

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária

PHD – 307 Hidrologia Aplicada



Prof. Dr. Rubem La Laina Porto

Prof. Dr. Kamel Zahed Filho

Ricardo Martins da Silva

São Paulo, 2001



Resumo

São apresentados diversos métodos para a medição de vazão em cursos d'água naturais: volumétrico, colorimétrico, calhas e vertedores, ultra-som e por velocidade. São detalhadas as diversas formas de medição com molinete: a vau, sobre pontes, com barco fixo ou em movimento e em teleféricos. São discutidos os cuidados para se obter a melhor precisão nos resultados.

São explicados o conceito de curva-chave, as condições hidráulicas para sua validade e sua aplicação prática. São apresentadas as diversas formas de obtenção de registros de nível d'água: escalas limnimétricas, limnígrafos de bóia, de borbulhador, de células de pressão, ultrassônicos. A determinação dos parâmetros da curva-chave é conceituada e é apresentada uma forma para sua obtenção utilizando-se a ferramenta SOLVER do Excel.

Objetivo

Você deverá, após o estudo deste texto, ser capaz de:

- Conhecer os diversos processos de medição de vazão;
- Saber calcular uma vazão, pelo processo de medição com molinete;
- Saber as condições ideais para uma medição de vazão;
- Saber escolher uma seção de um rio para ser uma estação fluviométrica;
- Saber obter os parâmetros de uma curva-chave.



Referências Bibliográficas

Você encontrará em mais detalhes o assunto tratado nesta apostila nas seguintes referências:

- Chow, V.T..- Handbook of Applied Hydrology –Mc-Graw-Hill Book Company- 1964.
- Chow, V.T.; Maidment, D.R.;Mays, L.W. - Applied Hydrology. New York, McGrawHill, 572p. 1988.
- Maidment, D.R. – Handbook of Hydrology. New York, McGrawHill, 1993
- Tucci, C.E. M. - Hidrologia – Ciência e Aplicação – Editora.da Univ. Federal do Rio Grande do Sul, EDUSP e ABRH- 1997.
- Pinto, N.L.S. et al. – Hidrologia Básica – São Paulo: Edgard Blucher, 1976.
- Linsley, R.K. – Engenharia de Recursos Hídricos – Mc Graw Hill do Brasil/ Editora da Universidade de São Paulo, 1978.
- Bras, R.L. – Hydrology – A Introduction to Hydrologic Science – Addison-Wesley Publishing Company – 1990.



Índice

1	Introdução	4
2	Medição de vazão	5
2.1	Tipos de Medição de Vazão	6
2.1.1	Volumétrico	6
2.1.2	Calhas Parshall	6
2.1.3	Vertedor	9
2.1.4	Ultrassônico	12
2.1.5	Eletromagnético	13
2.1.6	Colorimétrico ou radioativo	14
2.1.7	Molinete	15
2.2	Tipos de medição de vazão com molinete	17
2.2.1	A vau	17
2.2.2	Sobre ponte	17
2.2.3	Com teleférico	18
2.2.4	Com barco fixo	19
2.2.5	Com barco móvel	19
2.3	Cálculo de uma vazão a partir de uma medição	19
2.3.1	Determinação da velocidade média no perfil	21
2.3.2	Medida da área da seção e determinação da área de influência	22
3	Medição do Nível d'Água	29
3.1	Régua (limnímetro)	29
3.2	Limnígrafo	30
3.2.1	Quanto à medição	30
3.2.2	Quanto à transmissão do sinal	32
3.2.3	Quanto à gravação	33
4	Curva-chave	34
4.1	Ferramentas iterativas	39
4.2	Validade da Curva-Chave	45
4.2.1	Variação da curva-chave com o tempo	45
4.2.2	Extrapolação da curva-chave	46
5	Síntese	47



1 Introdução

A Hidrologia Aplicada irá estudar o Ciclo Hidrológico do ponto de vista quantitativo. O escoamento superficial das águas normalmente é medido ao longo dos cursos d'água, criando-se séries históricas que são extremamente úteis para diversos estudos e projetos de Engenharia, basicamente para responder a perguntas típicas como : onde há água, quanto há de água ao longo do tempo e quais são os riscos de falhas de abastecimento de uma determinada vazão em um ponto de um curso d'água.

No planejamento e gerenciamento do uso dos recursos hídricos, o conhecimento das vazões é necessário para se fazer um balanço de disponibilidades e demandas ao longo do tempo.

Em projetos de obras hidráulicas, as vazões mínimas são importantes para se avaliar, por exemplo, calado para navegação, capacidade de recebimento de efluentes urbanos e industriais e estimativas de necessidades de irrigação; as vazões médias são aplicáveis a dimensionamentos de sistemas de abastecimento de águas e de usinas hidrelétricas; as vazões máximas, como base para dimensionamento de sistemas de drenagem e órgãos de segurança de barragens, entre outras tantas aplicações.

Em operação de sistemas hidráulicos, onde poderiam se destacar sistemas de navegação fluvial, operação de reservatórios para abastecimento ou geração de energia e sistemas de controle ou alerta contra inundações.

Sem as informações básicas de vazões, os projetos de aproveitamento de recursos hídricos tendem a ser menos precisos, conduzindo a resultados duvidosos, que ora tendem a ser extremamente conservadores e custosos, ora a serem de risco superior ao admitido.

O levantamento dos dados de vazões pode ser feito pelo Estado, para estabelecer



uma rede hidrométrica básica, ou por empresas que tenha interesse particular em determinadas informações, como as empresas de geração de energia, de saneamento e as do setor agroindustrial.

A descrição dos processos de medição de vazões em cursos d'água visa também demonstrar as incertezas envolvidas nas medições e nos cálculos, alertando o usuário do dado sobre as incertezas que ele deve incorporar a seus estudos.

As medições de vazão são feitas periodicamente em determinadas seções dos cursos d'água (as estações ou postos fluviométricos). Diariamente ou de forma contínua medem-se os níveis d'água nos rios e esses valores são transformados em vazão através de uma equação chamada de curva-chave.

Curva-chave é uma relação *nível-vazão* numa determinada seção do rio. Dado o nível do rio na seção para a qual a expressão foi desenvolvida, obtém-se a vazão. Não é apenas o nível da água que influencia a vazão: a declividade do rio, a forma da seção (mais estreita ou mais larga) também alteram a vazão, ainda que o nível seja o mesmo. Entretanto, tais variáveis são razoavelmente constantes ao longo do tempo *para uma determinada seção*. A única variável temporal é o nível. Desta forma, uma vez calibrada tal expressão, a monitoração da vazão do rio no tempo fica muito mais simples e com um custo muito menor.

2 Medição de vazão

Para se determinar a expressão da curva-chave, precisamos *medir* a vazão para diversos níveis. Tais pares de pontos podem ser interpolados, definindo a expressão matemática da curva-chave.



2.1 Tipos de Medição de Vazão

As medições de vazão podem ser feitas de diversas formas, que utilizam princípios distintos: volumétrico, colorimétrico, estruturas hidráulicas (calhas e vertedores), velocimétrico, acústico e eletromagnético. A escolha do método dependerá das condições disponíveis em cada caso. Cada um destes métodos será descrito a seguir, para se poder analisar a oportunidade de aplicação de cada um deles.

2.1.1 Volumétrico

Este método é baseado no conceito volumétrico de vazão, isto é, vazão é o volume que passa por uma determinada seção de controle por unidade de tempo.

Utiliza-se um dispositivo para concentrar todo o fluxo em um recipiente de volume conhecido. Mede-se o tempo de preenchimento total do recipiente. Este processo é limitado a pequenas vazões, em geral pequenas fontes d'água, minas e canais de irrigação.

2.1.2 Calhas Parshall

As calhas Parshall são, assim como os vertedores, são estruturas construídas no curso d'água e possuem sua própria “curva-chave”. Assim, a determinação de vazão a partir do nível é direta para a seção onde a mesma está instalada. Entretanto, se não há ondas de cheia propagando pelo canal, a vazão que passa pela calha é a mesma que passa por qualquer outra seção do rio. Pode-se então determinar a curva-chave para outras seções de interesse medindo o nível da água em tais seções e relacionando-os com a vazão medida pela calha ou vertedor.

O método (calha ou vertedor) se aplica a escoamentos sob [regime fluvial](#)¹. O princípio consiste em forçar a mudança deste comportamento para o [regime torrencial](#)¹, medindo-se a profundidade crítica.



No caso da calha, tal mudança é condicionada por um estreitamento da seção.

Portanto, com o conhecimento do nível da água na região da profundidade crítica determina-se a vazão do canal, uma vez que a forma da seção da calha e a cota de fundo são conhecidas. Se a saída de jusante se dá de forma livre (sem afogamento), a vazão pode ser assim determinada:

$$Q_L = k \cdot H^n$$

- Q_L : vazão do canal;
- H : profundidade crítica;
- K e n : constantes que dependem das características da calha;

Caso a saída da água do canal se dá sob afogamento, forma-se um ressalto hidráulico e a vazão calculada pela expressão acima precisa ser corrigida:

$$Q_A = Q_L \cdot C$$

- Q_A : vazão do canal;
- C : coeficiente de redução;

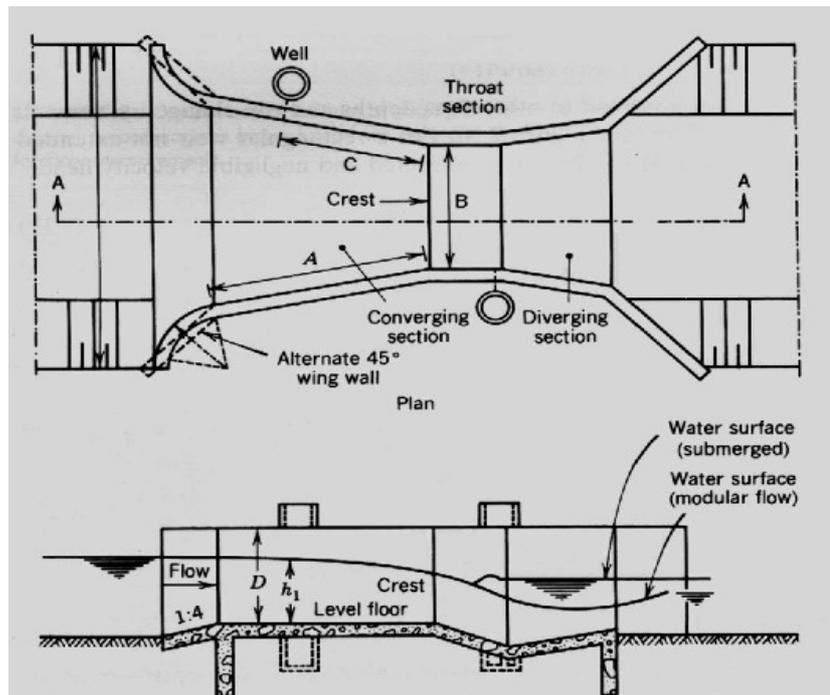


Figura 1 – Representação esquemática da calha Parshall ilustrando as condições de afogamento e saída livre.



Figura 2 – Calha Parshall

As calhas Parshall não interferem no escoamento (como ocorre com os vertedores, ao provocarem o remanso), mas apresentam um forte limitante: sua viabilidade está restrita a pequenos canais.

2.1.3 Vertedor

Este dispositivo também se baseia na determinação da vazão a partir da medição do nível d'água. Existem diversos modelos de vertedores, com diferentes curvas que relacionam o nível d'água com a respectiva vazão, vistos com detalhes em [Hidráulica I](#). Os mais utilizados são:

Vertedores triangulares:

A relação e a figura abaixo exemplificam o vertedor tipo Thompson, um vertedor triangular com ângulo reto.

$$Q = 1,42 \cdot H^{\frac{5}{2}}$$



- Q: vazão do canal em m^3/s ;
- H: nível d'água com relação ao vértice de ângulo reto em m ;



Figura 3 – Vertedor triangular

Vertedores retangulares:

Como exemplo, citamos o tipo Francis:

$$Q = 1.84 \cdot \left(L - 0.2 \cdot H \right)^{\frac{3}{2}}$$

- Q: vazão do rio em m^3/s ;
- L: largura da base do vertedor em m ;
- H: nível d'água em m ;



Figura 4 – Vertedor retangular

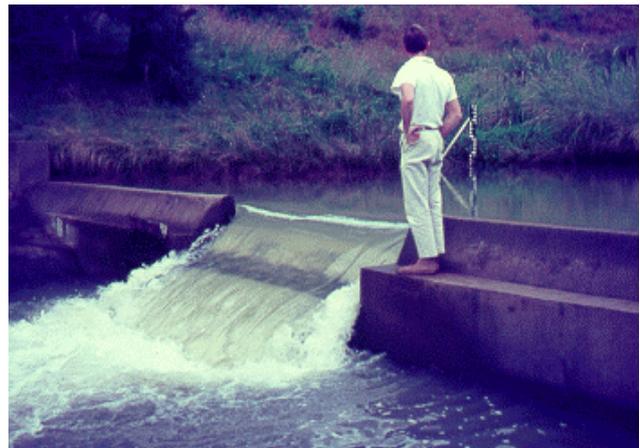
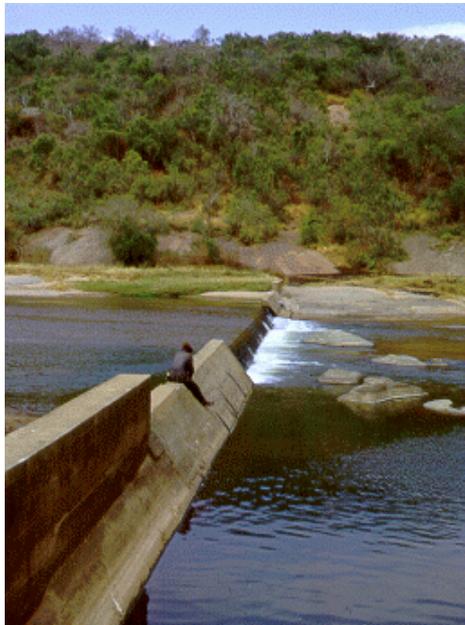


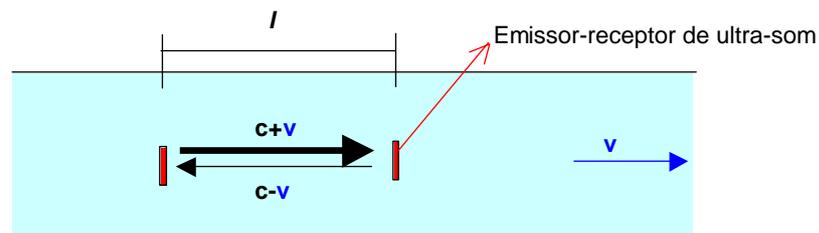
Figura 5 – Vertedor retangular em rio e passagem nítida do regime fluvial para torrencial – profundidade crítica

A aplicação dos tipos de vertedor depende da vazão que se mede. O vertedor triangular é mais preciso, com erro relativo à vazão da ordem de 1%, sendo entretanto menos sensível ao vertedor triangular, que apresenta erros relativos à vazão de 1 a 2%. Para vazões baixas o acréscimo de precisão atenua-se e o decréscimo de sensibilidade acentua-se, sendo portanto aconselhável o uso do vertedor triangular para vazões abaixo



de 0,030 m³/s.

Um inconveniente dos vetedores é a necessidade de sua construção, com custo apreciável. Além disso, o assoreamento e o remanso (elevação do nível) provocado a montante constituem outras desvantagens dos vetedores.



2.1.4 Ultrassônico

Dois aparelhos emissor-receptores de ultra-som são posicionados de forma a emitirem pulsos de cerca de 4Mhz na direção do fluxo de água. De montante para jusante a propagação do pulso é favorecida pelo fluxo de água, tendo a velocidade v acrescida à sua velocidade de propagação neste meio fluido. No sentido oposto, ocorre o contrário. Assim, como os dois pulsos são produzidos simultaneamente aparece uma defasagem no tempo de recepção.

$$\Delta T = l \cdot \left(\frac{1}{c-v} - \frac{1}{c+v} \right) \Rightarrow \Delta T = \frac{2 \cdot l \cdot v}{c^2 + v^2} \approx \Delta T = \frac{2 \cdot l \cdot v}{c^2}$$

$$v = \frac{c^2 \cdot \Delta T}{2 \cdot l}$$

- ΔT : diferença de tempo entre a recepção dos pulsos;
- c : velocidade de propagação do som no fluido;
- l : distância entre os emissor-receptores;
- v : velocidade do escoamento na linha que liga os dois aparelhos;



O aparelho da figura 6 baseia-se em outro princípio, o efeito Doppler.

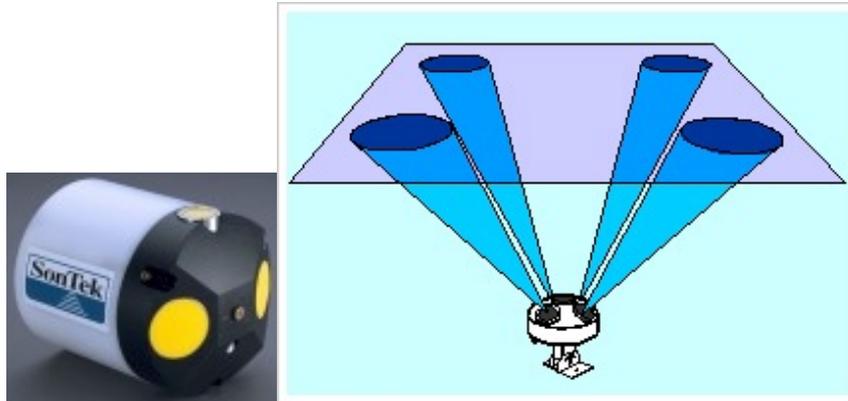


Figura 6 – Medidor de vazão ultrassônico baseado no efeito Doppler

Possui emissores e receptores apontados para diversas direções. O pulso de ultrassom emitido pelo aparelho é refletido por partículas presentes na água. Assim, o pulso **refletido** por uma partícula que caminha ao encontro do aparelho é captado por este com uma frequência maior à que foi emitida. Por outro lado, o pulso refletido por uma partícula que se afasta do equipamento chega com velocidade e frequência menores que as emitidas. Com base nesta diferença de frequência produzida pelo efeito Doppler, o aparelho calcula diretamente a vazão do rio. Este equipamento possui um alcance de mais de 22 m e é bastante utilizado para monitorar a vazão de forma permanente, sendo fixado, por exemplo, em pilares de pontes.

2.1.5 Eletromagnético

O princípio eletromagnético do método determina o perfil de velocidades do escoamento. Assim, com o perfil da seção do rio pode se calcular sua vazão.

Um aparelho gera um campo magnético na água. Os íons presentes na água (concentração conhecida) movem-se com a velocidade da mesma e alteram o campo magnético que foi produzido. Tal perturbação é medida, fornecendo indiretamente a velocidade com que as partículas carregadas passaram pelo campo.



2.1.6 Colorimétrico ou radioativo

Há situações em que a aplicação dos métodos anteriores é inviável ou até mesmo impossível. Por exemplo,

- escoamentos com velocidades altas, muita turbulência e leito irregular, como rios de montanhas;
- perigos devido a transporte de grandes sólidos, como troncos de árvores, ou ainda presença de cachoeiras, etc.

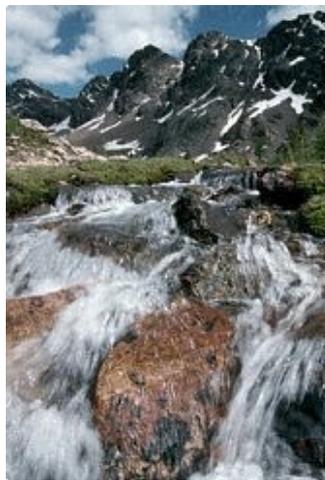


Figura 7 – Rio de montanha

Em casos como estes, pode-se utilizar uma técnica interessante, baseada na diluição de um produto químico (ex: corante) de concentração conhecida aplicado continuamente numa determinada seção do rio. Numa seção a jusante (o escoamento deve ser suficientemente turbulento para provocar a total diluição), mede-se a concentração deste produto.

A medição é feita depois de estabelecido o *regime permanente*, ou seja, têm-se ao mesmo tempo aplicação do traçador (solução química com vazão conhecida) na *seção 1* e medição desta solução diluída na *seção 2 a jusante*.



A vazão pode então ser assim determinada:

$$q \cdot C_1 = (Q + q) \cdot C_2$$

- q : vazão do produto traçador;
- Q : vazão do rio;
- C_1 : concentração inicial do traçador;
- C_2 : concentração após total diluição no rio;

O produto químico utilizado como traçador não deve reagir com impurezas existentes na água do rio e muito menos ser prejudicial à fauna ou à flora. Caso seja radioativo, deve-se corrigir o efeito do decaimento no tempo.

2.1.7 Molinete

São aparelhos dotados basicamente de uma hélice e um “conta-giros”, medindo a velocidade do fluxo d’água que passa por ele (figura 8). Assim, quando posicionado em diversos pontos da seção do rio determinam o perfil de velocidades desta seção. Com tal perfil e a geometria da seção, determina-se a vazão como se verá adiante.

O princípio de funcionamento é o seguinte: mede-se o tempo necessário para que a hélice do aparelho dê um certo número de rotações. O “conta-giros” envia um sinal ao operador a cada 5, 10 ou qualquer outro número de voltas realizadas. Marca-se o tempo entre alguns sinais e determina-se o número de rotações por segundo (n). O equipamento possui uma curva calibrada do tipo $V = a \cdot n + b$ (onde a e b são características do aparelho), que fornece a velocidade V a partir da frequência n da hélice.

O molinete pode ser utilizado de diversas formas, descritas no *item 2.2*.

Caso o molinete não seja fixo numa haste, deve-se prendê-lo a um lastro (peso entre 10 e 100 kg) para que fique aproximadamente na vertical. Este lastro tem a forma



parecida com a de um peixe, com mostra a figura 9.



Figura 8 – Molinete

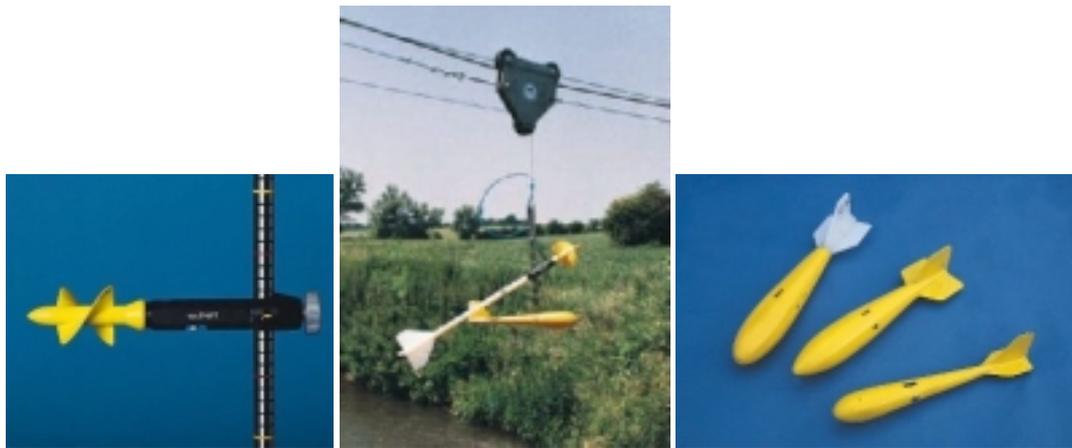


Figura 9 – Molinete preso a haste, preso a cabo com lastro (embaixo) e lastro (peixes)

As velocidades limites que podem ser medidas com molinete são de cerca de 2,5 m/s com haste e de 5 m/s com lastro. Acima destes valores os riscos para o operador e o equipamento passam a ser altos. Em boas condições, a precisão relativa para uma vazão assim medida é de cerca de 5%.



2.2 Tipos de medição de vazão com molinete

2.2.1 A vau

Este método é aplicado a medições com nível d'água não superior a 1,20 m e velocidade compatível com a segurança do operador. Consiste em prender o molinete numa haste, sempre tomando o cuidado de mantê-lo a uma distância mínima do leito (aproximadamente 20 cm)



Figura 10 – Medição a vau

2.2.2 Sobre ponte

Apesar de apresentar certa facilidade para uma medição de vazão com molinete, a seção de uma ponte pode interferir na velocidade do escoamento. Se a ponte possui pilares apoiados no leito do rio, o escoamento é alterado e pode provocar erosão no leito. A determinação da geometria da seção é mais complicada. Uma alternativa seria afastar ao máximo o molinete da ponte através de suportes, fazendo-se assim as medições numa seção menos influenciada.



Figura 11 – Utilização de ponte como suporte

2.2.3 Com teleférico

No caso de não se dispor de pontes e o rio ser profundo, mas não muito largo, pode-se utilizar o recurso do teleférico para levantar o perfil de velocidades. Há casos também em que há material transportado pelo rio (toras), sendo aplicado este método para a segurança do operador.

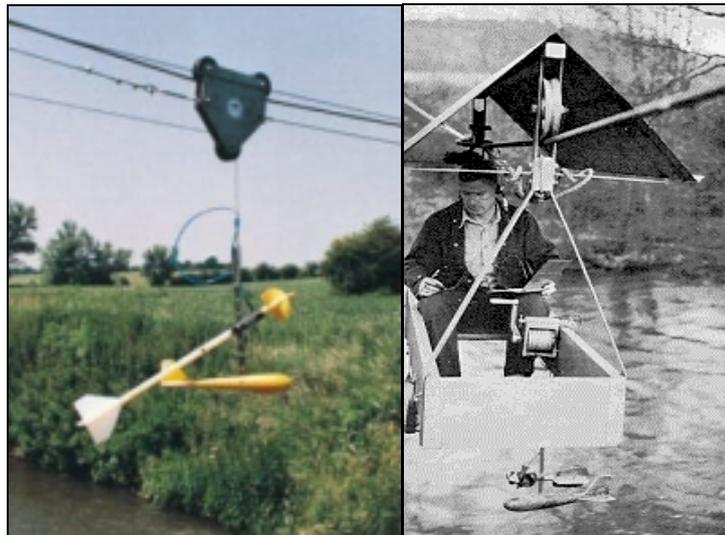


Figura 12 – Medição com teleférico



2.2.4 Com barco fixo

Num rio como o do item anterior (desde que não haja material de grande porte transportado) pode-se também utilizar o recurso do *barco fixo*. O barco é preso nas margens do rio através de cabos, sendo este o método mais comum de medição com molinete.

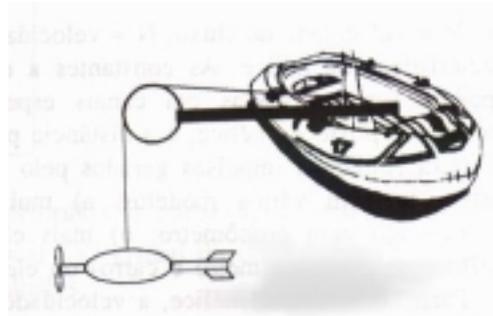


Figura 13 – Medição com barco fixo

2.2.5 Com barco móvel

Se o rio for de largura suficiente para inviabilizar o uso de cabos, pode-se ainda fazer a medição com o barco em movimento. O barco se desloca com uma velocidade constante de uma margem a outra, com o molinete fixado num leme especial a uma profundidade constante. A decomposição da velocidade do barco e das velocidades indicadas pelo molinete possibilita estabelecer a velocidade média da água na profundidade escolhida. A medição se repete a várias profundidades.

2.3 Cálculo de uma vazão a partir de uma medição

Alguns dos métodos descritos anteriormente fornecem diretamente a vazão numa determinada seção do rio. Outros, como molinete e o ultrassônico, fornecem o perfil de velocidades da seção. Nestes casos, precisamos ainda da geometria da seção para calcular a vazão que passa por ela.

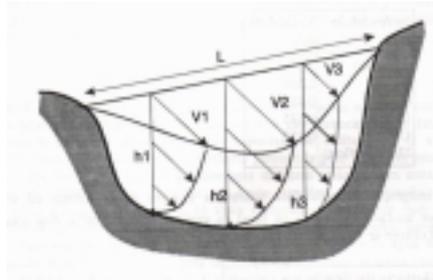


Figura 14 – Perfil de velocidades fornecido pelo método ultrassônico ou por molinete

A descarga líquida ou vazão de um rio é definida como sendo o volume de água que atravessa uma determinada seção num certo intervalo de tempo. Ou ainda, pode ser expressa como:

$$Q = V \cdot S$$

onde:

- Q: vazão em m³/s;
- V: velocidade do escoamento;
- S: área da seção;

Como a seção do rio é irregular e as medições de velocidades são feitas em alguns pontos representativos, a vazão total é calculada como sendo a soma de parcelas de vazão de faixas verticais. Para se calcular a vazão de tais parcelas utiliza-se a **velocidade média** no perfil e sua **área de influência**.

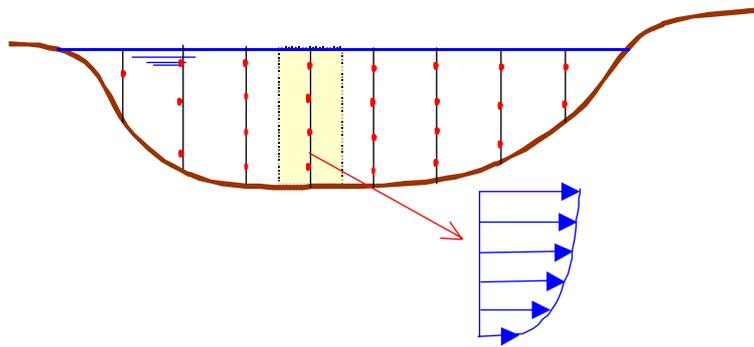


Figura 15 – Perfil de velocidades, pontos de medição e área de influência.

2.3.1 Determinação da velocidade média no perfil

Normalmente, utiliza-se quatro processos principais:

- Pontos múltiplos;
- Dois pontos;
- Um ponto;
- Integração;

O primeiro consiste em realizar uma medida no fundo (0,15 m a 0,20 m do leito), uma na superfície (0,10 m de profundidade) e, entre esses dois extremos, vários pontos que permitam um bom traçado da curva de velocidades em função da profundidade. Calculando-se a área desse diagrama e dividindo-a pela profundidade, tem-se a velocidade média na vertical considerada. Toma-se a velocidade superficial igual àquela medida a 0,10 m e a de fundo como sendo a *metade* da mais próxima ao leito.

O segundo processo baseia-se na constatação experimental de que a velocidade média numa vertical aproxima-se com boa precisão da média aritmética entre a velocidade medida a 0,2 e 0,8 da profundidade.

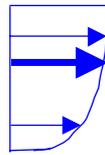


Figura 16 – Medição a 0,2 e 0,8 da profundidade

Quando a profundidade é pequena (menos de um metro), o método anterior não se aplica, pois a medição a 0,8 da profundidade fica muito próxima ao leito, havendo contato do contrapeso com o fundo do rio. Nestes casos utiliza-se o processo do ponto único, onde se aproxima a velocidade média pela medida a 0,6 da profundidade (contada a partir da superfície).

O processo de integração consiste em deslocar o aparelho na vertical com velocidade constante e anotarem-se, além da profundidade total, o número de rotações e o tempo para chegar à superfície. Tem-se assim diretamente a velocidade média.

2.3.2 Medida da área da seção e determinação da área de influência

A profundidade numa vertical é medida através do próprio elemento sustentador do molinete, seja ele uma haste graduada (a partir do fundo) ou cabo (a partir da superfície da água). Isto é feito ao se levantar o perfil de velocidades naquela vertical, tocando o leito com o “peixe” ou com a haste. Em rios muito profundos e/ou com altas velocidades de escoamento onde a medição com cabos e lastros torna-se inaplicável, pode-se utilizar recursos como a batimetria e os sonares.

A distância horizontal entre as margens pode ser determinada através de cabo graduado ou teodolitos.

As verticais onde se levantam os perfis de velocidades não devem ser muito próximas (custo adicional sem ganho considerável de informações), assim como também não devem ser muito distantes (perda da representatividade do modelo). A tabela abaixo sugere espaçamentos entre tais verticais:



Tabela 1 – Cuidados no espaçamento das medições para uma boa representatividade do perfil (Fonte: Anuário Fluviométrico n. 2 Ministério da Agricultura - DNPM – 1941)

Largura do rio (m)	Espaçamento n.º ax (m)
Até 3	0.30
3 a 6	0.50
6 a 15	1.00
15 a 30	2.00
30 a 50	3.00
50 a 80	4.00
80 a 150	6.00
150 a 250	8.00
250 a 400	12.00

Como já foi citado, a área de influência multiplicada pela velocidade média do escoamento na mesma resulta a vazão neste elemento.

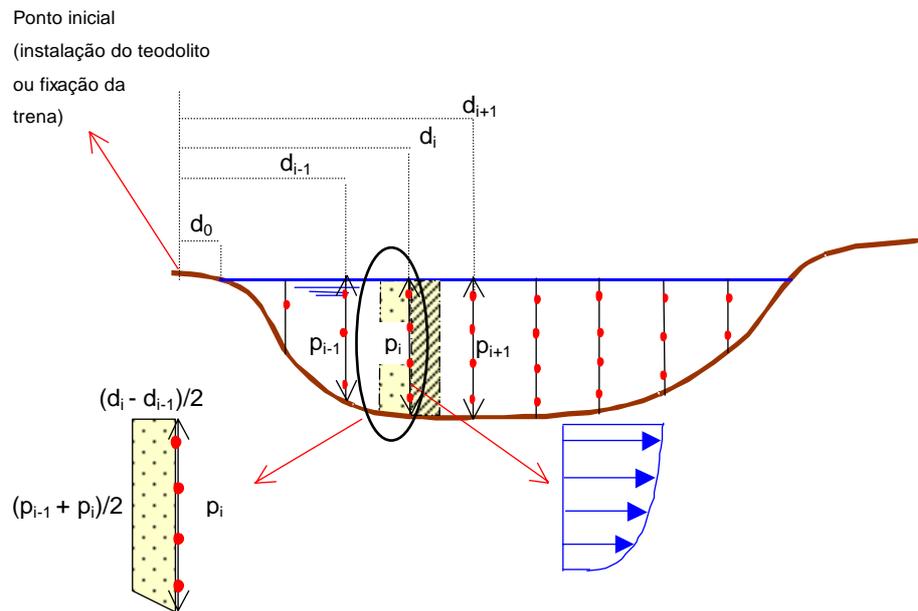


Figura 17 – Área de influência de um perfil de velocidades

A área de influência A_i de um determinado perfil de velocidades V_i é formada pela soma de duas áreas trapezoidais, como indica a figura acima.

$$A_i = \frac{\left(\frac{P_{i-1} + P_i}{2} + P_i \right)}{2} \cdot \frac{(d_i - d_{i-1})}{2} + \frac{\left(P_i + \frac{P_{i+1} + P_i}{2} \right)}{2} \cdot \frac{(d_{i+1} - d_i)}{2}$$

Exemplo 1

Com a folha de medição de descargas fornecida, calcular a vazão do rio sabendo-se que cada contagem de rotações do molinete foi feita em 50 segundos. A curva de calibração do aparelho segue abaixo:



$$V = 0.2465 \cdot n + 0.013 \text{ para } n \leq 0.69 ;$$

$$V = 0.2595 \cdot n + 0.004 \text{ para } n > 0.69 ;$$

Tabela 2 – Dados do levantamento de campo

Vertical	Distância ao ponto inicial	Profundidade vertical	Rotações do eixo do molinete		
			0.2 h	0.6 h	0.8 h
1	1.40	0.40	---	---	---
2	4.40	1.58	11	---	11
3	5.40	1.91	31	---	18
4	6.40	1.99	35	---	37
5	7.0	2.25	40	---	41
6	8.40	2.53	54	---	34
7	9.40	2.60	55	---	46
8	10.40	2.57	58	---	36
9	11.40	2.40	59	---	39
10	12.40	2.29	63	---	44
11	13.40	2.15	67	---	42
12	14.40	2.00	67	---	50
13	15.40	1.99	65	---	40
14	16.40	1.94	65	---	43
15	17.40	1.56	65	---	57
16	18.40	1.25	35	---	39
17	20.50	0.10	---	---	---

Como o procedimento se repete, mostraremos apenas o cálculo da vazão na área de influência da vertical nº 16. Obviamente o mesmo deveria ser feito para todas as verticais compreendidas entre 2 e 16, sendo a vazão total do rio igual à soma destas parcelas. As verticais de número 1 e 17 estão posicionadas nas margens do rio.

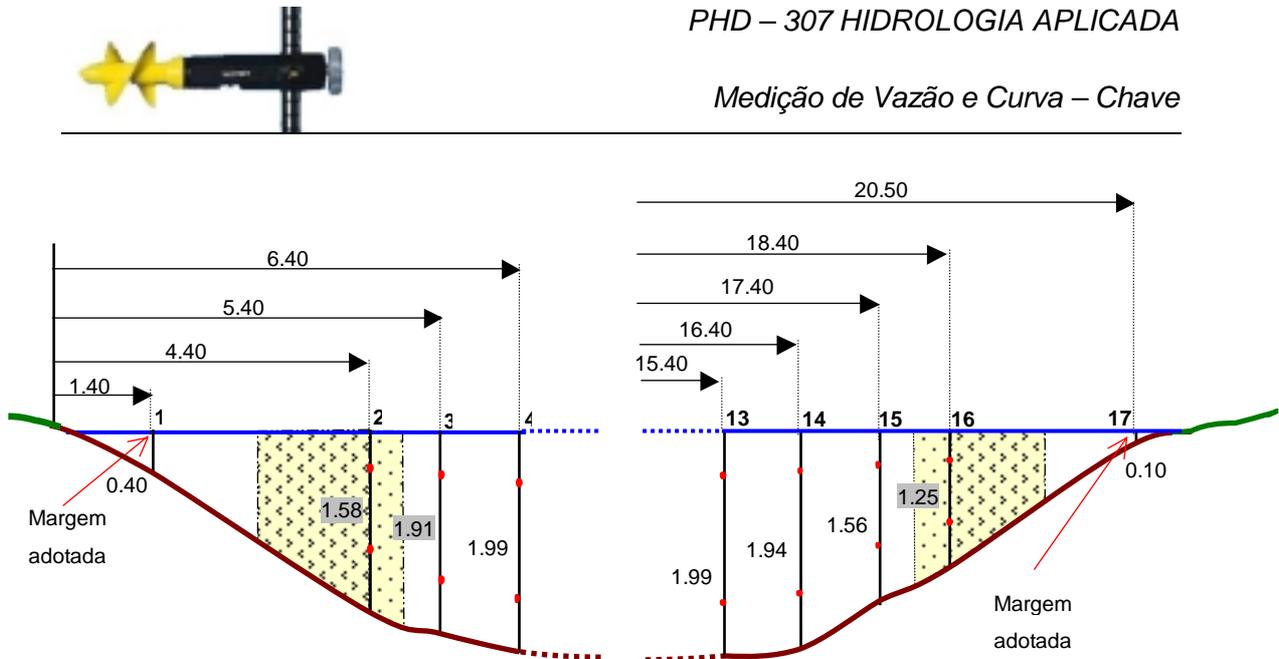


Figura 18 – Seção transversal do rio e as áreas de influência das verticais 2 e 16.

$$A_{16} = \left(\frac{P_{15} + P_{16} + P_{16}}{2} \right) \cdot \frac{(d_{16} - d_{15})}{2} + \left(\frac{P_{16} + \frac{P_{17} + P_{16}}{2}}{2} \right) \cdot \frac{(d_{17} - d_{16})}{2}$$

$$A_{16} = \left(\frac{1.56 + 1.25}{2} + 1.25 \right) \cdot \frac{(18.40 - 17.40)}{2} + \left(1.25 + \frac{0.10 + 1.25}{2} \right) \cdot \frac{(20.50 - 18.40)}{2}$$

$$A_{16} = 0.664 + 1.011 = 1.674 m^2$$

A velocidade média do perfil desta vertical pode ser calculada pelo método dos dois pontos, lembrando-se que a tabela fornece o **número de rotações do eixo** do molinete que deve ser convertido em velocidade.

Determinando-se a frequência de rotação do eixo (n) com base no tempo de exposição do molinete (50 s) e utilizando-se sua curva de calibração, obtemos a velocidade.



Vertical	Rotações		n (r.p.s.)	V _h (m/s)
16	0.2 h	35	0.70 (>0.69)	0.186
	0.8 h	39	0.78 (>0.69)	0.206

Assim,

$$V_{16} = \frac{V_{0.2h} + V_{0.8h}}{2} = \frac{0.186 + 0.206}{2} = 0.196 \text{ m/s}$$

Portanto,

$$Q_{16} = V_{16} \cdot A_{16} = 0.196 \cdot 1.674 = 0.328 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para se obter a vazão do rio, soma-se as vazões de todas as parcelas contribuintes.

Tabela 3 – Planilha de cálculo da vazão

Vertical	n ₁	n ₂	V ₁ (m/s)	V ₂ (m/s)	Área de Influência (m ²)	Velocidade média (m/s)	Q _i (m ³ /s)
2	0,22	0,22	0,067	0,067	2,759	0,067	0,185
3	0,62	0,36	0,166	0,102	1,879	0,134	0,251
4	0,70	0,74	0,186	0,196	1,602	0,191	0,306
5	0,80	0,82	0,212	0,217	2,280	0,214	0,488
6	1,08	0,68	0,284	0,181	2,996	0,232	0,696
7	1,10	0,92	0,289	0,243	2,588	0,266	0,689
8	1,16	0,72	0,305	0,191	2,553	0,248	0,633
9	1,18	0,78	0,310	0,206	2,408	0,258	0,622
10	1,26	0,88	0,331	0,232	2,286	0,282	0,644
11	1,34	0,84	0,352	0,222	2,149	0,287	0,616
12	1,34	1,00	0,352	0,264	2,018	0,308	0,621
13	1,30	0,80	0,341	0,212	1,985	0,276	0,549
14	1,30	0,86	0,341	0,227	1,899	0,284	0,540
15	1,30	1,14	0,341	0,300	1,569	0,321	0,503
16	0,70	0,78	0,186	0,206	1,674	0,196	0,328
Vazão Total (m³/s)							7,671

Perceba que uma pequena área (em verde) próxima a cada margem foi desconsiderada, como mostra a figura abaixo:

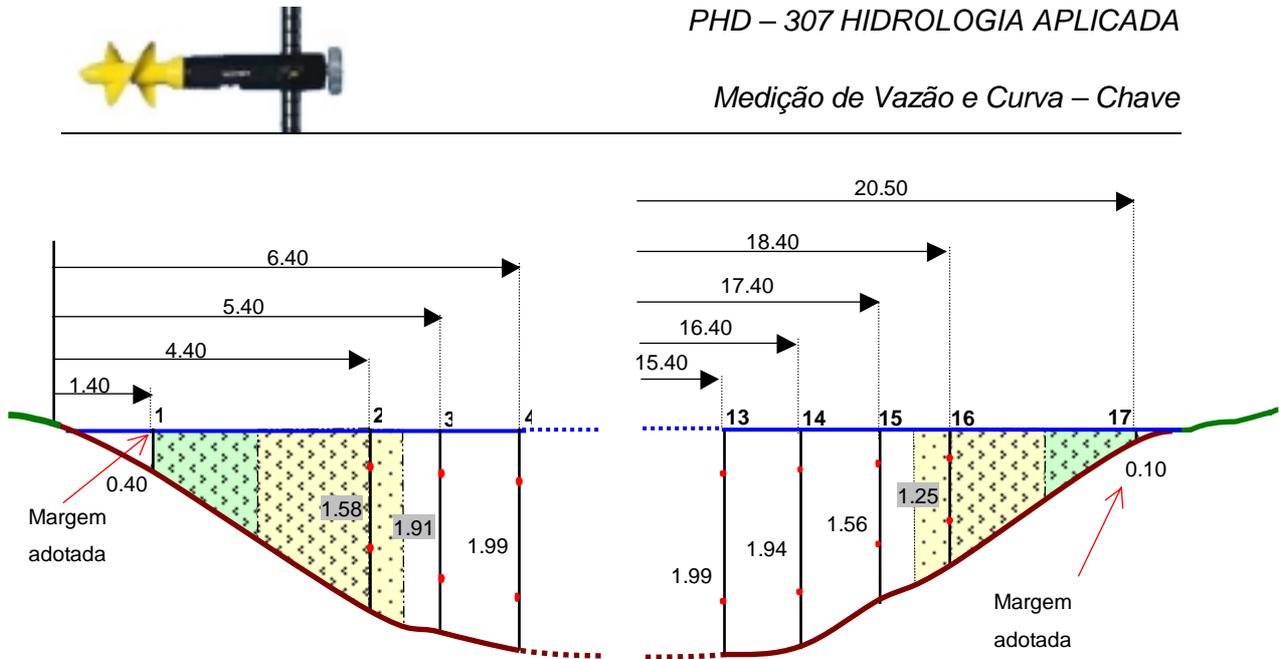


Figura 19 – Áreas próximas às margem não consideradas no cálculo anterior.

Vamos calcular a vazão em tais áreas, e analisar sua influência na vazão total:

$$A' = \frac{\left(\frac{P_1 + P_2}{2} + P_1\right)}{2} \cdot (d_2 - d_1) = \frac{\left(\frac{0,40 + 1,58}{2} + 0,40\right)}{2} \cdot (4,40 - 1,40) = 1,043 \text{ m}^2$$

$$A'' = \frac{\left(\frac{P_{16} + P_{17}}{2} + P_{17}\right)}{2} \cdot (d_{17} - d_{16}) = \frac{\left(\frac{1,25 + 0,10}{2} + 0,10\right)}{2} \cdot (20,50 - 18,40) = 0,407 \text{ m}^2$$

$$Q_{\text{desconsiderada}} = Q' + Q'' = V_2 \cdot A' + V_{16} \cdot A'' = 0,067 \cdot 1,043 + 0,196 \cdot 0,407 = 0,150 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{\text{CORRIGIDA}} = 7,671 + Q_{\text{desconsiderada}} = 7,671 + 0,150 = 7,821 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\text{Erro} = \frac{0,150}{7,821} = 0,02$$

A vazão corrigida difere muito pouco da vazão calculada na tabela 3. O erro cometido (2%) é menor que a precisão dos métodos de obtenção do perfil de velocidades (~10%), o que torna aceitável a aproximação feita anteriormente.



3 Medição do Nível d'Água

O nível d'água deve ser medido concomitantemente com a medição vazão na operação de determinação da curva-chave, a fim de se obter os pares de pontos cota-descarga a serem interpolados. Uma vez determinada a curva-chave (*item 4*), precisamos monitorar apenas o nível d'água para obtermos a vazão do rio. Aplicamos o sufixo *grafo* quando o monitoramento do nível se dá de forma contínua ao longo do tempo, sendo os registros feitos em papel ou data-logger. O sufixo *metro* é aplicado a métodos que fazem a verificação do nível em intervalos discretos de tempo, como a leitura da régua por um operador.

3.1 Régua (limnómetro)

A maneira mais simples para medir o nível de um curso d'água é colocar uma régua vertical na água e observar sua marcação. As réguas são geralmente constituídas de elementos verticais de 1 metro graduados em centímetro. São placas de metal inoxidável ou de madeira colocadas de maneira que o elemento inferior fique na água mesmo em caso de estiagem excepcional.



Figura 20 – Esquema de instalação e réguas na margem do rio



O observador faz leitura de cotas com uma frequência definida pelo órgão operador da estação, pelo menos uma vez por dia. Em geral a precisão destas observações é da ordem de centímetros.

3.2 Limnígrafo

Este equipamento grava as variações de nível continuamente no tempo. Isto permite registrar eventos significativos de curta duração ocorrendo essencialmente em pequenas bacias.

É possível classificar os tipos de limnígrafos segundo as quatro etapas da aquisição: medição, transmissão de sinal, gravação e transmissão do registro.

3.2.1 Quanto à medição

- Bóia flutuante;

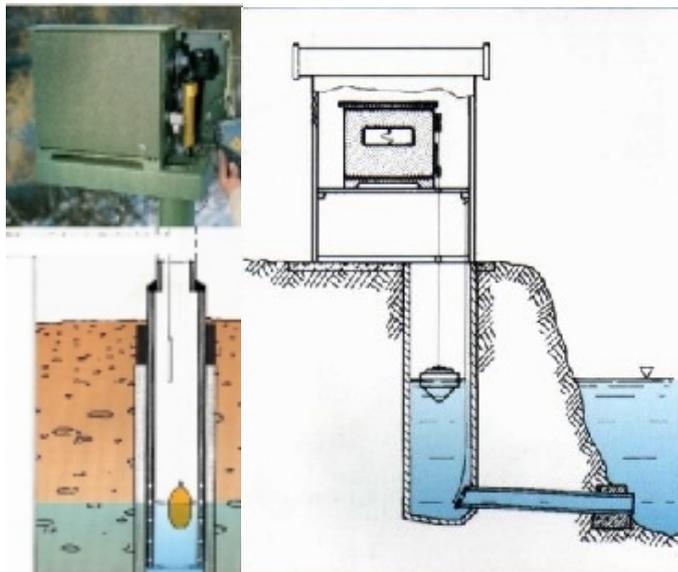


Figura 21 – Limnígrafo de bóia

- Sensor de pressão a gás, que possui uma membrana que separa o gás do



interior da célula da água do leito do rio. Tal membrana se deforma em função da coluna d'água existente sobre ela, induzindo uma determinada pressão no gás, que é constantemente monitorada;

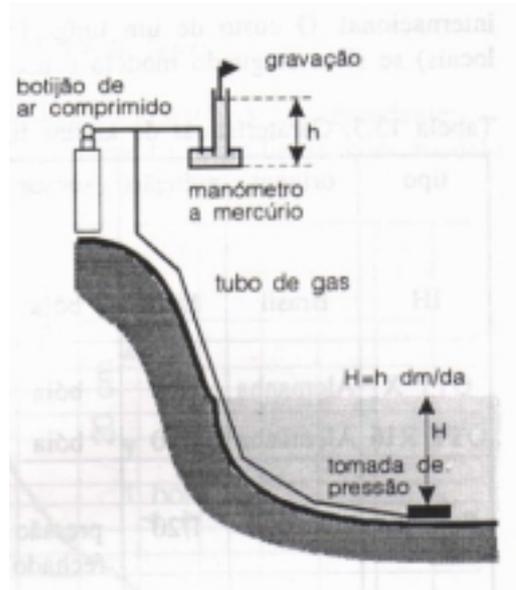


Figura 22 – Sensor de pressão

- Borbulhador – utiliza um princípio parecido com o do sensor de pressão a gás. A coluna d'água sobre o bico injetor é obtida a partir da pressão necessária para que as bolhas de ar comecem a sair.

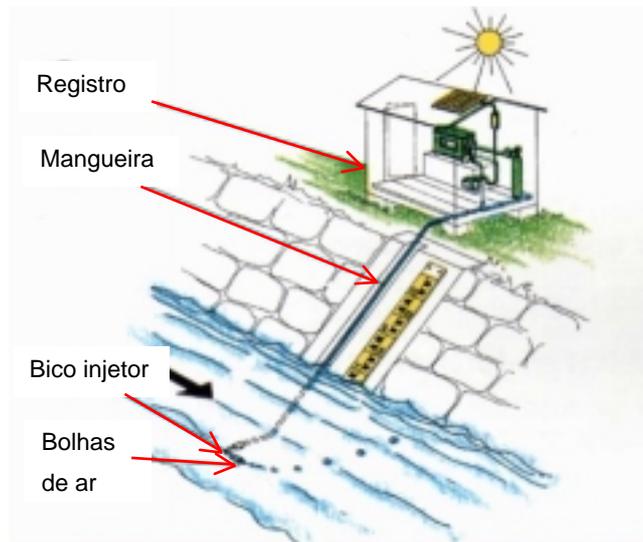


Figura 23 - Borbulhador

- Sensor eletrônico (ou transdutor de pressão), que também se baseia na deformação de uma membrana, percebida eletronicamente;
- Ultrassônico, aparelho posicionado fora da água num suporte, emitindo constantemente pulsos de ultra-som contra a superfície do rio;

3.2.2 Quanto à transmissão do sinal

- Mecânica, (pena ou codificador colocado na ponta de uma alavanca tipo “rosca sem fim” movimentada com cabo e roldana) com sistema de redução da amplitude do sinal em uma escala definida (1:1, 1:2, etc, sendo 1:10 a mais comum). O mecanismo de rosca sem fim permite que se registrem níveis d’água quaisquer sem a necessidade de se alterar a dimensão do limnógrafo. Quando o cursor (“pena”) atinge o final do curso, seu trajeto é revertido. No gráfico do limnograma (NA x tempo) esta reversão aparecerá como um ponto anguloso.

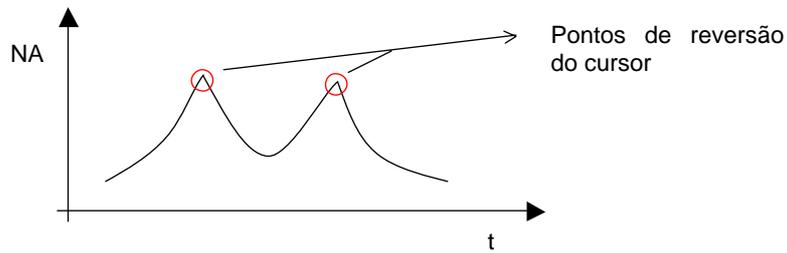


Figura 24 – Pontos de reversão do cursor num limnigrama

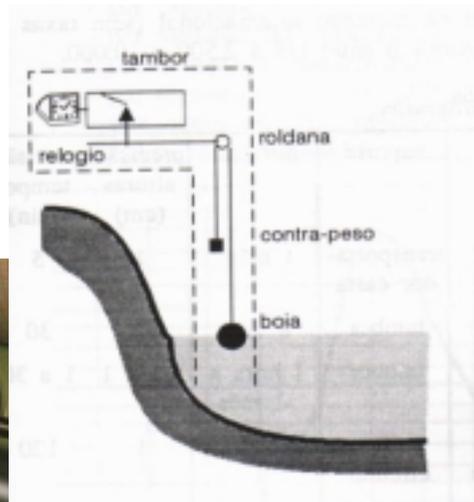


Figura 25 – Alavanca tipo “rosca sem fim” e sistema de transmissão mecânica da posição do nível

- Eletrônica (cálculo e digitalização do sinal transmitido pelo sensor);

3.2.3 Quanto à gravação

- Em suporte de papel, que podem ser: fita colocada em volta de um tambor com rotação de uma hora a 1 mês;



Figura 26 – Gravação contínua em papel

- Memorizada em suporte eletrônico (data-logger);



Figura 27 – Dados armazenados magneticamente sendo transferidos para serem analisados

- Transmitida em tempo real para uma central de operação;

4 Curva-chave

Como já foi dito, a curva-chave relaciona o nível de um rio com sua vazão. Para obtê-la, fazemos medições de vazão pelos métodos apresentados anteriormente para diversos níveis e obtemos pares cota-descarga. A relação é obtida a partir da interpolação destes pontos e, como esta operação não contempla todos os níveis possíveis, utiliza-se ainda a extrapolação.

A relação biunívoca cota-vazão de um rio se mantém ao longo do tempo desde que as características geométricas do mesmo sofram variação. Assim, ao se escolher uma seção para controle, esta deve seguir alguns princípios:



- Lugar de fácil acesso;
- Seção com forma regular;

A regularidade da seção facilita a operação de levantamento dos pares cota-vazão, diminuindo assim a possibilidade de erros na determinação da curva-chave.

- Trecho retilíneo e com declividade constante;

A localização da seção num trecho retilíneo e com declividade constante significa que o escoamento possui um comportamento relativamente uniforme nas suas imediações. Isso facilita as medições a serem realizadas, não havendo perturbações no escoamento devido a meandros ou ressaltos decorrentes da variação de declividade.

- Margem e leito não erodíveis;

Garante a integridade da geometria levantada para a seção por longo tempo.

- Velocidades entre 0,2 e 2 m/s;

Esta faixa de velocidades é importante para a medição da vazão, minimizando os erros das medições.

- Controle por [regime uniforme](#)¹;

O regime uniforme garante a constância das características hidráulicas do escoamento (nível, velocidade, declividade, área da seção) ao longo do trecho onde se localiza a seção.

- Controle por [regime crítico ou fluvial](#)¹;

O regime fluvial classifica o escoamento como lento. O regime crítico



abrange a faixa de velocidades que faz a transição entre o regime fluvial ou lento e o regime torrencial ou rápido. O escoamento na seção deve ser fluvial ou no máximo crítico. Cada classificação possui uma expressão que relaciona a vazão com as outras variáveis envolvidas, mostrados adiante.

- [Regime permanente¹](#);

Todas as medições devem ser feitas na situação de regime permanente (as características hidráulicas não variam durante a medição).

Seguindo tais recomendações, a curva-chave se mantém válida por muito tempo e a vazão pode ser obtida medindo-se apenas o nível do rio. O acúmulo das pequenas variações das características da seção ao longo dos anos faz com que a relação determinada seja associada a um período de validade. Abaixo temos um exemplo de curva-chave, representada no mesmo eixo de cotas da seção.

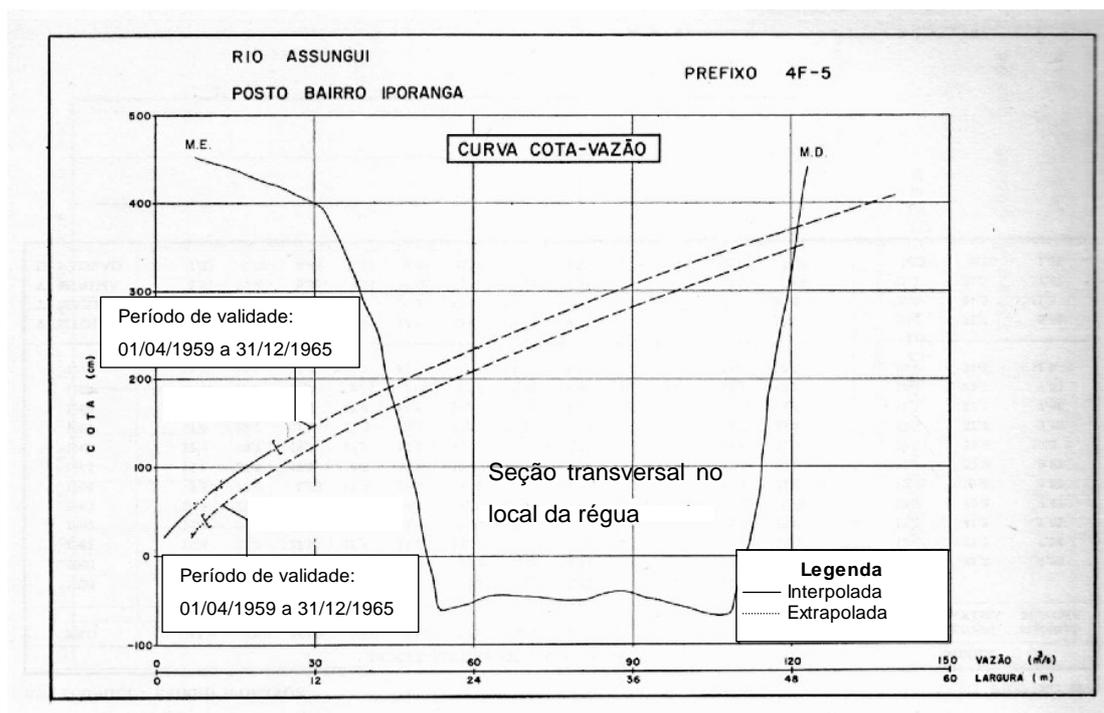


Figura 28 – Curva-chave representada sobre eixo de cotas do perfil geométrico da seção



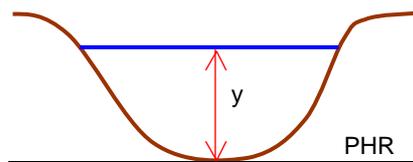
No regime fluvial, a vazão se relaciona com as demais variáveis segundo a expressão abaixo:

$$Q = K \cdot A \cdot (R_h \cdot j)^{1/2}$$

onde:

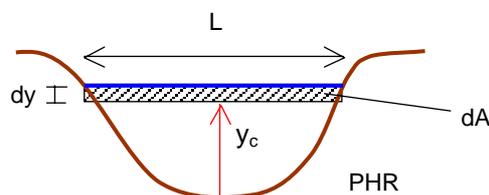
- Q: vazão;
- K: coeficiente de atrito;
- A: área molhada da seção;
- R_h : raio hidráulico;
- j: declividade do curso d'água;

E no regime crítico, a partir da teoria da carga específica, temos:



$$He = y + \frac{\alpha \cdot v^2}{2 \cdot g} = y + \frac{\alpha \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2}$$

$$He_{\min} \Rightarrow \frac{\partial He}{\partial y} = 0 \Rightarrow 1 - \frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot A^3} \cdot \frac{dA}{dy}$$



$$dA = L \cdot dy$$

$$1 - \frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot A^3} \cdot L = 0$$



$$Q^2 = \frac{g \cdot A^3}{\alpha \cdot L}$$

onde:

- Q: vazão;
- g: aceleração da gravidade;
- A: área molhada da seção;
- P: perímetro da seção molhada na superfície;

Em ambos os casos as características geométricas da seção (A, Rh, P) são função da profundidade do rio. Portanto, isto garante que a vazão é uma função indireta do nível do d'água.

Pode-se aproximar a relação Q x H por uma expressão exponencial do tipo:

$$Q = a \cdot (H - H_0)^b$$

onde:

- a, b e H_0 são parâmetros de ajuste;
- H é o nível do rio;
- Q é a vazão;

Como as cotas são tomadas com relação a um referencial arbitrário (fixado e materializado na superfície), H_0 constitui um parâmetro desconhecido, que poderia ser entendido como sendo a leitura do NA na régua para o qual a vazão é nula. Assim, H_0 pode assumir valores positivos ou negativos, dependendo da posição do zero da escala com relação ao fundo do rio. É o valor para o qual a vazão calculada pela expressão seria nula.

Para determinar os parâmetros de ajuste a partir dos pares (Q,H), a expressão geral é linearizada, determinando-se a e b por regressão linear e H_0 por tentativa e erro.



$$Q = a \cdot (H - H_0)^b$$

$$\log Q = \log a + \log b \cdot (H - H_0)$$

- a e b: obtidos por regressão linear;
- H_0 : tentativa e erro;

Pode-se ainda determinar todos estes parâmetros por tentativa e erro, através de ferramentas iterativas como se verá no exemplo 2.

4.1 Ferramentas iterativas

É necessário um cálculo iterativo para se obter a expressão da curva-chave, pois não se conhece o valor de H_0 para realizar uma regressão linear e obter as constantes a e b da expressão logarítmica. Para tanto, pode-se utilizar ferramentas iterativas de planilhas eletrônicas, como o Optimizer do QuattroPro (Corel) ou Solver do Excel (Microsoft). O Solver é uma ferramenta suplementar, e caso não o encontre diretamente no menu *Ferramentas* ou em *Ferramentas>Suplementos...* será preciso [instalá-lo](#).

Exemplo 2

Determine a curva-chave do rio Paraíba a partir dos pares cota-descarga da tabela 4.



Tabela 4 – Vazões medidas em campo para diversos níveis do rio Paraíba

Cota-descarga – Rio Paraíba			
h (m)	Vazão (m ³ /s)	h (m)	Vazão (m ³ /s)
0.87	75.0	1.79	145.0
0.98	82.0	1.80	152.0
1.12	84.0	1.81	149.0
1.13	84.0	2.04	170.0
1.15	95.0	2.10	178.0
1.26	107.0	2.12	187.0
1.35	104.0	2.14	182.0
1.39	110.0	2.24	194.0
1.40	167.0	2.53	240.0
1.45	115.0	2.86	262.0
1.56	131.0	3.02	289.0
1.68	136.0	3.32	323.0
1.72	143.0	3.46	336.0
1.75	144.0	3.64	360.0

Neste exemplo obteremos os três parâmetros por iteração, dispensando a regressão linear.

Assim, monta-se uma planilha semelhante a da tabela abaixo, onde Qcal é obtido a partir dos valores de a, b e H₀, segundo a expressão $Q = a \cdot (H - H_0)^b$.

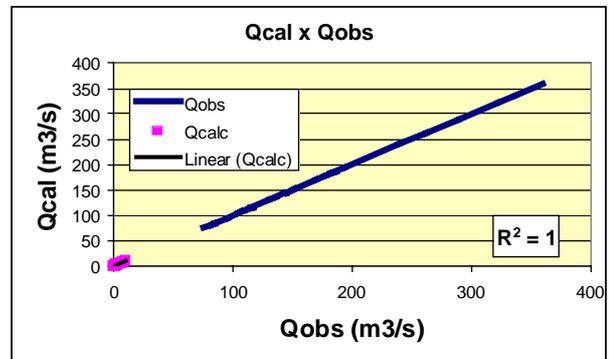
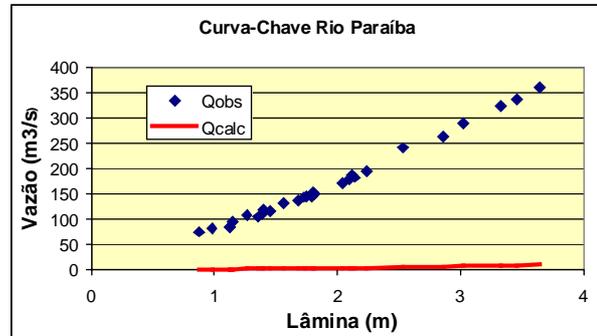


Tabela 5 – Planilha eletrônica (pode ser ativada com um clique duplo)

PHD - 307 Hidrologia Aplicada - Curva - Chave definida no EXCEL

$h_{\min} = 0,87$
 $h_0 = 0,5000$
 $a = 1,0000$
 $b = 2,0000$

H	Qobs	H-ho	Qcalc	(Qcal-Qobs)^2
0,87	75	0,37	0	5604
0,98	82	0,48	0	6686
1,12	84	0,62	0	6992
1,13	84	0,63	0	6989
1,15	95	0,65	0	8945
1,26	107	0,76	1	11326
1,35	104	0,85	1	10666
1,39	110	0,89	1	11926
1,4	117	0,90	1	13500
1,45	115	0,95	1	13018
1,56	131	1,06	1	16868
1,68	136	1,18	1	18119
1,72	143	1,22	1	20026
1,75	144	1,25	2	20288
1,79	145	1,29	2	20545
1,8	152	1,30	2	22593
1,81	149	1,31	2	21693
2,04	170	1,54	2	28099
2,1	178	1,60	3	30779
2,12	187	1,62	3	33994
2,14	182	1,64	3	32152
2,24	194	1,74	3	36470
2,53	240	2,03	4	55639
2,86	262	2,36	6	65757
3,02	289	2,52	6	79891
3,32	323	2,82	8	99255
3,46	336	2,96	9	107085
3,64	360	3,14	10	122598
Soma				927505,34



Deseja-se obter as constantes de forma que a soma dos quadrados dos desvios seja mínima, aproximando ao máximo os valores de vazão calculados com os valores reais medidos.

Para iniciar o processo, definimos valores quaisquer para a e b , podendo o valor de H_0 ser estimado de uma forma melhor, como mostra a figura 29. No exercício individual,



os parâmetros iniciais estarão especificados no enunciado.

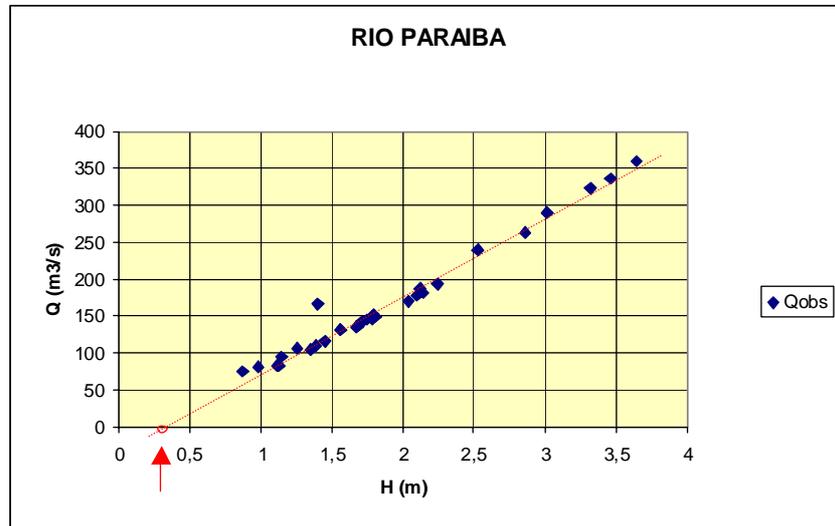
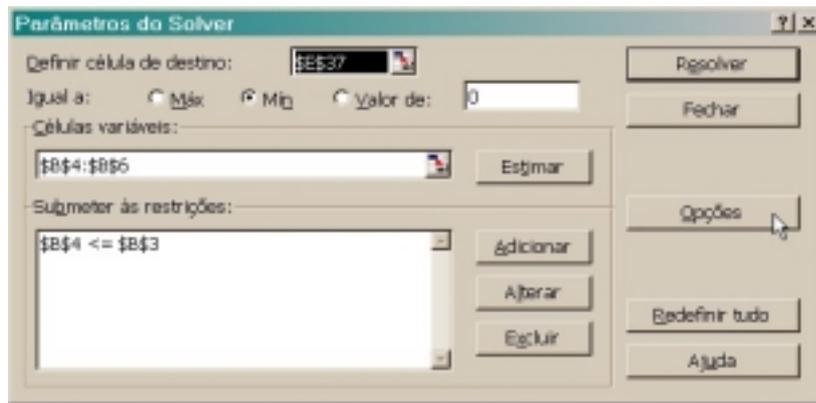


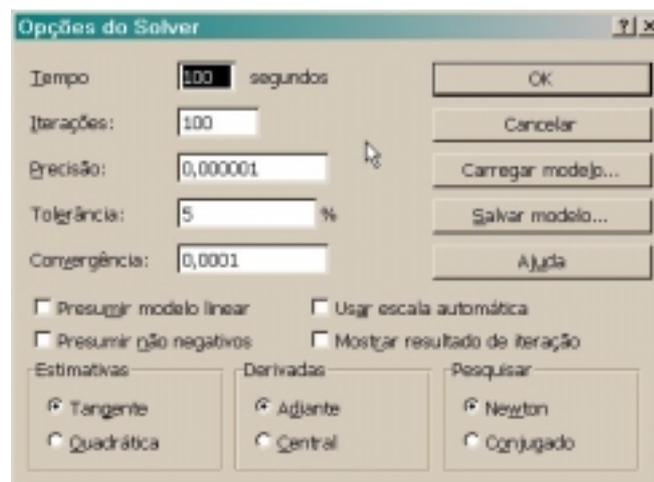
Figura 29 – Pares cota – vazão, sugerindo um valor de H_0 a ser “chutado” (H para vazão nula).

Escolhendo *Solver...* no menu *Ferramentas* do Excel, definimos as condições que conduzirão os cálculos:

- Minimizar o valor da soma dos desvios (célula destino);
- Valores de a , b e H_0 como células variáveis;
- Impor limite superior para o valor de H_0 (menor que o nível mínimo observado);



Clique em Opções e verifique se seus parâmetros estão configurados conforme indica a figura abaixo. Erros nesta configuração resultam em falhas no cálculo.



Escolha *OK* e *Resolver*. O Solver ajustará os valores das constantes a , b e h_0 , atendendo as condições impostas. Caso uma solução não seja encontrada, refaça as estimativas iniciais e verifique as condições impostas. Clique [aqui](#) em caso de problemas.

Resultado: $H_0 = -2,4929$, $a = 3,4472$ e $b = 2,5793$.

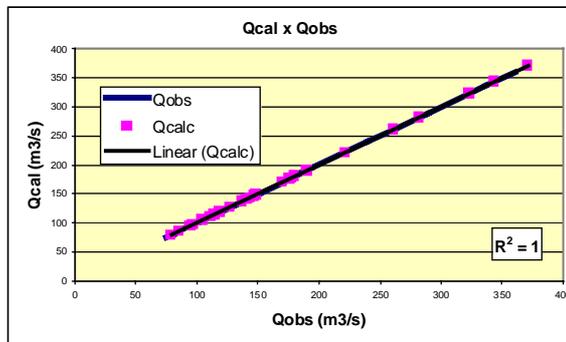
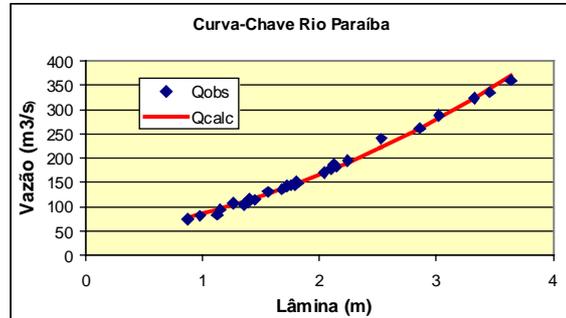


Tabela 6 – Planilha eletrônica após aplicado o Solver (pode ser ativada com um clique duplo)

PHD - 307 Hidrologia Aplicada - Curva - Chave definida no EXCEL

$h_{min} = 0,87$
 $h_o = -2,4929$
 $a = 3,4472$
 $b = 2,5793$

H	Qobs	H-ho	Qcalc	(Qcal-Qobs)^2
0,87	75	3,36	79	14
0,98	82	3,47	86	12
1,12	84	3,61	95	115
1,13	84	3,62	95	130
1,15	95	3,64	97	3
1,26	107	3,75	104	6
1,35	104	3,84	111	50
1,39	110	3,88	114	16
1,4	117	3,89	115	5
1,45	115	3,94	119	13
1,56	131	4,05	127	13
1,68	136	4,17	137	2
1,72	143	4,21	141	5
1,75	144	4,24	143	0
1,79	145	4,28	147	4
1,8	152	4,29	148	18
1,81	149	4,30	149	0
2,04	170	4,53	170	0
2,1	178	4,59	176	4
2,12	187	4,61	178	83
2,14	182	4,63	180	5
2,24	194	4,73	190	16
2,53	240	5,02	222	340
2,86	262	5,35	261	1
3,02	289	5,51	282	54
3,32	323	5,81	323	0
3,46	336	5,95	343	54
3,64	360	6,13	371	117
Soma				1079,96



O gráfico abaixo ilustra os pontos obtidos pela medição e a curva-chave obtida:

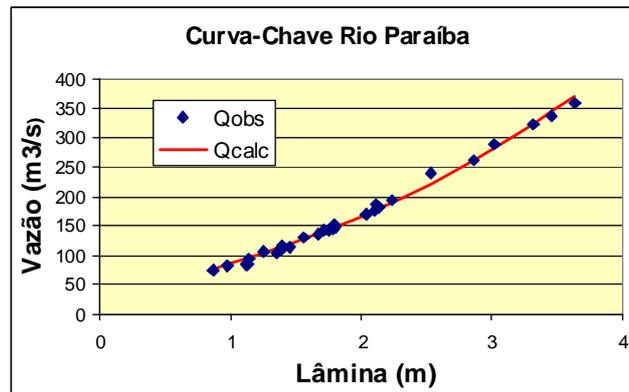


Figura 30 – Pontos obtidos pela medição e curva-chave calculada

Expressão da curva-chave:

$$Q = 3,4472 \cdot (H + 2,4929)^{2,5793}$$

4.2 Validade da Curva-Chave

4.2.1 Variação da curva-chave com o tempo

O fato de a curva-chave estar intimamente ligada às características hidráulicas da seção de controle implica variação da expressão matemática quando há uma variação nestas constantes. Alterações na geometria da seção ou na declividade do rio geradas por erosões ou assoreamento ao longo do tempo causam mudanças na velocidade do escoamento e nas relações entre área, raio hidráulico e profundidade, afetando a relação cota-descarga.

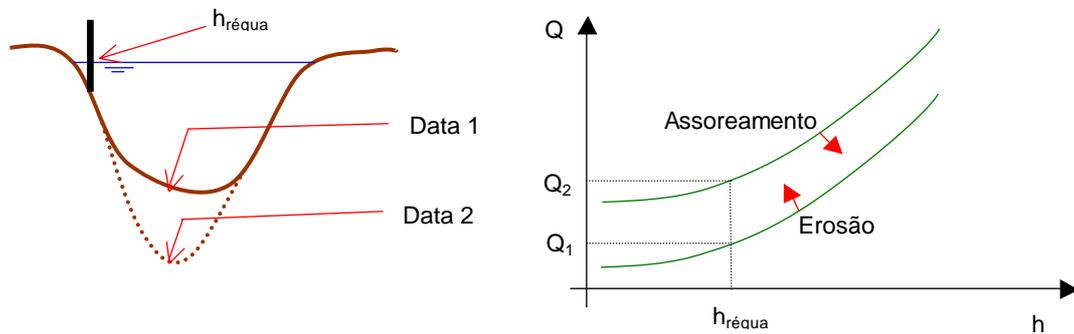


Figura 31 – Alteração da seção ao longo do tempo e conseqüente reflexo na curva cota-descarga.

4.2.2 Extrapolação da curva-chave

Em geral as medições não contemplam valores extremos de vazões. Assim, para se estimar vazões mais altas ou mais baixas recorreremos à extrapolação. No entanto, deve-se tomar cuidado com a forma da seção em função da altura, como mostra a figura 32. As curvas que relacionam raio hidráulico e área com o nível d'água podem sofrer variações bruscas no comportamento, gerando grandes erros na estimativa.

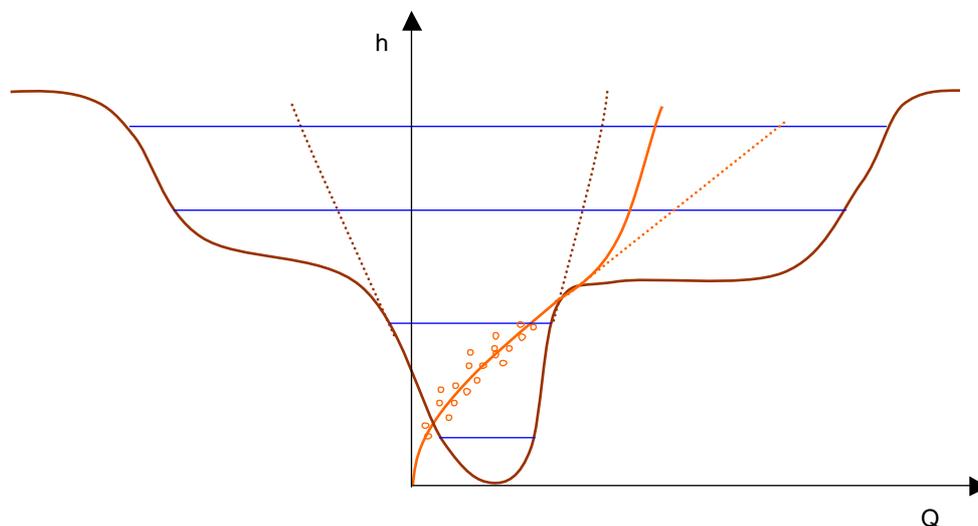


Figura 32 – Extrapolação equivocada da curva-chave (.....) e comportamento real (—).

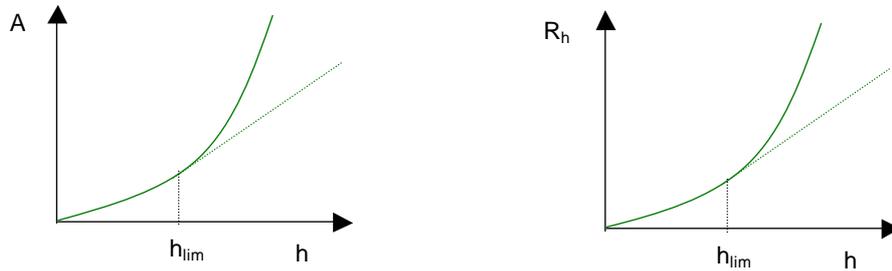


Figura 33 – Mudança brusca nas relações entre área, raio hidráulico e nível, acompanhando a variação no perfil da seção.

5 Síntese

Para se acompanhar a vazão de um rio ao longo do tempo, determinamos para este rio uma curva-chave, expressão que relaciona o nível do rio numa seção com sua respectiva vazão. Medir apenas o nível é muito mais fácil e barato que se utilizar qualquer um dos recursos apresentados no item 2. Entretanto, precisamos utilizá-los ao menos uma vez para um certo intervalo de níveis, definindo assim a curva-chave por meio da interpolação desses pares cota-descarga. Esta curva pode ainda ser cuidadosamente extrapolada para outros níveis que a seção possa apresentar ao longo do tempo.

Os passos são:

- Instalação do mecanismo de medição de nível numa seção (régua, etc.);
- Medição da vazão por meio dos recursos do item 2, para vários níveis observados pelo mecanismo instalado anteriormente;
- Determinação da curva-chave;
- Monitoramento do nível;



APÊNDICE

1. Classificação do escoamento

Quanto a:	Classificação:	Determinante:
Variabilidade no tempo	Permanente	Características hidráulicas constantes no tempo
	Não permanente	Características hidráulicas variáveis no tempo
Variabilidade no espaço	Uniforme	Características hidráulicas constantes no espaço
	Variável	Características hidráulicas variáveis no espaço
Mobilidade do escoamento	Fluvial ou lento	$Fr < 1$
	Crítico	$Fr = 1$
	Torrencial ou rápido	$Fr > 1$
Influência da viscosidade	Laminar	$Re < 500$
	Turbulento	$Re > 2000$