

CETESB

L4.001

MEDIÇÃO DE VAZÃO DE ÁGUA POR MEIO DE MOLINETES E FLUTUADORES

- Procedimento -

SUMÁRIO

	Páginas
1 Objetivo.....	1
2 Definições.....	1
3 Condições Gerais.....	4
4 Condições Específicas.....	8
5 Cálculo da Vazão.....	14
Anexo A.....	23
Anexo B.....	27
Anexo C.....	31
Anexo D.....	33
Anexo E.....	35
Anexo F.....	41

1 OBJETIVO

1.1 Esta Norma fixa as condições exigíveis para a execução do cálculo da vazão de cursos d'água a partir da determinação da área da seção transversal e da velocidade de escoamento.

1.2 Esta Norma aplica-se aos escoamentos à superfície livre, onde a velocidade média possa ser determinada a partir de observações com molinetes ou flutuadores.

2 DEFINIÇÕES

2.1 Escoamento

Movimento de um volume líquido.

2.2 Escoamento à superfície livre

Escoamento que se processa sobre uma superfície de contorno longitudinal, constituída de leito e margens, e que apresenta uma superfície em contato com a atmosfera.

2.3 Canal

A parte profunda de um rio ou outro curso d'água.

Nota: O termo canal, seguido de uma expressão adjetiva, clara ou implícita, apresenta um significado específico, como um canal artificial, canal de derivação, canal principal, canal das vazões mínimas, etc.

2.4 Vazão

Volume do líquido que escoar através de uma seção na unidade de tempo.

2.5 Nível d'água

Elevação da superfície livre de um curso d'água em relação a um datum.

2.6 Datum

Plano horizontal em relação ao qual as cotas são referidas.

2.7 Definições geométricas

Ver Figura 1.

2.7.1 Vertical

Linha vertical onde são feitas as medições de velocidade e profundidade.

2.7.2 Segmento

Área limitada por duas verticais sucessivas na seção reta, o leito do curso d'água e a superfície livre da água.

2.7.3 Painel

Parte da superfície livre do curso d'água, definida pelo traço de segmentos correspondentes em seção retas adjacentes.

2.8 Peixe

Peso de forma aerodinâmica usado como lastro para cabos de sondagem ou molinetes, quando se observa profundidades ou velocidades em cursos d'água.

2.9 Flutuador

Corpo sustentado pela água onde está parcialmente imerso (Ver Figura 2).

2.9.1 Flutuador superficial

Flutuador sujeito a maior arrastamento nas proximidades da superfície livre, usado para medição de velocidades superficiais.

2.9.2 Flutuador profundo

Flutuador sujeito a maior arrastamento abaixo da superfície livre, utilizado para medição de velocidades sub-superficiais.

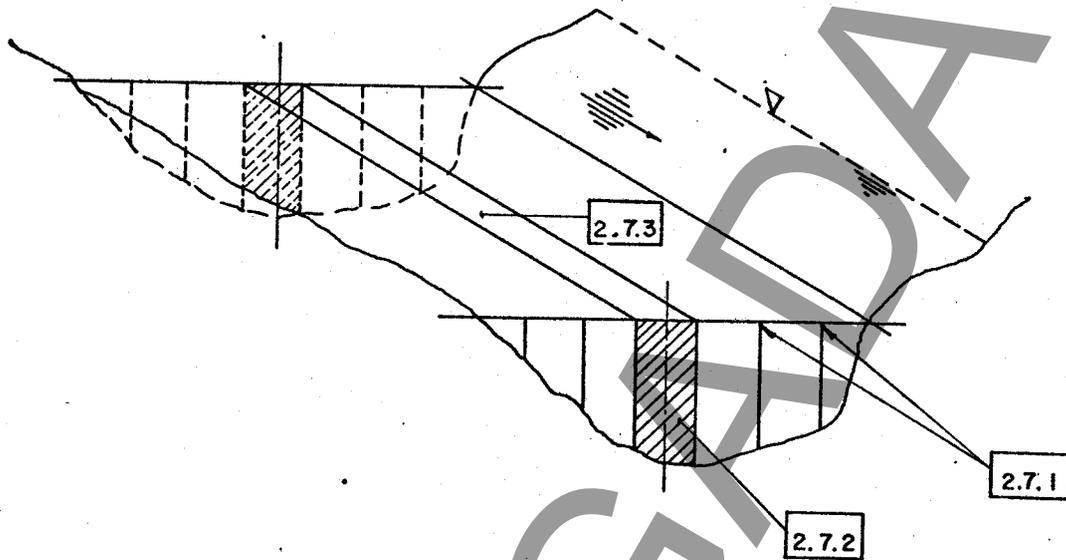


Figura 1 - Definições Geométricas

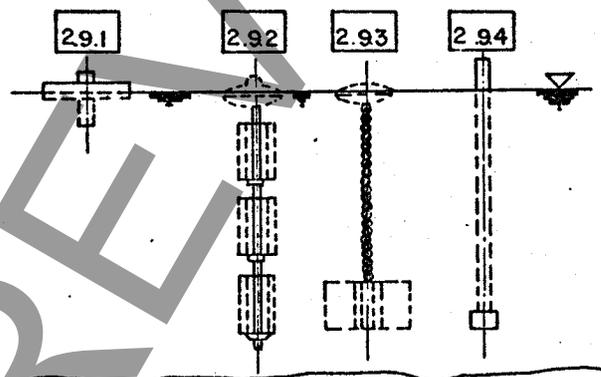


Figura 2 - Tipos de Flutuadores

2.9.3 Flutuador duplo

Corpo com flutuabilidade ligeiramente negativa, que se move no curso d'água a uma profundidade conhecida, e tem sua posição indicada por um pequeno flutuador superficial, no qual está suspenso.

2.9.4 Bastão lastrado

Bastão flutuador lastrado em sua base, de forma que se desloque na corrente em posição quase vertical.

3 CONDIÇÕES GERAIS

3.1 Fundamento dos métodos de medição

3.1.1 O fundamento dos métodos consiste na medição efetiva da velocidade e área da seção transversal do escoamento. O local de medição é escolhido de acordo com critérios específicos. Mede-se a largura por meio de trena de aço ou algum outro método topográfico, dependendo de sua magnitude. Mede-se a profundidade em um certo número de verticais ao longo da largura, suficientes para se determinarem a forma e a área da seção transversal.

3.1.2 Fazem-se as medições de velocidade ao mesmo tempo que as medições de profundidade, particularmente, nos casos de leitos instáveis. Os instrumentos utilizados para medição de velocidades são: os molinetes hidrométricos e flutuadores. De uma maneira geral, calcula-se a velocidade média em uma vertical, a partir de medições realizadas em alguns de seus pontos. Entretanto, no método da integração, a velocidade média é obtida diretamente.

3.1.3 Calcula-se a vazão somando-se os produtos das velocidades pelas respectivas áreas, para uma série de observações em uma seção transversal do curso d'água. Este cálculo é efetuado por processos aritméticos ou gráficos.

3.2 Escolha e demarcação de um trecho adequado para as medições

3.2.1 Reconhecimento preliminar do trecho

É desejável que sejam feitas medições aproximadas de larguras, profundidades e velocidades, para se decidir sobre a adequação de um trecho, o qual deverá ser escolhido de acordo com as especificações de 3.2.2. Com essas medições, pretende-se avaliar se os perfis longitudinal e transversal do leito, e a distribuição de velocidades são aceitáveis para as finalidades de medição de vazão.

3.2.2 Seleção do trecho

Aumenta-se a precisão na determinação da vazão, se:

- a) as condições de escoamento não mudam durante o período de medição;
- b) as velocidades em todos os pontos são paralelas entre si, e formam ângulos retos com a seção de medição;

- c) as curvas de distribuição de velocidades são regulares, nos planos ver ticais e horizontais em que são medidas;
- d) as dimensões geométricas da seção de medição são bem definidas; por tanto, as condições mais favoráveis para medições precisas, devem ser encontradas quando a seção reta de medição se localiza em um trecho retilíneo do curso d'água.

Com base nesses critérios, o trecho de medição deverá ser selecionado de maneira a satisfazer, tanto quanto possível, as recomendações apresentadas em 3.2.2.1 e 3.2.2.2.

3.2.2.1 O trecho escolhido deverá satisfazer, tanto quanto possível, aos requisitos seguintes:

- a) no local de medição, o curso d'água deverá ser retilíneo, e apresentar seção transversal e declividade uniformes, para se evitar uma distribuição de velocidades irregular. Quando o comprimento do trecho reto é restrito, recomenda-se que a seção de medição seja localizada de maneira ao comprimento reto a montante da seção ser duas vezes o de jusante, ou seja, a seção de medição deverá estar a $1/3$ do trecho, a partir de jusante;
- b) a profundidade da água no trecho escolhido deverá ser suficiente para propiciar a imersão efetiva do molinete ou do flutuador, qualquer que seja o utilizado;
- c) a vista do local de medição deverá ser clara e desobstruída de árvores ou outros obstáculos.

3.2.2.2 Complementando as recomendações especificadas em 3.2.2.1, para se escolher um local de medição, deverão ser levados em conta os aspectos seguintes:

- a) o leito do curso d'água, no trecho considerado, não deverá estar sujeito a mudanças durante as medições;
- b) independentemente do escoamento, todas as vazões deverão estar contidas em uma calha geométrica bem definida e de contorno substancialmente estável;
- c) o local deverá estar distante de qualquer curva ou obstrução natural ou artificial, que possa causar perturbação no escoamento;
- d) o local de medição deverá ser mantido livre de vegetação aquática, durante o período de medição;
- e) deverão ser evitados locais onde haja tendência a se desenvolverem vórtices, escoamento em sentido contrário ou zonas de água parada;
- f) deverão ser evitadas seções onde o escoamento é convergente ou divergente, devido aos erros sistemáticos que se cometem nas medições de velocidade em uma seção oblíqua ao escoamento;
- g) a orientação do trecho deverá ser tal, que a direção do escoamento seja normal à do vento predominante.

3.2.2.3 Quando os requisitos de 3.2.2.2 não podem ser satisfeitos (por exemplo, quando em rios aluvionares o leito está se modificando durante o período de medição, ou quando em condições de cheia, o rio não está confinado em seu caixão), o local de medição deverá ser escolhido de maneira que as modificações do leito e/ou extravazamento, sejam um mínimo. Se o extravazamento não pode ser evitado, a área inundável deverá ter largura mínima, ser tão lisa quanto possível, não apresentar canal distinto e estar livre de mato e árvores.

3.2.2.4 Nos casos onde é necessário executar medições nas vizinhanças de uma ponte, é preferível que a seção de medição seja localizada a montante da ponte. Todavia, em casos especiais onde é provável a acumulação de toros ou entulhos, é preferível que a seção de medição seja localizada a jusante da ponte.

NOTA: Se após selecionado o local, venham a ocorrer modificações inaceitáveis nas condições de escoamento, deverá ser escolhido outro local para as medições.

3.2.3 Demarcação do local

3.2.3.1 O local selecionado deverá dispor de meios para demarcação da seção reta e determinação do nível d'água.

3.2.3.2 A posição de cada seção de medição, normal à direção média do escoamento, deverá ser definida nas duas margens por meio de marcos visíveis e facilmente identificáveis.

3.2.3.3 O nível d'água será lido em régua limnimétrica, em intervalos, durante o período de medição. O zero da régua deverá ser definido em relação a um datum, por meio de nivelamento geométrico.

3.2.3.4 Quando existe a possibilidade dos níveis da superfície líquida serem diferentes nas duas margens, deverá ser instalada uma régua auxiliar na margem oposta. Isto é particularmente importante no caso de rios muito largos.

3.2.3.5 A média das leituras feitas nas régua referidas em 3.2.3.3 e 3.2.3.4 deverá ser tomada como nível superficial médio, que servirá de base para definição do perfil da seção transversal do escoamento.

3.3 Medição da área da seção reta

3.3.1 Perfil

3.3.1.1 O perfil da seção do curso de água deverá ser determinado por medições na seção, da profundidade relativa à superfície livre, de um número de pontos suficientes para se estabelecer a forma do leito.

3.3.1.2 A localização desses pontos deverá ser feita, medindo-se suas distâncias horizontais a um ponto de referência fixo na seção. Na prática, estas medições determinam a área da seção dos segmentos definidos pelas verticais sucessivas onde são medidas as velocidades.

3.3.2 Medições de larguras

3.3.2.1 A largura do curso d'água e as dos segmentos definidos pelas verticais, podem ser obtidas medindo-se as distâncias a um ponto de referência localizado no mesmo plano da seção de medição.

3.3.2.2 Quando a largura do curso d'água permitir, as distâncias referidas em 3.3.2.1 deverão ser medidas diretamente. Por exemplo, com auxílio de trena ou cabo de aço convenientemente marcado.

3.3.2.3 Quando se atravessa um cabo de aço marcado na seção, ele deve ser esticado sob as mesmas condições de tração em que foi calibrado, para evitar erros no posicionamento das verticais de medição.

3.3.2.4 Quando o curso d'água for muito largo para aplicar o método de medição direta, as distâncias deverão ser determinadas por processos ópticos ou medidores eletrônicos de distância, ou por um dos métodos apresentados no Anexo A.

3.3.3 Medições de profundidades

3.3.3.1 As medições de profundidade deverão ser feitas em verticais suficientemente próximas, para se definir, com precisão, o perfil da seção transversal de medição. Em geral, os intervalos entre as verticais não deverão ser maiores que 1/15 da largura superficial, nos casos de leitos com perfis regulares; e nem maiores de 1/20 de largura, nos casos de leito com perfis irregulares.

3.3.3.2 As profundidades deverão ser medidas empregando-se uma haste ou um cabo de sondagem, ou outros instrumentos adequados. Onde o curso d'água é suficientemente profundo, pode ser usado um ecobatímetro. Se a velocidade é alta, é preferível usar um ecobatímetro, ou outro dispositivo que não requeira grandes correções.

3.3.3.3 Quando se utilizar uma haste ou um cabo de sondagem, deverão ser tomadas pelo menos duas leituras em cada ponto, e seu valor médio será adotado para os cálculos, a menos que a diferença entre os dois valores seja maior que 5%, serão aceitas como resultado da medição, desprezando-se as duas leituras anteriores. Se elas forem novamente diferentes em mais de 5%, não serão tomadas as novas leituras e será adotado, como profundidade, a média das 4 leituras efetuadas.

3.3.3.4 Quando se utilizar um ecobatímetro, será tomada a média de várias leituras em cada ponto. Este instrumento deverá ser calibrado periodicamente para as mesmas condições de temperatura e salinidade da água.

NOTA 1: Se o leito é formado por material instável (areia movediça, lama), não se recomenda a repetição da medição de profundidade em um ponto, por meio da haste ou cabo de sondagem, face às deformações que podem ser causadas ao leito.

NOTA 2: Quando, durante as medições de vazão, o perfil do leito mudar apreciaavelmente, as medições de profundidade deverão ser feitas tomando-se uma leitura no início e outra no final das medições de velocidade em cada vertical, e o valor médio dessas duas medições deverá ser tomado como a profundidade efetiva.

NOTA 3: Imprecisões nas sondagens são mais prováveis de ocorrer:

- a) devido ao afastamento da haste ou do cabo de sondagem da vertical, especialmente em águas profundas, quando a velocidade é alta;
- b) devido à penetração no leito, da haste ou do lastro do cabo de sondagem;
- c) devido à natureza do leito, quando se utiliza ecobatímetro.

As imprecisões decorrentes de a) podem ser evitadas com o uso de um ecobatímetro, quando praticável. Pode-se reduzir o efeito de arrastamento do cabo de sondagem, usando um peixe como lastro de um cabo de sondagem fino. Deverá ser aplicada uma correção ao comprimento submerso do cabo, caso este não esteja normal à superfície da água. Recomenda-se que o ângulo de afastamento da ver

tical não exceda 30° , em face das imprecisões envolvidas. O método para se fazer esta correção é apresentado no Anexo C. As imprecisões decorrentes de b) podem ser evitadas colocando-se uma chapa plana como base da haste de sondagem; ou colocando-se um lastro adicional em forma de disco, na extremidade do cabo de sondagem.

NOTA 4: Em certos casos, por exemplo durante cheias, poderá ser impossível de terminar um perfil adequado da seção, durante a medição. Nestes casos, o perfil será determinado por levantamento antes ou após a medição. Este método, todavia, está sujeito a erros devidos à possibilidade de substituição do leito, entre o instante em que se determina o perfil da seção e aquele em que é feita a medição.

NOTA 5: Quando as medições de profundidade são feitas separadamente das medições de velocidade e o nível d'água não é constante, este deverá ser observado no instante de cada medição da profundidade. Se isto não for possível, o nível d'água deverá ser observado em intervalos de 15 minutos, e o valor do nível, no instante de cada determinação de profundidade, será obtido por interpolação.

4 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS

4.1 Medição de velocidade usando molinete

4.1.1 Calibração do molinete

4.1.1.1 O molinete deverá ser tarado para cobrir a faixa de velocidade do escoamento, tendo-se cuidado para que a calibração seja feita em condições de suspensão semelhantes às usadas durante a medição.

4.1.1.2 O molinete deverá ser mantido em boas condições por meio de acondicionamento adequado, limpeza completa após cada utilização e substituição oportuna de peças gastas ou danificadas. Quando partes importantes são substituídas, é necessário uma nova calibração do instrumento.

4.1.1.3 Os molinetes tipo concha deverão ser submetidos ao ensaio de rotação, antes e depois de cada utilização. Este ensaio consiste em se colocar o eixo do molinete na posição vertical, em local livre da influência de ventos, e dar um impulso manual ao rotor, que deverá então permanecer em movimento por um tempo mínimo especificado pelo fabricante, girando sempre no mesmo plano horizontal, diminuindo sua rotação lenta e suavemente até parar.

4.1.1.4 Os molinetes tipo hélice deverão ser submetidos a ensaio de rotação, antes e depois de cada utilização, da maneira especificada pelo fabricante. Poderá ser útil verificar com auxílio de moldes ou compasso de precisão, se a hélice não sofreu deformações desde sua calibração.

4.1.2 Procedimento de medição

4.1.2.1 As observações de velocidade são normalmente efetuadas ao mesmo tempo que as medições de profundidade. Este procedimento deverá ser obedecido no caso de leitões instáveis. Nos casos em que as duas medições são feitas em ocasiões diferentes, as observações de velocidade deverão ser feitas em um número suficiente de locais, normalmente entre 15 a 20 verticais, e as distâncias medidas como descrito em 3.3.2.2 e 3.3.2.3.

4.1.2.2 Pelo menos oito verticais deverão ser usadas, desde que isto não implique em que a distância entre verticais seja menor do que um diâmetro do rotor do molinete. Um número menor de verticais poderá ser usado, se a largura for inferior a 8 diâmetros do rotor do molinete, ou a profundidade e o perfil de velocidade forem uniformes.

4.1.2.3 As verticais de medição e também o número de pontos de observação em cada vertical, serão escolhidos de tal forma que cada ponto de medição, controle aproximadamente a mesma fração do escoamento.

4.1.2.4 O molinete deverá ser posicionado no local desejado de uma vertical, por meio de uma haste, no caso de canais rasos; ou por suspensão em cabo, desde uma ponte, cabo aéreo ou barco no caso de canais mais profundos. Quando se utiliza um barco, o molinete deverá ser posicionado de maneira a não ser afetado por perturbações causadas pelo barco. Após o molinete ter sido posicionado no ponto selecionado da vertical, sua rotação deverá se ajustar ao escoamento antes que sejam iniciadas as leituras.

NOTA 1: Deverá ser assegurado que as observações do molinete, não sejam afetadas por ondas superficiais aleatórias e vento.

NOTA 2: Se existe uma deflexão apreciável do cabo de suspensão do molinete, deve-se aplicar uma correção à profundidade do ponto de medição. Não existe um fator de correção aplicável a todos os casos. Uma aproximação satisfatória, consiste em se aplicar os fatores de correção indicados no Anexo C.

4.1.2.5 O molinete deverá ser exposto em cada ponto de medição, por um tempo mínimo de 40 s. Quando se sabe que a velocidade da água está sujeita a pulsações periódicas, é aconselhável que o molinete seja exposto em cada ponto por pelo menos três períodos consecutivos de 1 minuto, ou por períodos de duração suficiente para cobrir, pelo menos, 2 períodos de pulsação. A velocidade no ponto será então tomada como a média de todas as leituras efetuadas, a menos que seja evidente que a diferença deve-se a alguma causa que não a pulsação do escoamento.

4.1.2.6 O molinete deverá ser removido da água em intervalos, para exame, sempre que passar de uma vertical para outra.

4.1.2.7 Em cursos d'água onde o escoamento é variável, é útil corrigir a variação na descarga total durante o período de medição, não apenas por observação de mudança do nível d'água, mas também por medição contínua de velocidade em um ponto convenientemente escolhido. A experiência tem mostrado que desde que as variações de vazão sejam pequenas, a distribuição de velocidade não é modificada significativamente. Um molinete de referência pode ser posicionado na corrente principal e a velocidade medida neste ponto, se possível no mesmo instante em que cada medição é efetuada nos diferentes pontos da seção. Todas as medições efetuadas nos diferentes pontos, podem ser relacionadas com as leituras de referência correspondentes. A velocidade média de referência, definida como a média de todas as leituras do molinete de referência, pode ser calculada com precisão. Cada leitura efetuada nos pontos de medição de velocidade, pode então ser corrigida multiplicando-a pela razão entre a velocidade média de referência e a velocidade de referência no instante considerado. Se as medições com o molinete de referência não puderem ser feitas no mesmo instante que as medições nos pontos, elas deverão ser feitas em intervalos regulares, tão frequentes quanto possível, e a leitura de referência a ser tomada para uma dada medição de velocidade, deverá ser obtida por interpolação.

4.1.3 Escoamento oblíquo

Se não pode ser evitado escoamento oblíquo, o ângulo da direção do escoamento com a perpendicular à seção deve ser medido, e a velocidade medida deve ser corrigida para esse ângulo. Instrumentos especiais têm sido desenvolvidos para medir simultaneamente o ângulo e a velocidade em um ponto. Todavia, quando estes não são disponíveis e o vento é insignificante, o ângulo do escoamento ao longo da vertical pode ser tomado igual ao observado na superfície. Se o canal é muito profundo, ou se o leito no local está mudando rapidamente, esta hipótese não deverá ser aceita sem verificação. Se o ângulo medido com a perpendicular é β , então:

$$V \text{ corrigida} = \text{medida} \times \cos \beta.$$

4.1.4 Métodos para medição de velocidade média em cada vertical

4.1.4.1 A velocidade média em cada vertical, poderá ser determinada por um dos métodos seguintes dependendo da disponibilidade de tempo e tendo-se em vista a largura e a profundidade da água, as condições do leito, a variação de nível d'água e a precisão que se quer obter:

- a) método de distribuição da velocidade (Ver 4.1.5);
- b) método dos dois pontos (Ver 4.1.6);
- c) método da integração (Ver 4.1.7).

4.1.4.2 Na vizinhança da velocidade mínima que pode ser registrada com o molinete, o erro na determinação da velocidade aumenta consideravelmente. Para os molinetes comuns, a velocidade mínima para medições confiáveis é de 0,15 m/s. Molinetes especiais que fazem medições abaixo desta velocidade podem ser usados desde que testados antes das medições, para as faixas de velocidade e se tenha observado boa precisão e reproducibilidade.

4.1.4.3 O eixo horizontal do molinete não deverá estar situado a uma distância do leito do curso d'água, inferior a 3 vezes a altura do rotor. Além disso, nenhuma parte do rotor deverá quebrar a superfície da água.

4.1.5 Método da distribuição de velocidade

As medições da velocidade média por este método é feita a partir de observações em um número de pontos ao longo de cada vertical, entre a superfície da água e o leito do curso d'água. O espaçamento entre pontos deverá ser escolhido de maneira que a diferença de velocidades entre dois pontos adjacentes não seja maior que 20% do maior valor das duas velocidades. Em cada vertical, dois dos pontos de observação de velocidade, deverão ser locados, junto à superfície da água e do leito, respectivamente, levando-se em conta as especificações de 4.1.4. Em cada vertical serão feitas observações em pelo menos três pontos. As observações de velocidade em cada vertical serão representadas graficamente, e a velocidade média determinada com auxílio de um planímetro.

NOTA 1: Este método pode não ser adequado para medições rotineiras de vazão, porque o aparente ganho de precisão, pode ser mais que compensado por erros resultantes da mudança de nível da água, durante o longo período de tempo necessário para se fazer as medições.

NOTA 2: A curva de velocidade pode ser extrapolada a partir do último ponto de medição, para o leito ou margem vertical, calculando-se V por meio da equação:

$$V = V_a \left(\frac{x}{a} \right)^{\frac{1}{m}}$$

onde:

V = é a velocidade num ponto da zona extrapolada, a uma distância x do leito;

V_a = é a velocidade no último ponto de medição, a uma distância a do leito.

NOTA 3: A velocidade média \bar{V}_x entre o fundo (ou margem vertical) do canal e o ponto de medição mais próximo (onde a velocidade medida é V_a) pode ser calculada diretamente da equação:

$$\bar{V}_x = \frac{m}{m+1} V_a$$

de uma maneira geral, m varia entre 5 (para contornos rugosos) e 7 (para contornos lisos).

4.1.6 Método dos dois pontos

A obtenção da velocidade média por este método é feita a partir de observações em 2 ou 1 ponto ao longo de cada vertical, de acordo com a profundidade:

4.1.6.1 Para profundidades menores que 1,00 metro a velocidade será observada em cada vertical a 0,6 da profundidade, relativamente a superfície livre. O valor será tomado como a velocidade média na vertical.

4.1.6.2 Para profundidades maiores que 1,00 metro a velocidade será observada em cada vertical, expondo-se o molinete a 0,2 e 0,8 da profundidade, relativamente a superfície livre. A média aritmética dos dois valores será tomada com a velocidade média na vertical.

NOTA: Este método é recomendado para medições rotineiras, principalmente nos casos em que o curso d'água está mudando de nível de maneira significativa.

4.1.7 Método de integração

4.1.7.1 Neste método, o molinete é deslocado continuamente da superfície até o fundo, e daí para a superfície, sendo movimentado com a mesma taxa de deslocamento na vertical, durante todo o processo.

4.1.7.2 A taxa de deslocamento do molinete não deverá ser maior que 5% da velocidade média do escoamento na seção de medição e em qualquer caso, não deverá ser superior a 0,04 m/s.

4.1.7.3 Em cada vertical serão feitos dois ciclos completos de movimentação do molinete e, se os resultados deferirem em mais de 10%, a medição será repetida.

4.1.7.4 Para calcular a velocidade média na vertical, determina-se o número médio de revoluções por segundo, e a este valor aplica-se a equação do molinete. O erro introduzido por se usar a equação do molinete para medição próxima ao leito, é desprezível desde que o molinete não permaneça em sua posição mais próxima ao leito, por nenhum período de tempo apreciável.

4.1.7.5 Este método só poderá ser aplicado a profundidades maiores que 1,00 metro.

4.1.8 Erros e limitações

4.1.8.1 As estimativas dos erros que podem ocorrer, quando se utiliza um dos métodos detalhados em 4.1.4, são dados no Anexo E. Estas estimativas são dos erros aleatórios que podem ocorrer, mesmo quando se toma todas as precauções já observadas, e as descritas em 4.1.8.2. Se as medições não são feitas satisfazendo a essas condições, uma tolerância adicional deve ser incluída na estimativa da precisão total da medição.

4.1.8.2 Podem surgir erros:

- a) se o escoamento é variável e se o material em suspensão interfere com a rotação do molinete;
- b) se a direção do escoamento não é paralela ao eixo do molinete tipo hélice, ou é oblíqua ao plano do molinete tipo concha, e não são conhecidos, com precisão, os fatores de correção adequados;
- c) se o molinete é utilizado para medição de velocidades fora da faixa estabelecida pela calibração;
- d) se o arranjo para medição (tais como haste, cabo de suspensão do molinete, barco, etc.) é diferente do utilizado para a calibração do molinete, caso em que pode ser introduzido um erro sistemático;
- e) se existe perturbação significativa da superfície da água por vento;
- f) se durante a medição em um ponto, o molinete não é mantido no mesmo local, que é o caso quando o barco é arrastado pela corrente (Ver Anexo D) ou, quando ocorre movimento oscilatório transversal. Neste último caso, o que se mede é a composição da velocidade do escoamento com a velocidade transversal, que para velocidades transversais elevadas, acarreta sérios erros positivos.

4.2 Medição de velocidade usando flutuadores

4.2.1 Emprego do método

Este método deverá ser utilizado somente nos casos onde é impossível se empregar um molinete, devido a velocidades e profundidades excessivas, presença de material em suspensão ou quando as velocidades são muito baixas para medição com molinete.

4.2.2 Seleção do local

Deverão ser selecionadas 3 seções retas ao longo do trecho do curso d'água, escolhidas como descrito na seção 5 no início, meio e final do trecho. As seções retas deverão estar suficientemente distanciadas entre si, de maneira a se poder medir com precisão o intervalo de tempo gasto pelo flutuador. Para percorrer a distância entre duas seções adjacentes, a seção do meio deverá ser usada apenas para verificação da medição de velocidade entre as seções do início e final do trecho. Recomenda-se que a duração mínima do movimento do flutuador, entre as seções extremas, seja de 20 segundos.

4.2.3 Procedimento de medição

4.2.3.1 O flutuador deverá ser lançado no curso d'água, a uma certa distância acima da seção reta de montante, suficiente para que alcance velocidade constante antes de chegar na primeira seção. Os instantes em que o flutuador passa em cada uma das três seções são então anotados. Este procedimento será repetido com os flutuadores a distâncias diferentes da margem de curso d'água. As distân

cias do flutuador à margem, no instante em que passa por cada seção reta, pode ser determinada por meios ópticos adequados, por exemplo, um teodolito.

4.2.3.2 A largura do curso d'água será dividida em um certo número de segmentos de igual largura. Todavia, se o leito é muito irregular, em cada segmento deverá passar aproximadamente a mesma vazão. O número mínimo de segmentos não deverá ser inferior a três, mas quando possível, deverão ser usados um mínimo de cinco, dependendo este número do tempo disponível para as observações em um nível d'água específico do curso d'água.

4.2.4 Tipos de flutuadores

4.2.4.1 A velocidade da água em cada segmento pode ser determinada por:

- a) flutuadores superficiais;
- b) flutuadores duplos;
- c) outros tipos de flutuadores.

NOTA: Os coeficiente para se obter a velocidade média a partir das medições, para os diferentes tipos de flutuadores, são dados em 4.2.5.

4.2.4.2 Flutuadores superficiais: Estes podem ser usados durante cheias, quando as medições de velocidade devem ser feitas com rapidez. Eles não deverão ser usados, quando é provável que seu movimento seja afetado por ventos.

4.2.4.3 Flutuadores duplos: Estes podem ser usados para medições de velocidades em rios profundos. O corpo sub-superficial pode ser posicionado a 0,6 da profundidade, em relação a superfície livre, ou a outras profundidades onde se quer medir a velocidade diretamente.

4.2.4.4 Outros tipos de flutuadores: Outros métodos de se obter a velocidade média em cada segmento podem ser usados se o perfil do leito, ao longo do trecho de medição, é regular:

- a) flutuadores profundos:

- estes podem ser utilizados para medição de velocidade em rios muito profundos. Seu comprimento deverá ser aproximadamente igual a profundidade da água, mas em nenhum caso, poderá tocar no fundo,

Estes flutuadores consistem de elementos separados, convenientemente ligados entre si para permitir flexibilidade e que são sustentados por um flutuador superficial (Ver Figura 3);

- b) bastão lastrado:

- estes podem ser utilizados para medição de velocidades, no caso de canais artificiais ou outros de seção uniforme, que apresentem leito livre de vegetação e profundidade constante. O bastão deverá cobrir pelo menos 95% da profundidade do canal, mas não poderá tocar no fundo.

4.2.5 Avaliação da velocidade

4.2.5.1 A velocidade do flutuador deverá ser determinada dividindo-se a distância entre as seções retas, pelo tempo gasto pelo flutuador para percorre-la. Deverão ser tomadas diversas leituras da velocidade e a média desses valores se

rá multiplicada por um coeficiente adequado para se obter a velocidade no segmento. Pode ser utilizado um coeficiente obtido a partir de medições com molinete no local, em um nível d'água o mais próximo possível daquele em que se fez a medição com o flutuador, para converter a velocidade do flutuador em velocidade média. É evidente que este método necessariamente fornece apenas um valor aproximado para a vazão.

4.2.5.2 Flutuadores superficiais: Onde não é possível verificar diretamente o coeficiente, pode-se tomar como orientação, que o coeficiente para um flutuador superficial varia entre 0,84 e 0,90, dependendo da forma do perfil de velocidades. Os valores mais elevados são usualmente obtidos quando o leito é liso, mas em condições especiais, podem ocorrer valores fora da faixa indicada.

4.2.5.3 Flutuadores duplos: Onde não é possível verificar diretamente o coeficiente, pode-se tomar como orientação que, quando o corpo sub-superficial, está situado a 0,6 da profundidade, o coeficiente é aproximadamente igual a 1,0 e a 0,5 da profundidade, o coeficiente é aproximadamente 0,96.

4.2.5.4 Outros tipos de flutuadores: Onde não é possível verificar diretamente o coeficiente, pode-se tomar como orientação que, em geral, o coeficiente para flutuadores profundos e bastões lastrados variam na faixa de 0,8 a 1,0.

4.2.6 Principais fontes de erros

As principais fontes de erros que podem ocorrer durante a medição de vazão com flutuadores são enumeradas abaixo. Elas serão levadas em consideração na estimativa do erro total, da maneira indicada no Anexo E. Podem ocorrer erros:

- a) se o coeficiente utilizado para a obtenção da velocidade média, a partir da velocidade do flutuador, não é conhecido com precisão;
- b) se é utilizado um pequeno número de segmentos para a distribuição de velocidades;
- c) se é utilizado um flutuador profundo ou um bastão lastrado, e a profundidade do canal não é uniforme ao longo do trecho de medição;
- d) se o flutuador não se desloca no centro do painel, devido a correntes oblíquas;
- e) se existe vento, mas deve-se notar que este erro é geralmente desprezível, em comparação com os outros citados acima.

5 CÁLCULO DA VAZÃO

5.1 Generalidades

O cálculo da velocidade média em cada vertical foi tratado em 4.1 e 4.2. Em 5.2 e 5.3 apresentam-se os métodos para a determinação da vazão a partir de medições com molinetes e flutuadores. Os métodos apresentados em 5.2.1 e 5.2.2 são os mais usados, sendo o 5.2.2.2 particularmente útil para estimativas rápidas realizadas no campo.

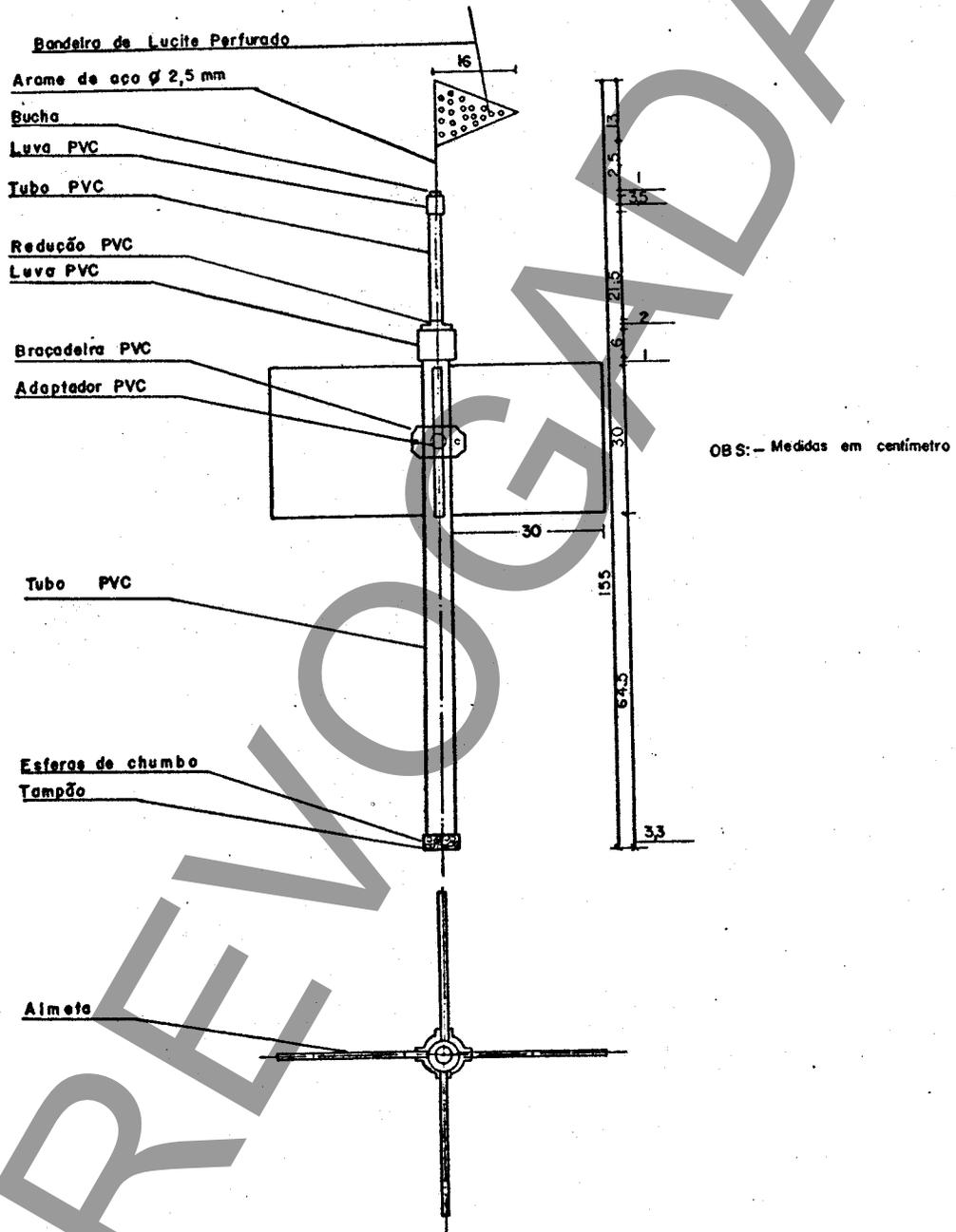


Figura 3 - Flutuador executado em PVC

5.2 Determinação da vazão a partir de medições com molinetes

5.2.1 Método gráfico

5.2.1.1 O valor do produto da velocidade média \bar{V} em cada vertical, pela profundidade correspondente h , ou seja, o produto $\bar{V}h$ deverá ser representado sobre a linha d'água superficial, e desenhada uma curva pelos pontos, como mostrado na Figura 4

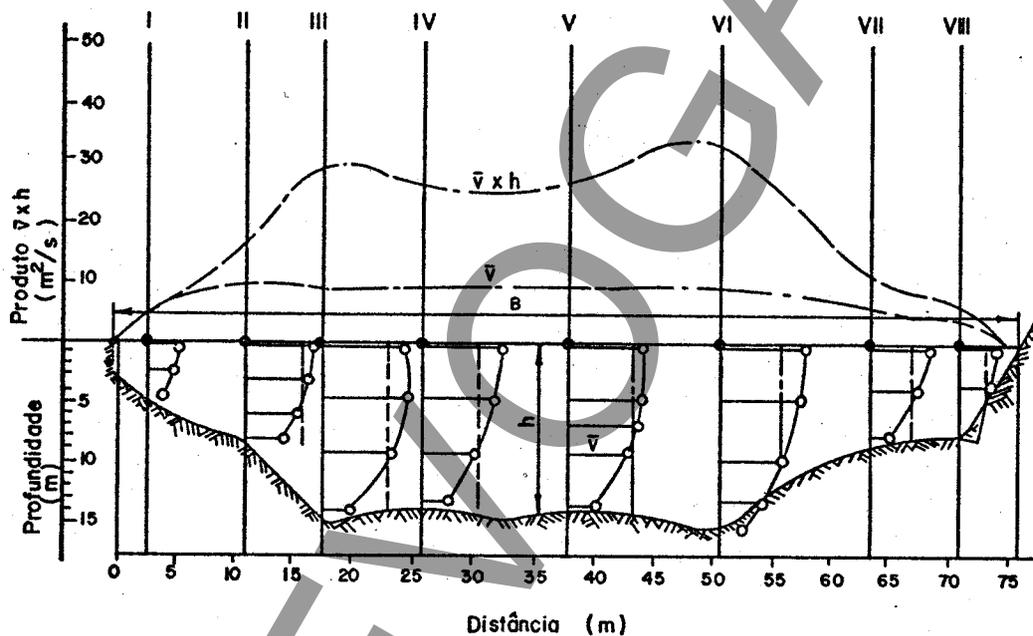


Figura 4 - Cálculo da vazão a partir de medições com molinetes

- Método Gráfico -

5.2.1.2 Quando as medições de velocidade não são realizadas nas mesmas verticais onde são feitas as medições de profundidade, a curva \bar{V} deverá ser representada sobre a linha d'água superficial, e serão tomados por interpolação os valores de \bar{V} correspondentes às verticais onde foram feitas as medições de profundidade, para construção da curva $\bar{V}h$.

5.2.1.3 A área limitada pela curva $\bar{V}h$ e a linha d'água superficial representa a vazão na seção reta de medição.

5.2.2 Métodos aritméticos

5.2.2.1 Método da seção média: A seção reta é considerada como sendo formada por segmentos, cada um dos quais é limitado por duas verticais adjacentes. Se \bar{V}_1 e \bar{V}_2 são as velocidades médias na primeira e segunda vertical, respectivamente, e h_1 e h_2 são as profundidades medidas nas verticais 1 e 2, respectivamente, e se b é a distância entre essas duas verticais, a vazão no segmento é calculada pela expressão:

$$q = \left(\frac{\bar{V}_1 + \bar{V}_2}{2} \right) \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) b.$$

Este procedimento é repetido para cada segmento e a vazão total é obtida por soma das vazões em todos os segmentos.

NOTA: As vazões correspondentes aos segmentos entre uma margem e a vertical 1, e entre a vertical m e a outra margem, podem ser estimadas a partir da equação acima, com a hipótese adicional de que a profundidade e a velocidade nas margens são nulas. Todavia, se estas vazões são uma parte significativa da vazão total, pode-se usar a equação dada na NOTA 2 de 4.1.5 para se obter as velocidades médias na região das margens.

5.2.2.2 Método aritmético simplificado: Admitindo-se uma variação linear para o produto $\bar{V}h$, a vazão em cada segmento será computada multiplicando $\bar{V}h$ pela largura correspondente medida ao longo da linha d'água superficial. Esta largura será tomada como soma da metade da largura definida por uma vertical adjacente até a vertical onde se calculou $\bar{V}h$, e da metade da largura entre esta vertical e a vertical adjacente do outro lado. Os valores de $\bar{V}h$ para as duas semi-larguras próximas às margens, serão considerados nulos.

5.3 Determinação de vazão a partir das medições de velocidade com flutuadores

5.3.1 Se as seções de montante e jusante do trecho, são representadas, como indicado na Figura 5 e são divididas em um número adequado de segmentos, a área de cada um desses segmentos pode ser determinada. À meia distância entre as duas seções, será traçada outra linha (MN na Figura 5) paralela às linhas das seções retas. Os pontos de passagem de cada flutuador pelas seções extremas podem ser representados e ligados por segmentos de reta com traço cheio (Figura 5), enquanto que os pontos superficiais que separam os diversos painéis das duas seções retas, podem ser ligados por segmentos de reta tracejados.

5.3.2 Nos pontos onde as linhas cheias cortam a linha MN, serão representadas as velocidades médias correspondentes (velocidade do flutuador multiplicada pe

lo coeficiente adequado) perpendicularmente a MN, e os pontos extremos desses vetores velocidades, ligados para formar uma curva de distribuição de velocidades.

5.3.3 A área de segmentos correspondentes nas seções de montante e jusante, quando multiplicado pela velocidade média para o painel respectivo, como mostrado pela curva de distribuição de velocidades, representa a vazão naquele segmento. A soma das vazões em todos os segmentos fornece a vazão total. A velocidade média para cada painel pode ser determinada, medindo-se com um planímetro a área sob a curva de distribuição de velocidades, para o segmento correspondente, e dividindo-se o valor desta área pela largura do segmento.

5.4 Determinação da vazão quando existe variação do nível d'água

Se a flutuação do nível d'água, durante o período de medição de velocidade, é menor que 0,05 m, o nível d'água médio será adotado para o cálculo da vazão. Se a flutuação é maior que 0,05 m, a vazão será calculada da maneira descrita em 5.4.1, e o nível d'água médio, correspondente a esta vazão, será obtido como descrito em 5.4.2.

5.4.1 Cálculo da vazão

O nível d'água será representado em degraus para cada segmento, como mostrado na Figura 6, ou por meio de uma curva contínua. A curva da velocidade média multiplicada pela profundidade real (curva $\bar{V}h$), será representada sobre a linha em degraus (ou curva) representativa da superfície da água. A área limitada pela curva $\bar{V}h$ e a curva em degraus da superfície da água, representa a vazão total.

5.4.2 Cálculo do nível d'água médio

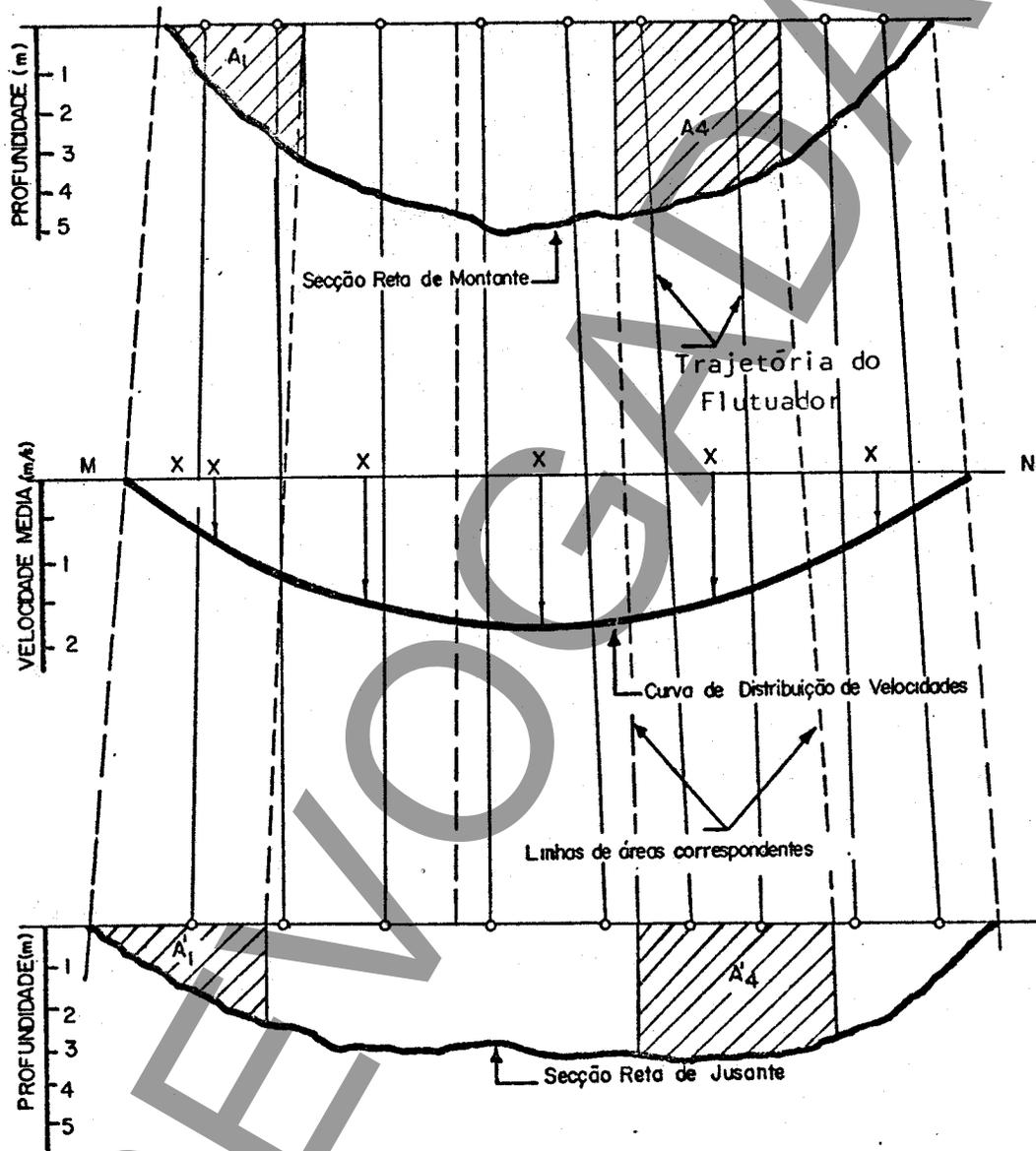
O nível d'água médio, representativo da medição de vazão, será calculado a partir das equações:

$$\bar{z} = \frac{\sum q_i \bar{z}_i}{Q} \quad \text{e} \quad q_i = b_i h_i \bar{V}_i$$

onde:

- \bar{z} é o nível d'água médio, em relação a um datum da seção de medição;
- q_i é a vazão parcial no segmento de ordem i ;
- \bar{z}_i é o nível d'água médio correspondente a vazão parcial q_i ;
- Q é a vazão total, igual a soma das vazões parciais, $\sum q_i$;
- b_i é a largura do segmento de ordem i ;
- h_i é a profundidade do segmento de ordem i ;
- \bar{V}_i é a velocidade média no segmento de ordem i .

O método está indicado na Figura 6.



$$Q = \sum_1^m q = \sum_1^m \bar{v} \frac{(A+A')}{2}$$

NOTAS

X Indica os Pontos Médios dos Painéis na Seção Intermediária

$2 \bar{v}_1 \bar{v}_2 \dots \bar{v}_s$ são as Velocidades Médias Em Cada um dos Cinco Painéis

Figura 5 - Cálculo da vazão em medições com flutuadores

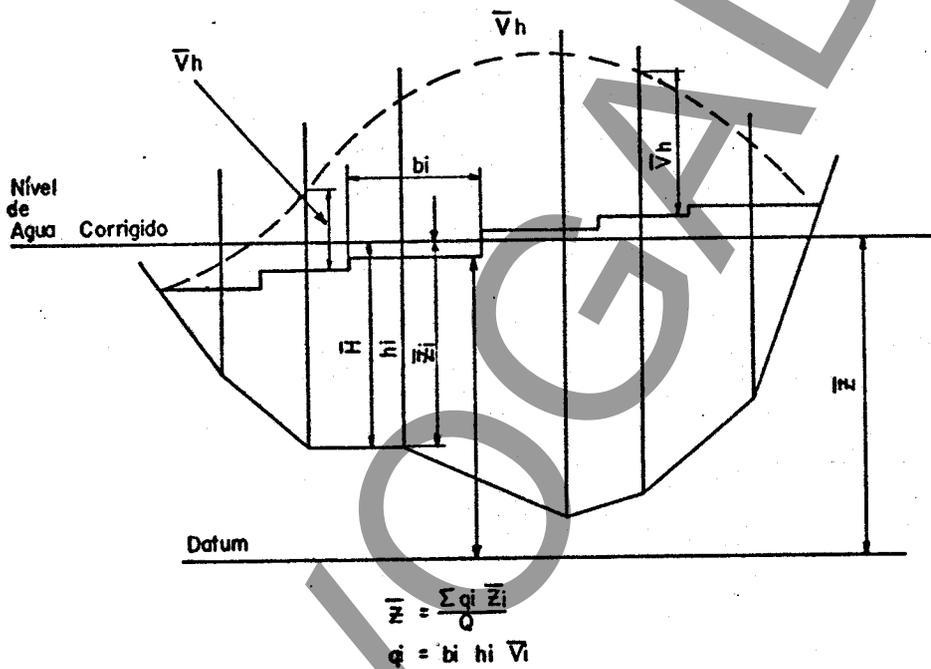


Figura 6 - Cálculo da vazão do nível de água médio, quando existem variações do nível d'água superiores a 0,05 m.

ANEXO A - MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DE LARGURAS NA SEÇÃO RETA

A-1 MÉTODO ÂNGULAR

Um teodolito é centrado em uma das margens, de onde são tomados os ângulos correspondentes às posições do barco nos locais de medição, os quais permitem posicionar as verticais (Ver Figura 7).

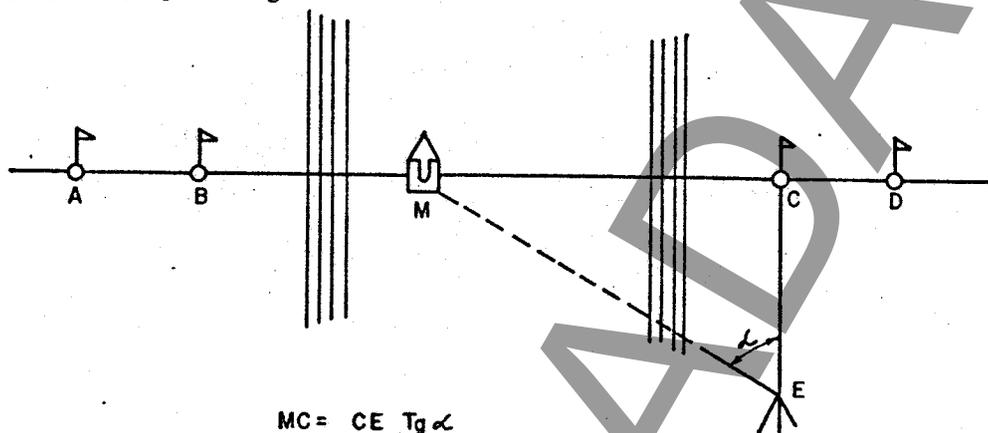


Figura 7 - Medição da seção reta - Método angular

A-2 MEDIÇÕES LINEARES

A-2.1 São fixadas 4 bandeiras A, B, C e D, duas em cada margem, ao longo da linha da seção reta (Ver Figura 8). Uma bandeira adicional E é fixada em uma das margens, sobre uma linha que passa pelo ponto correspondente à bandeira B, mais próxima da água, formando um ângulo reto com a linha da seção reta. A distância entre as bandeiras E e B pode ser medida com precisão. Um observador, move-se na margem oposta com uma bandeira na mão, do ponto C em direção a uma posição N, sobre uma linha perpendicular à linha da seção reta, até que a bandeira N do observador, a bandeira E na margem oposta e a bandeira M do barco, estejam em linha reta. A distância entre as bandeiras C e N é determinada e a posição do barco fica definida pela distância MC.

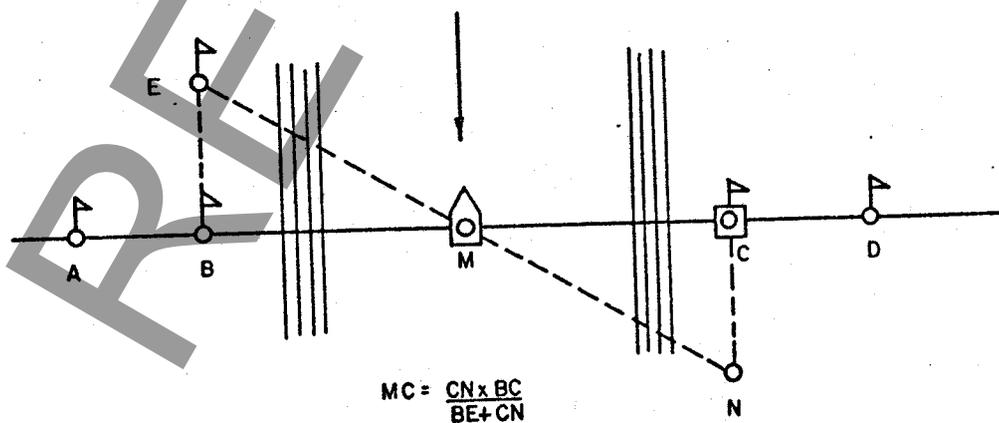


Figura 8 - Medição da seção reta - Medições Lineares

A-2.2 Se o canal do rio for muito largo, o suficiente para que as bandeiras não sejam claramente visíveis da margem oposta, a posição do barco será definida a partir de medições feitas em apenas uma das margens (Ver Figura 9). São colocadas as duas bandeiras em duas linhas perpendiculares à linha da seção reta, e do mesmo lado desta, em uma das margens do rio. A distância MB do barco à margem, é calculada pela expressão dada na Figura 9.

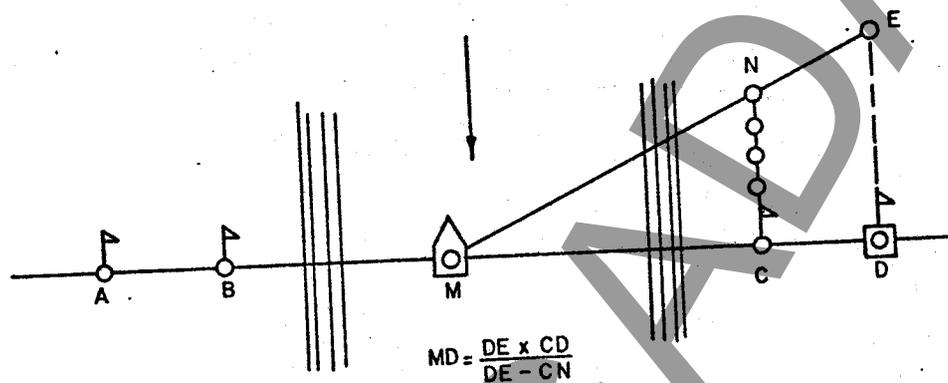


Figura 9 - Medição da seção reta - Medições lineares

A-3 MÉTODO DO PONTO-BASE

A-3.1 Quando o rio é largo e se dispõe de terreno plano, pode-se usar o método do ponto-base. Na Figura 10, a distância AP é aproximadamente igual à metade da largura do rio e PD é em torno de 1/5 de AP. Sobre uma linha DD', são demarcados pontos com intervalos fixados de acordo com a largura entre as verticais selecionadas. O barco, movendo-se sobre a linha AA', é posicionado em cada vertical quando está alinhado com os pontos P e E₁, E₂, ... etc.

A-3.2 Se necessário, pode-se usar um segundo conjunto de pontos-base na margem oposta.

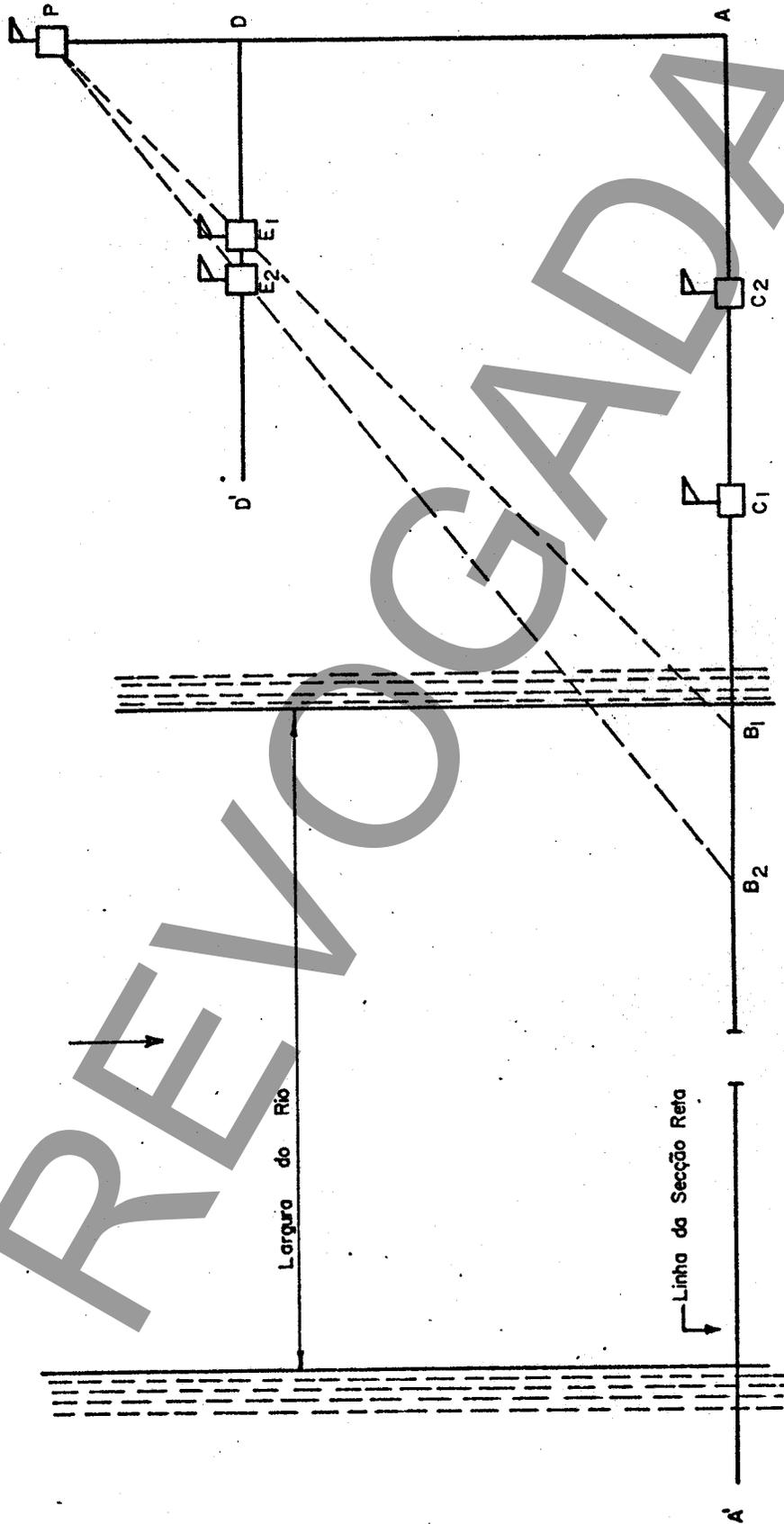


Figura 10 - Método do Ponto-base

ANEXO B - CORREÇÃO DO COMPRIMENTO DO CABO DE SONDA GEM

B-1 A correção para o comprimento do cabo de sondagem nas medições de profundidade, é feita quando esta não é normal à superfície da água.

B-2 Quando existe arrastamento do cabo de sondagem pela corrente, de um ângulo maior do que 5° , a profundidade deverá ser avaliada da maneira seguinte:

- mede-se a distância vertical \overline{ab} entre a superfície da água e o ponto de suspensão do cabo de sondagem (Ver Figura 11);
- libera-se o cabo até que o lastro atinja o leito. Mede-se o comprimento total de cabo liberado \overline{ae} , e o ângulo de arrastamento α ;
- calcula-se o comprimento do cabo fora d'água, multiplicando-se a distância vertical \overline{ab} pela secante do ângulo α ;
- calcula-se o comprimento do cabo submerso \overline{de} pela expressão:

$$\overline{de} = \overline{ae} - \overline{ab} \sec \alpha;$$

- na Tabela 1, encontra-se o fator de correção K, em função do ângulo α , que deverá ser aplicado à profundidade aparente \overline{de} , para se obter a profundidade real $h = K \cdot \overline{de}$.

Esta correção deve ser aplicada para ângulo α no máximo de 30° , em face às incertezas para ângulos maiores.

Tabela 1 - Valores do coeficiente K

x	Sec α	K
6°	1.0055	0.0016
8°	1.0089	0.0032
10°	1.0154	0.0050
12°	1.0223	0.0072
14°	1.0306	0.0098
16°	1.0403	0.0128
18°	1.0515	0.0164
20°	1.0642	0.0204
22°	1.0785	0.0248
24°	1.0946	0.0296
26°	1.1126	0.0350
28°	1.1326	0.0408
30°	1.1547	0.0472

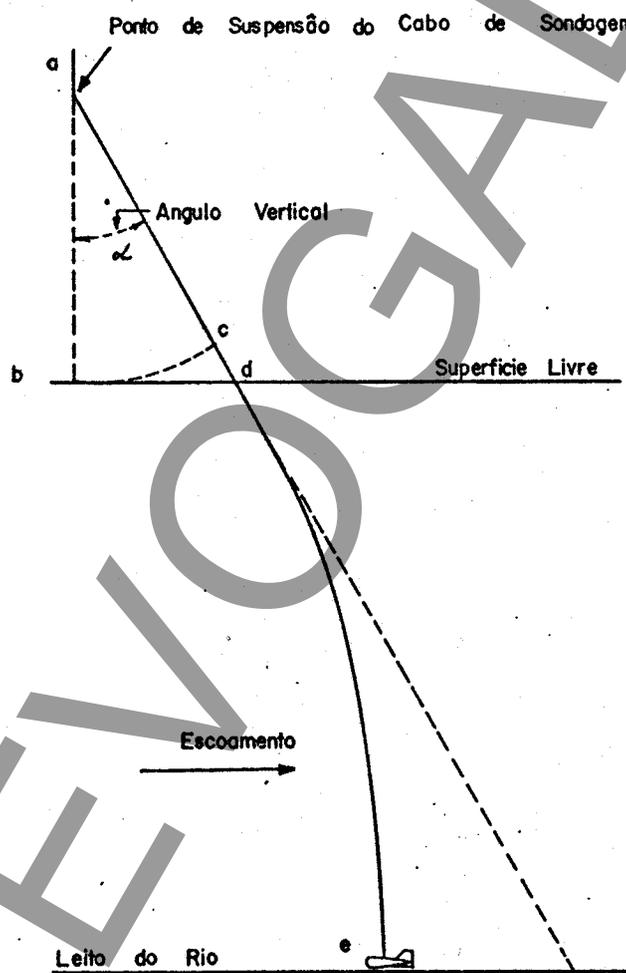


Figura 11 - Correção para o comprimento do cabo de sondagem

ANEXO C - CONSTRUÇÃO DE FLUTADORES

C-1 Para medições rotineiras com flutuadores, recomenda-se a construção de um módulo de fácil execução.

C-2 Na Figura 3, apresenta-se um módulo executado em PVC, para medições de velocidade em rios profundos. Estes módulos podem ser convenientemente lastrados com esferas de chumbo, ligados entre si por meio de um cabo flexível, para se construir flutuadores duplos profundos.

/Anexo D

REVOGADA

ANEXO D - CORREÇÃO DE VELOCIDADE PARA A DERIVA DO BARCO

D-1 Quando se utiliza barco com motor de popa, este deverá ter potência suficiente para evitar deriva em condições normais. Nos casos em que a profundidade e a velocidade são elevadas, é muitas vezes impossível manter-se o barco exatamente na posição desejada.

D-2 Os movimentos laterais, para montante e para jusante, durante as observações de velocidade, deverão ser medidos por método topográfico adequado ou com auxílio de um telurômetro, e feita uma análise dos vetores para se determinar a velocidade real, corrigida do movimento do barco durante a medição.

D-3 Quando em altas velocidades a deriva é para jusante, esta pode ser medida, permitindo que se aplique a correção correspondente na velocidade. Por exemplo, com base em 388 observações realizadas no rio Indus, em Kotri, com velocidades variando entre 1 146 e 2 911 m/s, a correção para a deriva foi obtida estatisticamente, chegando-se à fórmula seguinte:

$$\bar{V}_p = 0,064 + 0,98 \bar{V}_b + 0,98 \bar{V}_d$$

onde:

\bar{V}_p é a velocidade em m/s;

\bar{V}_b é a velocidade no ponto, em m/s, enquanto o barco estava derivando;

\bar{V}_d é a velocidade de deriva, em m/s.

$$\bar{V}_d = \frac{\text{deriva em metros}}{120\text{s (período de observação)}}$$

NOTA: No conjunto de observações acima, as velocidades sem deriva foram observadas em um barco com motor adequado, enquanto que as com deriva foram observadas em uma chata. Foi utilizada para ancorar a chata uma âncora de 28,123 kg, com dois braços, e o comprimento de filame variou entre 20 e 25 m. A chata foi rebocada suficientemente a montante da seção, a âncora foi lançada, e as velocidades foram medidas com a chata à deriva.

ANEXO E - ERROS EM MEDIÇÃO DE VAZÃO

E-1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

E-1.1 No item E-2, apresenta-se o desenvolvimento geral do método para se estimar a precisão de uma medição de vazão. O assunto não é tratado com grandes detalhes, apresentando-se apenas uma abordagem simplificada do problema, a qual, entretanto, possibilita o cálculo da ordem aproximada do erro cometido, para qualquer conjunto de dados.

E-1.2 No Anexo F, são examinados todos os componentes do erro total, e apresentados valores numéricos de cada componente. Entretanto, não se deve considerar esses valores válidos para todos os casos possíveis, enfatizando-se que as observações nas quais eles se baseiam, não incluem todos os tipos e dimensões de rios.

E-2 MÉTODO DE CÁLCULO

E-2.1 Definição de erro

E-2.1.1 Nenhuma medida de uma grandeza física está isenta de incertezas, as quais podem estar associadas a desvios sistemáticos do próprio instrumento de medição ou a uma dispersão aleatória por falta de sensibilidade do instrumento. Os desvios sistemáticos não são afetados pela repetição da medição e só podem ser reduzidos com utilização de instrumentos mais precisos. A repetição, entretanto, reduz o erro causado por dispersão aleatória. A precisão da média de m medições repetidas, é \sqrt{m} vezes maior do que a de qualquer medição isolada.

E-2.1.2 Nesta seção, os erros estimados de cada componente são expressos a partir dos desvios padrões das medições pertinentes, e são combinados para se estabelecer o erro total na medição de vazão.

E-2.1.3 Quando se considera a incerteza possível de uma medição de vazão em escoamentos à superfície livre, não é possível se predizer seu valor exato, mas pode ser feita a análise de todas as medições isoladas, necessárias para se obter a vazão, e a estimativa estatística da tolerância provável. Uma tolerância de 95% em uma medição, pode ser definida estatisticamente, como a faixa em torno do valor calculado que, em uma média de 19 vezes em cada 20, deve incluir o valor verdadeiro. Se a distribuição dos erros é aproximadamente normal, a tolerância pode ser tomada igual a duas vezes o erro padrão da medição de vazão.

E-3.2 Fontes de erro

As fontes de erro podem ser identificadas, considerando-se a forma geral da expressão para o cálculo da vazão:

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i h_i \bar{V}_i$$

onde:

Q é a vazão total

b_i , h_i e \bar{V}_i são, respectivamente, a largura, profundidade e velocidade média da água no segmento ou vertical de ordem i , das m em que se dividiu a seção reta.

O erro total na vazão é então composto de:

- a) erros em larguras;
- b) erros em profundidades, quer por sondagem direta ou leitura de nível d'água. Estes serão determinados, levando-se em consideração o estabelecido em 3.3.3.3;
- c) erro na determinação de velocidades nos diversos pontos de medição. Estes dependerão de precisão do instrumento, da técnica utilizada (Ver 4.1.1, 4.1.5 e 4.2.6) e da irregularidade da distribuição espacial de velocidade;
- d) erros intrínsecos do método, particularmente os relacionados com o número de verticais e o número de pontos em cada vertical. Estes erros também dependerão da largura do curso d'água, da relação largura-profundidade e do método de cálculo empregado.

E-3.3 Determinação dos diversos componentes do erro total

E-3.3.1 Erros em larguras (X_{b_i})

A medição de larguras entre verticais é normalmente baseada na medição de distâncias em relação a um ponto de referência em uma margem. Se a determinação baseada no uso de cabo de aço calibrado (Ver 3.3.2.3), trena ou cabo aéreo, o erro na medição de distância é desprezível. Quando se utiliza meios ópticos na determinação das distâncias, o erro dependerá do instrumento utilizado e da distância medida.

E-3.3.2 Erros em profundidades (X_{h_i})

O erro na medição de profundidade será determinado segundo o método adotado e tendo-se em vista as variações do nível d'água durante as medições, levando-se em consideração o estabelecido em 3.3.3.3.

E-3.3.3 Erros na determinação de velocidades em pontos isolados (X_v)

A velocidade em um ponto qualquer da seção reta de medição, flutua continuamente e aleatoriamente com o tempo. Portanto, uma única medição, durante o período de 40 segundos, é uma amostra que pode diferir de outra tomada em um longo período de tempo. Por análise de um grande número de observações em pontos isolados, com diferentes tempos de medição, pode-se determinar o desvio padrão X_f . Na prática, observa-se que o erro aumenta à medida que as medições são feitas nas proximidades do leito do curso d'água. Com uma aproximação, se, durante uma medição de vazão, o número médio de medições em pontos isolados numa vertical é \bar{p} , a contribuição para o erro X_v na velocidade média da vertical, devido a esta fonte,

pode ser calculada pela equação:

$$x_{\bar{v}} = \pm \sqrt{\frac{x_f^2}{p}}$$

E-1.3.4 Erros na determinação da velocidade média

Não é possível se predizer com precisão os erros que podem surgir, mas existem duas fontes principais. A primeira é decorrente do uso de um número limitado de pontos em uma vertical, e a segunda é decorrente de um número limitado de verticais. O método de combinação de erros da primeira categoria com os do item E-3.3.3, quando aplicável, é dado em b) abaixo:

a) número de pontos (X_0):

- como regra geral, o erro diminui à medida que o número de pontos por vertical aumenta. Deve-se notar que no método da integração, a medição é contínua e as duas fontes de erro, devidas ao número de pontos e à determinação das velocidades em pontos isolados, não podem ser separadas. O método da integração apresenta um erro único para essas duas fontes de erro;

b) velocidade média na vertical ($x_{\bar{v}_i}$):

- o erro na velocidade média determinada para cada vertical, é obtido combinando-se o erro da determinação de velocidades em pontos isolados, com o decorrente de número de pontos tomados para medições de velocidades na vertical. O erro resultante $x_{\bar{v}_i}$, é dado pela equação:

$$x_{\bar{v}_i} = \pm \sqrt{x_{\bar{v}}^2 + x_0^2}$$

c) número de verticais (X_m):

- o valor do erro depende não apenas do número de verticais, mas também da forma do canal, de variações no perfil do leito e da distribuição horizontal do perfil de velocidade. Segue-se que o valor para um determinado curso d'água é válido especificamente para aquele curso d'água. Ele somente pode ser determinado, se a vazão puder ser medida independentemente, por outro método mais preciso ou se tenha feito uma investigação minuciosa do escoamento na seção de medição do curso d'água. O erro devido a esta causa diminui quando se aumenta o número de verticais.

E-1.4 Erro padrão total na medição de vazão

O erro total na medição de vazão é o resultado da contribuição de erros diversos, os quais podem ser compostos por outros erros (por exemplo, o erro na determinação da velocidade média na vertical), e portanto, tenderão a se distribuir normalmente:

a) erro padrão aleatório (X'_0)

se x'_{b_i} , x'_{h_i} e $x'_{\bar{v}_i}$ são erros percentuais aleatórios em b_i , h_i e \bar{v}_i ,

para cada uma das m verticais, e X_Q^I é o erro percentual aleatória na vazão Q , tem-se:

$$X_Q^I = \pm \sqrt{X_m^2 + \frac{\sum_i^m (b_i h_i \bar{v}_i)^2 (X_{b_i}^{I2} + X_{h_i}^{I2} + X_{v_i}^{I2})}{(\sum_i^m b_i h_i \bar{v}_i)^2}}$$

onde:

X_m é como definido em E-1.3.4

$X_{b_i}^{I2}$ nesta equação, é comumente desprezível face a $X_{h_i}^{I2}$ e $X_{v_i}^{I2}$.

Esta equação pode ser simplificada, admitindo-se valores médios de X_b^I , X_h^I e X_v^I para todas as verticais e que $X_{b_i}^I$ é desprezível se o número de verticais é maior que dez, e particularmente, se as vazões parciais são aproximadamente iguais. Com estas hipóteses, a equação se torna:

$$X_Q^I = \pm \sqrt{X_m^2 + \frac{1}{m} (X_h^{I2} + X_v^{I2})}$$

b) erro padrão sistemático total (X_Q^{II}):

As equações acima podem ser empregadas para se estimar a precisão da medição, mas não leva em consideração a possibilidade de erros sistemáticos. Os erros sistemáticos se comportam como os erros aleatórios, e são estimados separadamente, podendo ser combinados como se segue:

$$X_Q^{II} = \pm \sqrt{X_b^{II2} + X_h^{II2} + X_v^{II2}}$$

onde:

X_b^{II} , X_h^{II} e X_v^{II} são os erros percentuais sistemáticos em b , h e \bar{v} .

A principal fonte de erro sistemático reside em erros na aferição do molinete e na perda de seu desempenho pelo uso em condições que se afastam daquelas em que foi tarado. Este erro é da ordem de $\pm 3\%$ para velocidades maiores que 50 cm/s. À medida que a velocidade é inferior a este valor, o erro pode crescer consideravelmente.

O erro sistemático nos instrumentos, usados para medição de largura e de profundidade são usualmente desprezíveis.

NOTA: X_v^{II} é o erro sistemático de um instrumento, o qual varia aleatoriamente de instrumento para instrumento, e não o erro inerente ao tipo de instrumento ou medição, o qual pode ser eliminado ou determinado, somente com o uso de instrumentos e métodos mais precisos.

c) erro padrão total (X_Q):

A estimativa do erro total na vazão, será dada por:

$$X_Q = \pm \sqrt{x_Q'^2 + x_Q''^2}$$

Este valor deve ser duplicado para se ter a tolerância estatística na medição de vazão, conforme estabelecido em E-2.1, portanto, a tolerância relativa estimada é dada por:

$$\pm 2X_Q = \pm 2 \sqrt{x_Q'^2 + x_Q''^2}$$

/Anexo F

ANEXO F - EXEMPLO DOS COMPONENTES DO ERRO TOTALE-1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Deve-se observar que os valores apresentados neste anexo estão sujeitos a modificações à medida em que se disponha de mais dados. Na elaboração das conclusões aqui apresentadas, não se dispunha de dados de rios muito largos (acima de 1200 m), rios com vazões maiores que 3 800 m³/s, e também de rios transportando alto conteúdo de sedimentos.

F-2 ERROS EM LARGURAS (X_b)

F-2.1 Como exemplo, o erro introduzido com telêmetro, tendo linha de base de 80 m, varia aproximadamente da maneira seguinte:

Faixa de largura m	Erro absoluto m	Erro relativo %
0 a 100	0,3	± 3%
150	0,5	± 0,4%
250	1,2	± 0,5%

F-2.2 Com outro exemplo, o erro cometido no "método do ponto-base" para posicionamento foi determinado pelo "método angular" com auxílio de um teodolito. Para rios até 600 m de largura, utiliza-se um conjunto de pontos-base e 1 teodolito. Para rios mais largos, utilizam-se dois conjuntos de ponto-base e dois teodolitos, um em cada margem, para medições até a metade da corrente. Os resultados foram os seguintes:

Faixa de larguras (m)	Erro absoluto (m)	Erro relativo %	Observações
300 a 600	2,3	± 0,4	Medições feitas de uma margem.
600 a 1200	6,7	± 0,6	Medições feitas de ambas as margens

F-3 ERROS EM PROFUNDIDADES (X_h)

F-3.1 Como exemplo, os erros na medição de profundidades, utilizando-se um cabo de sondagem em um rio aluvionar onde as profundidades variaram de 2 a 7 m e as velocidades variaram até 1,5 m/s, foram da ordem de 0,05 m.

F-3.2 Como outro exemplo, tomaram-se os erros em medições com haste de sondagem até a profundidade de 6 m e acima deste valor com cabo de sondagem, fazendo-se as correções indicadas na Tabela 1 do Anexo B. As observações foram feitas na faixa de 0,087 a 1,3 m/s, chegando-se ao resultado seguinte:

Faixa de profundidade (m)	Erro Absoluto (m)	Erro relativo %	Observações
0,4 a 6	0,04	± 0,7	Com haste de sondagem.
6 a 14	0,05	± 0,4	Com cabo de sondagem fazendo-se as correções do Anexo D

F-4 ERRO NAS DETERMINAÇÕES DE VELOCIDADES NOS PONTOS

Como orientação, quando o período de medição em cada ponto é 40 segundos, ou aproximadamente 100 revoluções, o valor de X_f pode ser tomado igual a 6%.

NOTA: O exemplo dado foi obtido da análise de uma grande quantidade de dados, cobrindo a faixa de profundidades de 0,8 a 10 m e velocidades de 0,1 a 2 m/s.

F-5 ERROS DA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA

F-5.1 Números de pontos (X_o)

Como orientação, a ordem deste erro pode ser tomada da maneira seguinte:

Método	Erro relativo X_o %
Distribuição de velocidades	± 0,5
Dois Pontos	± 3
Medições a 0.6 da profundidade	± 3,5

NOTA: Os valores acima foram avaliados a partir de dados disponíveis, cobrindo a

faixa de velocidades de 0,1 a 2,0 m/s e profundidades de 0,8 a 10 m. Em muitos casos houve variações consideráveis desses valores, e os resultados dependem dos instrumentos e técnicas utilizadas.

F-5.2 VELOCIDADE MÉDIA NA VERTICAL (\bar{X}_v)

F-5.2.1 O erro cometido no cálculo da velocidade média a partir de medições em pontos isolados é obtido combinando-se o erro da determinação da velocidade, nos pontos, com o erro decorrente do número de pontos de medição na vertical (Ver F-4 e F-5.1).

F-5.2.2 O erro no método da integração, onde a velocidade média é determinada diretamente, pode ser tomado igual a $\pm 2,5\%$.

F-5.3 Número de verticais (X_m)

No caso de rios largos com perfis de leito irregulares, podem ser tomados os valores seguintes:

Número de verticais m	Erro relativo X_m %
8	± 5
15	± 3
50	± 1

NOTA: Os valores acima estão baseados na análise de resultados de um grande número de rios, com profundidades variando de 0,8 a 10m, larguras de 12 a 600 m, velocidades de 0,1 a 2 m/s e vazões de 1 a 1 600 m³/s.