,00			664,00	648,00	569,00	608,50	713,00	632,00	672,50
<b>Névoa Sulfúrica</b>	SO <sub>3</sub>																									
Concentração	CN bs	mg /Nm <sup>3</sup>	4,55	7,30	13,30	8,38																				
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>																								
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>	4,64	7,30	14,20	8,71																				
Taxa de emissão	chaminé	g SO <sub>3</sub> /hora	645,6	1058,6	1932,7	1207,8																				
<b>Dióxido de Enxofre</b>	SO <sub>2</sub>																									
Concentração	CN bs	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	17,50	3,37	12,80	11,22	1,03	0,83	0,82	0,89					5,38	5,38	6,26			6,26	5,14	4,23	4,69	4,78	5,37	5,08
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>																								
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	17,90	3,37	13,60	11,62	1,32	1,06	1,08	1,15					5,27	5,27	5,80			5,80	5,14	4,40	4,77	4,82	5,37	5,10
Taxa de emissão	chaminé	g SO <sub>2</sub> /hora	2483,2	488,7	1860,0	1617,0	202,00	162,00	163,00	175,67					875,63	875,63	889,00			889,00	871,00	718,00	794,50	881,00	983,00	932,00
<b>Óxidos de Enxofre</b>	SO <sub>x</sub>																									
Concentração	CN bs	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	21,14	9,21	23,44	17,93	1,96	1,24	1,64	1,61					7,92	7,92	9,32			9,32	7,63	6,41	7,02	7,30	7,62	7,46
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	23,73	10,13	27,43	20,43	2,76	1,75	2,37	2,30					8,54	8,54	9,49			9,49	8,39	7,34	7,87	8,11	8,38	8,25
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>					2,51	1,59	2,15	2,08					7,77	7,77	8,63			8,63	7,63	6,68	7,16	7,37	7,62	7,50
Taxa de emissão	chaminé	g SO <sub>2</sub> /hora	2999,7	1335,6	3406,2	2580,5	383,80	243,28	327,12	318,07					1289,0	1289,0	1323,37			1323,37	1292,72	1089,00	1190,86	1346,51	1395,24	1370,88
<b>Vazão do gás</b>	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	141898	145012	145316	144075	195817	196196	199462	197158	208798	207893	197833	204841	164968	162757	163863	141993	141002	141498	169426	169890	169658	184454	183102	183778
Vazão do gás	C chaminé	m <sup>3</sup> /hora	258437	260914	262099	260483	336384	335624	338064	336691	357951	353906	339176	350344	291645	290459	291052	261728	260314	261021	300016	301448	300732	321035	319741	320388
Isocinética média		%	103,90	100,10	104,10	102,70	97,70	97,40	96,80	97,30	94,90	95,40	97,60	95,97	102,50	103,50	103,00	104,50	104,80	104,65	101,30	101,80	101,55	97,50	97,70	97,60
Velocidade média gás		m/s	9,21	9,30	9,34	9,28	12,00	12,00	12,10	12,03	12,80	12,60	12,10	12,50	10,40	10,40	10,40	9,33	9,28	9,31	10,70	10,70	10,70	11,40	11,40	11,40
Umidade do gás		%v/v	20,10	18,10	19,10	19,10	14,40	14,00	13,10	13,83	12,60	13,20	14,20	13,33	15,30	16,10	15,70	15,70	16,80	16,25	15,20	15,60	15,40	14,10	14,60	14,35
Temperatura chaminé		C	100,29	105,21	101,21	102,24	99,80	99,90	100,10	99,93	107,00	102,00	100,00	103,00	104,50	104,90	104,70	118,80	114,50	116,65	105,80	104,80	105,30	103,90	103,30	103,60
<b>Composição gases</b>																										
Dióxido de carbono		%CO <sub>2</sub> v/v	16,80	16,80	16,60	16,73	15,80	15,70	14,20	15,23	15,20	14,80	15,60	15,20	16,60	16,20	16,40	17,00	16,40	16,70	16,10	15,00	15,55	15,70	15,30	15,50
Oxigênio		%O <sub>2</sub> v/v	11,20	11,00	11,60	11,27	13,20	13,20	13,40	13,27	13,20	14,20	13,00	13,47	11,20	10,80	11,00	10,20	10,60	10,40	11,00	11,40	11,20	11,10	11,00	11,05
Nitrogênio		%N <sub>2</sub> v/v	72,00	72,20	71,80	72,00	71,00	71,10	72,40	71,50	71,60	71,00	71,40	71,33	72,20	73,00	72,60	72,80	73,00	72,90	72,90	73,60	73,25	73,20	73,70	73,45
<b>Gerais</b>																										
Data		d/m/a	3/9/98	3/9/98	4/9/98		4/9/02	4/9/02	5/9/02		3/9/02	3/9/02	4/9/02		29/3/01	29/3/01		29/3/01	29/3/01		30/3/01	30/3/01		30/3/01	30/3/01	
hora início		h:m	09:07	14:08	07:34		12:10	14:40	08:30		09:05	13:10	08:35		08:50	10:45		14:05	15:33		08:05	09:47		13:15	14:40	
hora término		h:m	11:14	16:14	10:46		14:16	16:45	10:35		11:11	15:18	10:43		10:00	11:50		15:10	16:38		09:15	10:54		14:20	15:48	
P <sub>atm</sub>		mm Hg	714,00	714,00	714,00	714,00	705,00	705,00	705,00	705,00																
P <sub>estática</sub> chaminé		mm Hg	0,10	0,10	0,10	0,10	0,40	0,40	0,40	0,40																

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1998a)

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002a)

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001a)

**TABELA 7.5**  
**RESULTADOS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉ DO FORNO DE CLÍNQUER 2 DA CCRG NO PERÍODO DE MAR/01**

Parâmetro	Condição	Unidade	PRÉ-TESTE F2 DE MAR/01 COM USO DE RESÍDUOS									
			MOINHO OPERANDO					MOINHO N OPERANDO				
			Am1	Am2	Am3	Am4	Am5	Média	Am1	Am2	Média	
<b>Material Particulado</b>												
Concentração	chaminé	mg/m <sup>3</sup>										
Concentração	CN bs	mg/Nm <sup>3</sup>	61,30	47,10	60,20	55,20	59,40	56,64	46,00	58,40	52,20	
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>										
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	60,10	47,10	59,00	55,20	59,40	56,16	46,00	57,20	51,60	
Taxa de emissão	chaminé	kg MP/hora	10,80	8,67	10,90	9,76	10,70	10,17	7,49	9,77	8,63	
Carregamento		t/h	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
<b>Névoa Sulfúrica</b>												
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>											
Concentração	CN bs	mg /Nm <sup>3</sup>	10,00	5,90	8,43	7,42	9,80	8,31	24,20	11,00	17,60	
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>										
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>	9,83	5,90	8,26	7,42	9,80	8,24	24,20	10,80	17,50	
Taxa de emissão	chaminé	g H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /hora	1771,0	1088,0	1529,0	1312,0	1762,0	1492,4	3938,0	1846,0	2892,0	
<b>Névoa Sulfúrica</b>												
	SO <sub>3</sub>											
Concentração	CN bs	mg /Nm <sup>3</sup>										
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>										
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>										
Taxa de emissão	chaminé	g SO <sub>3</sub> /hora										
<b>Dióxido de Enxofre</b>												
	SO <sub>2</sub>											
Concentração	CN bs	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	0,57	3,59	0,83	0,85	1,12	1,39	1,17	4,91	3,04	
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>										
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	0,56	3,59	0,81	0,85	1,12	1,39	1,17	4,81	2,99	
Taxa de emissão	chaminé	g SO <sub>2</sub> /hora	101,00	661,00	150,00	151,00	201,00	252,80	191,00	821,00	506,00	
<b>Oxidos de Enxofre</b>												
	SO <sub>x</sub>											
Concentração	CN bs	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	0,57	3,59	0,83	0,85	1,12	1,39	1,17	4,91	3,04	
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	0,62	3,95	0,89	0,94	1,23	1,53	1,29	5,30	3,29	
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>										
Taxa de emissão	chaminé	g SO <sub>2</sub> /hora	101,26	661,63	149,75	150,83	201,41	252,98	190,57	821,32	505,94	
Vazão do gás	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	176711	184298	181516	176828	179830	179837	162881	167274	165078	
Vazão do gás	C chaminé	m <sup>3</sup> /hora	315937	334635	325808	317980	325481	323968	307801	306735	307268	
Isocinética média		%	99,60	99,20	101,00	100,30	100,60	100,14	105,80	104,60	105,20	
Velocidade média gás		m/s	11,30	11,90	11,60	11,30	11,60	11,54	11,00	10,90	10,95	
Umidade do gás		%v/v	16,40	17,80	16,60	16,90	17,70	17,08	20,40	18,10	19,25	
Temperatura chaminé		C	104,10	103,30	104,40	103,80	102,80	103,68	106,50	105,80	106,15	
<b>Composição gases</b>												
Dióxido de carbono		%CO <sub>2</sub> v/v	15,20	15,00	15,40	15,20	15,20	15,20	15,00	15,20	15,10	
Oxigênio		%O <sub>2</sub> v/v	10,80	11,00	10,80	11,00	11,00	10,92	11,00	10,80	10,90	
Nitrogênio		%N <sub>2</sub> v/v	74,00	74,00	73,80	73,80	73,80	73,88	74,00	74,00	74,00	
<b>Gerais</b>												
Data		d/m/a	14/3/01	14/3/01	15/3/01	15/3/01	15/3/01		14/3/01	14/3/01		
hora início		h:m	10:57	12:42	10:11	11:47	15:32		18:05	19:43		
hora término		h:m	12:07	13:50	11:19	12:54	16:42		19:16	20:50		
P <sub>atm</sub>		mm Hg										
P <sub>estática</sub> chaminé		mm Hg										

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001a)

**TABELA 8.1**  
**EMISSIONES DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO EM CHAMINÉS DOS FORNOS DE CLÍNQUER DA CCRG, NO PERÍODO DE JUN/96 A SET/02**

Parâmetro	Condição	Unidade	TBF1JUN96										Média
			Am1	Am2	Am3	Am4	Am5	Am6	Am7	Am8	Am9	Am10	
Concentração	CN	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	241,70	280,00	237,20	216,00	221,30	264,80	282,50	250,30	262,40	284,40	254,06
Concentração	CN 7% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	307,60	356,20	301,90	274,90	281,70	337,00	359,50	318,60	334,00	361,90	323,33
Concentração	CN 10% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	241,70	280,00	237,20	216,00	221,30	264,80	282,50	250,30	262,40	284,40	254,06
Taxa de emissão		kg NO <sub>2</sub> /hora	38,07	44,10	37,36	34,02	34,86	41,71	44,50	39,42	41,33	44,79	40,02
Teor médio O <sub>2</sub>		%v/v	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Vazão do gás	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	157505	157505	157505	157505	157505	157505	157505	157505	157505	157505	157505
Data		d/m/a	30/7/96	30/7/96	30/7/96	30/7/96	30/7/96	31/7/96	31/7/96	31/7/96	31/7/96	31/7/96	
Hora início		h:m	11:50	11:56	12:01	12:07	12:13	13:53	13:57	14:03	14:08	14:14	
P <sub>atm</sub>		mm Hg	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705,00
P <sub>estática</sub> chaminé		mm Hg	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996)

Parâmetro	Condição	Unidade	TBF2JUN97										Média
			Am1	Am2	Am3	Am4	Am5	Am6	Am7	Am8	Am9	Am10	
Concentração	CN	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	291,00	229,00	250,00	279,00	292,00	245,00	315,00	230,00	241,00	263,56	
Concentração	CN 7% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	372,62	293,23	320,12	357,26	373,90	313,72	403,35	294,51	308,60	337,48	
Concentração	CN 10% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	292,77	230,40	251,52	280,70	293,78	246,49	316,92	231,40	242,47	265,16	
Taxa de emissão		kg NO <sub>2</sub> /hora	46,50	36,59	39,95	44,58	46,66	39,15	50,33	36,75	38,51	42,11	
Teor médio O <sub>2</sub>		%v/v	10,07	10,07	10,07	10,07	10,07	10,07	10,07	10,07	10,07	10,07	10,07
Vazão do gás	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	159.792	159.792	159.792	159.792	159.792	159.792	159.792	159.792	159.792	159.792	159.792
Data		d/m/a	25/6/97	25/6/97	25/6/97	26/6/97	26/6/97	26/6/97	01/7/97	01/7/97	01/7/97		
Hora início		h:m	16:53	16:58	17:04	16:35	16:39	16:45	16:35	16:40	16:46		
P <sub>atm</sub>		mm Hg	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705
P <sub>estática</sub> chaminé		mm Hg	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1997)

Parâmetro	Condição	Unidade	TBF2ABR01										Média
			Am1	Am2	Am3	Am4	Am5	Am6	Am7	Am8	Am9	Am10	
Concentração	CN	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	746,00	773,00	657,00	640,00	749,00	771,00	681,00	785,00	782,00	742,00	732,60
Concentração	CN 10% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	812,48	841,88	715,54	697,03	815,74	839,70	741,68	854,95	851,68	808,12	797,88
Concentração	CN 11% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	738,61	765,35	650,50	633,66	741,58	763,37	674,26	777,23	774,26	734,65	725,35
Taxa de emissão		kg NO <sub>2</sub> /hora	133,31	138,14	117,41	114,37	133,85	137,78	121,70	140,28	139,75	132,60	130,92
Teor médio O <sub>2</sub>		%v/v	10,90	10,90	10,90	10,90	10,90	10,90	10,90	10,90	10,90	10,90	10,90
Vazão do gás	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	178705	178705	178705	178705	178705	178705	178705	178705	178705	178705	178705
Data		d/m/a	18/4/01	18/4/01	18/4/01	18/4/01	18/4/01	18/4/01	19/4/01	19/4/01	19/4/01	19/4/01	
Hora início		h:m	15:36	15:40	15:46	15:51	15:56	16:00	16:03	16:09	16:18	16:23	
P <sub>atm</sub>		mm Hg	701	701	701	701	701	701	701	701	701	701	701,00

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001)

Parâmetro	Condição	Unidade	TBF1SET02										Média
			Am1	Am2	Am3	Am4	Am5	Am6	Am7	Am8	Am9	Am10	
Concentração	CN	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	824,00	680,00	881,00	925,00	823,00	941,00	878,00	852,00	736,00	837,78	
Concentração	CN 10% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	944,17	779,17	1009,48	1059,90	943,02	1078,23	985,51	956,33	826,12	953,55	
Concentração	CN 11% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	849,00	701,00	909,00	954,00	848,00	970,00	906,00	879,00	759,00	863,89	
Taxa de emissão		kg NO <sub>2</sub> /hora	159,00	132,00	171,00	179,00	159,00	182,00	170,00	165,00	143,00	162,22	
Teor médio O <sub>2</sub>		%v/v	11,40	11,40	11,40	11,40	11,40	11,40	11,20	11,20	11,20	11,33	
Vazão do gás	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	193590	193590	193590	193590	193590	193590	193590	193590	193590	193590	193590
Data		d/m/a	23/9/02	23/9/02	23/9/02	24/9/02	24/9/02	24/9/02	24/9/02	24/9/02	24/9/02	24/9/02	
Hora início		h:m	14:47	15:51	16:22	09:10	10:05	10:42	13:20	14:25	14:55		
P <sub>atm</sub>		mm Hg	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705,00	

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002)



**TABELA 8.2**  
**EMISSIONES DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO EM CHAMINÉS DOS FORNOS DE CLÍNQUER DA CCRG, NO PERÍODO DE JUN/98 A SET/02**

Parâmetro	Condição	Unidade	TBF1JUN98			
			Am1	Am2	Am3	Média
Concentração	CN	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	176,00	134,00	179,00	163,00
Concentração	CN 7% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	224,00	171,00	228,00	207,67
Concentração	CN 10% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	176,00	134,00	179,00	163,00
Taxa de emissão		kg NO <sub>2</sub> /hora	26,20	20,00	26,70	24,30
Teor médio O <sub>2</sub>		%v/v	10,00	10,00	10,00	10,00
Vazão do gás*	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	148910	148910	148910	148910
Data		d/m/a	21/6/98	21/6/98	21/6/98	
hora início		h:m	12:10	12:12	12:14	
P <sub>atm</sub>		mm Hg	705	705	705	705,00
P <sub>estática</sub> chaminé		mm Hg	0,4	0,4	0,4	0,40

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1998)

Parâmetro	Condição	Unidade	TBF1SET98																		
			Am1.1	Am1.2	Am1.3	Am2.1	Am2.2	Am2.3	Am3.1	Am3.2	Am3.3	Am4.1	Am4.2	Am4.3	Am5.1	Am5.2	Am5.3	Am6.1	Am6.2	Am6.3	Média
Concentração	CN	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	407,00	433,00	406,00	358,00	359,00	174,00	361,00	374,00	473,00	332,00	496,00	422,00	119,00	351,00	390,00	305,00	419,00	349,00	362,67
Concentração	CN 10% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	456,50	486,20	455,40	393,80	394,90	191,40	422,40	437,80	553,30	304,70	454,30	387,20	116,60	344,30	382,80	299,20	411,40	343,20	379,74
Concentração	CN 11% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	415,00	442,00	414,00	358,00	359,00	174,00	384,00	398,00	503,00	277,00	413,00	352,00	106,00	313,00	348,00	272,00	374,00	312,00	345,22
Taxa de emissão		kg NO <sub>2</sub> /hora	58,63	62,38	58,49	51,57	51,72	25,07	52,01	53,88	68,14	47,83	71,45	60,79	17,14	50,56	56,18	43,94	60,36	50,28	52,25
Teor médio O <sub>2</sub>		%v/v	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27
Vazão do gás*	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	144058	144058	144058	144058	144058	144058	144058	144058	144058	144058	144058	144058	144058	144058	144058	144058	144058	144058	144058
Data		d/m/a	03/9/98	03/9/98	03/9/98	03/9/98	03/9/98	03/9/98	03/9/98	04/9/98	04/9/98	11/9/98	11/9/98	11/9/98	11/9/98	11/9/98	11/9/98	11/9/98	11/9/98	11/9/98	11/9/98
hora início		h:m	13:56	13:56	13:57	16:30	16:30	16:30	10:55	10:58	10:59	12:31	12:32	12:33	14:23	14:25	14:26	16:31	16:32	16:33	
P <sub>atm</sub>		mm Hg	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705,00
P <sub>estática</sub> chaminé		mm Hg	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,10

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1998a)

Parâmetro	Condição	Unidade	TBF2SET02									
			Am1	Am2	Am3	Am4	Am5	Am6	Am7	Am8	Am9	Média
Concentração	CN	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	798,00	777,00	750,00	639,00	638,00	751,00	800,00	709,00	681,00	727,00
Concentração	CN 7% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	1432,31	1394,62	1346,15	1146,92	1145,13	1347,95	1473,68	1306,05	1254,47	1316,37
Concentração	CN 10% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	1125,38	1095,77	1057,69	901,15	899,74	1059,10	1157,89	1026,18	985,66	1034,29
Concentração	CN 11% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	1023,08	996,15	961,54	819,23	817,95	962,82	1052,63	932,89	896,05	940,26
Taxa de emissão		kg NO <sub>2</sub> /hora	157,33	153,19	147,87	125,98	125,79	148,07	157,73	139,79	134,26	143,33
Teor médio O <sub>2</sub>		%v/v	13,20	13,20	13,20	13,20	13,20	13,40	13,40	13,40	13,40	13,27
Vazão do gás*	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	197158	197158	197158	197158	197158	197158	197158	197158	197158	197158
Data		d/m/a	04/9/02	04/9/02	04/9/02	04/9/02	04/9/02	04/9/02	05/9/02	05/9/02	05/9/02	05/9/02
hora início		h:m	12:35	13:05	13:50	15:00	15:45	16:25	09:20	10:00	10:20	
P <sub>atm</sub>		mm Hg	705	705	705	705	705	705	705	705	705,00	

Fonte: BIOAGRI (2002a) e CETESB (2004<sup>9</sup>)

Parâmetro	Condição	Unidade	PTF2MAR-01 - moinho operando				
			Am1	Am2	Am3	Am4	Média
Concentração	CN	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	464,00	418,00	541,00	641,00	516,00
Concentração	CN 10% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	510,40	459,80	595,10	705,10	567,60
Concentração	CN 11% O <sub>2</sub>	mg NO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	464,00	418,00	541,00	641,00	516,00
Taxa de emissão		kg NO <sub>2</sub> /hora	83,50	75,22	97,35	115,35	92,85
Teor médio O <sub>2</sub>		%v/v	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00
Vazão do gás*	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	179948	179948	179948	179948	179948
Data		d/m/a	14/3/01	14/3/01	15/3/01	15/3/01	
hora início		h:m	12:30	12:35	16:50	16:55	

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001a)



TABELA 9.2

## CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

		TESTE	TBF2JUN97				TBF2ABR01				TBF2MAI01				TBF1SET02					
Corrente		Coleta	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média		
		Unidade	Metais	Metais	Metais		Metais	Metais	Metais		MP/Metais	MP/Metais	MP/Metais		MP/Metais	MP/Metais	MP/Metais			
HF	DADOS GERAIS	Nm <sup>3</sup> /h	Vazão(bs)	155403	158697	163864	159321	183189	190844	182349	185461									
		Nm <sup>3</sup> /h	Vazão(bu)	185667	187586	189657	187637													
		m <sup>3</sup> /h	Vazão (ch)	278556	279183	282422	280054	323241	334479	319397	325706									
		%	Umidade	16,3	15,4	13,6	15,1	15,6	15,3	15,3	15,4									
		%	O <sub>2</sub>	10,0	10,1	10,1	10,1	12,0	12,8	12,4	12,4									
		C	Tch	107	104	104	105	102	101	101	101									
		mm Hg	Pch	705	705	705	705													
Metais pesados	DADOS GERAIS	Nm <sup>3</sup> /h	Vazão(bs)	155403	158697	163864	159321	172495	180259	180879	177878	172185	174048	176297	174176	193522	192099	191308	192310	
		Nm <sup>3</sup> /h	Vazão(bu)	185667	187586	189657	187637	202221	211076	212799	208699	201621	202617	206679	203639	223724	221568	220655	221982	
		m <sup>3</sup> /h	Vazão (ch)	278556	279183	282422	280054	303696	313412	316256	311121	302322	303678	309561	305187	330356	325685	327914	327985	
		%	Umidade	16,3	15,4	13,6	15,1	14,7	14,6	15,0	14,8	14,6	14,1	14,7	14,5	13,5	13,3	13,3	13,4	
		%	O <sub>2</sub>	10,0	10,1	10,1	10,1	11,6	13,4	13,3	12,8	13,8	9,7	11,0	11,5	12,0	11,6	12,2	11,9	
		C	Tch	107	104	104	105	107	103	103	105	105	104	104	104	101	99	103	101	
		mm Hg	Pch	705	705	705	705	705	705	705	701	701	701	701	705	705	705	705		

## CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

Inorgânicos			TBF2JUN97				TBF2ABR01				TBF2MAI01				TBF1SET02			
Descrição	Unidade	Condição	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
Antimônio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	<b>0,0043</b>	<b>0,0042</b>	<b>0,0041</b>	<b>0,0042</b>	0,0020	0,0309	<b>0,0017</b>	<b>0,0115</b>	0,0078	<b>0,0014</b>	<b>0,0014</b>	<b>0,0036</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>
Arsênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0378	0,0345	0,0351	0,0358	0,5935	0,4439	0,6265	0,5546	0,0050	0,0144	0,0113	0,0102	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>
Bário	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,2430	0,2290	0,2480	0,2400												
Berílio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs																
Cádmio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0047	0,0047	0,0069	0,0054	0,0258	0,0263	0,0214	0,0245	0,0040	0,0031	0,0038	0,0036	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>
Chumbo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0224	0,0075	0,0243	0,0181	0,0123	0,2637	0,0111	0,0957	0,0093	0,0061	0,0113	0,0089	0,0091	0,0071	0,0068	0,0077
Cobalto	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs					<b>0,0018</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,0018</b>	0,0042	0,0032	0,0016	0,0030	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>
Cobre	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0169	0,0165	0,0326	0,0220	0,0085	0,0339	0,0169	0,0198	0,0581	0,0316	0,0274	0,0391	0,0646	0,0488	0,0648	0,0594
Cromo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0072	0,0075	0,0071	0,0073	0,0160	0,0197	0,0211	0,0189	0,0119	0,0118	0,0104	0,0113	0,0050	0,0048	0,0029	0,0042
Estanho	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs					<b>0,0018</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0014</b>	<b>0,0014</b>	<b>0,0014</b>	<b>0,0014</b>	0,0061	0,0042	0,0032	0,0045
Manganês	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0604	0,0202	0,0356	0,0387	0,0554	0,0439	0,0646	0,0546	0,0250	0,0490	0,0497	0,0412	0,0178	0,0134	0,0172	0,0161
Níquel	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0626	0,0125	0,0507	0,0419	0,0289	0,0137	0,0174	0,0200	0,0278	0,0313	0,0172	0,0254	0,0022	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0018</b>
Paládio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs					<b>0,0091</b>	<b>0,0088</b>	<b>0,0087</b>	<b>0,0089</b>	<b>0,0072</b>	<b>0,0072</b>	<b>0,0071</b>	<b>0,0071</b>	<b>0,0080</b>	<b>0,0081</b>	<b>0,0081</b>	<b>0,0081</b>
Platina	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs					<b>0,0091</b>	<b>0,0088</b>	<b>0,0087</b>	<b>0,0089</b>	<b>0,0072</b>	<b>0,0072</b>	<b>0,0071</b>	<b>0,0071</b>	<b>0,0080</b>	<b>0,0081</b>	<b>0,0081</b>	<b>0,0081</b>

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1997)

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001b)

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001)

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002)

TABELA 9.3

## CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

Descrição	Inorgânicos		TBF2JUN97				TBF2ABR01				TBF2MAI01				TBF1SET02			
	Unidade	Condição	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
Ródio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs					0,0091	0,0088	0,0087	0,0089	0,0072	0,0072	0,0071	0,0071	0,0080	0,0081	0,0081	0,0081
Prata	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0043	0,0042	0,0041	0,0042												
Selênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0043	0,0042	0,0041	0,0042	0,0018	0,0018	0,0017	0,0018	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
Tálio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs					0,0018	0,0018	0,0017	0,0018	0,0029	0,0022	0,0016	0,0022	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
Telúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0043	0,0042	0,0041	0,0042	0,0018	0,0018	0,0017	0,0018	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
Vanádio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs					0,0129	0,0081	0,0104	0,0105	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
Zinco	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	5,7536	5,3535	6,7634	5,9568												
Mercúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0012	0,0012	0,0054	0,0026	0,0318	0,0281	0,0061	0,0220	0,0094	0,0120	0,0187	0,0134	0,0034	0,0073	0,0057	0,0055
CN <sup>-</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs					0,0086	0,0088	0,0101	0,0092								
F <sup>-</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs					0,0240	0,0174	0,0178	0,0197								

## CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

Descrição	Inorgânicos		TBF2JUN97				TBF2ABR01				TBF2MAI01				TBF1SET02			
	Unidade	Condição	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
Antimônio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0055	0,0054	0,0052	0,0054	0,0030	0,0569	0,0031	0,0210	0,0152	0,0018	0,0020	0,0063	0,0025	0,0024	0,0025	0,0025
Arsênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0481	0,0443	0,0451	0,0458	0,8839	0,8177	1,1391	0,9469	0,0096	0,0178	0,0158	0,0144	0,0025	0,0024	0,0025	0,0025
Bário	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,3093	0,2941	0,3185	0,3073												
Berílio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%																
Cádmio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0059	0,0060	0,0088	0,0069	0,0384	0,0484	0,0389	0,0419	0,0077	0,0038	0,0053	0,0056	0,0025	0,0024	0,0025	0,0025
Chumbo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0285	0,0097	0,0312	0,0231	0,0183	0,4858	0,0202	0,1748	0,0180	0,0076	0,0158	0,0138	0,0142	0,0106	0,0108	0,0118
Cobalto	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%					0,0027	0,0033	0,0031	0,0030	0,0081	0,0040	0,0022	0,0048	0,0025	0,0024	0,0025	0,0025
Cobre	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0215	0,0212	0,0419	0,0282	0,0127	0,0624	0,0307	0,0353	0,1130	0,0392	0,0384	0,0635	0,1005	0,0727	0,1031	0,0921
Cromo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0091	0,0097	0,0091	0,0093	0,0238	0,0363	0,0384	0,0328	0,0231	0,0146	0,0145	0,0174	0,0078	0,0071	0,0046	0,0065
Estanho	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%					0,0027	0,0033	0,0031	0,0030	0,0028	0,0018	0,0020	0,0022	0,0095	0,0063	0,0051	0,0069
Manganês	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0769	0,0259	0,0457	0,0495	0,0825	0,0809	0,1175	0,0936	0,0485	0,0607	0,0696	0,0596	0,0277	0,0200	0,0274	0,0250
Níquel	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0797	0,0161	0,0651	0,0536	0,0430	0,0252	0,0316	0,0333	0,0541	0,0387	0,0241	0,0390	0,0034	0,0024	0,0025	0,0028
Paládio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%					0,0136	0,0162	0,0158	0,0152	0,0140	0,0089	0,0099	0,0109	0,0124	0,0121	0,0129	0,0125
Platina	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%					0,0136	0,0162	0,0158	0,0152	0,0140	0,0089	0,0099	0,0109	0,0124	0,0121	0,0129	0,0125
Ródio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%					0,0136	0,0162	0,0158	0,0152	0,0140	0,0089	0,0099	0,0109	0,0124	0,0121	0,0129	0,0125
Prata	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0055	0,0054	0,0052	0,0054												
Selênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0055	0,0054	0,0052	0,0054	0,0027	0,0033	0,0031	0,0030	0,0028	0,0018	0,0020	0,0022	0,0025	0,0024	0,0025	0,0025
Tálio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%					0,0027	0,0033	0,0031	0,0030	0,0056	0,0027	0,0022	0,0035	0,0025	0,0024	0,0025	0,0025
Telúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0055	0,0054	0,0052	0,0054	0,0027	0,0033	0,0031	0,0030	0,0028	0,0018	0,0020	0,0022	0,0025	0,0024	0,0025	0,0025
Vanádio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%					0,0192	0,0149	0,0189	0,0177	0,0028	0,0018	0,0020	0,0022	0,0025	0,0024	0,0025	0,0025
Zinco	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	7,3228	6,8761	8,6869	7,6286												
Mercúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0016	0,0015	0,0069	0,0033	0,0506	0,0298	0,0086	0,0297	0,0146	0,0185	0,0308	0,0213	0,0052	0,0112	0,0087	0,0084
CN <sup>-</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%					0,0154	0,0181	0,0175	0,0170								
F <sup>-</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%					0,0373	0,0297	0,0290	0,0320								

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1997)

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2011b)

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001)

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002)

TABELA 9.4

## CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

Inorgânicos			TBF2JUN97				TBF2ABR01				TBF2MAI01				TBF1SET02			
Descrição	Unidade	Condição	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
Antimônio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0043	0,0042	0,0041	0,0042	0,0023	0,0447	0,0024	0,0165	0,0120	0,0014	0,0016	0,0050	0,0020	0,0019	0,0020	0,0019
Arsênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0378	0,0348	0,0354	0,0360	0,6945	0,6425	0,8950	0,7440	0,0076	0,0140	0,0124	0,0113	0,0020	0,0019	0,0020	0,0019
Bário	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,2430	0,2311	0,2503	0,2415												
Berílio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%																
Cádmio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0047	0,0047	0,0070	0,0054	0,0302	0,0381	0,0306	0,0329	0,0061	0,0030	0,0042	0,0044	0,0020	0,0019	0,0020	0,0019
Chumbo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0224	0,0076	0,0245	0,0182	0,0144	0,3817	0,0159	0,1373	0,0142	0,0059	0,0124	0,0109	0,0111	0,0083	0,0085	0,0093
Cobalto	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%					0,0021	0,0026	0,0024	0,0024	0,0064	0,0031	0,0017	0,0037	0,0020	0,0019	0,0020	0,0019
Cobre	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0169	0,0167	0,0329	0,0222	0,0099	0,0491	0,0241	0,0277	0,0888	0,0308	0,0302	0,0499	0,0790	0,0571	0,0810	0,0724
Cromo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0072	0,0076	0,0072	0,0073	0,0187	0,0285	0,0301	0,0258	0,0181	0,0115	0,0114	0,0137	0,0061	0,0056	0,0036	0,0051
Estanho	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%					0,0021	0,0026	0,0024	0,0024	0,0022	0,0014	0,0016	0,0017	0,0075	0,0049	0,0040	0,0055
Manganês	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0604	0,0204	0,0359	0,0389	0,0648	0,0635	0,0923	0,0736	0,0381	0,0477	0,0547	0,0468	0,0218	0,0157	0,0215	0,0196
Níquel	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0626	0,0126	0,0512	0,0421	0,0338	0,0198	0,0249	0,0262	0,0425	0,0304	0,0189	0,0306	0,0027	0,0019	0,0020	0,0022
Paládio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%					0,0106	0,0127	0,0124	0,0119	0,0110	0,0070	0,0078	0,0086	0,0098	0,0095	0,0101	0,0098
Platina	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%					0,0106	0,0127	0,0124	0,0119	0,0110	0,0070	0,0078	0,0086	0,0098	0,0095	0,0101	0,0098
Ródio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%					0,0106	0,0127	0,0124	0,0119	0,0110	0,0070	0,0078	0,0086	0,0098	0,0095	0,0101	0,0098
Prata	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0043	0,0042	0,0041	0,0042												
Selênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0043	0,0042	0,0041	0,0042	0,0021	0,0026	0,0024	0,0024	0,0022	0,0014	0,0016	0,0017	0,0020	0,0019	0,0020	0,0019
Tálio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%					0,0021	0,0026	0,0024	0,0024	0,0044	0,0021	0,0017	0,0027	0,0020	0,0019	0,0020	0,0019
Telúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0043	0,0042	0,0041	0,0042	0,0021	0,0026	0,0024	0,0024	0,0022	0,0014	0,0016	0,0017	0,0020	0,0019	0,0020	0,0019
Vanádio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%					0,0151	0,0117	0,0149	0,0139	0,0022	0,0014	0,0016	0,0017	0,0020	0,0019	0,0020	0,0019
Zinco	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	5,7536	5,4026	6,8254	5,9939												
Mercúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0012	0,0012	0,0054	0,0026	0,0398	0,0234	0,0068	0,0233	0,0115	0,0145	0,0242	0,0167	0,0041	0,0088	0,0068	
CN	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%					0,0121	0,0142	0,0137	0,0134								
F	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%					0,0293	0,0233	0,0228	0,0251								

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1997)

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001b)

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001)

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002)

TABELA 9.5

## CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

Inorgânicos			TBF2JUN97				TBF2ABR01				TBF2MAI01				TBF1SET02			
Descrição	Unidade	Condição	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
Antimônio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0039	0,0038	0,0037	0,0038	0,0021	0,0407	<b>0,0022</b>	<b>0,0150</b>	0,0109	<b>0,0013</b>	<b>0,0014</b>	<b>0,0045</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0018</b>
Arsênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0344	0,0317	0,0322	0,0327	0,6314	0,5841	0,8136	0,6764	0,0069	0,0127	0,0113	0,0103	<b>0,0018</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0018</b>
Bário	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,2209	0,2101	0,2275	0,2195												
Berílio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%																
Cádmio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0042	0,0043	0,0063	0,0050	0,0274	0,0346	0,0278	0,0299	0,0055	0,0027	0,0038	0,0040	<b>0,0018</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0018</b>
Chumbo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0204	0,0069	0,0223	0,0165	0,0131	0,3470	0,0144	0,1248	0,0129	0,0054	0,0113	0,0099	0,0101	0,0076	0,0077	0,0085
Cobalto	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%					<b>0,0019</b>	<b>0,0024</b>	<b>0,0022</b>	<b>0,0022</b>	0,0058	0,0029	0,0016	0,0034	<b>0,0018</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0018</b>
Cobre	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0154	0,0151	0,0299	0,0201	0,0090	0,0446	0,0219	0,0252	0,0807	0,0280	0,0274	0,0454	0,0718	0,0519	0,0736	0,0658
Cromo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0065	0,0069	0,0065	0,0066	0,0170	0,0259	0,0274	0,0234	0,0165	0,0104	0,0104	0,0124	0,0056	0,0051	0,0033	0,0047
Estanho	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%					<b>0,0019</b>	<b>0,0024</b>	<b>0,0022</b>	<b>0,0022</b>	<b>0,0020</b>	<b>0,0013</b>	<b>0,0014</b>	<b>0,0016</b>	0,0068	0,0045	0,0036	0,0050
Manganês	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0549	0,0185	0,0327	0,0354	0,0589	0,0578	0,0839	0,0669	0,0347	0,0434	0,0497	0,0426	0,0198	0,0143	0,0195	0,0179
Níquel	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0569	0,0115	0,0465	0,0383	0,0307	0,0180	0,0226	0,0238	0,0387	0,0277	0,0172	0,0278	0,0024	<b>0,0017</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0020</b>
Paládio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%					<b>0,0097</b>	<b>0,0116</b>	<b>0,0113</b>	<b>0,0109</b>	<b>0,0100</b>	<b>0,0064</b>	<b>0,0071</b>	<b>0,0078</b>	<b>0,0089</b>	<b>0,0086</b>	<b>0,0092</b>	<b>0,0089</b>
Platina	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%					<b>0,0097</b>	<b>0,0116</b>	<b>0,0113</b>	<b>0,0109</b>	<b>0,0100</b>	<b>0,0064</b>	<b>0,0071</b>	<b>0,0078</b>	<b>0,0089</b>	<b>0,0086</b>	<b>0,0092</b>	<b>0,0089</b>
Ródio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%					<b>0,0097</b>	<b>0,0116</b>	<b>0,0113</b>	<b>0,0109</b>	<b>0,0100</b>	<b>0,0064</b>	<b>0,0071</b>	<b>0,0078</b>	<b>0,0089</b>	<b>0,0086</b>	<b>0,0092</b>	<b>0,0089</b>
Prata	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0039	0,0038	0,0037	0,0038												
Selênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0039	0,0038	0,0037	0,0038	<b>0,0019</b>	<b>0,0024</b>	<b>0,0022</b>	<b>0,0022</b>	<b>0,0020</b>	<b>0,0013</b>	<b>0,0014</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0018</b>
Tálio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%					<b>0,0019</b>	<b>0,0024</b>	<b>0,0022</b>	<b>0,0022</b>	0,0040	0,0019	0,0016	0,0025	<b>0,0018</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0018</b>
Telúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0039	0,0038	0,0037	0,0038	<b>0,0019</b>	<b>0,0024</b>	<b>0,0022</b>	<b>0,0022</b>	<b>0,0020</b>	<b>0,0013</b>	<b>0,0014</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0018</b>
Vanádio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%					0,0137	0,0107	0,0135	0,0126	<b>0,0020</b>	<b>0,0013</b>	<b>0,0014</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0018</b>
Zinco	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	5,2305	4,9115	6,2050	5,4490												
Mercúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0011	0,0011	0,0049	0,0024	0,0361	0,0213	0,0062	0,0212	0,0104	0,0132	0,0220	0,0152	0,0037	0,0080	0,0062	0,0060
CN	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%					<b>0,0110</b>	<b>0,0129</b>	<b>0,0125</b>	<b>0,0121</b>								
F	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%					<b>0,0267</b>	<b>0,0212</b>	<b>0,0207</b>	<b>0,0229</b>								

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1997)

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001b)

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001)

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002)

TABELA 9.6

## CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

Inorgânicos			TBF2JUN97				TBF2ABR01				TBF2MAI01				TBF1SET02			
Descrição	Unidade	Condição	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
Antimônio	g/h	TE	0,6698	0,6649	0,6686	0,6678	0,345	5,570	0,307	2,0742	1,3499	0,2506	0,2503	0,6170	0,3096	0,3074	0,3061	0,3077
Arsênio	g/h	TE	5,8742	5,4751	5,7516	5,7003	102,376	80,017	113,321	98,5711	0,8540	2,5011	1,9939	1,7830	0,3096	0,3074	0,3061	0,3077
Bário	g/h	TE	37,7630	36,3417	40,6382	38,2476												
Berílio	g/h	TE																
Cádmio	g/h	TE	0,7257	0,7427	1,1290	0,8658	4,450	4,741	3,871	4,3540	0,6819	0,5378	0,6735	0,6310	0,3096	0,3074	0,3061	0,3077
Chumbo	g/h	TE	3,4810	1,1950	3,9819	2,8860	2,122	47,534	2,008	17,2212	1,5962	1,0634	1,9939	1,5512	1,7610	1,3639	1,3009	1,4753
Cobalto	g/h	TE					0,310	0,324	0,307	0,3142	0,7180	0,5622	0,2750	0,5184	0,3096	0,3074	0,3061	0,3077
Cobre	g/h	TE	2,6263	2,6185	5,3420	3,5289	1,466	6,111	3,057	3,5446	10,0074	5,5017	4,8358	6,7816	12,5015	9,3744	12,3968	11,4242
Cromo	g/h	TE	1,1111	1,1950	1,1634	1,1565	2,760	3,551	3,817	3,3759	2,0438	2,0503	1,8317	1,9753	0,9676	0,9221	0,5548	0,8148
Estanho	g/h	TE					0,310	0,324	0,307	0,3142	0,2479	0,2506	0,2503	0,2496	1,1805	0,8068	0,6122	0,8665
Manganês	g/h	TE	9,3863	3,2057	5,8336	6,1419	9,556	7,913	11,685	9,7181	4,2977	8,5283	8,7602	7,1954	3,4447	2,5741	3,2905	3,1031
Níquel	g/h	TE	9,7282	1,9885	8,3079	6,6749	4,985	2,470	3,147	3,5340	4,7936	5,4390	3,0288	4,4205	0,4257	0,3074	0,3061	0,3464
Paládio	g/h	TE					1,570	1,586	1,574	1,5765	1,2397	1,2497	1,2447	1,2447	1,5482	1,5560	1,5496	1,5513
Platina	g/h	TE					1,570	1,586	1,574	1,5765	1,2397	1,2497	1,2447	1,2447	1,5482	1,5560	1,5496	1,5513
Ródio	g/h	TE					1,570	1,586	1,574	1,5765	1,2397	1,2497	1,2447	1,2447	1,5482	1,5560	1,5496	1,5513
Prata	g/h	TE	0,6698	0,6649	0,6686	0,6678												
Selênio	g/h	TE	0,6698	0,6649	0,6686	0,6678	0,310	0,324	0,307	0,3142	0,2479	0,2506	0,2503	0,2496	0,3096	0,3074	0,3061	0,3077
Tálio	g/h	TE					0,310	0,324	0,307	0,3142	0,4959	0,3759	0,2750	0,3823	0,3096	0,3074	0,3061	0,3077
Telúrio	g/h	TE	0,6698	0,6649	0,6686	0,6678	0,310	0,324	0,307	0,3142	0,2479	0,2506	0,2503	0,2496	0,3096	0,3074	0,3061	0,3077
Vanádio	g/h	TE					2,225	1,460	1,881	1,8555	0,2479	0,2506	0,2503	0,2496	0,3096	0,3074	0,3061	0,3077
Zinco	g/h	TE	894,13	849,59	1108,28	950,66												
Mercúrio	g/h	TE	0,1896	0,1847	0,8586	0,4110	5,852	5,302	1,142	4,0987	1,6426	2,1341	3,3457	2,3741	0,6640	1,4239	1,1158	1,0679
CN	g/h	TE					1,531	1,599	1,851	1,6603								
F	g/h	TE					4,397	3,321	3,246	3,6543								

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1997)

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001b)

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001)

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002)





TABELA 9.8

## CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

			TESTE	TQF1JUL96				TQF1JUN98			TQF1SET98				TQF2SET02					
			Coleta	1	2	3	Média	1	2	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média		
Corrente			Unidade	Metais	Metais	Metais		Metais	Metais		Metais	Metais	Metais		MP/Metais	MP/Metais	MP/Metais			
HF	DADOS GERAIS	Nm <sup>3</sup> /h	Vazão(bs)								191260	190034	191134	190809	192790	194459	197940	195063		
		Nm <sup>3</sup> /h	Vazão(bu)																	
		m <sup>3</sup> /h	Vazão(ch)																	
		%	Umidade																	
		%	O <sub>2</sub>									12,0	11,4	11,8	11,7	12,6	12,2	11,9	12,2	
		C	Tch																	
		mm Hg	Pch																	
Metais pesados	DADOS GERAIS	Nm <sup>3</sup> /h	Vazão(bs)	159507	145170	145559	150078	147006	147613	147309	151255	134157	143385	142932	208524	207703	197609	204612		
		Nm <sup>3</sup> /h	Vazão(bu)	194520	175453	174427	181467	174384	175312	174848	183562	164206	172753	173507	238586	239289	230313	236063		
		m <sup>3</sup> /h	Vazão(ch)	292063	263405	262553	272674	264496	263540	264018	270594	239654	255830	255359	357951	353906	339176	350344		
		%	Umidade	18,0	17,3	16,6	17,3	15,7	15,8	15,8	17,6	18,3	17,0	17,6	12,6	13,2	14,2	14,2	13,3	
		%	O <sub>2</sub>	10,2	10,4	10,3	10,3	10,0	10,0	10,0	10,0	8,0	10,0	9,3	13,2	14,2	13,0	13,0	13,5	
		C	Tch	107	107	108	108	111	108	109	102	101	107	103	107	102	100	100	103	
		mm Hg	Pch	705	705	705	705	705	705	705	708	714	714	712	705	705	705	705	705	

## CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

Inorgânicos			TQF1JUL96				TQF1JUN98			TQF1SET98				TQF2SET02			
Descrição	Unidade	Condição	1	2	3	Média	1	2	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
Antimônio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	<b>0,0078</b>	<b>0,0086</b>	<b>0,0087</b>	<b>0,0083</b>	<b>0,0037</b>	<b>0,0037</b>	<b>0,0037</b>	<b>0,0040</b>	<b>0,0043</b>	<b>0,0042</b>	<b>0,0042</b>	<b>0,0016</b>	0,0025	<b>0,0016</b>	<b>0,0019</b>
Arsênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	<b>0,0078</b>	<b>0,0086</b>	<b>0,0087</b>	<b>0,0083</b>	<b>0,0037</b>	<b>0,0037</b>	<b>0,0037</b>	<b>0,0040</b>	<b>0,0043</b>	<b>0,0042</b>	<b>0,0042</b>	0,0609	0,1063	0,0569	0,0747
Bário	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	<b>0,1949</b>	<b>0,2142</b>	<b>0,2165</b>	<b>0,2085</b>	8,4931	9,2831	8,8881	10,9033	12,0036	11,0035	11,3035				
Berílio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs												<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>
Cádmio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	<b>0,0039</b>	0,0059	0,0049	<b>0,0049</b>								<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>
Chumbo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0079	<b>0,0086</b>	<b>0,0087</b>	<b>0,0084</b>	0,0693	0,0611	0,0652	0,2112	0,1346	0,1655	0,1704	0,0379	0,0323	0,0147	0,0283
Cobalto	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs												0,0019	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0017</b>
Cobre	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	<b>0,0078</b>	<b>0,0086</b>	<b>0,0087</b>	<b>0,0083</b>	0,0180	0,0195	0,0188	<b>0,0208</b>	0,0140	0,0228	<b>0,0192</b>	0,0082	0,0158	0,0081	0,0107
Cromo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0089	0,0121	0,0094	0,0101	0,0212	0,0449	0,0331	0,0108	0,0110	0,0142	0,0120	0,0138	0,0113	0,0051	0,0101
Estanho	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs								<b>0,0040</b>	<b>0,0043</b>	<b>0,0042</b>	<b>0,0042</b>	0,0033	0,0036	0,0032	0,0034
Manganês	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0162	0,0129	0,0123	0,0138	0,0422	0,0633	0,0528	0,0168	0,0178	0,0173	0,0173	0,0305	0,0279	0,0191	0,0258
Níquel	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	<b>0,0117</b>	<b>0,0129</b>	0,0139	<b>0,0128</b>	0,1471	0,4501	0,2986	0,0046	<b>0,0043</b>	0,0070	<b>0,0053</b>	0,0204	0,0074	0,0030	0,0103
Paládio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs												<b>0,0078</b>	<b>0,0078</b>	<b>0,0080</b>	<b>0,0079</b>
Platina	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs												<b>0,0078</b>	<b>0,0078</b>	<b>0,0080</b>	<b>0,0079</b>

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996)

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1998)

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002a), CCRG (2002) e CETESB (2004f)

TABELA 9.9

## CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

Inorgânicos			TQF1JUL96				TQF1JUN98			TQF1SET98				TQF2SET02			
Descrição	Unidade	Condição	1	2	3	Média	1	2	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
Ródio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs												0,0078	0,0078	0,0080	0,0079
Prata	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0078	0,0086	0,0087	0,0083											
Selênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0078	0,0086	0,0087	0,0083								0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
Tálio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs												0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
Telúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,0078	0,0086	0,0087	0,0083								0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
Vanádio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs												0,0219	0,0149	0,0035	0,0134
Zinco	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs	0,2241	0,3435	0,3006	0,2894								0,0510	0,0363	0,0252	0,0375
Mercúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs												0,0096	0,0069	0,0112	0,0092
CN	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs					0,0310	0,0300	0,0305	0,0197	0,0190	0,0194	0,0194	0,0084	0,0086	0,0084	0,0085
F	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs												0,0640	0,0490	0,0600	0,0577

## CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE

Inorgânicos			TQF1JUL96				TQF1JUN98			TQF1SET98				TQF2SET02			
Descrição	Unidade	Condição	1	2	3	Média	1	2	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
Antimônio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0101	0,0113	0,0113	0,0109	0,0047	0,0047	0,0047	0,0051	0,0046	0,0053	0,0050	0,0029	0,0051	0,0028	0,0036
Arsênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0101	0,0113	0,0113	0,0109	0,0047	0,0047	0,0047	0,0051	0,0046	0,0053	0,0050	0,1093	0,2189	0,0996	0,1426
Bário	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,2526	0,2829	0,2833	0,2730	10,8094	11,8149	11,3121	13,8769	12,9270	14,0045	13,6028				
Berílio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%												0,0029	0,0033	0,0028	0,0030
Cádmio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0051	0,0077	0,0064	0,0064								0,0029	0,0033	0,0028	0,0030
Chumbo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0102	0,0113	0,0113	0,0109	0,0882	0,0778	0,0830	0,2688	0,1450	0,2106	0,2081	0,0680	0,0665	0,0257	0,0534
Cobalto	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%												0,0034	0,0033	0,0028	0,0032
Cobre	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0101	0,0113	0,0113	0,0109	0,0229	0,0248	0,0239	0,0265	0,0151	0,0290	0,0235	0,0147	0,0325	0,0142	0,0205
Cromo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0115	0,0159	0,0123	0,0133	0,0270	0,0571	0,0421	0,0137	0,0118	0,0181	0,0146	0,0248	0,0233	0,0089	0,0190
Estanho	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%								0,0051	0,0046	0,0053	0,0050	0,0059	0,0074	0,0056	0,0063
Manganês	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0211	0,0170	0,0161	0,0180	0,0537	0,0806	0,0671	0,0214	0,0192	0,0220	0,0209	0,0547	0,0574	0,0334	0,0485
Níquel	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0152	0,0170	0,0182	0,0168	0,1872	0,5729	0,3800	0,0059	0,0046	0,0089	0,0065	0,0366	0,0152	0,0053	0,0190
Paládio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%												0,0140	0,0161	0,0140	0,0147
Platina	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%												0,0140	0,0161	0,0140	0,0147
Ródio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%												0,0140	0,0161	0,0140	0,0147
Prata	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0101	0,0113	0,0113	0,0109											
Selênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0101	0,0113	0,0113	0,0109								0,0029	0,0033	0,0028	0,0030
Tálio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%												0,0029	0,0033	0,0028	0,0030
Telúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,0101	0,0113	0,0113	0,0109								0,0029	0,0033	0,0028	0,0030
Vanádio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%												0,0393	0,0307	0,0061	0,0254
Zinco	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%	0,2905	0,4537	0,3933	0,3792								0,0915	0,0747	0,0441	0,0701
Mercúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%												0,0164	0,0118	0,0196	0,0159
CN	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%					0,0381	0,0382	0,0381	0,0251	0,0266	0,0247	0,0255	0,0134	0,0151	0,0151	0,0145
F	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs7%												0,1067	0,0780	0,0923	0,0923

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996)

Fonte: TASQA SERVIÇOS

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002a), CCRG (2002) e CETESB (2004a)

TABELA 9.10

## CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

Inorgânicos			TQF1JUL96				TQF1JUN98			TQF1SET98				TQF2SET02			
Descrição	Unidade	Condição	1	2	3	Média	1	2	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
Antimônio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0079	0,0089	0,0089	0,0086	0,0037	0,0037	0,0037	0,0040	0,0036	0,0042	0,0039	0,0023	0,0040	0,0022	0,0028
Arsênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0079	0,0089	0,0089	0,0086	0,0037	0,0037	0,0037	0,0040	0,0036	0,0042	0,0039	0,0859	0,1720	0,0782	0,1120
Bário	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,1985	0,2223	0,2226	0,2145	8,4931	9,2831	8,8881	10,9033	10,1569	11,0035	10,6879				
Berílio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%												0,0023	0,0026	0,0022	0,0023
Cádmio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0040	0,0061	0,0050	0,0050								0,0023	0,0026	0,0022	0,0023
Chumbo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0080	0,0089	0,0089	0,0086	0,0693	0,0611	0,0652	0,2112	0,1139	0,1655	0,1635	0,0534	0,0523	0,0202	0,0420
Cobalto	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%												0,0027	0,0026	0,0022	0,0025
Cobre	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0079	0,0089	0,0089	0,0086	0,0180	0,0195	0,0188	0,0208	0,0118	0,0228	0,0185	0,0116	0,0256	0,0111	0,0161
Cromo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0091	0,0125	0,0097	0,0104	0,0212	0,0449	0,0331	0,0108	0,0093	0,0142	0,0114	0,0195	0,0183	0,0070	0,0149
Estanho	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%								0,0040	0,0036	0,0042	0,0039	0,0047	0,0058	0,0044	0,0050
Manganês	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0165	0,0133	0,0126	0,0142	0,0422	0,0633	0,0528	0,0168	0,0151	0,0173	0,0164	0,0430	0,0451	0,0263	0,0381
Níquel	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0119	0,0133	0,0143	0,0132	0,1471	0,4501	0,2986	0,0046	0,0036	0,0070	0,0051	0,0288	0,0120	0,0041	0,0150
Paládio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%												0,0110	0,0126	0,0110	0,0115
Platina	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%												0,0110	0,0126	0,0110	0,0115
Ródio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%												0,0110	0,0126	0,0110	0,0115
Prata	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0079	0,0089	0,0089	0,0086											
Selênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0079	0,0089	0,0089	0,0086								0,0023	0,0026	0,0022	0,0023
Tálio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%												0,0023	0,0026	0,0022	0,0023
Telúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,0079	0,0089	0,0089	0,0086								0,0023	0,0026	0,0022	0,0023
Vanádio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%												0,0309	0,0241	0,0048	0,0199
Zinco	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%	0,2283	0,3564	0,3090	0,2979								0,0719	0,0587	0,0347	0,0551
Mercúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%												0,0129	0,0093	0,0154	0,0125
CN	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%					0,0299	0,0300	0,0300	0,0197	0,0209	0,0194	0,0200	0,0105	0,0118	0,0118	0,0114
F	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs10%												0,0838	0,0613	0,0725	0,0725

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996)

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1998)

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002a), CCRG (2002) e CETESB (2004a)

TABELA 9.11

## CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

Inorgânicos			TQF1JUL96				TQF1JUN98			TQF1SET98				TQF2SET02			
Descrição	Unidade	Condição	1	2	3	Média	1	2	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
Antimônio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0072	0,0081	0,0081	0,0078	0,0034	0,0034	0,0034	<b>0,0036</b>	<b>0,0033</b>	<b>0,0038</b>	<b>0,0036</b>	<b>0,0021</b>	0,0037	<b>0,0020</b>	<b>0,0026</b>
Arsênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0072	0,0081	0,0081	0,0078	0,0034	0,0034	0,0034	<b>0,0036</b>	<b>0,0033</b>	<b>0,0038</b>	<b>0,0036</b>	0,0781	0,1563	0,0711	0,1018
Bário	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,1804	0,2021	0,2024	0,1950	7,7210	8,4392	8,0801	9,9121	9,2335	10,0032	9,7163				
Berílio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%												<b>0,0021</b>	<b>0,0024</b>	<b>0,0020</b>	<b>0,0021</b>
Cádmio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0036	0,0055	0,0046	0,0046								<b>0,0021</b>	<b>0,0024</b>	<b>0,0020</b>	<b>0,0021</b>
Chumbo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0073	0,0081	0,0081	0,0078	0,0630	0,0555	0,0593	0,1920	0,1035	0,1505	0,1487	0,0486	0,0475	0,0184	0,0382
Cobalto	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%												0,0024	<b>0,0024</b>	<b>0,0020</b>	<b>0,0023</b>
Cobre	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0072	0,0081	0,0081	0,0078	0,0164	0,0177	0,0170	<b>0,0189</b>	0,0108	0,0207	<b>0,0168</b>	0,0105	0,0232	0,0101	0,0146
Cromo	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0082	0,0114	0,0088	0,0095	0,0193	0,0408	0,0300	0,0098	0,0085	0,0129	0,0104	0,0177	0,0166	0,0064	0,0136
Estanho	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%								<b>0,0036</b>	<b>0,0033</b>	<b>0,0038</b>	<b>0,0036</b>	0,0042	0,0053	0,0040	0,0045
Manganês	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0150	0,0121	0,0115	0,0129	0,0384	0,0575	0,0480	0,0153	0,0137	0,0157	0,0149	0,0391	0,0410	0,0239	0,0347
Níquel	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0108	0,0121	0,0130	0,0120	0,1337	0,4092	0,2715	0,0042	<b>0,0033</b>	0,0064	<b>0,0046</b>	0,0262	0,0109	0,0038	0,0136
Paládio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%												<b>0,0100</b>	<b>0,0115</b>	<b>0,0100</b>	<b>0,0105</b>
Platina	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%												<b>0,0100</b>	<b>0,0115</b>	<b>0,0100</b>	<b>0,0105</b>
Ródio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%												<b>0,0100</b>	<b>0,0115</b>	<b>0,0100</b>	<b>0,0105</b>
Prata	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0072	0,0081	0,0081	0,0078											
Selênio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0072	0,0081	0,0081	0,0078								<b>0,0021</b>	<b>0,0024</b>	<b>0,0020</b>	<b>0,0021</b>
Tálio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%												<b>0,0021</b>	<b>0,0024</b>	<b>0,0020</b>	<b>0,0021</b>
Telúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,0072	0,0081	0,0081	0,0078								<b>0,0021</b>	<b>0,0024</b>	<b>0,0020</b>	<b>0,0021</b>
Vanádio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%												0,0281	0,0219	0,0044	0,0181
Zinco	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%	0,2075	0,3240	0,2809	0,2708								0,0654	0,0534	0,0315	0,0501
Mercúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%												0,0117	0,0084	0,0140	0,0114
CN	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%					0,0272	0,0273	0,0272	<b>0,0179</b>	<b>0,0190</b>	<b>0,0176</b>	<b>0,0182</b>	<b>0,0095</b>	<b>0,0108</b>	<b>0,0108</b>	<b>0,0104</b>
F	mg/Nm <sup>3</sup>	CNbs11%												0,0762	0,0557	0,0659	0,0659

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996)

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1998)

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002a), CCRG (2002) e CETESB (2004a)

TABELA 9.12

## CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

Inorgânicos			TQF1JUL96				TQF1JUN98			TQF1SET98				TQF2SET02			
Descrição	Unidade	Condição	1	2	3	Média	1	2	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
Antimônio	g/h	TE	1,2442	1,2441	1,2605	1,2496	0,5439	0,5462	0,5450	0,6050	0,5769	0,6022	0,5947	0,3336	0,5193	0,3162	0,3897
Arsênio	g/h	TE	1,2442	1,2441	1,2605	1,2496	0,5439	0,5462	0,5450	0,6050	0,5769	0,6022	0,5947	12,6991	22,0788	11,2439	15,3406
Bário	g/h	TE	31,085	31,098	31,518	31,234	1248,53	1370,31	1309,42	1649,18	1610,36	1577,74	1612,42				
Berílio	g/h	TE												0,3336	0,3323	0,3162	0,3274
Cádmio	g/h	TE	0,6221	0,8507	0,7147	0,7292								0,3336	0,3323	0,3162	0,3274
Chumbo	g/h	TE	1,2537	1,2441	1,2605	1,2528	10,1875	9,0191	9,6033	31,9450	18,0575	23,7302	24,5776	7,9031	6,7088	2,9048	5,8389
Cobalto	g/h	TE												0,3962	0,3323	0,3162	0,3482
Cobre	g/h	TE	1,2442	1,2441	1,2605	1,2496	2,6461	2,8785	2,7623	3,1461	1,8782	3,2692	2,7645	1,7099	3,2817	1,6006	2,1974
Cromo	g/h	TE	1,4196	1,7522	1,3668	1,5129	3,1165	6,6278	4,8722	1,6336	1,4757	2,0361	1,7151	2,8776	2,3470	1,0078	2,0775
Estanho	g/h	TE								0,6050	0,5769	0,6022	0,5947	0,6881	0,7477	0,6323	0,6894
Manganês	g/h	TE	2,5904	1,8654	1,7860	2,0806	6,2036	9,3439	7,7738	2,5411	2,3880	2,4806	2,4699	6,3600	5,7949	3,7743	5,3097
Níquel	g/h	TE	1,8646	1,8654	2,0276	1,9192	21,6245	66,4406	44,0326	0,6958	0,5769	1,0037	0,7588	4,2539	1,5370	0,5928	2,1279
Paládio	g/h	TE												1,6265	1,6201	1,5809	1,6091
Platina	g/h	TE												1,6265	1,6201	1,5809	1,6091
Ródio	g/h	TE												1,6265	1,6201	1,5809	1,6091
Prata	g/h	TE	1,2442	1,2441	1,2605	1,2496											
Selênio	g/h	TE	1,2442	1,2441	1,2605	1,2496								0,3336	0,3323	0,3162	0,3274
Tálio	g/h	TE												0,3336	0,3323	0,3162	0,3274
Telúrio	g/h	TE	1,2442	1,2441	1,2605	1,2496								0,3336	0,3323	0,3162	0,3274
Vanádio	g/h	TE												4,5667	3,0948	0,6916	2,7844
Zinco	g/h	TE	35,7470	49,8629	43,7565	43,1221								10,6347	7,5396	4,9797	7,7180
Mercúrio	g/h	TE												1,8575	1,3390	2,2220	1,8062
CN	g/h	TE					4,6506	4,5419	4,5962	2,5249	2,8073	2,9616	2,7646	1,6275	1,6640	1,6396	1,6437
F	g/h	TE												12,3386	9,5285	11,8764	11,2478

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996)

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1998)

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002a), CCRG (2002) e CETESB (2004a)

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1998a) e TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1998b)

**TABELA 10**  
**EMISSIONES DE MERCÚRIO EM CHAMINÉS DOS FORNOS 1 E 2 DA CCRG, NO PERÍODO DE JUN/97 A SET/02**

Parâmetro	Condição	Unidade	TBF2JUN97				TBF2ABR01				TBF1SET02				TQF2MAI01				TQF2SET02			
			Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média
Concentração	CN	mg Hg/Nm³	0,001	0,001	0,0054	0,0026	0,0318	0,0281	0,0061	0,0220	0,0034	0,0073	0,0057	0,0055	0,009	0,012	0,019	0,0134	0,0096	0,0069	0,0112	0,0092
Concentração	CN 7% O <sub>2</sub>	mg Hg/Nm³	0,002	0,002	0,0069	0,0033																
Concentração	CN 10% O <sub>2</sub>	mg Hg/Nm³																				
Concentração	CN 11% O <sub>2</sub>	mg Hg/Nm³					0,0362	0,0213	0,0062	0,0212	0,0037	0,0080	0,0062	0,0060	0,011	0,013	0,022	0,0153	0,0117	0,0084	0,0139	0,0113
Taxa de emissão		kg Hg/hora	0,190	0,185	0,8590	0,4113	5,8600	5,3100	1,1400	4,1033	0,6580	1,4200	1,1100	1,0627	1,650	2,140	3,350	2,3800	1,8600	1,3300	2,2100	1,8000
Carregamento		t/h																				
Vazão do gás	CN bs	Nm³/hora	158148	154042	159017	157069	184026	188678	187231	186645	195304	195060	195750	195371	174746	177839	178916	177167	193488	194065	198394	195316
Vazão do gás	C chaminé	m³/hora	274705	267525	277361	273197	323966	333196	328733	328632	335189	339082	337306	337192	306657	313422	320235	313438	345879	343369	345246	344831
Isocinética média		%	95,70	92,90	95,60	94,70	97,80	96,20	97,00	97,00	99,20	99,00	98,80	99,00	98,50	98,90	99,90	99,10	99,30	99,00	98,40	98,90
Velocidade média gás		m/s	9,80	9,50	9,90	9,70	11,50	11,90	11,70	11,70	12,00	12,10	12,00	12,00	10,90	11,20	11,40	11,20	12,30	12,20	12,30	12,30
Umidade do gás		%v/v	14,70	14,60	15,10	14,80	15,20	15,20	14,70	15,00	12,20	13,00	14,00	13,10	14,70	15,00	16,40	15,40	15,70	15,20	14,30	15,10
Temperatura chaminé		C	102,50	103,00	102,10	102,50	103,10	104,50	104,30	104,00	109,20	110,30	102,80	107,40	104,40	104,50	104,30	104,40	109,00	107,10	105,00	107,00
<b>Composição gases</b>																						
Dióxido de carbono		%CO <sub>2</sub> v/v	16,80	16,60	16,60	16,70	15,90	10,00	14,00	13,30	16,40	17,40	15,00	16,30	15,00	15,00	14,40	14,80	15,40	14,80	13,80	14,70
Oxigênio		%O <sub>2</sub> v/v	10,20	10,00	10,00	10,10	12,20	7,80	11,10	10,40	11,80	11,90	11,80	11,80	12,00	11,90	12,50	12,10	12,80	12,80	13,00	12,90
Nitrogênio		%N <sub>2</sub> v/v	73,00	73,40	73,40	73,30	71,90	82,20	74,90	76,30	71,80	70,70	73,20	71,90	73,00	73,10	73,10	73,10	71,80	72,40	73,20	72,50
<b>Gerais</b>																						
Data		d/m/a	3/7/97	3/7/97	4/7/97		26/4/01	26/4/01	26/4/01		26/9/02	26/9/02	26/9/02		30/5/01	30/5/01	30/5/01		16/9/02	17/9/02	18/9/02	
hora início		h:m	07:02	11:03	08:05		08:20	10:49	14:07		08:00	10:43	14:00		08:40	11:15	13:45		14:15	13:35	08:32	
hora término		h:m	10:15	14:18	11:15		10:26	12:55	16:29		10:07	12:47	16:06		10:44	13:20	15:50		16:25	16:58	13:31	
P <sub>atm</sub>		mm Hg	705,00	705,00	705,00	705,00	701,00	701,00	701,00	701,00	705,00	705,00	705,00	705,00	701,00	701,00	701,00	701,00	705,00	705,00	705,00	705,00
P <sub>estática</sub> chaminé		mm Hg	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,50	0,50	0,50	0,50	0,40	0,30	0,40	0,40	0,50	0,40	0,40	0,40

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002) Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001b)

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL

Fonte: BIOAGRI (2002a)

**TABELA 11**  
**EMISSIONES DE CIANETO EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG, NO PERÍODO DE JUN/98 A SET/02**

Parâmetro	Condição	Unidade	TBF2ABR01				TQF1JUN98			TQF1SET98				TQF2SET02			
			Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Média	Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média
Concentração	CN	mg CN-/Nm <sup>3</sup>	0,0086	0,0088	0,0101	0,0092	0,0310	0,0300	0,0305	0,0197	0,0190	0,0194	0,0194	0,0084	0,0086	0,0084	0,0085
Concentração	CN 7% O <sub>2</sub>	mg CN-/Nm <sup>3</sup>					0,0380	0,0380						0,01336	0,01505	0,01508	0,0145
Concentração	CN 10% O <sub>2</sub>	mg CN-/Nm <sup>3</sup>												0,0105	0,0118	0,0118	0,0114
Concentração	CN 11% O <sub>2</sub>	mg CN-/Nm <sup>3</sup>	0,0112	0,0130	0,0125	0,0122				0,0179	0,0190	0,0176	0,0182	0,0096	0,0108	0,0108	0,0104
Taxa de emissão		kg CN-/hora	1,5460	1,6000	1,8510	1,6657	0,0046	0,0046	0,0046	2,5300	2,8100	2,9600	2,7667	1,6220	1,6620	1,6460	1,6433
Carregamento		t/h															
Vazão do gás	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	177971	181733	183268	180991	150019	151396	150708	128165	147754	152658	142859	193754	193494	195193	194147
Vazão do gás	C chaminé	m <sup>3</sup> /hora	313466	314064	324761	317430	260516	269559	265038	240868	271017	279033	263639	336404	335735	335408	335849
Isocinética média		%	99,6	96,3	99,8	98,6	103,8	105,0	104,4	120,2	108,5	102,5	110,4	97,0	94,8	95,6	95,8
Velocidade média gás		m/s	11,2	11,2	11,6	11,3	9,3	9,6	9,5	8,6	9,7	10,0	9,4	12,0	12,0	12,0	12,0
Umidade do gás		%v/v	15,2	13,5	15,6	14,8	12,7	15,2	14,0	20,5	19,7	18,8	19,7	14,9	14,8	14,4	14,7
Temperatura chaminé		C	103,25	103,67	103,71	103,5	111,3	109,8	110,5	112,0	106,3	109,3	109,2	102,0	102,0	100,0	101,3
<b>Composição gases</b>																	
Dióxido de carbono		%CO <sub>2</sub> v/v	19,1	17,2	17,1	17,8	17,8	17,8	17,8	18,0	17,0	19,0	18,0	15,6	15,6	14,0	15,1
Oxigênio		%O <sub>2</sub> v/v	13,2	14,2	12,9	13,4	9,6	10,0	9,8	10,0	11,0	10,0	10,3	12,2	13,0	13,2	12,8
Nitrogênio		%N <sub>2</sub> v/v	67,7	68,6	70	68,8	72,6	72,2	72,4	72,0	72,0	71,0	71,7	72,2	71,4	72,8	72,1
<b>Gerais</b>																	
Data		d/m/a	25/4/01	25/4/01	25/4/01		20/6/98	20/6/98		23/10/98	23/10/98	23/10/98		5/9/02	5/9/02	5/9/02	
hora início		h:m	08:30	10:35	14:00		18:15	19:50		08:20	11:15	15:10		12:00	13:25	14:50	
hora término		h:m	10:13	12:17	15:45		19:25	21:00		10:45	13:25	17:20		13:05	14:30	15:56	
P <sub>atm</sub>		mm Hg	701	701	701	701,0	705,0	705,0		705,0	705,0	705,0	705,0				
P <sub>estática chaminé</sub>		mm Hg	0,419	0,454	0,404	0,4	0,4	0,4		2,0	2,0	2,0	2,0				

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001)

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1998b)

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1998)

Fonte: CETESB (2004a)

**TABELA 12**  
**EMISSÕES DE FLUORETOS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG,**  
**NO PERÍODO DE ABR/01 A SET/02**

Parâmetro	Condição	Unidade	TBF2ABR01				TQF2SET02			
			Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média
Concentração	CN	mg F-/Nm <sup>3</sup>	0,0240	0,0174	0,0178	0,0197	0,0640	0,0490	0,0600	0,0577
Concentração	CN 7% O <sub>2</sub>	mg F-/Nm <sup>3</sup>					0,1067	0,0780	0,0923	0,0923
Concentração	CN 10% O <sub>2</sub>	mg F-/Nm <sup>3</sup>	0,02933	0,02334	0,02277	0,0251	0,0838	0,0613	0,0725	0,0725
Concentração	CN 11% O <sub>2</sub>	mg F-/Nm <sup>3</sup>	0,0265	0,0212	0,0206	0,0228	0,0760	0,0560	0,0670	0,0663
Taxa de emissão		g F-/hora	4,397	3,321	3,246	3,6543	12,3000	9,5900	12,0400	11,3100
Carregamento		t/h								
Vazão do gás	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	183189	190844	182349	185461	192790	194459	197940	195063
Vazão do gás	C chaminé	m <sup>3</sup> /hora	323241	334479	319397	325706	341305	343647	345720	343557
Isocinética média		%	97,1	95,1	97,4	96,5	96,0	98,5	98,1	97,5
Velocidade média gás		m/s	11,5	11,9	11,4	11,6	12,2	12,3	12,3	12,3
Umidade do gás		%v/v	15,6	15,3	15,3	15,4	15,2	15,3	14,6	15,0
Temperatura chaminé		C	102,3	101,1	100,8	101,4	107,5	106,5	105,2	106,4
<b>Composição gases</b>										
Dióxido de carbono		%CO <sub>2</sub> v/v	18,0	16,2	17,1	17,1	15,4	15,7	15,2	15,4
Oxigênio		%O <sub>2</sub> v/v	12,0	12,8	12,4	12,4	12,6	12,2	11,9	12,2
Nitrogênio		%N <sub>2</sub> v/v	70,0	71,0	70,5	70,5	72,0	72,1	72,9	72,3
<b>Gerais</b>										
Data		d/m/a	19/4/01	20/4/01	20/4/01		18/9/02	18/9/02	18/9/02	
hora início		h:m	15:28	09:10	10:53		14:20	15:34	20:56	
hora término		h:m	16:32	10:23	11:59		15:24	16:47	22:19	
P <sub>atm</sub>		mm Hg	701,0	701,0	701,0	701,0	705,0	705,0	705,0	
P <sub>estática</sub> chaminé		mm Hg	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001)

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002a)



**TABELA 13.1**  
**RESULTADOS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG, NO PERÍODO DE AGO/95 A ABR/01**

Parâmetro	Condição	Unidade	TBF1AGO95				TBF2JUN97				TBF2ABR01				TQF1JUL96			
			Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média
<b>Ácido clorídrico</b>	HCl																	
Concentração	CN bs	mg/Nm <sup>3</sup>	0	0	0	0	0,069	0,075	0,073	0,072	0,335	0,341	0,360	0,345	0,078	0,082	0,092	0,084
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>					0,097	0,095	0,092	0,095					0,098	0,106	0,120	0,108
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>					0,076	0,075	0,072	0,074	0,376	0,383	0,440	0,400	0,077	0,083	0,094	0,085
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>									0,342	0,348	0,400	0,363				
Taxa de emissão	chaminé	g HCl/hora	0	0	0	0	11,39	11,56	11,41	11,45	60,93	61,37	62,37	61,56	13,00	12,80	14,10	13,30
<b>Cloro</b>	Cl <sub>2</sub>																	
Concentração	CN bs	mg/Nm <sup>3</sup>	15,97	12,63	14,54	14,38	0,069	0,075	0,073	0,072	0,335	0,341	0,360	0,345	0,078	0,082	0,295	0,152
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>					0,097	0,095	0,092	0,095					0,098	0,106	0,382	0,195
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	15,01	11,58	13,91	13,50	0,076	0,075	0,072	0,074	0,376	0,383	0,440	0,400	0,077	0,083	0,300	0,153
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>									0,342	0,348	0,400	0,363	13,038	12,848	45,032	23,639
Taxa de emissão	chaminé	g Cl <sub>2</sub> /hora	2614,54	2016,58	2404,92	2345,35	11,39	11,56	11,41	11,45	60,93	61,37	62,37	61,56	13,00	12,80	45,00	23,60
Vazão do gás	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	163716	159666	165400	162927	165109	154128	156305	158514	181890	179960	173256	178369	166934	157072	152651	158886
Vazão do gás	C chaminé	m <sup>3</sup> /hora					276377	272483	274995	274618	322328	316561	305383	314757	298760	282615	278801	286725
Isocinética média		%					93,60	93,00	94,20	93,60	101,00	100,40	98,70	100,03	94,36	95,82	94,63	94,94
Velocidade média gás		m/s					9,85	9,71	9,80	9,79	11,50	11,30	10,90	11,23	10,65	10,07	9,94	10,22
Umidade do gás		%v/v					11,30	15,40	14,90	13,87	15,70	15,30	15,40	15,47	17,24	17,26	17,76	17,42
Temperatura chaminé		°C					103,38	105,83	106,54	105,25	103,38	102,38	102,92	102,89	102,25	104,21	107,54	104,67
<b>Composição gases</b>																		
Dióxido de carbono		%CO <sub>2</sub> v/v					17,00	17,40	17,00	17,13	16,80	15,00	16,00	15,93	15,80	16,00	16,00	15,93
Oxigênio		%O <sub>2</sub> v/v	9,30	9,00	9,50	9,27	11,00	10,00	9,80	10,27	11,20	11,20	12,00	11,47	9,80	10,20	10,20	10,07
Nitrogênio		%N <sub>2</sub> v/v					72,00	72,60	73,20	72,60	72,00	73,80	72,00	72,60	74,40	73,80	73,80	74,00
<b>Gerais</b>																		
Data		d/m/a	3/8/95	3/8/95	3/8/95		26/6/97	26/6/97	26/6/97		23/4/01	24/4/01	24/4/01		23/7/96	23/7/96	31/7/96	
hora início		h:m					07:50	11:25	14:20		14:45	09:30	13:20		12:32	14:53	11:10	
hora término		h:m					10:15	13:40	16:25		16:50	11:38	15:27		14:36	16:59	13:14	
P <sub>atm</sub>		mm Hg					705,00	705,00	705,00	705,00	701,00	701,00	701,00	701,00	705,00	705,00	705,00	705,00
P <sub>estática</sub> chaminé		mm Hg					0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,37	0,34	0,39	0,25	0,25	0,25	0,25

Fonte: CETESB (1995)

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1997)

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996)

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001)

**TABELA 13.2**  
**RESULTADOS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG, NO PERÍODO DE JUN/98 A SET/02**

Parâmetro	Condição	Unidade	TQF1JUN98			TQF1SET98				TQF2SET02			
			Am1	Am2	Média	Am1	Am2	Am3	Média	Am1	Am2	Am3	Média
<b>Ácido clorídrico</b>	HCl												
Concentração	CN bs	mg /Nm <sup>3</sup>	<b>0,309</b>	<b>0,302</b>	0,306	1,830	1,930	2,480	2,080	<b>0,391</b>	<b>0,403</b>	<b>0,405</b>	<b>0,400</b>
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>	<b>0,379</b>	<b>0,384</b>	0,382								
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>	0,298	0,302	0,300	1,650	1,769	2,436	1,952	<b>0,524</b>	<b>0,633</b>	<b>0,665</b>	<b>0,607</b>
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg /Nm <sup>3</sup>				1,500	1,610	2,210	1,773				
Taxa de emissão	chaminé	g HCl/hora	<b>46,30</b>	<b>45,80</b>	46,05	267,00	274,00	346,00	295,67	<b>77,20</b>	<b>78,20</b>	<b>77,50</b>	<b>77,63</b>
<b>Cloro</b>	Cl <sub>2</sub>												
Concentração	CN bs	mg/Nm <sup>3</sup>	<b>0,309</b>	<b>0,302</b>	0,306	1,150	3,810	1,660	2,207	<b>0,391</b>	<b>0,403</b>	<b>0,405</b>	<b>0,400</b>
Concentração	CN bs 7% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	<b>0,379</b>	<b>0,384</b>	0,382								
Concentração	CN bs 10% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	0,298	0,302	0,300	1,037	3,493	1,630	2,053	<b>0,525</b>	<b>0,633</b>	<b>0,665</b>	<b>0,608</b>
Concentração	CN bs 11% O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>				0,942	3,180	1,480	1,867				
Taxa de emissão	chaminé	g Cl <sub>2</sub> /hora	<b>46,30</b>	<b>45,80</b>	46,05	167,00	542,00	230,00	313,00	<b>77,20</b>	<b>78,20</b>	<b>77,50</b>	<b>77,63</b>
Vazão do gás	CN bs	Nm <sup>3</sup> /hora	150019	151396	150708	145625	142287	139434	142449	197748	197070	191499	195439
Vazão do gás	C chaminé	m <sup>3</sup> /hora	260516	269559	265038	265773	258909	250945	258542	345679	343009	342084	343591
Isocinética média		%	103,80	105,00	104,40	102,50	102,40	102,70	102,53				
Velocidade média gás		m/s	9,29	9,61	9,45	9,47	9,23	8,94	9,21	12,30	12,20	12,20	12,23
Umidade do gás		%v/v	12,70	15,20	13,95	18,90	19,00	19,70	19,20	15,60	14,60	15,60	15,27
Temperatura chaminé		C	111,33	109,75	110,54	106,67	101,38	97,88	101,97	101,00	110,00	109,00	106,67
<b>Composição gases</b>													
Dióxido de carbono		%CO <sub>2</sub> v/v	17,80	17,80	17,80	18,80	18,20	17,80	18,27				
Oxigênio		%O <sub>2</sub> v/v	9,60	10,00	9,80	8,80	9,00	9,80	9,20	12,80	14,00	14,30	13,70
Nitrogênio		%N <sub>2</sub> v/v	72,60	72,20	72,40	72,40	72,80	72,40	72,53				
<b>Gerais</b>													
Data		d/m/a	20/6/98	20/6/98		4/9/98	11/9/98	11/9/98		9/9/02	11/9/02	13/9/02	
hora início		h:m	18:15	19:50		13:01	10:12	14:18					
hora término		h:m	19:25	21:00		15:07	12:17	16:22					
P <sub>atm</sub>		mm Hg	705,00	705,00	705,00	714,00	707,00	714,00	711,67				
P <sub>estática</sub> chaminé		mm Hg	0,40	0,40	0,40	0,10	0,10	0,10	0,10				

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1998)

Fonte: CETESB (2004a)

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1998a)

**TABELA 14**  
**EMISSIONES DE PCOP EM CHAMINÉS DOS FORNOS DA CCRG, NO PERÍODO DE JUL/96 A SET/02**

Parâmetro	Condição	Unidade	TQFIJUL96								
			Am1.1	Am1.2	Am1.3	Am2.1	Am2.2	Am2.3	Am3.1	Am3.2	Am3.3
Concentração PCOP	no <i>blend</i>	mg CCl <sub>4</sub> /kg			199,10			194,60			180,90
Taxa alimentação <i>blend</i>	no forno	kg/hora			1082,00			1081,00			1062,00
Taxa alimentação PCOP	no forno	mg/hora			215426,20			210362,60			192115,80
Concentração PCOP	nos gases	ng/Nm <sup>3</sup>	5,7637	5,8353	5,8931	5,9988	6,0361	6,0551	6,0511	6,0481	6,0427
Taxa emissão PCOP		mg CCl <sub>4</sub> /hora	0,8964	0,9075	0,9165	0,9330	0,9388	0,9417	0,9411	0,9406	0,9398
EDR		%	99,9996	99,9996	99,9996	99,9996	99,9996	99,9996	99,9995	99,9995	99,9995
Vazão		Nm <sup>3</sup> /hora	155523	155523	155523	155523	155523	155523	155523	155523	155523
Volume coleta	CNTP	litros	17,352	17,137	16,969	16,67	16,567	16,515	16,526	16,534	16,549
Temperatura chaminé		C	101,50	102,20	106,50	105,83	105,00	102,00	102,00	102,20	103,40
Data		d/m/a	25/7/96	25/7/96	25/7/96	25/7/96	25/7/96	25/7/96	25/7/96	25/7/96	25/7/96
hora início		h:m	09:24	10:06	10:47	11:36	12:15	12:56	13:30	14:12	14:58
hora término		h:m	09:44	10:27	11:22	12:03	12:37	13:16	13:55	14:37	15:23

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1996)

Parâmetro	Condição	Unidade	TQF1JUN98		
			Am1	Am2	Am3
Concentração PCOP	no <i>blend</i>	mg CCl <sub>4</sub> /kg	110,00	110,00	110,00
Taxa alimentação <i>blend</i>	no forno	kg/hora	2800,00	2800,00	2800,00
Taxa alimentação PCOP	no forno	g CCl <sub>4</sub> /hora	308,00	308,00	308,00
Concentração PCOP	nos gases	ug CCl <sub>4</sub> /Nm <sup>3</sup>	0,0600	595,0000	22,5000
Taxa emissão PCOP		g CCl <sub>4</sub> /hora	0,0089	88,6693	3,3530
EDR		%	99,9971	71,2113	98,9114
Vazão		Nm <sup>3</sup> /hora	149024	149024	149024
Volume coleta	CNTP	Nm <sup>3</sup>	0,0171	0,0172	0,0178
Temperatura chaminé		C	108,00	107,60	107,60
Data		d/m/a	20/6/98	20/6/98	20/6/98
hora início		h:m	16:28	16:58	17:28
hora término		h:m	16:53	17:23	17:53

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1998)

Parâmetro	Condição	Unidade	TQF1SET98								
			Am1	Am2	Am3	Am4	Am5	Am6	Am7	Am8	Am9
Concentração PCOP	no <i>blend</i>	mg CCl <sub>4</sub> /kg	362,10	463,60	212,60	248,00	255,00	193,40	109,00	207,30	108,30
Taxa alimentação <i>blend</i>	no forno	kg/hora	2638,00	2638,00	2638,00	2638,00	2638,00	2638,00	2638,00	2638,00	2638,00
Taxa alimentação PCOP	no forno	g CCl <sub>4</sub> /hora	955,22	1222,98	560,84	654,22	672,69	510,19	287,54	546,86	285,70
Concentração PCOP	nos gases	ug CCl <sub>4</sub> /Nm <sup>3</sup>	0,0972	0,0972	0,0993	0,104	0,103	0,102	0,0981	0,319	0,0959
Taxa emissão PCOP		g CCl <sub>4</sub> /hora	0,0136	0,0138	0,0139	0,0159	0,0158	0,0161	0,0144	0,0474	0,0127
EDR		%	99,9986	99,9989	99,9975	99,9976	99,9976	99,9968	99,9950	99,9913	99,9956
Vazão		Nm <sup>3</sup> /hora	139709	141509	139667	152951	153732	158287	147162	148661	132279
Volume coleta	CNTP	Nm <sup>3</sup>	0,0206	0,0206	0,0201	0,0193	0,0195	0,0197	0,0204	0,2038	0,0209
Temperatura chaminé		C	116,20	110,60	106,20	104,00	106,20	107,40	101,40	113,20	115,60
Data		d/m/a	22/10/98	22/10/98	22/10/98	22/10/98	22/10/98	22/10/98	22/10/98	22/10/98	22/10/98
hora início		h:m	09:10	09:55	10:48	11:55	12:50	13:45	16:05	16:50	17:32
hora término		h:m	09:35	10:25	11:15	12:20	13:15	14:10	16:40	17:15	17:56

Fonte: TASQA SERVIÇOS ANALÍTICOS (1998b)

Parâmetro	Condição	Unidade	TQF2SET02								
			Am1	Am2	Am3	Am4	Am5	Am6	Am7	Am8	Am9
Concentração PCOP	no <i>blend</i>	Mg/kg	332,00	332,00	332,00	432,00	432,00	432,00	523,00	523,00	523,00
Taxa alimentação <i>blend</i>	no forno	kg/hora	3572,00	3572,00	3572,00	3551,00	3551,00	3551,00	3563,00	3563,00	3563,00
Taxa alimentação PCOP	no forno	g/hora	1185,90	1185,90	1185,90	1534,03	1534,03	1534,03	1863,45	1863,45	1863,45
Concentração PCOP	nos gases	mg/Nm <sup>3</sup>	0,0001	0,0003	0,0001	0,0001	0,0009	0,0004	0,0001	0,0002	0,0001
Taxa emissão PCOP		g/hora	0,0103	0,0483	0,0133	0,0129	0,1666	0,0675	0,0231	0,0451	0,0219
EDR		%	99,9991	99,9959	99,9989	99,9992	99,9982	99,9955	99,9988	99,9975	99,9988
Vazão		Nm <sup>3</sup> /hora	194774	194774	194774	194774	194774	194774	194774	194774	194774
Temperatura chaminé		C	100,20	100,20	100,20	100,20	100,20	100,20	100,20	100,20	100,20
Data		d/m/a	10/9/02	10/9/02	10/9/02	10/9/02	10/9/02	10/9/02	10/9/02	10/9/02	10/9/02
hora início		h:m	09:18	09:55	10:26	11:15	11:45	12:20	14:05	14:37	15:15
hora término		h:m	09:38	10:15	10:46	11:35	12:05	12:40	14:25	14:57	15:43

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002a), CCRG (2002) e CETESB (2004a)

Parâmetro	Condição	Unidade	PRÉ-TESTE F2MAR01			
			Am1	Am2	Am3	Am4
Concentração PCOP	no <i>blend</i>	mg CCl <sub>4</sub> /kg	548,20	628,30	308,90	199,30
Taxa alimentação <i>blend</i>	no forno	kg/hora	3080,00	3030,00	3480,00	3500,00
Taxa alimentação PCOP	no forno	g CCl <sub>4</sub> /hora	1688,46	1903,75	1074,97	697,55
Concentração PCOP	nos gases	mg CCl <sub>4</sub> /Nm <sup>3</sup>	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Taxa emissão PCOP		g CCl <sub>4</sub> /hora	0,0108	0,0106	0,0108	0,0108
EDR		%	99,9993	99,9994	99,9990	99,9984
Vazão		Nm <sup>3</sup> /hora	180505	180505	179391	179391
Data		d/m/a	14/3/01	14/3/01	15/3/01	15/3/01
hora início		h:m	16:02	16:37	14:32	15:05
hora término		h:m	16:22	16:57	14:52	15:25

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001a)

Obs.: PCOP - Principal composto orgânico perigoso

TABELA 15.1

PARÂMETROS DE PERFORMANCE DA COMBUSTÃO NO FORNO N<sup>o</sup> 1 DA CCRG  
(expressos em ppm, exceto O<sub>2</sub>), EM TESTE DE QUEIMA DE AGO A OUT/1998

TQ F1 - SET/98 - 30% - ÓLEO E BLEND						
Parâmetro	Data	Hora	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	blend (kg/h)
Metais	26/08/98	14:00	22,30	8,78	1,47	2830
Metais	26/08/98	14:10	23,00	8,95	1,51	2830
Metais	26/08/98	14:20	22,60	8,80	1,54	2830
Metais	26/08/98	14:30	23,50	9,00	1,46	2830
Metais	26/08/98	14:40	23,70	8,79	1,51	2830
Metais	26/08/98	14:50	24,00	8,89	1,50	2830
Metais	26/08/98	15:00	23,60	8,80	1,47	2810
Metais	26/08/98	15:20	24,00	8,83	1,35	2810
Metais	26/08/98	15:30	23,50	8,85	1,40	2810
Metais	26/08/98	15:40	24,50	8,76	1,54	2810
Metais	26/08/98	15:50	23,60	8,74	1,47	2810
Metais	26/08/98	16:00	25,30	8,84	1,46	2810
Metais	26/08/98	16:10	24,90	8,80	1,45	2810
Metais	26/08/98	16:15	24,40	8,63	1,51	2810
Metais	01/09/98	14:16	24,20	8,99	1,71	2760
Metais	01/09/98	14:20	24,70	9,05	1,72	2760
Metais	01/09/98	14:30	24,50	8,87	1,78	2760
Metais	01/09/98	14:40	24,20	8,84	1,75	2760
Metais	01/09/98	14:50	23,80	8,77	1,90	2760
Metais	01/09/98	15:00	23,80	8,95	1,90	2890
Metais	01/09/98	15:10	23,70	8,84	1,86	2890
Metais	01/09/98	15:20	24,10	9,06	1,85	2890
Metais	01/09/98	15:30	24,20	9,06	1,90	2890
Metais	01/09/98	15:40	24,70	8,97	1,86	2890
Metais	01/09/98	15:50	24,30	9,04	1,93	2890
Metais	01/09/98	16:00	24,60	8,94	1,93	2900
Metais	01/09/98	16:10	24,10	8,95	1,93	2900
Metais	01/09/98	16:20	23,40	8,73	1,90	2900
Metais	02/09/98	11:00	25,90	9,20	2,02	2930
Metais	02/09/98	11:10	25,00	9,19	2,11	2890
Metais	02/09/98	11:20	25,90	9,16	2,04	2910
Metais	02/09/98	11:30	24,10	9,14	2,12	2920
Metais	02/09/98	11:40	25,00	9,09	2,02	2910
Metais	02/09/98	11:50	24,10	9,14	2,03	2940
Metais	02/09/98	12:00	25,00	9,17	2,12	2910
Metais	02/09/98	12:10	24,40	9,26	2,04	2950
Metais	02/09/98	12:20	24,30	9,20	2,04	2940
Metais	02/09/98	12:30	24,90	9,37	2,01	2930
Metais	02/09/98	12:40	25,30	9,24	2,06	2920
Metais	02/09/98	12:50	26,00	9,30	2,14	2930
Metais	02/09/98	13:00	25,70	9,28	2,14	2960
MP/SOx/NOx	03/09/98	9:10	24,20	8,90	1,51	2990
MP/SOx/NOx	03/09/98	9:20	23,90	8,68	1,64	2910
MP/SOx/NOx	03/09/98	9:30	23,90	8,68	1,60	2970
MP/SOx/NOx	03/09/98	9:40	23,90	8,58	1,60	2950
MP/SOx/NOx	03/09/98	9:50	25,00	8,63	1,51	2960
MP/SOx/NOx	03/09/98	10:00	24,10	8,87	1,57	2990
MP/SOx/NOx	03/09/98	10:10	23,90	8,63	1,63	2950
MP/SOx/NOx	03/09/98	10:20	25,60	8,70	1,68	2960

TQ F1 - SET/98 - 30% - ÓLEO E BLEND						
Parâmetro	Data	Hora	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	blend (kg/h)
MP/SOx/NOx	03/09/98	10:30	24,40	8,67	1,64	2950
MP/SOx/NOx	03/09/98	10:40	24,40	8,59	1,73	2940
MP/SOx/NOx	03/09/98	10:50	25,30	8,56	1,87	3030
MP/SOx/NOx	03/09/98	11:00	25,30	8,51	1,86	2890
MP/SOx/NOx	03/09/98	11:10	24,40	8,59	1,87	2980
MP/SOx/NOx	03/09/98	13:55	23,10	8,57	1,69	2930
MP/SOx/NOx	03/09/98	14:10	24,00	8,48	1,64	2930
MP/SOx/NOx	03/09/98	14:20	23,50	8,40	1,66	2970
MP/SOx/NOx	03/09/98	14:30	23,00	8,34	1,66	2920
MP/SOx/NOx	03/09/98	14:40	23,50	8,26	1,64	2930
MP/SOx/NOx	03/09/98	14:50	23,50	8,43	1,66	2950
MP/SOx/NOx	03/09/98	15:00	23,00	8,52	1,68	2980
MP/SOx/NOx	03/09/98	15:10	23,40	8,51	1,57	2960
MP/SOx/NOx	03/09/98	15:20	24,50	8,46	1,75	2920
MP/SOx/NOx	03/09/98	15:30	24,50	8,68	1,52	2970
MP/SOx/NOx	03/09/98	15:40	23,50	8,56	1,66	2930
MP/SOx/NOx	03/09/98	15:50	23,10	8,46	1,66	2960
MP/SOx/NOx	03/09/98	16:00	23,50	8,64	1,75	2940
MP/SOx/NOx	03/09/98	16:10	23,60	8,46	1,74	2960
MP/SOx/NOx	03/09/98	16:30	23,10	8,68	1,65	3000
MP/SOx/NOx	04/09/98	7:45	23,90	8,47	1,87	3080
MP/SOx/NOx	04/09/98	7:55	23,50	8,41	1,97	2980
MP/SOx/NOx	04/09/98	8:05	24,00	8,63	1,95	3000
MP/SOx/NOx	04/09/98	8:15	23,90	8,44	1,78	3010
MP/SOx/NOx	04/09/98	8:25	23,40	8,48	1,90	3000
MP/SOx/NOx	04/09/98	8:35	23,40	8,34	1,99	2950
MP/SOx/NOx	04/09/98	8:45	23,50	8,27	1,95	3010
MP/SOx/NOx	04/09/98	8:55	24,00	8,37	2,03	2990
MP/SOx/NOx	04/09/98	9:05	23,20	8,12	2,04	2990
MP/SOx/NOx	04/09/98	10:20	23,50	8,35	2,13	3020
MP/SOx/NOx	04/09/98	10:30	24,10	8,39	2,14	2950
MP/SOx/NOx	04/09/98	10:40	24,40	8,58	2,13	3030
MP/SOx/NOx	04/09/98	10:55	24,00	8,67	2,12	2950
HCl/NOx/MP	04/09/98	13:01	24,00	8,43	2,41	2990
HCl/NOx/MP	04/09/98	13:10	25,30	8,11	2,44	2940
HCl/NOx/MP	04/09/98	13:20	24,40	8,64	2,44	2990
HCl/NOx/MP	04/09/98	13:30	25,30	8,69	2,37	2960
HCl/NOx/MP	04/09/98	13:40	24,40	8,44	2,44	2950
HCl/NOx/MP	04/09/98	13:50	24,40	8,37	2,40	2970
HCl/NOx/MP	04/09/98	14:00	23,50	8,13	2,44	3010
HCl/NOx/MP	04/09/98	14:10	23,50	8,38	2,44	3010
HCl/NOx/MP	04/09/98	14:20	23,50	7,95	2,44	2980
HCl/NOx/MP	04/09/98	14:30	24,00	8,02	2,44	2900
HCl/NOx/MP	04/09/98	14:40	23,50	8,11	2,44	3020
HCl/NOx/MP	04/09/98	14:50	23,50	8,21	2,39	2970
HCl/NOx/MP	04/09/98	15:00	24,00	8,13	2,44	3020
HCl/NOx/MP	04/09/98	15:10	24,40	8,11	2,35	2960
HCl/NOx/MP	11/09/98	10:11	22,00	9,36	2,02	2750
HCl/NOx/MP	11/09/98	10:20	21,40	9,30	1,98	2760
HCl/NOx/MP	11/09/98	10:30	22,00	9,28	1,94	2740
HCl/NOx/MP	11/09/98	10:40	21,60	9,38	1,98	2760
HCl/NOx/MP	11/09/98	10:50	21,60	9,43	1,93	2700
HCl/NOx/MP	11/09/98	11:00	21,10	9,28	1,98	2790

TQ F1 - SET/98 - 30% - ÓLEO E BLEND						
Parâmetro	Data	Hora	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	blend (kg/h)
HCl/NOx/MP	11/09/98	11:10	21,10	9,26	1,98	2710
HCl/NOx/MP	11/09/98	11:20	21,10	9,30	1,84	2730
HCl/NOx/MP	11/09/98	11:30	21,90	9,51	1,75	2710
HCl/NOx/MP	11/09/98	11:40	21,40	9,36	1,94	2720
HCl/NOx/MP	11/09/98	11:50	22,00	9,37	1,96	2700
HCl/NOx/MP	11/09/98	12:00	21,90	9,50	1,98	2750
HCl/NOx/MP	11/09/98	12:10	21,50	9,20	2,02	2720
HCl/NOx/MP	11/09/98	12:30	21,50	9,20	2,01	2710
HCl/NOx/MP	11/09/98	14:18	21,40	9,30	1,84	2710
HCl/NOx/MP	11/09/98	14:22	21,90	9,39	1,83	2740
HCl/NOx/MP	11/09/98	14:30	23,20	9,33	1,93	2720
HCl/NOx/MP	11/09/98	14:40	22,70	9,29	1,87	2760
HCl/NOx/MP	11/09/98	14:50	21,90	9,28	1,88	2730
HCl/NOx/MP	11/09/98	15:00	22,30	9,37	2,41	2750
HCl/NOx/MP	11/09/98	15:10	22,00	9,32	2,04	2760
HCl/NOx/MP	11/09/98	15:20	22,00	9,30	1,94	2740
HCl/NOx/MP	11/09/98	15:30	22,60	9,33	2,17	2750
HCl/NOx/MP	11/09/98	15:40	21,80	9,26	2,18	2730
HCl/NOx/MP	11/09/98	15:50	23,50	9,32	2,23	2720
HCl/NOx/MP	11/09/98	16:00	23,50	9,27	1,87	2720
HCl/NOx/MP	11/09/98	16:10	23,50	9,32	1,87	2740
HCl/NOx/MP	11/09/98	16:20	23,10	9,23	2,14	2730
HCl/NOx/MP	11/09/98	16:31	23,50	9,36	1,91	2740
HCl/NOx/MP	11/09/98	16:32	23,20	9,34	1,87	2740
HCl/NOx/MP	11/09/98	16:33	23,10	9,22	1,87	2740
PCOP	22/10/98	9:10	19,90	8,78	1,50	2648
PCOP	22/10/98	9:15	19,40	8,08	1,31	2647
PCOP	22/10/98	9:25	19,90	9,00	1,41	2669
PCOP	22/10/98	9:35	19,90	9,00	1,31	2647
PCOP	22/10/98	9:55	19,00	9,07	1,34	2617
PCOP	22/10/98	10:05	19,40	9,05	1,32	2640
PCOP	22/10/98	10:15	19,90	9,04	1,32	2626
PCOP	22/10/98	10:47	19,80	8,66	1,54	2646
PCOP	22/10/98	10:57	19,50	8,83	1,63	2614
PCOP	22/10/98	11:07	19,80	8,83	1,63	2637
PCOP	22/10/98	11:13	19,40	8,77	1,60	2630
PCOP	22/10/98	11:47	19,60	8,71	1,63	2620
PCOP	22/10/98	12:12	21,70	8,66	1,54	2620
PCOP	22/10/98	12:22	19,60	8,52	1,60	2615
PCOP	22/10/98	12:25	19,90	8,61	1,59	2608
PCOP	22/10/98	12:50	19,60	8,63	1,54	2634
PCOP	22/10/98	12:56	19,10	8,67	1,54	2637
PCOP	22/10/98	13:06	20,30	8,56	1,41	2622
PCOP	22/10/98	13:15	20,80	8,50	1,24	2638
PCOP	22/10/98	13:40	21,60	9,07	1,24	2609
PCOP	22/10/98	13:45	20,80	9,08	1,24	2635
PCOP	22/10/98	13:55	22,30	9,07	1,23	2625
PCOP	22/10/98	14:05	23,40	9,00	1,24	2610
PCOP	22/10/98	16:05	19,90	9,06	1,64	2590
PCOP	22/10/98	16:12	20,40	9,06	1,53	2597
PCOP	22/10/98	16:25	21,20	9,23	1,54	2640
PCOP	22/10/98	16:50	21,30	9,18	1,54	2624
PCOP	22/10/98	17:00	21,20	9,22	1,58	2632

TQ F1 - SET/98 - 30% - ÓLEO E BLEND						
Parâmetro	Data	Hora	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	blend (kg/h)
PCOP	22/10/98	17:10	20,80	9,04	1,63	2623
PCOP	22/10/98	17:18	20,40	9,06	1,63	2622
PCOP	22/10/98	17:31	21,40	9,20	1,63	2580
PCOP	22/10/98	17:40	20,80	9,18	1,72	2593
PCOP	22/10/98	17:47	19,90	9,19	1,54	2615
PCOP	22/10/98	17:57	20,70	9,29	1,55	2660
CN	23/10/98	8:23	18,10	8,86	1,33	2667
CN	23/10/98	8:30	18,60	8,88	1,23	2645
CN	23/10/98	8:50	18,10	9,01	1,47	2662
CN	23/10/98	9:00	18,50	8,93	1,25	2699
CN	23/10/98	9:15	17,60	8,95	1,24	2697
CN	23/10/98	9:30	17,30	8,96	1,92	2668
CN	23/10/98	9:45	17,70	8,87	1,33	2684
CN	23/10/98	10:00	17,20	9,00	1,34	2683
CN	23/10/98	10:15	17,70	9,23	1,46	2690
CN	23/10/98	10:30	18,20	9,25	1,33	2657
CN	23/10/98	11:15	17,20	9,30	1,45	2643
CN	23/10/98	11:30	17,80	9,31	1,54	2686
CN	23/10/98	11:45	17,30	9,33	1,24	2683
CN	23/10/98	12:00	18,60	9,34	1,34	2700
CN	23/10/98	12:15	19,00	9,23	1,46	2675
CN	23/10/98	12:30	18,70	9,27	1,42	2660
CN	23/10/98	12:45	17,90	9,32	1,33	2698
CN	23/10/98	13:00	18,70	9,30	1,46	2687
CN	23/10/98	13:15	19,20	9,20	1,36	2697
CN	23/10/98	13:30	19,00	9,11	1,47	2672
CN	23/10/98	15:09	19,90	9,19	1,46	2692
CN	23/10/98	15:20	19,90	9,10	1,41	2670
CN	23/10/98	15:30	18,70	9,05	1,54	2678
CN	23/10/98	15:45	19,50	9,03	1,45	2673
CN	23/10/98	16:00	19,00	8,52	1,45	2684
CN	23/10/98	16:15	18,40	8,74	1,46	2670
CN	23/10/98	16:30	21,80	8,84	1,40	2652
CN	23/10/98	16:45	13,60	9,10	1,47	2692
CN	23/10/98	17:00	21,70	8,79	1,47	2709
CN	23/10/98	17:15	20,20	9,00	1,47	2622
<b>Mínima</b>			<b>13,60</b>	<b>7,95</b>	<b>1,23</b>	<b>2580</b>
<b>Média</b>			<b>22,25</b>	<b>8,89</b>	<b>1,75</b>	<b>2801</b>
<b>Máxima</b>			<b>26,00</b>	<b>9,51</b>	<b>2,44</b>	<b>3080</b>

Fonte: CCRG (1998)

TABELA 16

PARÂMETROS DE PERFORMANCE DA COMBUSTÃO NO FORNO N° 2 DA CCRG  
(expressos em ppm, exceto O<sub>2</sub>), EM PRÉ-TESTE DE QUEIMA DE MAR/2001

PT F2 - 14/03/2001 – ÓLEO, COQUE E BLEND								
Hora	Farinha (t/h)	COMBUSTÍVEIS (kg/h)			EMISSÕES EM CHAMINÉ (ppm)			
		óleo	coque	blend	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	NO <sub>x</sub>
1:00	100	1700	3400	2720	37,90	13,00	1,40	259,00
2:00	100	1520	3400	2750	39,10	13,50	1,20	409,00
3:00	100	1320	3400	2700	40,00	12,60	1,40	382,00
4:00	100	1208	3400	2700	34,20	13,60	1,20	308,00
5:00	100	1342	3400	2650	35,40	12,60	1,10	255,00
6:00	100	1357	3400	2660	33,70	12,70	1,10	230,00
7:00	100	1689	3400	2100	39,30	12,50	1,10	294,00
8:00	100	1560	3400	2000	41,00	13,00	1,30	290,00
8:30	100	1552	3400	1940	41,00	13,00	1,20	227,00
9:00	100	1660	3400	1960	45,20	12,80	1,20	207,00
9:30	100	1800	3400	1890	37,10	12,30	1,20	217,00
10:00	100	1170	3400	3000	35,90	12,10	1,30	200,00
10:30	100	1170	3400	3000	43,50	10,70	1,50	199,00
10:57	100	1176	3400	3080	46,40	11,60	1,60	274,00
11:15	100	1164	3400	3080	46,60	11,70	1,70	237,00
11:30	100	1142	3400	3013	45,70	12,10	1,60	232,00
11:45	100	1161	3400	3020	45,20	11,70	1,70	233,00
12:00	100	1178	3400	3081	51,50	11,50	1,70	224,00
12:15	100	1144	3400	3070	40,00	11,30	1,60	288,00
12:30	100	1139	3400	3040	44,20	11,50	1,60	302,00
12:45	100	1134	3400	3027	46,60	11,90	1,70	286,00
13:00	100	1137	3400	3107	55,40	11,40	1,70	243,00
13:15	100	1129	3400	3070	57,40	11,30	1,60	258,00
13:30	100	1124	3400	3100	53,70	11,40	1,60	241,00
13:45	100	1188	3400	3030	56,90	11,10	1,50	254,00
14:00	100	1161	3400	2910	41,30	11,50	1,50	305,00
14:15	100	1506	3400	2024	39,30	12,30	1,50	291,00
14:30	100	1516	3400	1993	40,00	12,10	1,40	284,00
14:45	100	1633	3400	1994	41,30	11,90	1,50	254,00
15:00	100	1650	3400	2270	42,00	11,70	1,40	202,00
15:15	100	1620	3400	2480	43,00	11,80	1,30	197,00
15:30	100	1560	3400	2700	88,90	12,10	1,40	170,00
15:45	100	1110	3400	3088	48,80	12,30	1,20	207,00
16:00	100	1120	3400	3107	49,70	11,80	1,10	191,00
16:15	100	1398	3400	3080	42,30	11,50	1,20	142,00
16:30	100	1286	3400	3104	65,00	11,80	1,20	176,00
16:45	100	1252	3400	3030	49,80	11,40	1,20	201,00
17:00	100	1297	3400	3009	80,80	11,90	1,00	199,00
17:15	100	1293	3400	3060	64,00	12,40	1,10	229,00
17:30	100	1300	3400	2450	121,00	9,50	1,00	265,00
17:45	100	1325	3400	2490	123,00	9,20	1,10	222,00
18:00	100	1177	3400	2300	48,80	9,90	1,20	274,00
18:15	100	1220	3400	2320	52,40	9,90	1,10	283,00
18:30	100	1340	3400	2400	52,80	9,60	1,10	277,00



PT F2 - 14/03/2001 – ÓLEO, COQUE E BLEND									
Hora	Farinha (t/h)	COMBUSTÍVEIS (kg/h)			EMISSÕES EM CHAMINÉ (ppm)				
		óleo	coque	blend	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	NO <sub>x</sub>	
18:45	100	1335	3400	2650	91,40	9,40	1,20	251,00	
19:00	100	1195	3400	2550	47,60	10,20	1,20	317,00	
19:15	100	1230	3400	2710	78,40	9,30	1,20	246,00	
19:30	100	1369	3400	2771	118,50	9,20	1,30	218,00	
19:45	100	1359	3400	2326	122,00	10,00	1,20	249,00	
20:00	100	1388	3400	2681	57,10	9,90	1,20	263,00	
20:15	100	1410	3400	2604	52,50	11,00	1,20	388,00	
20:30	100	1432	3400	2628	50,70	9,30	1,30	230,00	
20:45	100	1392	3400	2540	48,60	10,30	1,60	320,00	
<b>Mínima</b>	<b>100</b>	<b>1110</b>	<b>3400</b>	<b>1890</b>	<b>33,70</b>	<b>9,20</b>	<b>1,00</b>	<b>142,00</b>	
<b>Média</b>	<b>100</b>	<b>1335</b>	<b>3400</b>	<b>2680</b>	<b>54,60</b>	<b>11,44</b>	<b>1,33</b>	<b>252,83</b>	
<b>Máxima</b>	<b>100</b>	<b>1800</b>	<b>3400</b>	<b>3107</b>	<b>123,00</b>	<b>13,60</b>	<b>1,70</b>	<b>409,00</b>	

PT F2 - 14/03/2001 – ÓLEO E COQUE									
Hora	Farinha (t/h)	COMBUSTÍVEIS (kg/h)			EMISSÕES EM CHAMINÉ (ppm)				
		óleo	coque	blend	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	NO <sub>x</sub>	
21:00	100	1400	5000		44,70	12,00	1,40	344,00	
22:00	100	1410	5170		41,80	12,20	1,40	299,00	
23:00	100	1418	5100		36,40	14,20	1,00	411,00	
0:00	100	1435	5000		40,30	13,80	0,80	407,00	
<b>Mínima</b>	<b>100</b>	<b>1400</b>	<b>5000</b>		<b>36,40</b>	<b>12,00</b>	<b>0,80</b>	<b>299,00</b>	
<b>Média</b>	<b>100</b>	<b>1413</b>	<b>5068</b>		<b>40,80</b>	<b>13,05</b>	<b>1,15</b>	<b>365,25</b>	
<b>Máxima</b>	<b>100</b>	<b>1418</b>	<b>5170</b>		<b>44,70</b>	<b>14,20</b>	<b>1,40</b>	<b>411,00</b>	

PT F2 - 15/03/2001 – COQUE E BLEND									
Hora	Farinha (t/h)	COMBUSTÍVEIS (kg/h)			EMISSÕES EM CHAMINÉ (ppm)				
		óleo	coque	blend	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	NO <sub>x</sub>	
10:11	100		5600	2610	22,20	10,70	0,50	179,00	
10:30	100		5650	2581	30,30	11,90	0,90	224,00	
10:45	100		5600	2560	33,90	13,10	1,00	288,00	
11:00	100		5650	2580	34,20	13,20	0,90	257,00	
11:15	100		5600	2519	39,30	13,30	1,10	358,00	
11:30	100		5600	2435	37,70	12,70	1,10	324,00	
11:45	100		5600	2600	44,70	12,50	1,10	315,00	
12:00	100		5500	2570	37,30	12,20	1,10	333,00	
12:15	100		5500	2560	35,20	13,10	1,10	330,00	
12:30	100		5500	2525	37,40	12,80	1,00	321,00	
12:45	100		5500	2548	36,10	12,70	1,10	345,00	
13:00	100		5500	2545	40,80	12,40	1,10	299,00	
13:15	100		5000	3110	39,60	12,60	1,10	248,00	
13:30	100		5000	3050	34,40	13,40	1,10	240,00	
13:45	100		5000	3075	34,70	12,60	1,10	285,00	
14:00	100		4700	3480	35,70	12,70	1,10	259,00	
14:15	100		4700	3410	42,20	13,00	1,10	248,00	
14:30	100		4800	3480	37,70	12,70	1,20	261,00	
14:45	100		4800	3440	37,90	12,70	1,30	237,00	
15:00	100		4800	3480	38,60	12,80	1,30	237,00	
15:15	100		4800	3500	47,60	13,80	1,40	210,00	
15:30	100		4800	3445	50,80	12,60	1,30	197,00	

PT F2 - 15/03/2001 – COQUE E BLEND								
Hora	Farinha (t/h)	COMBUSTÍVEIS (kg/h)			EMISSÕES EM CHAMINÉ (ppm)			
		óleo	coque	blend	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	NO <sub>x</sub>
15:45	100		4800	3491	40,30	13,00	1,40	221,00
16:02	100		4800	3473	51,00	13,50	1,40	220,00
16:15	100		4800	3500	42,20	12,60	1,50	243,00
16:30	100		4800	3490	36,90	12,70	1,40	270,00
16:42	100		4800	3470	40,00	12,90	1,30	240,00
<b>Mínima</b>	<b>100</b>		<b>4700</b>	<b>2435</b>	<b>22,20</b>	<b>10,70</b>	<b>0,50</b>	<b>179,00</b>
<b>Média</b>	<b>100</b>		<b>5156</b>	<b>3020</b>	<b>38,47</b>	<b>12,75</b>	<b>1,15</b>	<b>266,26</b>
<b>Máxima</b>	<b>100</b>		<b>5650</b>	<b>3500</b>	<b>51,00</b>	<b>13,80</b>	<b>1,50</b>	<b>358,00</b>

PT F2 - 29/03/2001 - COQUE								
Hora	Farinha (t/h)	COMBUSTÍVEIS (kg/h)			EMISSÕES EM CHAMINÉ (ppm)			
		óleo	coque	blend	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	NO <sub>x</sub>
07:00	100		6900		54,50	11,40	2,40	540,00
07:30	100		6930		56,90	11,20	2,50	477,00
08:00	100		6870		58,90	11,90	2,20	584,00
08:30	100		6750		66,20	12,30	2,10	556,00
09:00	100		6750		65,20	12,10	2,10	514,00
09:15	100		6750		66,90	12,10	2,10	487,00
09:30	100		6750		68,10	12,00	2,20	526,00
09:45	100		6720		68,40	12,00	2,30	511,00
10:00	100		6720		68,10	12,30	2,40	496,00
10:15	100		6720		53,00	12,00	2,70	423,00
10:30	100		6680		62,50	10,80	2,70	430,00
10:45	100		6680		61,50	12,40	2,20	421,00
11:00	100		6680		63,20	12,30	2,10	426,00
11:15	100		6680		71,10	13,00	2,10	475,00
11:30	100		6620		74,20	13,00	2,30	476,00
11:45	100		6600		79,60	13,00	2,20	528,00
12:00	100		6550		90,60	13,40	2,50	526,00
12:15	100		6550		79,10	13,20	2,20	466,00
12:30	100		6650		77,40	12,80	2,50	444,00
12:45	100		6650		72,80	13,00	2,30	465,00
13:00	100		6620		81,10	13,00	2,50	501,00
13:15	100		6700		74,50	12,70	2,40	448,00
13:30	100		6850		67,20	12,70	2,40	399,00
13:45	100		6750		70,30	13,10	2,40	448,00
14:00	100		6700		71,60	13,60	2,10	444,00
14:15	100		6650		72,30	11,80	2,40	526,00
14:30	100		6600		73,70	11,70	2,50	524,00
14:45	100		6600		71,10	11,80	2,40	493,00
15:00	100		6630		73,30	11,80	2,50	503,00
15:15	100		6600		74,20	11,20	2,50	513,00
15:30	100		6600		74,60	11,70	2,50	502,00
15:45	100		6580		75,70	11,70	2,60	496,00
16:00	100		6580		75,50	11,70	2,60	478,00
16:15	100		6580		77,20	11,40	2,70	476,00
16:30	100		6580		80,60	11,70	2,80	481,00
<b>Mínima</b>	<b>100</b>		<b>6550</b>		<b>53,00</b>	<b>10,80</b>	<b>2,10</b>	<b>399,00</b>
<b>Média</b>	<b>100</b>		<b>6681</b>		<b>70,60</b>	<b>12,22</b>	<b>2,38</b>	<b>485,80</b>
<b>Máxima</b>	<b>100</b>		<b>6930</b>		<b>90,60</b>	<b>13,60</b>	<b>2,80</b>	<b>584,00</b>

Obs.:

1. Das 8:50 horas às 10:00 horas com moinho operando
2. Das 10:45 horas às 11:50 horas com moinho operando
3. Das 14:05 horas às 15:10 horas com moinho parado
4. Das 15:33 horas às 16:38 horas com moinho parado

PT F2 - 30/03/2001 – COQUE								
Hora	Farinha (t/h)	COMBUSTÍVEIS (kg/h)			EMISSÕES EM CHAMINÉ (ppm)			
		óleo	coque	blend	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	NO <sub>x</sub>
7:15	100		6800		52,50	13,00	1,70	483,00
8:00	100		6800		52,00	13,00	1,60	501,00
8:15	100		6750		57,40	13,10	1,70	517,00
8:30	100		6750		55,70	13,00	1,70	521,00
8:45	100		6750		57,10	13,10	1,70	493,00
9:00	100		6750		56,90	13,10	1,70	540,00
9:15	100		6720		58,40	13,30	1,50	535,00
9:30	100		6700		58,10	13,40	1,50	476,00
9:45	100		6850		52,30	13,40	1,60	436,00
10:00	100		6800		54,30	13,20	1,60	503,00
10:15	100		6750		56,00	13,20	1,70	495,00
10:30	100		6720		55,20	13,00	1,70	492,00
10:45	100		6700		55,90	13,30	1,60	507,00
11:00	100		6700		57,40	13,30	1,60	497,00
11:30	100		6700		55,90	13,20	1,50	500,00
12:00	100		6700		54,20	13,40	1,50	512,00
12:30	100		6700		52,50	13,20	1,40	489,00
13:00	100		6640		55,00	13,60	1,50	476,00
13:15	100		6750		53,20	13,40	1,40	400,00
13:30	100		6670		54,00	13,30	1,40	463,00
13:45	100		6670		57,40	13,60	1,40	482,00
14:00	100		6630		51,20	13,30	1,40	484,00
14:15	100		6670		54,60	13,40	1,60	465,00
14:30	100		6650		56,70	13,50	1,60	444,00
14:45	100		6650		57,40	13,20	1,70	488,00
15:00	100		6600		57,00	13,40	1,70	512,00
15:15	100		6550		58,00	13,30	1,70	520,00
15:30	100		6600		52,20	13,20	1,60	443,00
15:45	100		6700		56,20	13,00	1,70	393,00
16:00	100		6700		57,60	13,40	1,80	434,00
<b>Mínima</b>	<b>100</b>		<b>6550</b>		<b>51,20</b>	<b>13,00</b>	<b>1,40</b>	<b>393,00</b>
<b>Média</b>	<b>100</b>		<b>6704</b>		<b>55,41</b>	<b>13,26</b>	<b>1,59</b>	<b>483,37</b>
<b>Máxima</b>	<b>100</b>		<b>6850</b>		<b>58,40</b>	<b>13,60</b>	<b>1,80</b>	<b>540,00</b>

- Obs.:
1. Das 8:05 horas às 9:15 horas com batedores do ECP desligados
  2. Das 9:47 horas às 10:54 horas com batedores do ECP desligados
  3. Das 13:15 horas às 14:20 horas com a 2 câmara do ECP desligada
  4. Das 14:40 horas às 15:48 horas com a 2 câmara do ECP desligada

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS - DIVISÃO AMBIENTAL (2001a)

TABELA 17

PARÂMETROS DE PERFORMANCE DA COMBUSTÃO NO FORNO Nº 2 DA CCRG  
(expressos em ppm, exceto O<sub>2</sub>), EM TESTE EM BRANCO DE MAI/2001

TB F2 - 30/05/2001 - COQUE								
Hora	Farinha (t/h)	COMBUSTÍVEIS (kg/h)			EMISSÕES EM CHAMINÉ (ppm)			
		óleo	coque	blend	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	NO <sub>x</sub>
08:40	100		6730		36,00	15,50	0,90	280,00
08:55	100		6900		37,00	16,40	1,20	286,00
09:10	100		6900		39,00	16,60	1,30	314,00
09:25	100		6850		43,00	16,70	1,30	383,00
09:40	100		6820		42,00	16,80	1,40	360,00
09:55	100		6810		43,00	16,80	1,40	358,00
10:10	100		6860		43,00	16,80	1,40	323,00
10:25	100		6960		42,00	16,80	1,40	361,00
10:40	100		6910		24,00	13,30	1,20	214,00
10:44	100		6910		28,00	14,50	1,30	272,00
11:15	100		6900		44,00	16,70	1,50	426,00
11:30	100		6850		42,00	16,70	1,60	410,00
11:45	100		6850		49,00	17,00	1,60	396,00
12:00	100		6850		50,00	17,00	1,60	422,00
12:15	100		6850		47,00	17,00	1,60	437,00
12:30	100		6850		48,00	17,00	1,50	425,00
12:45	100		6850		50,00	17,00	1,60	428,00
13:00	100		6850		49,00	17,00	1,50	429,00
13:15	100		6850		47,00	17,00	1,60	345,00
13:20	100		6850		48,00	17,00	1,60	350,00
13:45	100		6850		48,00	16,70	1,90	393,00
14:00	100		6850		48,00	16,70	1,70	403,00
14:15	100		6850		49,00	16,80	1,50	381,00
14:30	100		6850		49,00	17,20	1,40	400,00
14:45	100		6850		50,00	17,10	1,40	410,00
15:00	100		6850		45,00	17,10	1,30	362,00
15:15	100		6850		46,00	17,10	1,40	398,00
15:30	100		6850		46,00	17,20	1,30	442,00
15:50	100		6850		44,00	17,10	1,30	408,00
<b>Mínima</b>	<b>100</b>		<b>6730</b>		<b>24,00</b>	<b>13,30</b>	<b>0,90</b>	<b>214,00</b>
<b>Média</b>	<b>100</b>		<b>6857</b>		<b>44,00</b>	<b>16,64</b>	<b>1,44</b>	<b>372,97</b>
<b>Máxima</b>	<b>100</b>		<b>6960</b>		<b>50,00</b>	<b>17,20</b>	<b>1,90</b>	<b>442,00</b>

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS – DIVISÃO AMBIENTAL (2001)

**TABELA 18**

PARÂMETROS DE PERFORMANCE DA COMBUSTÃO NO FORNO Nº 2 DA CCRG  
(expressos em ppm, exceto O<sub>2</sub>), EM TESTE EM BRANCO DE JUN/2001

TB F2 - 29/06/2001 - COQUE								
Hora	Farinha (t/h)	COMBUSTÍVEIS (kg/h)			EMISSÕES EM CHAMINÉ (ppm)			
		óleo	coque	blend	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	NO <sub>x</sub>
09:50	100		6900		46	17	1,7	457
10:05	100		6900		46	17	1,8	444
10:20	100		6900		48	17	1,7	460
10:35	100		6900		43	16	1,7	443
10:50	100		6900		46	16	1,7	479
11:05	100		6900		48	16	1,8	470
11:20	100		6900		50	16	1,7	471
11:35	100		6900		47	17	1,8	429
11:50	100		6900		48	16	1,8	432
12:05	100		6900		44	17	1,8	444
12:20	100		6900		44	16	1,8	443
12:35	100		6900		44	16	1,8	430
12:50	100		6900		43	17	1,8	392
13:05	100		7100		41	16	1,8	402
13:20	100		7000		46	17	1,7	407
13:35	100		7000		44	17	1,8	436
13:50	100		7000		45	16	1,8	423
14:05	100		7110		42	16	1,7	257
14:20	100		7200		41	16	1,7	350
14:35	100		7200		37	16	1,7	401
14:50	100		7150		37	17	1,6	428
15:05	100		7150		40	16	1,6	447
15:20	100		7150		41	17	1,6	429
15:35	100		7150		44	17	1,6	361
15:50	100		7150		45	17	1,6	348
16:05	100		7150		42	16	1,6	374
16:20	100		7150		43	17	1,6	364
16:35	100		7150		44	17	1,5	425
16:50	100		7150		44	16	1,5	408
17:04	100		7180		43	17	1,6	411
<b>Mínima</b>	<b>100</b>		<b>6900</b>		<b>37,00</b>	<b>16,00</b>	<b>1,50</b>	<b>257,00</b>
<b>Média</b>	<b>100</b>		<b>7028</b>		<b>43,87</b>	<b>16,50</b>	<b>1,70</b>	<b>415,50</b>
<b>Máxima</b>	<b>100</b>		<b>7200</b>		<b>50,00</b>	<b>17,00</b>	<b>1,80</b>	<b>479,00</b>

Fonte: BIOAGRI LABORATÓRIOS – DIVISÃO AMBIENTAL (2001b)

TABELA 19

PARÂMETROS DE PERFORMANCE DA COMBUSTÃO NO FORNO N<sup>o</sup> 2 DA CCRG  
(expressos em ppm, exceto O<sub>2</sub>), EM TESTE EM BRANCO DE SET/2002

TB F1 - SET/02 - COQUE							
Parâmetro	Farinha (t/h)	Coque (kg/h)	TZQ (°C)	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	NO <sub>x</sub>
MP/SOx/NOx	97,3	7400	1339	54,00	11,00	0,50	496,00
MP/SOx/NOx	96,8	7600	1353	57,00	13,00	1,20	434,00
MP/SOx/NOx	97,3	7200	1337	52,00	13,00	0,90	391,00
Metais	97,0	7900	1345	44,50	13,60	1,10	370,00
Metais	96,3	7900	1345	51,00	13,50	0,96	356,00
Metais	97,5	7300	1354	50,00	13,40	0,66	365,00
Hg	97,6	7400	1380	21,00	11,00	0,90	267,00
Hg	96,9	7700	1043	21,00	11,00	1,10	213,00
Hg	96,8	7200	1376	8,00	11,00	0,90	175,00
<b>Mínima</b>	<b>96,3</b>	<b>7200</b>	<b>1043</b>	<b>8,00</b>	<b>11,00</b>	<b>0,50</b>	<b>175,00</b>
<b>Média</b>	<b>97,1</b>	<b>7511</b>	<b>1319</b>	<b>39,83</b>	<b>12,28</b>	<b>0,91</b>	<b>340,78</b>
<b>Máxima</b>	<b>97,6</b>	<b>7900</b>	<b>1380</b>	<b>57,00</b>	<b>13,60</b>	<b>1,20</b>	<b>496,00</b>

Obs.: TZQ – temperatura na zona de queima do forno rotativo

Fonte: CETESB (2003c)

TABELA 20

PARÂMETROS DE PERFORMANCE DA COMBUSTÃO NO FORNO N<sup>o</sup> 2 DA CCRG  
(expressos em ppm, exceto O<sub>2</sub>), EM TESTE SE QUEIMA DE SET/2002

TQ F2 - SET/02 - 30% - COQUE/BLEND										
Parâmetro	Data	Hora	Far (t/h)	Coque (hg/h)	Blend (kg/h)	TZQ (°C)	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	NO <sub>x</sub>
Metais	03/09/02	9:05	99,3	5120	3310	1335	72,00	19,20	1,40	556,00
Metais	03/09/02	9:20	99,8	5110	2948	1332	79,00	19,40	1,50	617,00
Metais	03/09/02	9:35	99,8	5120	2975	1342	75,00	19,20	1,60	553,00
Metais	03/09/02	9:50	99,8	5110	3030	1342	73,00	19,10	1,60	508,00
Metais	03/09/02	10:05	99,6	5110	3016	1347	68,00	19,40	1,60	600,00
Metais	03/09/02	10:22	99,3	5110	2936	1353	67,00	18,90	1,50	500,00
Metais	03/09/02	10:38	99,5	5110	2950	1348	82,00	19,20	1,50	585,00
Metais	03/09/02	10:50	99,0	5110	2864	1347	71,00	19,20	1,50	602,00
Metais	03/09/02	11:06	99,1	5110	2941	1346	64,00	19,00	1,50	536,00
Metais	03/09/02	13:15	100,2	5170	3006	1338	69,10	18,60	1,70	523,00
Metais	03/09/02	13:30	100,5	5170	3045	1351	65,20	17,90	1,70	508,00
Metais	03/09/02	13:45	99,7	5150	2967	1358	69,40	18,20	1,70	813,00
Metais	03/09/02	14:00	99,7	5120	2912	1362	71,60	18,00	1,70	469,00
Metais	03/09/02	15:15	99,5	5110	2963	1356	71,60	18,20	1,70	455,00
Metais	03/09/02	14:30	99,4	5110	3014	1340	73,50	18,00	1,70	476,00
Metais	03/09/02	14:45	100,2	5150	3011	1352	69,80	18,00	1,80	459,00
Metais	03/09/02	15:00	100,8	5110	2967	1358	75,90	17,90	1,80	457,00
Metais	03/09/02	15:15	100,0	5110	2929	1346	75,90	17,50	1,90	423,00
Metais	04/09/02	8:40	99,1	5350	3028	1336	59,10	17,00	2,30	351,00
Metais	04/09/02	8:55	99,5	5370	2992	1343	50,10	18,00	2,40	303,00
Metais	04/09/02	9:10	99,0	5310	3045	1360	44,00	17,90	2,50	262,00
Metais	04/09/02	9:25	99,7	5310	3011	1361	58,60	16,70	2,40	329,00

TQ F2 - SET/02 - 30% - COQUE/BLEND										
Parâmetro	Data	Hora	Far (t/h)	Coque (hg/h)	Blend (kg/h)	TZQ (°C)	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	NO <sub>x</sub>
Metais	04/09/02	9:40	99,5	5310	3009	1355	63,20	16,60	2,60	337,00
Metais	04/09/02	9:55	99,1	5320	2934	1344	59,60	16,50	2,70	333,00
Metais	04/09/02	10:10	99,5	5310	3045	1351	57,10	16,50	2,70	337,00
Metais	04/09/02	10:25	99,3	5310	2952	1345	57,60	16,60	2,70	339,00
Metais	04/09/02	10:40	99,7	5360	2919	1359	59,80	17,20	2,60	351,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	12:15	99,7	5020	3159	1360	65,90	16,30	2,90	352,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	12:30	99,2	5010	3210	1358	53,00	16,70	2,90	351,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	12:45	99,9	4980	3222	1354	57,90	16,10	2,90	362,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	13:05	99,4	4960	3185	1363	54,50	16,80	2,90	367,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	13:20	99,1	4970	3181	1367	57,60	16,20	2,90	400,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	13:35	99,1	1960	3195	1374	61,10	16,50	2,90	396,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	13:50	99,5	4960	3157	1355	56,40	16,90	2,90	353,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	14:05	99,4	4960	3135	1357	67,90	16,20	2,90	324,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	14:15	99,6	4960	3167	1365	57,60	16,10	2,90	321,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	14:45	99,1	4960	3128	1345	57,60	16,80	2,90	333,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	15:00	99,4	4970	3123	1353	56,40	16,50	2,90	324,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	15:15	99,3	4960	3147	1345	54,60	16,00	2,90	350,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	15:30	99,2	4960	3108	1348	56,20	16,00	2,90	328,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	15:45	99,3	4960	3167	1345	56,40	16,30	2,90	356,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	16:00	99,1	4960	3127	1343	56,90	16,30	2,90	354,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	16:15	99,5	4960	3159	1343	53,50	16,70	3,80	326,00
MP/SOx/NOx	04/09/02	16:30	99,5	4960	3162	1332	53,20	17,80	3,00	325,00
MP/SOx/NOx	05/09/02	8:35	100,0	5160	3013	1356	41,80	16,80	2,00	275,00
MP/SOx/NOx	05/09/02	8:50	99,2	5160	2956	1360	45,20	17,80	2,00	266,00
MP/SOx/NOx	05/09/02	9:05	99,4	5160	3052	1346	46,20	16,80	2,30	282,00
MP/SOx/NOx	05/09/02	9:20	99,8	5160	3052	1341	41,80	16,90	2,10	278,00
MP/SOx/NOx	05/09/02	9:35	99,8	5160	3065	1354	41,50	17,00	1,90	277,00
MP/SOx/NOx	05/09/02	9:50	99,1	5160	3038	1354	45,20	17,00	2,00	277,00
MP/SOx/NOx	05/09/02	10:05	99,2	5160	2963	1364	44,00	17,00	2,10	267,00
MP/SOx/NOx	05/09/02	10:20	99,8	5160	2926	1364	45,90	16,70	2,10	285,00
MP/SOx/NOx	05/09/02	10:35	99,5	5160	2968	1367	39,60	17,60	2,00	256,00
CN	05/09/02	12:00	99,2	5010	3165	1343	43,00	16,40	2,00	257,00
CN	05/09/02	15:15	99,5	5010	3077	1346	46,10	16,70	1,90	287,00
CN	05/09/02	12:30	99,0	5010	3058	1351	45,90	15,80	1,80	287,00
CN	05/09/02	12:45	100,0	5010	3103	1360	44,20	16,10	1,90	297,00
CN	05/09/02	13:00	99,7	5020	3116	1354	46,90	15,80	1,80	276,00
CN	05/09/02	13:30	100,2	4960	3111	1354	47,10	16,60	2,10	300,00
CN	05/09/02	13:45	99,8	4970	3081	1340	48,80	16,30	2,10	293,00
CN	05/09/02	14:00	99,7	4970	3084	1344	44,70	16,80	2,10	278,00
CN	05/09/02	14:15	99,0	4970	3074	1366	47,10	16,40	2,20	292,00
CN	05/09/02	14:30	99,2	4960	3081	1330	44,40	16,10	1,90	286,00
CN	05/09/02	14:55	99,0	5010	3111	1357	48,40	16,80	1,90	297,00
CN	05/09/02	15:10	99,8	5010	3036	1348	45,20	15,80	2,00	294,00
CN	05/09/02	15:25	99,3	5010	3035	1343	42,70	16,50	2,00	269,00
CN	05/09/02	15:40	99,2	5010	2950	1354	41,30	16,60	1,90	277,00
CN	05/09/02	15:55	99,0	5010	2912	1360	40,50	16,70	1,90	273,00
EDR	10/09/02	9:20	99,6	5510	3562	1337	28,60	13,90	2,00	245,00
EDR	10/09/02	9:40	99,1	5510	3578	1321	29,10	13,70	2,00	250,00
EDR	10/09/02	9:55	99,3	5460	3630	1330	29,30	13,90	2,10	263,00
EDR	10/09/02	10:15	99,6	5460	3528	1338	29,30	13,90	2,00	257,00
EDR	10/09/02	10:30	99,8	5460	3545	1355	28,80	14,10	2,00	254,00
EDR	10/09/02	10:40	100,1	5460	3482	1324	27,10	13,90	2,00	247,00
EDR	10/09/02	11:15	99,3	5460	3542	1315	27,10	14,20	2,00	252,00
EDR	10/09/02	11:35	99,5	5510	3608	1303	27,60	14,20	2,00	240,00
EDR	10/09/02	11:45	100,2	5510	3624	1315	29,50	13,90	2,10	246,00
EDR	10/09/02	12:05	99,4	5510	3544	1300	28,10	14,30	2,00	228,00
EDR	10/09/02	12:20	99,7	5500	3462	1313	29,30	13,80	2,10	219,00

TQ F2 - SET/02 - 30% - COQUE/BLEND											
Parâmetro	Data	Hora	Far (t/h)	Coque (hg/h)	Blend (kg/h)	TZQ (°C)	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	NO <sub>x</sub>	
EDR	10/09/02	12:40	99,2	5510	3474	1274	28,60	14,50	2,00	232,00	
EDR	10/09/02	14:05	99,7	5510	3579	1310	28,60	14,20	2,10	247,00	
EDR	10/09/02	14:25	99,4	5510	3542	1303	26,80	14,10	2,10	232,00	
EDR	10/09/02	14:40	100,0	5410	3555	1270	28,10	13,80	2,10	260,00	
EDR	10/09/02	14:57	99,1	5510	3448	1240	26,90	14,00	2,10	246,00	
EDR	10/09/02	15:15	99,4	5510	3538	1256	37,60	13,60	2,20	256,00	
EDR	10/09/02	15:40	99,2	5510	3564	1270	33,00	12,90	2,30	263,00	
HCI/CI2	09/09/02	14:45	99,5	5960	3409	1370	25,00	15,30	1,60	169,00	
HCI/CI2	09/09/02	15:00	99,1	5950	3333	1360	25,90	15,20	1,60	160,00	
HCI/CI2	09/09/02	15:15	99,4	5970	3339	1364	26,40	15,00	1,60	177,00	
HCI/CI2	09/09/02	15:30	99,9	5920	3317	1359	28,80	15,40	1,60	169,00	
HCI/CI2	09/09/02	15:45	99,2	5910	3307	1361	27,60	15,00	1,60	177,00	
HCI/CI2	09/09/02	16:00	99,7	5900	3380	1365	25,60	15,30	1,60	151,00	
HCI/CI2	09/09/02	16:15	99,5	5860	3327	1370	27,60	14,90	1,60	182,00	
HCI/CI2	11/09/02	14:30	99,1	5210	3528	1340	26,90	14,20	2,00	193,00	
HCI/CI2	11/09/02	14:45	99,8	5200	3484	1340	34,90	13,90	2,00	200,00	
HCI/CI2	11/09/02	15:00	100,7	5200	3523	1332	27,80	13,90	2,00	182,00	
HCI/CI2	11/09/02	15:15	99,0	5210	3549	1334	27,80	13,80	2,10	208,00	
HCI/CI2	11/09/02	15:30	100,0	5200	3530	1341	25,90	13,90	2,10	192,00	
HCI/CI2	11/09/02	15:45	100,1	5200	3513	1339	29,50	14,30	2,10	169,00	
HCI/CI2	11/09/02	16:00	99,5	5210	3496	1329	26,60	14,80	2,00	167,00	
HCI/CI2	13/09/02	8:50	99,6	5320	3634	1334	28,80	14,10	1,80	216,00	
HCI/CI2	13/09/02	9:05	99,5	5310	3681	1331	27,80	14,10	2,00	213,00	
HCI/CI2	13/09/02	9:20	99,3	5310	3670	1318	28,60	13,90	1,90	203,00	
HCI/CI2	13/09/02	9:35	100,0	5310	3714	1332	28,30	14,00	2,00	214,00	
HCI/CI2	13/09/02	9:50	98,8	5310	3663	1323	27,60	14,00	1,90	225,00	
HCI/CI2	13/09/02	10:05	99,8	5310	3627	1329	28,00	14,10	1,90	229,00	
HCI/CI2	13/09/02	10:20	99,7	5260	3590	1332	27,10	14,10	1,90	235,00	
D/F	11/09/02	9:25	100,7	5200	3516	1327	27,60	14,10	2,00	199,00	
D/F	11/09/02	9:45	99,9	5210	3504	1364	27,10	14,00	2,00	207,00	
D/F	11/09/02	10:05	99,0	5310	3508	1312	27,10	13,70	2,00	198,00	
D/F	11/09/02	10:25	99,5	5360	3469	1302	27,60	14,20	2,10	187,00	
D/F	11/09/02	10:45	99,1	5310	3489	1349	28,10	14,20	2,10	184,00	
D/F	11/09/02	11:05	100,6	5310	3447	1354	28,30	14,20	2,10	208,00	
D/F	11/09/02	11:25	99,2	5260	3520	1345	26,10	14,20	2,10	216,00	
D/F	11/09/02	11:45	100,2	5310	3450	1349	27,40	14,00	2,10	211,00	
D/F	11/09/02	12:05	99,9	5310	3479	1336	28,80	13,90	2,20	205,00	
D/F	11/09/02	12:25	99,9	5310	3496	1348	26,40	14,00	2,10	212,00	
D/F	12/09/02	8:40	100,1	5210	3853	1363	26,40	14,70	1,60	162,00	
D/F	12/09/02	8:55	99,7	5200	3872	1365	23,90	15,20	1,70	179,00	
D/F	12/09/02	9:10	100,7	5210	3819	1360	23,00	15,00	1,60	150,00	
D/F	12/09/02	9:30	99,1	5210	3878	1352	25,90	14,90	1,60	169,00	
D/F	12/09/02	9:50	99,8	5200	3856	1350	24,90	15,00	1,60	164,00	
D/F	12/09/02	10:10	99,2	5210	3812	1348	26,60	14,80	1,60	176,00	
D/F	12/09/02	10:30	99,4	5200	3846	1354	24,90	15,10	1,60	176,00	
D/F	12/09/02	10:50	99,6	5210	3756	1339	25,40	14,50	1,60	166,00	
D/F	12/09/02	11:10	99,4	5210	3773	1338	27,10	14,60	1,60	159,00	
D/F	12/09/02	11:30	99,5	5210	3770	1331	26,60	14,60	1,60	172,00	
D/F	12/09/02	13:30	99,3	5200	3794	1314	28,60	13,20	1,80	186,00	
D/F	12/09/02	13:50	99,5	5310	3823	1285	29,10	13,30	1,90	176,00	
D/F	12/09/02	14:10	99,4	5410	3821	1266	28,80	13,00	2,00	180,00	
D/F	12/09/02	14:30	99,0	5410	3855	1277	26,90	13,30	2,00	142,00	
D/F	12/09/02	14:50	99,6	5300	3824	1309	26,90	13,60	1,90	163,00	
D/F	12/09/02	15:10	99,4	5310	3826	1301	22,00	14,70	1,80	116,00	
D/F	12/09/02	15:30	99,3	5260	3761	1300	24,20	14,50	1,70	122,00	
D/F	12/09/02	15:50	99,6	5260	3767	1272	23,90	14,50	1,70	120,00	
D/F	12/09/02	16:10	99,1	5410	3756	1266	26,60	13,90	1,80	140,00	



TQ F2 - SET/02 - 30% - COQUE/BLEND										
Parâmetro	Data	Hora	Far (t/h)	Coque (hg/h)	Blend (kg/h)	TZQ (°C)	CO	O <sub>2</sub> (%)	HCT	NO <sub>x</sub>
Hg	16/09/02	14:20	99,6	5310	3972	1344	25,40	14,50	1,60	191,00
Hg	16/09/02	14:40	99,5	5310	4088	1316	23,40	14,80	1,50	195,00
Hg	16/09/02	15:00	99,3	5320	4013	1340	28,60	14,40	1,30	205,00
Hg	16/09/02	15:20	99,5	5310	4122	1351	21,50	15,10	1,40	183,00
Hg	16/09/02	15:40	99,1	5310	3821	1367	20,00	16,10	1,30	138,00
Hg	16/09/02	16:00	99,0	5310	3850	1366	15,40	16,70	1,30	155,00
Hg	16/09/02	16:20	99,5	5310	3814	1368	17,10	16,30	1,30	136,00
Hg	17/09/02	13:40	99,4	5010	3698	1332	36,90	18,90	3,70	366,00
Hg	17/09/02	14:00	99,8	5010	3710	1328	35,70	18,50	3,60	356,00
Hg	17/09/02	14:20	99,3	5210	3767	1348	35,70	18,40	3,60	374,00
Hg	17/09/02	14:40	100,2	5100	3680	1339	38,60	18,60	3,40	349,00
Hg	17/09/02	15:00	99,0	5100	3675	1364	30,50	19,20	3,30	350,00
Hg	17/09/02	16:30	100,2	4910	3840	1316	30,00	18,20	2,90	422,00
Hg	17/09/02	16:50	99,7	4810	3755	1353	28,80	18,60	2,80	402,00
Hg	18/09/02	8:40	99,3	5260	3777	1376	33,90	17,10	1,80	472,00
Hg	18/09/02	9:00	99,5	5260	3818	1373	34,70	17,30	1,70	457,00
Hg	18/09/02	9:20	99,7	5110	3760	1380	39,80	17,20	1,80	446,00
Hg	18/09/02	9:40	99,8	5110	3879	1373	37,40	17,80	1,80	434,00
Hg	18/09/02	13:20	99,2	5110	3700	1350	33,00	15,10	1,00	273,00
HF/F	18/09/02	14:25	99,3	5210	3773	1289	34,20	14,30	1,10	206,00
HF/F	18/09/02	14:40	99,0	5210	3770	1340	33,70	14,60	1,10	262,00
HF/F	18/09/02	14:55	99,2	5200	3763	1345	38,10	14,20	1,10	294,00
HF/F	18/09/02	15:10	99,2	5200	3778	1348	37,10	14,40	1,10	271,00
HF/F	18/09/02	15:45	99,7	5200	3747	1330	36,90	14,40	1,20	286,00
HF/F	18/09/02	16:00	100,0	5210	3782	1338	47,10	14,40	1,10	281,00
HF/F	18/09/02	16:15	99,1	5110	3812	1347	108,00	14,50	1,10	258,00
HF/F	18/09/02	16:30	99,0	4810	3857	1336	34,90	14,20	1,20	295,00
HF/F	18/09/02	16:45	99,5	4810	3882	1339	40,30	14,50	1,10	292,00
HF/F	18/09/02	21:00	99,7	5160	3224	1371	26,60	16,20	1,10	242,00
HF/F	18/09/02	21:15	98,3	5160	3210	1366	30,80	16,40	1,00	199,00
HF/F	18/09/02	21:30	99,0	5110	3275	1369	26,10	16,50	1,00	202,00
HF/F	18/09/02	21:45	99,2	5100	3239	1352	25,20	16,50	0,90	177,00
HF/F	18/09/02	22:20	99,9	5110	3241	1013	47,60	16,80	0,90	134,00
<b>Mínima</b>			<b>98,3</b>	<b>1960</b>	<b>2864</b>	<b>1013</b>	<b>15,40</b>	<b>12,90</b>	<b>0,90</b>	<b>116,00</b>
<b>Média</b>			<b>99,5</b>	<b>5204</b>	<b>3404</b>	<b>1338</b>	<b>40,54</b>	<b>15,79</b>	<b>1,99</b>	<b>284,30</b>
<b>Máxima</b>			<b>100,8</b>	<b>5970</b>	<b>4122</b>	<b>1380</b>	<b>108,00</b>	<b>19,40</b>	<b>3,80</b>	<b>813,00</b>

Obs.: TZQ – temperatura na zona de queima do forno rotativo

Fonte: CETESB (2004a)

**TABELA 21**  
**EMISSIONES DE DIOXINAS E FURANOS EM CHAMINÉ DO FORNO 2 DA CCRG, EM JUL E SET/02**

Isômeros	Branco	Unidade	TBF2JUN02				TQF2SET02					
			Com Blend		Sem Blend		Am1		Am2		Am3	
			Am1	Am2	Am1	Am2	Am	Branco	Am	Branco	Am	Branco
2,3,7,8 TCDD	0,04	ng	0,04	0,0089	0,0025	0,04	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
2,3,7,8 PeCDD	0,12	ng	0,12	0,0026	0,0026	0,12	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026
2,3,7,8 HxCDD	0,12	ng	0,12	0,0090	0,0090	0,12	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090
2,3,7,8 HpCDD	0,12	ng	0,12	0,0280	0,0030	0,12	0,0079	0,0057	0,0025	0,0025	0,0089	0,0210
OCDD	0,24	ng	0,24	0,0480	0,0250	0,24	0,0220	0,0140	0,0230	0,0170	0,0200	0,0110
2,3,7,8 TCDF	0,04	ng	0,04	0,1300	0,0600	0,04	0,2900	0,3000	0,1100	0,1100	0,2600	0,0810
1,2,3,7,8 PeCDF	0,10	ng	0,10	0,0300	0,0120	0,10	0,0520	0,0550	0,0200	0,0210	0,0460	0,0160
2,3,4,7,8 PeCDF	0,10	ng	0,10	0,0510	0,0026	0,10	0,2800	0,1300	0,0780	0,1200	0,2400	0,0910
2,3,7,8 HxCDF	0,12	ng	0,12	0,0530	0,0165	0,12	0,3860	0,4210	0,0999	0,1550	0,3070	0,1180
2,3,7,8 HpCDF	0,12	ng	0,12	0,0580	0,0060	0,12	0,2120	0,2500	0,0059	0,0930	0,1860	0,0660
OCDF	0,36	ng	0,36	0,0310	0,0100	0,36	0,2900	0,3300	0,0730	0,1200	0,2500	0,0630
Dioxinas e Furanos	0,19	ng	0,19	0,0573	0,0144	0,19	0,2170	0,1470	0,0660	0,0930	0,1859	0,0718
Recuperação		%					96,9	96,2	99,0	100,7	93,7	97,0
Volume gás amostrado		Nm³	3,2577	2,9708	2,9709	3,0052	2,3075	2,3075	2,3575	2,3575	2,3393	2,3393

Massa coletada, volume de gás amostrado e percentual de recuperação nas amostras

**EMISSIONES OBTIDAS EM CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS EM CHAMINÉ**

Parâmetros	Condição	Unidade	Com Blend		Sem Blend		Am1	Am2	Am3
			Am1	Am2	Am1	Am2			
			2,3,7,8 TCDD	chaminé	ng/Nm³	0,0120			
2,3,7,8 PeCDD	chaminé	ng/Nm³	0,0370	0,0009	0,0009	0,0400	0,0011	0,0011	0,0011
2,3,7,8 HxCDD	chaminé	ng/Nm³	0,0370	0,0030	0,0030	0,0400	0,0039	0,0038	0,0038
2,3,7,8 HpCDD	chaminé	ng/Nm³	0,0370	0,0094	0,0010	0,0400	0,0013	0,0011	0,0029
OCDD	chaminé	ng/Nm³	0,0740	0,0162	0,0084	0,0800	0,0035	0,0025	0,0038
2,3,7,8 TCDF	chaminé	ng/Nm³	0,0120	0,0438	0,0202	0,0130	0,0013	0,0013	0,0765
1,2,3,7,8 PeCDF	chaminé	ng/Nm³	0,0310	0,0101	0,0040	0,0330	0,0011	0,0011	0,0128
2,3,4,7,8 PeCDF	chaminé	ng/Nm³	0,0310	0,0172	0,0009	0,0330	0,0650	0,0011	0,0637
2,3,7,8 HxCDF	chaminé	ng/Nm³	0,0370	0,0178	0,0056	0,0400	0,0052	0,0051	0,0808
2,3,7,8 HpCDF	chaminé	ng/Nm³	0,0370	0,0195	0,0020	0,0400	0,0026	0,0025	0,0513
OCDF	chaminé	ng/Nm³	0,1110	0,0104	0,0034	0,1200	0,0013	0,0013	0,0799
Dioxinas e Furanos	chaminé	ng/Nm³	0,0570	0,0193	0,0048	0,0620	0,0353	0,0033	0,0509

Parâmetros	Condição	Unidade	Com Blend		Sem Blend		Am1	Am2	Am3
			Am1	Am2	Am1	Am2			
			2,3,7,8 TCDD	11%O <sub>2</sub>	ng/Nm³	0,0130			
2,3,7,8 PeCDD	11%O <sub>2</sub>	ng/Nm³	0,0380	0,0009	0,0009	0,0410	0,0012	0,0016	0,0012
2,3,7,8 HxCDD	11%O <sub>2</sub>	ng/Nm³	0,0380	0,0032	0,0031	0,0410	0,0043	0,0055	0,0043
2,3,7,8 HpCDD	11%O <sub>2</sub>	ng/Nm³	0,0380	0,0098	0,0010	0,0410	0,0014	0,0015	0,0032
OCDD	11%O <sub>2</sub>	ng/Nm³	0,0770	0,0168	0,0086	0,0810	0,0038	0,0036	0,0043
2,3,7,8 TCDF	11%O <sub>2</sub>	ng/Nm³	0,0130	0,0456	0,0206	0,0140	0,0014	0,0018	0,0850
1,2,3,7,8 PeCDF	11%O <sub>2</sub>	ng/Nm³	0,0320	0,0105	0,0041	0,0340	0,0012	0,0015	0,0142
2,3,4,7,8 PeCDF	11%O <sub>2</sub>	ng/Nm³	0,0320	0,0179	0,0009	0,0340	0,0714	0,0016	0,0708
2,3,7,8 HxCDF	11%O <sub>2</sub>	ng/Nm³	0,0380	0,0186	0,0057	0,0410	0,0057	0,0073	0,0898
2,3,7,8 HpCDF	11%O <sub>2</sub>	ng/Nm³	0,0380	0,0203	0,0021	0,0410	0,0029	0,0036	0,0570
OCDF	11%O <sub>2</sub>	ng/Nm³	0,1150	0,0109	0,0034	0,1220	0,0014	0,0018	0,0888
Dioxinas e Furanos	11%O <sub>2</sub>	ng/Nm³	0,0590	0,0201	0,0049	0,0630	0,0388	0,0047	0,0565

Parâmetros	Condição	Unidade	Com Blend		Sem Blend		Am1	Am2	Am3
			Am1	Am2	Am1	Am2			
			2,3,7,8 TCDD	TE	ug/h	2,470			
2,3,7,8 PeCDD	TE	ug/h	7,400	0,171	0,175	8,040	0,22	0,22	0,22
2,3,7,8 HxCDD	TE	ug/h	7,400	0,594	0,607	8,040	0,75	0,76	0,76
2,3,7,8 HpCDD	TE	ug/h	7,400	1,847	0,202	8,040	0,25	0,21	0,57
OCDD	TE	ug/h	14,800	3,166	1,687	16,100	0,67	0,51	0,76
2,3,7,8 TCDF	TE	ug/h	2,470	8,574	4,049	2,680	0,25	0,25	15,00
1,2,3,7,8 PeCDF	TE	ug/h	6,170	1,979	0,810	6,700	0,21	0,21	2,52
2,3,4,7,8 PeCDF	TE	ug/h	6,170	3,363	0,175	6,700	12,50	0,22	12,50
2,3,7,8 HxCDF	TE	ug/h	7,400	3,495	1,113	8,040	1,00	1,01	15,90
2,3,7,8 HpCDF	TE	ug/h	7,400	3,825	0,405	8,040	0,50	0,51	10,10
OCDF	TE	ug/h	22,200	2,044	0,675	24,100	0,25	0,25	15,70
Dioxinas e Furanos	TE	ug/h	11,500	3,782	0,970	12,500	6,79	0,65	10,00

**Gerais**

Vazão do gás	CN bs	Nm³/hora	200904	195925	200479	201322	192505	198703	196356
Vazão do gás	C chaminé	M³/hora	352366	345411	343335	348439	338560	352749	347963
Isocinética média		%	98,20	99,50	97,30	98,00	98,40	97,40	97,80
Velocidade média gás		m/s	12,60	12,30	12,20	12,40	12,10	12,60	12,40
Umidade do gás		%v/v	14,90	15,70	13,20	14,00	15,10	14,60	15,00
Temperatura chaminé		C	103,58	102,17	102,08	102,58	105,60	111,20	109,00

**Composição gases**

Dióxido de carbono	%	CO <sub>2</sub> v/v	15,40	15,40	16,00	16,00	15,40	13,80	15,80
Oxigênio	%	O <sub>2</sub> v/v	11,40	11,40	11,20	11,20	11,90	14,00	12,00
Nitrogênio	%	N <sub>2</sub> v/v	73,20	73,20	72,80	72,80	72,70	72,20	72,20
Data		d/m/a	28/6/02	28/6/02	29/6/02	29/6/02	11/9/02	12/9/02	12/9/02
hora início		h:m	09:34	14:00	07:44	10:54	09:25	08:30	13:20
hora término		h:m	12:20	16:30	10:16	13:28	12:30	11:38	16:27
P <sub>atm</sub>		mm Hg	702,00	702,00	702,00	702,00	705,00	705,00	705,00
P <sub>estática</sub> chaminé		mm Hg	0,30	0,30	0,30	0,30	0,40	0,40	0,40

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002b)

Fonte: BIOAGRI AMBIENTAL (2002a)

## **ANEXO C – Gerais**

**TABELA 22**  
**PONTOS DE FUSÃO PARA ESPÉCIES SELECIONADAS**  
**DE METAIS E ÓXIDOS METÁLICOS**

SUBSTÂNCIAS		PONTO DE FUSÃO		
Nome	Símbolo	°F	K	°C
<b>Substâncias voláteis</b>				
Mercúrio	Hg	-102	199	-74
Tálio	Tl	5495	3308	3035
<b>Substâncias semi-voláteis</b>				
Cádmio	Cd	609	594	321
Chumbo	Pb	621	601	328
Selênio	Se	423	490	217
Antimônio	Sb	1167	904	631
Cloreto de potássio	KCl	1454	1063	790
Cloreto de sódio	NaCl	1472	1073	800
<b>Substâncias refratárias</b>				
Prata	Ag	1761	1234	961
Alumínio	Al	1220	933	660
Níquel	Ni	2646	1725	1452
Bário	Ba	1562	1123	850
Cromo	Cr	2939	1888	1615
Ferro	Fe	2795	1808	1535

Fonte: Dellinger, Pershing e Sarofim (1993), p.40, adaptada pelo autor

TABELA 23

## PADRÕES DE EMISSÃO PARA INCINERAÇÃO E CO-PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS CORRIGIDOS A 7% DE OXIGÊNIO

Parâmetros	Unidades	CONAMA 264/99	CETESB P4.263	CETESB 1997	NBR 11175/90	CONAMA 316/02	DIR 2000/76 Dez/00	
							Co-incineração	Incineração
SO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup> ou * kg/h	OA	445,45	8*	280,00	280,00	63,64	70,00
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	OA	1018,18	392,0	560,00	560,00	1018,18	280,00
HCl	mg/Nm <sup>3</sup> ou * kg/h	1,80*	12,73	0,60*	1,80*	80,00	12,73	14,00
HF	mg/Nm <sup>3</sup> ou * g/h	5,00	5,09	43,00*	5,00	5,00	1,27	1,40
CO	ppm <sub>v</sub> ou *ppm	100,00	100,00	66,67*	100*	100,00	OA	70,00
HCT (expresso como propano)	ppm <sub>v</sub> - *mg/Nm <sup>3</sup>	20,00	20,00				12,73*	14,00*
CO (pico)	ppm <sub>v</sub> ou *ppm	500,00	500,00	333,33*	500,00			
MP	mg/Nm <sup>3</sup> ou *kg/t	98,00	98,00	0,15*	70,00	70,00	38,18	14,00
Mercúrio (Hg)	mg/Nm <sup>3</sup>	0,05	0,05				0,06	0,07
Chumbo (Pb)	mg/Nm <sup>3</sup>	0,35	0,35					
Cádmio (Cd)	mg/Nm <sup>3</sup>	0,10	0,00					
Tálio (Tl)	mg/Nm <sup>3</sup>	0,10	0,00					
Cd+Tl	mg/Nm <sup>3</sup>	0,00	0,06				0,06	0,07
Cd+Hg+Tl	mg/Nm <sup>3</sup> ou * g/h	0,00	0,00	2,50*	0,28	0,28		
As+Co+Ni+Se+Te	mg/Nm <sup>3</sup> ou * g/h	0,00	0,00	12,00*	1,40	1,40		
As+Be+Co+Ni+Se+Te	mg/Nm <sup>3</sup>	1,40	1,27					
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V	mg/Nm <sup>3</sup>	0,00	0,00				0,64	0,70
Sb+Pb+Cr+CN+F+Cu+Mn+Pt+Pd+Rh+V+Sn	mg/Nm <sup>3</sup> ou * g/h	0,00	0,00	60,00*	7,00	7,00		
As+Be+Co+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Sb+Se+Sn+Te+Zn	mg/Nm <sup>3</sup>	7,00	0,00					
As+Be+Co+Cr+Mn+Ni+Pb+Sb+Se+Sn+Te+Zn	mg/Nm <sup>3</sup>		6,36					
Dioxinas e furanos	ng/Nm <sup>3</sup>		0,14			0,50	0,13	0,10
EDR - PCOP	%	99,99	99,99	99,99	99,99	99,99		
EDR - PCB's/Dioxinas	%				99,999	99,99		
Classes 1 e 2	mg/Nm <sup>3</sup>				1,40			
Classes 1 e 3	mg/Nm <sup>3</sup>				7,00			
Classes 2 e 3	mg/Nm <sup>3</sup>				7,00			

Obs.: A Diretiva Européia estabelece que se numa planta de co-incineração mais que 40% do calor resultante liberado vir do resíduo perigoso, deverão ser aplicados os valores limites de emissão do anexo V - incineradores.  
OA - limite estabelecido pelo Órgão Ambiental

TABELA 24

## PADRÕES DE EMISSÃO PARA INCINERAÇÃO E CO-PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS CORRIGIDOS A 10% DE OXIGÊNIO

Parâmetros	Unidades	CONAMA 264/99	CETESB P4.263	CETESB 1997	NBR 11175/90	CONAMA 316/02	DIR 2000/76 Dez/00	
							Co-incineração	Incineração
SO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup> ou * kg/h	OA	350,00	8,00*	220,00	220,00	50,00	55,00
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	OA	800,00	308,00	440,00	440,00	800,00	220,00
HCl	mg/Nm <sup>3</sup> ou * kg/h	1,80*	10,00	0,60*	1,80*	62,86	10,00	11,00
HF	mg/Nm <sup>3</sup> ou * g/h	3,93	4,00	43,00*	3,93	3,93	1,00	1,10
CO	ppm <sub>v</sub> ou *ppm	78,57	78,57	52,38*	78,57*	78,57	OA	55,00
HCT (expresso como propano)	ppm <sub>v</sub> - *mg/Nm <sup>3</sup>	15,71	15,71				10,00*	11,00*
CO (pico)	ppm <sub>v</sub> ou *ppm	392,86	392,86	261,90*	392,86*			
MP	mg/Nm <sup>3</sup> ou *kg/t	77,00	77,00	0,15*	55,00	55,00	30,00	11,00
Mercúrio (Hg)	mg/Nm <sup>3</sup>	0,04	0,04				0,05	0,06
Chumbo (Pb)	mg/Nm <sup>3</sup>	0,28	0,28					
Cádmio (Cd)	mg/Nm <sup>3</sup>	0,08	0,00					
Tálio (Tl)	mg/Nm <sup>3</sup>	0,08	0,00					
Cd+Tl	mg/Nm <sup>3</sup>	0,00	0,05				0,05	0,06
Cd+Hg+Tl	mg/Nm <sup>3</sup> ou * g/h	0,00	0,00	2,50*	0,22	0,22		
As+Co+Ni+Se+Te	mg/Nm <sup>3</sup> ou * g/h	0,00	0,00	12,00*	1,10	1,10		
As+Be+Co+Ni+Se+Te	mg/Nm <sup>3</sup>	1,10	1,00					
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V	mg/Nm <sup>3</sup>	0,00	0,00				0,50	0,55
Sb+Pb+Cr+CN+F+Cu+Mn+Pt+Pd+Rh+V+Sn	mg/Nm <sup>3</sup> ou * g/h	0,00	0,00	60,00*	5,50	5,50		
As+Be+Co+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Sb+Se+Sn+Te+Zn	mg/Nm <sup>3</sup>	5,50	0,00					
As+Be+Co+Cr+Mn+Ni+Pb+Sb+Se+Sn+Te+Zn	mg/Nm <sup>3</sup>		5,00					
Dioxinas e furanos	ng/Nm <sup>3</sup>		0,11			0,39	0,10	0,10
EDR - PCOP	%	99,99	99,99	99,99	99,99	99,99		
EDR - PCB's/Dioxinas	%				99,999	99,99		
Classes 1 e 2	mg/Nm <sup>3</sup>				1,10			
Classes 1 e 3	mg/Nm <sup>3</sup>			3,00	5,50			
Classes 2 e 3	mg/Nm <sup>3</sup>				5,50			

Obs.: A Diretiva Européia estabelece que se numa planta de co-incineração mais que 40% do calor resultante liberado vir do resíduo perigoso, deverão ser aplicados os valores limites de emissão do anexo V - incineradores.

OA – limite estabelecido pelo Órgão Ambiental

TABELA 25

## PADRÕES DE EMISSÃO PARA INCINERAÇÃO E CO-PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS CORRIGIDOS A 11% DE OXIGÊNIO

Parâmetros	Unidades	CONAMA 264/99	CETESB P4.263	CETESB 1997	NBR 11175/90	CONAMA 316/02	DIR 2000/76 Dez/00	
							Co-incineração	Incineração
SO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup> ou * kg/h	OA	318,18	8,00*	200,00	200,00	45,45	50,00
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	OA	727,27	280,00	400,00	400,00	727,27	200,00
HCl	mg/Nm <sup>3</sup> ou * kg/h	1,80*	9,09	0,60*	1,80*	57,14	9,09	10,00
HF	mg/Nm <sup>3</sup> ou * g/h	3,57	3,64	43,00*	3,57	3,57	0,91	1,00
CO	ppm <sub>v</sub> ou *ppm	71,43	71,43	47,60*	71,43*	100,00	OA	50,00
HCT (expresso como propano)	ppm <sub>v</sub> - *mg/Nm <sup>3</sup>	14,29	14,29				9,09*	10,00*
CO (pico)	ppm <sub>v</sub> ou *ppm	357,14	357,140	238,00*	357,14*			
MP	mg/Nm <sup>3</sup> ou *kg/t	70,00	70,00	0,15*	50,00	50,00	27,27	10,00
Mercúrio (Hg)	mg/Nm <sup>3</sup>	0,04	0,04				0,05	0,05
Chumbo (Pb)	mg/Nm <sup>3</sup>	0,25	0,25					
Cádmio (Cd)	mg/Nm <sup>3</sup>	0,07						
Tálio (Tl)	mg/Nm <sup>3</sup>	0,07						
Cd+Tl	mg/Nm <sup>3</sup>		0,05				0,05	0,05
Cd+Hg+Tl	mg/Nm <sup>3</sup> ou * g/h			2,50*	0,20	0,20		
As+Co+Ni+Se+Te	mg/Nm <sup>3</sup> ou * g/h			12,00*	1,00	1,00		
As+Be+Co+Ni+Se+Te	mg/Nm <sup>3</sup>	1,00	0,91					
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V	mg/Nm <sup>3</sup>						0,45	0,50
Sb+Pb+Cr+CN+F+Cu+Mn+Pt+Pd+Rh+V+Sn	mg/Nm <sup>3</sup> ou * g/h			60,00*	5,00	5,00		
As+Be+Co+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Sb+Se+Sn+Te+Zn	mg/Nm <sup>3</sup>	5,00						
As+Be+Co+Cr+Mn+Ni+Pb+Sb+Se+Sn+Te+Zn	mg/Nm <sup>3</sup>		4,55					
Dioxinas e furanos	ng/Nm <sup>3</sup>		0,10			0,36	0,09	0,10
EDR - PCOP	%	99,99	99,99	99,99	99,99	99,99		
EDR - PCB's/Dioxinas	%				99,999	99,99		
Classes 1 e 2	mg/Nm <sup>3</sup>				1,00			
Classes 1 e 3	mg/Nm <sup>3</sup>				5,00			
Classes 2 e 3	mg/Nm <sup>3</sup>				5,00			

Obs.: A Diretiva Européia estabelece que se numa planta de co-incineração mais que 40% do calor resultante liberado vir do resíduo perigoso, deverão ser aplicados os valores limites de emissão do anexo V - incineradores.

OA - limite estabelecido pelo Órgão Ambiental estadual

**FIGURA 1**  
**REAÇÕES DE FORMAÇÃO E ABSORÇÃO DE SO<sub>2</sub> NAS VÁRIAS PARTES**  
**DE UM SISTEMA DE PIRO-PROCESSAMENTO DE CLÍNQUER**

Parte da planta	Formação de SO <sub>2</sub>	Absorção de SO <sub>2</sub>
Moinho de cru e PE <sup>(1)</sup>		$\text{CaCO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2$
Zona de pré-aquecimento	$\text{Sulfetos} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Óxidos} + \text{SO}_2$ $\text{Enxofre orgânico} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$	$\text{CaCO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2$
Zona de calcinação	$\text{Enxofre do combustível} + \text{O}_2 \rightarrow \text{}^{(2)}\text{SO}_2$ $\text{CaSO}_4 + \text{C} \rightarrow \text{CaO} + \text{SO}_2 + \text{}^{(2)}\text{CO}^*$	$\text{CaO} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3$ $\text{CaSO}_3 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4$
Zona de queima	$\text{Enxofre do combustível} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$ $\text{Sulfatos} \rightarrow \text{óxidos} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$	$\text{Na}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4$ $\text{K}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4$ $\text{CaO} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4$

Obs.: 1) PE - precipitador eletrostático;

2) quando queimando somente na zona de pré-calcinação

Fonte: Nielsen e Jepsen (1991), adaptada pelo autor