



**CENTRO UNIVERSITARIO DE BRASÍLIA – UniCEUB
FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS
CURSO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO
PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO**

***ANÁLISE E ESTUDO DE ESCOAMENTO EM CONDUTOS LIVRES COM UM
TRATAMENTO COMPUTACIONAL ATRAVÉS DE SOFTWARE DE SIMULAÇÃO***

Aluno: Janaína Neves Souto

Brasília, 2008.

Janaína Neves Souto

***ANÁLISE E ESTUDO DE ESCOAMENTO EM CONDUTOS
LIVRES COM UM TRATAMENTO COMPUTACIONAL
ATRAVÉS DE SOFTWARE DE SIMULAÇÃO***

Monografia apresentada à Banca Examinadora da Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - UniCEUB, como um dos pré - requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia da Computação.

Prof. Orientador: Carmo Gonçalves

Brasília – DF, Julho de 2008.

AGRADECIMENTOS

À minha amada família;

Ao meu namorado;

Aos meus amigos;

Ao professor Carmo Gonçalves, que me orientou com paciência, dando sempre dicas pertinentes, me norteando e incentivando cordialmente;

A todos os professores que contribuíram para minha formação;

Acima de tudo, agradeço a DEUS, pela grande oportunidade da Vida.

RESUMO

O interesse principal na apresentação desta monografia é mostrar os aspectos práticos que envolvem a análise do escoamento livre de fluidos em canais artificiais de seção circular e retangular, e a partir desta análise construir uma ferramenta computacional que simulará o dimensionamento de canais artificiais, calculando a vazão, velocidade média, raio hidráulico, número de Reynolds, número de Froude, velocidade desejável, fator de atrito e perda de carga unitária. Todos estes cálculos representam a maioria das situações com as quais a grande parte de profissionais da área de hidráulica se depara diariamente. Entretanto, não se tem a intenção de esgotar o assunto e nem de apresentar ou demonstrar teorias de hidráulica, visto que a literatura corrente sobre o assunto já o faz e é bem ampla. Tem-se como principal objetivo abordar os principais tópicos práticos e relevantes sobre o dimensionamento de canais artificiais.

Palavras-chaves: escoamento livre, canais, seção retangular, seção circular.

ABSTRACT

The main interest in presenting this monograph is to show the practical aspects involving the analysis of the free flow of fluids in channels of artificial circular and rectangular section, and from this analysis to build a computational tool that simulate the dimensions of artificial channels by estimating the flow, average speed, hydraulic radius, the Reynolds number, number of Froude, speed desirable, factor of friction and loss of charge unit. All these calculations represent the majority of the situations with which a large proportion of professionals in the area of hydraulic daily. However, it is not intended to exhaust the subject and not to provide or demonstrate theories of hydraulics, because the current literature on the subject and it does it well wide. It has been principal objectives address the main topics on the practical and relevant dimensions of artificial channels.

Keywords: free flow, canals, section rectangular, circular section.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema do Experimento de Reynolds.....	16
Figura 2.2 – Aspecto do escoamento no tubo de vidro.....	18
Figura 3.1 – Elementos geométricos de uma seção.....	25
Figura 3.2 – Tipos de escoamentos permanentes, uniformes e variado.....	29
Figura 3.3 – Diagrama de variação da velocidade na seção transversal.....	33
Figura 3.4 – Velocidades medidas em um canal – curvas isotáquicas.....	34
Figura 3.5 – Velocidades na seção longitudinal.....	34
Figura 3.6 – Diagrama de variação da velocidade com a profundidade.....	35
Figura 3.7 – Esquema das componentes da equação geral da resistência.....	42
Figura 3.8 – Grandezas geométricas do Canal Circular.....	52
Figura 3.9 – Elementos Hidráulicos da seção circular: relação da vazão pela lâmina líquida.....	53
Figura 3.10 – Seção Circular.....	54
Figura 3.11 – Seção retangular.....	56
Figura 3.12 – Linha de energia e linha piezométrica no escoamento.....	58
Figura 3.13 – As diferentes relações entre a seção inicial do canal e a seção final..	61
Figura 4.1 – Diagrama de Atividades.....	83
Figura A.1 – Canal artificial cavado no coral.....	83
Figura A.2 – Situação atual do Canal Campos – Macaé.....	83
Figura A.3 – Canal Retangular.....	84
Figura A.4 – Canal Retangular.....	85
Figura A.5 – Canalização Ribeirão Anhumas.....	86
Figura A.6 – Canal da Integração.....	87
Figura A.7 – Canal da Integração.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Coeficiente de Chézy para condutos circulares.....	41
Tabela 3.2 – Área molhada, perímetro molhado e raio hidráulico das seções circular e retangular.....	44
Tabela 3.3 – Valores (n) da fórmula de Manning.....	46
Tabela 3.4 – Valores do coeficiente C.....	49
Tabela 3.5 – Rugosidade dos condutos (e).....	51

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Δl - Delta (variação do deslocamento – deformação da mola)

∂ – Derron (derivada)

τ - Tau (tensão de cisalhamento)

μ - Miu (viscosidade dinâmica)

ε - Épsilon (compressibilidade volumétrica)

ρ - Ro (densidade)

γ - Gama (peso específico)

Rey – Reynolds

α - Alfa (ângulo de inclinação)

Tg – Tangente

Sen – seno

θ - Teta (ângulo da máxima vazão de escoamento na seção circular)

PDF – Portable Document Format

SUMÁRIO

1 Introdução	1
1.1 OBJETIVOS.....	1
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	2
2 Fundamentos Teóricos	4
2.1 BREVE HISTÓRICO DA MECÂNICA DOS FLUÍDOS.....	4
2.2 PRINCÍPIOS DA MECÂNICA DOS FLUÍDOS.....	5
2.2.1 Viscosidade.....	6
2.2.2 Reologia.....	6
2.2.3 Fluido Newtoniano.....	8
2.2.4 Fluido Não-Newtoniano.....	9
2.2.5 Compressibilidade.....	11
2.2.6 Parâmetros Relevantes.....	12
2.3 ESCOAMENTO DOS FLUIDOS.....	14
2.3.1 Campo de Velocidades.....	14
2.3.2 Experiência de Reynolds.....	15
2.3.3 Regime Permanente e Não-Permanente.....	20
3 Condutos Livres	22
3.1 FORMA DOS CONDUTOS.....	22
3.2 ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DOS CANAIS.....	24
3.3 TIPOS DE ESCOAMENTOS.....	26
3.4 VELOCIDADES EM CANAIS.....	33
3.4.1 Distribuição da velocidade nos canais.....	33
3.4.2 Relações para a velocidade média.....	35
3.4.3 Limites da velocidade.....	36

3.4.4 Velocidade ótima nos canais e a fórmula de Kennedy.....	38
3.5 EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS	40
3.5.1 Fórmula de Chézy.....	40
3.5.2 Equação geral da resistência.....	41
3.5.3 Fórmula de Chézy com coeficiente de Manning.....	44
3.5.4 Fórmula de Manning.....	46
3.5.5 Fórmula de Hazen-Willians.....	48
3.5.6 Fórmula de Forchheimer.....	49
3.5.7 Fórmula universal para canais.....	50
3.6 CONDUTOS CIRCULARES.....	52
3.7 CONDUTOS RETANGULARES.....	55
3.8 PERDA DE CARGA.....	57
3.8.1 Linha de energia e linha piezométrica.....	57
3.8.2 Carga específica.....	58
3.8.3 Perda de carga.....	60
3.8.4 Perda de Carga Unitária e Fator de Atrito.....	61
4 O Software de Simulação	65
5 Resultados Obtidos	68
6 Conclusão	82
7 Bibliografia	84
APÊNDICE A – FOTOS DE CANAIS ARTIFICIAIS.....	85
APÊNDICE B – DEMONSTRAÇÃO DAS PRINCIPAIS EQUAÇÕES UTILIZADAS NO SIMULADOR.....	91
APÊNDICE C – CÓDIGO FONTE DO SIMULADOR.....	95

1 INTRODUÇÃO

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma análise do escoamento em condutos livres circulares e retangulares e o desenvolvimento juntamente com a implementação de ferramenta de apoio para simulação de cálculos computacionais.

Os métodos numéricos aplicados são capazes de resolver as equações envolvidas por intermédio do software, pois a solução manual é complexa, trabalhosa, lenta e não recomendável. Contudo, a utilização de métodos computacionais de cálculos para o dimensionamento de condutos livres, calculando vazão, perda de energia e fator de atrito, é de grande utilidade na hidráulica aplicada.

Neste trabalho, serão apresentados os aspectos práticos que envolvem a análise do escoamento, e os tópicos relevantes sobre o tema.

O sistema de simulação computacional, com suas várias opções de cálculo, tornará a resolução de problemas que envolvam o escoamento em condutos livres circulares e retangulares simples, automático e dinâmico.

1.1 Objetivos do Trabalho

Apresentar os aspectos práticos e teóricos que envolvem a análise do escoamento em canais artificiais, mostrando tópicos relevantes sobre o tema, equacionar este estudo e implementar um programa que calcule o dimensionamento de condutos livres, vazão, perda de energia e fator de atrito. Esses cálculos

representam a maioria das situações em que profissionais de hidráulica necessitam em seu dia-a-dia.

Esta ferramenta que será implementada e apresentada neste trabalho, terá como bases, leis matemáticas amplamente consolidadas, tais como: a equação geral de resistência, a fórmula de Chézy, o coeficiente e a fórmula de Manning, a fórmula universal para canais, a fórmula de Hazen-Williams, cálculo de vazão e perda de carga.

1.2 Estrutura do Trabalho

Serão apresentados, nos próximos capítulos, um breve histórico da mecânica dos fluidos na hidráulica, e os principais conceitos e princípios da mecânica dos fluidos relacionados ao tema do trabalho.

No capítulo 3, serão abordados os principais tópicos e conceitos deste trabalho, ou seja, os conceitos de canais artificiais e suas diferentes formas, escoamento livre e outras formas de escoamento, as velocidades nos canais, vazão, perda de carga e fator de atrito nas seções retangulares e circulares.

As características do simulador de dimensionamento de canais artificiais serão apresentadas no capítulo 4, que foi estruturado na teoria, nas leis fundamentais e equações de escoamento livre em canais artificiais, sua construção, código fonte e linguagem. No capítulo seguinte, serão mostrados os resultados obtidos com o simulador, os testes e validação por meio de resolução de problemas

conhecidos. Será apresentada, no capítulo 6, a conclusão deste trabalho, destacando o de mais importante de todo o trabalho, e suas utilidades na prática.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Breve Histórico da Mecânica dos Fluídos – Hidráulica

Todo este capítulo 2 tem como base a referência bibliográfica [2] capítulos 2 e 3, a referência bibliográfica [3] capítulos 3, 4 e 5, a referência bibliográfica [4] capítulos 3 e 4, a referência bibliográfica [7] capítulo 1 e 2, a referência bibliográfica [13] capítulos 2 e 3, a referência bibliográfica [15] capítulos 1, 2 e 3, a referência bibliográfica [16] capítulos 2, 3 e 4.

Não há dúvida da importância dos conhecimentos que envolvem os fenômenos físicos que ocorrem na natureza com materiais fluidos. Tais fenômenos têm permitido ao homem um avanço crescente no desenvolvimento técnico, propiciando-lhe melhores condições de sobrevivência.

São muitos os campos de aplicação desses conhecimentos: habitação, construção de máquinas, hidráulica, meteorologia, acústica, transporte, agricultura, medicina, entre outras, que se desenvolvem com aplicações de conhecimentos de mecânica dos fluídos, sempre presentes, embora em escalas diferentes.

O desenvolvimento da mecânica dos fluídos foi iniciado antes de Cristo, numa época em que as aplicações, sem muitos conhecimentos do comportamento dos fenômenos eram consideradas arte e não ciência. Depois dessa época obscura, que foi até o Renascimento, apareceram muitas aplicações no ramo da hidráulica. A partir do século XVI, quando estudos matemáticos começaram a confirmar algumas teorias propostas, os conhecimentos hidráulicos foram estabelecidos por meio de experimentos.

Nos séculos XVII e XVIII, os conhecimentos se acumularam de forma muito lenta, e o grande desenvolvimento apareceu no século XIX, chegando ao estado atual, firmando-se como ciência.

Muitos se dedicaram a este ramo da ciência e têm seus nomes lembrados em princípios, leis, coeficientes, unidades de medidas. Tudo teve início com Arquimedes, antes de Cristo, depois, Leonardo da Vinci, no Renascimento; Isaac Newton, na primeira metade do século XVII, pouco depois, Euler. Importantes equações estabelecidas por Bernoulli. No Século XVIII, destacaram-se Navier, Stokes, e Reynolds. Mais tarde, Prandtl, entre outros, que contribuíram para o desenvolvimento desta ciência.

Até hoje, novas áreas estão sendo investigadas, e os conhecimentos crescem em progressão geométrica.

2.2 Princípios da mecânica dos Fluidos

A mecânica dos fluidos estuda os fenômenos que ocorrem em meios fluidos, procurando estabelecer métodos que tomem por base os princípios gerais da física e que sejam consistentes com resultados de modernas técnicas experimentais [1].

É bastante difícil encontrar uma área da engenharia que não necessite usar conhecimentos da mecânica dos fluidos. Com o avanço da tecnologia, a mecânica dos fluidos foi se desenvolvendo como uma ferramenta fundamental,

comum e necessária em várias áreas, e não é mais um interesse em área específica como já foi há algumas décadas.

Os materiais existentes na natureza podem ser agrupados em diversas classes, porém o agrupamento mais simples é o que forma duas classes: fluidos e sólidos. Um fluido é uma substância que sob a ação de esforços cisalhantes – força cortante – por menores que sejam, sofre deformações contínuas. Uma definição mais técnica descreve o fluido como toda substância incapaz de suportar, sem se deformar continuamente, efeitos de tensões de cisalhamento – força por unidade de área da secção transversal – por menores que estas sejam.

2.2.1 VISCOSIDADE

Uma das características dos fluidos é a viscosidade, que é a medida da resistência interna ou fricção interna de uma substância ao fluxo, quando submetida a uma tensão. Quanto mais viscosa a massa, mais difícil de escoar e maior o seu coeficiente de viscosidade.

Os fluidos reais (líquidos, gases, sólidos fluidizados) apresentam uma resistência à deformação ou ao escoamento, quando submetidos a uma determinada tensão. Para os gases, a viscosidade está relacionada com a transferência de impulso devido à agitação molecular. Já a viscosidade dos líquidos relaciona-se mais com as forças de coesão entre as moléculas. Os líquidos viscosos não possuem forma geométrica definida e escoam irreversivelmente quando submetidos a forças externas. Por outro lado, os sólidos apresentam forma

geométrica bem definida e não sofrem deformação contínua pela ação de forças externas.

Muitos materiais apresentam um comportamento mecânico intermediário entre estes dois extremos, evidenciando tanto características viscosas como elásticas e, por este motivo, são conhecidos como visco elástico (exemplos: natas, pasta de amendoim, marshmallow, manteiga batida).

2.2.2 REOLOGIA

Reologia é o estudo do escoamento e da deformação da matéria, ou seja, é o estudo do comportamento de fluidez. Os componentes dos fluidos podem apresentar diferentes formas geométricas, características diversas de ligação, tamanhos variados, que lhe conferem comportamentos distintos. Então, devido a sua composição alguns produtos possuem uma única viscosidade a uma dada temperatura independente da força de cisalhamento e são denominados de fluidos newtonianos. Enquanto a maioria dos fluidos apresenta comportamento reológico mais complexo e a determinação da viscosidade não é um tópico simples.

Quanto à deformação os fluidos podem ser classificados como:

- *Reversíveis ou elásticos*: são sistemas que não escoam; sua deformação é reversível e o sistema obedece à lei de Hooke.

A *lei de Hooke* é a lei da física relacionada a elasticidade de corpos, que serve para calcular a deformação causada pela força exercida sobre um corpo, tal

que a força é igual ao deslocamento da massa a partir do seu ponto de equilíbrio vezes a característica constante da mola ou do corpo que sofrerá deformação:

$$F = k \cdot \Delta l \quad (2.1)$$

Onde:

F é a força, em Newtons

K é a constante elástica da mola, em Newton/metro

Δl é a deformação da mola, em metros.

- *Irreversível ou viscoso*: são sistemas que escoam; sua deformação é irreversível e o sistema obedece à lei de Newton, de viscosidade constante.

Também podem ser classificados quanto à relação entre taxa de deformação e a tensão de cisalhamento:

- *Fluidos newtonianos*: sua viscosidade é constante, seguem a lei de Newton. Esta classe abrange todos os gases e líquidos não poliméricos e homogêneos. (ex.: água, leite, soluções de sacarose, óleos vegetais).
- *Fluidos não-newtonianos*: a relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento não é constante (ex.: a maioria dos alimentos, tintas e emulsões).

2.2.3 FLUIDO NEWTONIANO

A Lei de Newton da Viscosidade diz que a relação entre a tensão de cisalhamento (força de cisalhamento x área) e o gradiente local de velocidade é definido através de uma relação linear, sendo a constante de proporcionalidade, a viscosidade do fluido. Assim, todos os fluidos que seguem este comportamento são denominados *fluidos newtonianos*.

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.2)$$

Onde:

τ é a tensão de cisalhamento na direção x, N/m²;

$\frac{\partial u}{\partial y}$ é o gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento, s⁻¹;

μ é a viscosidade, kg/m.s

2.2.4 FLUIDO NÃO-NEWTONIANO

Os fluidos não newtonianos podem ser classificados em: dependentes e independentes do tempo.

Nos *fluidos não newtonianos independentes do tempo* a sua propriedade deformacional e o fluxo da matéria submetido à tensão independem do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento. São ainda divididos em:

- Sem tensão inicial – são aqueles que não necessitam de uma tensão de cisalhamento inicial para começarem a escoar. Compreende a maior parte dos fluidos não newtonianos. Dentro desta classe destacam-se:
 - *Pseudoplásticos*: São substâncias que, em repouso, apresentam suas moléculas em um estado desordenado, e quando submetidas a uma tensão de cisalhamento, suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada. E quanto maior esta força, maior será a ordenação e, conseqüentemente, menor será a viscosidade aparente. (Exemplo: tintas, emulsões, clara de ovo).
 - *Dilatantes*: São substâncias que apresentam um aumento de viscosidade aparente com a tensão de cisalhamento. No caso de suspensões, à medida que se aumenta a tensão de cisalhamento, o líquido intersticial que lubrifica a fricção entre as partículas é incapaz de preencher os espaços devido a um aumento de volume que freqüentemente acompanha o fenômeno. Ocorre, então, o contato direto entre as partículas sólidas e, conseqüentemente, um aumento da viscosidade aparente. (Exemplos: argilas, lama, amido de milho em água, ingrediente de balas).
- Com tensão inicial – são os que necessitam de uma tensão de cisalhamento inicial para começarem a escoar. Dentre os fluidos desta classe se encontram:
 - *Plásticos de Bingham*: Este tipo de fluido apresenta uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, a partir do momento em que se atinge uma tensão de cisalhamento inicial (exemplo: catchup).

- *Herschel-Bulkley*: Também chamado de Bingham generalizado. Este tipo de fluido também necessita de uma tensão inicial para começar a escoar. Entretanto, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação não é linear (Exemplo: chocolate com baixo teor de gordura).

Os *fluidos não newtonianos dependentes do tempo* onde apresentam propriedades que variam, além da tensão de cisalhamento, com o tempo de aplicação desta tensão, para uma velocidade de cisalhamento constante [3]. Podem ser:

- *Tixotrópicos*: Esta classe de fluidos tem sua viscosidade diminuída com o tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, voltando a ficar mais viscosos quando esta cessa (Exemplo: esperma humano) .
- *Reopéticos*: Já este tipo de fluido apresenta um comportamento inverso ao dos tixotrópicos. A viscosidade destes fluidos aumenta com o tempo de aplicação da tensão, retornando à viscosidade inicial quando esta força cessa (Exemplo: sangue).

2.2.5 COMPRESSIBILIDADE

No que diz respeito à compressibilidade, os fluidos podem ser classificados em duas grandes classes: líquidos e gases. Um líquido é praticamente incompressível com um volume definido, tomando a forma do recipiente em que está contido, apresentando uma superfície livre. Um gás é muito compressível e expande-se indefinidamente, se não existirem esforços externos.

Para muitos líquidos, a densidade é pouco afetada pela mudança de temperatura. Para baixas pressões, líquidos podem ser considerados incompressíveis. Entretanto, para altas pressões, o efeito da compressibilidade em líquidos pode ser importante. Mudanças de pressão e de densidade em líquidos são relacionadas pelo *módulo de compressibilidade*, ou de *elasticidade*:

$$\varepsilon_{vol} = -\nu \frac{dp}{dv} \quad (2.3)$$

Onde:

ε_{vol} é a compressibilidade volumétrica;

ν é o coeficiente de compressibilidade volumétrica;

$\frac{dp}{dv}$ é a relação entre o acréscimo de pressão e o decréscimo de volume.

A compressibilidade volumétrica é definida como a razão da variação da pressão, pela variação do volume, ocorrendo mudança relativa da densidade, enquanto a temperatura permanece constante. Se o módulo de compressibilidade independe da temperatura, a densidade é uma função somente da pressão.

A mecânica dos fluidos estuda fluidos em equilíbrio e fluidos em movimento, aplicando-se os termos de estática dos fluidos e de dinâmica dos fluidos, respectivamente. No aspecto dinâmico, se o fluido for incompressível, o termo hidrodinâmica é utilizado. Alguns casos de escoamento de fluidos compressíveis sob condições especiais também são analisados pela hidrodinâmica. Escoamentos compressíveis em geral são estudados pela aerodinâmica.

2.2.6 PARÂMETROS RELEVANTES

Para descrever o movimento de fluidos, serão necessários alguns termos que permitam definir o seu estado físico. Algumas propriedades básicas e importantes em mecânica dos fluidos caracterizam uma determinada substância que pode ter um valor constante para um dado estado:

- *Temperatura (T)*. A temperatura mede o estado térmico de um corpo. Se dois corpos têm a mesma temperatura, diz-se que estão em equilíbrio térmico, não havendo troca de calor entre eles. Variações de temperatura causam modificações em outras propriedades, como pressão e volume.
- *Pressão (p)*. A pressão é definida pela relação (quociente) da intensidade de uma força normal a uma superfície pela área desta superfície. Numa determinada superfície de um volume fluido, a pressão resulta de efeitos de forças de superfície sobre tal volume. A força de pressão exercida num ponto de uma massa fluida, depende da orientação do plano que se imagine conter o ponto. A medida de pressão pode ser feita com dois referenciais: o primeiro deles, é um valor absoluto nulo, sendo esta medida denominada *pressão absoluta*; o segundo referencial é a pressão atmosférica do local da medida, sendo a medida denominada *pressão manométrica*, que numericamente representa a pressão absoluta menos a pressão atmosférica local.
- *Volume Específico (v)*. O volume específico é definido como o volume pela unidade da massa.
- *Densidade (ρ)*. A densidade muitas vezes é usada para se determinar a massa específica de um fluido (geralmente um líquido). É definida pela relação entre a massa específica de um determinado fluido e a massa

específica de um material padrão. A densidade dos líquidos é especificada com relação à da água, e a dos gases, com relação à do ar em condições normais de pressão e temperatura. A densidade é uma grandeza adimensional.

- *Peso Específico (γ)*. O peso específico é definido como o peso por unidade de volume. Portanto, o peso específico de um dado material depende do valor do campo gravitacional, sendo definido por ρg .
- *Coefficiente de Viscosidade (μ)*. Também denominado coeficiente de viscosidade dinâmica. A viscosidade de um fluido diz respeito à resistência que uma lâmina de partícula impõe a outra a ela adjacente, quando existe movimento relativo.

2.3 escoamento dos Fluidos

Grande parte dos estudos em fenômenos de transporte envolve os fluidos em movimento, um fenômeno conhecido como escoamento. Define-se, então, escoamento de um fluido como o processo de movimentação de suas moléculas, umas em relação às outras e aos limites impostos ao escoamento [9].

Os escoamentos são descritos por parâmetros físicos e pelo comportamento desses parâmetros ao longo do espaço e do tempo. O comportamento dos parâmetros físicos permite separar os escoamentos em classes, facilitando o entendimento e principalmente sua descrição em termos matemáticos para criar modelos que os representem.

2.3.1 CAMPO DE VELOCIDADES

A velocidade é um dos parâmetros mais importantes no estudo dos escoamentos. Este parâmetro mede a alteração da posição de um elemento do fluido em função do tempo. A velocidade em um fluido apresenta algumas diferenças em relação à velocidade de um corpo sólido, sendo mais importante o fato de que em um sólido todas as suas partículas têm a mesma velocidade, ou há uma relação bem determinada entre elas, enquanto em um fluido cada partícula ou molécula tem ou pode ter velocidade diferente. Sendo uma grandeza vetorial, a velocidade tem módulo, direção e sentido e é representada por três componentes, uma para cada eixo coordenado. Considerando um sistema cartesiano de coordenadas, a velocidade em um ponto, ou em uma partícula do fluido, pode ser representada pela equação abaixo:

$$\vec{V} = V_x \cdot \vec{e}_x + V_y \cdot \vec{e}_y + V_z \cdot \vec{e}_z \quad (2.4)$$

Como um fluido é composto por moléculas, ou elementos, quase independentes e mantidos coesos por uma força de atração, ao ser submetido ao escoamento sofre contínua distorção desses elementos. Essa característica não permite manter um elemento com sua forma geométrica inicial e, com o tempo, diferentes partes do elemento passam a estar sujeitas as diferentes velocidades. Assim, torna-se necessário acompanhar a velocidade em vários pontos representativos do escoamento para obter uma avaliação de seu comportamento como um todo. A descrição espacial dessas velocidades, por intermédio de uma fórmula matemática ou por representação gráfica, é denominada genericamente de

perfil de velocidades, e é por meio desses perfis que o comportamento do escoamento pode ser caracterizado.

2.3.2 EXPERIÊNCIA DE REYNOLDS

A classificação dos escoamentos depende da velocidade, mas prende-se à fórmula pela qual ocorre também. Essa forma se sujeita ao comportamento das moléculas de fluido, que adotam um padrão de movimento denominado estrutura interna do escoamento. O estudo da estrutura interna dos escoamentos foi iniciado por Osborne Reynolds, em 1883, por meio de um artigo considerado clássico na área de Mecânica dos Fluidos [8]. O estudo da estrutura dos escoamentos foi iniciado por um experimento, atualmente conhecido como Experiência de Reynolds, que consiste na injeção de um corante líquido na posição central de um escoamento de água interno a um tubo circular de vidro transparente.

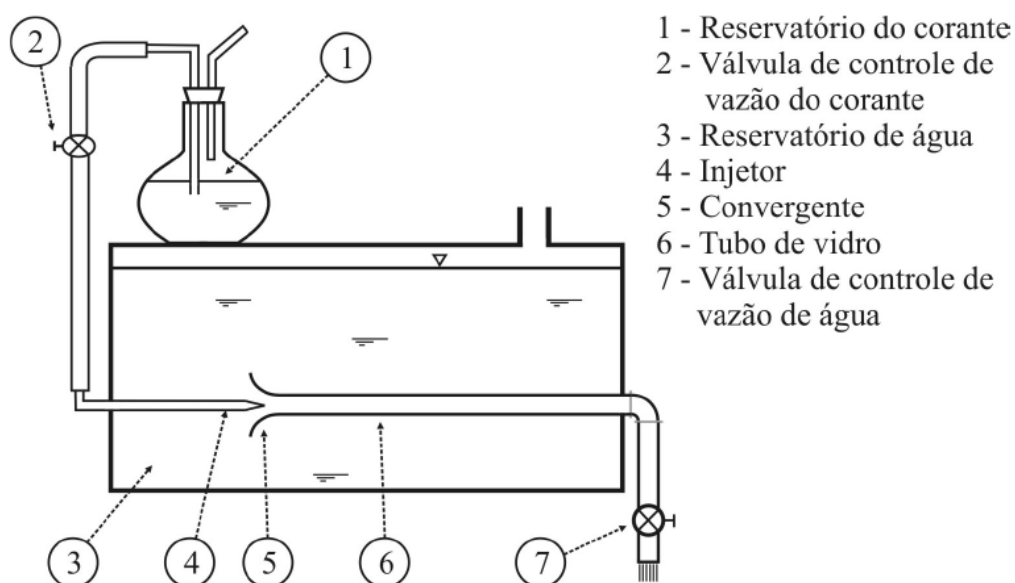


Figura 2.1 – Esquema do Experimento de Reynolds

Fonte: http://meusite.mackenzie.com.br/eangelo/Exp_Reynolds.pdf

Seja um reservatório com água (3) como ilustrado na figura 2.1. Um tubo de vidro, cuja extremidade tem adaptado um convergente (5), é mantido dentro do reservatório e ligado a um sistema externo que contém uma válvula que tem a função de regular a vazão (7). No eixo do tubo de vidro é injetado um líquido corante que possibilitará a visualização do padrão de escoamento.

Para garantir o estabelecimento do regime permanente, o reservatório contendo água deve ter dimensões adequadas para que a quantidade de água retirada durante o experimento não afete significativamente o nível do mesmo, e ao abrir ou fechar a válvula (7), as observações devem ser realizadas após um intervalo de tempo suficientemente grande. O ambiente também deve ter sua temperatura e pressões controladas.

Para pequenas vazões o líquido corante forma um filete contínuo paralelo ao eixo do tubo (6). Vazões crescentes induzem oscilações que são amplificadas à medida que o aumento vai ocorrendo, culminando no completo desaparecimento do filete, ou seja, uma mistura completa no interior do tubo de vidro (6) do líquido corante, indicando uma diluição total. É possível concluir que ocorrem dois tipos distintos de escoamentos separados por uma transição.

No primeiro caso, no qual é observável o filete colorido conclui-se que as partículas viajam sem agitações transversais, mantendo-se em lâminas concêntricas entre as quais não há troca macroscópica de partículas.

No segundo caso, as partículas apresentam velocidades transversais importantes, já que o filete desaparece pela diluição de suas partículas no volume de água.

Aspecto do Escoamento no tubo de vidro:

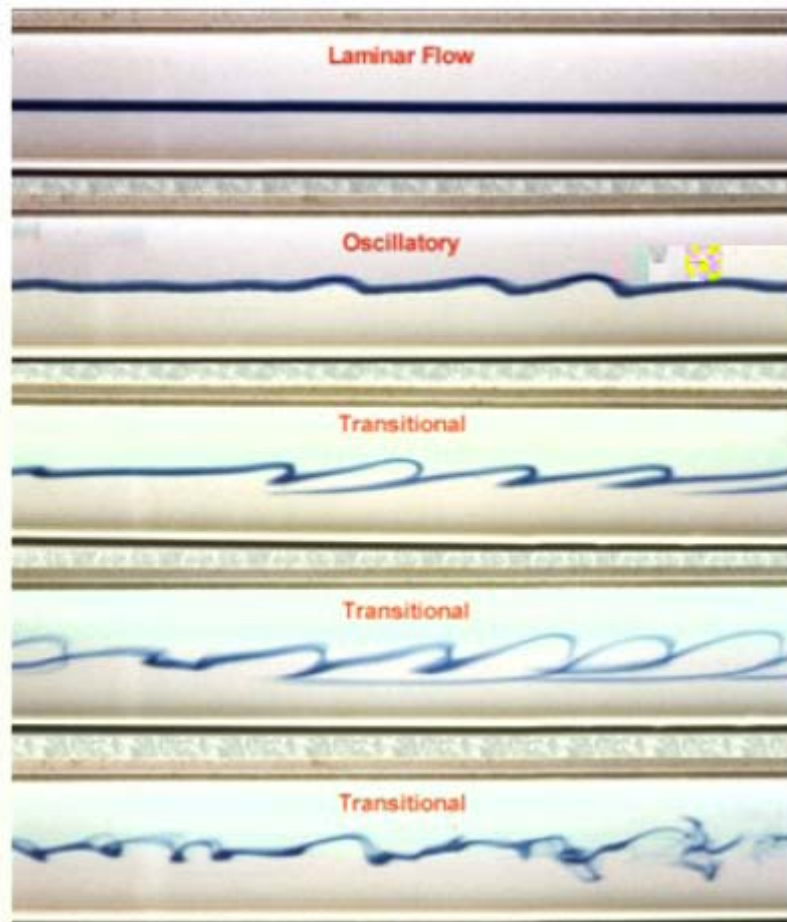


Figura 2.2 – Aspecto do escoamento no tubo de vidro

Fonte: http://meusite.mackenzie.com.br/eangelo/Exp_Reynolds.pdf

O comportamento do filete de corante ao longo do escoamento no tubo define três características distintas, discutidas a seguir:

- O corante não se mistura com o fluido, permanecendo na forma de um filete no centro do tubo, como mostra o primeiro quadro da figura 2.2. O escoamento processa-se sem provocar mistura transversal entre o escoamento e o filete, observável de forma macroscópica. A mistura que ocorre em nível molecular, por intermédio do processo de difusão

molecular, não é visualizável. Como “não há mistura”, o escoamento aparenta ocorrer como se lâminas de fluido deslizassem umas sobre as outras e, em razão disso, recebeu o nome de escoamento em *regime laminar* [8]. Qualquer tendência para instabilidade e turbulência é amortecida por forças viscosas de cisalhamento que dificultam o movimento relativo entre as camadas adjacentes do fluido.

- O filete apresenta alguma mistura com o fluido, deixando de ser retilíneo e sofrendo ondulações, como mostra o segundo, terceiro e quarto quadro da figura 2.2. Como essa situação ocorre para uma pequena gama de velocidades e liga o regime laminar à outra forma mais caótica de escoamento, ela foi considerada um estágio intermediário e recebeu o nome de escoamento em *regime de transição*.
- O filete de corante apresenta uma mistura transversal intensa, com dissipação rápida no seio do fluido, como no quinto quadro da figura 2.2. São perceptíveis movimentos aleatórios no interior da massa fluida que provocam o deslocamento de moléculas entre as diferentes camadas do fluido, com transferência de volumes macroscópicos entre as diferentes regiões do escoamento. Como há mistura intensa e movimentação desordenada, esse regime de escoamento foi denominado de *regime turbulento* [4]. O escoamento turbulento apresenta também as seguintes características importantes: irregularidade, difusividade, altos números de Reynolds, flutuações tridimensionais (vorticidade), dissipação de energia.

Pode-se dizer que o regime de escoamento, laminar ou turbulento, depende das propriedades de cada escoamento em particular. Reynolds determinou

que houvesse um valor da relação entre a velocidade (V), a viscosidade cinemática (ν) e outro parâmetro que caracterize determinado canal (para os canais circulares, por exemplo, diâmetro, 'D'), e o valor estabelecido pela relação dessas grandezas citadas é atualmente conhecido como número de Reynolds (Rey).

De modo geral, escoamentos em tubos retos, com valores de Rey < 2.000 caracterizam regime de escoamento laminar, e valores de Rey > 2.300 , caracterizam o regime turbulento. Os valores entre esses dois limites referem-se ao regime de escoamento de transição. Esses valores foram definidos em condições de laboratório e, dependendo das condições do escoamento, podem variar em função de estímulos externos.

No regime turbulento a troca de energia no interior do escoamento resulta em tensões maiores. Esse movimento também dissipa energia por atrito viscoso. Como resultado dos dois efeitos o fluido se comporta como se sua viscosidade fosse aumentada. Muitos e complexos modelos tentam determinar o comportamento dos escoamentos turbulentos.

2.3.3 REGIME PERMANENTE E NÃO-PERMANENTE

Um campo de velocidade é dependente do espaço e do tempo, e os escoamentos representados por um campo de velocidades apresentam também um comportamento espaço-temporal. De acordo com a dependência temporal, os escoamentos podem ser *permanentes* ou *não-permanentes*.

Escoamento permanente define-se como sendo aquele cujo campo de velocidades que o representa não tem dependência temporal, isto é, as propriedades e grandezas características do escoamento são constantes no tempo.

Conseqüentemente, escoamento não-permanente é aquele representado por um campo de velocidades com dependência temporal, isto é, ao menos uma grandeza ou propriedade é função do tempo.

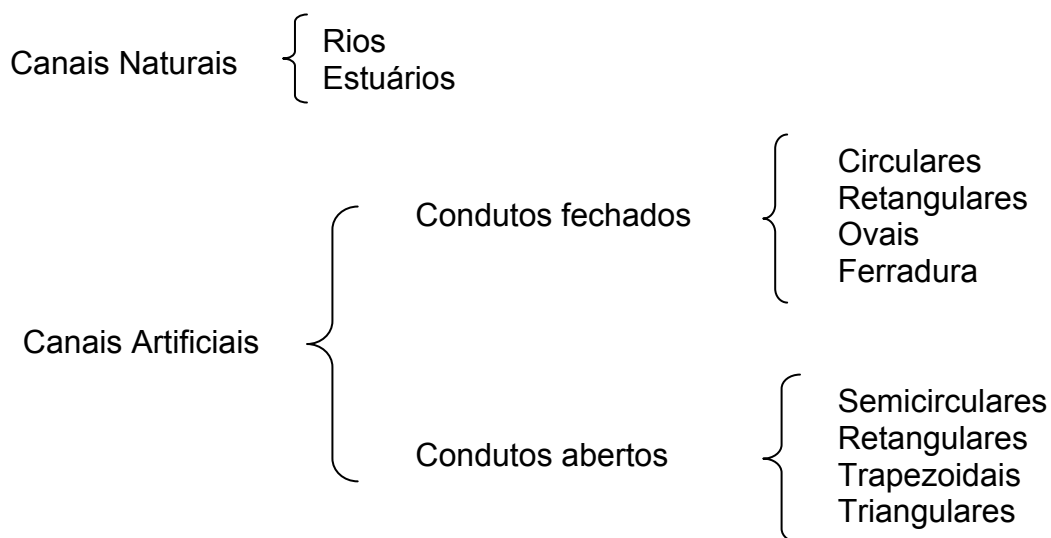
3 CONDUTOS LIVRES

3.1 Forma dos Condutos

Esta seção e as duas próximas têm como base a referência bibliográfica [1] capítulos 14,15 e 16, a referência bibliográfica [12] capítulos 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14, a referência bibliográfica [5] capítulos 3 e 4, a referência bibliográfica [8], a referência bibliográfica [10], a referência bibliográfica [11], a referência bibliográfica [17] e a referência bibliográfica [18].

Compreendem-se como condutos livres os recipientes abertos ou fechados, naturais ou artificiais, independentes da forma, sujeitos à pressão atmosférica atuando sobre a superfície do líquido, onde o escoamento se processa necessariamente por gravidade, apresentando-se na prática com uma grande variedade de seções.

Ocorrência dos escoamentos em condutos Livres:



A designação de conduto ou canal tanto se pode aplicar a cursos d'água naturais como aos artificiais. No escoamento em condutos livres, a distribuição de pressão pode ser considerada como hidrostática (também chamada fluidostática, - a hidrostática refere-se à água, que foi o primeiro fluido a ser estudado, e assim por razões históricas mantém-se o nome, - é a parte da física que estuda as forças exercidas por e sobre fluidos em repouso), e o agente que proporciona o escoamento é a gravidade. Apesar da hipotética semelhança nos escoamentos livres e forçados, os livres são mais complexos e com resolução mais sofisticada, pois as variáveis são interdependentes com variação no tempo e no espaço.

Os condutos de pequenas proporções geralmente são executados com a forma circular ou oval.

A seção em forma de ferradura é comumente adotada para os grandes aquedutos (canais com a finalidade de conduzir a água).

Os canais escavados em terra normalmente apresentam uma seção trapezoidal, que se aproxima tanto quanto possível da forma semi-hexagonal. O talude das paredes laterais depende da natureza do terreno (condições de estabilidade).

Os canais abertos em rocha são, aproximadamente, de forma retangular, com a largura igual à cerca de duas vezes a altura.

As calhas de madeira ou de aço são, em sua maioria, semicirculares, ou retangulares.

Os canais podem ser ditos prismáticos se possuírem ao longo do comprimento seção reta e declividade de fundo constante ou caso contrário, são ditos não prismáticos.

Quanto à rugosidade das paredes internas dos canais, uma vez que o atrito é, preponderantemente, influenciado pela aspereza desta parede, existe um grande número de materiais usados na fabricação, porém a especificação do valor numérico da rugosidade é difícil, devido à falta de controle de qualidade industrial e mais difícil ainda, no caso dos canais naturais.

A compreensão, interpretação e o dimensionamento de condutos livres são importantes nos aspectos econômico, ecológico e social. Em atividades do desenvolvimento: drenagem, irrigação, contenção e previsão de cheias, diagnósticos e estudos de impacto ambiental, modelagem, navegação, transporte e tratamento de esgoto, proteções, entre outras.

Na prática o planejamento, projeto e construção de um conduto estão condicionados por uma série de restrições de natureza variada. O projeto de um conduto em um sistema de drenagem urbana, por exemplo, pode depender de condições topográficas, geotécnicas, construtivas, de influência do sistema viário, existência de obras de arte, faixa de domínio, legislação e questões ambientais. Todas estas condições de caráter não hidráulico/hidrológico limitam a liberdade do projetista no dimensionamento das seções. A seção do conduto deverá atender às vazões previstas, ser estável, baixo custo, atender aos critérios de segurança e legais, com a mínima interferência no ambiente.

No apêndice A estão algumas fotos de canais de diferentes seções e aplicações práticas.

3.2 Elementos Geométricos dos Canais

Tanto nos canais prismáticos como nos não prismáticos, uma série de parâmetros é necessária para descrever geometricamente a seção e as declividades de interesse. Conforme a figura 3.1, os principais elementos geométricos são:

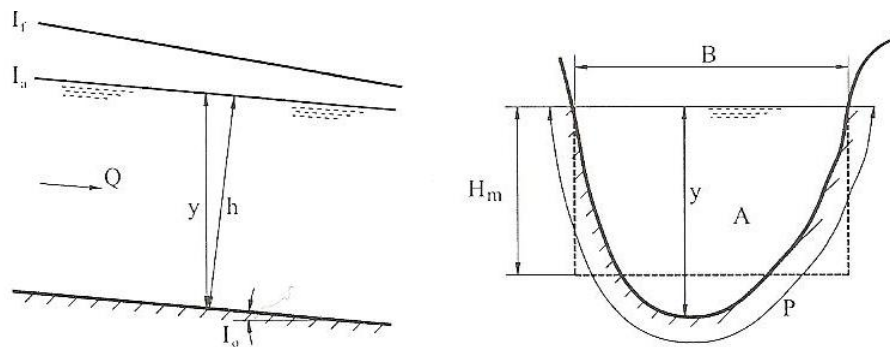


Figura 3.1 – Elementos geométricos dos canais.

Fonte: Hidráulica Básica, Rodrigo de Melo Porto.

a) *Área molhada (A)* é a área da seção reta do escoamento, normal à direção do fluxo;

b) *Perímetro molhado (P)* é o comprimento da parte da fronteira sólida da seção do canal (fundo e paredes) em contato com o líquido. A superfície livre não faz parte do perímetro molhado;

c) *Raio hidráulico* (R_h) é a razão entre a área molhada e o perímetro molhado;

d) *Altura d'água ou tirante d'água* (y) é a distância vertical do ponto mais baixo da seção do canal até a superfície livre;

e) *Altura do escoamento da seção* (h) é a altura do escoamento medida perpendicularmente ao fundo do canal;

f) *Largura de topo* (B) é a largura da seção do canal na superfície livre, função da forma geométrica da seção e da altura d'água;

g) *Altura hidráulica ou altura média* (H_m) é a razão entre a área molhada e a largura da seção na superfície livre. É a altura de um retângulo de área equivalente à área molhada;

h) *Declividade do fundo* (I_o) é a declividade longitudinal do canal. Em geral, as declividades dos canais são baixas, podendo ser expressas por:

$$I_o = \operatorname{tg} \alpha \cong \operatorname{sen} \alpha \quad (3.1)$$

Onde:

α é o ângulo da inclinação.

i) *Declividade piezométrica ou declividade da linha d'água* (I_a);

j) *Declividade da linha de energia* (I_f) é a variação da energia da corrente no sentido do escoamento.

3.3 Tipos de Escoamentos

O escoamento em canais tem um grande número de aplicações práticas na engenharia, estando presente em áreas como saneamento, drenagem urbana, irrigação, hidroeletricidade, navegação e conservação do meio ambiente.

Os escoamentos são fenômenos tridimensionais, transitórios e complexos, mas é normal utilizar hipóteses simplificadoras para analisar adequadamente o problema sem sacrificar a precisão ou a validade dos resultados. Uma das hipóteses possíveis é considerar o escoamento uni ou bidirecional. Em muitos casos, a análise tridimensional do escoamento é inevitável, como nos túneis de ar para verificar estabilidade, aderência, aerodinâmica em carros ou aviões, esforços em embarcações. No caso de escoamento em canais naturais ou artificiais pode-se considerá-lo uni, bi ou tridimensional.

A maioria dos cursos d'água natural (canais naturais) é instável dinamicamente produzindo curvas, depositando, erodindo, assim a velocidade real do curso é complexa e tridimensional, mas em muitos casos os estudos são conduzidos como unidirecionais, isto é, com velocidades vetoriais médias.

Os escoamentos em canais artificiais serão tratados como bidimensionais, com grandezas médias que não devem minorar a validade dos resultados, geralmente em regime permanente e fluido incompressível, exceto quando gasoso.

Os escoamentos nos canais podem ter por parâmetros de variabilidade o espaço e o tempo, isto é, características hidráulicas como altura d'água, área molhada, raio hidráulico podem variar no espaço, de seção para seção, e no tempo.

O escoamento é permanente se a velocidade local em um ponto qualquer da corrente permanecer invariável no tempo, em módulo e direção. Por conseguinte, os demais parâmetros hidráulicos em uma mesma seção transversal, como profundidade, vazão, área molhada e a massa específica também permanecem constantes.

Ao contrário, o escoamento é não permanente se a velocidade em certo ponto varia com o passar do tempo. E neste caso não existe uma continuidade da vazão, por exemplo, e as características do escoamento dependem, por sua vez, das coordenadas do ponto considerado e do tempo.

Tomando como critério comparativo o espaço, os escoamentos podem ser uniformes ou variados.

O escoamento é uniforme desde que as velocidades locais sejam paralelas entre si e constantes ao longo de uma mesma trajetória. Entretanto, as velocidades podem diferir de uma trajetória para outra. As trajetórias são retilíneas e paralelas, a linha d'água é paralela ao fundo, portanto a altura d'água é constante e $l_o = l_a = l_f$.

Quando as trajetórias não são paralelas entre si, o escoamento é dito não uniforme, a declividade da linha d'água não é paralela à declividade de fundo e os elementos característicos do escoamento variam de uma seção para outra. Neste caso, a declividade de fundo difere da declividade de linha d'água $l_o \neq l_a$.

O escoamento variado pode ser permanente ou não permanente, acelerado ou desacelerado, se a velocidade aumenta ou diminui no sentido do movimento.

O escoamento variado, por sua vez, é subdividido em *gradualmente variado* e *rapidamente variado*.

No primeiro caso, os elementos característicos da corrente variam de forma lenta e gradual, de seção para seção, podendo ocorrer o fenômeno chamado *remanso*, que é o perfil da linha formada pela superfície livre do canal. Dependendo da declividade do fundo do canal pode-se ter 12 tipos de curvas para a linha d'água (superfície livre). Os tipos de curva são determinados comparando-se a profundidade crítica com a normal em cada seção considerada.

E no segundo caso, há uma variação brusca na altura d'água e demais parâmetros, sobre uma distância comparativamente pequena. Os escoamentos bruscamente variados são estudados como fenômenos locais, cujos principais exemplos são o *ressalto hidráulico*, que é uma elevação brusca da superfície livre que se produz quando uma corrente de forte velocidade encontra uma corrente de fraca velocidade, e a *queda brusca* que consiste em um abaixamento notável da linha d'água sobre uma distância curta.

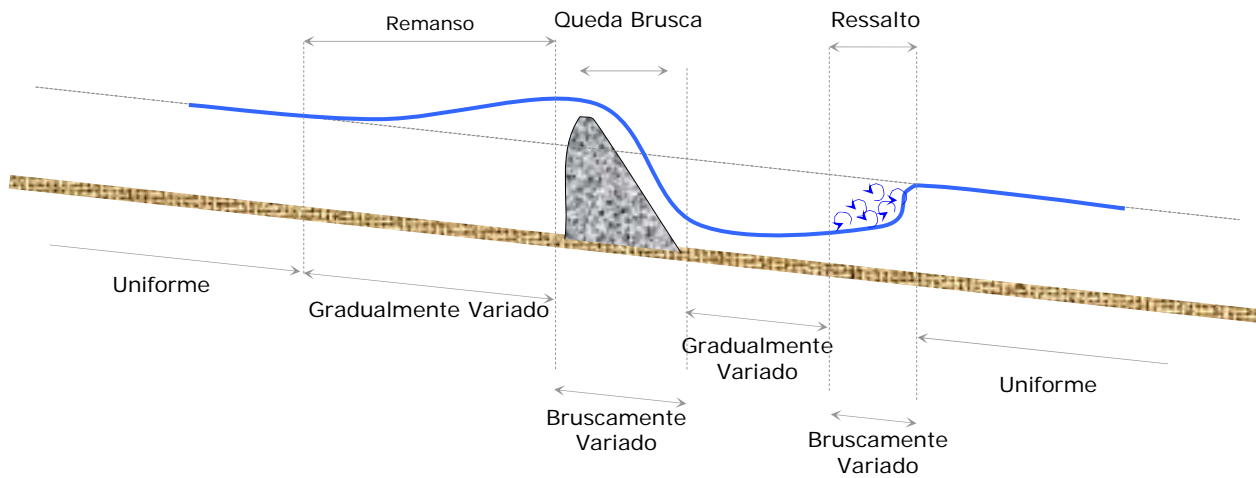
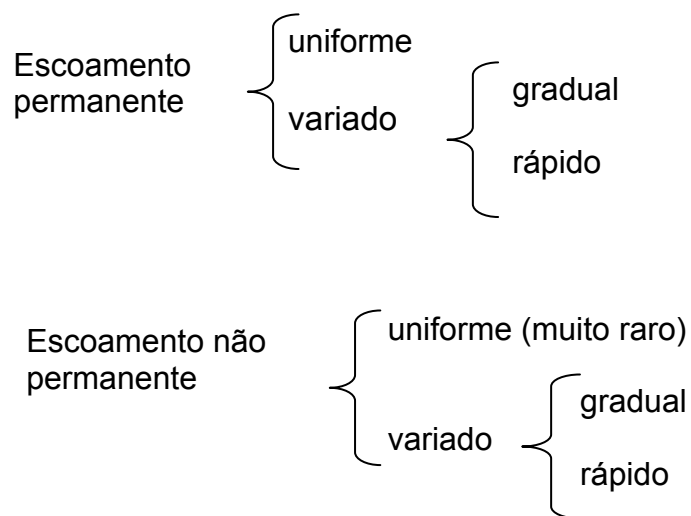


Figura 3.2 – Tipos de escoamentos permanentes, uniformes e variados.

Fonte: Hidráulica Básica, Rodrigo de Melo Porto.

A figura 3.2 apresenta alguns tipos de escoamentos permanentes em um canal uniforme e de declividade constante.

Em resumo, os escoamentos em canais são classificados como:



Ainda do ponto de vista classificatório, pode-se distinguir, dois tipos de regime, laminar e turbulento. As principais forças que atuam sobre a massa líquida são as forças de inércia, da gravidade, de pressão e de atrito, pela existência de viscosidade e rugosidade, e são expressas em função de L (uma dimensão geométrica característica), da seguinte forma:

$$\text{Força de inércia} \rightarrow F_i = ma = \frac{\rho L^3 V^2}{L} = \rho L^2 V^2 \quad (3.2)$$

$$\text{Força da gravidade} \rightarrow F_g = mg = \rho L^3 g \quad (3.3)$$

$$\text{Força de pressão} \rightarrow F_p = pL^2 \quad (3.4)$$

$$\text{Força viscosa} \rightarrow F_v = \mu \left(\frac{\Delta V}{\Delta y} \right) A = \frac{\mu V L^2}{L} = \mu V L \quad (3.5)$$

O número de Reynolds é a relação entre a força de inércia e a força viscosa e, no estudo de canais, este adimensional é expresso por:

$$Re_y = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V R_h}{\nu} \quad (3.6)$$

Onde:

R_{ey} é o número de Reynolds

ρ é a densidade

V é a velocidade média na seção considerada

μ é a viscosidade do fluido

R_H é o raio hidráulico

ν é a viscosidade cinemática da água

Se o conduto for de uma seção circular, considera-se $R_H = \frac{D}{4}$ e para $Rey < 2000$ caracteriza regime laminar, porém pela equação 3.6, para os canais tem-se $Rey < 500$ no regime laminar. A grande maioria das aplicações práticas ocorre para números de Reynolds bem maiores que 500, caracterizando escoamentos turbulentos.

O número de Reynolds permite classificar os escoamentos livres em três tipos, como se segue:

- a) Escoamento laminar $Rey < 500$
- b) Escoamento turbulento $Rey > 2000$
- c) Escoamento transição $500 < Rey < 2000$

Outro adimensional muito utilizado em estudos de canais é o *número de Froude*, definido como a raiz quadrada da relação entre a função de inércia e a força de gravidade, e expresso por:

$$Fr = \sqrt{\frac{\rho V^2 L^2}{\rho L^3 g}} = \frac{V}{\sqrt{gL_c}} \quad (3.7)$$

Onde:

V é a velocidade média na seção

g é a aceleração da gravidade

L_c é uma dimensão característica do escoamento.

Nos canais, é comum definir como dimensão característica a profundidade do canal, de modo que o número de Froude é apresentado como:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (3.8)$$

O número de Froude é utilizado para classificar os escoamentos livres que ocorrem nas aplicações práticas em três tipos:

- a) Escoamento subcrítico ou fluvial, $Fr < 1$
- b) Escoamento supercrítico ou torrencial, $Fr > 1$
- c) Escoamento crítico $Fr = 1$

3.4 Velocidades em Canais

3.4.1 DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE NOS CANAIS

A variação de velocidade, nas seções dos canais, é objeto de estudo há muito tempo. Para o estudo da distribuição das velocidades consideram-se duas seções:

- (a) *Seção Transversal*

A resistência oferecida pelas paredes e pelo fundo reduz a velocidade. Na superfície livre a resistência oferecida pela atmosfera e pelos ventos também influencia a velocidade. A velocidade máxima será encontrada na vertical (1) central, em um ponto pouco abaixo da superfície livre.

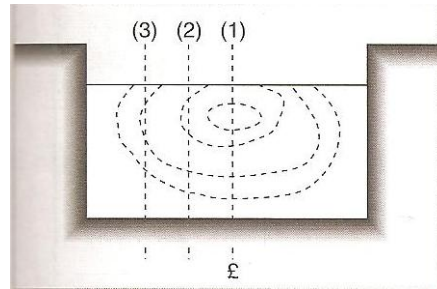


Figura 3.3 – Diagrama de variação da velocidade na seção transversal.

Fonte: Manual de Hidráulica, Azevedo Neto.

Podem ser consideradas as curvas isotáquicas, que constituem o lugar geométrico dos pontos de igual velocidade.

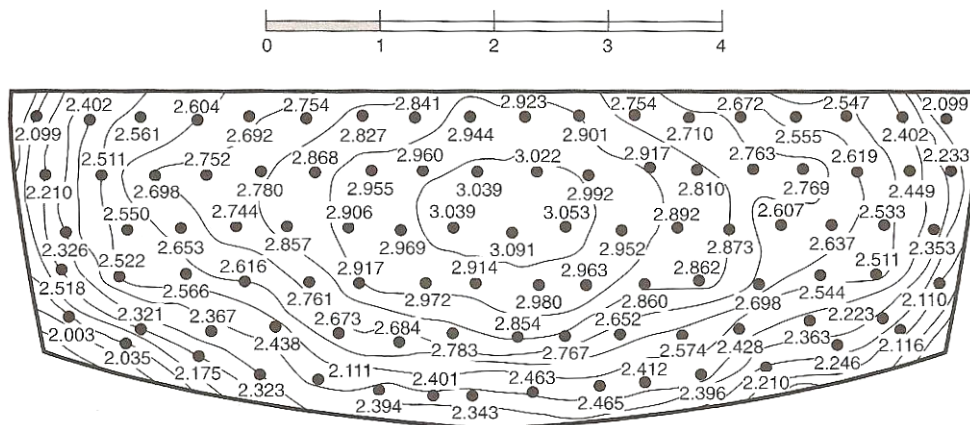


Figura 3.4 – Velocidades medidas em um canal – curvas isotáquicas.

Fonte: Manual de Hidráulica, Azevedo Neto.

(b) Seção Longitudinal

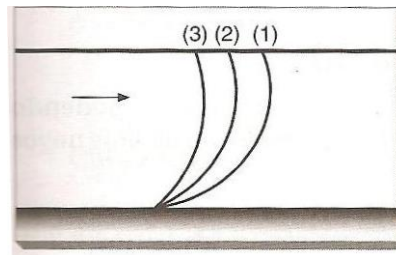


Figura 3.5 – Velocidades na seção longitudinal.

Fonte: Manual de Hidráulica, Azevedo Neto.

A figura 3.5 mostra a variação da velocidade nas verticais (1), (2) e (3), indicadas na figura 3.3. Considerando-se a velocidade média em determinada seção como igual a 1, pode-se traçar o diagrama de variação da velocidade com a profundidade (figura 3.6).

De modo geral, nos canais prismáticos, a distribuição vertical da velocidade segue uma lei aproximadamente parabólica, com valores decrescentes com a profundidade e a máxima velocidade ocorrendo um pouco abaixo da superfície livre.

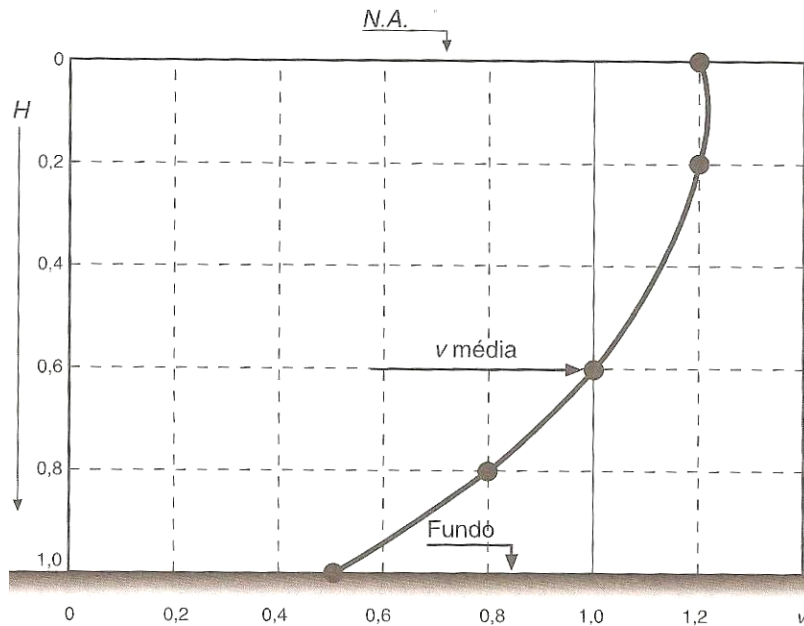


Figura 3.6 – Diagrama de variação da velocidade com a profundidade.

Fonte: Manual de Hidráulica, Azevedo Neto.

3.4.2 RELAÇÕES PARA A VELOCIDADE MÉDIA

Este item e os dois próximos têm como base a referência bibliográfica [1] capítulos 14 e 15, a referência bibliográfica [8] e a referência bibliográfica [9].

O fato físico de que as velocidades das várias partículas em um canal não estão uniformemente distribuídas na seção reta dele, não devem ser ignoradas na hora de determinar a velocidade do escoamento, e devido a esse fato, calculamos a velocidade média.

Na seção reta dos canais, a desuniformidade nos perfis de velocidades depende da forma geométrica da seção e é devida às tensões cisalhantes no fundo e paredes e à presença da superfície livre.

O serviço Geológico dos Estados Unidos (United States Geological Survey) apresenta as relações dadas a seguir, que são de grande utilidade nas determinações e estimativas de vazão:

(a) A velocidade média numa vertical geralmente equivale de 80% a 90% da velocidade superficial;

(b) A velocidade a seis décimos de profundidade é, geralmente, a que mais se aproxima da velocidade média,

$$V_{med} \cong V_{0,6} \quad (3.9)$$

(c) Com maior aproximação do que na relação anterior, tem-se:

$$V_{med} \cong \frac{V_{0,2} + V_{0,8}}{2} \quad (3.10)$$

(d) A velocidade média também pode ser obtida partindo-se de:

$$V_{med} \cong \frac{V_{0,2} + V_{0,8} + V_{0,6}}{4} \quad (3.11)$$

Essa ultima expressão é a mais precisa para se encontrar a velocidade média.

3.4.3 LIMITES DA VELOCIDADE

A velocidade média da água nos canais, normalmente, não se afasta de uma gama de valores não muito ampla, imposta pelas boas condições de funcionamento e manutenção.

Dois limites extremos são estabelecidos na prática, ou seja, limite inferior: velocidade média mínima e limite superior: velocidade média máxima.

a) Limite inferior

Estabelecido para evitar a deposição de matérias em suspensão:

	<i>Velocidade média limite inferior, m/s</i>
Águas com suspensões finas	0,30
Águas carregando areias finas	0,45
Águas de esgoto	0,60
Águas pluviais	0,75

b) Limite superior

Fixado de modo a impedir a erosão das paredes:

	<i>Velocidade média limite superior, m/s</i>
Canais arenosos	0,30
Saibro	0,40
Seixos	0,80

Materiais aglomerados	2,00
consistentes	
Canais de rocha compacta	4,00
Canais de concreto	4,50

c) Velocidade práticas

	<i>Valores mais comuns, m/s</i>
Canais de navegação, sem revestimento	Até 0,5
Canais industriais, sem revestimento	0,4 a 0,8
Canais industriais com revestimento	0,6 a 1,3
Aquedutos de água potável	0,6 a 1,3
Coletores e emissários de esgoto	0,5 a 1,5

3.4.4 VELOCIDADE ÓTIMA NOS CANAIS E A FÓRMULA DE KENNEDY

As águas naturais sempre carregam materiais em suspensão, materiais esses suscetíveis de deposição em determinadas condições.

Caso os canais forem projetados para funcionar com velocidades muito reduzidas, haverá o perigo da deposição desses materiais, o que poderá trazer elevadas despesas de conservação.

Se, em contrapartida, os canais forem executados para trabalhar com velocidades muito elevadas, as paredes laterais e o fundo são erodidos, alterando-se as condições do projeto.

Mas existe uma relação ótima entre a velocidade da água, a natureza do material e as dimensões do canal, para a qual os efeitos da erosão e da deposição serão desprezíveis.

R.G. Kennedy foi o primeiro a investigar quantitativamente a questão em 1895. Após um grande número de observações, em um estudo que abrangeu 22 canais da Índia, chegou à seguinte fórmula empírica, para a determinação da velocidade desejável ou velocidade de equilíbrio:

$$V_o = nh^s \quad (3.12)$$

As investigações feitas na bacia superior do Bari-Doeab (Índia) levaram aos seguintes valores:

$$n = 0,55 ,$$

$$s = 0,64$$

Resultando a expressão:

$$V_o = 0,55h^{0,64} , \text{ (Fórmula de Kennedy)} \quad (3.13)$$

Onde:

V_o é a velocidade média crítica, ou de equilíbrio, em m/s;

h é a profundidade do canal, em m.

A idéia geral de Kennedy consistia em admitir que as condições de escoamento em um canal podiam se alterar mediante a ação da corrente, até que fosse atingida uma velocidade conveniente, dependente da profundidade útil.

3.5 Equações Fundamentais

Este item sobre equações fundamentais tem como base a referência bibliográfica [12] capítulos 7, 8, 9 e 10, a referência bibliográfica [1] capítulos 14, 15 e 16, a referência bibliográfica [4] capítulos 3 e 4.

3.5.1 FÓRMULA DE CHÉZY

Em 1775, Chézy propôs uma expressão da seguinte forma:

$$V = C\sqrt{R_H I_o} \quad (3.14)$$

onde:

V é a velocidade média

C é o coeficiente de Chézy

R_H é o raio hidráulico

I_o é a declividade do canal

O valor de C era, nessa época, suposto independente da rugosidade das paredes. Porém, ele não depende só da natureza e do estado das paredes dos condutos, mas também da sua própria forma, havendo fórmulas em que seu valor relaciona-se ainda à declividade. Na tabela 3.1 encontram-se os valores do coeficiente C, propostos por Hamilton Smith, para condutos de superfícies internas lisas.

<i>D</i> m	Velocidades m/s									
	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	3,00
0,20	51	53	54	55	56	57	58	59	61	65
0,30	53	55	56	57	58	59	60	61	63	67
0,40	55	57	58	59	60	61	62	63	65	69
0,50	57	59	60	61	62	63	64	65	67	71
0,60	59	61	62	63	64	65	66	67	69	74
0,70	61	63	64	65	66	67	68	69	71	76
0,80	63	65	66	67	68	69	69	70	73	78
0,90	64	66	67	68	69	70	70	71	74	79
1,00	65	67	68	69	70	71	71	72	75	80
1,10	66	68	69	70	71	71	72	73	76	81
1,20	67	69	70	71	72	73	73	74	77	82
1,50	70	71	72	73	74	74	75	76	79	83
2,00	74	75	76	77	78	78	79	80	83	-

Tabela 3.1 – Coeficiente de Chézy para condutos circulares.

Fonte: Manual de Hidráulica, Azevedo Neto.

3.5.2 EQUAÇÃO GERAL DA RESISTÊNCIA

Os cálculos em canais estão baseados em equações de resistência, que ligam a perda de carga em um trecho à velocidade média, ou vazão, por meio de parâmetros geométricos e da rugosidade do perímetro molhado.

Toma-se um trecho de comprimento unitário. O movimento sendo uniforme, a velocidade mantém-se à custa da declividade do fundo do canal,

declividade essa que será a mesma para a superfície livre das águas. Sendo γ o peso específico da massa líquida, a força que produz o movimento será a componente tangencial do peso do líquido:

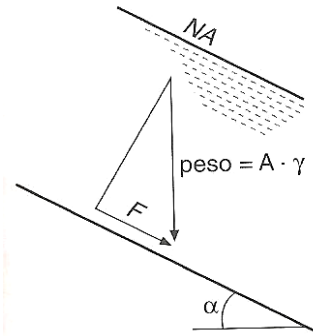


Figura 3.7 – Esquema das componentes da equação geral da resistência.

Fonte: Manual de Hidráulica, Azevedo Neto.

$$F = \gamma A s \sin \alpha \quad (3.15)$$

Desde que o movimento seja uniforme, deve haver equilíbrio entre as forças aceleradoras e retardadoras, de modo que a força F deve contrabalançar a resistência oposta ao escoamento pela resultante dos atritos. Essa resistência ao escoamento pode ser considerada proporcional aos seguintes fatores:

- a) peso específico do líquido (γ);
- b) perímetro molhado (P);
- c) comprimento do canal ($= 1$);
- d) uma certa função $\phi(V)$ da velocidade média, ou seja,

$$R_e s = \gamma P \phi(V) \quad (3.16)$$

Igualando-se as equações (3.15) e (3.16),

$$\gamma.A.\text{sen}\alpha = \gamma P\phi(V) \quad (3.17)$$

Ou

$$A\text{sen}\alpha = P\phi(V) \quad (3.18)$$

Em geral a declividade dos canais é relativamente pequena,

$$\alpha \ll 10^\circ$$

Permitindo que se tome

$$\text{sen}\alpha \cong \text{tg}\alpha = I(\text{declividade}) \quad (3.19)$$

Resultando

$$\frac{A}{P}I = \phi(V) \quad (3.20)$$

A relação $\frac{A}{P}$ é denominada raio hidráulico ou raio médio:

$$R_H = \frac{\text{área molhada}}{\text{perímetro molhado}} \quad (3.21)$$

Chegando-se então, à expressão:

$$R_H I = \phi(V) \quad (3.22)$$

Que é a equação geral da resistência ao escoamento, onde:

R_H é o raio hidráulico;

I é a declividade;

$\phi(V)$ é uma função da velocidade média.

Forma ou seção	Altura de água	Área molhada	Perímetro molhado	Raio hidráulico	Observações
Condutos fechados					
Circular*	D	$3,14r^2$	$6,28r$	$0,500r$	$D = \text{diâmetro}$ $r = \text{raio}$
Circular	$0,75D$	$2,53r^2$	$4,19r$	$0,603r$	
Circular	$0,67D$	$2,24r^2$	$3,84r$	$0,583r$	
Circular	$0,50D$	$1,57r^2$	$3,14r$	$0,500r$	
Circular	$0,25D$	$0,614r^2$	$2,09r$	$0,293r$	
Quadrada*	a	a^2	$4a$	$a/4$	$a = \text{lado}$
Retangular*	a	ab	$2(a + b)$	$\frac{ab}{2(a + b)}$	$b = \text{base}$

Tabela 3.2 – Área molhada, perímetro molhado e raio hidráulico das seções circular e retangular.

Fonte: Manual de Hidráulica, Azevedo Neto.

Além da equação de resistência, tem-se a equação da continuidade:

$$Q = V.A \quad (3.23)$$

E essas duas equações permitem resolver os problemas práticos, conhecidos dois elementos, é sempre possível conhecer os outros dois.

3.5.3 FÓRMULA DE CHÉZY COM COEFICIENTE DE MANNING

Qualquer expressão do movimento turbulento uniforme poderia ser utilizada para os canais, desde que o elemento geométrico característico fosse $D = 4R_H$, uma vez que, nos movimentos turbulentos, a forma da seção praticamente não influi na equação do movimento.

Entretanto, na fórmula de Chézy com coeficiente de Manning $C = \sqrt[6]{\frac{R_H}{n}}$, é mais utilizada por ter sido experimentada desde os canais de dimensões minúsculas até os grandes canais, com resultados coerentes entre o projeto e a obra construída.

$$\frac{nQ}{\sqrt{I}} = AR_H^{2/3} \quad \text{ou} \quad V = \frac{1}{n} R_H^{2/3} . I^{1/2} \quad (3.24)$$

Sendo:

n é o coeficiente de rugosidade de Ganguillet e Kutter;

Q é a vazão (m^3/s);

I é a declividade do fundo do canal (m/m);

A é a área molhada do canal (m^2);

R_H é o raio hidráulico (m);

V é a velocidade média (m/s).

A única objeção que se faz à fórmula de Chézy com coeficiente de Manning é que o coeficiente n é um adimensional. O valor do coeficiente n de

rugosidade de Ganguillet e Kutter é pouco variável, como pode se ver pela tabela abaixo:

Natureza das Paredes	Coefficiente de Manning
Canais de chapas com rebites embutidos, juntas perfeitas e águas limpas. Tubos de cimento e de fundição em perfeitas condições.	0,011
Canais de cimento muito liso, de dimensões limitadas, de madeira aplainada e lixada, em ambos os casos; trechos retilíneos compridos e curvas de grande raio e água limpa. Tubos de fundição usados.	0,012
Canais de reboco de cimento liso, porém com curvas de raio limitado e águas não completamente limpas; construídos com madeira lisa, mas com curvas de raio moderado.	0,013
Canais com reboco de cimento não completamente liso; de madeira como no nº 2, porém com traçado tortuoso e curvas de pequeno raio e juntas imperfeitas.	0,014
Canais com paredes de cimento não completamente lisas, com curvas estreitas e águas com detritos; construídos de madeira não aplainada de chapas rebitadas.	0,015
Canais com reboco de cimento não muito alisado e pequenos depósitos no fundo; revestidos por madeira não aplainada; de alvenaria construída com esmero; de terra, sem vegetação.	0,016
Canais com reboco de cimento incompleto, juntas irregulares, andamento tortuoso e depósitos no fundo; de alvenaria revestindo taludes não bem perfilados.	0,017
Canais com reboco de cimento rugoso, depósitos no fundo, musgo nas paredes e traçado tortuoso.	0,018
Canais de alvenaria em más condições de manutenção e fundo com barro, ou de alvenaria de pedregulhos; de terra, bem construídos, sem vegetação e com curvas de grande raio.	0,020
Canais de chapas rebitadas e juntas irregulares; de terra, bem construídos com pequenos depósitos no fundo e vegetação rasteira nos taludes.	0,022
Canais de terra, com vegetação rasteira no fundo e nos taludes.	0,025
Canais de terra, com vegetação normal, fundo com cascalhos ou irregular por causa de erosões; revestidos com pedregulhos e vegetação.	0,030
Álveos naturais, cobertos de cascalhos e vegetação.	0,035
Álveos naturais, andamento tortuoso.	0,040

Tabela 3.3 – Valores (n) da fórmula de Manning.

Fonte: Hidráulica, Prof. Alfredo Bandini.

3.5.4 FÓRMULA DE MANNING

Conforme Chézy:

$$V = C\sqrt{R_H I} \quad (3.25)$$

Manning fez $C = \frac{R_H^{1/6}}{n}$, então $V = \frac{1}{n} R_H^{2/3} I^{1/2}$.

Em função de D (diâmetro), a fórmula tem as seguintes expressões, para condutos circulares:

$$V = \frac{1}{n} .0,397 D^{2/3} I^{1/2} \quad (3.26)$$

$$Q = \frac{1}{n} .0,312 D^{8/3} I^{1/2} \quad (3.27)$$

Onde:

V é a velocidade média, m/s;

n é o coeficiente de Manning;

D é o diâmetro da seção;

I é a declividade;

Q é a vazão.

Os valores de n são mostrados na tabela 3.3.

Embora a fórmula de Manning tenha sido estabelecida para os condutos livres, seu emprego tende a se generalizar, não somente devido a sua simplicidade, como também em consequência da influência da técnica norte-americana.

3.5.5 FÓRMULA DE HAZEN-WILLIAMS

Das experiências de Hazen-Williams tem-se a seguinte expressão:

$$V = 0,85.C.R_h^{0,63}.I^{0,54} \quad (3.28)$$

E esta fórmula pode ser usada no dimensionamento de canais, onde:

V é a velocidade média, m/s;

C coeficiente que depende das condições da superfície interna dos condutos (tabela 3.4);

R_h é o raio hidráulico

I é a declividade

Tubos	Novos	Usados ± 10 anos	Usados ± 20 anos
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	—	—
Aço galvanizado roscado	125	100	—
Aço rebitado, novos	110	90	80
Aço soldado, comum (revestimento betuminoso)	125	110	90
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento-amianto	140	130	120
Cobre	140	135	130
Concreto, bom acabamento	130	—	—
Concreto, acabamento comum	130	120	110
Ferro fundido, revestimento epóxico	140	130	120
Ferro fundido, revestimento de argamassa de cimento	130	120	105
Grés cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130
Madeira, em aduelas	120	120	110
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90
Vidro	140	140	140
Plástico (PVC)	140	135	130

Tabela 3.4 – Valores do coeficiente C sugerido para a fórmula de Hazen-Williams.

Fonte: Manual de Hidráulica, Azevedo Neto

3.5.6 FÓRMULA DE FORCHHEIMER

O Prof. Forchheimer, depois de realizar um considerável número de investigações a respeito do escoamento em condutos livres, abrangendo em suas observações canais grandes e pequenos, chegou à conclusão de que a fórmula de Manning poderia ser, vantajosamente, modificada para a seguinte expressão:

$$V = \frac{I^{0,5} R_h^{0,7}}{n} \quad (3.29)$$

Onde:

V é a velocidade média, m/s;

I é a declividade;

R_h é o raio hidráulico

n é o coeficiente que tem valores idênticos ao da tabela 3.3.

Segundo o Prof. Schoklistch, essa última fórmula tem levado a resultados mais satisfatórios [14].

3.5.7 FÓRMULA UNIVERSAL PARA CANAIS

Powell, por meio de estudos e experiências realizadas por volta de 1940, propôs a aplicação, aos canais, de expressões semelhantes às que foram estabelecidas para tubulações por Nikuradse e Von Kármán, tendo indicado, para o caso mais simples:

$$C = \alpha \log \frac{R_h}{e} + \beta \quad (3.30)$$

Outros estudos estabelecem valores para C , que dependem do número de Froude. Partindo-se da expressão geral de Kármán-Prandtl para condutos rugosos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{4R_h}{e} + 1,14 \quad (3.31)$$

e considerando-se que $C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$, encontra-se:

$$C = 17,7 \log \frac{4R_h}{e} + 10,09 \quad (3.32)$$

Valor aplicável à expressão de Chézy:

$$V = C \sqrt{R_H I} \quad (3.33)$$

Onde:

C é o coeficiente da expressão de Chézy;

R_h é o raio hidráulico;

e é a rugosidade equivalente do conduto (Tabela 3.5).

Material	Tubos novos	Tubos velhos**
Aço galvanizado	0,00015 a 0,00020	0,0046
Aço rebitado	0,0010 a 0,0030	0,0060
Aço revestido	0,0004	0,0005 a 0,0012
Aço soldado	0,00004 a 0,00006	0,0024
Chumbo	lisos	lisos
Cimento-amianto	0,000025	
Cobre ou latão	lisos	lisos
Concreto bem acabado	0,0003 a 0,0010	
Concreto ordinário	0,0010 a 0,0020	
Ferro forjado	0,0004 a 0,0006	0,0024
Ferro fundido	0,00025 a 0,00050	0,0030 a 0,0050
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,00012	0,0021
Madeira em aduelas	0,0002 a 0,0010	
Manilhas cerâmicas	0,0006	0,0030
Vidro	lisos***	lisos***
Plástico	lisos	lisos

Tabela 3.5 – Rugosidade dos condutos (e)

Fonte: Manual de Hidráulica, Azevedo Neto.

3.6 Conduitos circulares

Este item e o próximo têm como base a referência bibliográfica [1] capítulo 13, 14 e 15, e também a referência bibliográfica [12] capítulo 8, páginas 259 e 260.

Num canal circular, as dimensões geométricas são: a profundidade de escoamento y e o diâmetro D .

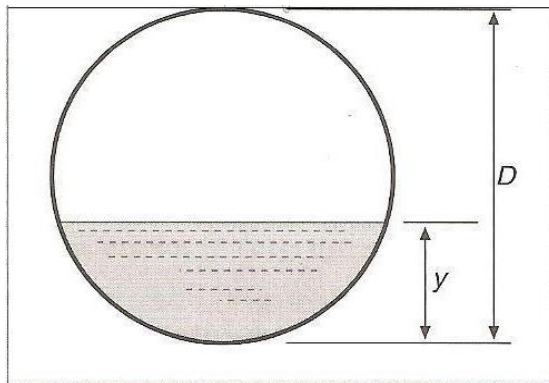


Figura 3.8 – Grandezas geométricas do Canal Circular
Fonte: Manual de Hidráulica, Azevedo Neto.

A seção circular é a que apresenta o menor perímetro molhado e maior raio hidráulico por unidade de área do conduto. Por isso, é considerada uma seção econômica ideal. Também é a mais empregada na maioria das obras em que são necessárias seções fechadas.

A adoção da seção circular nos grandes condutos será condicionada as questões estruturais e aos processos de execução. Normalmente, os tubos são

fabricados com a seção circular. Por isso, o predomínio dessa forma e a importância do seu estudo.

Exceção feita aos condutos de grande porte, os coletores de esgoto, as galerias de águas pluviais e as linhas adutoras são de seção circular.

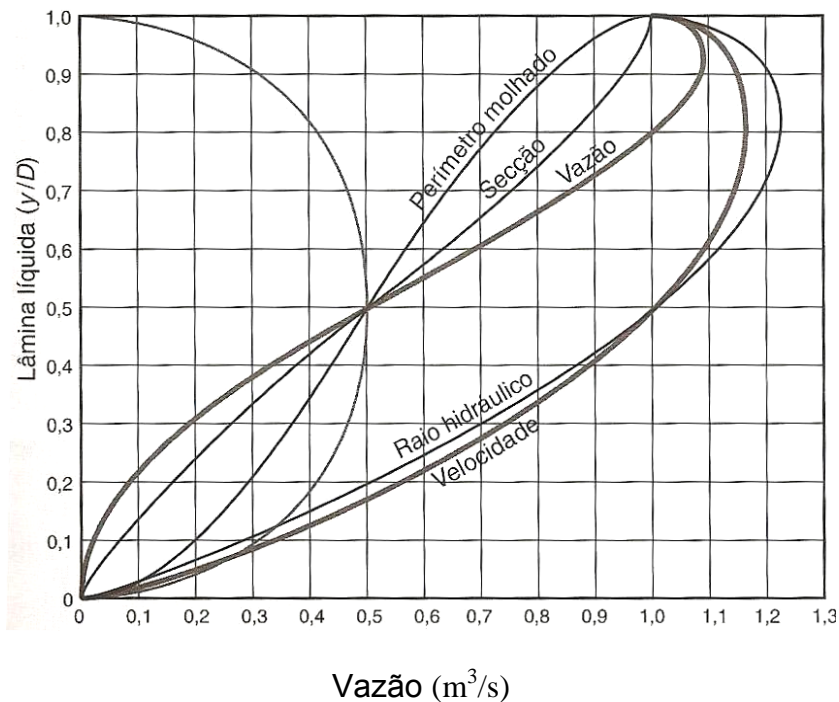


Figura 3.9 –Elementos Hidráulicos da seção circular: relação da vazão pela lâmina líquida.

Fonte: Hidráulica Básica, Rodrigo de melo Porto.

Como pode ser visto na figura 3.9, existe uma peculiaridade na maneira pela qual o raio hidráulico varia em relação à lâmina líquida. Na medida que a lâmina líquida aumenta, há um aumento gradual da área molhada e do perímetro molhado. Entretanto, a partir de uma determinada altura, devido à conformação geométrica da cobertura, um pequeno acréscimo na altura d'água provoca aumento proporcionalmente maior no perímetro molhado do que na área molhada. Portanto, o

raio hidráulico aumenta até uma altura d'água em que o perímetro molhado cresce mais lentamente que a área molhada, e decresce daí em diante.

Pode-se observar também que, a curva de velocidade acusa uma diminuição no crescimento no mesmo ponto em que ocorre a diminuição do raio hidráulico. Isto é evidente, uma vez que, pela fórmula de Manning, para n (coeficiente de Manning) e I (declividade) fixados, a velocidade é diretamente proporcional ao raio hidráulico. Para a vazão, o ponto de máximo é diferente do ponto de máximo da velocidade, como mostra a figura 3.9, pois a vazão depende conjuntamente do raio hidráulico e da área molhada, e como a área é sempre crescente, o máximo da vazão ocorre para uma altura d'água maior.

Matematicamente, esta diferença entre os pontos de máximos pode ser constatada a partir do emprego da fórmula de Manning, e das expressões geométricas mostradas abaixo:

$$V = \frac{1}{2,52n} \cdot D^{2/3} \cdot I^{1/2} \left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta}\right)^{2/3} \quad (3.34)$$

$$Q = \frac{1}{20,2n} \cdot D^{8/3} \cdot I^{1/2} \frac{(\theta - \text{sen}\theta)^{5/3}}{\theta^{2/3}} \quad (3.35)$$

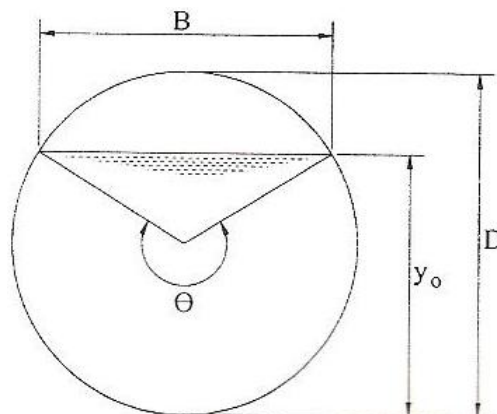


Figura 3.10 – Seção circular.

Fonte: Hidráulica Básica, Rodrigo de Melo Porto.

Para n , D e I constantes, a vazão e a velocidade só dependem do ângulo θ e, portanto, de y . Derivando essas equações em relação a θ e igualando a zero, chega-se a:

$V = V_{\max}$, quando $\theta = 257^\circ$, que corresponde a $y = 0,81D$.

$Q = Q_{\max}$, quando $\theta = 302,5^\circ$, que corresponde a $y = 0,94D$.

Isto mostra que, os máximos ocorrem em alturas diferentes e a vazão máxima no conduto livre circular não ocorre quando a seção é plena. Para propósitos práticos, esta particularidade não é explorada, porque a altura da lâmina na seção de máxima vazão é tão próxima do diâmetro que, se houver qualquer instabilidade no escoamento, o conduto passa a funcionar à seção plena como um conduto forçado, e este não é o foco deste estudo.

Nos projetos usuais, o limite da lâmina líquida é fixado em $y = 0,75 D$.

3.7 Condutos Retangulares

A forma retangular, geralmente, é adotada nos canais de concreto e nos canais abertos em rocha.

Tratando-se de seção retangular, a mais favorável é aquela para qual a base b é o dobro da altura h , para melhor servir ao objetivo de sua construção,

devido à segurança, economia e, principalmente, maior velocidade de escoamento ao menor perímetro.

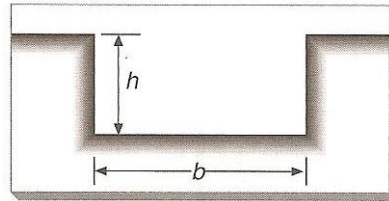


Figura 3.11 – Seção retangular.

Fonte: Manual de Hidráulica, Azevedo Neto.

O retângulo é um caso particular do trapézio quando o ângulo do talude for 90° . Substituindo esta condição na equação de perímetro molhado do trapézio:

$$m = 2(\sqrt{1 + Z^2} - Z) \quad (3.36)$$

Onde:

m é a relação da base sobre altura da água $\left(\frac{b}{h}\right)$;

Z é a inclinação do talude, e no caso do retângulo $Z = \cotg 90^\circ = 0$.

Temos:

$$m = 2 \quad \text{ou} \quad m = \left(\frac{b}{h}\right) = 2$$

\therefore

$$b = 2h$$

Por isso diz-se que a seção retangular mais favorável é aquela para qual a base b é o dobro da altura h , porque é quando a seção retangular alcança a máxima vazão.

3.8 Perda de Carga

3.8.1 LINHA DE ENERGIA E LINHA PIEZOMÉTRICA

Este item sobre perda de carga tem como base a referência bibliográfica [12] capítulo 10, páginas 287 a 327, e também a referência bibliográfica [1] capítulo 15, páginas 405 a 416.

Considere-se a equação de Bernoulli deduzida, analiticamente, a partir da linha de corrente:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_{12} \quad (3.37)$$

Esta equação, pelo fato de cada parcela representar energia por unidade de peso e ter como unidade o metro, admite uma interpretação geométrica de importância prática. Tais parcelas são denominadas como:

$\frac{p}{\gamma}$ é a energia ou carga de pressão;

z é a carga de posição (energia potencial de posição em relação a um plano horizontal de referência);

$\frac{V^2}{2g}$ é a energia ou carga cinética;

ΔH é a perda de carga ou perda de energia.

Conhecendo-se a trajetória de um filete de líquido, identificada pelas cotas geométricas em relação a um plano horizontal de referência, pode-se representar os valores de $\frac{p}{\gamma}$ (figura 3.12), obtendo-se o lugar geométrico dos

pontos cujas cotas são dadas por $\frac{p}{\gamma} + z$ e designado como linha de carga efetiva

ou linha piezométrica. Cada valor da soma $\frac{p}{\gamma} + z$ é chamado de cota piezométrica

ou carga piezométrica. Se acima da linha piezométrica acrescentarem-se os valores da carga cinética $\frac{V^2}{2g}$, obtém-se a linha de cargas totais ou linha de energia, que

designa a energia mecânica total por unidade de peso de líquido, na forma

$$H = \frac{p}{\gamma} + z_1 + \frac{V^2}{2g}.$$

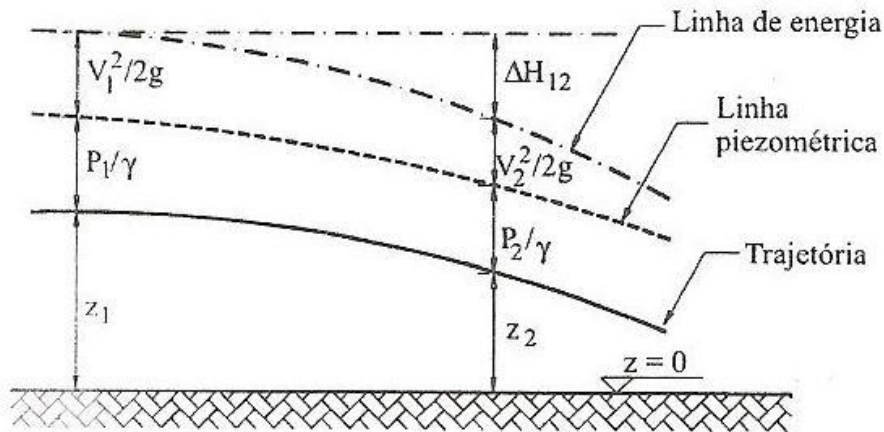


Figura 3.12 – Linha de energia e linha piezométrica no escoamento

Fonte: Hidráulica Básica, Rodrigo de Melo Porto.

3.8.2 CARGA ESPECÍFICA

Para carga total (H_T) existente na seção, pode-se escrever:

$$H_T = Z + y + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (3.38)$$

O coeficiente α , cujo valor geralmente está compreendido entre 1,0 e 1,1, leva em conta a variação de velocidade que existe na seção. Na prática adota-se o valor unitário, com aproximação razoável, resultando:

$$H_T = Z + y + \frac{V^2}{2g} \quad (3.39)$$

Em seções, a jusante a carga será menor, pois o valor de Z vai se reduzindo para permitir a manutenção do escoamento contra os atritos.

Passando-se a tomar como referência o próprio fundo do canal, a carga na seção passar a ser:

$$H_e = y + \frac{V^2}{2g} \quad (3.40)$$

H_e denomina-se *carga específica* e resulta da soma da altura de água com a carga cinética ou energia de velocidade.

Os canais uniformes e o escoamento uniforme não existem na natureza. Essas condições de semelhança apenas acontecem a partir de certa distância da seção inicial e também deixam de existir a certa distância da seção final (nas extremidades a profundidade e a velocidade são variáveis).

Nos canais com escoamento uniforme, o regime poderá se alterar, passando a variado em consequência de mudanças de declividade, variação de seção e presença de obstáculos.

Utilizando a equação da continuidade, a equação anterior poder ser expressa por:

$$H_e = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (3.41)$$

Onde:

Q é a vazão;

A é a área molhada.

3.8.3 PERDA DE CARGA

Sempre que um líquido escoar por um canal de um ponto a outro, haverá certa perda de energia, denominada perda de pressão ou perda de carga. Essa perda de energia é devida ao atrito com as paredes do canal e devida à viscosidade do líquido em escoamento. Quanto maior for a rugosidade da parede do canal, isto é, a altura das asperezas, maior será a turbulência do escoamento e, logo, maior será a perda de carga.

A perda de carga entre duas seções, seção inicial e final é igual à diferença da energia na seção 2 e seção 1:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \left(y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (3.42)$$

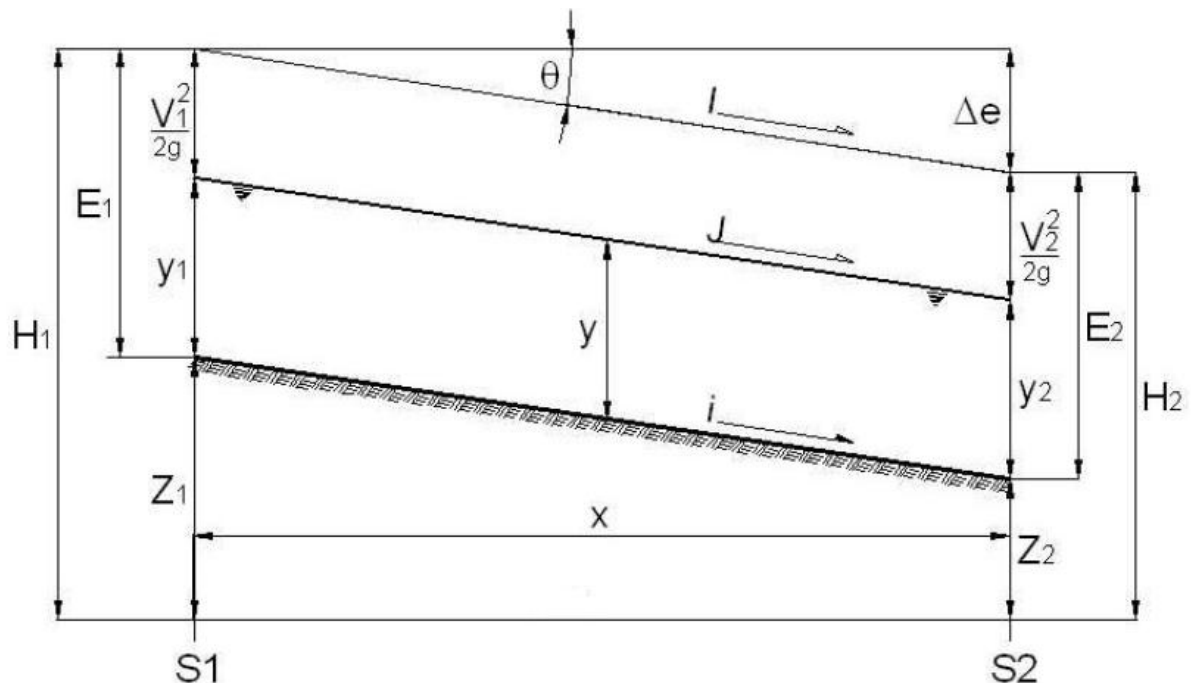


Figura 3.13 – As diferentes relações entre a seção inicial do canal e a seção final.

Fonte: www.fcth.br/phd/phd2301/Apresentacoes/PHD%202301%20Aula%203.ppt

No caso particular do canal retangular, a equação anterior pode ser desenvolvida, chegando-se a:

$$\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_2 y_1} \quad (3.43)$$

3.8.4 PERDA DE CARGA UNITÁRIA E FATOR DE ATRITO

Em 1939, Colebrook e White apresentaram uma formulação para o fator de atrito, com particular referência à região de transição entre os escoamentos hidraulicamente liso e rugoso, trabalhando com canais artificiais de vários materiais. Para resolver este adimensional, tratou-se através de uma engenhosa combinação de argumentos de logaritmos e que se ajusta bem aos dados experimentais de ensaios em tubos com rugosidade natural. A fórmula de Colebrook-White é dada por:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{n}{3,71D} + \frac{2,51}{Re_y \sqrt{f}} \right) \quad (3.44)$$

Onde:

n é o coeficiente de Manning

f é o fator de atrito

D é o diâmetro hidráulico

Re_y é o número de Reynolds

Esta equação, particularmente, indicada para a faixa de transição entre os escoamentos turbulentos, tem sua condição de aplicabilidade no intervalo:

$$14,14 < \frac{\text{Re } y \sqrt{f}}{D/n} < 198$$

Algumas fórmulas explícitas e aproximadas, para determinação do fator de atrito, têm sido apresentadas na literatura, entre elas a de Swamee-Jain:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left\{ \frac{n}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re } y} \right\} \right]^2} \quad (3.45)$$

para $10^{-6} \leq n/D \leq 10^{-2}$ e $5 \cdot 10^3 \leq \text{Re } y \leq 10^8$, onde:

f é o fator de atrito

n é o coeficiente de Manning

D é o diâmetro hidráulico

Re_y é o número de Reynolds

No mesmo trabalho, Swamee-Jain apresentam expressões explícitas para o cálculo da perda de carga unitária do canal, cobrindo assim todos os problemas relativos ao dimensionamento ou verificação de escoamentos em canais artificiais, sem necessidade de processos iterativos. As equações são as seguintes:

$$J = \frac{0,203Q^2 / gD^5}{\left[\log \left(\frac{n}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re } y^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (3.46)$$

$$\frac{Q}{D^2} = -\frac{\pi}{\sqrt{2}} \log \left(\frac{n}{3,7D} + \frac{1,78V}{D\sqrt{gDJ}} \right) \quad (3.47)$$

$$D \left(\frac{gJ}{Q^2} \right)^{0.2} = 0,66 \left[\left\{ n \left(\frac{gJ}{Q^2} \right)^{0.2} \right\}^{1,25} + v \left(\frac{1}{gJQ^3} \right)^{0.2} \right]^{0,04} \quad (3.48)$$

Onde:

J é perda de carga unitária (m/m)

Q é a vazão

D é o diâmetro hidráulico

n é o coeficiente de Manning

g é a aceleração da gravidade

Re_y é o número de Reynolds

Recentemente, Swamee apresentou uma equação geral para o cálculo do fator de atrito, válida para os escoamentos laminar, turbulento e de transição, na forma [14]:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re_y} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{n}{3,7D} + \frac{5,74}{Re_y^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re_y} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (3.49)$$

Onde:

f é o fator de atrito

n é o coeficiente de Manning

D é o diâmetro hidráulico

Re_y é o número de Reynolds

E também apresentou uma fórmula universal de perda de carga que pode ser generalizada, com o conceito de diâmetro hidráulico ($R_h = D/4$) da seção de interesse, na forma:

$$\Delta H = \frac{f V^2}{D 2g} \quad (3.50)$$

Onde:

ΔH é a perda de carga

f é o fator de atrito

V é a velocidade média do escoamento

D é o diâmetro hidráulico

g é a aceleração da gravidade

4 O SOFTWARE DE SIMULAÇÃO

Construído na linguagem Java, com swing na interface gráfica e JasperReports para implementar a funcionalidade de impressão, o simulador de cálculos para dimensionamento de canais artificiais proposto para este projeto tem como base para sua construção toda a teoria aplicada ao escoamento em condutos livres, para realizar os cálculos de vazão do escoamento e velocidade média pela fórmula de Manning, raio hidráulico pela sua definição, o número de Reynolds e sua classificação, o número de Froude e sua classificação, a velocidade desejável pela fórmula estatística de Kennedy, o fator de atrito pela equação geral para cálculo de fator de atrito de Swamee e a perda de carga unitária pela fórmula universal da perda de carga, podendo os resultados de todos os cálculos serem gerados em um relatório e serem impressos ou salvos em arquivos PDF ou planilha Excel.

Foi escolhida a linguagem Java, principalmente, por ser uma linguagem concisa e simples, orientada a objetos, robusta, portátil, segura, multiplataforma e compilada.

Abaixo, diagrama de atividades:

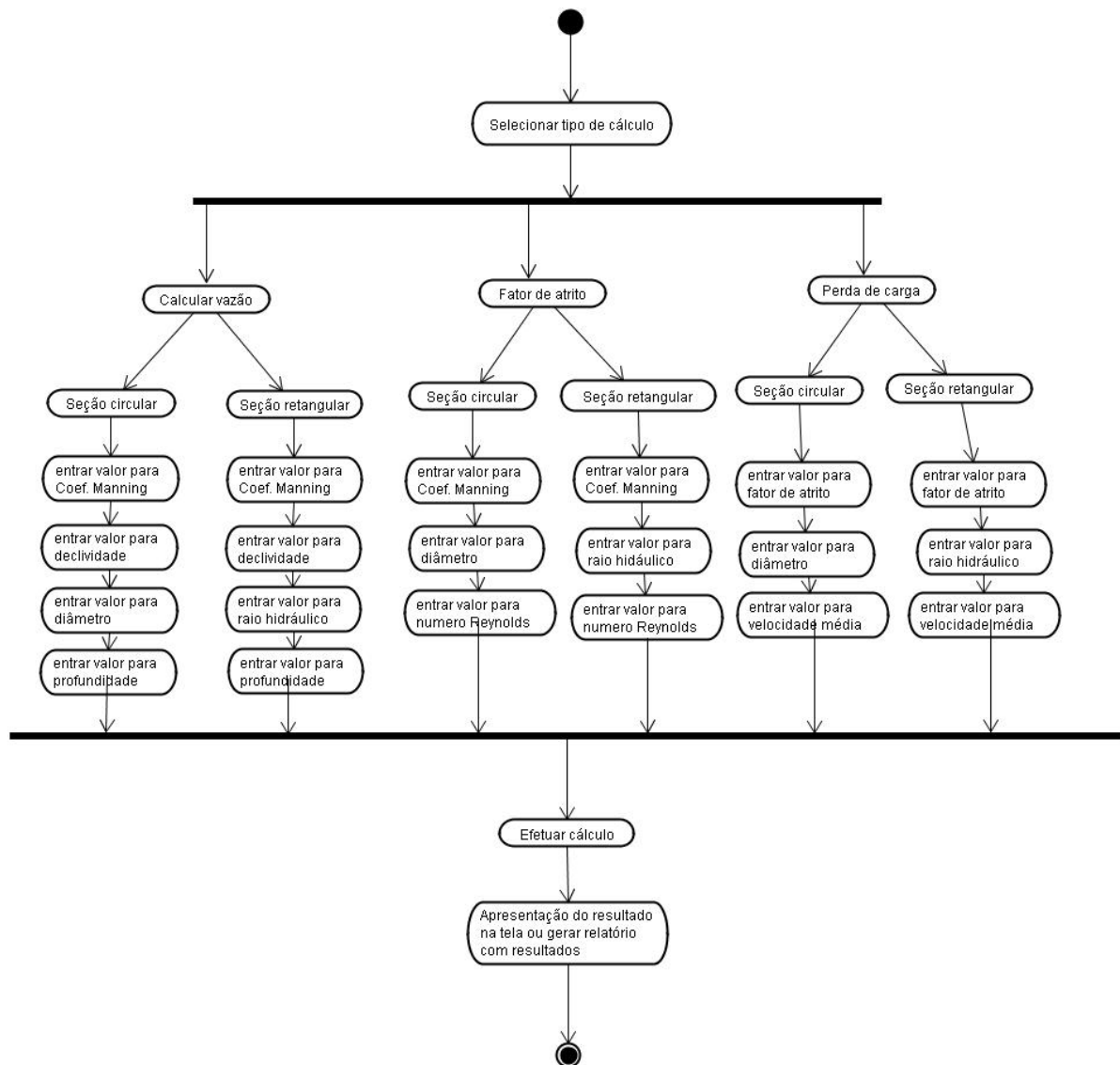


Figura 4.1 – Diagrama de Atividades

Inicialmente, o usuário deverá selecionar qual o cálculo que deseja realizar primeiro: vazão, fator de atrito ou perda de carga. Lembrando que a partir do cálculo da vazão, conseguimos calcular todos os outros na seqüência colocada acima.

Depois de escolhido o cálculo, deverá ser escolhido quais das seções: retangular ou circular.

Na seqüência, será apresentada a tela de entrada de dados, onde o usuário deverá entrar com os dados, clicar no botão calcular e logo abaixo, na mesma janela, serão apresentados os resultados dos cálculos relacionados às entradas que foram inseridas. Todos os detalhes de funcionamento do software estão na ajuda do simulador de dimensionamento de canais artificiais.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizados vários testes para validar o simulador de dimensionamento de canais artificiais. Abaixo, para validação e comprovação da eficácia do software, foram resolvidos 2 dimensionamentos, um de canal com seção circular e outro de canal com seção retangular, e foram resolvidos por dimensionamento manual e dimensionamento por meio do software.

O primeiro dimensionamento foi retirado de uma apostila de hidráulica, da Escola Superior de Agricultura da Universidade de São Paulo [17], e o segundo dimensionamento, do livro Manual de Hidráulica de Azevedo Neto [16].

1. Dimensionamento de Canal - seção circular

Qual a vazão e a velocidade média para descarga máxima de um bueiro circular de concreto ($n = 0,015$) com diâmetro de 2,18 m e declive de 0,2 m por mil. Exige-se que a seção transversal de escoamento atinja no máximo 90% da seção total. Calcule a vazão e a velocidade média. **Resposta: Q = 2,36 m³/s; V = 0,63 m/s.**

- Dimensionamento Manual

$n = 0,015$
 $D = 2,18 \text{ m}$
 $I = 0,0002 \text{ m}$
 $Y = 1,962 \text{ m (90\% D)}$
 $Q = ?$
 $V = ?$

-Fórmula de Manning para vazão: $Q = \frac{1}{n} \cdot 0,312 \cdot D^{8/3} \cdot I^{1/2}$

$$Q = \frac{1}{0,015} \cdot 0,312 \cdot (2,18)^{8/3} \cdot (0,0002)^{1/2}$$

$$Q = 66,6666666 \times 0,312 \times 7,9900712 \times 0,0141421$$

$$\mathbf{Q = 2,350 \text{ m}^3/\text{s}}$$

- *Fórmula de Manning para velocidade:* $V = \frac{1}{n} \cdot 0,397 \cdot D^{2/3} \cdot I^{1/2}$

$$V = \frac{1}{0,015} \cdot 0,397 \cdot (2,18)^{2/3} \cdot (0,0002)^{1/2}$$

$$V = 66,6666666 \times 0,397 \times 1,6812707 \times 0,0141421$$

$$\mathbf{V = 0,629 \text{ m/s}}$$

- *Número de Reynolds:* $Re_y = \frac{VR_h}{\nu}$

$$R_h = \frac{D}{4} = \frac{2,18}{4} = 0,545$$

$$\nu = 0,000001$$

$$Re_y = \frac{0,629 \cdot 0,545}{0,000001}$$

$$\mathbf{Re_y = 342.805}$$

Re_y > 2000 => Escoamento Turbulento

- *Número de Froude:* $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH_m}}$

$$H_m = Y = 1,962 \text{ m}$$

$$g = 9,806 \text{ m/s}^2$$

$$F_r = \frac{0,629}{\sqrt{9,806 \cdot 1,962}}$$

$$F_r = \frac{0,629}{\sqrt{19,239372}}$$

$$F_r = \frac{0,629}{4,3862708}$$

$$\mathbf{F_r = 0,143}$$

$F_r < 1 \Rightarrow$ Escoamento subcrítico (fluvial)

- Fator de atrito: $f = \left\{ \left(\frac{64}{\text{Re } y} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{n}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re } y^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{\text{Re } y} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{342.805} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{0,015}{3,7(2,18)} + \frac{5,74}{(342.805)^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{342.805} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{342.805} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{0,015}{8,066} + \frac{5,74}{95839,035} \right) - \left(\frac{2500}{342.805} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{342.805} \right)^8 + 9,5 \left[\ln(0,00185 + 0,0000598) - \left(\frac{2500}{342.805} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{342.805} \right)^8 + 9,5 \left[\ln(0,001909) - (7,292 \cdot 10^{-3})^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{342.805} \right)^8 + 9,5 \left[-6,260 - 1,504 \cdot 10^{-13} \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{342.805} \right)^8 + 9,5 \left[-6,26 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{342.805} \right)^8 + 9,5 \left[-1,798 \cdot 10^{-13} \right] \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ (1 \cdot 10^{-4})^8 + 1,708 \cdot 10^{-12} \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ 1,475 \cdot 10^{-30} + 1,708 \cdot 10^{-12} \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ 1,708 \cdot 10^{-12} \right\}^{0,125}$$

$$f = 0,033$$

- Perda de Carga: $\Delta H = \frac{f V^2}{D 2g}$

$$\Delta H = \frac{0,033}{2,18} \frac{0,629^2}{2.9,806}$$

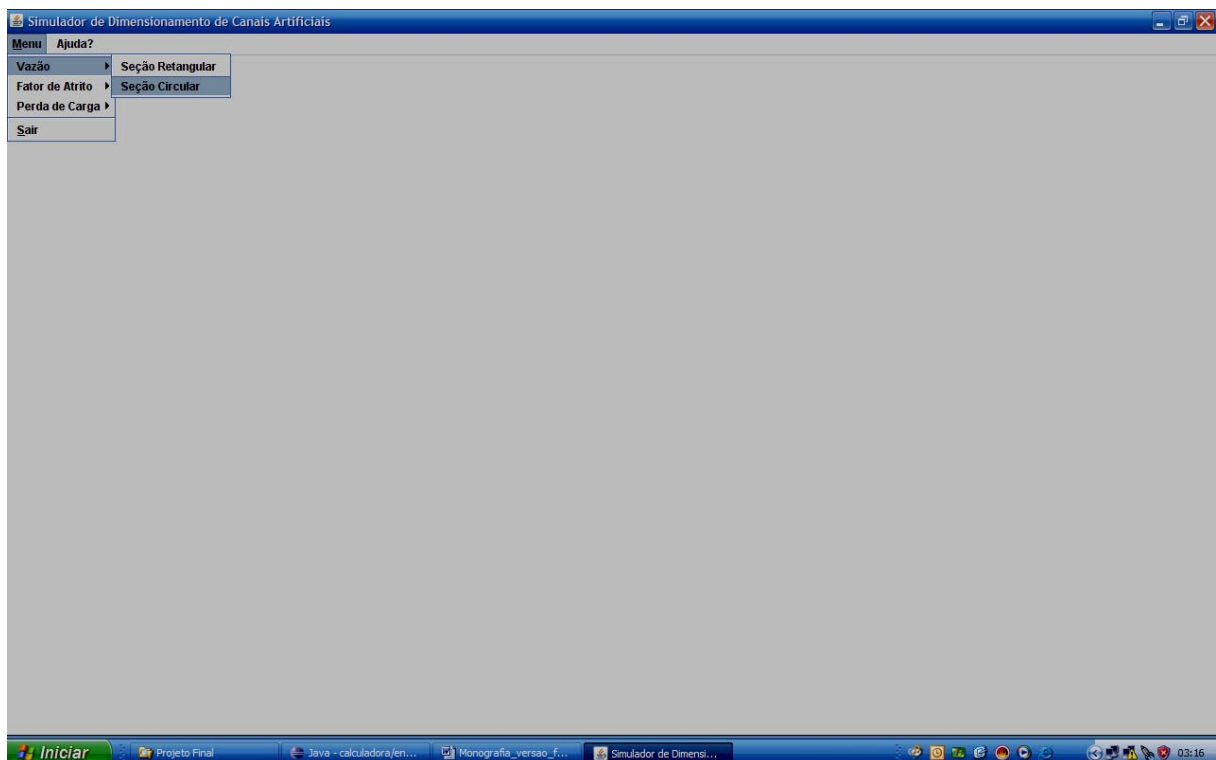
$$\Delta H = 0,015 \cdot \frac{0,395}{19,612}$$

$$\Delta H = 0,015 \cdot 0,020$$

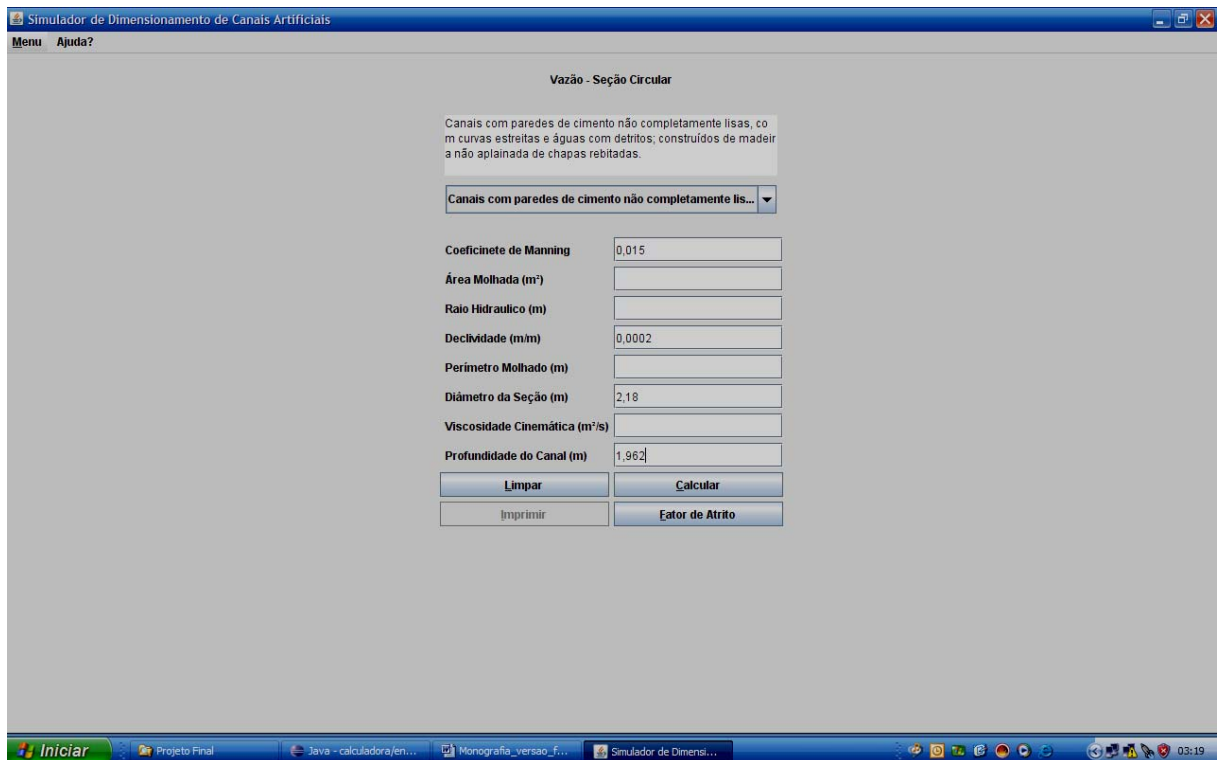
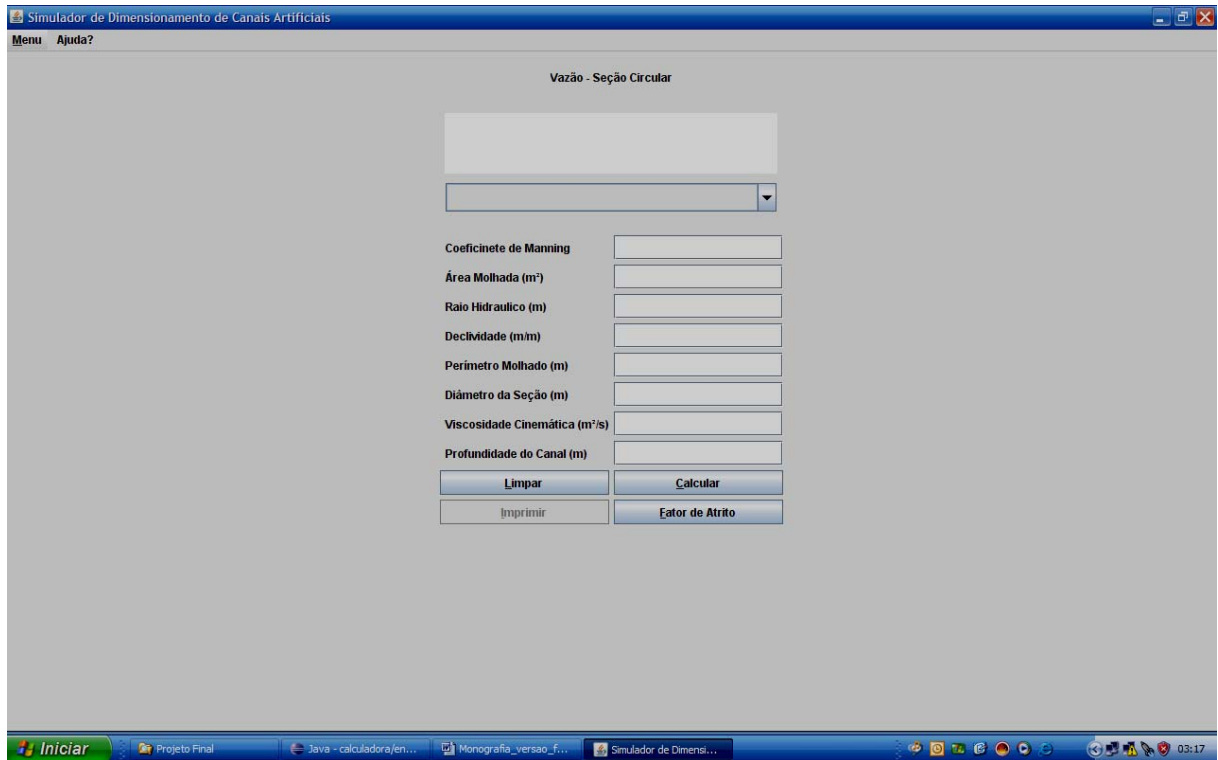
$$\Delta H = 0,0003 \text{ m}$$

- Dimensionamento no Simulador

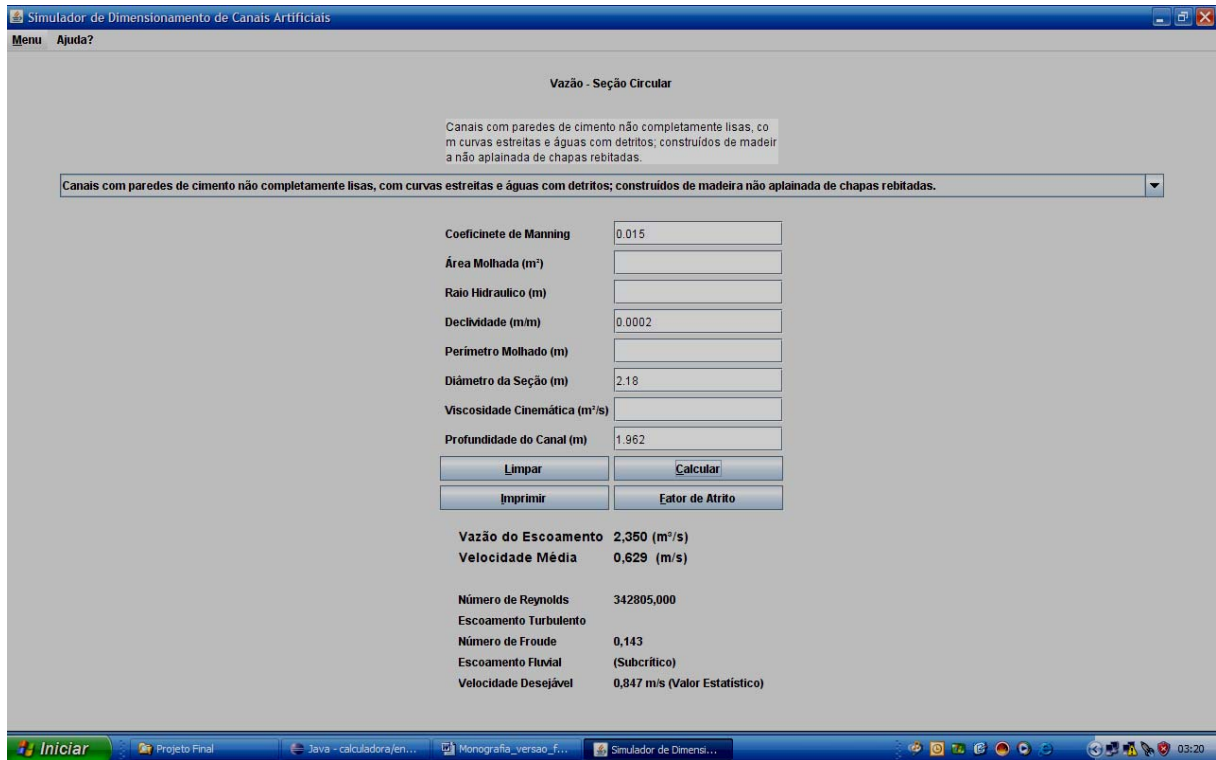
1. Escolha o cálculo e em seguida a seção:



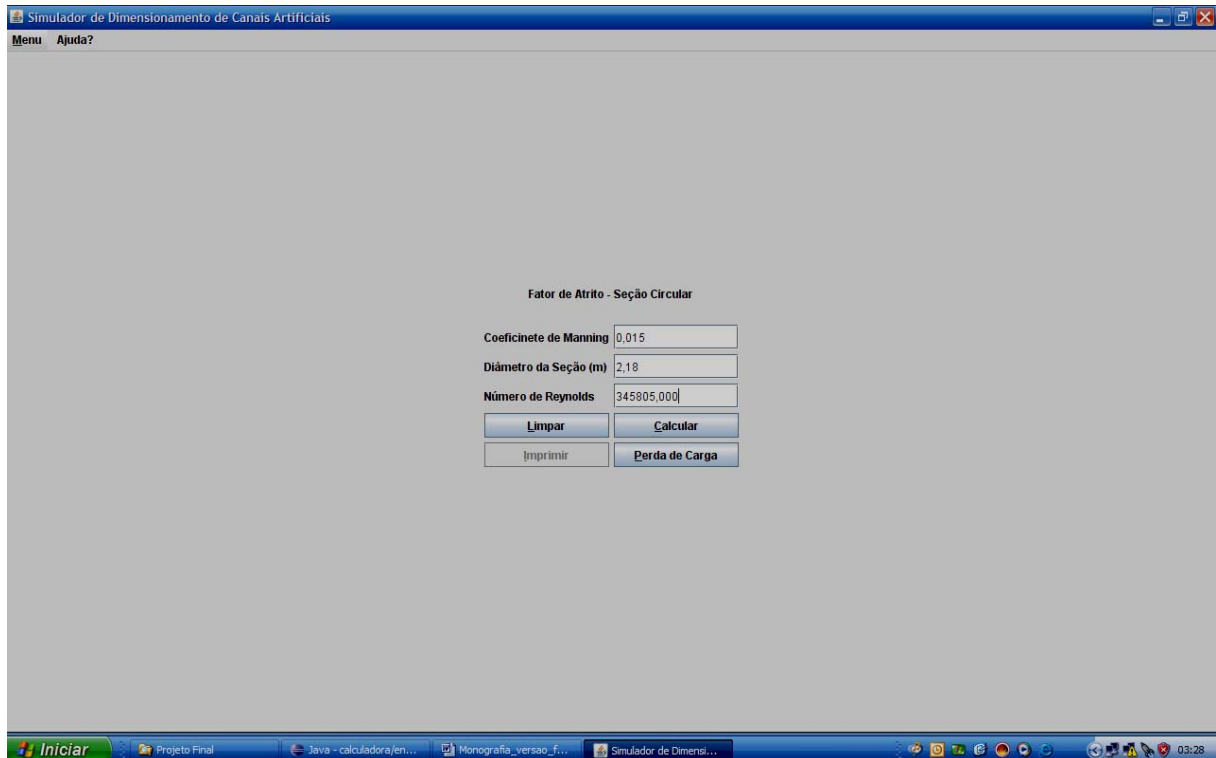
2. Entre com os dados do problema:



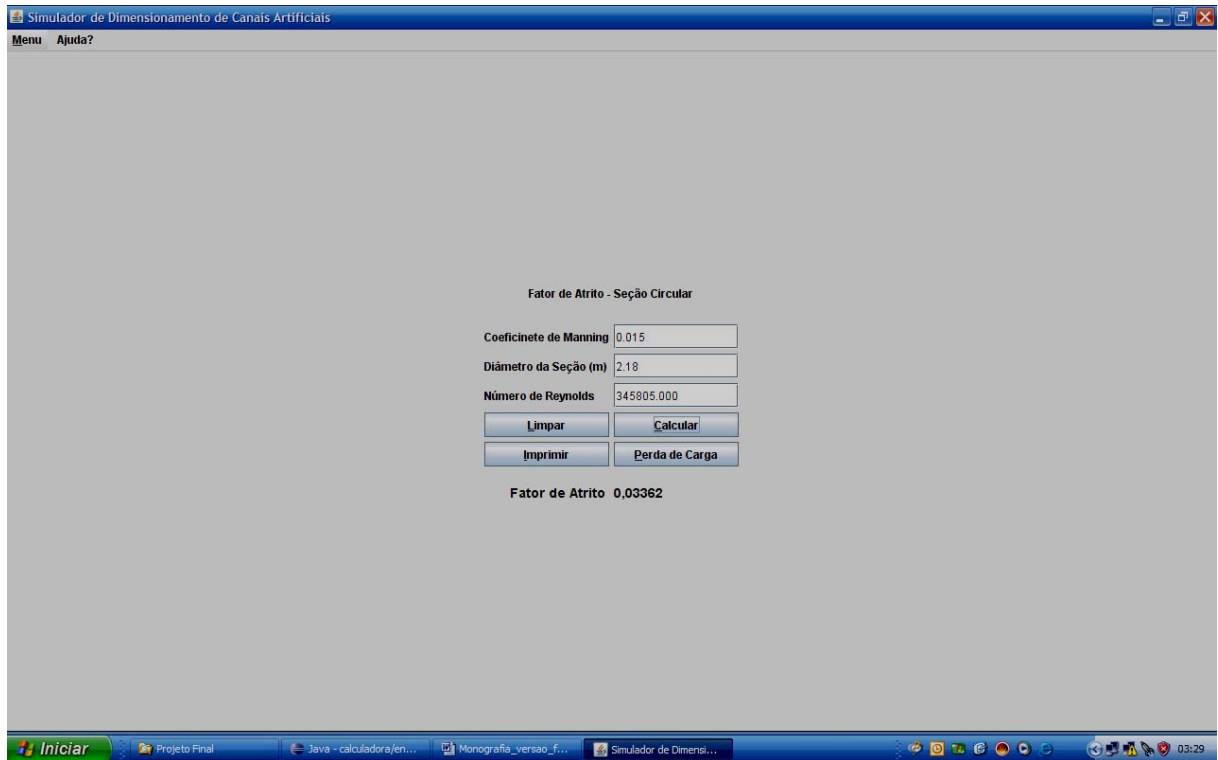
3. Após teclar no botão calcular, será apresentado o resultado do cálculo:



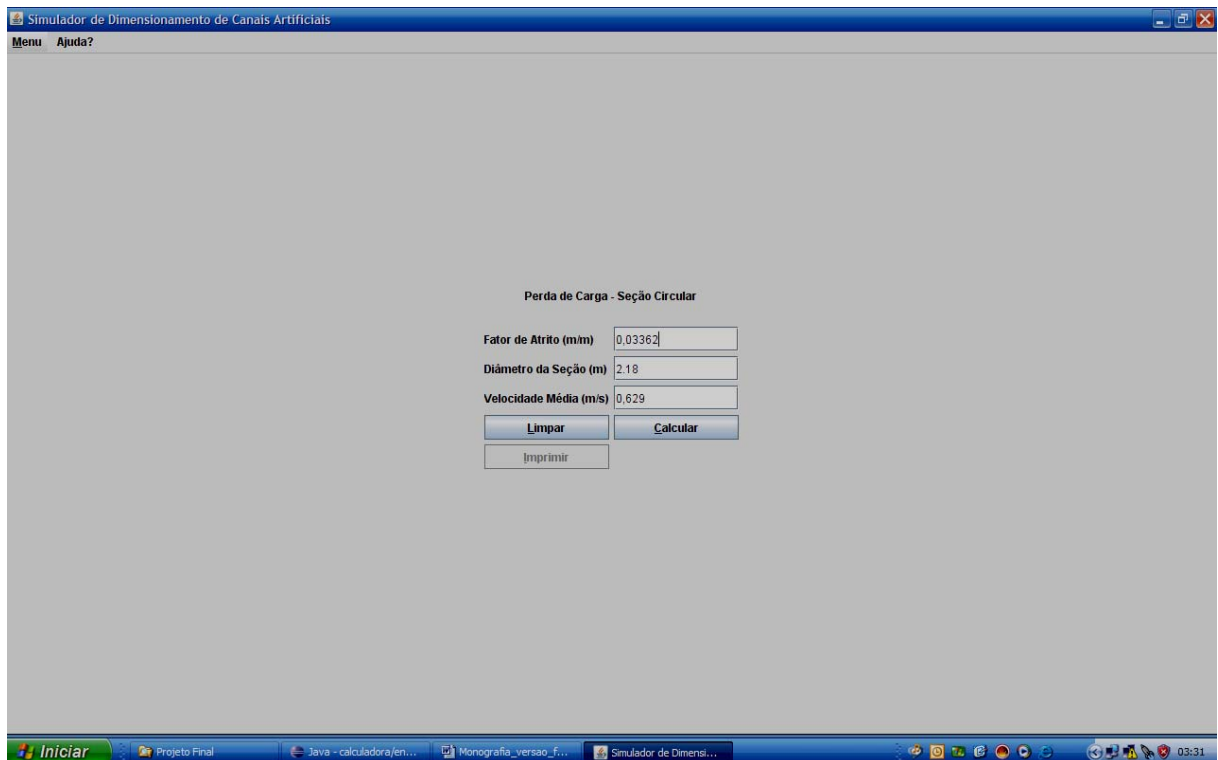
4. O usuário pode continuar com o dimensionamento e teclar no botão fator de atrito para continuar com os cálculos, e será apresentada a tela abaixo com os campos já preenchidos com o resultado do cálculo anterior:



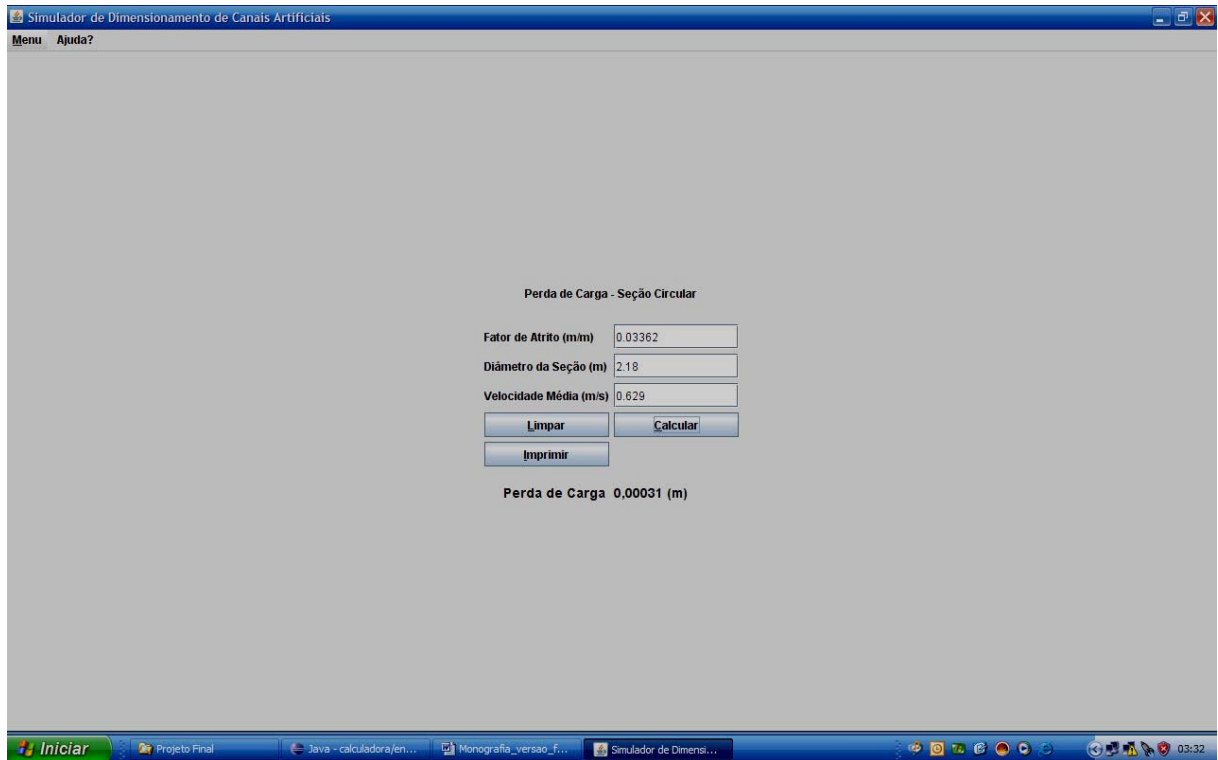
5. Tecele no botão calcular e será apresentado o resultado do cálculo como na tela abaixo:



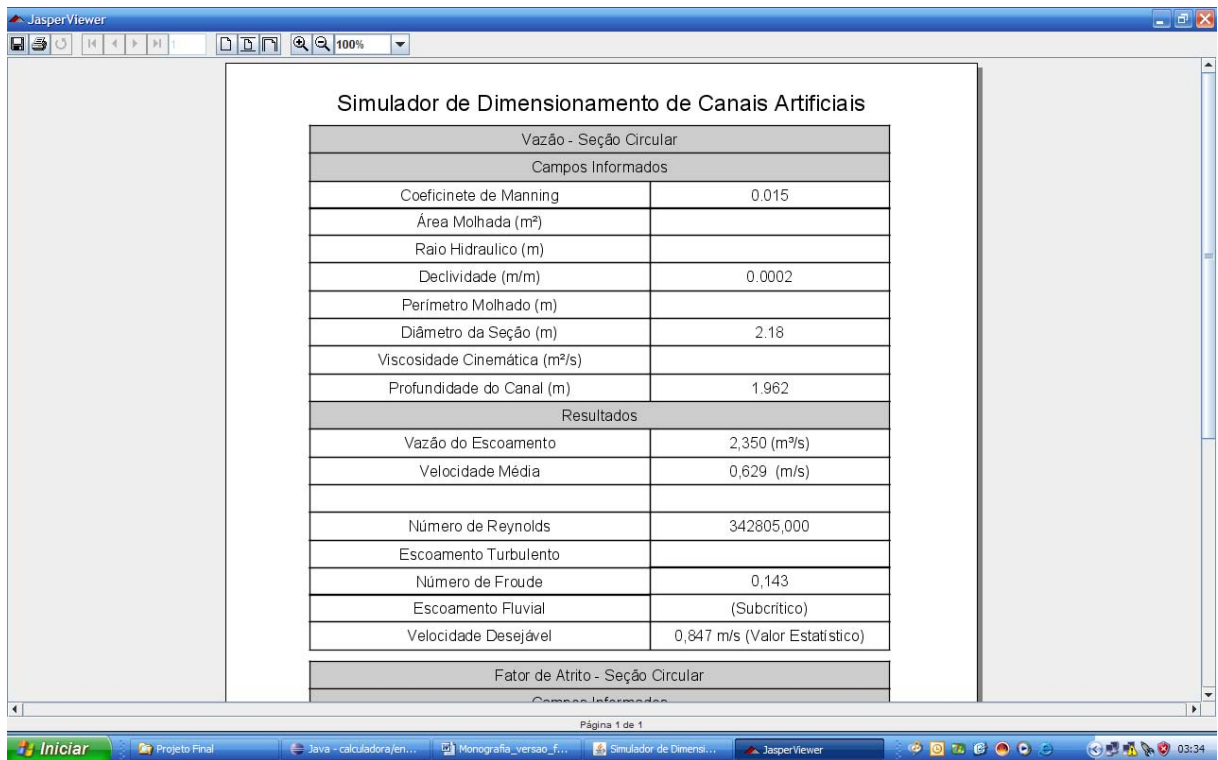
6. O usuário pode continuar com o dimensionamento do canal, teclando no botão perda de carga, e será apresentada a tela abaixo com os resultados dos cálculos anteriores:



7. Tecele no botão calcular e será apresentada o resultado do cálculo como na tela abaixo:



8. O usuário tem ainda a opção de gerar um relatório e imprimi-lo ou salvá-lo, teclando no botão imprimir:



Número de Reynolds	342805,000
Escoamento Turbulento	
Número de Froude	0,143
Escoamento Fluvial	(Subcrítico)
Velocidade Desejável	0,847 m/s (Valor Estatístico)

Fator de Atrito - Seção Circular	
Campos Informados	
Coefficiente de Manning	0,015
Diâmetro da Seção (m)	2,18
Número de Reynolds	342805,000
Resultados	
Fator de Atrito	0,03362

Perda de Carga - Seção Circular	
Campos Informados	
Fator de Atrito (m/m)	0,03362
Diâmetro da Seção (m)	2,18
Velocidade Média (m/s)	0,629
Resultados	
Perda de Carga	0,00031 (m)

2. Dimensionamento de Canal - seção retangular

Um canal de concreto mede 2 m de largura e foi projetado para funcionar com uma profundidade útil de 1m. A declividade é de 0,0005 m/m. Determinar a vazão e a velocidade média. Resposta: **Q = 2,17 m³/s; V = 1,08m/s.**

- Dimensionamento Manual

n = 0,013 (canal de concreto)

I = 0,0005 m

Y = 1 m

A = 2 x 1 = 2 m²

P = 1 + 1 + 2 = 4 m

Q = ?

V = ?

- Raio Hidráulico: $R_h = \frac{\text{área molhada}}{\text{perímetro molhado}}$

$$R_h = \frac{2}{4}$$

$$\mathbf{R_h = 0,5 m}$$

- *Fórmula de Chézy com coeficiente de Manning para vazão:* $Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2}$

$$Q = \frac{1}{0,013} \cdot 2 \cdot (0,5)^{2/3} \cdot (0,0005)^{1/2}$$

$$Q = 76,9230769 \times 2 \times 0,6299605 \times 0,0223606$$

$$\mathbf{Q = 2,167 m^3/s}$$

- *Fórmula da continuidade:* $v = \frac{Q}{A}$

$$V = \frac{2,167}{2}$$

$$\mathbf{V = 1,083 m/s}$$

- *Número de Reynolds:* $Re_y = \frac{VR_h}{\nu}$

$$\nu = 0,000001$$

$$Re_y = \frac{1,083 \cdot 0,5}{0,000001}$$

$$\mathbf{Re_y = 541.500}$$

$\mathbf{Re_y > 2000 \Rightarrow \text{Escoamento Turbulento}}$

- *Número de Froude:* $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH_m}}$

$$g = 9,806 \text{ m/s}^2$$

$$F_r = \frac{1,083}{\sqrt{9,806.1}}$$

$$F_r = \frac{1,083}{\sqrt{9,806}}$$

$$F_r = \frac{1,083}{3,1314533}$$

$$\mathbf{F_r = 0,345}$$

$F_r < 1 \Rightarrow$ Escoamento subcrítico (fluvial)

$$\text{- Fator de atrito: } f = \left\{ \left(\frac{64}{\text{Re } y} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{n}{3,7(4R_h)} + \frac{5,74}{\text{Re } y^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{\text{Re } y} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{541500} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{0,013}{3,7(4,0,5)} + \frac{5,74}{541500^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{541500} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ \left(1,181 \cdot 10^{-4} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(1,756 \cdot 10^{-3} + 3,968 \cdot 10^{-5} \right) - \left(4,616 \cdot 10^{-3} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ \left(1,181 \cdot 10^{-4} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(1,795 \cdot 10^{-3} \right) - \left(4,616 \cdot 10^{-3} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ \left(1,181 \cdot 10^{-4} \right)^8 + 9,5 \left[-6,322 - 9,673 \cdot 10^{-15} \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ \left(1,181 \cdot 10^{-4} \right)^8 + 9,5 \left[-6,322 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ 3,784 \cdot 10^{-32} + 1,458 \cdot 10^{-12} \right\}^{0,125}$$

$$f = \left\{ 1,458 \cdot 10^{-12} \right\}^{0,125}$$

$$\mathbf{f = 0,033}$$

$$\text{- Perda de Carga: } \Delta H = \frac{f}{4R_h} \frac{V^2}{2g}$$

$$\Delta H = \frac{0,033}{4,0,5} \frac{1,083^2}{2,9,806}$$

$$\Delta H = 0,0165 \cdot \frac{1,172}{19,612}$$

$$\Delta H = 0,0165 \cdot 0,0598$$

$$\Delta H = 0,00098$$

- Dimensionamento no Simulador

Vazão - Seção Retangular	
Campos Informados	
Coeficiente de Manning	0,013
Área Molhada (m²)	2
Raio Hidráulico (m)	
Declividade (m/m)	0,0005
Perímetro Molhado (m)	4
Diâmetro da Seção (m)	
Viscosidade Cinemática (m²/s)	
Profundidade do Canal (m)	1
Resultados	
Vazão do Escoamento	2,167 (m³/s)
Velocidade Média	1,084 (m/s)
Raio Hidráulico	0,500 (m)
Número de Reynolds	542000,000
Escoamento Turbulento	
Número de Froude	0,346
Escoamento Fluvial	(Subcrítico)
Velocidade Desejável	0,550 m/s (Valor Estatístico)
Fator de Atrito - Seção Retangular	
Campos Informados	

The screenshot shows a window titled 'JasperViewer' displaying a report. The report contains three main sections: 'Fator de Atrito - Seção Retangular', 'Perda de Carga - Seção Retangular', and their respective results. The data is as follows:

Raio Hidráulico	0,500 (m)
Número de Reynolds	542000,000
Escoamento Turbulento	
Número de Froude	0,346
Escoamento Fluvial	(Subcritico)
Velocidade Desejável	0,550 m/s (Valor Estatístico)
Fator de Atrito - Seção Retangular	
Campos Informados	
Coefficiente de Manning	0,013
Raio Hidraulico (m)	0,500
Número de Reynolds	542000,000
Resultados	
Fator de Atrito	0,03299
Perda de Carga - Seção Retangular	
Campos Informados	
Fator de Atrito (m/m)	0,03299
Raio Hidraulico (m)	0,500
Velocidade Média (m/s)	1,084
Resultados	
Perda de Carga	0,00099 (m)

Como se pode observar, os resultados do relatório gerado a partir do simulador de dimensionamento de canais são os mesmos resultados dos cálculos resolvidos manualmente e o mesmo resultado do dimensionamento realizado conforme referência.

Portanto, validou-se o simulador desenvolvido, uma vez que funcionou como se esperava, fazendo o dimensionamento dos canais utilizando as fórmulas e leis mais conhecidas e usuais para este tipo de dimensionamento de canais artificiais para seções circulares e retangulares com escoamento livre.

6 CONCLUSÃO

Nesta monografia procurou-se transmitir de forma direta, objetiva e concisa a maioria dos conceitos utilizados em mecânica dos fluidos aplicados a escoamento livre. Toda a teoria mencionada, e todo o estudo e análise do escoamento em condutos livres proposto, foram “traduzidos” e transformados em um simulador de dimensionamento de canais artificiais.

Foi um trabalho que exigiu muita pesquisa e estudo, envolvendo uma série de dificuldades, principalmente equacionar matematicamente todo o estudo. Por mais simples que possam ser as equações apresentadas, elas requerem algum esforço computacional com operações matemáticas de potenciação, radiciação e logarítmicas. Outra dificuldade foi quanto a encontrar a bibliografia corrente sobre o tema. Não é um assunto tratado no dia-a-dia e nem tão pouco em qualquer livro de hidráulica, ou muito discutido na internet.

Por meio dos testes realizados e dos resultados obtidos constatou-se que o simulador de dimensionamento de canais artificiais alcançou os objetivos que foram propostos no capítulo 1 item 1.1, e principalmente, toda a fundamentação teórica e os métodos numéricos aplicados foram capazes de resolver as equações envolvidas por intermédio do simulador, podendo assim facilitar para acadêmicos ou profissionais da área a solucionar problemas de dimensionamento de canais artificiais de seção retangular ou circular por meio de um sistema computacional simples e funcional.

Este trabalho foi desenvolvido a partir de uma sugestão de continuidade do projeto do colega John Franklin, porém este é um assunto muito vasto e com muitas possibilidades de crescimento. O estudo de outras diferentes seções, a inclusão de outros módulos de cálculos no simulador, emissão de relatórios e

gráficos analíticos, por exemplo, a inclusão de várias outras funcionalidades como comparação de melhores canais em determinado projeto, simuladores gráficos comprovando o melhor canal e mostrando o porquê ou mesmo, escoamento para fluidos compressíveis.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] AZEVEDO NETO, J.M. *Manual de hidráulica*. 8ª Edição. Edgard Blücher, 1998.
- [2] BANDINI, A. *Hidráulica Vol 1*. EESC/USP, 1961.
- [3] BASTOS, F.A.A. *Problemas de Mecânica dos Fluidos*. Guanabara Dois, 1980.
- [4] BENNET, C. O., MYERS, J. E. *Fenômenos de Transporte, Quantidade de Calor e Massa*, McGraw-Hill do Brasil LTDA, 1978.
- [5] BONILHA, J.B. *Conduto Livres - "Notas de Aula"*, Universidade de São Paulo, USP, SP, 1991.
- [6] DUARTE, S.N., BOTREL, T.A., FURLAN, R.A. *Hidráulica: Exercícios*. Piracicaba, 1996, disponível em <http://www.ciagri.usp.br/~tabotrel/download/cap11.doc>
- [7] FOX, R. W., MCDONALD, A. T., *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, 5ª edição, LTC, 2001.
- [8] GOLDFARB, M.C., SILVA, T.C., AZEVEDO, C.A.V., LIMA, V.L.A. *Escoamento uniforme em canais circulares lisos*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.8, n.2/3, p.180-183, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v8n2-3/v8n2a03.pdf>
- [9] MADEIRA, J.F.L. *Simulador Computacional para fluidos Incompressíveis*, 2006.
- [10] MIT, Home Page. Disponível em: <http://web.mit.edu/nnf>
- [11] ORBITA, Home Page. Disponível em: <http://orbita.starmedia.com/~engomagem/reologia.htm>
- [12] PORTO, R.M. *Hidráulica Básica*, 4ª edição, EESC/USP, 2006.
- [13] POTTER, M. C., WIGGERT, D. C., *Mecânica dos Fluidos*, 3ª edição, Thomson, 2004.
- [14] ROMA, Woodrow N. L., *Fenômenos de Transporte para Engenharia*, RiMA, 2003.
- [15] SCHIOZER, Dayr. *Mecânica dos Fluidos*, 2ª edição, LTC, 1996.
- [16] SILVESTRE, P. *Hidráulica Geral*. Livros Técnicos e Científicos S.A. 1979.
- [17] THERMOEVOLUTION, Home Page. Disponível em: <http://www.thermoevolution.com.br>
- [18] VISCOELASTICITY, Home Page. Disponível em: <http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/VE.html>

APÊNDICE A – FOTOS DE ALGUNS CANAIS ARTIFICIAIS



Figura A.1 - Canal artificial cavado no coral
Fonte: <http://www.panoramio.com/photo/1285650>

Figura A.1 - Este canal de Quipenho, Quipinho ou Kipira, destinado a ligar as ilhas do Ibo e de Quirimba (Moçambique - África), foi construído entre densos mangais, escavando o coral, no ano de 1794, por mão-de-obra escrava. Permite nas baixas-mar ser percorrido a pé, em 3 horas.



Figura A.2 - Situação atual do Canal Campos - Macaé
Fonte: <http://maglevcobra.blogspot.com/2007/07/evolucao-da-trao-vapor-continuo.html>

Figura A.2 - Em 1843, quando Irineu Evangelista de Souza, o futuro Barão de Mauá, já havia iniciado a construção da sua primeira ferrovia, iniciou-se a construção de um canal que teria cerca de 100 km ligando a bacia do rio Paraíba do Sul, em Campos, ao porto de Macaé, passando pela Lagoa Feia, Quissamã, Carapebus (Estado do Rio de Janeiro) e dezenas de usinas de açúcar. Nesta ocasião, apesar das ferrovias já serem uma realidade em outros países, no Brasil a primeira ferrovia só seria inaugurada em 1854. Portanto o transporte fluvial era uma recomendação correta, além de permitir a drenagem da água alagadiça, onde proliferavam mosquitos.



Figura A.3 – Canal Retangular



Figura A.4 – Canal Retangular

Fonte: <http://agetec.com.br/solucoes.detalhe.php?id=51&cat=2&sub=3>

Figuras A.3 e A.4 - Canal artificial retangular aplicados na medição contínua de vazão e/ou mistura rápida de coagulantes em Estações de Tratamento de Água (ETAs) e / ou Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) industriais ou urbanos. Fabricados em resina poliéster reforçada com fibra de vidro, esses canais são equipamentos projetados para resistir aos efeitos corrosivos do líquido a ser mensurado e dos eventuais produtos químicos incorporados ao mesmo.



Figura A.5 - Canalização Ribeirão Anhumas (local onde o canal tem seção retangular aberta)

Fonte: <http://www.fec.unicamp.br/~ec517/anhumas.htm>

Figura A.5 – A canalização do Ribeirão Anhumas (Campinas - SP) visou conter as enchentes mais freqüentes dentro do leito do ribeirão e proporcionar a cada margem mais uma faixa de tráfego na avenida. Seção retangular: 7.00 x 3.00, onde o material das paredes e fundo é concreto (coeficiente de manning é $n=0.018$), a declividade é de 0.0027 m/m e o regime de escoamento é fluvial.



Figura A.6 – Canal da Integração (Ceará)



Figura A.7 – Canal da Integração (Ceará)

Fonte: <http://www.srh.ce.gov.br/canal-de-integracao>

Figuras A.6 e A.7 - O Canal da Integração constitui-se de um complexo de estação de bombeamento, canais de diferentes seções, sifões, adutoras e túneis, que realizam a transposição das águas do Açude Castanhão para reforçar o abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza, assim como do Complexo Portuário e Industrial do Pecém, fazendo a integração das bacias hidrográficas do

Jaguaribe e Região Metropolitana. Sua construção possibilita o surgimento de um pólo de desenvolvimento hidroagrícola nas áreas de tabuleiro da Bacia do Rio Jaguaribe, promovendo o atendimento a projetos de irrigação no decorrer de seu traçado. A obra também garante o abastecimento humano de água da capital cearense por, pelo menos, 30 anos, bem como de todas as comunidades ao longo de seu trajeto, beneficiando e potencializando o desenvolvimento local dos municípios. O percurso estende-se ao longo de aproximadamente 200 km. O prolongamento do sistema adutor para a zona Oeste de Fortaleza perfaz cerca de 55 km adicionais, totalizando uma extensão de 255 km de canais e adutoras.

APÊNDICE B – APRESENTAÇÃO DAS EQUAÇÕES UTILIZADAS NO DIMENSIONAMENTO DE CANAIS ARTIFICIAIS

1. Seção Circular

- Cálculo da vazão – Fórmula de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot 0,312 D^{8/3} \cdot I^{1/2}$$

- Velocidade média – Fórmula de Manning:

$$V = \frac{1}{n} \cdot 0,397 D^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

- Raio hidráulico:

$$R_H = \frac{D}{4}$$

- Número de Reynolds:

$$Re = \frac{VR_h}{\nu}$$

Classificação:

- Escoamento laminar: $Re < 500$
- Escoamento turbulento: $Re > 2000$
- Escoamento de transição: $500 < Re < 2000$

- Número de Froude:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH_m}}$$

Classificação:

- Escoamento subcrítico ou fluvial: $Fr < 1$
- Escoamento supercrítico ou torrencial: $Fr > 1$
- Escoamento crítico: $Fr = 1$

- *Fator de atrito - Equação geral para cálculo de fator de atrito de Swamee:*

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re y} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{n}{3,7D} + \frac{5,74}{Re y^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re y} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

- *Perda de carga unitária - fórmula universal da perda de carga:*

$$\Delta H = \frac{f V^2}{D 2g}$$

2. Seção Retangular

- *Cálculo da vazão – Fórmula de Manning:*

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_h^{8/3} \cdot I^{1/2}$$

- *Velocidade média – Equação da continuidade:*

$$V = \frac{Q}{A}$$

- *Raio hidráulico:*

$$R_H = \frac{\text{área molhada}}{\text{perímetro molhado}}$$

- *Número de Reynolds:*

$$Re y = \frac{VR_h}{\nu}$$

Classificação:

- Escoamento laminar: $Re y < 500$
- Escoamento turbulento: $Re y > 2000$
- Escoamento de transição: $500 < Re y < 2000$

- *Número de Froude:*

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH_m}}$$

Classificação:

- Escoamento subcrítico ou fluvial: $Fr < 1$
- Escoamento supercrítico ou torrencial: $Fr > 1$
- Escoamento crítico: $Fr = 1$

- *Fator de atrito - Equação geral para cálculo de fator de atrito de Swamee:*

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re y} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{n}{3,7(4R_h)} + \frac{5,74}{Re y^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re y} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

- *Perda de carga unitária - fórmula universal da perda de carga:*

$$\Delta H = \frac{f}{4R_h} \frac{V^2}{2g}$$

3. Independente da Seção

- *Velocidade desejável - Fórmula estatística de Kennedy:*

$$V_o = 0,55h^{0,64}$$

APÊNDICE C – CÓDIGO FONTE DO SIMULADOR

Segue abaixo o código fonte do simulador de dimensionamento de canais artificiais:

```
package engenharia.calculadora;

import javax.swing.JFrame;

import engenharia.calculadora.visao.JanelaPrincipal;

public class Principal {

    // Metodo main. É o primeiro método a ser chamado, ele executa o
    aplicativo.
    public static void main(String[] args) {
        JanelaPrincipal janelaPrincipal = new JanelaPrincipal();
        janelaPrincipal.setDefaultCloseOperation(JFrame.EXIT_ON_CLOSE);
    }
}
```

```
package engenharia.calculadora.visao;

import java.awt.Container;
import java.awt.Font;
import java.awt.GridBagConstraints;
import java.awt.GridBagLayout;
import java.awt.GridLayout;
import java.awt.Insets;
import java.awt.event.ActionEvent;
import java.awt.event.ActionListener;
import java.text.DecimalFormat;
import java.util.HashMap;

import javax.swing.JButton;
import javax.swing.JFrame;
import javax.swing.JLabel;
import javax.swing.JMenu;
import javax.swing.JMenuBar;
import javax.swing.JMenuItem;
import javax.swing.JOptionPane;
import javax.swing.JPanel;
import javax.swing.JTextField;

import net.sf.jasperreports.engine.JRException;
import net.sf.jasperreports.engine.JasperFillManager;
import net.sf.jasperreports.engine.JasperPrint;
import net.sf.jasperreports.view.JasperViewer;
import engenharia.calculadora.negocio.Calculadora;
import engenharia.calculadora.negocio.Calculos;
```

```

public class JanelaPrincipal extends JFrame{

    //Paineis
    private JPanel jpPainel1,
                  jpPainel2,
                  jpPainel3;

    //Botões
    private JButton jbCalcular,
                  jbCalcular2,
                  jbCalcular3,
                  jbLimpar,
                  jbFatorAtrito,
                  jbPerdaCarga,
                  jbImprimir;

    //Declaração dos labels
    private JLabel jlCoefManning,
                  jlAreaMolhada,
                  jlRaioHidraulico,
                  jlDeclividade,
                  jlPerMolhado,
                  jlDiametroSecao,
                  jlViscosidade,
                  jlProfundidade,
                  jlTituloDoCalculo,
                  jlTituloDoCalculoPC,
                  jlTituloDoCalculoFatorAtrito,
                  jlNumeroReyDesc,
                  jlNumeroReyResult,
                  jlEscoamentoReyDesc,
                  jlEscoamentoReyrresult,
                  jlNumeroFroudDesc,
                  jlNumeroFroudResult,
                  jlEscoamentoFroudDesc,
                  jlEscoamentoFroudrResult,
                  jlVelocidadeDesejavelDesc,
                  jlVelocidadeDesejavelResult,
                  jlVazaoQDesc,
                  jlVazaoQResult,
                  jlVelocidadeDesc,
                  jlVelocidadeResult,
                  jlRaioHidraulicoDesc,
                  jlRaioHidraulicoResult,
                  jlReynolds,
                  jlFatorAtritoDesc,
                  jlFatorAtritoResult,
                  jlVelocidade,
                  jlFatorAtrito,
                  jlPerdaCargaDesc,
                  jlPerdaCargaResult;

    private JTextField jtCoefManning,
                      jtAreaMolhada,
                      jtRaioHidraulico,
                      jtDeclividade,
                      jtPerMolhado,
                      jtDiametroSecao,
                      jtViscosidade,
                      jtProfundidade,
                      jtReynolds,
                      jtVelocidade,

```

```

        jtFatorAtrito;

//Layout
private GridLayout grid1;
private Container container = getContentPane();
private JasperPrint jasperPrint;
private HashMap<String, String> mapa = new HashMap<String, String>();

public static final String CAMINHO_JASPER= "Calculadora.jasper";

/**
 * Método JanelaPrincipal, contrutor da classe Principal
 * Monta a tela inicial com menu
 */
public JanelaPrincipal(){
    super("Simulador de Cálculos para Canais Artificiais");

    //Configurando o Menu principal
    JMenu menu = new JMenu("Menu");
    //Atalho Alt+M
    menu.setMnemonic('M');

    //Primeiro Calculo
    JMenu calculo1 = new JMenu("Vazão");
    menu.add(calculo1);

    JMenuItem quadrado1 = new JMenuItem("Seção Retangular");
    calculo1.add(quadrado1);

    quadrado1.addActionListener(
        new ActionListener(){
            public void actionPerformed(ActionEvent evento){
                container.removeAll();
                container.repaint();
                montaContainerVazao("Retangular");
                jpPainel1.setVisible(true);
                jpPainel2.setVisible(true);
                jpPainel3.setVisible(true);
            }
        }
    );

    JMenuItem circulo1 = new JMenuItem("Seção Circular");
    calculo1.add(circulo1);

    circulo1.addActionListener(
        new ActionListener(){
            public void actionPerformed(ActionEvent evento){
                container.removeAll();
                container.repaint();
                montaContainerVazao("Circular");
                jpPainel1.setVisible(true);
                jpPainel2.setVisible(true);
                jpPainel3.setVisible(true);
            }
        }
    );

    //Segundo Calculo
    JMenu calculo2 = new JMenu("Fator de Atrito");

```

```

menu.add(calculo2);

JMenuItem quadrado2 = new JMenuItem("Seção Retangular");
calculo2.add(quadrado2);

quadrado2.addActionListener(
    new ActionListener(){
        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            container.removeAll();
            container.repaint();
            montaContainerFatorAtrito("Retangular", new
Calculadora());

            jpPainel1.setVisible(true);
            jpPainel2.setVisible(true);
            jpPainel3.setVisible(true);
        }
    }
);

JMenuItem circulo2 = new JMenuItem("Seção Circular");
calculo2.add(circulo2);

circulo2.addActionListener(
    new ActionListener(){
        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            container.removeAll();
            container.repaint();
            montaContainerFatorAtrito("Circular", new
Calculadora());

            jpPainel1.setVisible(true);
            jpPainel2.setVisible(true);
            jpPainel3.setVisible(true);
        }
    }
);

//Terceiro calculo
JMenu calculo3 = new JMenu("Perda de Carga");
menu.add(calculo3);

JMenuItem quadrado3 = new JMenuItem("Seção Retangular");
calculo3.add(quadrado3);

quadrado3.addActionListener(
    new ActionListener(){
        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            container.removeAll();
            container.repaint();
            montaContainerPerdaCarga("Retangular", new
Calculadora());

            jpPainel1.setVisible(true);
            jpPainel2.setVisible(true);
            jpPainel3.setVisible(true);
        }
    }
);

JMenuItem circulo3 = new JMenuItem("Seção Circular");

```

```

calculo3.add(circulo3);

circulo3.addActionListener(
    new ActionListener(){
        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            container.removeAll();
            container.repaint();
            montaContainerPerdaCarga("Circular",new
Calculadora());

            jpPainel1.setVisible(true);
            jpPainel2.setVisible(true);
            jpPainel3.setVisible(true);
        }
    }
);

//Configurando o Submenu sair
JMenuItem itenSair = new JMenuItem("Sair");
//Atalho Alt+S
itenSair.setMnemonic('S');

//tratamento do evento Sair
itenSair.addActionListener(
    new ActionListener(){
        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            System.exit(0);
        }
    }
);

//Separador do menu sair
menu.addSeparator();
//Adiciona o item sair ao menu
menu.add(itenSair);

//Criando um barra de menu para adicionar o menu
JMenuBar barraDeMenu = new JMenuBar();
setJMenuBar(barraDeMenu);
barraDeMenu.add(menu);

//posicao de abertura da janela
setLocation(450, 100);
//tamanho da janela
setSize(400,609);
//visibilidade da janela
setVisible(true);
}

private void preencherMapa(String calculo){
    if(calculo.equals("vazao")){
        // mapa.clear();
        mapa.put("titulo", jtTituloDoCalculo.getText());
        mapa.put("coefManning", jtCoefManning.getText());
        mapa.put("areaMolhada", jtAreaMolhada.getText());
        mapa.put("raioHidraulico", jtRaioHidraulico.getText());
        mapa.put("declividade", jtDeclividade.getText());
        mapa.put("perMolhado", jtPerMolhado.getText());
        mapa.put("diametroSecao", jtDiametroSecao.getText());
        mapa.put("viscosidade", jtViscosidade.getText());
        mapa.put("profundidade", jtProfundidade.getText());
    }
}

```

```

        mapa.put("vazaoDesc", jlVazaoQDesc.getText());
        mapa.put("vazaoResult", jlVazaoQResult.getText());

        mapa.put("veloMediaDesc", jlVelocidadeDesc.getText());
        mapa.put("veloMediaResult", jlVelocidadeResult.getText());

        mapa.put("RhDesc", jlRaioHidraulicoDesc.getText());
        mapa.put("RhResult", jlRaioHidraulicoResult.getText());

        mapa.put("reyDesc", jlNumeroReyDesc.getText());
        mapa.put("reyResult", jlNumeroReyResult.getText());

        mapa.put("escoamentoReyDesc", jlEscoamentoReyDesc.getText());
        mapa.put("escoamentoReyResult",
        jlescoamentoReyrrresult.getText());

        mapa.put("froudDesc", jlNumeroFroudDesc.getText());
        mapa.put("froudResult", jlNumeroFroudResult.getText());

        mapa.put("escoamentoFroudDesdc",
        jlEscoamentoFroudDesc.getText());
        mapa.put("escoamentoFroudResult",
        jlescoamentoFroudrrresult.getText());

        mapa.put("veloDesejavelDesc",
        jlVelocidadeDesejavelDesc.getText());
        mapa.put("veloDesejavelResult",
        jlVelocidadeDesejavelResult.getText());
    }
    if(calculo.equals("fatorAtrito")){
        mapa.put("tituloFatorAtrito",
        jlTituloDoCalculoFatorAtrito.getText());
        mapa.put("fatorAtrito", jlFatorAtritoResult.getText());
        mapa.put("coefManningFatorAtrito", jtCoefManning.getText());

        if(jlTituloDoCalculoFatorAtrito.getText().equals("Fator de
        Atrito - Seção Retangular")){
            mapa.put("descSecao", jlRaioHidraulico.getText());
            mapa.put("secaoValor", jtRaioHidraulico.getText());
        }else{
            mapa.put("descSecao", jlDiametroSecao.getText());
            mapa.put("secaoValor", jtDiametroSecao.getText());
        }

        mapa.put("reyFatorAtrito", jtReynolds.getText());
    }
    if(calculo.equals("perdaCarga")){
        mapa.put("tituloPerdaCarga", jlTituloDoCalculoPC.getText());
        mapa.put("fatorAtritoPC", jtFatorAtrito.getText());
        mapa.put("veloMediaPC", jtVelocidade.getText());

        if(jlTituloDoCalculoPC.getText().equals("Perda de Carga -
        Seção Retangular")){
            mapa.put("descSecaoPC", jlRaioHidraulico.getText());
            mapa.put("secaoValorPC", jtRaioHidraulico.getText());
        }else{
            mapa.put("descSecaoPC", jlDiametroSecao.getText());
            mapa.put("secaoValorPC", jtDiametroSecao.getText());
        }
    }

```

```

        mapa.put("perdaCarga", jlPerdaCargaResult.getText());
    }
}

private void btnImprimir(String calculo) {
    preencherMapa(calculo);
    try {
        jasperPrint = JasperFillManager.fillReport(CAMINHO_JASPER,
mapa);
        JasperViewer.viewReport(jasperPrint, false);
    } catch (JRException e1) {
        e1.printStackTrace();
    }
}

private void btnFatorAtrito() {
    preencherMapa("vazao");

    container.removeAll();
    container.repaint();

    Object[] options = { "Circular", "Retangular" };
    int i = JOptionPane.showOptionDialog(null, "Defina a seção.",
"Seção?", JOptionPane.DEFAULT_OPTION, JOptionPane.WARNING_MESSAGE, null,
options, options[0]);

    Calculadora calculadora = new Calculadora();

    calculadora.setCoefManning(jtCoefManning.getText());
    calculadora.setReynolds(jlNumeroReyResult.getText());
    calculadora.setVelocidade(jlVelocidadeResult.getText());

    if(!jtRaioHidraulico.getText().equals(""))
        calculadora.setRaioHidraulico(jtRaioHidraulico.getText());
    else if(!jlRaioHidraulicoResult.getText().equals(""))

    calculadora.setRaioHidraulico(jlRaioHidraulicoResult.getText().substri
ng(0, jlRaioHidraulicoResult.getText().length()-5));

    calculadora.setDiametroSecao(jtDiametroSecao.getText());

    if(i==1)
        montaContainerFatorAtrito("Retangular", calculadora);
    else
        montaContainerFatorAtrito("Circular", calculadora);

    jpPainel1.setVisible(true);
    jpPainel2.setVisible(true);
    jpPainel3.setVisible(true);
}

private void btnCalcularVazao(){
    Calculadora vazao = new Calculadora();

    try{
        if(!jtAreaMolhada.getText().equals("")){

            jtAreaMolhada.setText(jtAreaMolhada.getText().replace(',', '.'));
            //tenta converter para double, se nao for numero lanca
            NumberFormatException

```

```

        Double.parseDouble(jtAreaMolhada.getText());
    }
    if(!jtCoefManning.getText().equals("")){
        jtCoefManning.setText(jtCoefManning.getText().replace(',', '.'));
        Double.parseDouble(jtCoefManning.getText());
    }
    if (!jtDeclividade.getText().equals("")){
        jtDeclividade.setText(jtDeclividade.getText().replace(',', '.'));
        Double.parseDouble(jtDeclividade.getText());
    }
    if (!jtDiametroSecao.getText().equals("")){
        jtDiametroSecao.setText(jtDiametroSecao.getText().replace(',', '.'));
        Double.parseDouble(jtDiametroSecao.getText());
    }
    if (!jtPerMolhado.getText().equals("")){
        jtPerMolhado.setText(jtPerMolhado.getText().replace(',', '.'));
        Double.parseDouble(jtPerMolhado.getText());
    }
    if (!jtRaioHidraulico.getText().equals("")){
        jtRaioHidraulico.setText(jtRaioHidraulico.getText().replace(',', '.'));
        Double.parseDouble(jtRaioHidraulico.getText());
    }
    if (!jtViscosidade.getText().equals("")){
        jtViscosidade.setText(jtViscosidade.getText().replace(',', '.'));
        Double.parseDouble(jtViscosidade.getText());
    }
    if (!jtProfundidade.getText().equals("")){
        jtProfundidade.setText(jtProfundidade.getText().replace(',', '.'));
        Double.parseDouble(jtProfundidade.getText());
    }
    if(jtCoefManning.getText().equals("")){
        JOptionPane.showMessageDialog(null, "O campo Coeficinete de Manning é obrigatório.", "Atenção", JOptionPane.WARNING_MESSAGE);
    }else if (jtDeclividade.getText().equals("")){
        JOptionPane.showMessageDialog(null, "O campo Declividade é obrigatório.", "Atenção", JOptionPane.WARNING_MESSAGE);
    }else if (jtAreaMolhada.getText().equals("") && jtDiametroSecao.getText().equals("")){
        JOptionPane.showMessageDialog(null, "O campo Área Molhada ou Diâmetro da Seção é obrigatório.", "Atenção", JOptionPane.WARNING_MESSAGE);
    }else if (!(jtAreaMolhada.getText().equals("")) && jtPerMolhado.getText().equals("") && jtRaioHidraulico.getText().equals("")){
        JOptionPane.showMessageDialog(null, "O campo Raio Hidraulico ou Perímetro Molhado é obrigatório.", "Atenção", JOptionPane.WARNING_MESSAGE);
    }else{
        //Preenche o objeto vazao com os dados digitados
        vazao.setAreaMolhada(jtAreaMolhada.getText());
        vazao.setCoefManning(jtCoefManning.getText());
        vazao.setDeclividade(jtDeclividade.getText());
        vazao.setDiametroSecao(jtDiametroSecao.getText());
    }
}

```



```

vazao.setPerMolhado(jtPerMolhado.getText());
vazao.setRaioHidraulico(jtRaioHidraulico.getText());
vazao.setViscosidade(jtViscosidade.getText());
vazao.setProfundidade(jtProfundidade.getText());

//formata para 3 casas apos a vígula
DecimalFormat df = new DecimalFormat("0.000");

double Q = Calculos.vazaoQ(vazao);
double V = Calculos.velocidadeMedia(Q, vazao);
double Rh=0.0;

//Definindo afonte dos labels de saída
Font font = new Font("arial", Font.BOLD, 14);
j1VazaoQDesc.setFont(font);
j1VazaoQResult.setFont(font);
j1VelocidadeDesc.setFont(font);
j1VelocidadeResult.setFont(font);

j1VazaoQDesc.setText("Vazão do Escoamento");
j1VazaoQResult.setText(String.valueOf(df.format(Q))+
(m3/s)");

j1VelocidadeDesc.setText("Velocidade Média");
j1VelocidadeResult.setText(String.valueOf(df.format(V))+
(m/s)");

if(!(vazao.getAreaMolhada().equals("") &&
vazao.getPerMolhado().equals("")) && vazao.getRaioHidraulico().equals("")){
    if(!vazao.getAreaMolhada().equals("")){
        Rh = Calculos.raioHidraulico(vazao);
        j1RaioHidraulicoDesc.setText("Raio Hidráulico");

j1RaioHidraulicoResult.setText(String.valueOf(df.format(Rh))+ " (m)");
    }
}else{
    j1RaioHidraulicoDesc.setText(" ");
    j1RaioHidraulicoResult.setText(" ");
}
if(!vazao.getViscosidade().equals("")){
    double Rey = Calculos.rey(vazao,V);
    j1NumeroReyDesc.setText("Número de Reynolds");

j1NumeroReyResult.setText(String.valueOf(df.format(Rey)));

    if(Rey<500)j1EscoamentoReyDesc.setText("Escoamento
Laminar");

    if(Rey>2000)j1EscoamentoReyDesc.setText("Escoamento
Turbulento");

    if(Rey>500 &&
Rey<2000)j1EscoamentoReyDesc.setText("Escoamento de Transição");

}else{
    j1NumeroReyDesc.setText(" ");
    j1NumeroReyResult.setText(" ");
    j1EscoamentoReyDesc.setText(" ");
}
if(!vazao.getProfundidade().equals("")){
    double Fr = Calculos.fr(vazao,V);

```

```

        jlNumeroFroudDesc.setText("Número de Froude");

        jlNumeroFroudResult.setText(String.valueOf(df.format(Fr)));

        if(Fr<1){
            jlEscoamentoFroudDesc.setText("Escoamento
Fluvial");
            jlescoamentoFroudResult.setText("(Subcrítico)");
            jlescoamentoReyrresult.setText(" ");
        }
        if(Fr>1){
            jlEscoamentoFroudDesc.setText("Escoamento
Torrencial");
            jlescoamentoReyrresult.setText(" ");
            jlescoamentoFroudResult.setText("(Supercrítico)");
        }

        if(Fr==1){
            jlEscoamentoFroudDesc.setText("Escoamento
Crítico");
            jlescoamentoReyrresult.setText(" ");
            jlescoamentoFroudResult.setText(" ");
        }

        jlVelocidadeDesejavelDesc.setText("Velocidade
Desejável");

        jlVelocidadeDesejavelResult.setText(String.valueOf(df.format(Calculos.
vd(vazao)))+ " m/s");
    }else{
        jlNumeroFroudDesc.setText(" ");
        jlNumeroFroudResult.setText(" ");
        jlEscoamentoFroudDesc.setText(" ");
        jlescoamentoFroudResult.setText(" ");
        jlescoamentoReyrresult.setText(" ");
        jlVelocidadeDesejavelDesc.setText(" ");
        jlVelocidadeDesejavelResult.setText(" ");
    }
    jbImprimir.setEnabled(true);
}

}catch (NumberFormatException ex) {
    ex.printStackTrace();
    JOptionPane.showMessageDialog(null, "Todos os campos devem
conter somente números.", "Atenção", JOptionPane.WARNING_MESSAGE);
}
}

private void btnPerdaCarga(){
    preencherMapa("fatorAtrito");
    container.removeAll();
    container.repaint();

    Object[] options = { "Circular", "Retangular" };
    int i = JOptionPane.showOptionDialog(null, "Defina a seção.",
"Seção?", JOptionPane.DEFAULT_OPTION, JOptionPane.WARNING_MESSAGE, null,
options, options[0]);

    Calculadora calculadora = new Calculadora();

```

```

calculadora.setFatorAtrito(jlFatorAtritoResult.getText());
calculadora.setVelocidade(jtVelocidade.getText());
calculadora.setRaioHidraulico(jtRaioHidraulico.getText());
calculadora.setDiametroSecao(jtDiametroSecao.getText());

    if(i==1){
        montaContainerPerdaCarga("Retangular",calculadora);
    }else{
        montaContainerPerdaCarga("Circular",calculadora);
    }
    jpPainel1.setVisible(true);
    jpPainel2.setVisible(true);
    jpPainel3.setVisible(true);
}

private void btnCalcularPerdaCarga() {
    Calculadora objeto = new Calculadora();

    try{
        if(!jtFatorAtrito.getText().equals("")){

            jtFatorAtrito.setText(jtFatorAtrito.getText().replace(',','.'));
            //tenta converter para double, se nao for numero lanca
            NumberFormatException
            Double.parseDouble(jtFatorAtrito.getText());
        }
        if (!jtDiametroSecao.getText().equals("")){

            jtDiametroSecao.setText(jtDiametroSecao.getText().replace(',','.'));
            Double.parseDouble(jtDiametroSecao.getText());
        }
        if (!jtRaioHidraulico.getText().equals("")){

            jtRaioHidraulico.setText(jtRaioHidraulico.getText().replace(',','.'));
            Double.parseDouble(jtRaioHidraulico.getText());
        }
        if (!jtVelocidade.getText().equals("")){
            jtVelocidade.setText(jtVelocidade.getText().replace(',','.'));
            Double.parseDouble(jtVelocidade.getText());
        }

        if(jtFatorAtrito.getText().equals("")){
            JOptionPane.showMessageDialog(null, "O campo Fator de
Atrito é obrigatório.", "Atenção", JOptionPane.WARNING_MESSAGE);
        }else if(jlTituloDoCalculoPC.getText().equals("Perda de Carga
- Seção Retangular") && jtRaioHidraulico.getText().equals("")){
            JOptionPane.showMessageDialog(null, "O campo Raio
Hidráulico é obrigatório.", "Atenção", JOptionPane.WARNING_MESSAGE);
        }else if (jlTituloDoCalculoPC.getText().equals("Perda de
Carga - Seção Circular") && jtDiametroSecao.getText().equals("")){
            JOptionPane.showMessageDialog(null, "O campo Diametro da
Seção é obrigatório.", "Atenção", JOptionPane.WARNING_MESSAGE);
        }else if (jtVelocidade.getText().equals("")){
            JOptionPane.showMessageDialog(null, "O campo Velocidade
média é obrigatório.", "Atenção", JOptionPane.WARNING_MESSAGE);
        }else{

            //Preenche o objeto vazao com os dados digitados
            objeto.setFatorAtrito(jtFatorAtrito.getText());

```

```

objeto.setDiametroSecao(jtDiametroSecao.getText());
objeto.setRaioHidraulico(jtRaioHidraulico.getText());
objeto.setVelocidade(jtVelocidade.getText());

//formata para 3 casas apos a vígula
DecimalFormat df = new DecimalFormat("0.000");

double j = Calculos.perdaCarga(objeto);

//Definindo afonte dos labels de saída
Font font = new Font("arial", Font.BOLD, 14);
jlPerdaCargaDesc.setFont(font);
jlPerdaCargaResult.setFont(font);

jlPerdaCargaDesc.setText(" Perda de Carga ");
jlPerdaCargaResult.setText(String.valueOf(df.format(j)));
}

} catch (NumberFormatException ex) {
    ex.printStackTrace();
    JOptionPane.showMessageDialog(null, "Todos os campos devem
conter somente números.", "Atenção", JOptionPane.WARNING_MESSAGE);
}
    jbImprimir.setEnabled(true);
}

private void btnLimpar(String calculo){

    if(calculo.equals("vazao")){
        jtAreaMolhada.setText("");
        jtCoefManning.setText("");
        jtDeclividade.setText("");
        jtDiametroSecao.setText("");
        jtPerMolhado.setText("");
        jtProfundidade.setText("");
        jtRaioHidraulico.setText("");
        jtViscosidade.setText("");
        jlRaioHidraulicoDesc.setText(" ");
        jlRaioHidraulicoResult.setText(" ");
        jlVazaoQDesc.setText(" ");
        jlVazaoQResult.setText(" ");
        jlVelocidadeDesc.setText(" ");
        jlVelocidadeResult.setText(" ");
        jlNumeroReyDesc.setText(" ");
        jlNumeroReyResult.setText(" ");
        jlEscoamentoReyDesc.setText(" ");
        jlEscoamentoReyrresult.setText(" ");
        jlNumeroFroudDesc.setText(" ");
        jlNumeroFroudResult.setText(" ");
        jlEscoamentoFroudDesc.setText(" ");
        jlEscoamentoFroudrResult.setText(" ");
        jlVelocidadeDesejavelDesc.setText(" ");
        jlVelocidadeDesejavelResult.setText(" ");
    }

    if(calculo.equals("fatorAtrito")){
        jtCoefManning.setText("");
        jtDiametroSecao.setText("");
        jtRaioHidraulico.setText("");
        jtReynolds.setText("");
        jlFatorAtritoDesc.setText(" ");
    }
}

```

```

        jlFatorAtritoResult.setText(" ");
    }
    if(calculo.equals("perdaCarga")){
        jtDiametroSecao.setText("");
        jtRaioHidraulico.setText("");
        jtFatorAtrito.setText("");
        jtVelocidade.setText("");
        jlPerdaCargaDesc.setText(" ");
        jlPerdaCargaResult.setText(" ");
    }
    jbImprimir.setEnabled(false);
}

private void btnCalcularFatorAtrito(){
    Calculadora objeto = new Calculadora();

    try{
        if(!jtCoefManning.getText().equals("")){

            jtCoefManning.setText(jtCoefManning.getText().replace(',','.'));
            //tenta converter para double, se nao for numero lanca
            NumberFormatException
            Double.parseDouble(jtCoefManning.getText());
        }
        if (!jtDiametroSecao.getText().equals("")){

            jtDiametroSecao.setText(jtDiametroSecao.getText().replace(',','.'));
            Double.parseDouble(jtDiametroSecao.getText());
        }
        if (!jtRaioHidraulico.getText().equals("")){

            jtRaioHidraulico.setText(jtRaioHidraulico.getText().replace(',','.'));
            Double.parseDouble(jtRaioHidraulico.getText());
        }
        if (!jtReynolds.getText().equals("")){
            jtReynolds.setText(jtReynolds.getText().replace(',','.'));
            Double.parseDouble(jtReynolds.getText());
        }
        if(jtCoefManning.getText().equals("")){
            JOptionPane.showMessageDialog(null, "O campo Coeficiente de Manning é obrigatório.", "Atenção", JOptionPane.WARNING_MESSAGE);
        }else if(jtRaioHidraulico.getText().equals("")) &&
        jlTituloDoCalculoFatorAtrito.getText().equals("Fator de Atrito - Seção Retangular")){
            JOptionPane.showMessageDialog(null, "O campo Raio Hidráulico é obrigatório.", "Atenção", JOptionPane.WARNING_MESSAGE);
        }else if (jtDiametroSecao.getText().equals("")) &&
        jlTituloDoCalculoFatorAtrito.getText().equals("Fator de Atrito - Seção Circular")){
            JOptionPane.showMessageDialog(null, "O campo Diametro da Seção é obrigatório.", "Atenção", JOptionPane.WARNING_MESSAGE);
        }else if (jtReynolds.getText().equals("")){
            JOptionPane.showMessageDialog(null, "O campo Número de Reynolds é obrigatório.", "Atenção", JOptionPane.WARNING_MESSAGE);
        }else{

```

```

//Preenche o objeto vazao com os dados digitados
objeto.setCoefManning(jtCoefManning.getText());
objeto.setDiametroSecao(jtDiametroSecao.getText());
objeto.setRaioHidraulico(jtRaioHidraulico.getText());
objeto.setReynolds(jtReynolds.getText());

//formata para 3 casas apos a vígula
DecimalFormat df = new DecimalFormat("0.000");

double f = Calculos.fatorAtrito(objeto);

//Definindo afonte dos labels de saída
Font font = new Font("arial", Font.BOLD, 14);
jlFatorAtritoDesc.setFont(font);
jlFatorAtritoResult.setFont(font);

jlFatorAtritoDesc.setText(" Fator de Atrito ");
jlFatorAtritoResult.setText(String.valueOf(df.format(f))+
m/m");

jbImprimir.setEnabled(true);
}

} catch (NumberFormatException ex) {
ex.printStackTrace();
JOptionPane.showMessageDialog(null, "Todos os campos devem
conter somente números.", "Atenção", JOptionPane.WARNING_MESSAGE);
}
}

/**
 * Metodo que monta a tela do calculo da vazão, valida os campos e
exibe os resultados
 */
private void montaContainerVazao(String secao) {
// Criando os paineis
jpPainel1 = new JPanel();
jpPainel2 = new JPanel();
jpPainel3 = new JPanel();

//Definindo o layout do painel onde ficarão os campos de entrada
grid1 = new GridLayout(10,2,5,5);
jpPainel1.setLayout(grid1);
grid1 = new GridLayout(9,2,5,5);
jpPainel2.setLayout(grid1);

GridBagConstraints cons = new GridBagConstraints();
GridBagLayout layout = new GridBagLayout();

//Definindo o Titulo da tela
jlTituloDoCalculo = new JLabel("Vazão - Seção "+secao);

//Definindo os labels e os texts da tela
jlCoefManning = new JLabel(" Coeficinete de Manning");
jtCoefManning = new JTextField(10);
jtCoefManning.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

jlAreaMolhada = new JLabel(" Área Molhada (m²)");
jtAreaMolhada = new JTextField(10);
jtAreaMolhada.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

jlRaioHidraulico = new JLabel(" Raio Hidraulico (m)");

```

```

jtRaioHidraulico = new JTextField(10);
jtRaioHidraulico.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

jlDeclividade = new JLabel(" Declividade (m/m)");
jtDeclividade = new JTextField(10);
jtDeclividade.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

jlPerMolhado = new JLabel(" Perímetro Molhado (m)");
jtPerMolhado = new JTextField(10);
jtPerMolhado.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

jlDiametroSecao = new JLabel(" Diâmetro da Seção (m)");
jtDiametroSecao = new JTextField(10);
jtDiametroSecao.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

jlViscosidade = new JLabel(" Viscosidade Cinemática (m²/s)");
jtViscosidade = new JTextField(10);
jtViscosidade.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

jlProfundidade = new JLabel(" Profundidade do Canal (m)");
jtProfundidade = new JTextField(10);
jtProfundidade.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

jbCalcular = new JButton("Calcular");
jbCalcular.setMnemonic('C');

jbLimpar = new JButton("Limpar");
jbLimpar.setMnemonic('L');

jbImprimir = new JButton("Imprimir");
jbImprimir.setMnemonic('I');
jbImprimir.setEnabled(false);

//Tratando o evento do botão imprimir
jbImprimir.addActionListener(
    new ActionListener(){
        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            btnImprimir("vazao");
        }
    });

jbFatorAtrito = new JButton("Fator de Atrito");
jbFatorAtrito.setMnemonic('F');

//Tratando o evento do botão Fator de Atrito
jbFatorAtrito.addActionListener(
    new ActionListener(){
        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            btnFatorAtrito();
        }
    });

//Tratando o evento do botão limpar
jbLimpar.addActionListener(
    new ActionListener(){
        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            btnLimpar("vazao");
        }
    }
);

```

```

//Tratando o evento do botão calcular
jbCalcular.addActionListener(
    new ActionListener(){
        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            btnCalcularVazao();
        }
    }
);

//Adicionando o titulo ao painel 3
jpPainel3.add(jlTituloDoCalculo);

//adicionando os campos de entrada ao painel 1
jpPainel1.add(jlCoefManning);
jpPainel1.add(jtCoefManning);

jpPainel1.add(jlAreaMolhada);
jpPainel1.add(jtAreaMolhada);

jpPainel1.add(jlRaioHidraulico);
jpPainel1.add(jtRaioHidraulico);

jpPainel1.add(jlDeclividade);
jpPainel1.add(jtDeclividade);

jpPainel1.add(jlPerMolhado);
jpPainel1.add(jtPerMolhado);

jpPainel1.add(jlDiametroSecao);
jpPainel1.add(jtDiametroSecao);

jpPainel1.add(jlViscosidade);
jpPainel1.add(jtViscosidade);

jpPainel1.add(jlProfundidade);
jpPainel1.add(jtProfundidade);

jpPainel1.add(jbLimpar);
jpPainel1.add(jbCalcular);
jpPainel1.add(jbImprimir);
jpPainel1.add(jbFatorAtrito);

//Labels de saida
jlVazaoQDesc = new JLabel(" ");
jlVazaoQResult = new JLabel(" ");
jlVelocidadeDesc = new JLabel(" ");
jlVelocidadeResult = new JLabel(" ");
jlRaioHidraulicoDesc = new JLabel(" ");
jlRaioHidraulicoResult = new JLabel(" ");
jlNumeroReyDesc = new JLabel(" ");
jlNumeroReyResult = new JLabel(" ");
jlEscoamentoReyDesc = new JLabel(" ");
jlescoamentoReyrresult = new JLabel(" ");
jlNumeroFroudDesc = new JLabel(" ");
jlNumeroFroudResult = new JLabel(" ");
jlescoamentoFroudDesc = new JLabel(" ");
jlescoamentoFroudrResult = new JLabel(" ");
jlVelocidadeDesejavelDesc = new JLabel(" ");
jlVelocidadeDesejavelResult = new JLabel(" ");

//inserindo os labels no painel

```



```

        jpPainel2.add(jlVazaoQDesc);
        jpPainel2.add(jlVazaoQResult);
        jpPainel2.add(jlVelocidadeDesc);
        jpPainel2.add(jlVelocidadeResult);
        jpPainel2.add(jlRaioHidraulicoDesc);
        jpPainel2.add(jlRaioHidraulicoResult);
        jpPainel2.add(jlNumeroReyDesc);
        jpPainel2.add(jlNumeroReyResult);
        jpPainel2.add(jlEscoamentoReyDesc);
        jpPainel2.add(jlescoamentoReyrresult);
        jpPainel2.add(jlNumeroFroudDesc);
        jpPainel2.add(jlNumeroFroudResult);
        jpPainel2.add(jlEscoamentoFroudDesc);
        jpPainel2.add(jlescoamentoFroudrResult);
        jpPainel2.add(jlVelocidadeDesejavelDesc);
        jpPainel2.add(jlVelocidadeDesejavelResult);

        //Organizando a posição dos paineis
        container.setLayout(layout);
        cons.insets = new Insets(10,10,10,10);
        cons.gridy = 0;
        container.add(jpPainel3,cons);
    cons.gridy = 1;
        container.add(jpPainel1,cons);
        cons.gridy = 2;
        container.add(jpPainel2,cons);

        jpPainel1.setVisible(false);
        jpPainel2.setVisible(false);
        jpPainel3.setVisible(false);
    }
    /**
     * Metodo que monta a tela do calculo da Fator de Atrito, valida os
     campos e exhibe os resultados
     */
    private void montaContainerFatorAtrito(String secao, Calculadora
calculadora) {
        // Criando os paineis
        jpPainel1 = new JPanel();
        jpPainel2 = new JPanel();
        jpPainel3 = new JPanel();

        //Definindo o layout do painel onde ficarão os campos de entrada
        grid1 = new GridLayout(5,2,5,5);
        jpPainel1.setLayout(grid1);
        grid1 = new GridLayout(1,2,5,5);
        jpPainel2.setLayout(grid1);

        GridBagConstraints cons = new GridBagConstraints();
        GridBagLayout layout = new GridBagLayout();

        //Definindo o Titulo da tela
        jlTituloDoCalculoFatorAtrito = new JLabel("Fator de Atrito - Seção
"+secao);

        //Definindo os labels e os texts da tela
        jlCoefManning = new JLabel("Coeficinete de Manning");
        jtCoefManning = new JTextField(10);
        jtCoefManning.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

        jlRaioHidraulico = new JLabel("Raio Hidraulico (m)");

```

```

jtRaioHidraulico = new JTextField(10);
jtRaioHidraulico.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

jlDiametroSecao = new JLabel("Diâmetro da Seção (m)");
jtDiametroSecao = new JTextField(10);
jtDiametroSecao.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

jlReynolds = new JLabel("Número de Reynolds");
jtReynolds = new JTextField(10);
jtReynolds.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

jbCalcular2 = new JButton("Calcular");
jbCalcular2.setMnemonic('C');

jtVelocidade = new JTextField();

//adiciona os valores da tela anterior
if(calculadora != null){
    jtCoefManning.setText(calculadora.getCoefManning());
    jtRaioHidraulico.setText(calculadora.getRaioHidraulico());
    jtDiametroSecao.setText(calculadora.getDiametroSecao());
    jtReynolds.setText(calculadora.getReynolds());
    jtVelocidade.setText(calculadora.getVelocidade());
}

//Tratando o evento do botão caucular
jbCalcular2.addActionListener(
    new ActionListener(){
        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            btnCalcularFatorAtrito();
        }
    }
);

jbLimpar = new JButton("Limpar");
jbLimpar.setMnemonic('L');

//Tratando o evento do botão limpar
jbLimpar.addActionListener(
    new ActionListener(){
        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            btnLimpar("fatorAtrito");
        }
    }
);

jbImprimir = new JButton("Imprimir");
jbImprimir.setMnemonic('I');
jbImprimir.setEnabled(false);

//Tratando o evento do botão Imprimir
jbImprimir.addActionListener(
    new ActionListener(){
        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            btnImprimir("fatorAtrito");
        }
    }
);

```

```

jbPerdaCarga = new JButton("Perda de Carga");
jbPerdaCarga.setMnemonic('P');

// Trata o evento do botão Perda de Carga
jbPerdaCarga.addActionListener(
    new ActionListener(){
        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            btnPerdaCarga();
        }
    }
);

//Adicionando o titulo ao painel 3
jpPainel3.add(jlTituloDoCalculoFatorAtrito);

//adicionando os campos de entrada ao painel 1
jpPainel1.add(jlCoefManning);
jpPainel1.add(jtCoefManning);

if(secao.equals("Circular")){
    jpPainel1.add(jlDiametroSecao);
    jpPainel1.add(jtDiametroSecao);
}else{
    jpPainel1.add(jlRaioHidraulico);
    jpPainel1.add(jtRaioHidraulico);
}

jpPainel1.add(jlReynolds);
jpPainel1.add(jtReynolds);

jpPainel1.add(jbLimpar);
jpPainel1.add(jbCalcular2);
jpPainel1.add(jbImprimir);
jpPainel1.add(jbPerdaCarga);

//Labels de saida
jlFatorAtritoDesc = new JLabel(" ");
jlFatorAtritoResult = new JLabel(" ");

//inserindo os labels no painel
jpPainel2.add(jlFatorAtritoDesc);
jpPainel2.add(jlFatorAtritoResult);

//Organizando a posição dos paineis
container.setLayout(layout);
cons.insets = new Insets(10,10,10,10);
cons.gridy = 0;
container.add(jpPainel3, cons);
cons.gridy = 1;
container.add(jpPainel1, cons);
cons.gridy = 2;
container.add(jpPainel2, cons);

jpPainel1.setVisible(false);
jpPainel2.setVisible(false);
jpPainel3.setVisible(false);
}
/**

```

```

    * Metodo que monta a tela do calculo da Fator de Atrito, valida os
    campos e exibe os resultados
    */
    private void montaContainerPerdaCarga(String secas, Calculadora
calculadora) {
        // Criando os paineis
        jpPainel1 = new JPanel();
        jpPainel2 = new JPanel();
        jpPainel3 = new JPanel();

        //Definindo o layout do painel onde ficarão os campos de entrada
        grid1 = new GridLayout(5,2,5,5);
        jpPainel1.setLayout(grid1);
        grid1 = new GridLayout(1,2,5,5);
        jpPainel2.setLayout(grid1);

        GridBagConstraints cons = new GridBagConstraints();
        GridBagLayout layout = new GridBagLayout();

        //Definindo o Titulo da tela
        jlTituloDoCalculoPC = new JLabel("Perda de Carga - Seção "+secas);

        //Definindo os labels e os texts da tela
        jlFatorAtrito = new JLabel("Fator de Atrito (m/m)");
        jtFatorAtrito = new JTextField(10);
        jtFatorAtrito.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

        jlRaioHidraulico = new JLabel("Raio Hidraulico (m)");
        jtRaioHidraulico = new JTextField(10);
        jtRaioHidraulico.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

        jlDiametroSecao = new JLabel("Diâmetro da Seção (m)");
        jtDiametroSecao = new JTextField(10);
        jtDiametroSecao.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

        jlVelocidade = new JLabel("Velocidade Média (m/s)");
        jtVelocidade = new JTextField(10);
        jtVelocidade.setDocument(new FixedLengthDocument(15));

        jbCalcular3 = new JButton("Calcular");
        jbCalcular3.setMnemonic('C');

        //adiciona os valores da tela anterior
        jtRaioHidraulico.setText(calculadora.getRaioHidraulico());
        jtDiametroSecao.setText(calculadora.getDiametroSecao());

        if(!calculadora.getFatorAtrito().equals(" ") &&
!calculadora.getFatorAtrito().equals(""))

            jtFatorAtrito.setText(calculadora.getFatorAtrito().substring(0,calcula
dora.getFatorAtrito().length()-4));
            if(!calculadora.getVelocidade().equals(" ")&&
!calculadora.getVelocidade().equals(""))

                jtVelocidade.setText(calculadora.getVelocidade().substring(0,calculado
ra.getVelocidade().length()-7));

        //Tratando o evento do botão caucular
        jbCalcular3.addActionListener(
            new ActionListener(){

```

```

        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            btnCalcularPerdaCarga();
        }
    }
};

jbLimpar = new JButton("Limpar");
jbLimpar.setMnemonic('L');

//Tratando o evento do botão limpar
jbLimpar.addActionListener(
    new ActionListener(){
        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            btnLimpar("perdaCarga");
        }
    }
);

jbImprimir = new JButton("Imprimir");
jbImprimir.setMnemonic('I');

jbImprimir.setEnabled(false);

//Tratando o evento do botão Imprimir
jbImprimir.addActionListener(
    new ActionListener(){
        public void actionPerformed(ActionEvent evento){
            btnImprimir("perdaCarga");
        }
    }
);

//Adicionando o titulo ao painel 3
jpPainel3.add(jlTituloDoCalculoPC);

//adicionando os campos de entrada ao painel 1
jpPainel1.add(jlFatorAtrito);
jpPainel1.add(jtFatorAtrito);

if(secao.equals("Circular")){
    jpPainel1.add(jlDiametroSecao);
    jpPainel1.add(jtDiametroSecao);
}else{
    jpPainel1.add(jlRaioHidraulico);
    jpPainel1.add(jtRaioHidraulico);
}

jpPainel1.add(jlVelocidade);
jpPainel1.add(jtVelocidade);

jpPainel1.add(jbLimpar);
jpPainel1.add(jbCalcular3);
jpPainel1.add(jbImprimir);

//Labels de saida
jlPerdaCargaDesc = new JLabel(" ");
jlPerdaCargaResult = new JLabel(" ");

//inserindo os labels no painel
jpPainel2.add(jlPerdaCargaDesc);
jpPainel2.add(jlPerdaCargaResult);

```

```

        //Organizando a posição dos paineis
        container.setLayout(layout);
        cons.insets = new Insets(10,10,10,10);
        cons.gridy = 0;
        container.add(jpPainel3, cons);
        cons.gridy = 1;
        container.add(jpPainel1, cons);
        cons.gridy = 2;
        container.add(jpPainel2, cons);

        jpPainel1.setVisible(false);
        jpPainel2.setVisible(false);
        jpPainel3.setVisible(false);
    }
}

```

```

package engenharia.calculadora.negocio;

import java.util.HashMap;

public class Calculadora {

    private String coefManning="";
    private String areaMolhada="";
    private String raioHidraulico="";
    private String declividade="";
    private String perMolhado="";
    private String diametroSecao="";
    private String viscosidade="";
    private String profundidade="";
    private String reynolds="";
    private String fatorAtrito="";
    private String perdaCarga="";
    private String velocidade="";

    public static final String G = "9.8";

    public String getFatorAtrito() {
        return fatorAtrito;
    }
    public void setFatorAtrito(String fatorAtrito) {
        this.fatorAtrito = fatorAtrito;
    }
    public String getPerdaCarga() {
        return perdaCarga;
    }
    public void setPerdaCarga(String perdaCarga) {
        this.perdaCarga = perdaCarga;
    }
    public String getReynolds() {
        return reynolds;
    }
    public void setReynolds(String reynolds) {
        this.reynolds = reynolds;
    }
}

```

```

    }
    public String getAreaMolhada() {
        return areaMolhada;
    }
    public void setAreaMolhada(String areaMolhada) {
        this.areaMolhada = areaMolhada;
    }
    public String getCoefManning() {
        return coefManning;
    }
    public void setCoefManning(String coefManning) {
        this.coefManning = coefManning;
    }
    public String getDeclividade() {
        return declividade;
    }
    public void setDeclividade(String declividade) {
        this.declividade = declividade;
    }
    public String getDiametroSecao() {
        return diametroSecao;
    }
    public void setDiametroSecao(String diametroSecao) {
        this.diametroSecao = diametroSecao;
    }
    public String getPerMolhado() {
        return perMolhado;
    }
    public void setPerMolhado(String perMolhado) {
        this.perMolhado = perMolhado;
    }
    public String getProfundidade() {
        return profundidade;
    }
    public void setProfundidade(String profundidade) {
        this.profundidade = profundidade;
    }
    public String getRaioHidraulico() {
        return raioHidraulico;
    }
    public void setRaioHidraulico(String raioHidraulico) {
        this.raioHidraulico = raioHidraulico;
    }
    public String getViscosidade() {
        return viscosidade;
    }
    public void setViscosidade(String viscosidade) {
        this.viscosidade = viscosidade;
    }
    public String getVelocidade() {
        return velocidade;
    }
    public void setVelocidade(String velocidade) {
        this.velocidade = velocidade;
    }
}
}

```

```
package engenharia.calculadora.negocio;
```

```
public class Calculos {  
    /**  
     * Método responsável pelo cálculo da vazão  
     * @param objeto vazao carregado  
     * @return resultado do cálculo da vazão  
     */  
    public static double vazaoQ(Calculadora vazao) {  
        double n = Double.parseDouble(vazao.getCoefManning());  
        double i = Double.parseDouble(vazao.getDeclividade());  
        double q = 0;  
  
        if(vazao.getAreaMolhada().equals("")){  
            double d = Double.parseDouble(vazao.getDiametroSecao());  
            q = 1/n * 0.312 * Math.pow(d, 8.0/3.0)*Math.pow(i, 0.5);  
        } else{  
            double a = Double.parseDouble(vazao.getAreaMolhada());  
  
            if(vazao.getRaioHidraulico().equals("")){  
                double p = Double.parseDouble(vazao.getPerMolhado());  
                q = 1/n * a * Math.pow(a/p, 2.0/3.0) * Math.pow(i,0.5);  
            } else{  
                double rh =  
Double.parseDouble(vazao.getRaioHidraulico());  
                q = 1/n * a * Math.pow(rh, 2.0/3.0) * Math.pow(i, 0.5);  
            }  
        }  
        return q;  
    }  
    /**  
     * Método responsável pelo cálculo da velocidade média  
     * @param resultado do cálculo da vazão  
     * @param objeto vazao carregado  
     * @return resultado do cálculo da velocidade média  
     */  
    public static double velocidadeMedia(double q, Calculadora vazao) {  
        double v=0;  
        double n = Double.parseDouble(vazao.getCoefManning());  
        double i = Double.parseDouble(vazao.getDeclividade());  
  
        if(vazao.getAreaMolhada().equals("")){  
            double d = Double.parseDouble(vazao.getDiametroSecao());  
            v= 1/n * 0.397 * Math.pow(d, 2.0/3.0) * Math.pow(i, 0.5);  
        }else{  
            double a = Double.parseDouble(vazao.getAreaMolhada());  
            v = q/a;  
        }  
        return v;  
    }  
    /**  
     * Método responsável pelo calculo do raio Hidráulico  
     * @param objeto Calculadora preenchido  
     * @return resultado do cálculo do Raio Hidráulico  
     */  
    public static double raioHidraulico(Calculadora vazao) {
```



```

        return
Double.parseDouble(vazao.getAreaMolhada())/Double.parseDouble(vazao.getPerM
olhado());
    }
    /**
     * Método responsável pelo cálculo do número de Reynolds
     * @param objeto Calculadora preenchido
     * @param resultado do cálculo da velocidade média
     * @return número de Reynolds
     */
    public static double rey(Calculadora vazao, double v) {
        double ry=0;
        double rh=0;

        if(vazao.getAreaMolhada().equals("")){
            rh = Double.parseDouble(vazao.getDiametroSecao())/4;
            ry = (v*rh)/Double.parseDouble(vazao.getViscosidade());
        }else if(vazao.getRaioHidraulico().equals("")){
            ry =
v*raioHidraulico(vazao)/Double.parseDouble(vazao.getViscosidade());
        }else{
            ry =
v*Double.parseDouble(vazao.getRaioHidraulico())/Double.parseDouble(vazao.ge
tViscosidade());
        }

        return ry;
    }
    /**
     * Método responsável pelo cálculo do número de Froude
     * @param objeto Calculadora preenchido
     * @param resultado do cálculo da velocidade média
     * @return número de Froude
     */
    public static double fr(Calculadora vazao, double v) {
        double g = Double.parseDouble(Calculadora.G);
        double y = Double.parseDouble(vazao.getProfundidade());
        return v/Math.pow(g*y,0.5);
    }
    /**
     * Método responsável pelo cálculo da Velocidade Desejável
     * @param objeto Calculadora preenchido
     * @return Velocidade Desejável
     */
    public static double vd(Calculadora vazao) {
        return
0.55*Math.pow(Double.parseDouble(vazao.getProfundidade()),0.64);
    }
    /**
     * Método responsável pelo cálculo do Fator de Atrito
     * @param objeto Calculadora preenchido
     * @return Fator de Atrito
     */
    public static double fatorAtrito(Calculadora objeto) {
        double F = 0.0;
        double Rey = Double.parseDouble(objeto.getReynolds());
        double N = Double.parseDouble(objeto.getCoefManning());

        if(objeto.getDiametroSecao().equals("")){
            double Rh = Double.parseDouble(objeto.getRaioHidraulico());

```

```

        F = Math.pow(Math.pow(64.0/Rey,8.0)+9.5 *
Math.pow(Math.log(N/(3.7*(4.0*Rh))+5.74/(Rey*0.9)) -
Math.pow(2500.0/Rey,6.0),-16.0),0.125);
    }
    else{
        double D = Double.parseDouble(objeto.getDiametroSecao());
        F = Math.pow(Math.pow(64.0/Rey,8.0)+9.5 *
Math.pow(Math.log(N/(3.7*D)+5.74/(Rey*0.9)) -Math.pow(2500.0/Rey,6.0),-
16.0),0.125);
    }
    return F;
}
/**
 * Método responsável pelo cálculo da Perda de Carga
 * @param objeto Calculadora preenchido
 * @return Perda de Carga
 */
public static double perdaCarga(Calculadora objeto) {

    double F = Double.parseDouble(objeto.getFatorAtrito());
    double V = Double.parseDouble(objeto.getVelocidade());
    double G = Double.parseDouble(Calculadora.G);
    double J = 0.0;

    if(objeto.getDiametroSecao().equals("")){
        double Rh = Double.parseDouble(objeto.getRaioHidraulico());
        J = (F/(4.0*Rh))* (Math.pow(V,2.0)/(2.0*G));
    }else{
        double D = Double.parseDouble(objeto.getDiametroSecao());
        J = (F*Math.pow(V,2.0))/(D*(2.0*G));
    }

    return J;
}
}

```

```

package engenharia.calculadora.visao;

import javax.swing.text.AttributeSet;
import javax.swing.text.BadLocationException;
import javax.swing.text.PlainDocument;

public class FixedLengthDocument extends PlainDocument
{
    private int iMaxLength;

    public FixedLengthDocument(int maxlen) {
        super();
        iMaxLength = maxlen;
    }

    public void insertString(int offset, String str, AttributeSet
attr)throws BadLocationException {
        if (str == null) return;

```

```
    if (iMaxLength <= 0)           // aceitara qualquer no. de caracteres
    {
        super.insertString(offset, str, attr);
        return;
    }

    int ilen = (getLength() + str.length());
    if (ilen <= iMaxLength)        // se o comprimento final for menor...
        super.insertString(offset, str, attr);    // ...aceita str
    }
}
```