

Estudo de Baixo Carbono para a Indústria de Cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030

1ª edição atualizada

Sumário Executivo



Governo do Estado de São Paulo
Secretaria do Meio Ambiente
CETESB – Companhia Ambiental
do Estado de São Paulo
BID – Banco Interamericano
de Desenvolvimento
São Paulo, 2018



Estudo de Baixo Carbono para a Indústria de Cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030

1ª edição atualizada

Sumário Executivo

Governo do Estado de São Paulo

Secretaria do Meio Ambiente

CETESB – Companhia Ambiental
do Estado de São Paulo

BID – Banco Interamericano
de Desenvolvimento

São Paulo, 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CETESB – Biblioteca, SP, Brasil)

C418e CETESB (São Paulo)

Estudo de baixo carbono para a indústria de cimento no estado de São Paulo de 2014 a 2030 [recurso eletrônico] : sumário executivo / CETESB, BID ; Elaboração Bruna Patrícia de Oliveira, Jhonathan Fernandes Torres de Souza ; Coordenação executiva Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer ; Coordenação técnica Sérgio Almeida Pacca ; Colaboradores Bruna Chyoshi... [et al.]. – 1.ed. atual. – São Paulo : CETESB, 2018.

1 arquivo de texto (22 p.) : il. color., PDF ; 5,5 MB.

Elaborado a partir do texto de mesmo título dos autores: PUNHAGUI, Kátia Regina Garcia et al. Projeto BR-T1262: apoio ao desenvolvimento de estudos de mitigação para o estado de São Paulo.

Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>

ISBN 978-85-9467-038-0

1. Aquecimento global 2. Baixo carbono 3. Cimento – indústria 4. Efeito estufa – gases - cenário 5. Mudanças climáticas 6. Tecnologia química 7. São Paulo (Est.) I. Oliveira, Bruna Patrícia de. II. Souza, Jhonathan Fernandes Torres de. III. BID. IV. Título.

CDD (21. ed. Esp.) 363.738 748 161

CDU (2. ed. Port.) 504.7:666.94 (815.6)

Catalogação na fonte: Margot Terada CRB 8.4422

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

Avenida Professor Frederico Hermann Jr., 345
Alto de Pinheiros CEP 05459-900 São Paulo SP
Tel.: (11) 3133 3000 Fax: (11) 3133 3402
<http://www.cetesb.sp.gov.br>

© CETESB 2018

É permitida a reprodução total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte.

Direitos reservados de distribuição.



GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO

Governador Márcio França

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE

Secretário Eduardo Trani

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

Diretor Presidente Carlos Roberto dos Santos

Diretoria de Gestão Corporativa Waldir Agnelo

**Diretoria de Controle
e Licenciamento Ambiental** Geraldo do Amaral Filho

**Diretoria de Avaliação
de Impacto Ambiental** Ana Cristina Pasini da Costa

**Diretoria de Engenharia
e Qualidade Ambiental** Eduardo Luis Serpa

Presidência

Carlos Roberto dos Santos

Departamento de Cooperação Institucional e Internacional

Fátima Aparecida Carrara

Divisão de Mudanças Climáticas

Maria Fernanda Pelizzon Garcia

Ficha técnica

Autores

Katia Regina Garcia Punhagui
Lidiane Santana Oliveira
Vanderley Moacyr John
Bruna Patrícia de Oliveira
Jhonathan Fernandes Torres de Souza

Carlos Alberto Sequeira Paiva
Daniel Soler Huet
Eduardo Shimabokuro
Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer
Jussara de Lima Carvalho
Maria Fernanda Pelizzon Garcia
Marta Emerich
Neuza Maria Maciel
Oswaldo dos Santos Lucon
Renan Pelegrine
Wilson Issao Shiguemoto

Coordenação Executiva

Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer

Coordenação Técnica

Sérgio Almeida Pacca

Revisão e Reestruturação

Bruna Patrícia de Oliveira

Colaboradores

Bruna Chyoshi

Projeto Gráfico e Diagramação

Brainstorm – Arte em Comunicação

Foto da capa

Acervo BID

Estudo realizado com recursos do Projeto BR T-1262: “Apoio ao desenvolvimento de estudos de mitigação para o Estado de São Paulo” proveniente da parceria entre o Banco Interamericano de Desenvolvimento e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

As opiniões e conclusões expressas nesta publicação são de responsabilidade dos autores e não refletem necessariamente a posição da CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo e do BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento, de sua Diretoria Executiva, ou dos países que eles representam.

O Banco Mundial, através do seu fundo de assistência técnica, ESMAP, apoiou o desenvolvimento deste estudo com a ferramenta Curva MAC e as informações que foram necessárias para sua utilização. A versão mais recente da referida ferramenta encontra-se no link <http://esmap.org/mactool> (acesso em 01/12/2017)

Lista de abreviaturas e siglas

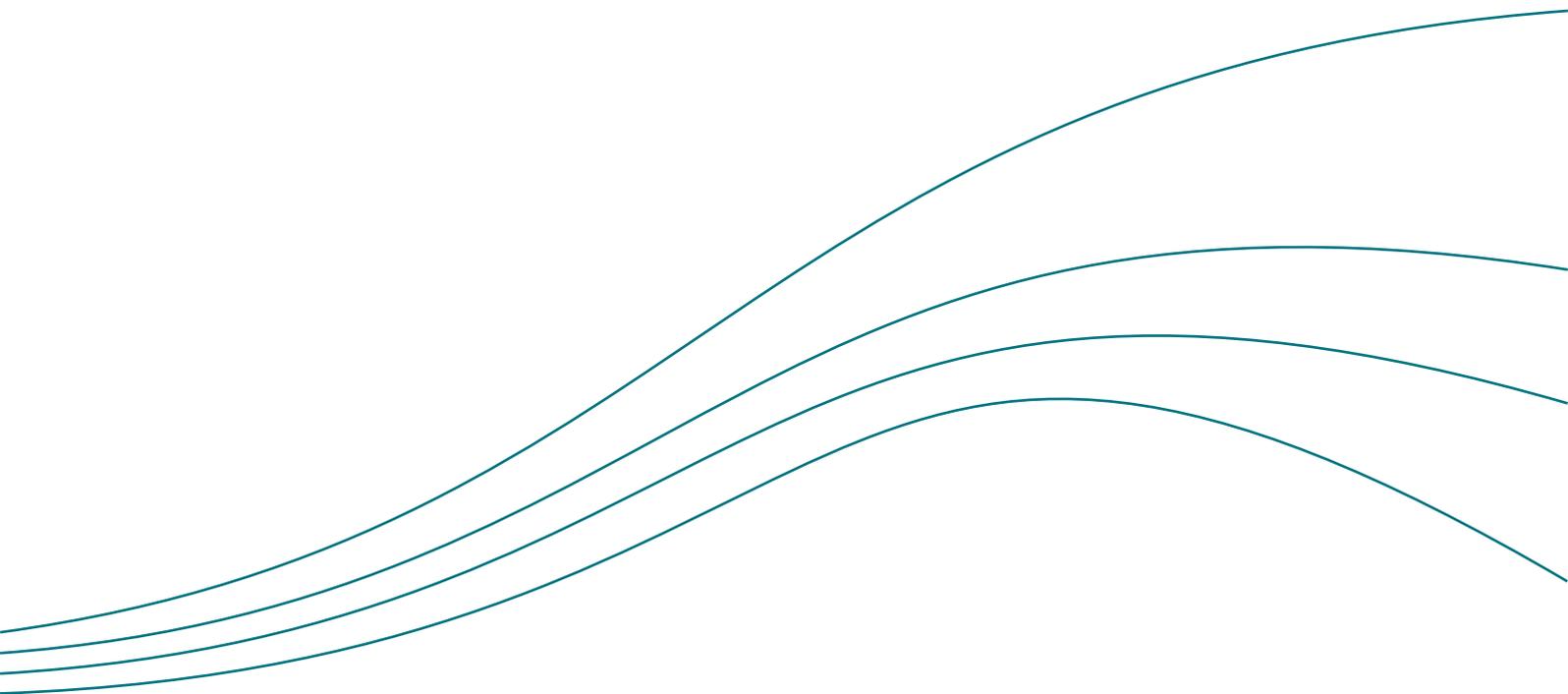
a.a.	ao ano
ABAI	Associação Brasileira de Argamassas Industrializadas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABESC	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAMAT	Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção
BECP	Preço de Equilíbrio de Carbono (<i>Break-Even Carbon Price</i>)
BEN	Balanco Energético Nacional
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
CAPEX	Investimentos (<i>Capital Expenditures</i>)
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH	Cal Hidratada
CP	Cimento <i>Portland</i>
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
CNI	Confederação Nacional da Indústria
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
INDC	Intended Nationally Determined Contribution
MAC	Custo Marginal de Abatimento (<i>Marginal Abatement Cost</i>)
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira
NDC	Nationally Determined Contribution
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PEMC	Política Estadual de Mudanças Climáticas
Sabesp	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SGT	Superintendência de Gestão Tarifária
Sinaprocim	Sindicato Nacional da Indústria de Produtos de Cimento
SNIC	Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento
TIR-Benchmark	Taxa de Tratividade
WBCSD	Conselho Mundial de Negócios para Desenvolvimento Sustentável (World Business Council for Sustainable Development)

Lista de símbolos

CO₂	dióxido de carbono (gás carbônico)
Gg	gigagrama
GJ	gigajoule
kWh	quilowatt-hora
m³	metro cúbico
MPa	megapascal
Mt	megatonelada
PJ	petajoule
t	tonelada
TJ	terajoule



Sumário executivo



O presente sumário foi baseado no “Estudo de baixo carbono para a indústria de cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030” o qual apresentou cenários de referência (CR) e o cenário de baixo carbono (CBC) considerando emissões de GEE no processo industrial, no consumo de energia e alternativas de mitigação. No estudo foram avaliados os Custos Marginais de Abatimento (*Marginal Abatement Cost* – MAC) das tecnologias avaliadas e o preço de equilíbrio de carbono (*Break-Even Carbon Price* – BECP). As reduções de emissões proporcionadas ao longo do período analisado em cada opção tecnológica de mitigação foram consolidadas em um gráfico de cunha (*Wedge Graph*).

As emissões futuras de GEE são o produto de sistemas dinâmicos muito complexos, determinados por forças motrizes tais como crescimento demográfico, desenvolvimento sócio-econômico e mudança tecnológica, cuja evolução é altamente incerta. No entanto, os cenários são imagens alternativas de como o futuro poderá se desdobrar e são ferramentas adequadas para analisar como as forças motrizes podem influenciar no resultado de emissões futuras, assim como avaliar as incertezas associadas, não apresentando relação com a probabilidade de ocorrência dos mesmos (IPCC, 2000a).

Os cenários colaboram na identificação das possíveis ameaças, avaliam as competências organizacionais e exercitam o pensamento global para desenvolver alianças e ações estratégicas, proporcionando a elaboração de análises alternativas. Portanto, não se trata apenas de prospecção, mas da construção de um futuro possível, auxiliando a construir as mudanças desejadas para o futuro (WRIGHT, 2008 apud MENDONÇA, 2011). Os cenários no presente estudo foram construídos baseados na análise

de dados históricos, nas informações apresentadas em publicações do setor e em informações atribuídas pelos autores.

O Setor de Cimento no Estado de São Paulo, em 2005, contribuiu com 8,4% das emissões de GEE no Setor de Processos Industriais, fato que se relaciona com a produção, onde o estado foi responsável por 8,1% da produção nacional de cimento (CETESB, 2013).

ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

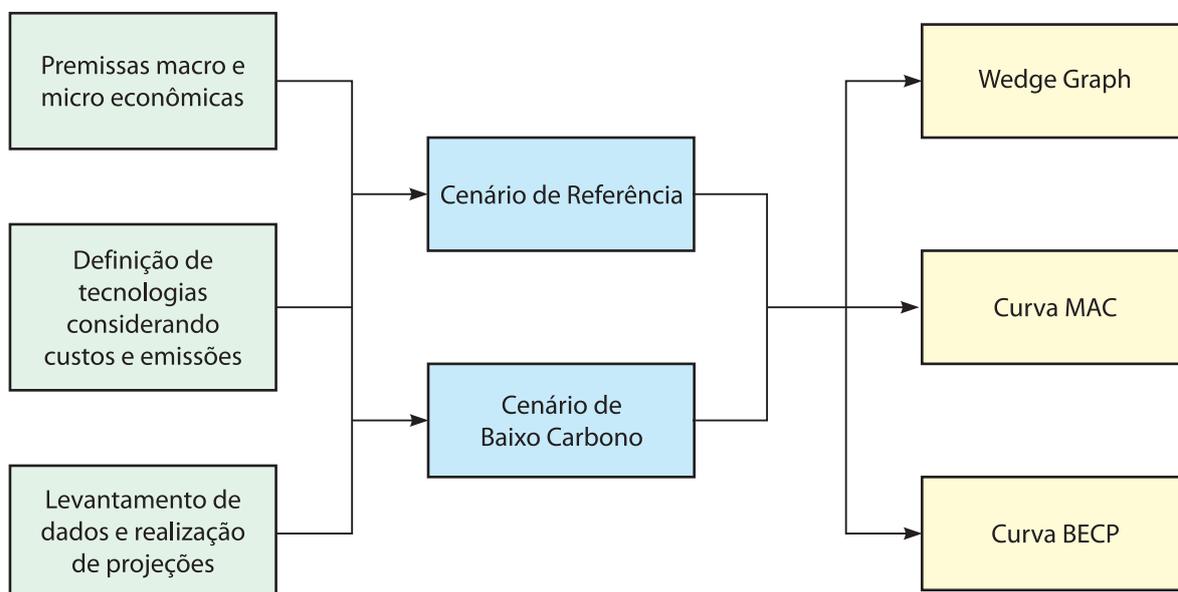
A construção dos cenários seguiu o roteiro metodológico apresentado na Figura 1, onde consta um levantamento inicial de dados, onde foram contactadas empresas e especialistas do setor para o estabelecimento de premissas e a realização de projeções. Posteriormente, seguiu-se com a realização dos CR e CBC e a apresentação dos resultados de mitigação, MAC e BECP.

As estimativas de emissões de GEE foram realizadas empregando-se o método apresentado no guia do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2000b), o *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Essas estimativas consideraram dados de atividade, como produção ou energia consumida e o respectivo fator de emissão.

A abordagem na determinação do MAC e do BECP¹ foi incremental e teve como referência o Estudo de Baixo Carbono para o Brasil (GOUVELLO et al., 2010). Para a construção das curvas de MAC e BECP empregou-se a *MACTool*. De acordo com *Energy Sector Management Assistance Program* (ESMAP, 2016), trata-se de uma ferramenta desenvolvida pelo Banco Mundial que permite avaliar o investimento

1. O preço de equilíbrio de carbono indica o incentivo econômico que os agentes, como por exemplo, a indústria, necessitariam para que a medida de mitigação estudada se tornasse atraente, quando comparada à referência. Este preço é determinado da mesma forma que o custo marginal de abatimento (MAC), porém utilizando uma taxa de atratividade (TIR) setorial. Usualmente, o *benchmark carbon price* é apresentado graficamente da mesma forma que a Curva MAC (GOUVELLO et al, 2010).

Figura 1 – Etapas do desenvolvimento do estudo



Fonte: Pacca et al. (2017).

necessário para um crescimento de baixo carbono, podendo ser utilizada para testar as possibilidades setoriais e as respectivas respostas aos preços. Como entradas, a MACTool utiliza os parâmetros chave para as medidas de mitigação e para as variáveis macroeconômicas, devendo o usuário especificar pelo menos um cenário sobre o futuro macroeconômico incluindo as variáveis de interesse, tais como o preço dos combustíveis fósseis e a demanda futura, e também fornecer cenários de futura inclusão de tecnologias ou medidas de baixo carbono para uma linha de base e pelo menos uma via de redução de emissão (FAY, et al, 2015).

Para aferir quantitativamente a contribuição de cada tecnologia na redução das emissões de GEE, foram elaboradas curvas que apresentam cunhas de mitigação (*Wedge Graph*), referentes à comparação entre o CR e o CBC, com a implantação das respectivas tecnologias. Com esta informação foi possível visualizar a contribuição de cada tecnologia para a mitigação de GEE.

RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados no período de 2014 a 2030 para a evolução da produção de cimento no estado, a evolução do consumo de energia, a evolução das emissões do CR e CBC, os custos de investimentos, as emissões evitadas por cada medida nos cenários, o custo marginal de abatimento (curva MAC) e o BECP das tecnologias.

A evolução da produção de cimento no Estado de São Paulo

A produção de cimento no Estado de São Paulo não é suficiente para suprir sua demanda. No período de 2004 a 2013 o consumo esteve em média 62% acima de sua produção, o que faz com que o estado seja um importador de cimento proveniente de outras regiões do país. Além do cimento, São Paulo importa o clínquer que passa por processo de moagem e adições nas indústrias cimenteiras localizadas no estado.

O estudo do setor do cimento considerou dados primários de fontes de informação setoriais, bem como, referências bibliográficas, sendo uma das limitações encontradas, a obtenção de dados acurados sobre a produção de clínquer no Estado de São Paulo. A deficiência de dados para criação dos cenários foi superada por meio da obtenção de informações primárias e estimativas obtidas em entrevistas com especialistas, pesquisadores e agentes do mercado. As empresas e associações contatadas para participar do estudo foram: Votorantim Cimentos, Inter-cement, SINAPROCIM, ABAI, ABRAMAT, ABESC, MC-Bauchemie, Grace, Fives Group, Saint-Gobain, ABCP, ArtSpray, França e Associados, Cyrela e Infibra.

Para a composição do cenário de evolução da produção de cimento no Estado de São Paulo, assumiu-se que não haverá aumento da capacidade instalada por rota integrada do cimento, ou seja, a rota que inclui a etapa de clínquerização, em razão da dificuldade de obtenção de licença ambiental para a construção de novas fábricas integradas. Quando a produção atingir esta capacidade, o incremento se dará por construção de usinas de moagem.

Para a projeção da produção de cimento adotou-se um crescimento de 5% a.a. (ao ano), com exceção de 2014 e 2015 onde foi utilizada uma taxa de 0,4% a.a. conforme o Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento (SNIC). Existem, no entanto, estimativas mais conservadoras e mais otimistas, que variam entre 3% e 8% a.a.. Considerou-se que ao se atingir a capacidade instalada das usinas integradas em São Paulo, o crescimento continuaria a partir da ampliação de usinas de moagem (PUNHAGUI et al., 2017; MME, 2010).

Na Tabela 1 e no Gráfico 1 é apresentada a produção de cimento correspondente a rota integrada e moagem para o CR e CBC. Observa-se que em 2014 a produção por rota integrada corresponde a 64% e a moagem a 36%, mas

Tabela 1 – Produção de cimento

Ano	Rota integrada	Moagem	Produção de cimento total (integrada + somente moagem)
	(Gg)		
2014R	6.413	3.607	10.020
2015E	6.441	3.623	10.064
2016E	6.763	3.804	10.567
2017E	7.101	3.995	11.096
2018E	7.457	4.194	11.651
2019E	7.800	4.433	12.233
2020E	7.800	5.045	12.845
2021E	7.800	5.687	13.487
2022E	7.800	6.361	14.161
2023E	7.800	7.069	14.869
2024E	7.800	7.813	15.613
2025E	7.800	8.593	16.393
2026E	7.800	9.413	17.213
2027E	7.800	10.274	18.074
2028E	7.800	11.178	18.978
2029E	7.800	12.126	19.926
2030E	7.800	13.123	20.923

Fonte: Elaboração própria (2017).

Legenda: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

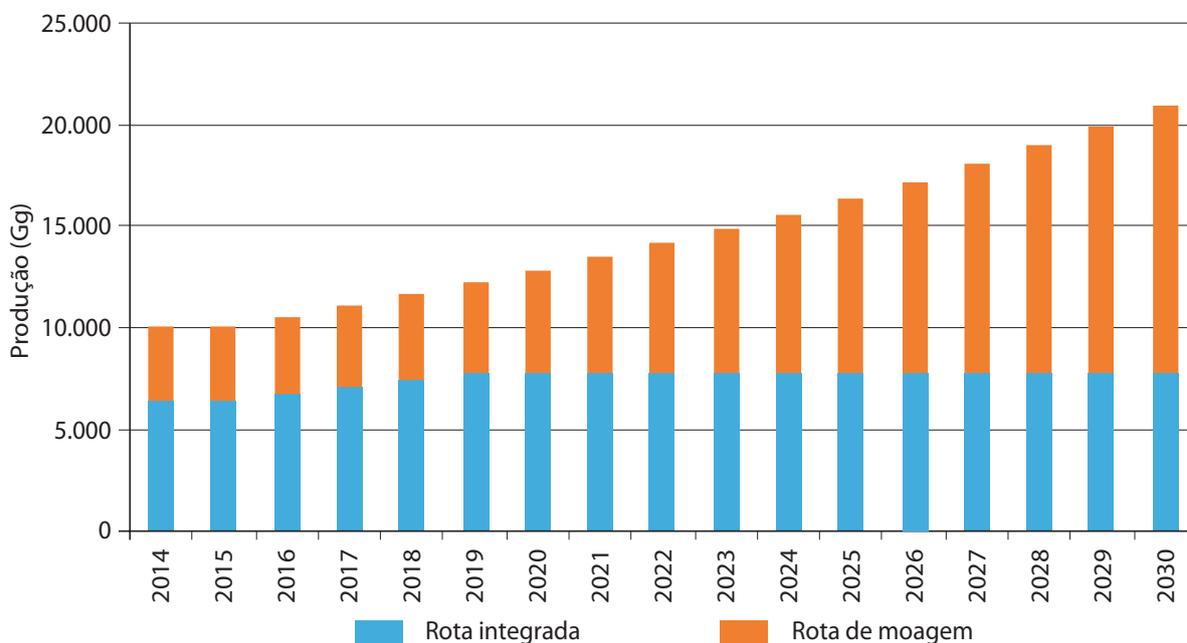
em 2030 a rota integrada corresponde a 37% e a moagem a 63%. Esta inversão se deve principalmente a proposta da ausência de novas usinas integradas no estado, incentivando que ocorra uma importação de materiais para que sejam apenas moídos nos limites territoriais.

O Gráfico 1 apresenta a produção no Estado de São Paulo de 2014 a 2030.

A evolução do consumo de energia

A energia térmica consumida por tonelada de cimento varia devido à composição do mesmo e das condições dos processos industriais. Quanto maior o teor de clínquer no cimento, maior a energia térmica necessária para produzi-lo. Já o consumo de energia elétrica para produção de cimento foi considerado fixo e igual a 107 kWh/t. Como a energia elétrica consumida na moagem

Gráfico 1 – Produção de cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030



Fonte: Elaboração própria (2017).

é baixa, em média 32 kWh/t, e fortemente influenciada pelo que é moído, dadas às incertezas, assumiu-se que a demanda de eletricidade não será afetada no futuro. No ano de 2013, a energia total, térmica e elétrica, consumida por tonelada de cimento foi de 2,74 GJ, cerca de 86% térmica e 14% elétrica.

No CBC, o consumo de energia térmica diminui devido ao aumento da participação do *filler* no cimento, com seu teor atingindo 39% em 2030, enquanto que o teor de clínquer se reduz para 46% (19,6% a menos do que em 2014). O consumo de energia elétrica, entretanto, permanece inalterado. Isto pode ser conferido na Tabela 2, que apresenta a comparação do consumo de energia estimado para o setor de cimento no CR e no CBC.

No CR, a energia térmica corresponde a 80% do total de energia em 2014. Esta relação diminui para 73% em 2030 por conta do aumento da participação das usinas de moagem, em detrimento das usinas de rota integrada ao longo do período. De acordo com as estimativas, espera-se que ocorra um aumento do con-

Tabela 2 – Consumo de energia do cimento produzido em São Paulo

Ano	Cenário de referência		Cenário de baixo carbono	
	Energia térmica	Energia elétrica	Energia térmica	Energia elétrica
	(TJ)	(GWh)	(TJ)	(GWh)
2014R	15.166	1.069	14.985	1.069
2015E	14.818	1.074	14.617	1.074
2016E	15.619	1.128	15.619	1.128
2017E	16.690	1.184	16.142	1.184
2018E	17.815	1.243	16.663	1.243
2019E	18.996	1.306	17.182	1.306
2020E	19.141	1.371	16.740	1.371
2021E	19.402	1.439	16.401	1.439
2022E	19.651	1.511	16.049	1.511
2023E	19.888	1.587	15.686	1.587
2024E	20.114	1.666	15.312	1.666
2025E	20.329	1.749	14.926	1.749
2026E	20.534	1.837	14.531	1.837
2027E	20.729	1.929	14.126	1.929
2028E	20.915	2.025	13.711	2.025
2029E	21.091	2.126	13.288	2.126
2030E	21.260	2.233	12.856	2.233

Fonte: Elaboração própria (2017).
Legenda: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

sumo energético total de 54% de 2030 em relação a 2014.

Já no CBC, a diminuição do consumo de energia térmica é de 14% em 2030 em comparação a 2014. Comparado ao CR, seria possível economizar um total de 63.323 TJ ao longo do período 2014-2030 com a implantação das estratégias de baixo carbono.

A evolução das emissões do cenário de referência

A produção do clínquer é responsável pela maior parte da energia consumida e da emissão de processo (HUNTZINGER; EATMON, 2009). Para construir o cenário de emissão, fo-

ram consideradas as emissões da rota integrada (descarbonatação, queima de combustível fóssil e consumo de eletricidade) juntamente com as emissões da rota de moagem que ocorrem dentro dos limites físicos do estado, ou seja, as emissões pelo consumo de eletricidade.

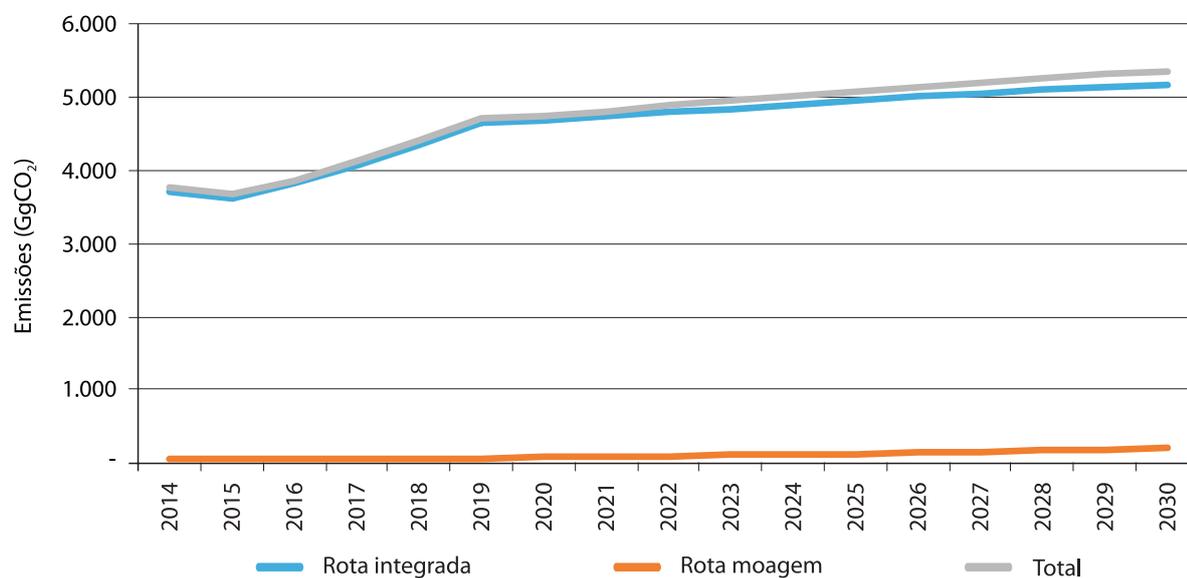
O Gráfico 2 apresenta as emissões de CO₂ projetadas no CR para a produção de cimento, discriminando cada rota.

A Tabela 3 apresenta as emissões de GEE de 2014 a 2030 considerando a emissão da produção no Estado de São Paulo.

Em relação ao CBC, foram levantadas três possibilidades de mitigação:

- a) Redução do teor de clínquer no cimento pelo aumento do teor de *filler*;

Gráfico 2 – Emissões da produção de cimento em São Paulo no cenário de referência



Fonte: Elaboração própria (2017).

Tabela 3 – Emissões da produção de cimento do Estado de São Paulo no cenário de referência

Ano	Rota integrada			Rota de moagem	Total
	Descarbonatação	Combustível	Eletricidade	Eletricidade	
	(GgCO ₂)				
2014R	2.347	1.266	93	52	3.758
2015E	2.293	1.237	93	52	3.676
2016E	2.455	1.304	98	55	3.874
2017E	2.583	1.393	103	57	4.137
2018E	2.757	1.487	108	60	4.413
2019E	2.940	1.586	114	63	4.702
2020E	2.962	1.598	113	73	4.746
2021E	3.003	1.620	113	82	4.817
2022E	3.041	1.641	113	92	4.886
2023E	3.078	1.660	113	102	4.953
2024E	3.113	1.679	113	113	5.018
2025E	3.146	1.697	113	124	5.080
2026E	3.178	1.714	113	136	5.141
2027E	3.208	1.731	113	149	5.200
2028E	3.237	1.746	113	162	5.257
2029E	3.264	1.761	113	175	5.313
2030E	3.290	1.775	113	190	5.367

Fonte: Elaboração própria (2017)

Nota: O FE do cimento foi calculado ano a ano, uma vez que este varia devido o teor de clínquer no cimento. O FE do clínquer é considerado constante a 848 kgCO₂/t. Mais informações ao longo do relatório principal.

Legenda: R - Dado Real, E - Dado Estimado.

- b) Substituição de combustível fóssil (coque de petróleo) por combustível derivado de resíduos (CDR);
- c) Substituição de combustível fóssil (coque de petróleo) por pellets de madeira.

A Tabela 4 apresenta o cenário de penetração destas três medidas. É possível observar a introdução gradual de cada uma até atingirem o máximo estipulado em 2030. Para *filler*, considerou-se que este limite será 39% do percentual do cimento. Para a substituição de combustíveis fósseis por biomassa, considerou-se que o máximo potencial de substituição é de 60% da energia térmica. Uma vez que CDR e *pellets* partilham da mesma energia, para evitar duplas contagens, estipulou-se 30% de penetração para cada uma destas opções.

A partir da produção de cimento (Gráfico 1), da penetração das tecnologias (Tabela 4) e dos fatores de emissão específicos, pode-

Tabela 4 – Penetração das medidas de baixo carbono 2014–2030

Ano	Filler (1)	CDR (2)	Pellets (2)
2014R	2%	0%	0%
2015E	5%	0%	0%
2016E	7%	2%	2%
2017E	9%	4%	4%
2018E	12%	6%	6%
2019E	14%	8%	8%
2020E	16%	10%	10%
2021E	19%	12%	12%
2022E	21%	14%	14%
2023E	24%	16%	16%
2024E	26%	18%	18%
2025E	28%	20%	20%
2026E	31%	22%	22%
2027E	33%	24%	24%
2028E	35%	26%	26%
2029E	38%	28%	28%
2030E	40%	30%	30%

Fonte: Elaboração própria (2017).

(1) Sobre a produção total de cimento, que afeta as emissões de descarbonatação e de energia térmica.

(2) Apenas sobre as emissões de energia térmica.

Legenda: R - Dado Real, E - Dado Estimado.

se projetar as emissões no CBC, apresentado na Tabela 5.

A partir da Tabela 3 e da Tabela 5, pode-se observar que no CBC as emissões de processo (pelo aumento do *filler*) e de energia térmica (pelo aumento do *filler* mais o uso de combustíveis renováveis) no período de análise apresentaram uma redução de emissões de 19,7% e 50,0% em relação às emissões totais do CR2030. Considerando as emissões totais, processo, energia térmica e elétrica, ocorreria uma redução de 28,9% das emissões no CBC em relação ao CR.

Custo de investimento e de operação

Foi assumido que não haverá aumento da capacidade instalada por rota integrada do cimento, como já explicitado anteriormente. O incremento se dará por construção de usinas de moagem.

Os custos de investimento (CAPEX) e os custos de operação e manutenção (OPEX) estão resumidos na Tabela 6. Estes custos foram essenciais para a análise econômica da estratégia *filler* e determinação do MAC e BECP. Por outro lado, para a substituição de combustível fóssil, considerou-se que não há necessidade de adaptação da estrutura industrial para utilização de CDR ou pellets, igualmente não há variação nos custos de operação, portanto, tanto CAPEX quanto OPEX foram considerados zero em ambos CR e CBC. O MAC e BECP das estratégias de CDR e pellets ficaram em função unicamente da diferença dos preços adotados para cada um destes combustíveis em relação aos preços do coque de petróleo.

A partir da Tabela 6 é possível perceber que, apesar de haver um CAPEX adicional no CBC por conta da implantação de silos para

Tabela 5 – Emissões no Cenário de Baixo Carbono

Ano	Rota integrada			Rota de moagem	Total
	Descarbonatação	Combustível	Eletricidade	Eletricidade	
	(GgCO ₂)				
2014R	2.319	1.251	93	52	3.715
2015E	2.262	1.220	93	52	3.627
2016E	2.417	1.139	98	55	3.709
2017E	2.498	1.062	103	57	3.720
2018E	2.579	991	108	60	3.738
2019E	2.659	925	114	63	3.761
2020E	2.590	863	113	73	3.639
2021E	2.538	805	113	82	3.538
2022E	2.484	751	113	92	3.440
2023E	2.427	701	113	102	3.343
2024E	2.369	654	113	113	3.249
2025E	2.310	610	113	124	3.157
2026E	2.249	569	113	136	3.067
2027E	2.186	531	113	149	2.979
2028E	2.122	495	113	162	2.892
2029E	2.056	462	113	175	2.806
2030E	1.989	429	113	190	2.721

Fonte: Elaboração própria (2017).

Legenda: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

armazenamento do *filler*, o OPEX torna-se menor quando se aumenta o teor de *filler* no cimento, já que seu custo por tonelada é 61% menor que o custo do clínquer.

Tabela 6 – CAPEX e OPEX

Tipo de custo	Equipamento	Unidade	Custo
CAPEX	Fábrica de moagem (1)	(US\$)	87.500.000,00
	Silo de armazenamento (2)	(US\$)	51.852,00
OPEX	Clínquer + gipsita	(US\$/t)	56,34
	<i>Filler</i>	(US\$/t)	21,72
	Escória granulada	(US\$/t)	17,50
	Água (3)	(US\$/m ³)	6,45

Fonte: Elaboração própria (2017).

(1) Capacidade instalada aproximada: 900 Gg/ano.

(2) Capacidade de 100 toneladas.

(3) Tabela tarifária – acima de 50 m³/mês.

Emissões evitadas em cada medida de baixo carbono

A partir da aplicação das tecnologias de baixo carbono, é possível alcançar uma redução no período de 23.199 GgCO₂, 29% em relação às emissões do CR da indústria do cimento até o ano de 2030. Considerando os resultados apresentados na Tabela 7, esta redução tem participação predominante da medida de *filler* (65% do total das emissões evitadas), enquanto as medidas referentes aos combustíveis têm igual representação ao longo do período (17,4% cada uma).

A redução das emissões de CO₂ é diretamente proporcional ao percentual de *filler* adicionado, pois este atua substituindo

Tabela 7 – Emissões evitadas por medida ou tecnologia no Estado de São Paulo de 2014 a 2030

Ano	Aumento do teor de <i>filler</i> no cimento	Substituição de combustível fóssil por CDR	Substituição de combustível fóssil por pellets de madeira	Total das emissões do CBC	Total das emissões do CR
2014R	43	0	0	3.715	3.758
2015E	48	0	0	3.628	3.676
2016E	58	35	35	3.746	3.874
2017E	131	143	143	3.721	4.137
2018E	274	200	200	3.738	4.413
2019E	432	255	255	3.761	4.702
2020E	572	267	267	3.639	4.746
2021E	715	282	282	3.538	4.817
2022E	858	294	294	3.439	4.886
2023E	1.001	304	304	3.343	4.953
2024E	1.144	312	312	3.249	5.018
2025E	1.287	318	318	3.157	5.080
2026E	1.430	322	322	3.067	5.141
2027E	1.573	324	324	2.978	5.200
2028E	1.716	325	325	2.892	5.257
2029E	1.859	324	324	2.807	5.313
2030E	2.002	322	322	2.721	5.367

Fonte: Elaboração própria (2017).

Legenda: R - Dado Real, E - Dado Estimado.

o ligante (clínquer) que é o principal emissor da mescla que compõe o cimento, por emissões de processo e energia térmica. Parte da energia remanescente (60%), após a introdução do *filler*, é substituída por CDR e pellets. No Gráfico 3, observa-se a evolução da participação de cada medida avaliada no estudo na mitigação das emissões.

Custo marginal de abatimento (curva MAC) e preço de equilíbrio do carbono das medidas de baixo carbono

De acordo com os resultados da curva MAC na Tabela 8, conclui-se que a medida de filler traz um retorno econômico de US\$ 2 a cada tonelada de CO₂ evitada. As medidas de pellets e CDR, entretanto, apresentam MAC positivo, respectivamente US\$ 10 e US\$ 11. Se a in-

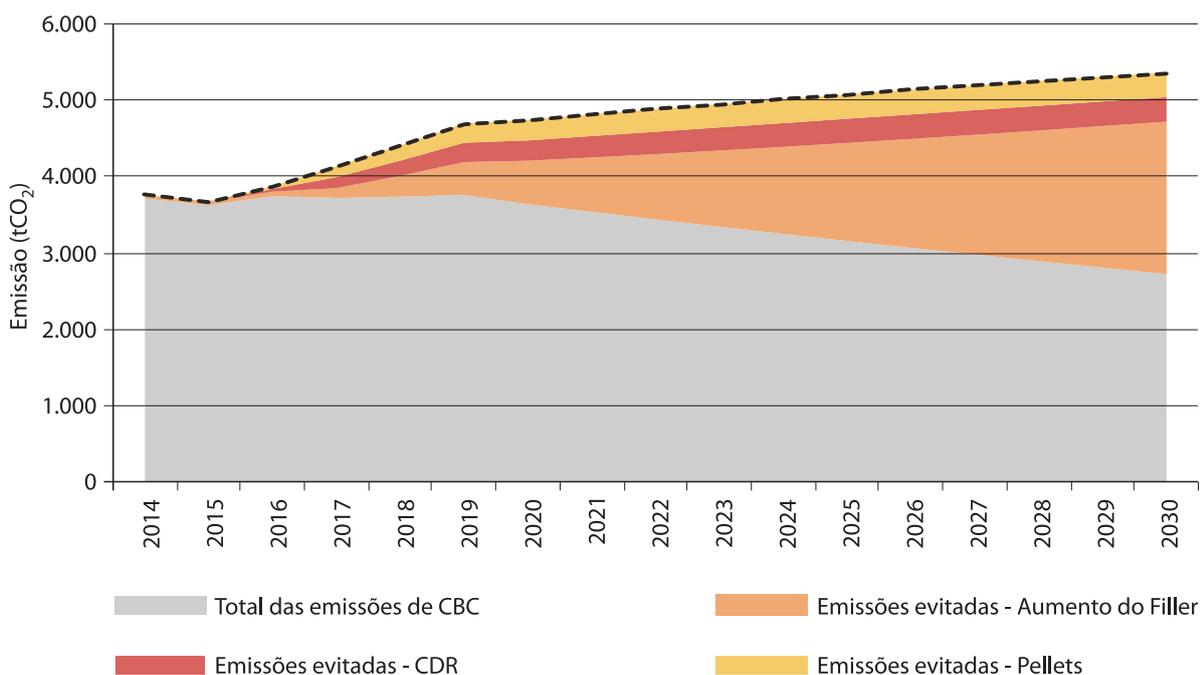
Tabela 8 – Dados para a elaboração da curva MAC, baseados nos resultados dos cenários estratégicos propostos

Tipo de emissão	Medida	MAC	BECP	Emissões evitadas 2014–2030 (MtCO ₂)
		(US\$/tCO ₂)	(US\$/tCO ₂)	
Processo e combustível	Filler	-2	-5	15,14
	Pellets	10	23	4,03
Combustível	CDR	11	24	4,03

Fonte: Elaboração própria (2017).

dústria de cimento optasse por adotar somente a medida de *filler*, geraria uma economia total de US\$ 28 milhões, evitando 15,14 MtCO₂ até 2030. Logo, se a indústria desejar atingir o potencial máximo de redução avaliado (23,2 MtCO₂), terá que investir US\$ 54,3 milhões ao longo do período.

Gráfico 3 – Wedge Graph para a indústria de cimento em São Paulo 2014–2030



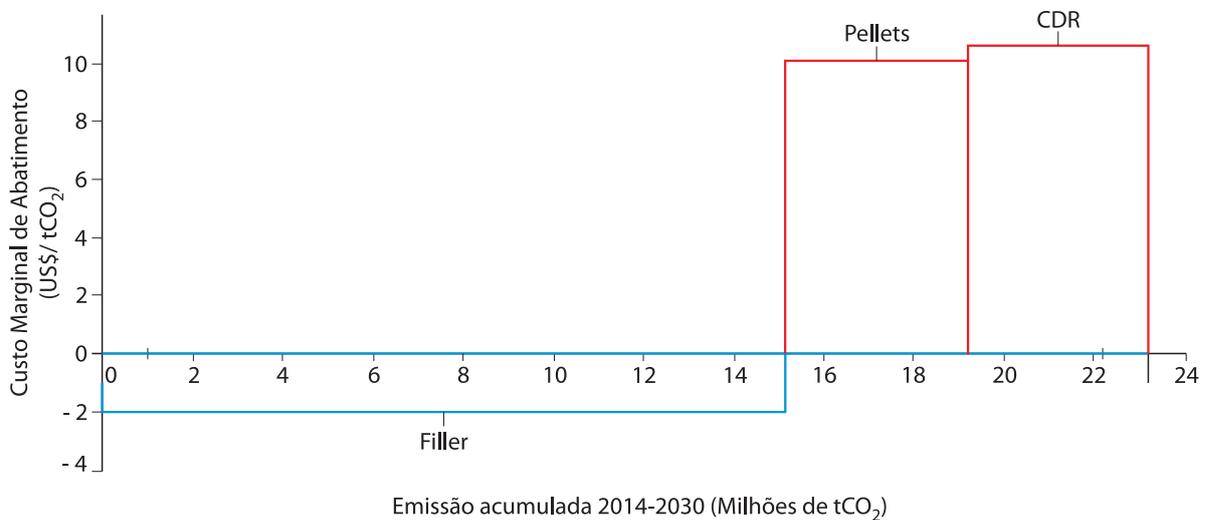
Fonte: Elaboração própria (2017).

O resultado do BECP foi análogo ao MAC, com o *filler* trazendo um retorno interno maior do que o *Benchmark-TIR* estipulado pela indústria (13%), o que a torna uma medida atrativa para investimentos. Já as medidas de *pellets* e CDR não atingem o retorno esperado, portan-

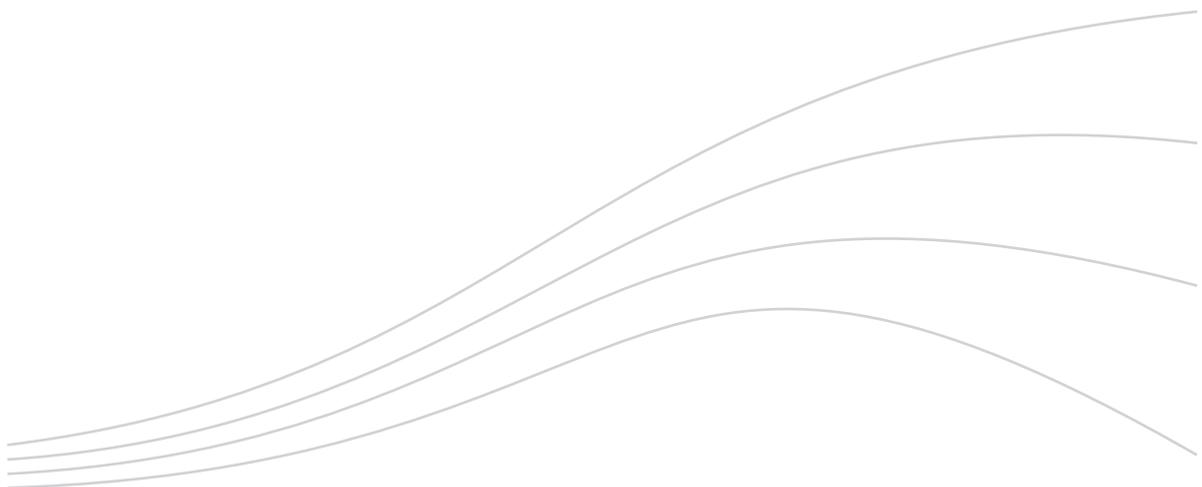
to, seria necessário vender a tonelada de carbono, respectivamente por US\$ 23 e US\$ 24, para que as mesmas se tornassem atraentes.

O Gráfico 4 apresenta a curva MAC com as três medidas avaliadas para a indústria de cimento no estado.

Gráfico 4 – Curva de custo marginal de abatimento para a indústria de cimento no Estado de São Paulo 2014–2030



Fonte: Elaboração própria (2017).



CONCLUSÕES

As mudanças no teor de clínquer são afetadas pelo fornecimento de escória, que deve apresentar dificuldades nos próximos anos. A única fonte paulista de escória de alto forno, Usiminas, anunciou em outubro de 2015 o fechamento da usina de Cubatão. Assim, as cinzas volantes ou escória não são consideradas uma solução para o Estado de São Paulo, já que não existe fornecedor local. Embora haja opções de adição para a diminuição de ligantes, considera-se que o filler é a melhor opção para o momento e o local.

No CR, as emissões de CO₂ do setor de cimento para o Estado de São Paulo sofrerão um aumento de 1609 GgCO₂, cerca de 43% em 2030 em relação a 2014. Estima-se que as emissões sejam crescentes por conta do aumento da produção de cimento de 5% a.a., que a partir de 2019 ocorre pelo incremento de fábricas de moagem, já que não haverá aumento de capacidade instalada por rota integrada no estado. Também existe o aumento do teor do clínquer no cimento, que atinge 77% em 2030, e por conta disto o fator de emissão por tonelada de cimento irá aumentar. O aumento do teor de clínquer ocorrerá por não haver fornecedor local de cinzas volantes e escória, e se identificou dificuldades (futuras) deste fornecimento.

Na produção de cimento, 60% a 65% das emissões são relacionadas à descarbonatação do clínquer, sobre a qual não é possível propor mitigação, uma vez que é um processo químico. A mitigação desta fração de emissão pode ser feita pela substituição parcial desta matéria-prima por alternativas que não necessitem ser descarbonatadas, como o filler analisado no presente estudo. A outra parte expressiva da emissão (35%–40%) está relacionada à queima de combustíveis fósseis. A eficiência energética não foi considerada como uma possível medida para o CBC, pois para o setor, estratégias desta natureza surtem pouco efeito. As possibilidades

na área de energia neste setor se encontram no aumento da participação de biomassa, como o CDR e os pellets analisados no estudo, dentro do *mix* de combustíveis utilizados na produção de cimento.

Os resultados obtidos no *Wedge Graph* gerado na MACTool, a partir da comparação do CR e do CBC, permitem concluir que é possível alcançar uma redução de 23.199 GgCO₂, que considerando o total mitigado no período de 2014 a 2030 representa uma redução de 28,9% sobre as emissões do CR. Esta redução tem participação predominante da estratégia do *filler*, 65,3% do total das emissões evitadas, que inclusive é a única medida que apresentou MAC e BECP negativos. Este resultado mostra que é atrativo para a indústria de cimento investir no aumento do *filler*, podendo gerar uma economia de US\$ 28 milhões até o ano de 2030.

Por outro lado, pellets e CDR apresentaram MAC e BECP positivos. O preço dos combustíveis foi o único determinante deste resultado, já que se pressupôs que não há mudanças no CAPEX ou no OPEX para implantação destas medidas. Por conta disto, o futuro cenário dos preços dos combustíveis poderá acarretar em MAC e BECP maiores ou menores do que foi apresentado para estas medidas.

O uso de CDR em substituição ao combustível fóssil convencional (neste caso carvão) em fornos de cimento além de permitir reduzir as emissões de GEE, também, diminui a demanda por aterros e, dessa a probabilidade de contaminação do ambiente.

A implementação de tais estratégias depende de política fiscal e de um plano de desenvolvimento setorial. O custo destas ações deve ser baixo, uma vez que se trata de práticas existentes.

Finalmente, destacam-se as limitações e dificuldades encontradas ao longo do período de execução deste documento, um dos seus principais objetivos foi identificar possíveis direções para um futuro de baixo carbono, tendo

um recorte específico e exploratório, a indústria de cimento no Estado de São Paulo. Uma vez que tomadores de decisão optem por determinados caminhos, novos estudos deverão surgir para ampliar o escopo e aprofundar o caráter técnico, político, regulatório, social e ambiental destas tecnologias de baixo carbono. Cabe res-

saltar que o enfoque deste estudo foi a análise de tecnologias para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa, com enfoque no dióxido de carbono, e, portanto, a emissão de outros poluentes deve ser analisada de acordo com a legislação vigente, sendo necessária por vezes a regulamentação de procedimentos específicos.

REFERÊNCIAS

- CERQUEIRA, C. **The steel industry and its by-products for cement industries**. In: CBI BRAZIL & LATAM 2014 – BRAZILIAN AND LATIN AMERICAN CEMENT & LIME CONFERENCE. São Paulo, 6/02 2014.
- CETESB. **Emissões no setor de processos industriais e uso de produtos 1990 a 2008: Relatório de Referência**. São Paulo, 2013. (1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo). Disponível em: <http://inventariogeosp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/04/primeiro_inventario_setor_industria_web1.pdf>. Acesso em: set. 2015.
- ESMAP. World bank group. **Modeling Tools and E-Learning: MACTool**. Disponível em: <<http://www.esmap.org/MACTool>>. 2016. Acesso em: 24 abr 2016.
- FAY, M.; HALLEGATTE, S.; VOGT-SCHILB, A.; ROZENBERG, J.; NARLOCH, U.; KERR, T. **Decarbonizing Development. Three Steps to a Zero-Carbon Future**. Climate Change and Development. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-0479-3. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO. Washington, 2015. 182p.
- GOUVELLO, C. de et al. **Estudo de baixo carbono para o Brasil**. Washington, DC: Banco Mundial, 2010. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/Relatorio_BM_Principal_Portugues_SumarioExecutivo.pdf>. Acesso em: out.2015.
- IPCC. **Emission Scenarios**. Summary for Policymakers. A Special Report of IPCC Working Group III. 2000a. 27p.
- IPCC. **Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories**. Hayama, JP, 2000b. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>>. Acesso em mai de 2016.
- MENDONÇA, M.B. ANPAD. **Técnicas de Prospecção e Análise de Cenários Futuros nos Governos e Administração Pública do Brasil: Revisão da Produção Científica Brasileira de 2001 a 2010**. In: **V Encontro de Estudos em Estratégia**. Porto Alegre, 2011.
- MME. **Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030)**. Brasília: MME, 2010.
- PACCA, S. A. et al. **Estudo de baixo carbono para a indústria de São Paulo: relatório síntese**. 1ª ed. 2017. São Paulo CETESB, 2017. 188 p.
- PUNHAGUI, K. R. S.; OLIVEIRA, L. S.; SOUZA, J. F. T. de; JOHN, V. M. **Estudo de baixo carbono para a indústria de cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**. São Paulo, 2017.
- SNIC. **Press Kit 2013**. SNIC,, 2013. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2013_PB.pdf>. Acesso em: 28 set. 2015
- SNIC. **Relatório anual 2013**. [s.l.] SNIC, 2014. Disponível em: <http://www.snic.org.br/relatorio_anual_dinamico.asp>. Acesso em: 1 jun. 2015
- WBCSD. **CO₂ and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry – The Cement CO₂ and Energy Protocol – Version 3.0**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www.cement-co2-protocol.org/v3/Content/Resources/Downloads/WBCSD_CO2_Protocol_En.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2015.

Agenda 2030:



Apoio técnico:



Realização:

