

MANUAL DO CANAL DE ESCOAMENTO HD24



• INTRODUÇÃO

O estudo de **Perda de Carga em Condutos** não é um assunto recente. Remonta a antiguidade quando as cidades começaram a crescer e o fornecimento de água, o fluido mais precioso da época, não mais podia ser obtido de forma eficaz no local de consumo. Como o homem começou a buscar água cada vez mais longe, ele teve de construir meios, aquedutos, canais, e dutos, para o transporte deste fluido até o centro consumidor. Por certo é sabido que naqueles tempos, não existiam bombas hidráulicas para impulsionar a água, e que a mesma fluía através do conduto apenas pela ação da energia nela contida e pela inclinação do conduto. Porém como as distancias não excepcionalmente eram grandes, estes elementos deveriam oferecer a menor resistência possível ao escoamento do fluido. Logo, um estudo detalhado da forma e das características superficiais destes elementos era imprescindível.

Não obstante, muitos séculos se passaram e daqueles tempos remotos até os dias atuais, muita água, por não dizer fluidos, passaram por estes condutos. O transporte de fluidos cresceu demasiadamente. Hoje, o fornecimento de água potável é apenas uma das inúmeras aplicações onde se estuda a **Perda de Carga**. Da hidráulica residencial aos mais complexos processos industriais, todos possuem condutos através dos quais os fluidos são transportados e entregues. Para começar estudos de perda de carga, faz-se necessário definir alguns conceitos:

Condutos são todos os meios pelos quais os fluidos são transportados, são divididos em livres e forçados.

Condutos Livres são aqueles onde o fluido apresenta um contato apenas parcial com suas paredes internas. Neste tipo de conduto, observa-se sempre uma superfície livre, onde o fluido está em contato com o ar atmosférico, ou seja, o fluido se encontra a pressão atmosférica. Os condutos livres são geralmente denominados de canais, os quais podem ser abertos ou fechados. A figura 01 apresenta dois exemplos de condutos livres, um aberto e um fechado. Ex: Canais, Calhas e Aquedutos.

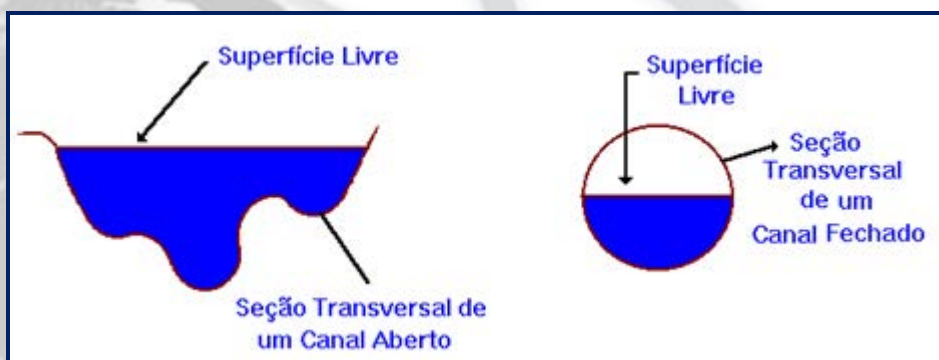


Figura 01. Conduto Livre

Condutos Forçados são condutos do tipo fechado onde o fluido apresenta um contato total com suas paredes internas. São condutos nos quais a pressão interna é diferente da pressão atmosférica. O movimento pode se efetuar em qualquer sentido do conduto. A figura 02 mostra um dos exemplos mais comuns de conduto forçado, que é o de seção transversal circular. Ex: Tubulações e Dutos.

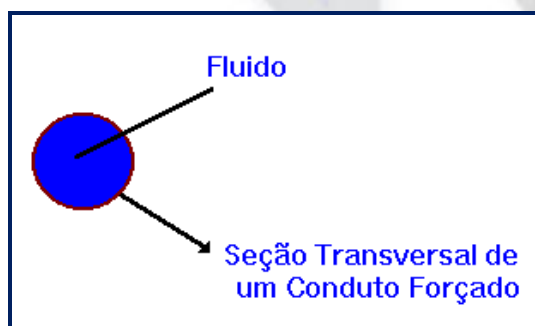


Figura 02. Conduto Forçado

ESTUDO DE CANAIS ABERTOS

A hidráulica de canais abertos é o estudo das leis que regem o escoamento da água em condutos livres, o que em geral inclui canais, cursos d'água e tubulações (excetuando-se as que operam sob pressão) como mostrado na figura 01.

Para analisar o escoamento em canal aberto, é necessário primeiro considerar um canal longo e uniforme, como o canal trapezoidal de concreto mostrado na figura 03. Canal uniforme, ou prismático, é o que mantém constantes a forma e a declividade. O canal trapezoidal é mostrado em mais detalhes na figura 04, incluindo um perfil e uma seção transversal.

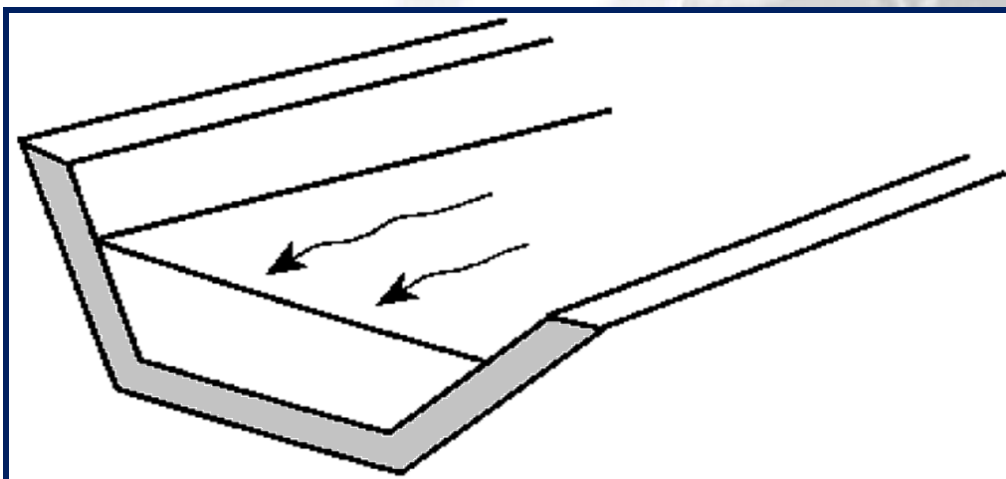


Figura 03. Exemplo de canal aberto trapezoidal.

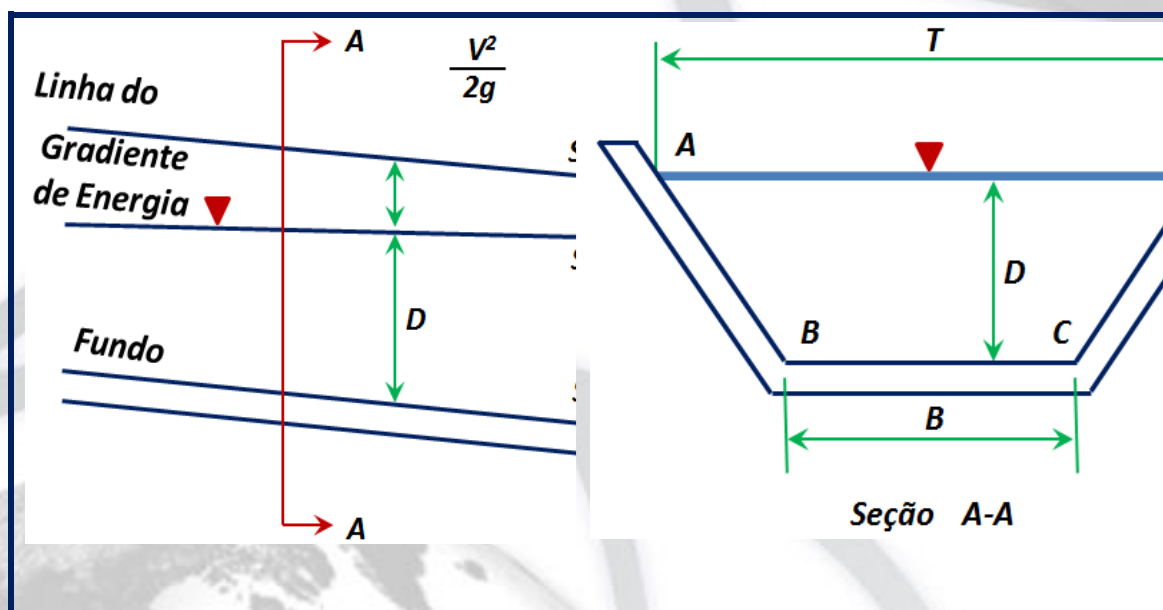


Figura 04. Canal de concreto com seção transversal trapezoidal.

Os elementos essenciais do perfil são o fundo do canal, a superfície da água e a linha do gradiente de energia (**EGL**). A linha do gradiente hidráulica (**HGL**) coincide com a superfície da água. Cada uma dessas linhas tem uma declividade, que pode ser igual ou diferente das outras, dependendo do tipo de escoamento.

A declividade do fundo do canal, S_o , é definida como o desnível vertical dividido pelo comprimento horizonte do fundo. Assim, o fundo de um canal que se rebaixa em **1,0m** em uma extensão de **20,0m** tem declividade de **0,050 m/m**. Ou seja,

$$S = \frac{\text{Desnível}}{\text{Comprimento}} = \frac{1,0}{20,0} = 0,050m/m$$

A declividade também pode ser expressa como uma porcentagem, multiplicando-se por **100**. Dessa forma, a declividade calculada anteriormente, expressa como uma porcentagem, é **5%**.

A figura 04 revela duas outras declividades envolvidas com o escoamento em canais abertos: a declividade da lâmina d'água, S_w , e a linha do gradiente de energia, S . Essas declividades também são definidas como desnível dividido pela extensão, como acontece com a declividade do fundo.

A profundidade do escoamento, D , é a distância vertical do canal até a superfície da água. A área de seção transversal do fluxo, a , é a área de seção transversal do escoamento. Na figura 04, a área da seção transversal é a área do trapezoide, ou

$$a = \left(\frac{T + B}{2} \right) \cdot D$$

O perímetro molhado, p , é a distância, ao longo da seção transversal do canal, que está em contato com a água em escoamento. Na figura, 04, o perímetro molhado é a soma das distâncias AB , BC e CD . Outro conceito importante é o raio hidráulico. O raio hidráulico, R , de um canal é definido como a área de seção transversal (também denominado área molhada) dividida pelo perímetro molhado, ou

$$R = \frac{a}{p}$$

TIPOS DE CANAIS

Canais construídos para o transporte de água podem ter muitas formas diferentes de seção transversal, assim como diferentes declividades e alinhamentos. Se um canal muda de forma, a declividade ou o alinhamento, ele é não-prismático e as características do escoamento são também afetadas. Essas alterações modificam o escoamento uniforme e causam condições de escoamento variado, que requerem técnicas de cálculos especiais. Seções transversais de canais típicas são exibidas na figura 05.

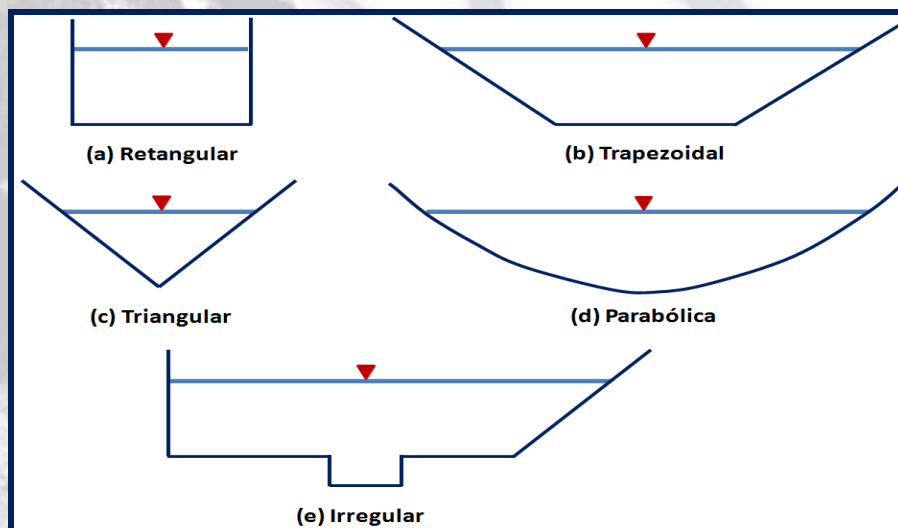


Figura 05. Formas típicas de seções transversais de canais.



Os canais são também construídos com muitos materiais diferentes, de solo revestido de grama, pedras ou concreto. O material usado para formar um canal é chamado de revestimento do canal.

O tipo de material afeta o escoamento porque aumenta e diminui a velocidade na superfície entre água e o revestimento do canal. De acordo com a equação de continuidade descrita a seguir, se a velocidade for afetada, a área de seção transversal e, conseqüentemente, a profundidade também serão.

$$Q = \bar{v} \cdot a$$

Onde:

Q → Vazão de escoamento [m^3/s];

$\bar{v}$ → Velocidade média através de uma determinada seção transversal do escoamento [m/s];

a → Área da seção transversal [m^2].

A velocidade máxima ocorre logo abaixo da superfície livre no centro do canal e pode atingir uma magnitude de 2,0 a 2,5 vezes a velocidade média do sistema. A figura 06 apresenta distribuições de velocidades típicas para canais retangulares e trapezoidais. As velocidades mais baixas manifestam-se ao longo do revestimento do canal.

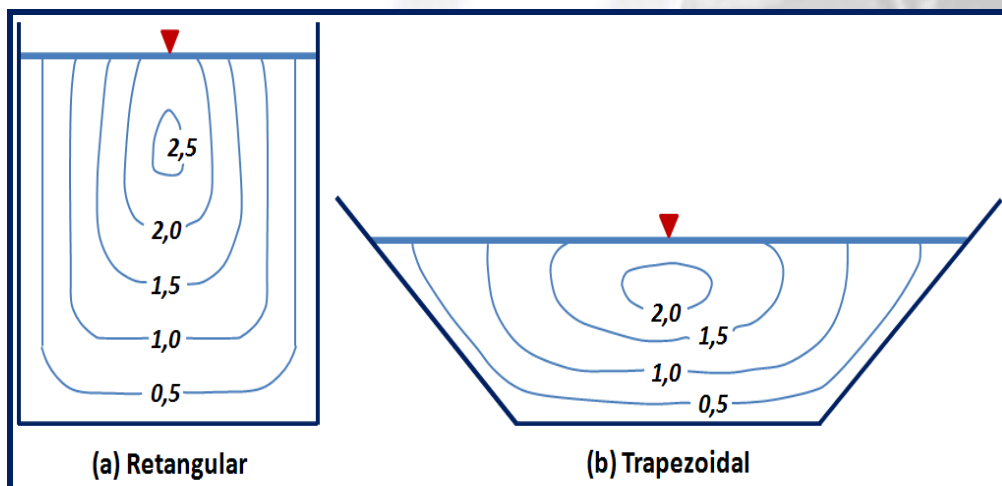


Figura 06. Distribuições de velocidade em canais retangulares e trapezoidais.
 Os valores são múltiplos da velocidade média.

PROFUNDIDADE NORMAL

Quando a água escoar em um canal prismático, depois de uma transição inicial, ela alcança e mantém uma velocidade constante e uma profundidade constante é chamada profundidade normal, D_n . A água em escoamento é impulsionada a jusante pelo seu próprio peso, especificamente o componente de seu peso na direção do canal. Mas a força de atrito produzida no revestimento das paredes e do fundo do canal é igual em magnitude e oposta em direção, criando um equilíbrio conduzindo a velocidade constante. A linha do gradiente de energia é paralela à superfície do fluido, porque a velocidade, e portanto a carga da velocidade, é constante. Ou seja, todas as três inclinações na figura 06 são iguais, ou $S_o = S_w = S$ e $D = D_n$.

Outra exigência para a profundidade normal é a vazão constante, Q . Ressalta-se que todos os experimentos relativos ao escoamento em canais abertos presentes neste manual utilizarão vazão constante.

A profundidade normal depende da declividade, da rugosidade do revestimento, das dimensões da seção transversal e da vazão escoada. Para declividade mais acentuadas, D_n é menor; para declividades menores, D_n é maior. Para canais mais rugosos, D_n é maior, canais mais lisos, D_n é menor. Para canais mais largos, D_n é menor; para canais mais estreitos, D_n é maior. Para valores menores de Q , D_n é menor; valores maiores de Q resultam em valores maiores de D_n .

PROFUNDIDADE CRÍTICA

A energia específica, E , é definida como $E = D + \frac{v^2}{2g}$, ou a carga de energia total acima do leito do canal. Se assimilarmos valores de D_n contra os valores correspondentes de D resultando das variações em profundidade para o mesmo valor de D_n , obtém uma curva como a mostrada pela figura 07.

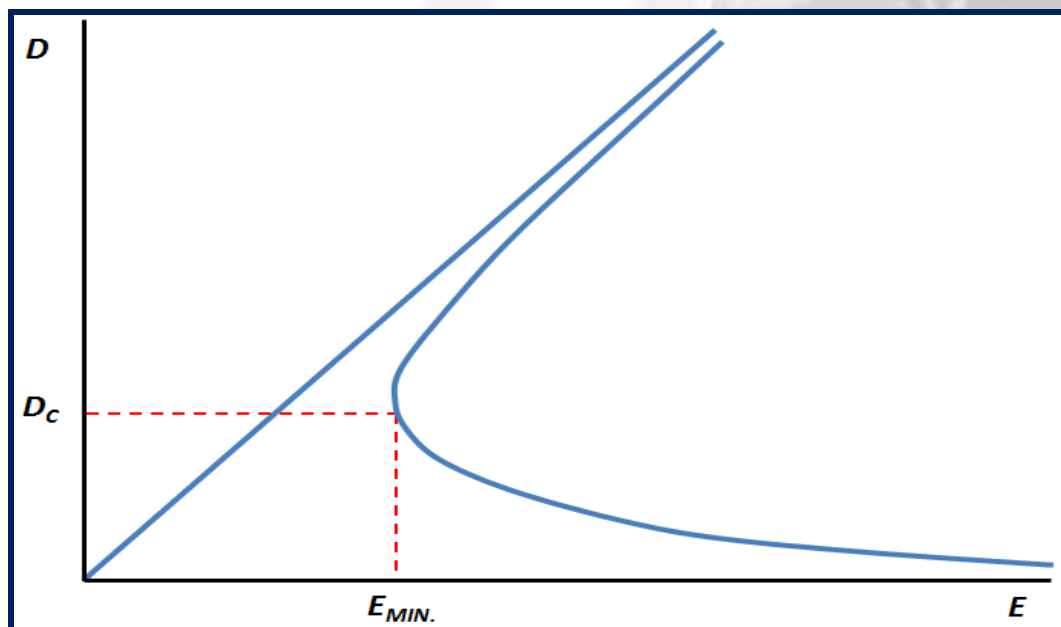


Figura 07. Diagrama de energia específica.

Um exame atento do diagrama de energia específica revela que, para velocidade muito baixa com profundidade alta, a energia específica E aproxima-se do valor de D . Para alta velocidade, a profundidade aproxima-se de zero, significando que E é composto quase completamente de $v^2/2g$. Um valor particular de D , chamado profundidade crítica, designado D_c resulta no valor mínimo de E . A profundidade crítica é um conceito teórico que depende apenas de forma do canal e da vazão Q . Ela não depende da rugosidade do revestimento ou da declividade do canal. Em geral, profundidades de escoamento maiores que a profundidade crítica representam um escoamento mais tranquilo chamado subcrítico, e profundidades abaixo de D_c representam uma escoamento mais rápido denominado supercrítico.

A velocidade de escoamento em profundidade crítica é chamada velocidade crítica. Quando um canal possui uma declividade que faz a profundidade normal coincidir com a profundidade crítica, a declividade é denominada declividade crítica. A profundidade crítica é calculada pelo uso da seguinte relação, que ocorre na energia específica mínima, ***E***:

$$\frac{a^3}{T} = \frac{Q^2}{g}$$

Onde:

a → Área da seção transversal [***m*²**];

T → Largura do canal na superfície líquida [***m***];

Q → Vazão de escoamento [***m*³/s**];

g → Aceleração da gravidade [***m/s*²**];

A equação acima aplica-se a todas as formas de canal e deve, geralmente, ser resolvida por método de tentativa e erro. No entanto, ela é válida apenas se o escoamento for gradualmente variado ou paralelo ao fundo do canal e a declividade do canal for pequena (menos de 8%). Para Canais retangulares, a equação se reduz a:

$$D_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{T^2 \cdot g}}$$

Para quaisquer canal e vazão Q , há uma profundidade crítica correspondente. Usualmente, a profundidade normal em um canal não é igual à profundidade crítica. Apenas uma declividade em particular resulta em uma profundidade normal igual à profundidade crítica, a declividade crítica.

A ocorrência mais comum de profundidade crítica está no escoamento gradualmente variado, no qual a profundidade do escoamento varia sobre uma distância exata em razão de uma mudança em um ou mais atributos do canal. A mudança pode ser na declividade do canal ou na forma da seção transversal. Conforme a profundidade varia, a profundidade crítica pode ser alcançada dentro da região de transição. Por exemplo, a figura 08 mostra um perfil de uma transição de canal de escoamento subcrítico para supercrítico.

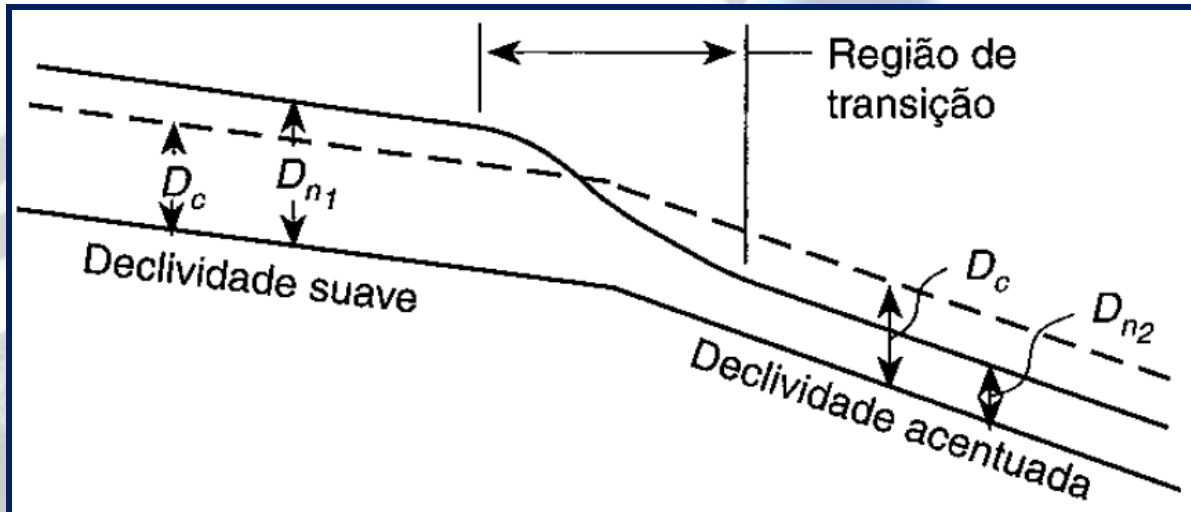


Figura 08. Transição de canal. Transições de escoamento subcrítico para supercrítico passando-se pela profundidade crítica.

A profundidade do escoamento está na profundidade crítica perto do ponto de transição. Observa-se, na figura 08, que a profundidade crítica teórica não se altera quando a declividade for nula.

Um parâmetro chamado **número Froude** pode ser usado para distinguir entre escoamento subcrítico e supercrítico. Para um canal retangular, o número Froude, **F** , é definido como

$$F = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D}}$$

Onde:

F → número Froude **[adimensional]**;

v → Velocidade média do escoamento **[m/s]**;

D → Profundidade do escoamento **[m]**;

g → Aceleração da gravidade **[m/s²]**.

Quando **$F = 1$** , o escoamento é crítico. O escoamento subcrítico ocorre quando **$F < 1$** , e o supercrítico, quando **$F > 1$** . Para canais não-retangulares, o **número Froude** é definido como

$$F = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D_h}}$$

Onde:

D_h → Profundidade hidráulica do escoamento **[m]**.

A profundidade hidráulica, D_h , é definida como

$$D_h = \frac{a}{T}$$

Onde:

$a \rightarrow$ Área da seção transversal $[m^2]$;

$T \rightarrow$ Largura do canal na superfície líquida $[m]$.

O conceito de profundidade crítica, embora puramente teórico, oferece muitas aplicações na hidráulica de canais abertos. Duas grandes aplicações do princípio são o controle e a medição de vazão.

ESCOAMENTO UNIFORME EM CANAIS

Em canais uniformes (prismáticos), quando a água escoar à vazão constante, resulta em um perfil da superfície da água paralelo ao fundo do canal. Esse tipo de escoamento é denominado **escoamento uniforme** e está relacionado com a maioria das situações comuns de projetos, como os canais e os tubos externos e retos (desde que os tubos não estejam com escoamento sob pressão). O conceito pode também ser aplicado a correntezas naturais, embora as correntezas não sejam estritamente prismáticas. Além disso, se um canal sofrer uma alteração na declividade ou na seção transversal, pode-se geralmente assumir escoamento uniforme para seções retas entre as transições.

→ Equação de Manning

Muitas equações empíricas foram elaboradas para calcular a profundidade normal em um canal uniforme. Essas equações trazem os nomes de seus criadores e incluem, entre outras, as equações de Chezy, de Darcy, de Kutter e de Manning. A equação de Chezy, desenvolvida por Antoine Chezy, é considerada a primeira equação para escoamento uniforme. Em 1889, Robert Manning apresentou uma derivação desta, a equação de Manning para escoamento uniforme é:

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S_o^{1/2}$$

Onde:

$v \rightarrow$ Velocidade média do escoamento [m/s];

$R \rightarrow$ Raio hidráulico [m];

$S_o \rightarrow$ Declividade do canal [m/m];

$n \rightarrow$ Coeficiente da rugosidade.

A equação de Manning é usada para determinar a velocidade se a profundidade normal, D_n , for conhecida. A vazão, Q , pode então ser determinada com o uso da equação de continuidade, $Q = v \cdot a$. Substituindo-se a equação de continuidade na equação de Manning, uma variação da equação é criada, envolvendo a vazão, Q , como a seguir:

$$Q = \frac{a}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S_o^{1/2}$$



Onde:

$A \rightarrow$ Área da seção transversal $[m^2]$;

Essa variação da equação de Manning pode ser usada para calcular a profundidade normal se a vazão for conhecida. No entanto, observando-se a equação revela que não há um termo para a profundidade normal, embora sejam usadas para calcular a profundidade normal. A profundidade normal é calculada indiretamente. A equação de Manning é usada em um processo iterativo (tentativa e erro) para determinar a profundidade normal.

Todos os termos da equação de Manning, já foram descritos a exceção do coeficiente de rugosidade, n . Este é um número empírico que descreve a aspereza do revestimento do canal. Ele é similar a f usado na equação de Bernoulli, mas não é exatamente o mesmo. Valores usados para f não podem ser substituídos por valores de n . A seguir, é apresentada uma tabela (tabela 01) com uma seleção tais de valores:

NATUREZA DAS PAREDES	Condições			
	Muito Boa	Boa	Regular	Má
Alvenaria de pedra argamassada	0,017	0,020	0,025	0,030
Alvenaria de pedra aparelhada	0,013	0,014	0,015	0,017
Alvenaria de pedra seca	0,025	0,033	0,033	0,035
Alvenaria de tijolos	0,012	0,013	0,015*	0,017
Calhas metálicas lisas (semicirculares)	0,011	0,012	0,013	0,015
Calhas abertas em rocha (irregular)	0,035	0,040	0,045	----
Canais com fundo em terra e talude com pedras	0,028	0,030	0,033	0,035
Canais com leito pedregoso e talude vegetado	0,025	0,030	0,035	0,040
Canais com revestimento de concreto	0,012	0,014*	0,016	0,018
Canais de terra (retilíneos e uniformes)	0,017	0,020	0,023	0,025
Canais dragados	0,025	0,028	0,030	0,033
Condutos de barro (drenagem)	0,011	0,012*	0,014*	0,017
Condutos de barro vitrificado (esgoto)	0,011	0,013*	0,015	0,017
Condutos de prancha de madeira aplainada	0,010	0,012*	0,013	0,014
Gabião	0,022	0,030	0,035	----
Superfícies de argamassa de cimento	0,011	0,012	0,013*	0,015
Superfície de cimento alisado	0,010	0,011	0,012	0,013
Tubo de ferro fundido revestido com alcatrão	0,011	0,012*	0,013*	
Tubo de ferro fundido sem revestimento	0,012	0,013	0,014	0,015
Tubos de bronze ou de vidro	0,009	0,010	0,011	0,013
Tubos de concreto	0,012	0,013	0,015	0,016
Tubos de ferro galvanizado	0,013	0,014	0,015	0,017
Córregos e rios limpos, retilíneos e uniformes	0,025	0,028	0,030	0,033
Córregos e rios com pedras e vegetação	0,030	0,033	0,035	0,040
Córregos e rios com meandros, bancos e poços e limpos	0,035	0,040	0,045	0,050
Margens espraçadas, pouca vegetação	0,050	0,060	0,070	0,080
Margens espraçadas, muita vegetação	0,075	0,100	0,125	0,150

Tabela 01. Valores para coeficiente de rugosidade de Manning, **71**.

Como mencionado, o raio hidráulico é uma medida da eficiência hidráulica de um canal. Quanto maior o valor de ***R***, maior vazão transportada pelo canal para uma determinada área de seção transversal. Assim, um canal largo e raso possui perímetro molhado relativamente grande, em comparação com a área de seção transversal, e é, portanto, menos eficiente que um canal quadrado com a mesma área de seção transversal.

→ Escoamento em Tubulações

Quando a água flui por gravidade em um tubo parcialmente cheio (não sob pressão), ela se sujeita às leis do escoamento de canal aberto. A profundidade normal é calculada com o uso da equação de Manning, e a profundidade crítica, a partir da equação:

$$\frac{a^3}{T} = \frac{Q^2}{g}$$

A única diferença entre escoamento em tubulações e em canal retangular é a geometria da seção transversal. A distribuição de velocidade em um tubo é similar à de qualquer canal aberto, influenciada pela forma da seção transversal. A figura 09 mostra a velocidade de distribuição típica em um tubo parcialmente cheio.

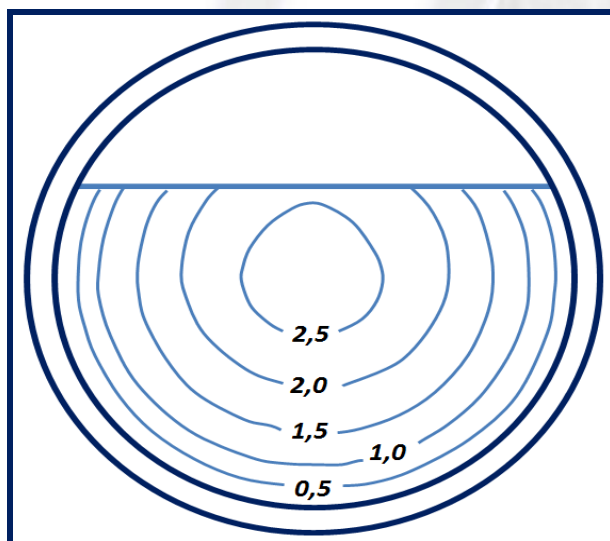


Figura 09. Distribuição de velocidade em um tubo parcialmente cheio.
Os valores são múltiplos da velocidade média.

As principais aplicações do escoamento em tubulações são as galerias de águas pluviais, os coletores de esgoto sanitário e os bueiros. Os exemplos a seguir ilustram as características do escoamento em tubos.

➔ Escoamento em Cursos D'água

Cursos d'água são canais naturais com seção transversal e aspereza variáveis. A figura 10 exibe dois exemplos de canais naturais.

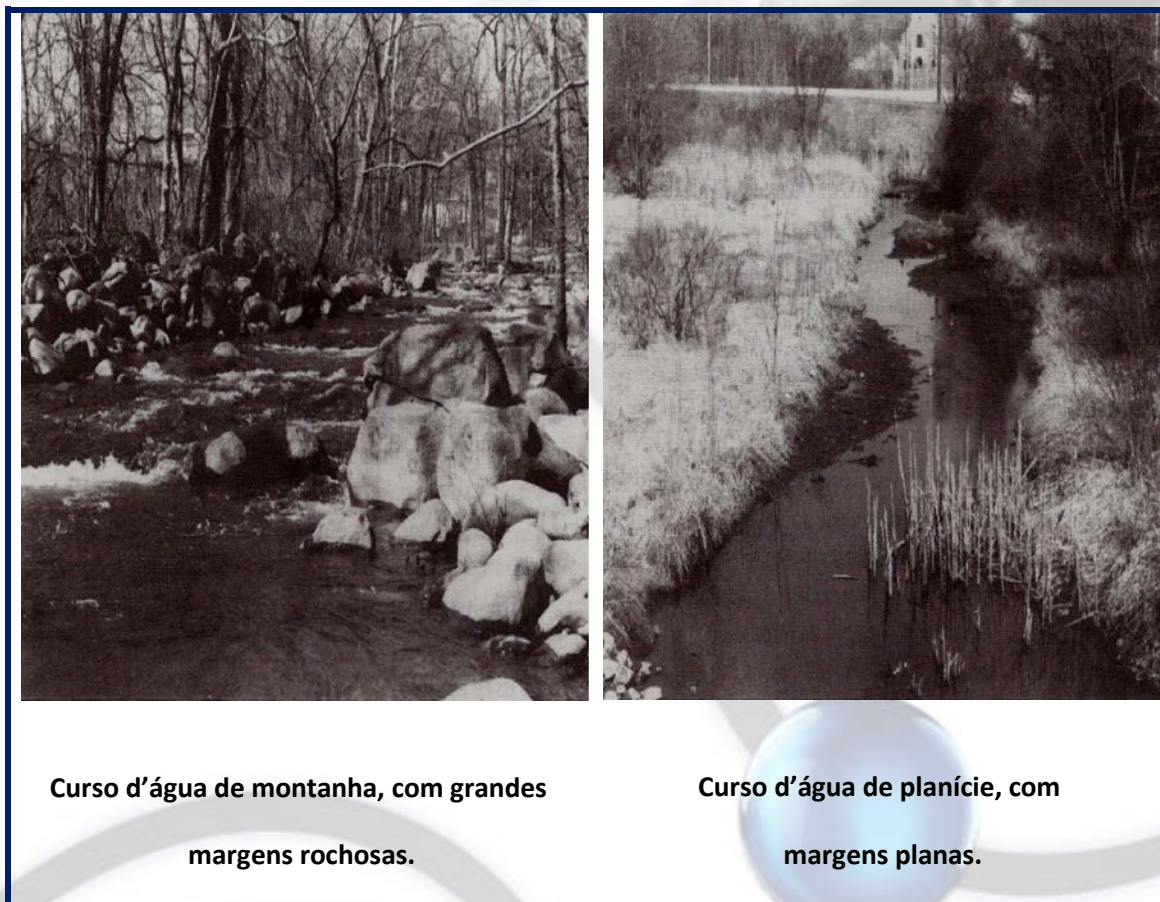


Figura 10. Exemplos de canais naturais.

A profundidade normal pode ser calculada para um canal natural por meio da equação de Manning quando o escoamento pode ser considerado uniforme e não há obstruções significativas. As obstruções, como uma ponte, causam uma variação no perfil da superfície líquida, chamada curva de remanso. Curvas de remanso são delineadas por um procedimento especial de cálculo por passos (ou etapas), normalmente realizado por computador.

Este estudo limita-se a análise do escoamento uniforme, no qual a equação de Manning é usada para calcular a profundidade e a vazão. Cursos d'água naturais frequentemente escoam em uma condição de inundação, ou seja, com profundidade acima da margem. Quando a inundação ocorre, devemos ainda ser capazes de calcular a profundidade, embora os fatores de rugosidade das

margens sejam, normalmente, diferentes do fator de rugosidade das paredes do canal natural. A figura 12 mostra uma típica seção transversal de um canal natural, incluindo as margens. A convenção usual para seções transversais de canais naturais é que elas são desenhadas voltadas a jusante.

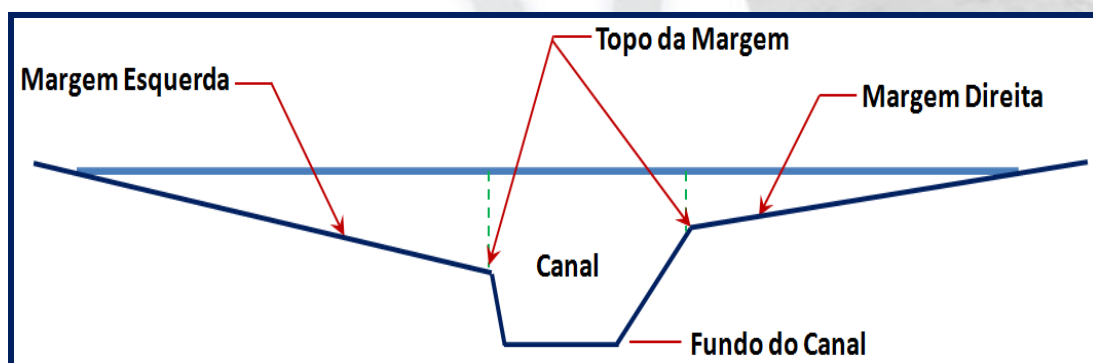


Figura 11. Seção transversal típica de canal natural (olhando a jusante).

ESCOAMENTO VARIADO EM CANAIS

A água que flui em um canal aberto é submetida, algumas vezes, a variações em sua profundidade por causa de certas condições no canal. Na seção anterior, foi visto que, em canais uniformes, quando a água flui com a vazão constante, o perfil resultante da superfície líquida é paralelo ao fundo do canal. A partir deste momento, será visto que obstruções ao escoamento ou condições variáveis do canal resultam em um perfil da superfície líquida que não é paralelo ao fundo do canal. Dependendo do tipo de condição encontrado, o escoamento pode ser gradualmente variado ou bruscamente variado.

Há muitas condições possíveis em um canal que resultam em escoamento variado – gradual ou brusco. O escoamento variado é gradual se ocorre em uma distância relativamente longa. Exemplos de condições que causam escoamento gradualmente variado são uma alteração na declividade de um canal; uma alteração na seção transversal de um canal, de estreita para larga

ou de larga para estreita; e uma obstrução, como um bueiro ou uma ponte. Exemplos de escoamento bruscamente variado incluem um vertedor e um dissipador de energia. Nesses casos, o escoamento em alta velocidade abruptamente se altera para escoamento baixa velocidade em uma curta distância.

Os perfis da superfície líquida são categorizados de acordo com a declividade do fim do canal e outras condições de escoamento. A declividade do fundo do canal pode ser fraca, forte, crítica, nula ou adversa. Essas inclinações serão descritas a seguir.

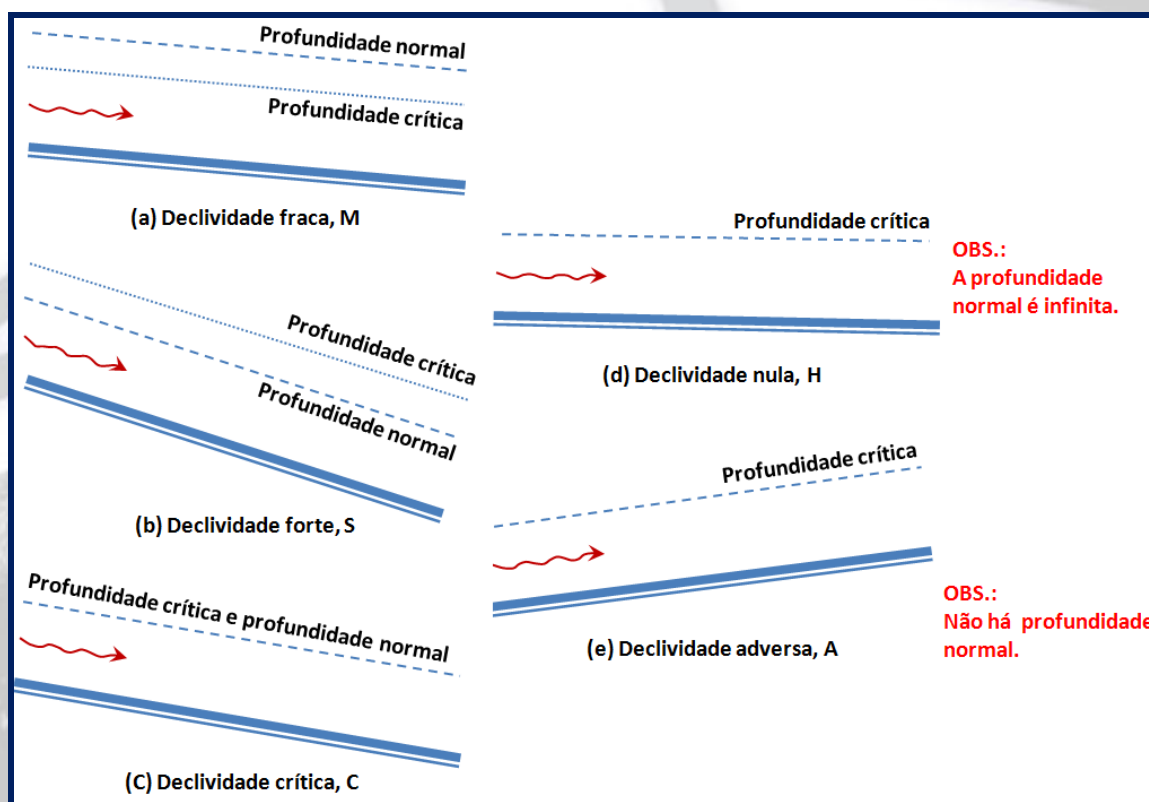


Figura 12. Classificação das declividades de canal para escoamento variado.

A declividade fraca (designada **M** do inglês mild, suave) é uma declividade resultante em um escoamento subcrítico, em que a profundidade normal está acima da profundidade crítica.

A declividade forte (designada **S** do inglês steep, forte) é uma declividade resultante em um escoamento supercrítico, em que a profundidade normal está abaixo da profundidade crítica. A declividade crítica (designada **C**) é uma declividade resultante em um escoamento crítico, cuja profundidade normal coincide com a profundidade crítica. A declividade nula (designada **H** do inglês horizontal) é uma declividade perfeitamente plana. A declividade adversa (designada **A**) é uma declividade voltada à direção oposta à do escoamento (declividade negativa característica de trechos em auge). Essas declividades são ilustradas na figura 12.

Um exame atento da figura 12 revela que, em cada caso, a profundidade crítica é a mesma. Isso acontece porque a profundidade crítica depende apenas da vazão e da geometria do canal, não da declividade do canal. A profundidade normal varia com as condições da declividade. Para aprofundar a análise dos perfis da superfície líquida em canais com declividades fraca e forte, considere três zonas no perfil, como definido na figura 13.

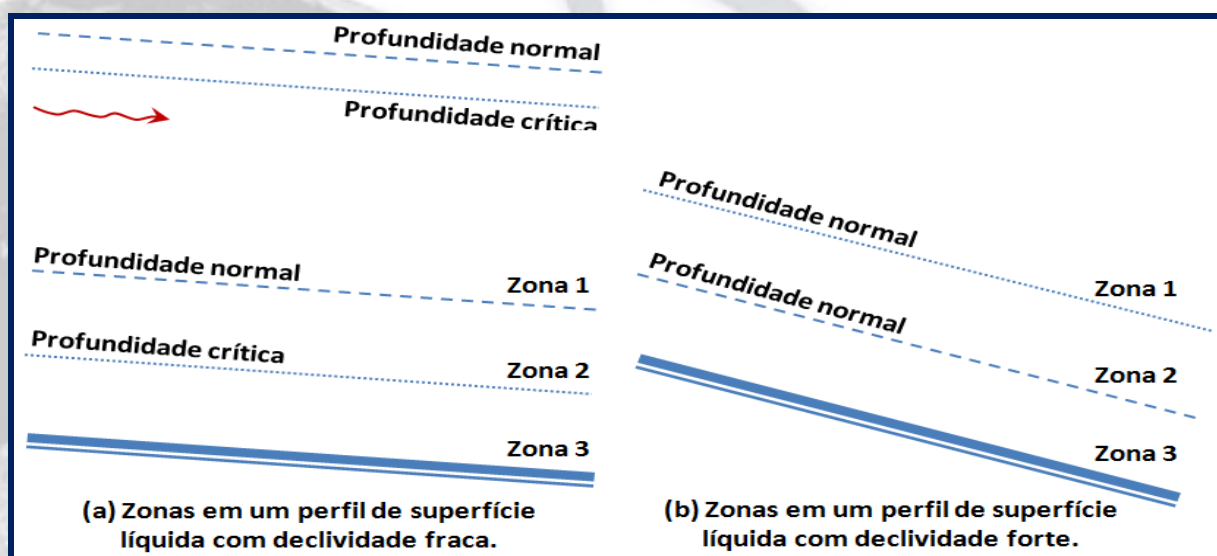


Figura 13. Definições de zonas em perfis da superfície líquida.

Para as declividades fracas, a Zona 1 compreende a área acima da linha da profundidade normal, enquanto a Zona 2 é a área entre a linha da profundidade normal e a linha da profundidade crítica, e a Zona 3 consiste na área entre a linha da profundidade crítica e o fundo do canal. Para as declividades fortes, as zonas são definidas similarmente, exceto que as linhas de profundidades normal e crítica são reversas. Usando essas designações de zonas, vários perfis podem ser identificados para várias condições de escoamento.

A figura 14 mostra exemplos de perfis de declividade suave. O perfil **M1** exibido na parte (a) é a típica curva de remanso para uma obstrução em um canal. Essa é uma condição comum na hidráulica de canais abertos.

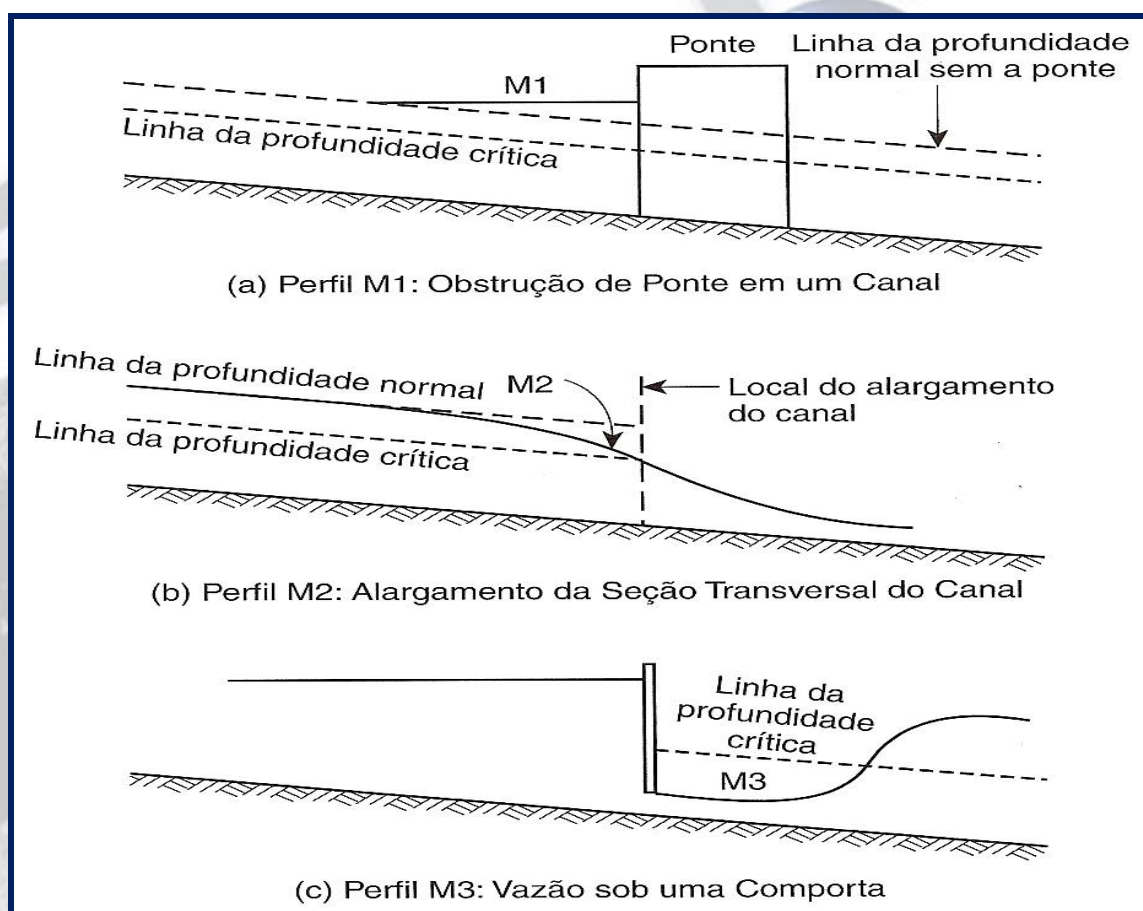


Figura 14. Exemplo de escoamento variado em perfis de declividade fraca.

A figura 15 mostra exemplos de perfis de declividade forte. A obstrução mostrada na parte (a) resulta em perfil **S1** a montante e um perfil **S3** a jusante. Se o canal tivesse uma declividade fraca, o perfil resultante seria semelhante ao exibido na figura 14(a).

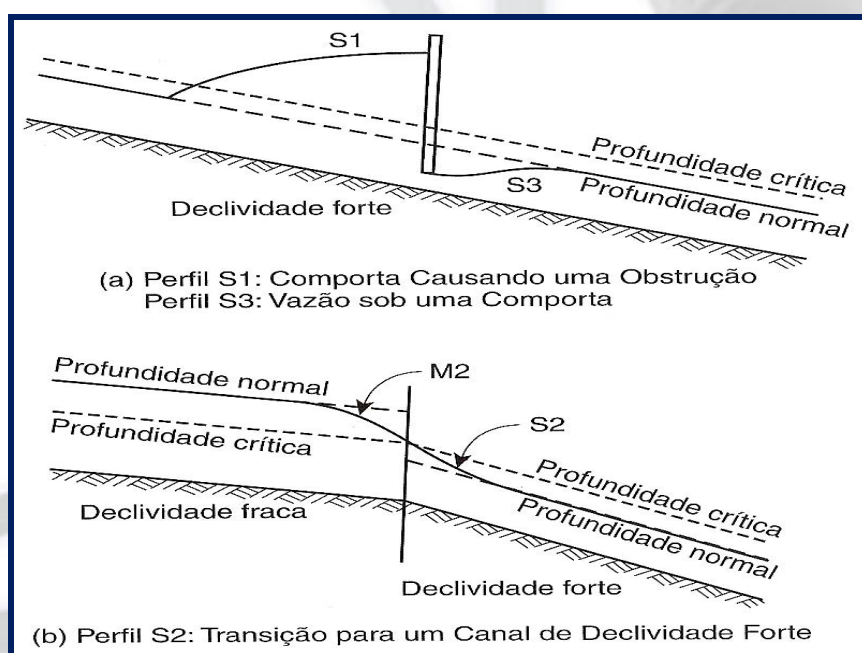


Figura 15. Exemplo de escoamento variado em perfis de declividade forte.

Uma seção de controle é uma seção transversal de um canal na qual a profundidade do escoamento pode ser facilmente determinada. O perfil da superfície líquida para o escoamento variado é traçado geralmente com o começo em uma seção de controle, prosseguindo então a montante ou a jusante, dependendo das condições do escoamento. Para o escoamento subcrítico, a seção de controle está sempre na extremidade a jusante da extensão do canal, e o perfil é traçado em uma direção a montante. Para o escoamento supercrítico, vale o oposto: a seção de controle está na extremidade a montante da extensão do canal, e o perfil é traçado em uma direção à jusante.

Perfis de remanso que envolvam escoamento subcrítico são causados por uma condição a jusante ou uma obstrução. A obstrução não permite que toda a vazão em escoamento atravesse facilmente, resultando em um aumento do escoamento a montante, similar a um aumento de tráfego quando uma via de quatro pistas se estreita em uma via de duas pistas. No entanto, no caso do escoamento supercrítico, uma obstrução não afeta o escoamento a montante, porque a água é impulsionada a jusante rapidamente. Ao contrário, o escoamento a jusante é afetado pela obstrução.

→ Perfil de Remanso

Um clássico perfil de remanso, ou curva de remanso, ocorre quando uma obstrução em um canal provoca um represamento a montante da obstrução, como mostrado na figura 15(a). O cálculo de um perfil de remanso pode ser realizado diretamente, pela integração da equação de energia, ou aproximadamente, pelos chamados métodos de passos padrão, que envolvem o cálculo de um número finito de pontos ao longo do perfil, usando a técnica de tentativa e erro. No método de integração por passos, a elevação da superfície líquida é conhecida na seção de controle, e a distância é calculada entre essa seção e outra elevação da superfície líquida conhecida. O cálculo é então repetido ao longo da extensão do canal. No método de passos padrão, a elevação da superfície líquida é conhecida na seção de controle, e a elevação da superfície líquida é calculada em outra seção de distância conhecida a partir da seção de controle. O cálculo é então repetido ao longo da extensão do canal. O método de passos padrão é o usado no **HEC – RAS**, software de perfil da superfície líquida desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos.

→ Entrada em um Canal

Outro exemplo de escoamento variado ocorre quando a água flui de um recipiente amplo, como um reservatório, até um canal. Essa situação é frequentemente encontrada no projeto de um vertedor para um reservatório ou uma bacia de detenção.

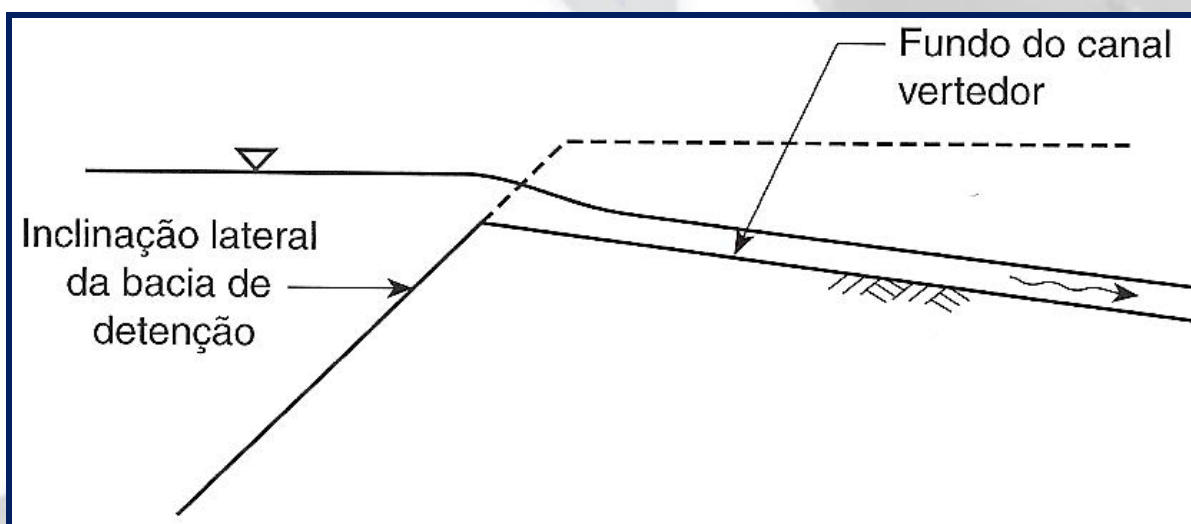


Figura 16. Perfil de uma entrada em um canal.

Como exemplo, considere a bacia de detenção descrita na figura acima (figura 16). Observe que o vertedor consiste em um canal com a abertura de sua entrada na lateral da bacia de detenção. A figura 16 mostra um perfil de uma típica entrada em um canal de vertedor. Para calcular a queda da superfície líquida conforme ela entra no canal, utiliza-se a equação de Bernoulli como ela é aplicada para o reservatório e o canal. Os parâmetros de profundidade da água são apresentados na figura 17.

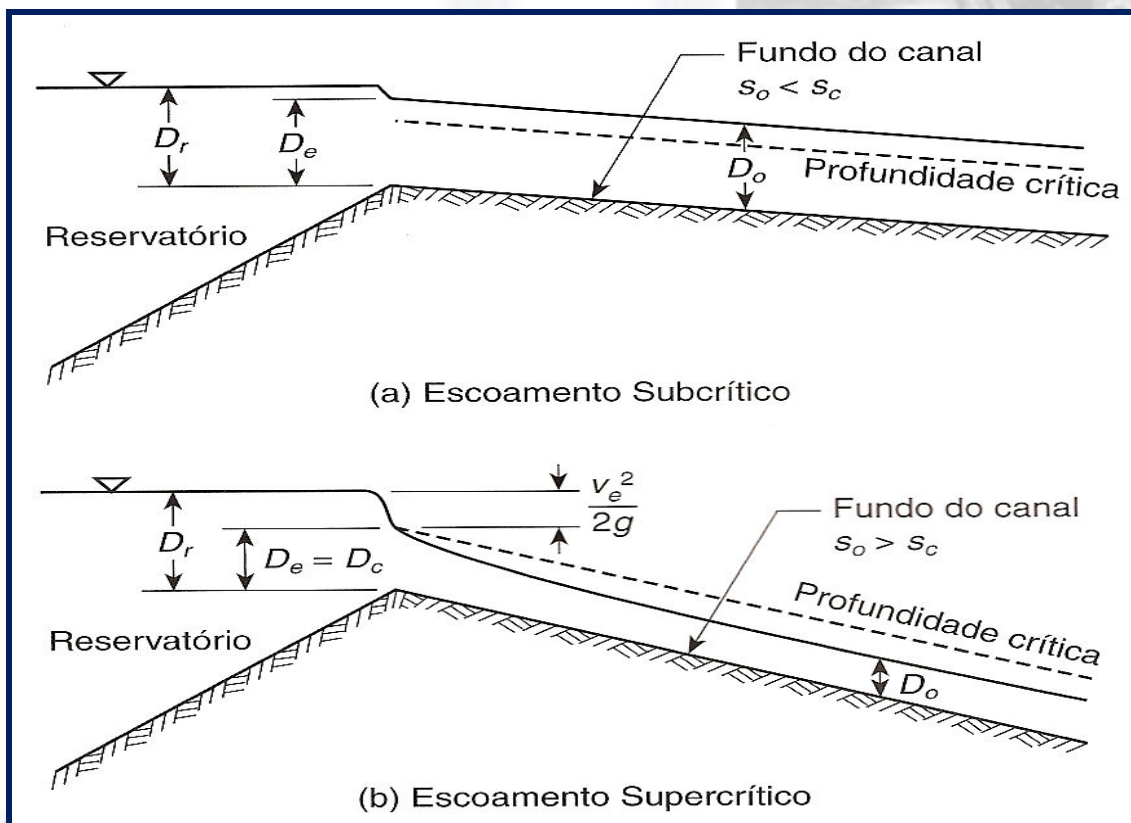


Figura 17. Entrada de um canal mostrando os parâmetros usados no cálculo das profundidades do escoamento.

Ao usar como plano de referência o fundo do canal na entrada, a equação de Bernoulli pode ser escrita como

$$D_r + \frac{v_r^2}{2 \cdot g} = D_e + \frac{v_e^2}{2 \cdot g} + h_e$$

Onde:

$D_r \rightarrow$ Profundidade do reservatório $[m]$;

$v_r \rightarrow$ Velocidade no reservatório $[m/s]$;

$D_e \rightarrow$ Profundidade do canal de entrada $[m]$;

$v_e \rightarrow$ Velocidade do canal de entrada $[m/s]$;

$h_e \rightarrow$ Perda de carga $[m]$.

Se a velocidade no reservatório for presumida como zero, e as perdas menores na entrada forem consideradas insignificantes, a equação se tomará

$$D_r = D_e + \frac{v_e^2}{2 \cdot g}$$

Substituindo a equação de continuidade, $Q = v \cdot a$, na equação acima obtém-se

$$D_r = D_e + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot a^2}$$

Onde:

$Q \rightarrow$ Vazão no canal $[m^3/s]$;

$a \rightarrow$ Área da seção transversal na entrada $[m^2]$;

Se o escoamento no canal for subcrítico ($S_o < S_e$), a água entra no canal na profundidade normal, D_w . Portanto, a profundidade na entrada é igual à profundidade através do restante do canal, e a equação pode ser escrita como

$$D_r = D_n + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot a^2} \quad (\text{Subcrítica})$$

Valores de D_n podem ser escolhidos, encontrando-se então os valores correspondentes de Q por meio da equação de Manning. Então, os valores de D_n ; e de Q podem ser substituídos na equação para encontrar os valores correspondentes de D_r .

Se o escoamento no canal for supercrítico ($S_o < S_e$), a água entra no canal na profundidade crítica, D_e . Portanto, a equação pode ser escrita como

$$D_r = D_c + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot a^2} \quad (\text{Supercrítica})$$

Valores de D_c podem ser escolhidos, encontrando-se então os valores correspondentes de Q por meio da equação de Manning. Então, os valores de D_c ; e de Q podem ser substituídos na equação para encontrar os valores correspondentes de D_r .



→ Ressalto Hidráulico

Quando a água escoar sobre uma superfície íngreme, como um vertedor, e entra em um canal relativamente plano, o resultado é uma transição de um escoamento raso e rápido para um escoamento mais profundo e mais lento. Qualquer transição abrupta de um escoamento supercrítico de baixa lâmina d'água para um escoamento subcrítico de lâmina d'água mais alta é chamado ressalto hidráulico. A figura 18 mostra um ressalto hidráulico

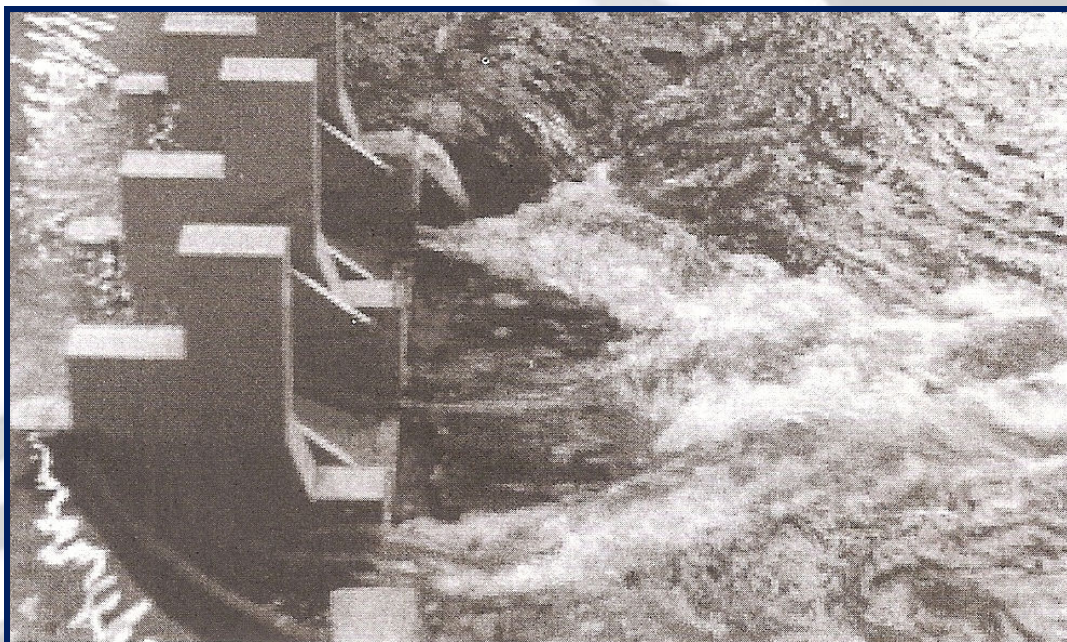


Figura 18. Ressalto hidráulico

Os ressaltos hidráulicos podem ocorrer onde quer que o escoamento em um canal seja muito rápido, como um canal de declividade elevada em transição para um canal plano, ou um escoamento descarregando sob uma comporta basculante em um canal. Ressaltos hidráulicos também podem ser induzidos em um ponto de escoamento rápido, para reduzir a velocidade, e assim, controlar a erosão a jusante. Estruturas típicas de indução de ressalto incluem bacias de amortecimento e dissipadores de energia que consistem em blocos de concreto agindo como obstruções ao escoamento.

Ressaltos hidráulicos podem ser fracos ou muito pronunciados, dependendo das condições do escoamento. Uma classificação dos diferentes tipos de ressaltas foi desenvolvida pelo U.S. Bureau of Reclamation, de acordo com o número **Fraude**, F , do escoamento de entrada. O valor de F deve ser maior que **1,0** para que haja ressalto hidráulico. A razão é que os ressaltos hidráulicos sempre ocorrem quando o escoamento se altera de supercrítico para subcrítico. De acordo com a classificação, quanto mais alto o valor de F , mais forte é o ressalto hidráulico. Os ressaltas mais fortes acontecem quando $F > 9,0$. Para valores de F entre **1,0** e **9,0**, os ressaltas hidráulicos que se formam têm várias características, incluindo fraco, oscilante e estacionário. Os principais aspectos de um ressalto hidráulico aparecem na figura 19.

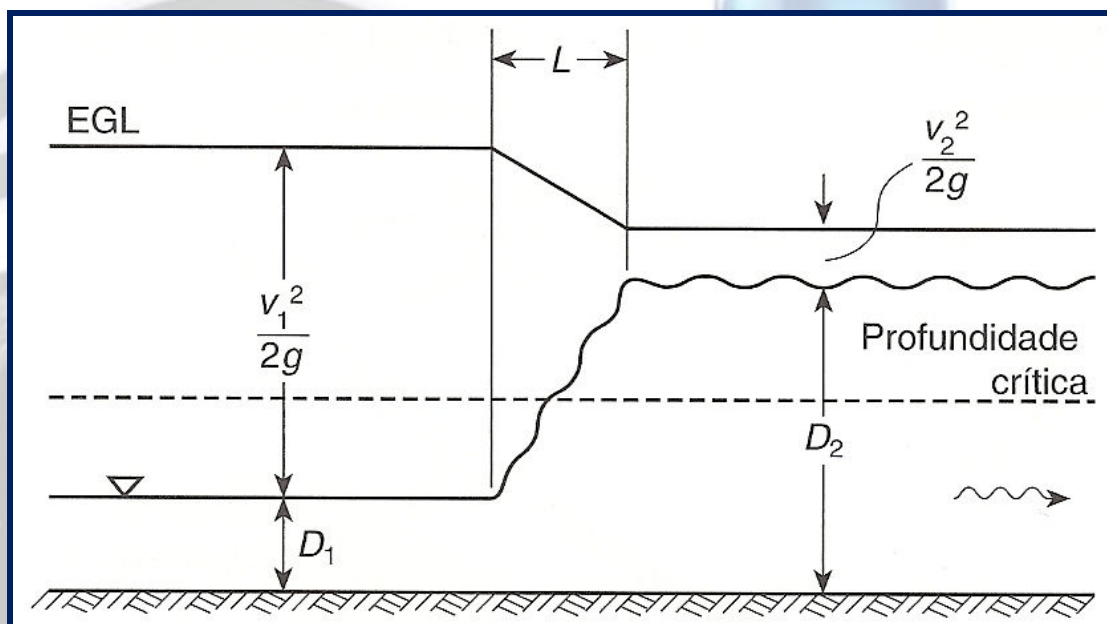


Figura 19. Típico ressalto hidráulico mostrado os parâmetros essenciais.



A profundidade do escoamento antes do ressalto, D_1 , é chamada profundidade de montante; a profundidade após o ressalto, D_2 , é chamada profundidade de jusante, também denominadas de profundidades conjugadas do ressalto. O comprimento, L , do ressalto não pode ser calculado matematicamente, em razão do complexo movimento da água no ressalto. No entanto, valores de L têm sido experimentalmente determinados e podem ser encontrados em muitos textos sobre hidráulica. Em geral, a profundidade de jusante é determinada pela profundidade normal no canal a jus ante do ressalto hidráulico. O local do ressalto é determinado pela velocidade inicial e pela profundidade de montante relativa à profundidade de jusante. Um ressalto hidráulico se formará em um canal retangular quando a seguinte equação for satisfeita:

$$D_2 = \frac{1}{2} \cdot D_1 \cdot \left[\sqrt{1 + 2 \cdot F_1^2} - 1 \right]$$

- DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E ACESSÓRIOS

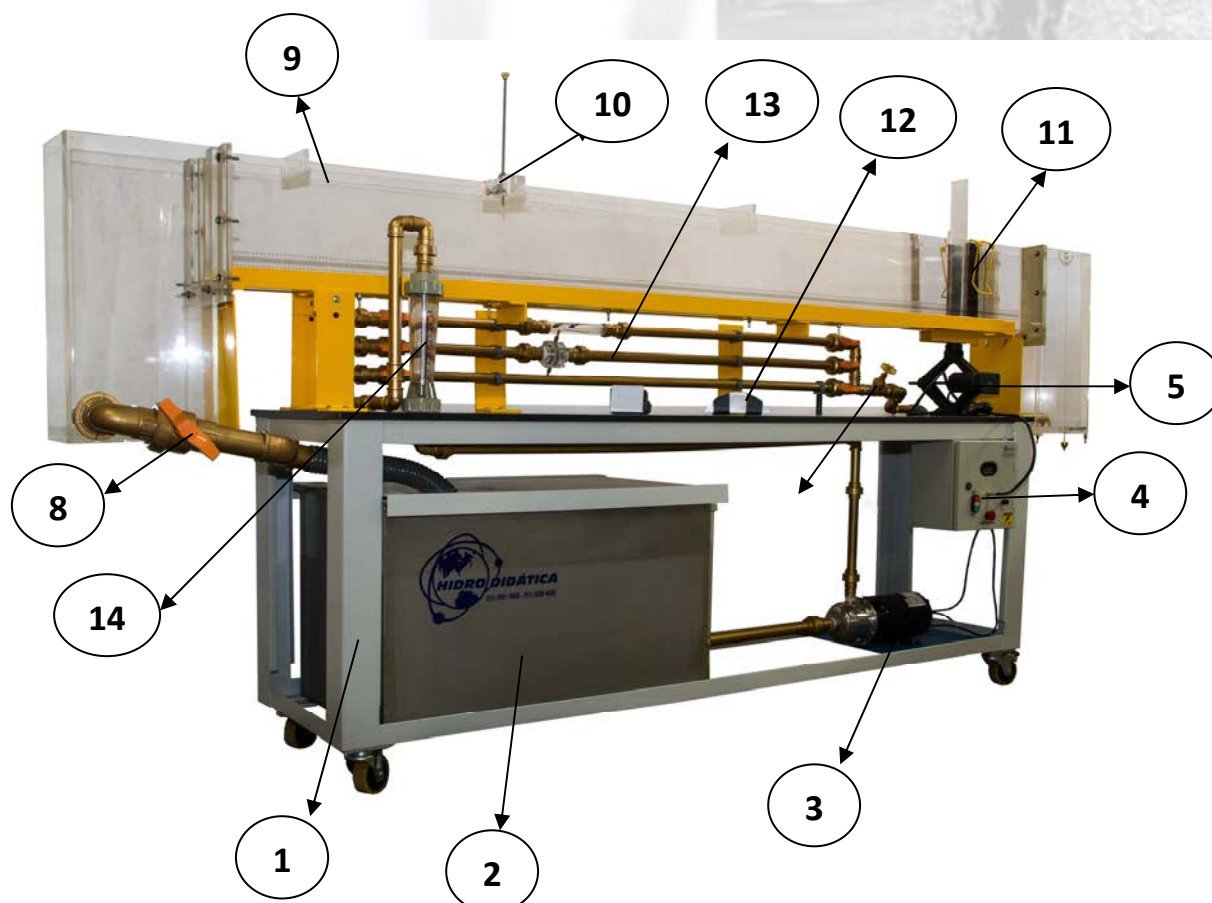


Figura 20. Descritivo da bancada HD24 – Canal de Escoamento.

- **PARTES COMPONENTES DA BANCADA – ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA**

01 – Estrutura Metálica:

Estrutura metálica elaborada em perfis de aço SAE 1020 com 5 mm de espessura. Estrutura com as seguintes dimensões (CxLxA) 3680 x 660 x 1250 mm e revestida com pintura eletrostática. Estrutura dotada de 04 (quatro) rodízios com altura de 100 mm sendo dois de ação livre e dois dotados de sistema de frenagem.

02 – Reservatório em Aço Inox:

Tanque reservatório elaborado em chapas soldadas de aço INOX. Reservatório com dimensões (CxLxA) 1250 x 550 x 600 mm e com capacidade volumétrica de 410 litros.

03 – Bomba Hidráulica:

Bomba centrífuga INOX com potência de 1CV, tensão de 220V trifásica e frequência de 60 Hz, rotação nominal de 3500 rpm, altura manométrica máxima de 41 m.c.a. e vazão volumétrica máxima de 14,0 m³/h. Tubulação de sucção de 1 1/4" (40mm) e tubulação de recalque de 1"



Figura 22. Bomba centrífuga.

04 – Painel de Comando:

Painel em chapa metálica dobrada e protegido com pintura eletrostática e desenhado para abrigar os comandos elétricos. Composto de botoeira liga-desliga, botoeira de emergência, conector para acoplamento do controle remoto do macaco hidráulico, inversor de frequência com chave potenciométrica para variar a rotação da bomba e display indicativo da frequência da bomba.



Figura 23. Painel de comando.

05 – Macaco de Parafuso com Comando Elétrico:

Macaco de parafuso com comando elétrico dotado de controle remoto para elevação do canal hidráulico. Possui capacidade de carga de 1500 kg e alimentação de 12V. Permite uma elevação do canal hidráulico de 300 mm.



Figura 24. Macaco de parafuso para elevação do canal..

06 – Painel piezométrico com manômetro de Coluna em U de 450-0-450 MCU e um manômetro diferencial de 0 a 380 mm:

Manômetro de coluna em U confeccionado em vidro e preenchido com água para determinação de variação de pressão manométrico por diferença de altura das colunas de líquidos. Dotada de escala milimétrica variando de 450 – 0 – 450 mm, permite a determinação direta da diferença de altura entre colunas e um manômetro diferencial de 0 a 380 mm .

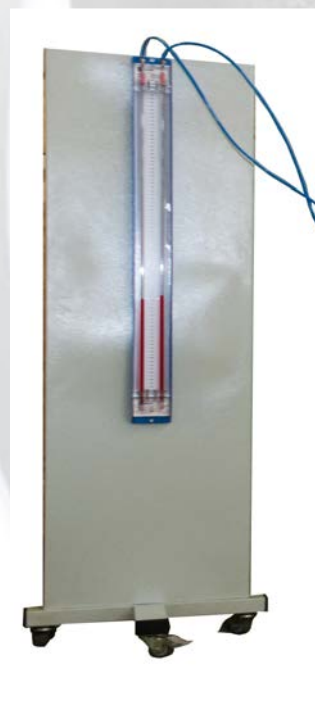


Figura 25. Manômetro de coluna em U.

08 – Conjunto de Registro:

Conjunto possui 01 Registro de saída de água do canal para reservatório principal.



Registro de controle de esgotamento do canal.

Figura 27. Registro.

09 – Canal Hidráulico:

Canal confeccionado em acrílico cristal, possuindo comprimento útil de 3000 mm, com escalas graduadas e caixas de acrílico, adutora e de descarga acopláveis ao canal, tubulação em PVC com cotovelos e registros.

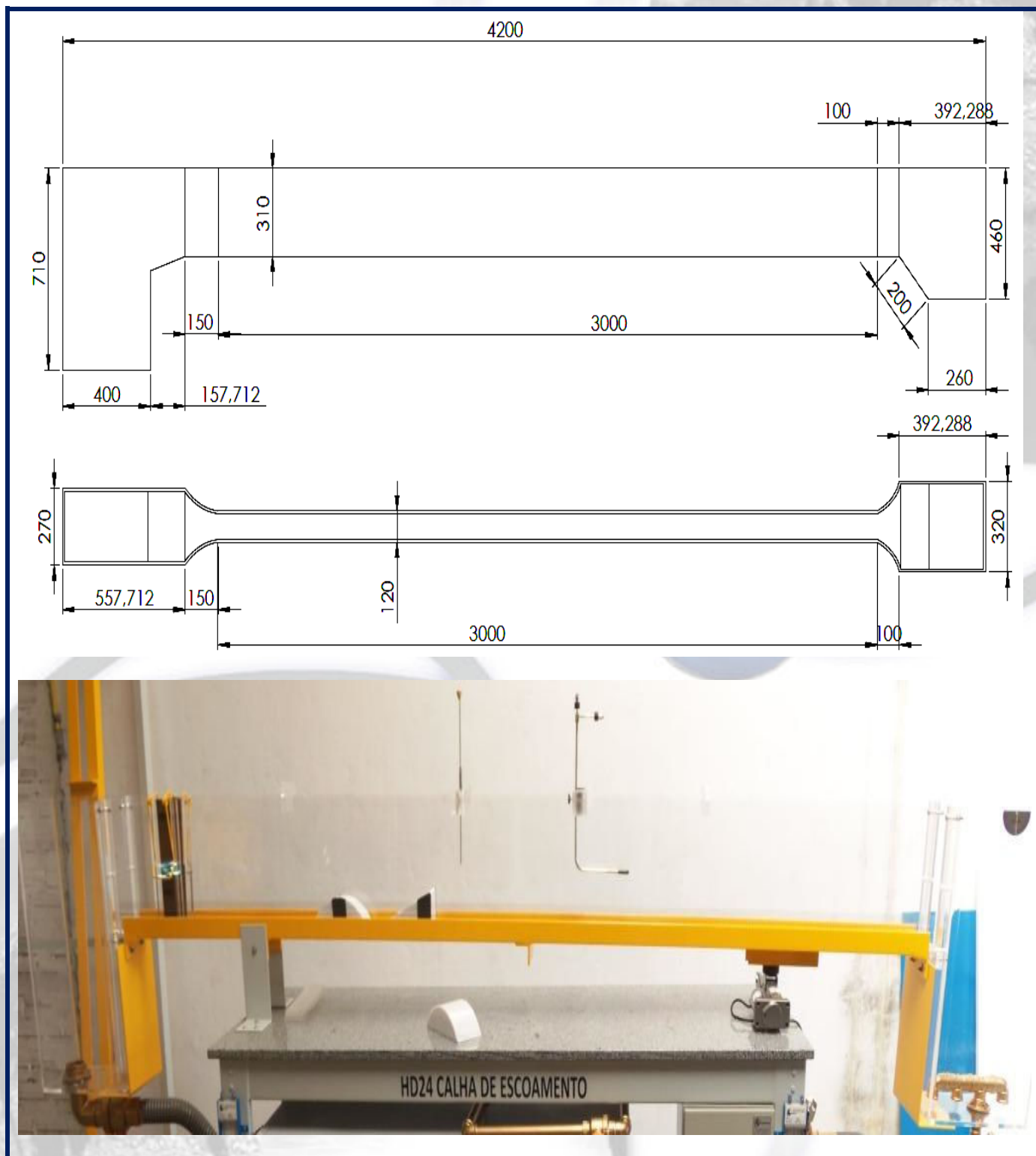


Figura 28. Canal hidráulico – Desenho técnico e foto.

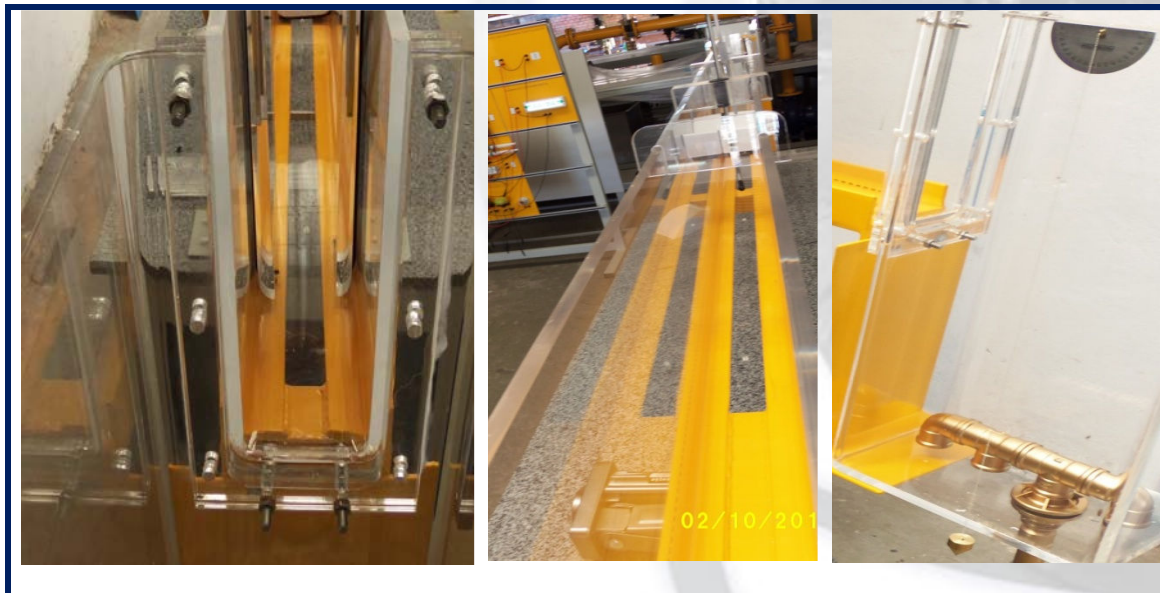


Figura 29. Canal hidráulico – Fotos de detalhes e do sensor de inclinação.

10 – Linímetro e Medidor de Velocidade Tipo Tubo de Pitot em L:

Linímetro:

Aparelho destinado a medir o nível da água; linígrafo. É um aparelho dotado de sistema de bóia e contra peso e destina-se ao registro gráfico contínuo da medição de níveis d'água para qualquer amplitude de variação do nível. É amplamente utilizado em rios, canais, açudes e reservatórios.

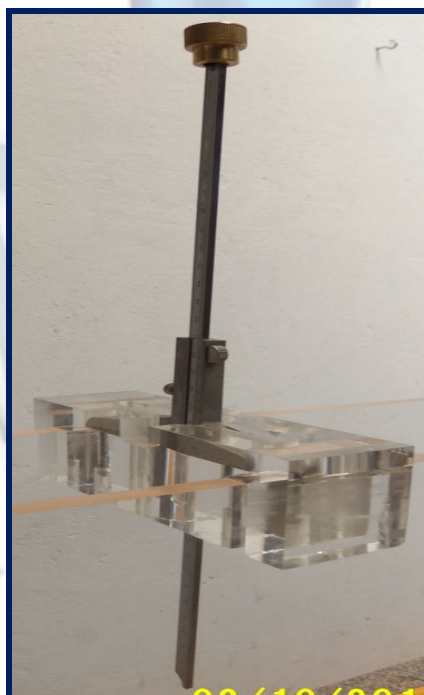


Figura 30. Linímetro.

***Medidor de Velocidade Tipo
Tubo de Pitot em L:***

Instrumento de medição de velocidade muito utilizado para medir a velocidade de fluidos em modelos físicos em laboratórios de hidráulica. Consiste basicamente num tubo orientado para o fluxo de fluido a medir. Visto que o tubo contém fluido pode assim ser medida a pressão do fluido em movimento (soma da pressão estática mais a pressão do fluido em movimento – a chamada taquicarga ou pressão dinâmica) a pressão total.

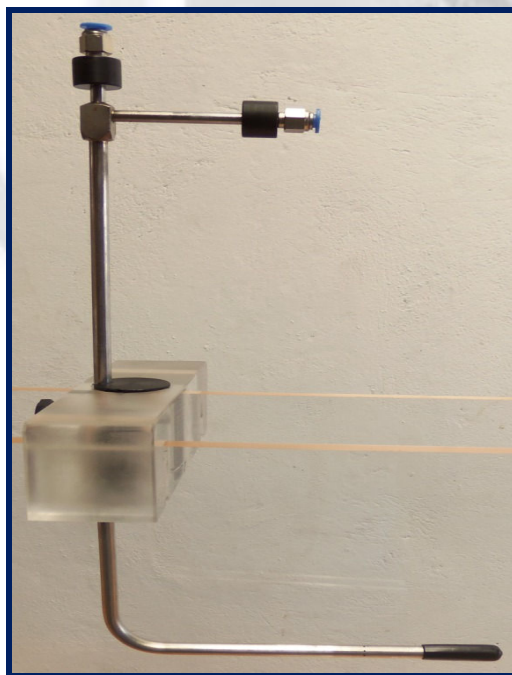


Figura 31. Tubo de Pitot.



11 – Placas com Vertedores com suporte de Placas Vertedoras:

Vertedores:

Estrutura hidráulica utilizada para medição de vazão e controle de vazão. Possui geometria variada sendo bastante empregada a triangular de parede delgada, embora possam ser empregadas as formas retangular, semicircular, entre outras. Em canais, o excesso de água é descarregado para jusante. O vertedor é essencialmente um orifício sem a parte superior. Canais possuem uma parte inicial com trecho reto seguido de uma obstrução que é o vertedor propriamente dito, posteriormente existe mais um canal (normalmente bastante inclinado) que possibilita o escoamento da água até a bacia de dissipação aonde se forma um ressalto hidráulico. Seguem abaixo os desenhos técnicos dos vertedores que acompanham a bancadas. São seis opções, conforme desenhos técnicos nas ultimas paginas:

11 – Pontos de Coleta de Pressão:

Para possibilitar a leitura e medição da perda de carga, e por consequência vazão, foram disponibilizados vários pontos de medição de pressão através de conectores do tipo pneumáticos M5.



Figura 38. Tomadas de pressão com conectores pneumáticos M5.

12 – Ressalto de Fundo:

Para possibilitar o estudo de ressaltos hidráulicos presentes à jusante de vertedores, foram confeccionados 03 ressaltos, um semi-circular e um chanfro e um modelos escada.



Figura 39. Ressaltos de fundo.



Figura 40. Realizando experimento com ressalto de fundo semi-circular.

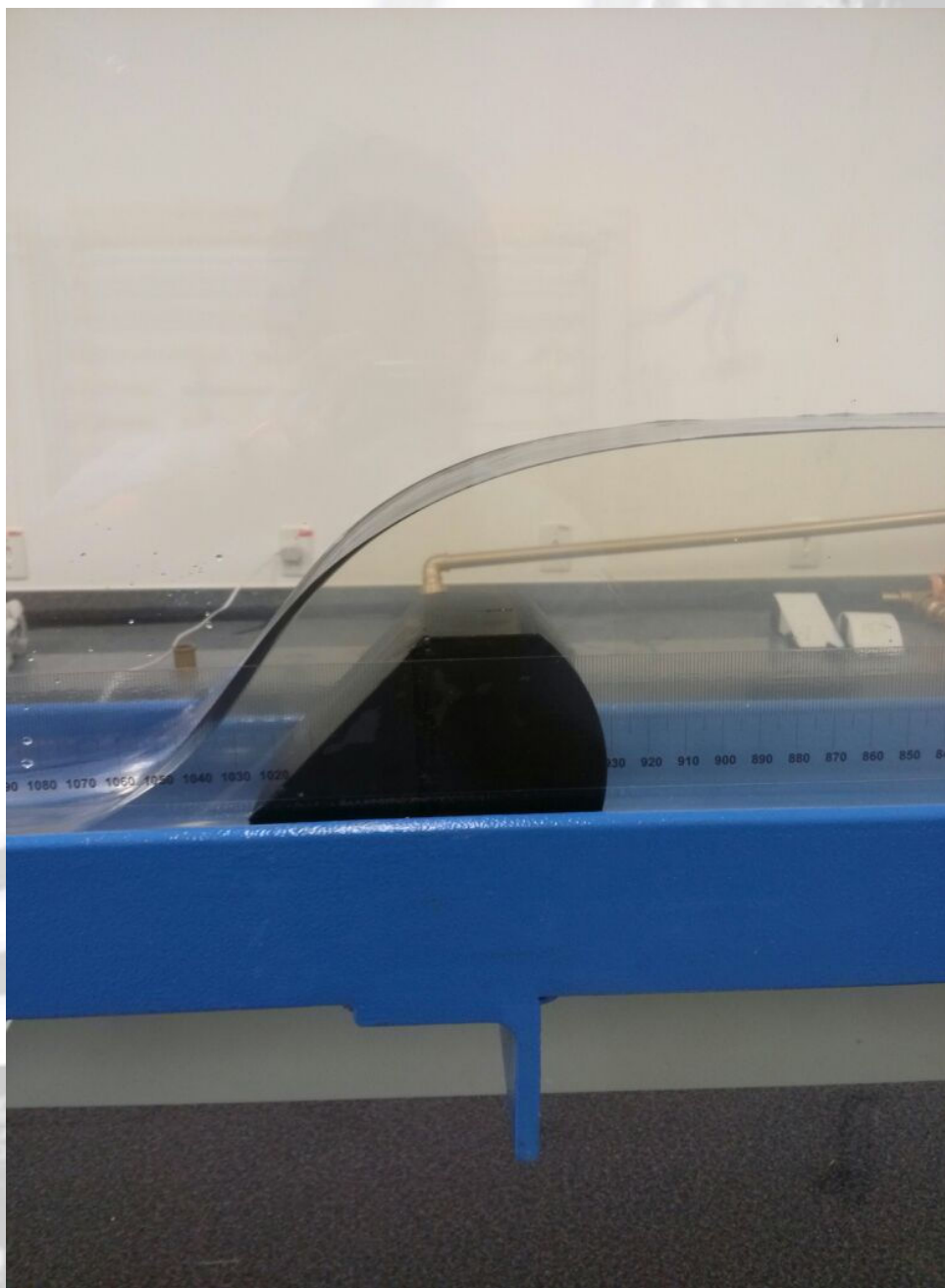
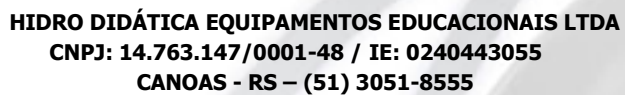
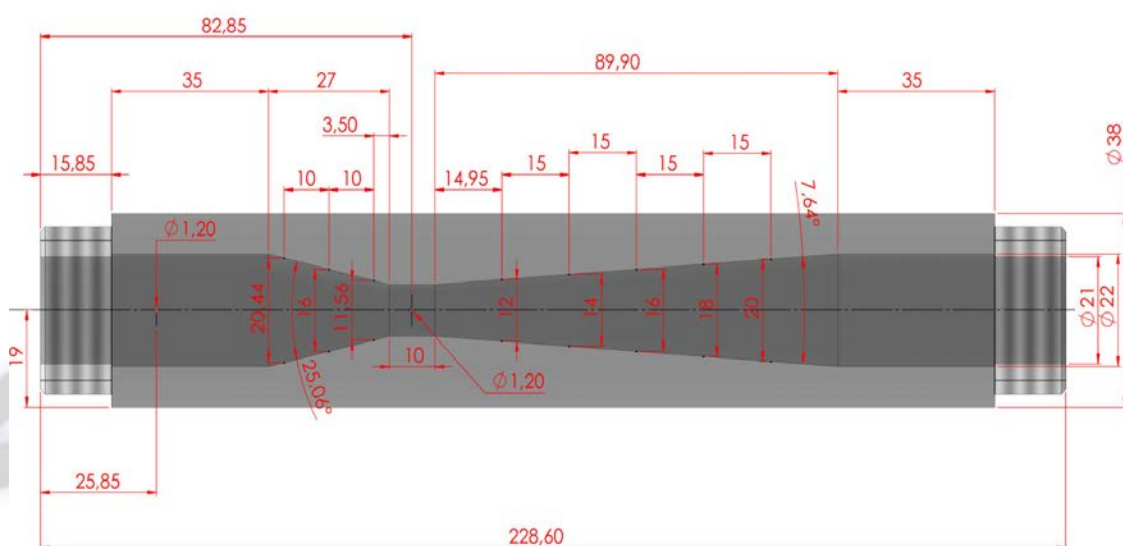


Figura 41. Realizando experimento com ressalto de fundo com chanfro.



Equipamento possui 03 tubulações de 1", uma com tubulação lisa, uma com placa de orifício que ontem uma lamina com furação de 12 mm e outra com tubo de venturi conforme desenho abaixo:



Sensor mecânico para medição de vazão através de área variável.





- **PROCEDIMENTOS GERAIS PARA UTILIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO**

1. Colocar o equipamento sobre superfície plana e nivelada;
2. Manipule o equipamento com cuidado evitando golpes nas mangueiras e conexões;
3. Aplique a pressão gradualmente para evitar golpes nas placas dos vertedores, pois pode ocorrer a ruptura das mesmas;
4. Tome cuidado para não bater no cilindro de vidro, pois o mesmo pode quebrar;
5. Não exceda a pressão do manômetro de Tubo em “U”, pois isso irá danificá-los;



- **MONTAGENS PRÁTICA SUGERIDAS**

A utilização do equipamento permite a montagem de inúmeras práticas sobre os fenômenos considerados no estudo da mecânica dos fluídos, as mais diversas abordagens podem ser discutidas dependendo dos enfoques a serem dados.

Algumas montagens práticas são sugeridas a seguir, as quais têm como objetivo proporcionar um entendimento inicial do funcionamento do equipamento bem como dos acessórios que acompanham o mesmo.

1. Escoamento Permanente em Canais;
2. Determinação do Coeficiente de Rugosidade de Manning, **11**;

A descrição das montagens é realizada de forma simplificada com vistas a apresentar o funcionamento do equipamento. Recomenda-se o aprofundamento teórico do assunto através da literatura especializada.



AULA PRÁTICA 01 – ESCOAMENTO PERMANENTE EM CANAIS

I – INTRODUÇÃO:

Um escoamento com superfície livre processa-se em regime uniforme quando se escoar naturalmente no seu leito tendo a sua superfície livre paralela ao fundo do canal. Numa secção onde ocorra regime uniforme a velocidade U e a altura h que medeia entre a superfície livre e o fundo do canal são constantes. Um escoamento que ocorra num canal com vazão volumétrica, secção e altura constantes tende naturalmente para o regime uniforme se nenhuma perturbação ocorrer. O escoamento necessita, no entanto de percorrer algum comprimento do canal antes de atingir o referido regime uniforme, dado que a montante dessa zona o escoamento é provavelmente diferente devido à influência da zona de entrada e a jusante haverá a influência da queda no fim do canal.

II – MATERIAIS:

- Canal hidráulico;
- Goniômetro (Transferidor);
- Linímetro.

III – METODOLOGIA:

1 – Regule a inclinação do canal (para uma boa observação do fenômeno sugere-se 0,5 a 1,0%) e verifique que no canal não estão instalados dispositivos que possam funcionar como obstáculos ao escoamento (p. ex: comportas);

2 – Ligue a bomba e em seguida abra a válvula de controle, regulando a vazão volumétrica até obter o valor pretendido (sugerimos um valor de $Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$);

3 – Espere alguns segundos por forma a permitir a estabilização do escoamento;

4 – Meça a altura da superfície livre da água relativamente ao fundo do canal na secção onde ocorra regime uniforme utilizando o linímetro.

NOTA: As considerações acima referidas fazem notar que o regime uniforme não ocorre imediatamente a jusante do tanque de amortecimento, mas sim em secções mais a jusante, onde já não se façam sentir as perturbações provocadas pelo bocal de entrada e onde sejam desprezáveis as devidas à queda no final do canal.

Para aumentar a precisão das observações, dada a existência das perturbações atrás referidas, recomenda-se que sejam efetuadas diversas medições da altura de água em secções espaçadas entre si de 10 a 20 cm: o valor médio obtido será a profundidade do escoamento uniforme.

**AULA PRÁTICA 02 – DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE
RUGOSIDADE DE MANNING, n**

1 – INTRODUÇÃO:

Para o estudo do regime uniforme em escoamentos com superfície livre utiliza-se a função de Manning, com a seguinte forma:

$$Q = \frac{a}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S_o^{1/2}$$

Onde:

$Q \rightarrow$ Vazão volumétrica do canal [m^3/s];

$R \rightarrow$ Raio hidráulico [m];

$S_o \rightarrow$ Declividade do canal [m/m];

$n \rightarrow$ Coeficiente da rugosidade;

$a \rightarrow$ Área da seção transversal [m^2].

O raio hidráulico corresponde ao quociente entre a seção transversal do escoamento e o seu perímetro molhado. O valor de R é calculado a partir das características geométricas da seção. No canal em estudo teremos:

$$R = \frac{a}{p} = \frac{b \cdot h}{b + 2 \cdot h}$$



Onde:

P → Perímetro molhado da secção [**m**];

b → Largura da secção transversal [**m**];

h → Altura da superfície livre relativamente à soleira do canal [**m**].

O conhecimento da natureza e do estado em que se encontra o leito de um escoamento, em resumo, o seu grau de rugosidade, é muito importante face ao considerável efeito que tem sobre o escoamento.

O coeficiente **n** que nos surge na primeira equação depende da natureza das paredes do canal e encontra-se na tabela presente no início deste manual, página 15.

II – MATERIAIS:

- Canal hidráulico;
- Goniômetro (Transferidor);
- Linímetro.

III – PROCEDIMENTO:

Para determinar o coeficiente de rugosidade **n** do canal em observação proceda da seguinte forma:

- 1 – Regule a inclinação do canal (sugere-se 0,5 a 1,0%) e anote-a;
- 2 – Introduza no canal um dos pisos disponíveis de rugosidade variável;

- 3 – Efetue o acionamento da bomba e deixe estabilizar o regime de escoamento para a vazão volumétrica pretendida (sugerimos um valor de $Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$), anotando o seu valor;
- 4 – Meça a altura da superfície livre relativamente à soleira do canal numa seção onde o regime uniforme se tenha estabelecido (ver experiência 1);
- 5 – Calcule o raio hidráulico **R** e anote-o;
- 6 – Calcule o coeficiente de rugosidade **n** através da equação apresentada explicitando-a em função de **n** ;
- 7 – Repita o indicado nos pontos 3 a 6 para três novos valores de vazão volumétrica, mantendo constante a inclinação do canal;
- 8 – Altere a inclinação do canal, anotando o novo valor;
- 9 – Repita o indicado nos pontos 3 a 6 com os valores da vazão volumétrica anteriormente utilizadas;
- 10 - Determine a média dos valores encontrados para **n** .



NOTA: Se as características de rugosidade das paredes e do rasto do canal são diferentes (seção mista), o valor de n obtido experimentalmente representa uma média ponderada, de acordo com a fórmula de Manning. Assim sendo, sob diferentes condições experimentais poderemos obter diferentes valores de n ; tal deve-se ao fato de a influência das paredes aumentarem com a altura do escoamento, e, portanto com a variação da sua secção.



• **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA**

1. GRIBBIN, J. E. Introdução à hidráulica, hidrologia, e gestão de águas pluviais. Tradução da 3ª edição norte-americana. São Paulo: Cengage Learning. 2009. 494 p. ISBN 978-85-221-0635-6.
2. AZEVEDO NETTO, J. M. de. Manual de hidráulica. 8. ed. atual. São Paulo: E. Blücher, 1998. 669 p. ISBN 85-212-0153-2
3. GIORGETTI, M. F. Fundamentos de fenômenos de transporte para estudantes de engenharia. São Carlos: Suprema, 2008. 500 p. ISBN 978-85-98156-30-9
4. NEVES, E. T. Curso de hidráulica. 9. ed. São Paulo: Globo, 1989. 577 p. ISBN 85-250
5. PIMENTA, C. F. Curso de hidráulica geral. 4. ed Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 2v.
6. PORTO, R. M. Hidráulica Básica EESC -USP, São Carlos, SP, 1999.
7. MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. Fundamentos da mecânica dos fluidos. São Paulo: Edgard Blücher, 1997. v ISBN 8521201435
8. STREETER, V. Mecânica dos Fluidos McGraw-Hill, São Paulo, SP, 1979.