

**ANÁLISE DE PARÂMETROS QUE AFETAM AS
RESPOSTAS DAS PRESSÕES EM ESCOAMENTOS
TRANSIENTES**

WILBER HUMBERTO VÉLEZ GÓMEZ

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DE PARÂMETROS QUE AFETAM AS
RESPOSTAS DAS PRESSÕES EM ESCOAMENTOS
TRANSIENTES**

WILBER HUMBERTO VÉLEZ GÓMEZ

ORIENTADOR: LINEU JOSÉ PEDROSO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

PUBLICAÇÃO: E.DM-008A/15

BRASÍLIA/DF: ABRIL – 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DE PARÂMETROS QUE AFETAM AS
RESPOSTAS DAS PRESSÕES EM ESCOAMENTOS
TRANSIENTES**

WILBER HUMBERTO VÉLEZ GÓMEZ

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. Lineu José Pedroso, Dr. Ing. (UnB)
(Orientador)

Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Marcus Vinícius Girão de Moraes, Dr. Ing. (UnB)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 27 DE ABRIL DE 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

GÓMEZ, W. H. VÉLEZ

Análise de parâmetros que afetam as respostas das pressões em escoamentos transientes. [Distrito Federal] 2015.

xxi, 132p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2015).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Transiente

2. Duto forçado

3. Método das Características

4. TRANSPETRO-1D

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GÓMEZ, W. H. VÉLEZ; Análise de parâmetros que afetam as respostas das pressões em escoamentos transientes. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.DM-008A/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília – UnB. Brasília, DF, 132p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Wilber Humberto Vélez Gómez

TÍTULO: Análise de parâmetros que afetam as respostas das pressões em escoamentos transientes.

GRAU: Mestre

ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Dedicatória.

*Dedico a Deus meu criador, meus pais
Genny Gómez e Humberto Vélez minhas irmãs
Julieth e Claudia Vélez, meu sobrinho Samuel
Osorio. Muito obrigado pelo amor e carinho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me ajudar neste grande e importante projeto, abrir caminhos e me permitir conhecer pessoas maravilhosas que fez muito melhor esta grande aventura.

Agradeço a minha família, meus pais Genny Gómez e Humberto Vélez, minhas irmãs Julieth e Claudia e meu sobrinho Samuel Osorio. Também a minha avó, tios e primos. A todos, os meus agradecimentos pelo apoio e incentivo nessa jornada.

A capes pelo apoio econômico.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em estruturas e construção civil da Universidade de Brasília (UnB) pelos novos aprendizados e a oportunidade de adquirir novas experiências. Ao meu orientador Lineu José Pedroso pela ajuda, dedicação e motivação.

Agradeço a Carlos Magno, pela colaboração parcial na coordenação desta dissertação, assim como pela possibilidade de poder utilizar e implementar aspectos do programa TRANSPETRO-1D, desenvolvido por ele no PECC, com a orientação do professor Lineu Pedroso, a partir de uma experiência anterior do GDFE em transientes de pressão em centrais nucleares de mais de uma década.

Minha gratidão a toda equipe de funcionários da UnB que contribuem diariamente para que possamos desenvolver nossas pesquisas, sobretudo a Eva Veloso, secretária do programa e grande exemplo de vida. Fico muito grato a aqueles que fizeram este trabalho melhor por seus aportes ajuda e amizade Nazareth, Nailde, Vitória, Ramon, Fabiano, Armeiro, Sara, e outras pessoas que me apoiaram desde antes com sua companhia Jader, Cristina, Fredy, Damaris, Isabel.

Aos irmãos Enilton, Eliana e Victor que me aceitaram na sua casa como parte da família, a Rebeca e sua família por sua companhia e grande ajuda neste processo, a família Gravina e os demais amigos e irmãos das assembleias de Deus de Brasília.

*Temos este tesouro de Deus,
somos vasos de barro que o guardam,
o poder supremo pertence a Ele e não a nós.
Em dificuldades, mas não somos derrotados.
Temos dúvidas, mas não desanimamos.
Somos perseguidos, mas não abandonados.
Às vezes somos feridos, mas não destruídos.*

2 Coríntios 4:7-9

RESUMO

ANÁLISE DE PARÂMETROS QUE AFETAM AS RESPOSTAS DAS PRESSÕES EM ESCOAMENTOS TRANSIENTES

Autor: Wilber Humberto Vélez Gómez

Orientador: Lineu José Pedroso, Dr. Ing.

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, abril de 2015

Nos últimos tempos o Brasil vem desenvolvendo um crescimento significativo em diferentes campos da indústria. Isto tem gerado a necessidade de novas e diferentes obras civis as quais trazem importantes desafios para a engenharia brasileira. Centrais nucleares, oleodutos, gasodutos, adutoras de barragens e outras construções de grande porte são alguns dos projetos que requerem a utilização de sistemas hidráulicos de diferentes tamanhos, materiais e dispositivos que variam de acordo com os requisitos e utilidades.

A análise de escoamentos em regime transiente é um dos principais itens no planejamento de projetos de sistemas de transportes de fluidos (líquido e/ou gás). O aumento das pressões nas tubulações pode gerar risco no funcionamento normal das mesmas, gerando danos parciais ou totais (onde se inclui o colapso do sistema), trazendo graves consequências como: contaminação do ambiente, perdas econômicas ou ainda a perda de vidas humanas (explosão de sistemas com líquido inflamável).

A abordagem consiste em estudar o fenômeno transiente em dutos forçados através da análise das ondas de pressão do fluido utilizando o Método das Características onde a solução se procedeu mediante o método das diferenças finitas. Tais métodos foram desenvolvidos no programa computacional TRANSPETRO-1D (Nascimento, 2002) no qual se fizeram algumas implementações de acordo as investigações realizadas.

Para este trabalho, foram executadas simulações com o intervalo de valores de cada uma das principais propriedades mecânicas e físicas do duto e do fluido, juntamente com as condições de contorno envolvidas no sistema, tais como válvulas, inclinação do duto, chaminé de equilíbrio, entre outras. Os resultados obtidos mostraram boa concordância com as formulações analíticas e dados experimentais encontrados na literatura.

Palavras-chave: Transiente, Duto forçado, Método das Características, TRANSPETRO-1D.

ABSTRACT

ANALYSIS OF PARAMETERS AFFECTING THE ANSWERS PRESSURES IN TRANSIENT FLOWS

Author: Wilber Humberto Vélez

Supervisor: Lineu José Pedroso, Dr. Ing.

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, April of 2015

In recent times, Brazil has experienced significant growth in different industrial fields. This has created the need for new and different civil works presenting important challenges to the Brazilian engineering. Nuclear power plants, pipelines, gas pipelines, hydroelectric power plants and other major buildings are some of the projects that require the use of hydraulic systems of different sizes, materials and devices that vary according to the requirements and utilities.

The flow analysis in transient regime is one of the main items in the planning of fluid transport systems projects (liquid and / or gas). Increased pressure in the pipes can generate risk in the normal functioning, generating partial or total damage (system breakdown). This can result in serious consequences such as economic loss, environmental pollution, or the loss of human lives (explosion systems with flammable liquid).

The present numerical study of transient phenomenon in forced ducts. The study fluid pressure waves by characteristics method. The numerical solution was carried out by the finite difference method. Such methods have been developed in the computer program TRANSPETRO-1D (Nascimento, 2002) according to investigations some implementations were made in this.

The present work, simulations were performed with the range of values of each of the main mechanical and physical properties of the fluid and duct and together with the boundary conditions involved in the system such as valves, tilt duct, surge tank, among others. The results supported the analytical formulations and experimental data in the literature.

Keywords: Transient, Forced duct, Characteristics Method, TRANSPETRO-1D.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	GENERALIDADES	1
1.2	MOTIVAÇÃO	3
1.3	COLOCAÇÃO DO PROBLEMA	4
1.4	OBJETIVOS	5
1.4.1	Objetivo geral	5
1.4.2	Objetivos específicos	5
1.5	ABRANGÊNCIA E LIMITAÇÕES.....	5
1.6	METODOLOGIA.....	6
1.7	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1	REGIMES DE ESCOAMENTOS TRANSIENTES	8
2.2	ESTUDOS HISTÓRICOS FÍSICOS E MATEMÁTICOS	11
2.3	ALGUNS ESTUDOS REPRESENTATIVOS DE TRANSIENTES EM FLUIDO LÍQUIDO	13
2.3.1	Experiência do Grupo de Dinâmica e Fluida-Estrutura (GDFE)	18
2.4	MÉTODOS DE ANÁLISE.....	19
2.4.1	Método aritmético	20
2.4.2	Método gráfico	21
2.4.3	Método das Características.....	21
2.4.4	Método algébrico.....	22
2.4.5	Método da onda plana	23
2.4.6	Método implícito	23
2.4.7	Método linear	24
2.4.8	Método de perturbação	24
2.4.9	Outros métodos.....	25

2.5	EXEMPLOS DE ACIDENTES EXTREMOS GERADOS PELO FENÔMENO TRANSIENTE NO MUNDO	25
2.5.1	Usina hidroelétrica - Oigawa, Japão.....	25
2.5.2	Usina hidrelétrica - Estados Unidos	26
2.5.3	Usina Hidrelétrica – Arequipa, Peru	27
2.5.4	Usina Hidrelétrica – Sayano – Shushenskaya, Rússia.	27
3	FORMULAÇÃO TEÓRICA DE TRANSIENTES DE PRESSÃO E VELOCIDADE EM DUTOS ELÁSTICOS	30
3.1	INTRODUÇÃO	30
3.2	HIPÓTESES E SIMPLIFICAÇÕES	31
3.3	EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS	31
3.4	MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS GERAL	34
3.4.1	Método das diferenças finitas.....	35
3.4.2	Método das Características de Intervalos de tempo especificados.....	36
3.4.3	Introdução das condições de contorno	37
3.4.3.1	Condição de Reservatório a nível fixo no início do sistema.....	40
3.4.3.2	Condições entre tubos – Mudança de Diâmetro	40
3.4.3.3	Condições entre tubos – Perda singular	41
3.4.3.4	Condições entre tubos – Válvula na linha.....	43
3.4.3.5	Condições entre tubos – Chaminé de Equilíbrio.....	44
3.4.3.6	Condições entre tubos – Conexão em Galho (Ramificação)	46
3.4.3.7	Condições de final do sistema – Válvula à Jusante	47
3.5	ASPECTOS COMPUTACIONAIS.....	50
3.5.1	Principais conceitos do visual C++ 6.0	51
3.5.2	Desenvolvimento do programa TRANSPETRO-1D	51
3.5.3	Arquitetura do programa e principais funções membros	52
3.5.4	Descrição da contribuição realizada.....	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES (EXEMPLOS E APLICAÇÕES)	56

4.1	VALIDAÇÃO.....	56
4.1.1	Caso 01 – Cavidade conectada a um duto reto.....	57
4.2	INFLUENCIA DE PARÂMETROS	59
4.2.1	Caso 02 – Tempo de fechamento da válvula.....	60
4.2.2	Caso 03 – Tipo de fechamento de válvulas em experimentos	62
4.2.3	Caso 04 – Tipo de fechamento (Válvulas comerciais).....	63
4.2.3.1	Válvula tipo Globo.....	63
4.2.3.2	Válvula tipo Guilhotina.....	65
4.2.3.3	Válvula tipo Esfera.....	66
4.2.3.4	Válvula tipo Borboleta	68
4.2.3.5	Válvula tipo Howell-Bunger	69
4.2.3.6	Válvulas em linha.....	71
4.2.3.7	Válvulas no final	72
4.2.4	Caso 05 – Variação da rugosidade relativa do material	74
4.2.5	Caso 06 – Variação da relação espessura/Diâmetro interno (e/D).....	74
4.2.6	Caso 07 – Variação do material do duto	75
4.2.7	Caso 08 – Variação das propriedades mecânicas e físicas do duto.....	76
4.2.8	Caso 09 – Variação das propriedades físicas do fluido.....	81
4.2.9	Caso 10 – Variação das propriedades do duto e do fluido	83
4.3	EXEMPLOS DE CASOS COM CIRCUITOS REAIS	84
4.3.1	Caso 11 – Bancada Contractor - Sistema com duto inclinado	84
4.3.2	Caso 12 – Representação aparente da cavitação como corte da onda na região negativa	87
4.4	SIMULAÇÕES.....	89
4.4.1	Setor nuclear - Bancada Claudia	89
4.4.2	Setor hidroelétrico – Usina hidroelétrica.....	92
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	95
5.1	CONCLUSÕES GERAIS.....	95

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
Anexos.....	107
ANEXO A – ALGUNS PROGRAMAS COMERCIAIS PARA A SIMULAÇÃO DE TRANSIENTES	107
A.1 PROGRAMAS MONOFÁSICOS	107
A.1.1 Pipeline studio (TGNET E TLNET).....	107
A.1.2 Stoner pipeline simulation (SPS).....	108
A.2 PROGRAMAS MULTIFÁSICOS.....	109
A.2.1 Olga.....	109
A.2.2 LedaFlow	110
A.2.3 Pipephase Tacite	112
ANEXO B – FATOR DE ATRITO TRANSIENTE	113
ANEXO C – FATORES QUE AFETAM A CELERIDADE DA ONDA TRANSIENTE NOS SISTEMAS HIDRÁULICOS.....	115
C.1 INTRODUÇÃO	115
C.2 CELERIDADE DA ONDA TRANSIENTE.....	115
C.3.1 Equação para a variação de pulso de pressão ΔH	115
C.2.2 - Velocidade da onda de tubos de paredes delgadas	118
C.2.3 - Velocidade da onda transiente em dutos de paredes espessas	125
C.2.4 - Velocidade da onda transiente em túneis circulares	126
C.3 – VELOCIDADE DO SOM MODIFICADA PELA DEFORMAÇÃO DO DUTO EM MODO DE RESPIRAÇÃO (EXPANSÃO - CONTRAÇÃO DO DIÂMETRO).....	127
C.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	128
ANEXO D – ANÁLISE DO EFEITO DA TEMPERATURA NO FLUIDO.....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Condições de contorno utilizadas	49
Tabela 4.1 - Materiais utilizados na simulação.....	76
Tabela 4.2. Geometria dos dutos utilizados na simulação	78
Tabela 4.3 - Propriedades do fluido.....	78
Tabela 4.4 - Tabela de erros nos resultados para os materiais utilizados.	79
Tabela 4.5 - Fluidos utilizados na simulação.....	81
Tabela 4.6 - Tabela de erros nos resultados para os fluidos utilizados.....	83
Tabela 4.7 - Dados de simulação do sistema.	87
Tabela D.1 - Fluidos utilizados na simulação	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Usina Hidrelétrica de Itaipu – Foz de Iguaçu, Brasil (Fonte: Obtida em site).....	2
Figura 1.2 – Usina nuclear em Angra Dois Reis – Rio de Janeiro, Brasil (Fonte: Obtida em site).	2
Figura 1.3 – Terminal Ribeirão Preto – São Paulo, Brasil (Fonte: Obtida em site).	2
Figura 2.1 – Transiente hidráulico, pressão em função do tempo para uma partícula “x” no sistema (Modificado – Masoug e Kwame, 2007).....	9
Figura 2.2 – Dano no conduto forçado gerado pela sobrepressão. Usina hidroelétrica – Oigawa, Japão (Fonte: Chaudhry, 1988).....	26
Figura 2.3 – Colapso do conduto forçado gerado pela sub pressão. Usina hidroelétrica – Oigawa, Japão (Fonte: Chaudhry, 1988).....	26
Figura 2.4 – Rachadura no conduto forçado gerado pela pressão positiva. Usina hidroelétrica – Estados Unidos (Fonte: Chaudhry, 1988).	27
Figura 2.5 – Deslocamento horizontal do duto. Usina Hidrelétrica de Arequipa, Peru (Fonte: Chaudhry, 1988).	27
Figura 2.6 – Localização da Usina Hidrelétrica (Fonte: Cruz, 2009).	28
Figura 2.7 – Casa de maquinas antes e depois do acidente (Fonte: Cruz, 2009).....	29
Figura 2.8 – Localização do lugar onde se apresentou o golpe de aríete (Fonte: Cruz, 2009).....	29
Figura 3.1 - Método das diferencias finitas (Nascimento, 2002).....	35
Figura 3.2 - Linhas Características nos contornos.....	38
Figura 3.3 – Condição de contorno entre tubos (Nascimento, 2002).	39
Figura 3.4 – Câmara de pressão fixa à montante.	40
Figura 3.5 – Mudança de diâmetro.	40
Figura 3.6 – Perda de pressão localizada.	42
Figura 3.7 – Válvula na linha do sistema.....	43
Figura 3.8 – Chaminé de equilíbrio entre dos dutos (modificado – Nascimento, 2002).44	

Figura 3.9 – Conexão em Galho.	46
Figura 3.10 – Válvula no final à jusante.	48
Figura 3.11 - Tela de programação do programa Visual C++.	51
Figura 3.12 - Tela de exibição de TRANSPETRO-1D, caixa de diálogo e gráficos da curva da válvula, pressão e velocidade em função do tempo (modificado – Nascimento, 2002).	52
Figura 3.13 – Arquitetura do programa (Nascimento, 2002).	54
Figura 3.14 – Implementações nas características do fluido e dos fatores externos.	55
Figura 3.15 - Implementações nas características do duto e dos fatores transientes.	55
Figura 4.1 - Bancada de Ensaio (modificado - Contractor, 1965) (a) e curva de fechamento da válvula (b).	57
Figura 4.2 - Evolução da pressão no ponto A – Resultados experimentais e numéricos (modificado – Contractor, 1965).	58
Figura 4.3 - Superfície da onda de pressão no duto.	58
Figura 4.4 – Componentes principais do sistema hidráulico.	59
Figura 4.5 – Sistema hidráulico horizontal.	59
Figura 4.6 - Porcentagem de abertura da válvula em função do tempo.	60
Figura 4.7 - Relação entre pressão final e pressão inicial em função do tempo.	61
Figura 4.8 - Porcentagem de abertura da válvula em função do tempo de fechamento.	62
Figura 4.9 - Relação entre pressão final e pressão inicial em três secções do duto (6.1 m, 9.14m e 12.2 m) para um tempo constante de 0.0065 s.	62
Figura 4.10 – Válvula Globo (a) e sua curva de fechamento (b).	64
Figura 4.11 – Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento súbito e o fechamento com a válvula Globo.	64
Figura 4.12 - Válvula Guilhotina (a) e sua curva de fechamento (b).	65
Figura 4.13 - Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento súbito e o fechamento com a válvula Guilhotina.	66
Figura 4.14 - Válvula Esfera (a) e suas curvas de fechamento (b).	67

Figura 4.15 - Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento súbito e o fechamento com a válvula Esfera.	67
Figura 4.16 - Válvula Borboleta (a) e suas curvas de fechamento (b).....	68
Figura 4.17 - Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento súbito e o fechamento com a válvula Borboleta.....	69
Figura 4.18 - Válvula Howell-Burguer (a) e sua curva de fechamento (b).	70
Figura 4.19 - Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento súbito e o fechamento com a válvula Howell-Bunger.	70
Figura 4.20 – Curvas de fechamento de válvulas na linha do sistema hidráulico.	71
Figura 4.21 - Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento das diferentes válvulas na linha do sistema hidráulico.	72
Figura 4.22 - Curvas de fechamento de válvulas localizadas no final do sistema hidráulico.....	72
Figura 4.23 - Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento das diferentes válvulas localizadas no final do sistema hidráulico.....	73
Figura 4.24 - Onda transiente de pressão em função do tempo (Para diferentes rugosidades relativas).	74
Figura 4.25 - Onda transiente de pressão em função do tempo (Para diferentes diâmetros internos).....	75
Figura 4.26 - Onda transiente de pressão em função do tempo (Para dois diferentes materiais).	75
Figura 4.27 – Seção transversal do duto.	76
Figura 4.28 – Parâmetro C em função da relação e/D_{int}	77
Figura 4.29 - Fator de atrito "f" em função do Número de Reynolds "Re" (5 tipos de materiais).	77
Figura 4.30 - Resultados analíticos e numéricos para a relação entre pressões em função da relação geométrica do duto variando seu tipo de material.	79
Figura 4.31 - Resultados analíticos da relação entre as pressões em função do parâmetro (β).	80

Figura 4.32 - Fator de atrito "f" em função do Número de Reynolds "Re" (5 tipos de fluidos).....	81
Figura 4.33 - Resultados analíticos e numéricos para a relação entre pressões em função da relação geométrica do duto, variando o diâmetro do duto e as propriedades do fluido.	82
Figura 4.34 - Resultados analíticos e numéricos para a relação entre pressões em função do parâmetro (β) (Para 5 tipos diferentes de fluidos).....	83
Figura 4.35 – Esquema do sistema hidráulico inclinado (modificado - Bancada Contractor).....	84
Figura 4.36 – Esquema da simulações com o tubo inclinado.	85
Figura 4.37 – Curva de fechamento da válvula (modificado - Contractor, 1965).....	85
Figura 4.38 – Ondas transientes de pressão para as diferentes inclinações.....	85
Figura 4.39 – Ondas transientes de velocidade para as diferentes inclinações.....	86
Figura 4.40 - Configuração do sistema hidráulico.....	88
Figura 4.41 - Onda transiente de pressão em função do tempo no Captor de pressão (P).88	
Figura 4.42 - Representação em isométrico do sistema hidráulico da bancada Claudia.89	
Figura 4.43 - Representação em planta do sistema hidráulico da bancada de Claudia. .	90
Figura 4.44 – Curva de fechamento da válvula (modificado - Nascimento, 1965).....	90
Figura 4.45 – Evolução de pressão experimental na bancada Claudia no captor de pressão (P).	91
Figura 4.46 – Evolução da pressão numérica no captor P (Resultado TRANSPETRO-1D).....	91
Figura 4.47 - Representação em isométrico de uma usina hidroelétrica.	92
Figura 4.48 - Perfil da linha hidráulica simulada.....	93
Figura 4.49 - Evolução da pressão para os pontos A, B e C.....	93
Figura 4.50 - Evolução da velocidade para os pontos A, B e C.	94
Figura A.1 - Perfil Pressão - Pipeline Estúdio	107
Figura A.2 - Line service – Stoner Pipeline Simulation.	108
Figura A.3 – Solução dinâmica para uma ótima produção – OLGA.....	110

Figura A. 4 – Modelo Leadflow.	111
Figura A. 5 – Diagrama de solução - Pipephase Tacite.....	112
Figura C.1 – Volume de controle de escoamento transiente para análise de momento (Larock et al., 1999).	115
Figura C.2 - Volume de controle de escoamento permanente para análise de momento (Larock et al., 1999).	116
Figura C.3 - Volume de controle do escoamento permanente com todas as forças que atuam (Larock et al.,1999).	117
Figura C.4 - Propagação da onda transiente de pressão em dois instantes (Larock et al.,1999).....	118
Figura C.5 - Tubo engastado – livre (Nascimento, 2002).	122
Figura C.6 - Tubo bi-engastado (Nascimento, 2002).	123
Figura C.7 - Tubo com juntas de dilatação longitudinais ao longo do duto (Nascimento, 2002).....	123
Figura C.8 - Tubo de seção circular (Gilbert, 1988).....	127
Figura D.1 - Fator de atrito "f" em função do Número de Reynolds "Re" (5 tipos de temperaturas).	130
Figura D. 2 - Resultados analíticos e numéricos para a relação entre pressões em função da relação geométrica do duto, variando o diâmetro do duto e as propriedades do fluido.	131
Figura D. 3 - Resultados analíticos e numéricos para a relação entre pressões em função do parâmetro (β) (7 tipos diferentes de fluidos).	132

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

a	Velocidade de propagação da onda no meio
a'	Velocidade do som na água
a^+, a^-	Linhas características
A	Área do duto
A_{Ch}	Área secção transversal da chaminé
A_{Ent}	Área do tubo de ligação entre a chaminé e o sistema
C	Constante adimensional que depende das propriedades elásticas do tubo (dimensões de secção transversal, condições de ancoragem da tubulação, coeficiente de Poisson)
D	Diâmetro interno do duto
e	Espessura da parede do duto
E	Módulo de elasticidade do material
f	Coefficiente do Fator de Atrito Linear
g	Aceleração da gravidade
GDFE	Grupo de Dinâmica e Fluido Estrutura
H	Altura efetiva da coluna de água
j	Número do tubo
k	Módulo de expansão volumétrica do fluido
k'	Coefficiente em função do modulo de elasticidade do material do duto
K	Valor de perda singular
L	Comprimento do duto
L_1, L_2	Representação simbólica das equações diferenciais que governam o problema
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEC	Método dos elementos de contorno
MEF	Método dos Elementos Finitos
N tubo	Número do tubos do sistema
P	Pressão do fluido
PP, PR, PS	Pontos da malha discretizada
Q	Vazão no sistema hidráulico
Re	Número de Reynolds
α	Ângulo de inclinação do duto

t	Tempo
u	Amplitude da onda viajando no meio
v	Velocidade do escoamento
x	Posição do ponto no meio
z	Nível da superfície do fluido na chaminé de equilíbrio
\vec{V}	Vetor de velocidade de escoamento
ΔP	Mudança na pressão do sistema
Δv	Mudança na velocidade do fluido
ΔH	Mudança na altura efetiva da coluna de água
μ	Coefficiente de Poisson
μ_f	Viscosidade cinemática do fluido
ρ	Densidade do fluido
α	Ângulo de inclinação do duto
β	Parâmetro adimensional
ε	Rugosidade relativa do material
θ	Taxa de variação da malha de pontos
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
ψ	Parâmetro de identificação do fluxo
1D	Uni-dimensional
τ	Coefficiente da abertura da válvula
λ	Constante multiplicativa para combinação linear das equações fundamentais do problema
∇	Divergente

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo se apresentam algumas generalidades dos sistemas hidráulicos e do fenômeno transiente, a motivação para desenvolver esta dissertação, os objetivos gerais e específicos, as abrangências e limitações do trabalho, e a metodologia geral aplicada para o desenvolvimento da pesquisa, além de uma descrição sintética do conteúdo deste texto.

1.1 GENERALIDADES

Historicamente, dutos e canais trouxeram grandes vantagens às civilizações e povos. Estes tipos de sistemas hidráulicos provavelmente foram inventados de forma independente em várias partes do mundo, como na China 5.000 anos atrás, o Egito e o Iraque são outros lugares onde estes tipos de sistemas também foram encontrados. Séculos depois os romanos desenvolveram a arte de projetar tubulações para a distribuição de água. Arte está amplamente ignorada na Idade Média na Europa, mas com o adensamento nas cidades, problemas como poços, nascentes de rios e águas residuais, evidenciaram a necessidade da retomada dos estudos de estruturas hidráulicas.

Os sistemas hidráulicos estão compostos por um conjunto de tubulações industriais, as quais têm hoje mais aplicações do que em épocas anteriores em razão da utilização nos mais diversos ramos da atividade humana. A seguir se apresentam alguns exemplos de importantes obras no Brasil onde estão envolvidos setores deste domínio de estudos. Os três empreendimentos abaixo são constituídos por sistemas tubulares possíveis de sofrer com problemas relacionados aos fenômenos transientes de pressão. A Figura 1.1 apresenta a Usina Hidroelétrica de Itapu, localizada em Foz de Iguaçu, a qual é a maior usina hidroelétrica do Brasil e segunda do mundo. A Usina Nuclear em Angra Dois Reis no Rio de Janeiro, Figura 1.2, está formada pelo conjunto das usinas nucleares Angra 1, Angra 2 e Angra 3, esta é propriedade da Eletronuclear, subsidiária das Centrais Elétricas Brasileiras - Eletrobrás. Na Figura 1.3 se observam a grande quantidade de dutos que conformam o Terminal de Ribeirão Preto em São Paulo, cuja principal atividade é o armazenamento e a distribuição de óleo diesel, de gasolina e de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) para as companhias distribuidoras da região.



Figura 1.1 - Usina Hidrelétrica de Itaipu – Foz de Iguaçu, Brasil (Fonte: Obtida em site {1}).



Figura 1.2 – Usina nuclear em Angra Dois Reis – Rio de Janeiro, Brasil (Fonte: Obtida em site {2}).



Figura 1.3 – Terminal Ribeirão Preto – São Paulo, Brasil (Fonte: Obtida em site {3}).

A implantação deste tipo de sistemas exige um alto investimento inicial e, normalmente têm um tempo de vida projetado em torno de 40 anos ou mais, considerando-se que é bom o suficiente por ser mais econômico do que as formas de transporte alternativo. Adicionalmente estes apresentam um conjunto de fatores como: durabilidade aproximada da tubulação, a extensão do circuito, o diâmetro, a forma do tubo, o tipo de escoamento, o custo do capital, as despesas operacionais, as perdas de pressão, o consumo de energia, a presença de componentes adicionais como válvulas, bombas, chaminés de equilíbrio, entre outros, que precisam ser estudados e analisados para obter estruturas mais eficientes e seguras.

Estes projetos apresentam importantes desafios técnicos, como simulações prévias do escoamento no sistema que permitem identificar eventuais fenômenos transientes, tornando-se uma ferramenta útil para diminuir ou evitar a possibilidade de acidentes gerados nas adutoras ou usinas. Por exemplo, o caso ocorrido em 17 de agosto de 2009 numa usina hidroelétrica na Rússia, onde uma onda transiente de pressão ocasionou a destruição parcial da casa de máquinas da usina, gerando a morte de aproximadamente 76 pessoas.

O estudo do fenômeno transiente de pressão apresenta grande interesse devido a seu relevante impacto nos sistemas utilizados para o transporte de fluidos. Na literatura técnica, investigadores de todo o mundo tem estudado os conceitos mais importantes e as principais equações para sua análise. As pesquisas pioneiras foram desenvolvidas e confirmadas experimentalmente por Joukowski (1898), Allievi (1903) e Streeter e Wylie (1967), sendo estes últimos os autores da obra mais importante e completa deste fenômeno, servindo como base para vários estudos que abordam desde os conceitos do fenômeno até as aplicações em problemas mais complexos, destacando-se os métodos de análise, e vários algoritmos computacionais baseados especialmente no Método das Características.

1.2 MOTIVAÇÃO

Na atualidade têm-se disponíveis no mercado alguns programas comerciais (softwares) que efetuam a análise transiente monofásico (líquido ou gás) ou multifásico (óleo mais água mais gás). Mas todos estes programas, além de ter um custo elevado, são limitados em

alguns aspectos, devido a que se constituem em “caixas pretas”, onde o usuário não tem acesso e nem conhece as formulações utilizadas, assim como a respectiva programação.

O Grupo de Dinâmica e Fluido Estrutura (GDFE) da Universidade de Brasília (UnB) tem se dedicado há mais de duas décadas, aos estudos de transientes de pressão em circuitos tubulares (de reatores, adutoras de barragens e de petróleo), e desenvolvido uma série de programas e rotinas que permitem as análises neste campo do conhecimento. Por tanto, esta dissertação se insere no escopo destas atividades de pesquisa do GDFE, e pretende dar um passo a mais, no acumulo de experiência e conhecimento neste domínio.

Como o GDFE dispõe de um programa bastante elaborado (TRANSPETRO-1D) melhorado e acrescido de novas potencialidades (Nascimento, 2002), a partir de toda a experiência anterior do grupo, serão efetuadas modificações no programa computacional afim de fornecer uma ferramenta útil e acessível para a comunidade acadêmica e empresarial da região, e que permita esta entender e fazer análises do fenômeno transiente para determinadas configurações.

1.3 COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

Centrais nucleares, adutoras de barragens, oleodutos, gasodutos, e outros grandes projetos requerem a utilização de condutos forçados em seus sistemas hidráulicos, estes podem se encontrar de diferentes tamanhos, configurações e materiais que variam de acordo com as especificações e requisitos de cada obra. Na literatura se tem relatado uma série de acidentes neste tipo de sistemas, assim como diferentes trabalhos experimentais, mas estes além de ter um custo elevado são focados em situações particulares. Com o avanço da tecnologia tem-se desenvolvido novas ferramentas computacionais que permitem fazer este tipo de análise e aplicações para qualquer tipo de configuração as quais em conjunto com análises prévias permitem obter soluções com um equilíbrio entre as condições técnicas, econômicas e ambientais.

Este trabalho se caracteriza pelo estudo de alguns dos parâmetros básicos deste fenômeno, onde se considera as propriedades do duto (tipo de material, inclinação, diâmetro interno, parede do duto, rugosidade da superfície), as propriedades do fluido (densidade,

viscosidade e compressibilidade) e dos diferentes componentes como válvulas, singularidades, chaminés de equilíbrio, inclinação do duto, entre outras.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento das ondas transientes de pressão quando se varia alguns dos parâmetros fundamentais, presentes num determinado circuito tubular, mediante a utilização de recursos disponíveis: soluções analíticas, numéricas e experimentais fornecidas na literatura, e comparadas com os resultados numéricos dados pelo programa TRANSPETRO-1D.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar estudos que mostrem a importância do tempo e tipo de fechamento de válvulas, em sistemas de tubulações existentes em centrais nucleares, oleodutos, gasodutos, tubulações de hidroelétricas, no comportamento das ondas transientes de pressão;
- Implementar outras condições (recursos) no programa TRANSPETRO-1D, tais como os efeitos da inclinação do duto, identificação da cavitação, efeitos da temperatura no fluido e elasticidade da parede do tubo; incluindo também um algoritmo que estima o coeficiente de atrito no duto.
- Efetuar estudos de casos e simulações que permita modelar e analisar o comportamento de circuitos tubulares mais complexos.

1.5 ABRANGÊNCIA E LIMITAÇÕES

Este trabalho aplicou-se á sistemas tubulares com condutos forçados constituídos por uma linha principal, acrescido de vários elementos localizados como perdas singulares, chaminés de equilíbrio, etc. As aplicações do problema neste trabalho se limitam a uma série de simplificações:

- Não se leva em conta a interação fluido estrutura (em fase de implementação);
- Não é aplicável a sistemas de redes (malhas tubulares);

- O material dos dutos tem um comportamento linear elástico;
- Não leva em conta o efeito da temperatura no material do duto, e a cavitação no fluido;
- Na maior parte dos casos considera o fluido como sendo líquido (água) por apresentar os resultados mais conservadores nas aplicações em circuitos tubulares de interesse.
- Não se considera a deformada modal do tubo (estrutura);
- Aplicável a escoamentos monofásicos (líquido).

1.6 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho consistiu inicialmente na busca de material bibliográfico referente ao tema do fenômeno transiente em sistemas hidráulicos em condutos forçados, assim como os métodos de solução. Depois se reapresentam as equações físicas que regem o fenômeno transiente em dutos, em conjunto com outras expressões úteis para se determinar o fator de atrito e a celeridade das ondas transientes, que por sua vez depende de uma série de parâmetros.

Para a solução destas equações empregou-se o método das características em conjunto com a técnica das diferenças finitas que foram anteriormente implementadas no programa TRANSPETRO-1D (Nascimento, 2002), no qual se fez uma modificação permitindo ao usuário a possibilidade de ingressar as propriedades físicas e mecânicas do duto e do fluido, onde anteriormente não se tinha a possibilidade de ingressar estes valores. Considera-se ainda como principal aporte ao programa a opção de se ingressar no sistema uma inclinação no duto.

Sempre que for possível faz-se uma comparação entre os resultados das ondas transientes de pressão experimental e as ondas de pressão transientes obtidas numericamente pelo programa TRANSPETRO-1D. Foram também executadas simulações com cada uma das principais propriedades mecânicas e físicas do duto e do fluido, juntamente com as condições de contorno envolvidas no sistema, tais como válvulas, inclinação do duto, chaminé de equilíbrio, entre outras. Finalmente apresentam casos práticos de circuitos tubulares que evidenciam a potencialidade do programa.

1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta tese foi desenvolvida em cinco capítulos. Abaixo apresenta-se uma breve descrição do conteúdo destes capítulos.

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica: Apresenta-se uma breve introdução com a descrição geral do fenômeno transiente, além de alguns estudos físicos e matemáticos do fenômeno, com uma ênfase nos fluidos líquidos. São mostrados diferentes métodos de análise com suas vantagens e desvantagens. A parte final relata casos de acidentes extremos que aconteceram no mundo devido ao fenômeno transiente.

Capítulo 3 - Fundamentação teórica: Apresentam-se as hipóteses e simplificações feitas no desenvolvimento teórico do trabalho em conjunto com o equacionamento do fenômeno. É apresentado o processo de solução pelo método de características, um dos métodos numéricos mais utilizados na solução deste tipo de problemas. O TRANSPETRO-1D é apresentado com uma descrição de suas principais características e potencialidades.

Capítulo 4 - Resultados e discussões (Exemplos e aplicações): Este capítulo é dividido em quatro partes: Validação, Influência dos parâmetros, Exemplos de casos em circuitos reais e Simulações. Estes subcapítulos visou avaliar as implementações feitas e verificar o campo de aplicação do programa.

Capítulo 5 - Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros: Apresentam-se as principais observações obtidas através do estudo. Recomendações para futuros trabalhos são desenvolvidas com base nas investigações efetuadas.

Finalmente apresenta-se a bibliografia principal da pesquisa com os anexos complementares utilizados nesta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma introdução geral ao fenômeno transiente com alguns de seus principais conceitos, uma breve descrição histórica das teóricas físicas e matemáticas que deram suporte as teorias atuais, além dos estudos realizados por diferentes pesquisadores para a análise de transientes de pressão e os diferentes métodos de solução numérica existentes na literatura. Na parte final do capítulo apresentam se alguns acidentes importantes gerados por este fenômeno.

2.1 REGIMES DE ESCOAMENTOS TRANSIENTES

Os conceitos mais importantes e as principais equações para a análise de transientes foram desenvolvidos e confirmados experimentalmente por vários autores (Joukowsky, 1898; Allievi, 1903; Streeter e Wylie, 1967). Os métodos de análise transiente geralmente baseiam-se nas equações de quantidade de movimento, continuidade e estado, com diferentes níveis de restrições no seu desenvolvimento.

A descrição do fenômeno transiente é associada à noção de regimes de escoamentos. A origem de um escoamento entre dois pontos é dada pela diferença de pressão, a diferença potencial ou o incremento da quantidade de movimento num determinado tempo, e pode ser classificado como:

- Escoamento permanente: A velocidade e pressão no sistema são invariáveis no tempo.
- Escoamento não permanente ou transiente: A velocidade e pressão no sistema são variáveis no tempo.

Um fenômeno transiente pode ser ainda definido como uma perturbação no sistema causada pela alteração nas magnitudes da pressão e velocidade entre dois regimes permanentes. Assim a transição de fase entre duas situações permanentes pode ser caracterizada como um transiente (Masoug e Kwame, 2007).

A variação da velocidade no tempo em uma seção é acompanhada por uma variação da pressão, e vice-versa. Esta perturbação propaga se no duto em forma de onda. Estas ondas podem ser refletidas parcialmente ou completamente em curvas, bifurcações, e mudanças

de seções. Em algumas condições, implica em a mudança de sinal de toda ou de parte da onda.

A avaliação de um transiente de pressão é uma tarefa complexa. Envolve a determinação dos valores das funções $V(x, t)$ e $P(x, t)$ durante um período de tempo (T), resultado de uma operação de controle do escoamento realizada num intervalo de tempo (Δt). Em transientes de pressão são consideradas essenciais mudanças na densidade do líquido (normalmente água). No caso de oscilações o escoamento pode ser considerado incompressível. O fenômeno transiente apresentado na Figura 2.1 ocorre num intervalo de tempo (T). Entre os estados inicial e final tem uma oscilação instável do escoamento, produto de uma mudança na velocidade. No caso de golpe de aríete o transiente resulta de uma mudança rápida no estado do escoamento.

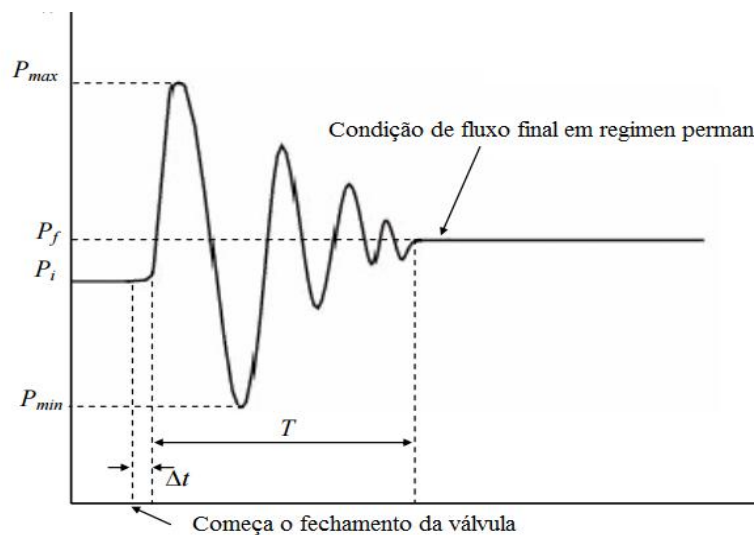


Figura 2.1 – Transiente hidráulico, pressão em função do tempo para uma partícula “x” no sistema (Modificado – Masoug e Kwame, 2007).

Na Figura 2.1 observa-se a evolução do fenômeno transiente em um ponto fixo de um sistema que está sendo submetido a um fechamento brusco da válvula, onde a pressão P é representada como uma função de tempo t ; P_i é a pressão inicial no início do transiente e P_f é a pressão final no final do evento transiente.

Chaudhry (1988) apresentou alguns termos comuns nos escoamentos transientes, os quais são apresentados à continuação:

Escoamento transiente: Escoamento em fase intermediária, onde as condições do escoamento variam de um estado estacionário para outro estado estacionário.

Escoamento uniforme e não uniforme: Escoamento uniforme é aquele onde a velocidade do escoamento é constante em função da distância, num determinado momento. Se a velocidade varia com a distância, o escoamento é chamado não uniforme.

Coluna de separação: Se a pressão no escoamento cai para a pressão de vapor do líquido, cavidades são formadas nos líquidos e muitas vezes a coluna de líquido pode se separar ao longo de toda a secção transversal.

Golpe de aríete: No passado, conhecido como o martelo de água, martelo de óleo, martelo a vapor. Refere-se às flutuações de pressão causada por uma alteração no escoamento do fluido envolvido. Os transientes de pressão tornaram-se mais estudados a partir dos anos 1960.

Têm-se dois tipos de categorias principais para classificar os modelos de simulação hidráulica (Santos, 2010):

- Modelo estático (condições de escoamento constante): Neste tipo de modelagem se considera que as magnitudes das variáveis de estado não variam com o tempo, estes só permitem fazer uma análise em regime permanente.
- Modelo dinâmico (condições dependentes do tempo): Os modelos dinâmicos estão divididos em inerciais e não inerciais. Eles permitem avaliar as variáveis de interesse no tempo.
 - Modelos dinâmicos não inerciais, ou quase-estáticos: Estes admitem que a característica dinâmica seja introduzida fazendo alterações temporais das condições de contorno, eles são muito usados para análise em períodos longos.
 - Modelos dinâmicos inerciais: este apresenta dois tipos de modelos.

- ✓ Modelo elástico: O escoamento é considerado unidimensional e descrito por duas equações diferenciais parciais não lineares que permitem a determinação das variáveis de estado, a compressibilidade do fluido e as características mecânicas das paredes do duto. O fechamento súbito de uma válvula, a ruptura da tubulação, os efeitos de uma bomba num determinado sistema, entre outros casos podem ser analisados.
- ✓ Modelo rígido: O fluido é descrito por uma coluna rígida, na qual as condições de escoamento variam lentamente no tempo e os efeitos de compressibilidade do fluido e do duto são desprezados.

2.2 ESTUDOS HISTÓRICOS FÍSICOS E MATEMÁTICOS

Estudos sobre a propagação das ondas sonoras no ar, na água, e o escoamento de sangue nas artérias foram às primeiras investigações sobre transientes. Newton em 1687 apresentou uma equação para a celeridade da onda e a elasticidade no meio, a qual foi à primeira referência para análise deste fenômeno.

As primeiras soluções matemáticas da equação de onda foram obtidas quase ao mesmo tempo por d'Alembert, Euler e Bernoulli para estudar o problema da corda vibrante de um segmento musical que vibra. Euler em 1759 investigou a equação de onda em relação ao problema da circulação do sangue e desenvolveu a equação de propagação de ondas elásticas. O trabalho da solução matemática da propagação da onda foi generalizado por Fourier em 1800 e estendida para a equação de onda em duas dimensões, conforme a expressão:

$$\frac{\partial^2 u_{(x,t)}}{\partial t^2} = a^2 \nabla^2 u(x,t) \quad (2.1)$$

Onde, u: Amplitude da onda viajando no meio;

t: Tempo;

x: Posição do ponto no meio;

a: Velocidade de propagação da onda no meio.

Savart em 1825 e Cagnard em 1835 aperfeiçoaram o trabalho de Euler sobre a propagação das ondas sonoras. Wertheim em 1848 observou a velocidade de propagação na água em duto elástico menor do que o indicado pela formulação teórica mostrada, Equação 2.2:

$$a' = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.2)$$

Onde, E: Módulo de elasticidade do material do duto;

ρ : Densidade do fluido;

a': Velocidade do som na água.

Joukowsky (1898) fez experimentos complementares para verificar as suas teorias sobre celeridade fazendo as considerações da elasticidade do fluido e da parede do duto e ainda desenvolveu a formulação clássica para a variação da pressão devido à mudança brusca na velocidade. Os resultados experimentais indicaram que as reflexões em tubos modificados influenciam na pressão. Adicionalmente, ele fez estudos dos efeitos da chaminé de equilíbrio, tanque de pressão e válvulas e investigou os efeitos do tempo de fechamento de válvulas, concluindo que o máximo aumento da pressão devido ao fechamento da válvula ocorre no tempo (t):

$$t \leq \frac{2L}{a} \quad (2.3)$$

onde, L: Comprimento do duto;

a : Velocidade de propagação da onda no meio.

Allievi (1903) estabeleceu uma expressão para o fechamento lento da válvula, além de elaborar uma relação ideal da pressão com um coeficiente constante de descarga, se focando na obtenção da curva pressão-tempo devido ao fechamento linear da válvula. Esta relação, geralmente usada, é universalmente conhecida como “Equações de Allievi”.

Equação de movimento:

$$Ag \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + k'Q|Q| = 0 \quad (2.4)$$

Equação de continuidade:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.5)$$

Onde, A: Área do duto.

g: Aceleração da gravidade.

H: Altura efetiva da coluna de água.

Q: Vazão no sistema hidráulico.

k': Coeficiente em função do módulo de elasticidade do material do duto.

a : Velocidade de propagação da onda no meio.

Gibson (1920) desenvolveu uma teoria elástica sem o conhecimento do trabalho anterior de Allievi (1903). Em uma breve comparação dos resultados obtidos havia uma semelhança de valores para um regulador de pressão devido ao fechamento linear lento da válvula.

Bergeron (1961) expôs um método gráfico para determinar variações de velocidade no conduto devido ao fechamento de uma válvula sem considerar as perdas. Este método era bastante eficiente no início, mas com a chegada da tecnologia digital, este método tornou-se inviável, em comparação com outros métodos.

Li (1972) apresentou as soluções matemáticas aproximadas às equações diferenciais do fenômeno transiente, utilizando a transformada de Laplace, além de resolver os problemas que envolvem o fechamento das válvulas, com a utilização de séries de Fourier.

2.3 ALGUNS ESTUDOS REPRESENTATIVOS DE TRANSIENTES EM FLUIDO LÍQUIDO

Estudos representativos em reatores nucleares foram feitas por Liberman e Brown (1960) motivados pelas consequências geradas por ondas propagadas no circuito do sistema de bombas para refrigeração e/ou fechamento de válvulas. Foi uma tentativa para identificar a magnitude, frequência e duração de possíveis oscilações de pressão no duto, bem como a descarga de oscilações de pressão na câmara Plenum fixa (parte central do reator que contém barras radioativas), estabelecendo limites para pressões transitórias do reator.

A análise feita com base na equação dinâmica que rege o problema (Equação 2.6), com a inclusão do fator de atrito proporcional à velocidade (fator de amortecimento), mostrou não ser possível resolver a equação geral com separação de variáveis.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.6)$$

Onde, ΔP : Perda de carga por atrito;

f: Fator de Atrito não Linear;

L: Comprimento do duto;

D: Diâmetro do duto;

V: Velocidade do escoamento;

P: Densidade do fluido.

Além do citado acima, nesse trabalho foi apresentada uma forma de consideração da transmissão e reflexão de ondas num tubo de seção variável, mais a forma de redução dos efeitos do transiente em um tubo com o atrito, devido ao aumento da pressão e da velocidade causadas por ondas de baixa amplitude.

Parmakian (1963) reapresentou a teoria do Método gráfico de Bergerom (1961), aplicou a vários problemas que envolvem diversas condições de contorno (bombas, chaminé de equilíbrio, etc.), base para validação de outros métodos.

Contractor (1965) estudou as reflexões de ondas e perdas singulares proveniente de um transiente causado pelo fechamento das válvulas. Também desenvolveu uma solução numérica para o problema através do método de características e as equações básicas a fim de provar o resultado experimental. Além disso, fez testes considerando os efeitos de atrito e observou que tanto o Método das Características quanto a consideração de emprego das condições (com ou sem perda singular, fechamento da válvula) foram eficazes para validar os resultados obtidos experimentalmente.

Streeter e Wyllie (1967) escreveram a obra mais importante e completa sobre transientes e formaram a base de vários estudos que abordam desde os conceitos do fenômeno até as considerações em problemas mais complexos, tais como oleodutos. Destacam-se os

métodos de análise para fornecer vários algoritmos computacionais na análise de transientes, especialmente com base no método de características.

Curtis (1973) descreve diversas formas de solucionar as equações diferenciais que regem o problema; destaca-se principalmente a formulação analítica do Método das Características.

Tullis (1976), dentre outros pesquisadores estudaram regimes de escoamento. Com pequena quantidade de gás livre presente em um líquido, quando a pressão local durante o transiente fica abaixo da pressão de saturação, o líquido libera o gás livre. Se a pressão cai para a pressão de vapor, as cavidades são formadas gerando a cavitação gasosa.

Wiggert e Sundquist (1979) investigaram a cavitação gasosa usando o Método das Características. A liberação de gás é assumida principalmente devido à diferença de pressão local e pressão de saturação, aumento da fração de vazio. O escoamento de calor não é considerado.

Lessa (1984) apresentou um modelo matemático para a análise computacional de fenômenos transientes em sistemas complexos de abastecimento de água, cujas equações foram resolvidas pelo método de características.

Pedroso (1986) estudou o problema da Interação Fluido Estrutura (IFE) em estruturas tubulares de reatores nucleares, excitadas pela propagação de ondas geradas por uns transientes de pressão; investigou as deformações dos frentes de ondas e suas interações com as estruturas; as perdas de pressão localizadas (em placas perfuradas), o fenômeno de degasagem (bolhas/vazios) introduzidas no sistema em função de um campo de pressão variável (oscilatório), além de outros aspectos inerentes aos fenômenos envolvidos. Estes estudos foram conduzidos de forma teórica (analítica), numérica e experimental.

Tullis (1989) apresenta o Método das Características para resolver problemas transientes. O texto vai além de considerações a serem feitas para o tratamento de algumas das condições de contorno. Campbell (1989) apresentou um documento com base nas equações básicas do golpe de aríete, propôs um método gráfico para representar as pressões, o excesso de pressão e a sobrepressão ao qual o tubo fica sujeito.

Adams e Koelle (1992) publicaram o trabalho para o efeito de transientes em sistemas de rede com base no Método das Características para produzir vários resultados interessantes, como chaminés de equilíbrio que foram validadas por soluções analíticas.

Wang *et al.* (1992) pesquisadores chineses estudaram um modelo físico-matemático. A partir das equações fundamentais estabelecidas, desenvolvem um programa computacional para simular vários efeitos transientes no sistema de refrigeração de água dos circuitos de reatores nucleares.

Loeffler *et al.* (1996) apresentam uma formulação do Método de Elementos de Contorno (MEC) aplicada a problemas de transientes rápidos em condutos forçados, sendo que os resultados mostraram uma boa aproximação aos obtidos pelo Método das Características, que é referenciado pelos autores como o mais consagrado.

Taylor *et al.* (1997) desenvolveram um modelo utilizando o Método de Elementos Finitos que leva em conta as novas aproximações para a questão da fricção de acordo com o número de Reynolds. Os resultados obtidos são comparados com os determinados pelo Método das Características e métodos das diferenças finitas. Eles verificaram que havia uma boa aproximação para o regime laminar e para o turbulento usando um fator de correção.

Pezzinga (1999) desenvolveu um modelo em duas dimensões que calcula perdas por atrito em tubos e redes de tubulação usando perfis de velocidade instantânea. Os valores extremos de pressão e oscilações de ondas de pressão foram bem reproduzidos por este modelo.

Brunone *et al.* (2000) publicaram seus resultados experimentais para variações de velocidade no tempo em várias zonas ao longo de uma mesma seção do tubo para o fechamento de uma válvula. Nestes ensaios foram considerados os escoamentos turbulentos e laminares levando-se em conta as perdas laterais devidas ao atrito. Esses resultados demonstraram a complexidade advinda do tipo de escoamento e do comportamento do fluido que devem ser levados em consideração em modelos numéricos com alta precisão e qualidade dos resultados.

Izquierdo e Iglesias (2002) apresentaram um modelo matemático para a análise de transientes hidráulicos em sistemas simples de distribuição com base no método de características, o que resultou no desenvolvimento do programa DYAGATS.

Izquierdo e Iglesias (2004) compararam os resultados obtidos por um software comercial SURGE5 com o programa desenvolvido para sistemas hidráulicos mais complexos através de uma melhoria na definição das condições de contorno. PIRES *et al.* (2004) estudaram os transientes em dutos curtos gerados pelo fechamento rápido de válvulas.

Magzoub e Oduro (2007) empregaram o método gráfico e o Método das Características na construção de modelos para calcular e simular transientes em alguns condutos. Estes pesquisadores criaram diversos cenários e operações de fechamento da válvula foram aplicadas para os modelos com e sem a presença de bomba no duto a fim de estudar os fenômenos. As soluções do modelo foram comparadas com as soluções gráficas para os dois fluxos transientes. Silvore (2007) desenvolveu um programa de análise transiente em Java que permitia trabalhar com válvulas de fechamento brusco, fechamento gradual, falhas de energia na bomba e mudanças bruscas nos cruzamentos. Um máximo de quatro tubos pode estar presente em um cruzamento. Um problema de rede de tubulação foi resolvido usando este programa e os resultados encontrados foram semelhantes aos obtidos a partir de programa TRANSNET.

Andrzejewski (2009) realizou uma comparação entre os resultados de métodos de resolução de chaminés de equilíbrio, baseados em métodos numéricos de diferentes complexidades, com os resultados obtidos de um protótipo instalado em laboratório hidráulico. Bratland (2009) escreve o livro “Pipe Flow 1: Single-phase Flow Assurance” onde se abordam problemas mais complexos como a variação de calor calculado pelo Método das Características, além de novas condições de contorno.

Seleghim (2011) desenvolveu o estudo da propagação de ondas em dutos de transporte de fluidos através da análise de atenuação acústica e propagação de velocidade. Por tanto, foram realizados testes experimentais em escoamento único e de duas fases para a aquisição de sinais gerados a partir do fechamento das válvulas e da simulação de vazamentos em pontos conhecidos ao longo do gasoduto. Fontes *et al.*,(2011) fizeram um

trabalho prático para determinar a fadiga em tubulações submetidas ao fenômeno transiente.

Bratland (2013) escreve o segundo livro “Pipe Flow 2: Multi-phase Flow Assurance” este aborda problemas muito mais complexos como a determinação do regime do fluxo, análise de fluxos que tem presença de líquido e gás, e as soluções pelos métodos numéricos, entre outros.

2.3.1 Experiência do Grupo de Dinâmica e Fluida-Estrutura (GDFE)

Pedroso (1992) desenvolveu um modelo analítico para as perdas de pressão e reflexão de ondas transientes, assumindo tubo rígido, fluido incompressível sem cavitação.

Pedroso *et al.* (1993d) desenvolveram um programa computacional baseado no Método das Características denominado TRANS, o qual calculava as pressões induzidas pela propagação de ondas em condutos forçados, cuja validação foi feita com resultados experimentais da bancada de RIO (Pedroso, 1986). Este código serviu também para simular circuitos de reatores nucleares. Nessa mesma linha, ampliaram suas pesquisas com um novo programa TRANS-II, abordando os efeitos de amortecimentos e de reflexões de pressão quando estas atravessavam singularidades (orifícios, válvulas, diafragmas, etc.), que são tratadas como condições de contorno, e cujo transiente era originário do fechamento abrupto de válvulas.

Pedroso *et al.* (1994a) produzam uma nova versão do programa TRANS fazendo uma análise de transientes em circuitos de reatores nucleares, incluindo novos resultados para diferentes condições de contorno, entre elas a descompressão brusca de cavidade pressurizada, que foi validada por soluções analíticas.

Neri e Pedroso (1999) desenvolveu o programa RETRANS baseado nos mesmos fundamentos de programas anteriores (TRANS e TRANS-II). Diferencia-se pela implementação de novas condições de contorno e o aperfeiçoamento do processo de interação com o usuário.

Nascimento (2002) desenvolveu o programa chamado TRANSPETRO - 1D, ondas plana. Este programa permite identificar e caracterizar os efeitos transientes causadas pela

pressão das ondas com várias condições de contorno, sendo importante mencionar os aspectos visuais deste programa. Permite uma interface do usuário confortável e transforma o programa em uma ferramenta fácil no processo de análise e simulação.

Neves (2004) apresentou um estudo de vibrações em fluido-estrutura que examinava as frequências de ressonância em problemas de vazão com alta e baixa velocidade utilizando técnicas para suavizar o golpe de aríete. Neves (2004) propôs uma solução para encontrar o campo de pressão bidimensional na válvula comparando os resultados com as soluções apresentadas na literatura utilizando o método de características. Além disso, ainda sugeriu a construção de um dispositivo (composto de material poroso) na válvula.

O GDFE da UnB ainda produziu vários trabalhos no domínio de transientes de pressão orientado a escoamento em dutos de centrais nucleares, adutoras de barragens e de oleodutos:

O problema de transientes em circuitos tubulares de centrais nucleares foi estudado em alguns trabalhos como: Pedroso *et al.*, (1993b), Pedroso e Barbosa (1993c), , Pedroso *et al.*, (1995) e Pedroso e Barbosa (2005).

Alguns trabalhos experimentais do fenômeno transiente também foram feitos por Pedroso e Gilbert (1987), e Pedroso (1990).

O fenômeno transiente gerado nos dutos forçados existentes nas adutoras de barragens foi estudado por Pedroso e Neves (2006), e Rampinelli *et al.*, (2008).

Oleodutos são alguns das estruturas que também estão submetidas ao fenômeno transiente e foram estudadas por Pedroso *et al.*, (2001), e Pedroso *et al.*, (2014).

2.4 MÉTODOS DE ANÁLISE

Estes conceitos e equações são válidos somente quando a pressão num determinado sistema é maior do que a pressão de vapor do líquido, as quais são resolvidas utilizando diversos métodos numéricos, sendo o Método das Características o mais popular. Em muitos regimes de escoamento uma pequena quantidade de gás livre está presente no líquido. Quando a pressão local fica abaixo da pressão de saturação o líquido libera este

gás livre, formando cavidades que geram cavitação gasosa (Tullis *et al.*, 1976) ou degasagem (Pedroso, 1986). Tem-se, portanto, a necessidade de se estender esses conceitos a escoamentos transientes com mais de uma fase.

O problema do escoamento transiente em dutos foi desenvolvido baseado nas equações da quantidade de movimento, continuidade e estado, que em conjunto com outras relações físicas são utilizadas nas soluções numéricas dos sistemas não lineares, em que o fator de atrito é desprezado ou linearizado na Equação de movimento. Os métodos são descritos a seguir com suas respectivas vantagens e desvantagens. O conteúdo dessa seção se baseia no texto da literatura *Fluid Transients* (Wylie e Streeter, 1967).

2.4.1 Método aritmético

Este método negligencia o fator de atrito (Joukowsky, 1900; Allievi, 1925), sendo aplicável a um duto horizontal, tem-se as seguintes equações finais:

$$H_A - \frac{a}{g}V_A = H_B - \frac{a}{g}V_B \rightarrow H_A - H_B = \frac{a}{g}(V_A - V_B) \quad (2.7)$$

$$\Delta H = \frac{a}{g} \Delta V \rightarrow \Delta P = \rho a \Delta V \quad (2.8)$$

Onde, ΔP : Mudança na pressão do sistema;

ΔV : Mudança na velocidade do fluido;

ΔH : Mudança na altura efetiva da coluna de água;

a : Velocidade de propagação da onda no meio;

ρ : Densidade do fluido.

Vantagens:

- Desenvolvimento teórico muito simples, necessitando de poucos recursos para resolução.

Desvantagens:

- Negligencia o fator de atrito;

- Muito trabalhoso para sistemas complexos onde as aproximações podem provocar erros nos resultados finais;
- Precisa de ensaios para obter a variação da velocidade na válvula.

2.4.2 Método gráfico

Este método foi o primeiro método de análise aprimorado por Begeon (1961) e muito divulgado na literatura (Parmakian, 1963). Despreza o fator de atrito no seu desenvolvimento teórico, mas inclui uma correção para aplicação da fricção.

Este método é considerado uma das maneiras mais simples e eficazes de calcular um transiente hidráulico onde as simplificações feitas tornam possível sua aplicação. Os transientes são normalmente obtidos apenas nos pontos finais do duto e as perdas geradas por atrito são assumidas como concentradas em um ponto, na entrada ou na saída da tubulação dependendo do problema.

Vantagens:

- O método gráfico pode ser feito à mão livre ou através da utilização de software de desenho (por exemplo, AutoCAD);
- Uso simples onde o limite é uma válvula;
- Visualização imediata do fenômeno transiente.

Desvantagens:

- O resultado depende sempre da precisão da pessoa;
- Não se aplica a sistemas complexos com precisão;
- Para muitas condições de contorno é preciso comparar com soluções numéricas;
- Difícil de manter a precisão.

2.4.3 Método das Características

Este método converte as equações diferenciais parciais de continuidade e movimento em quatro equações diferenciais ordinárias, as quais são resolvidas numericamente usando técnicas de diferenças finitas e intervalos de tempo especificados (Gray, 1954; Streeter e Wylie, 1967). Esta é a abordagem mais popular para o tratamento de transientes

hidráulicos (Loeffler *et al.*, 1996), além de ser muito utilizados em estudos de validação e de pesquisa, como por exemplo, os de Taylor *et al.* (1997).

Vantagens:

- As condições de contorno são facilmente programadas;
- Os termos menores podem ser retidos;
- Sistemas muito complexos podem ser tratados;
- Tem melhor precisão que qualquer dos métodos de diferenças finitas;
- Todas as condições podem ser programadas;
- Método detalhado que tem resultados completos e podem ser impressos;
- Os critérios de estabilidade são firmemente estabelecidos.

Desvantagens:

- Requer vários passos no cálculo para resolver um problema típico de escoamento transiente;
- Complexo para ser aplicado manualmente.

2.4.4 Método algébrico

Este método tem duas equações características das ondas nos sentidos positivo e negativo, em um tubo de acesso; e duas equações não lineares que são obtidas algebricamente para cada tubo no sistema, o que, juntamente com as condições de contorno permitem a solução para incrementos iguais de tempo (Wylie e Streeter, 1993).

Vantagens:

- Apresenta uma boa precisão, considerando o efeito de fricção linear;
- Usa técnicas simples de programação;
- Elas são facilmente resolvidas para as etapas anteriores no tempo, e fornece a base para a síntese de escoamento transiente.

Desvantagens:

- Complexo para ser aplicado manualmente;

- A consideração de não linearidade das equações faz com que os efeitos do atrito não sejam distribuídos com precisão.

2.4.5 Método da onda plana

Este método usa um procedimento de análise de onda plana que mantém o controle de reflexões nas fronteiras (Wood *et al.*, 1966). Ele baseia-se no conceito físico, onde geração e propagação de ondas de pressão ocorrem como um resultado de uma perturbação no sistema de escoamento do tubo (válvula de fechamento, viagem da bomba, etc.). A onda de pressão, que representa uma pressão rápida e uma alteração no escoamento associado, viaja a velocidade do som no meio contido no duto e a onda é parcialmente transmitida e refletida em todas as discontinuidades no sistema da tubulação, sendo que também pode ser modificada pela resistência da parede do tubo. O método converte as equações diferenciais parciais que regem o fenômeno em equações diferenciais ordinárias, as quais são solucionadas por um método numérico.

Vantagens:

- Solução para pressões transientes e escoamentos em redes de distribuição de água, incluindo os efeitos da fricção do duto;
- Exige menos cálculos e menor tempo de execução.

Desvantagem:

- Complicado para ser aplicado manualmente.

2.4.6 Método implícito

Este método utiliza um procedimento de diferenças finitas, que pode ser usado para a solução de uma classe de escoamento de fluido instável, particularmente, em situações em que as forças de inércia não são tão importantes quanto os efeitos de armazenagem. Este método é formulado de tal maneira que o requisito de manter uma relação entre o intervalo de comprimento de Δx e o incremento de tempo Δt é pequeno (Amein e Chu, 1975).

Vantagem:

- Oferece esquema mais flexível do que outros métodos para lidar com sistemas complexos.

Desvantagem:

- É necessário o uso de uma solução de simulações para todas as incógnitas no sistema em cada etapa de tempo.

2.4.7 Método linear

Este método faz uma linearização do fator de atrito e obtém uma solução analítica para as duas equações diferenciais parciais da continuidade e da quantidade de movimento, e pode tratar de oscilações de onda senoidal. Os métodos de análise lineares podem ser colocados em duas categorias: o método da impedância, que são basicamente flutuações-oscilatórias, constantes criadas por alguma função de força, e o método de vibrações livres de um sistema de tubulação, que é um método que determina as frequências naturais do sistema e proporciona a taxa de amortecimento de oscilações quando a função de força é interrompida (Wylie *et al.*, 1993).

Vantagem:

- Muito útil para problemas de escoamento oscilatório cuja solução requer métodos lineares (solução de onda senoidal).

Desvantagens:

- Complexo para ser aplicado manualmente;
- Em casos diferentes é mais eficiente que o Método das Características.

2.4.8 Método de perturbação

Neste método o fator de atrito não linear é expandido em uma série para permitir a determinação explícita, além de fazer uma determinação analítica da velocidade do transiente no duto. As soluções são obtidas em formas funcionais adequadas para a engenharia, como a determinação dos valores críticos de velocidade e pressão, suas localizações ao longo da tubulação, e seus tempos de ocorrência (Walski *et al.*, 2003).

2.4.9 Outros métodos

Ao longo do tempo ocorreu o desenvolvimento matemático de novos métodos numéricos, tais como: método de elementos finitos (Taylor *et al.*, 1997), métodos dos elementos de contorno (Loeffler *et al.*, 1998) e os métodos de malha, além dos novos desenvolvimentos na área de informática. Eles têm permitido o desenvolvimento de programas comerciais, tais como os programas: Pipeline, Stoner, Olga, Ledaflo, Pipeflo dinâmico, Pipephase Tacite, sendo novas e ferramentas que permitem uma melhor visualização do fenômeno transiente em sistemas complexos e com diferentes condições de contorno, além de permitir uma análise mais avançada e detalhada.

No Anexo A se apresenta uma breve descrição geral de alguns programas comerciais com suas respectivas vantagens, estes permitem fazer um análise para escoamentos monofásicos ou multifásicos, que vai ser determinado pelo sistema hidráulico analisado.

2.5 EXEMPLOS DE ACIDENTES EXTREMOS GERADOS PELO FENÔMENO TRANSIENTE NO MUNDO

2.5.1 Usina hidroelétrica - Oigawa, Japão

A explosão do conduto forçado na usina hidroelétrica ocorreu devido a um excesso de pressão causado por erros operacionais e pelo mau funcionamento dos equipamentos, resultando na morte de três funcionários e meio milhão de dólares de prejuízos (Chaudhry, 1988).

O colapso do conduto forçado foi devido à explosão de uma seção a montante. O escoamento descontrolado causado pela explosão provocou a queda da linha piezométrica criando vazio e conseqüente o colapso do duto. Nas Figuras 2.2 e 2.3 se apresenta o dano e o colapso do duto o qual foi gerado pela sobrepessão e sub pressão gerada pelo fenômeno transiente no duto.

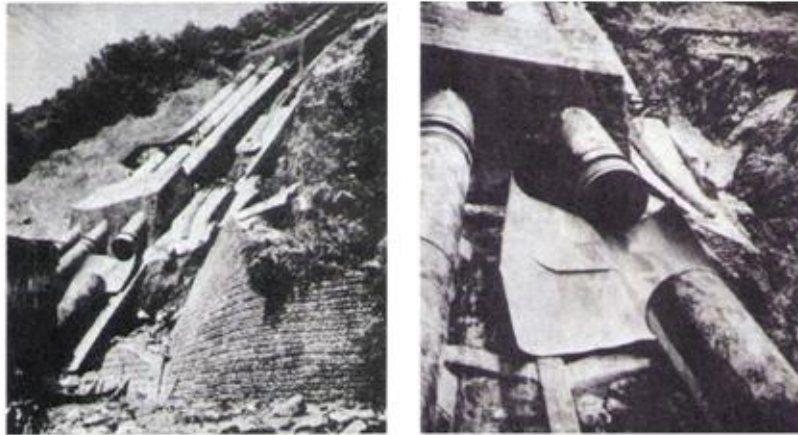


Figura 2.2 – Dano no conduto forçado gerado pela sobrepressão. Usina hidroelétrica – Oigawa, Japão (Fonte: Chaudhry, 1988).

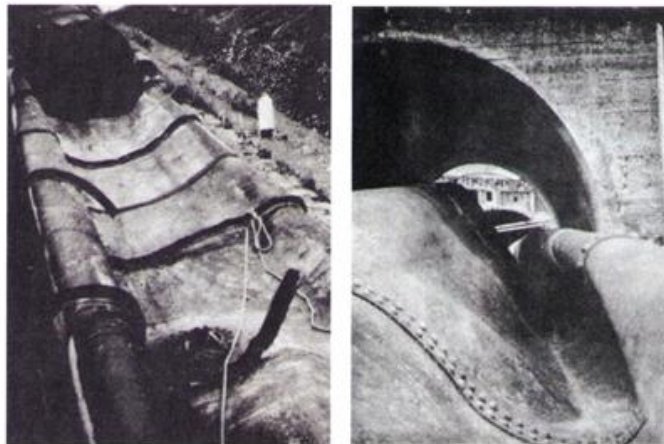


Figura 2.3 – Colapso do conduto forçado gerado pela sub pressão. Usina hidroelétrica – Oigawa, Japão (Fonte: Chaudhry, 1988).

2.5.2 Usina hidrelétrica - Estados Unidos

Acidente ocasionado por uma explosão na válvula da turbina de entrada da unidade 2. O conduto forçado da unidade 2 falhou no poço de inspeção depois do fechamento da válvula da turbina em menos três segundos. Isto aconteceu durante a manutenção da válvula. A rachadura foi de 3.7 m de comprimento e 76 milímetros no ponto mais largo (Chaudhry, 1988). Na Figura 2.4 observa se a rachadura no duto gerada pelo fenômeno transiente.

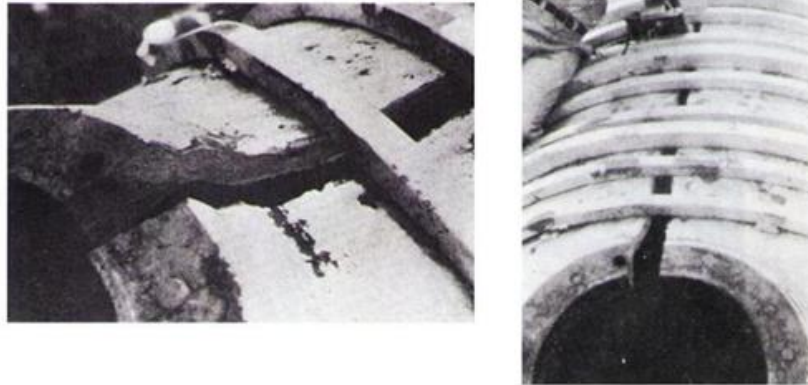


Figura 2.4 – Rachadura no conduto forçado gerado pela pressão positiva. Usina hidroelétrica – Estados Unidos (Fonte: Chaudhry, 1988).

2.5.3 Usina Hidrelétrica – Arequipa, Peru

Flutuações de pressão causadas pelo entupimento do sistema de controle da válvula esférica resultaram na falha das juntas de soldagem do conduto forçado, gerando a fadiga do material. Estas variações de pressão danificaram o conduto forçado da Usina Hidrelétrica de Arequipa, Peru (Chaudhry, 1988). Na Figura 2.5 observa se o deslocamento horizontal do duto gerado pelo fenômeno transiente.



Figura 2.5 – Deslocamento horizontal do duto. Usina Hidrelétrica de Arequipa, Peru (Fonte: Chaudhry, 1988).

2.5.4 Usina Hidrelétrica – Sayano – Shushenskaya, Rússia.

Esta é uma das maiores hidroelétricas do mundo cuja represa se eleva a 245m e cuja extensão é de 1 km cortando o rio Yenisei. A referida usina era composta de 10 turbinas

tipo Francis, com uma potência operacional de 650 MW, velocidade nominal de 142.86 rpm, queda de 194m, peso do rotor de 156 ton. e diâmetro de 6.77m. No dia 17 de agosto de 2009, um aumento súbito da pressão na turbina 2 gerou o deslocamento vertical da mesma devido a um fechamento súbito de válvula. Isto gerou um extraordinário golpe de aríete levantando o equipamento de cerca de 900 toneladas (Cruz, 2009).

Danos e consequências:

- 76 pessoas mortas;
- Os custos com os danos foram de pelo menos US\$ 310 milhões;
- Um longo tempo (em torno de 20 meses) para reparar os danos;
- A produção de mais de 500 mil ton. de alumínio foram perdidas;
- Uma grande massa de óleo contaminou as águas do rio.

Na Figura 2.6 se apresenta a localização da usina hidroelétrica, vista em elevação (esquerda) e em plano (direita).



Figura 2.6 – Localização da Usina Hidrelétrica (Fonte: Obtida em site {4} e {5}).

Principais hipóteses acerca da sequência do acidente:

- Repentino fechamento da comporta da turbina 2;
- Potente golpe de aríete na carcaça e no duto, causando o colapso de ambos;
- Retorno da onda de choque causando a destruição das estruturas de concreto acima da carcaça da turbina;
- Pressão das águas ascendentes na casa de força, causando elevação e dispersão das estruturas e outras partes;
- Rápida inundação da casa de máquinas.

Nas Figuras 2.7 e 2.8 se mostram os lugares onde aconteceram os principais danos na usina hidroelétrica, com imagens antes (esquerda) e depois (direita) de acontecer o fenômeno.



Figura 2.7 – Casa de máquinas antes e depois do acidente (Fonte: Cruz, 2009).



Figura 2.8 – Localização do lugar onde se apresentou o golpe de aríete (Fonte: Cruz, 2009).

Possíveis causas do súbito bloqueio da água:

- Uma peça de grande porte teria penetrado na turbina e se manteve presa, impedida de passar pelas palhetas da turbina.
- A peça teria girado com a turbina golpeando as palhetas da válvula de admissão causando o seu fechamento em uma fração de segundo.
- Ruptura da tubulação de óleo do motor que movimenta a válvula-palhetas de admissão de água à turbina.
- Ruptura sequencial das conexões da válvula-palhetas, e conseqüente fechamento da válvula por pressão da água.

3 FORMULAÇÃO TEÓRICA DE TRANSIENTES DE PRESSÃO E VELOCIDADE EM DUTOS ELÁSTICOS

3.1 INTRODUÇÃO

O fenômeno transiente em um conduto forçado é tratado como um problema unidimensional de parâmetros distribuídos que cumprem determinadas hipóteses e simplificações (Santos, 2010). O modelo matemático inercial elástico utilizado no desenvolvimento desta dissertação considera a elasticidade do fluido e do duto. Esse tipo de fenômeno é regido por equações diferenciais parciais hiperbólicas não-lineares, as quais apresentam soluções numéricas no domínio do tempo ou da frequência.

Apresentam-se as hipóteses e simplificações, as principais equações que regem o fenômeno como a equação da continuidade, quantidade de movimento e de estado, além de expressões para o cálculo do fator de atrito, da celeridade das ondas transientes de pressão e da velocidade, nas quais as propriedades mecânicas e físicas do duto e do fluido exercem uma grande influência.

A solução para as equações que regem o fenômeno transiente vai ser tratada mediante um método numérico denominado “Método das Características”. As equações diferenciais parciais são transformadas em equações diferenciais totais e solucionadas pela técnica das diferenças finitas de primeira ordem utilizando o método de intervalos de tempos especificados (Streeter e Wylie, 1967). Uma importante vantagem deste método é sua ampla flexibilidade para a introdução das condições de contorno, as quais também vão ser abordadas neste capítulo.

Neste capítulo são desenvolvidas implementações no programa computacional TRANSPETRO-1D, elaborado por Nascimento (2002), introduzindo as propriedades físicas e mecânicas do duto, as propriedades físicas do fluido e a inclinação do duto. O desenvolvimento teórico apresentado foi baseado em Streeter e Wylie (1967) e Nascimento (2002).

3.2 HIPÓTESES E SIMPLIFICAÇÕES

As equações da lei da quantidade de movimento e da conservação da massa admitem as seguintes simplificações e hipóteses (Covas, 2003):

- escoamento monofásico, homogêneo e ligeiramente compressível;
- escoamento unidimensional (1-D) com um perfil pseudouniforme de cada seção transversal do duto;
- São excluídos os efeitos termodinâmicos, uma vez que a variação da temperatura é desprezível comparada com as variações de pressão e vazão;
- O material do duto tem um comportamento reológico linear;
- A interação fluido-estrutura é negligenciada;
- Não considera o fenômeno de degasagem (ar dissolvido no fluido);
- O duto tem área de seção transversal constante e sem escoamento lateral.

3.3 EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

As equações governantes do problema transiente em dutos são:

Equação da continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.1)$$

Equação da quantidade de movimento

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \vec{V} \nabla(\vec{V}) + \nabla(P) - \mu_f \left[\Delta \vec{V} + \frac{1}{3} \nabla(\nabla \cdot \vec{V}) \right] = 0 \quad (3.2)$$

Equação de estado

$$f(P, \rho) = cte \leftrightarrow \tilde{P} = \tilde{\rho} \cdot a^2 \text{ (linearizada)} \therefore a^2 = \frac{k}{\rho} \quad (3.3)$$

Onde, ρ : Densidade do fluido;

\vec{V} : Vector de velocidade de escoamento;

μ_f : Viscosidade cinemática do fluido;

P : Pressão do fluido;

k : Módulo de expansão volumétrica do fluido;

\tilde{P} : Pressão variável do fluido;

∇ : Divergente;

$\tilde{\rho}$: Densidade variável do fluido;

a : Velocidade da onda transiente no meio.

As três equações determinam a pressão (P), a velocidade (V) e a densidade do fluido (ρ), para um determinado ponto no duto. Assim temos um sistema matematicamente determinado com solução real, devido a se tratar de um fluxo unidimensional os vetores de pressão e velocidade se convertem em escalares.

Após algumas simplificações e operações algébricas das Equações (3.1), (3.2) e (3.3), obtém-se as equações diferenciais quase-lineares para escoamentos em regime transiente em circuitos tubulares unidimensionais (com $L \gg D$, ondas planas).

Equação de continuidade para dutos circulares

$$V \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3.4)$$

onde,

$$a^2 = \frac{k/\rho}{\left(1 + V_0/a\right)\left(1 + (k/E)(D/e)C\right)} \quad (3.5)$$

Como o termo V_0/a é muito pequeno ($V_0 \ll a$), pode-se desprezá-lo, obtendo a seguinte expressão, Equação (3.6):

$$a = \frac{\sqrt{k/\rho}}{\sqrt{1 + (k/E)(D/e)C}} \quad (3.6)$$

onde, k : Módulo de elasticidade volumétrica do fluido;

ρ : Densidade do fluido;

E : Módulo de elasticidade do material;

D : Diâmetro interno do duto;

e : Espessura da parede do duto;

C : Constante adimensional função das propriedades elásticas do tubo (dimensões de seção transversal, condições de ancoragem da tubulação, coeficiente de Poisson).

$$C = \frac{1}{\left(1 + \frac{e}{D}\right)} \left[1 + 2 \frac{e}{D} (1 + \mu) \left(1 + \frac{e}{D}\right) \right] \quad (3.7)$$

Adicionalmente apresenta-se todo o desenvolvimento teórico e matemático para a Equação (3.7) no Anexo C. Aplica-se a um duto de parede espessa ou delgada com juntas de expansão em seus dois extremos. É importante ressaltar que se utiliza essa expressão com o objetivo de representar um cálculo prático consistente na consideração da celeridade da onda transiente.

Equação de quantidade de movimento para dutos circulares

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \cdot \text{sen}(\alpha) + \frac{f \cdot V \cdot |V|}{2D} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (3.8)$$

A Equação Swamee-Jain é utilizada para calcular diretamente o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach para um duto. Ela fornece valores próximos do experimental e da expressão implícita de Colebrook-White (Towler, 2012).

$$f(V, D, \nu, \varepsilon) = \frac{0.25}{\left(\log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{\text{Re}(V, D, \rho, \mu_f)^{0.9}} \right) \right)^2} \quad (3.9)$$

Onde, f : Coeficiente do Fator de Atrito Linear;

ε : Rugosidade relativa do material;

D: Diâmetro interno do duto;

V: Velocidade do fluido;

Re: Número de Reynolds;

ρ : Densidade do fluido;

α : Ângulo de inclinação do duto;

μ_f : Viscosidade dinâmica do fluido.

$$\text{Re} = \frac{VD\rho}{\mu_f} \quad (3.10)$$

A Equação (3.9) calcula a magnitude do fator de atrito para escoamentos permanentes. Na realidade, o modelo modela o comportamento de um escoamento transiente. Pesquisas estão sendo desenvolvidas para o Coeficiente do Fator de Atrito Linear em escoamentos transientes (Santos, 2010). O Anexo B apresenta informação e recomendações acerca deste fenômeno.

3.4 MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS GERAL

As Equações (3.4) e (3.8) são as equações diferenciais parciais, as quais têm duas variáveis dependentes, pressão e velocidade que variam no espaço e no tempo. Para fazer o desenvolvimento do Método das Características temos as equações da continuidade e da quantidade do movimento, respectivamente:

$$L_1 = V \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3.11)$$

$$L_2 = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \text{sen}(\alpha) + \frac{fV|V|}{2D} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (3.12)$$

A combinação linear entre as Equações (3.11) e (3.12), através do multiplicador λ , resulta:

$$L_1 + \lambda L_2 = \lambda \left[\frac{\partial P}{\partial x} \left(V + \frac{1}{\lambda \rho} \right) + \frac{\partial P}{\partial t} \right] + \frac{\partial V}{\partial t} (V + \lambda \rho a^2) + \frac{\partial V}{\partial x} + g \text{sen}(\alpha) + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (3.13)$$

Logo se conclui que:

$$\lambda = \pm \frac{1}{\rho a} \quad (3.14)$$

$$\frac{dx}{dt} = V \pm a \quad (3.15)$$

Ao substituir-se as Equações (3.14) e (3.15) na Equação (3.13) e após um rearranjo, as equações características tomam a seguinte forma:

$$a^+ = \begin{cases} \frac{1}{\rho a} \frac{dP}{dt} + \frac{dV}{dt} + g \operatorname{sen}(\alpha) + \frac{fV|V|}{2D} = 0 & (3.16) \\ \frac{dx}{dt} = V + a & (3.17) \end{cases}$$

$$a^- = \begin{cases} -\frac{1}{\rho a} \frac{dP}{dt} + \frac{dV}{dt} + g \operatorname{sen}(\alpha) + \frac{fV|V|}{2D} = 0 & (3.18) \\ \frac{dx}{dt} = V - a & (3.19) \end{cases}$$

3.4.1 Método das diferenças finitas

Para a solução das equações linhas características, Equações (3.16) e (3.18) se utilizam das diferentes técnicas. Este trabalho usa o método das diferenças finitas. Primeiro se apresenta como é o desenvolvimento do método no plano (x-t), na Figura 3.1 onde as curvas características a^+ e a^- são conhecidas como linhas características. Supõem-se conhecidas as condições (P,V,x,t) nos pontos PR e PS, o problema se resume em conhecer as condições desconhecidas (P,V) em PP, ou seja, numa posição média entre esses pontos após um determinado passo de tempo Δt .

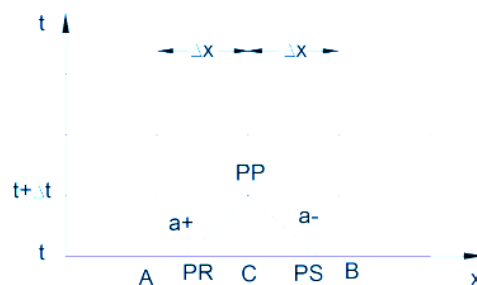


Figura 3.1 - Método das diferenças finitas (Nascimento, 2002).

Linha característica a^+

$$V_{PP} - V_{PR} - \frac{1}{\rho a} (P_{PP} - P_{PR}) + g(t_{PP} - t_{PR}) \text{sen}(\alpha) + \frac{f}{2D} V_{PR} |V_{PR}| (t_{PP} - t_{PR}) = 0 \quad (3.20)$$

Linha característica a^-

$$V_{PP} - V_{PS} - \frac{1}{\rho a} (P_{PP} - P_{PS}) + g(t_{PP} - t_{PS}) \text{sen}(\alpha) + \frac{f}{2D} V_{PS} |V_{PS}| (t_{PP} - t_{PS}) = 0 \quad (3.21)$$

Das Equações (3.20) e (3.21) resultam as seguintes expressões de pressão e de velocidade no ponto PP:

$$V_{PP} = \frac{1}{2} \left[V_{PR} + V_{PS} + \frac{1}{\rho a} (P_{PR} - P_{PS}) - 2g\Delta t \text{sen}(\alpha) - \frac{f\Delta t}{2D} (V_{PR} |V_{PR}| + V_{PS} |V_{PS}|) \right] \quad (3.22)$$

$$P_{PP} = \frac{1}{2} \left[P_{PR} + P_{PS} + (\rho a (V_{PR} - V_{PS})) - \frac{f\Delta t}{2D} (V_{PR} |V_{PR}| - V_{PS} |V_{PS}|) \right] \quad (3.23)$$

3.4.2 Método das Características de Intervalos de tempo especificados

A solução temporal utiliza o Método dos Intervalos de Tempo especificados (Streeter e Wylie, 1967). A solução transiente procede do conhecimento do estado de pressão e velocidade no regime permanente. Desta forma, é possível determinar a pressão e velocidade no ponto C mediante a interpolação entre os pontos A e B.

Antes de iniciar o regime de escoamento transiente no sistema, este apresenta um regime de escoamento permanente, razão pela qual é possível conhecer as condições de pressão e velocidade no ponto C mediante interpolação linear entre os pontos A e B. Depois de se fazer um desenvolvimento matemático, se obtém as expressões para determinar o valor da magnitude e da pressão nos pontos PR e PS.

$$V_{PR} = V_C - (\theta a (V_C - V_A)) \quad (3.24)$$

$$V_{PS} = V_C - (\theta a (V_C - V_B)) \quad (3.25)$$

$$P_{PR} = P_C - (\theta a (P_C - P_A)) \quad (3.26)$$

$$P_{PS} = P_C - (\theta a (P_C - P_B)) \quad (3.27)$$

onde, θ : Taxa de variação da malha de pontos.

$$\theta = \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (3.28)$$

A estabilidade e convergência do método são asseguradas impondo-se uma condição no tempo, Equação (3.29). Para modelar sistemas complexos (com dois ou mais dutos) o incremento do tempo (Δt) deve ser o mesmo para todos onde o objetivo é ter distâncias mínimas entre as secções a fim de poder capturar no tempo a evolução do fenómeno transiente.

$$\Delta t = \frac{L_j}{(V_j + a_j) E_j} \quad (3.29)$$

Onde, L_j : Comprimento do duto j.

E_j : Módulo de elasticidade do material;

V_j : Velocidade do escoamento no duto j;

a_j : Velocidade da onda de propagação no meio no duto j.

3.4.3 Introdução das condições de contorno

A partir das Equações (3.20) e (3.21) podem ser obtidas as equações de contorno correspondentes a uma dada condição de contorno. Utiliza-se então a técnica de diferenças finitas nas duas linhas características para os contornos apresentadas na Figura 3.2. As expressões das condições de contorno permitem a solução numérica do problema transiente (Nascimento, 2002).

A pressão e velocidade nos pontos C, PR e PS são conhecidas inicialmente no instante t_0 (regime permanente). Adota-se uma notação de índices duplos ii , número do tubo e secção do tubo, respectivamente.

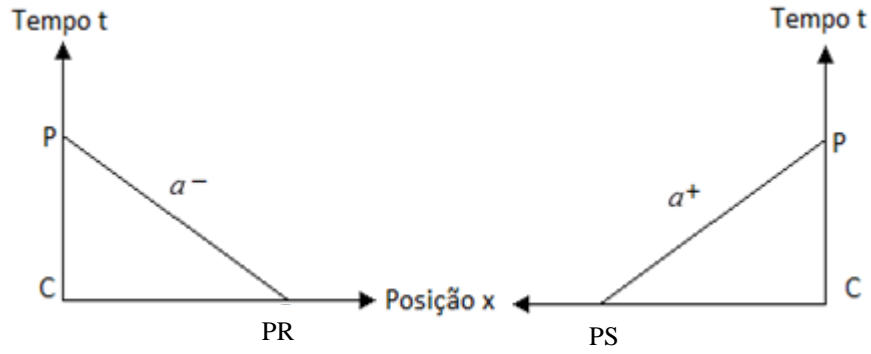


Figura 3.2 - Linhas Características nos contornos.

Para uma condição de contorno a montante (à esquerda), na seção 0 do tubo j , a Equação (3.28) pode ser apresentada como:

$$V_{PPj,0} = V_{PSj} + \frac{1}{\rho a_j} (P_{PSj,0} - P_{PSj}) - g \Delta t \text{sen}(\alpha_j) - \frac{f_j}{2D_j} V_{PSj} |V_{PSj}| \Delta t \quad (3.30)$$

Reescrevendo a Equação (3.30), separasse a mesma em dois termos, obtendo-se as seguintes expressões.

$$C_1 = V_{PSj} - \frac{1}{\rho a_j} P_{PSj} - g \Delta t \text{sen}(\alpha_j) - \frac{f_j}{2D_j} V_{PSj} |V_{PSj}| \Delta t \quad (3.31)$$

$$C_2 = \frac{1}{\rho a_j} \quad (3.32)$$

Assim da Equação (3.30) se tem a seguinte expressão:

$$V_{PPj,0} = C_1 + C_2 P_{PPj,0} \quad (3.33)$$

C_1 e C_2 são funções ou quantidades conhecidas e constantes durante cada passo de tempo.

Para uma condição de contorno a jusante (à direita), na seção N do tubo j , a Equação (3.30) se torna:

$$V_{PPj,N} = V_{PRj} + \frac{1}{\rho a_j} (P_{PRj,N} - P_{PRj}) - g \Delta t \text{sen}(\alpha_j) - \frac{f_j}{2D_j} V_{PRj} |V_{PRj}| \Delta t \quad (3.34)$$

Reescrevendo a Equação (3.34), separasse a mesma em dois termos, obtendo-se as seguintes expressões.

$$C_3 = V_{PRj} + \frac{1}{\rho a_j} P_{PSj} - g \Delta t \text{sen}(\alpha_j) - \frac{f_j}{2D_j} V_{PRj} |V_{PRj}| \Delta t \quad (3.35)$$

$$C_4 = \frac{1}{\rho a_j} \quad (3.36)$$

Assim, da Equação (3.30) se chega a seguinte expressão:

$$V_{PPj,N} = C_3 + C_4 P_{PPj,N} \quad (3.37)$$

C_3 e C_4 são funções ou quantidades conhecidas e constantes durante cada passo de tempo.

Para qualquer extremidade do duto só uma das Equações (3.33) ou (3.37) estará disponível para as duas variáveis V_{PP} ou P_{PP} . No caso do contorno á esquerda (montante) a Equação (3.33) é válida, mas no caso do contorno á direita (jusante) a Equação (3.37) que será válida. Para se solucionar as Equações (3.33) e (3.37) torna-se necessário se conhecer uma das variáveis (V e P) no ponto PP ou uma relação entre elas. Para as condições de contorno entre dutos se tem as seguintes expressões:

$$V_{PPj,N} = C_3 - C_4 P_{PPj,N} \quad (3.38)$$

$$V_{PP(j+1),0} = C_1 + C_2 P_{PP(j+1),0} \quad (3.39)$$

Os termos C_1 e C_2 estão associados ao duto $j+1$, enquanto os termos C_3 e C_4 estão associados a duto j .

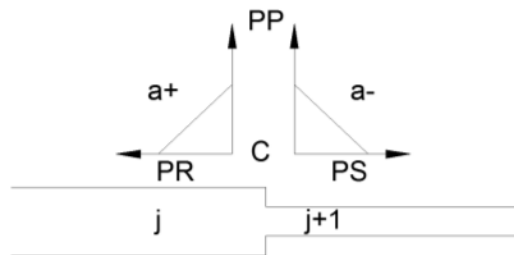


Figura 3.3 – Condição de contorno entre tubos (Nascimento, 2002).

A Figura 3.3 apresenta as condições entre dutos, no qual as Equações (3.38) e (3.39) são utilizadas para solucionar o problema nas quatro variáveis desconhecidas ($P_{PPj,N}$, $V_{PPj,N}$, $P_{PP(j+1),0}$ e $V_{PP(j+1),0}$).

3.4.3.1 Condição de Reservatório a nível fixo no início do sistema

Para o caso do reservatório de nível fixo ou pressão constante na extremidade inicial (Seção 0) a montante, a Equação (3.40) deve ser satisfeita. Neste sistema de Conexão tubo-reservatório se tem a seguinte condição:

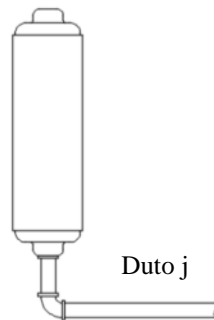


Figura 3.4 – Câmara de pressão fixa à montante.

$$P_{PPj,0} = P_0 \quad (3.40)$$

Substituindo a Equação (3.40) na Equação (3.33), tem-se:

$$V_{PPj,0} = C_1 + C_2 P_0 \quad (3.41)$$

3.4.3.2 Condições entre tubos – Mudança de Diâmetro

Esta condição pode ser implementada para dutos com variações em suas propriedades mecânicas (diâmetro e espessura do duto).

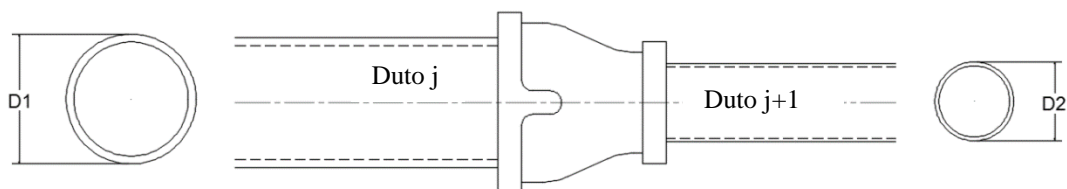


Figura 3.5 – Mudança de diâmetro.

Para este caso existe a necessidade de se obter, mais duas equações. Utiliza-se a equação da continuidade na junção do duto, obtendo-se a Equação (3.42).

$$V_{PPj,N}A_j = V_{PP(j+1),0}A_{j+1} \quad (3.42)$$

A pressão na junção é a mesma para qualquer tempo, obtendo a Equação (3.43).

$$P_{PPj,N} = P_{PP(j+1),0} \quad (3.43)$$

Após manipulações matemáticas chegam-se as seguintes expressões:

$$P_{PP(j+1),0} = \frac{A_j V_{PPj,N} - C_1 A_{j+1}}{C_2 A_{j+1}} \quad (3.44)$$

$$P_{PPj,N} = \frac{C_3 A_j - C_1 A_{j+1}}{C_2 A_{j+1} + C_4 A_j} \quad (3.45)$$

Substituindo a Equação (3.44) na Equação (3.39) se obtém a magnitude da variável $V_{PP(j+1),0}$, dada pela expressão:

$$V_{PP(j+1),0} = C_1 + C_2 \frac{A_j V_{PPj,N} - C_1 A_{j+1}}{C_2 A_{j+1}} \quad (3.46)$$

Substituindo a Equação (3.45) na Equação (3.38) se obtém a magnitude da variável $V_{PP(j+1),N}$, fornecida pela expressão:

$$V_{PPj,N} = C_3 - C_4 \frac{C_3 A_j - C_1 A_{j+1}}{C_2 A_{j+1} + C_4 A_j} \quad (3.47)$$

3.4.3.3 Condições entre tubos – Perda singular

A perda singular está localizada num determinado ponto. Ela pode ser levada em conta no Método das Características, considerando-se que ela tenha com um comportamento análogo ao de uma mudança abrupta de diâmetro.

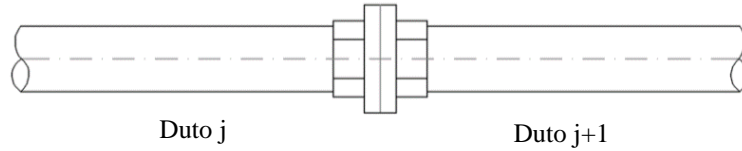


Figura 3.6 – Perda de pressão localizada.

Para se obter a pressão a jusante P_{0PS} , ou seja, após a singularidade (no início do duto $j+1$), aplica-se a Equação de Bernoulli:

$$P_{PPj,N} + \rho \frac{V_{PPj,N}^2}{2} = V_{PPj+1,0}^2 + \rho \frac{V_{PP(j+1),0}^2}{2} + K \frac{V_{PP(j+1),0}^2}{2} \quad (3.48)$$

Onde, K : Coeficiente de perda de pressão singular entre os tubos j e $j+1$.

Efetuando-se manipulações matemáticas, faz-se o respectivo processamento matemático para obter as seguintes expressões para o escoamento na direção positiva através da singularidade, Equação (3.49) com o sinal positivo, e para o escoamento na direção negativa com o sinal negativo.

$$V_{PPj,N} = \pm \frac{C_5}{2dH} \left(\sqrt{1 - \frac{4 \cdot dHC_6}{C_5^2}} - 1 \right) \quad (3.49)$$

Onde,

$$C_5 = \frac{C_4 \cdot A_j}{A_{j+1}} + C_2 \quad (3.50)$$

$$C_6 = C_4 \cdot C_1 + C_2 \cdot C_3 \quad (3.51)$$

O parâmetro C_6 determina a direção do escoamento, se ele é negativo a solução é dada pela Equação (3.49) com o sinal negativo, nos outros casos se utiliza o sinal positivo.

$$dH = C_2 C_4 \cdot \frac{\rho}{2} \left(K \left(\frac{A_j^2}{A_{j+1}^2} + 1 \right) - 1 \right) \quad (3.52)$$

Se o parâmetro dH é nulo se tem uma conexão em série sem perda singular.

Substituindo a Equação (3.49) dependendo do caso, na Equação (3.48), se obtém a magnitude da variável $V_{PP(j+1),0}$. Os valores para as demais variáveis são apresentados à continuação:

$$V_{PP(j+1),0} = \frac{V_{PPj,N} \cdot A_j}{A_{j+1}} \quad (3.53)$$

$$P_{PP(j+1),0} = \frac{V_{PP(j+1),0} - C_1}{C_2} \quad (3.54)$$

$$P_{PPj,N} = \frac{V_{PP(j+1),0} - C_1}{C_2} + \rho \frac{V_{PP(j+1),0}^2 (K+1)}{2} - \rho \frac{V_{PPj,N}^2}{2} \quad (3.55)$$

3.4.3.4 Condições entre tubos – Válvula na linha

Esta condição também pode ser tratada como um orifício no interior de um tubo. As expressões matemáticas relativas a este caso são dadas pelas seguintes equações:

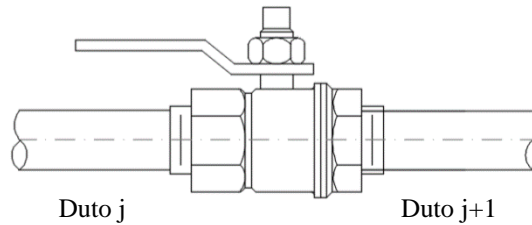


Figura 3.7 – Válvula na linha do sistema.

$$V_{PPj,N} = \pm \frac{-C_5 \cdot \left(\frac{C_2 A_j}{A_{j+1}} + C_4 \right) + \sqrt{\left[C_5 \left(\frac{C_2 A_j}{A_{j+1}} + C_4 \right)^2 \right] - 4 \cdot C_5 [C_2 C_3 + C_1 C_4]}}{2} \quad (3.56)$$

$$C_5 = \frac{\tau^2 V_{0j}^2}{\Delta P_0 C_2 C_4} \quad (3.57)$$

O parâmetro $(C_2 C_3) + (C_1 C_4)$ define a direção do escoamento. Se ele for maior ou igual a zero utiliza-se a Equação (3.56) com o sinal positivo, no caso contrário se utiliza o sinal negativo. Os valores para as demais variáveis são apresentados a seguir:

$$V_{PP(j+1),0} = \frac{A_j}{A_{j+1}} V_{PPj,N} \quad (3.58)$$

$$P_{PP(j+1),0} = \frac{V_{PP(j+1),0} - C_1}{C_2} \quad (3.59)$$

$$P_{PPj,N} = \frac{C_3 - V_{PPj,N}}{C_4} \quad (3.60)$$

3.4.3.5 Condições entre tubos – Chaminé de Equilíbrio

Esta é uma condição que reduz significativamente a amplitude de qualquer onda de pressão após sua passagem pelo mesmo.

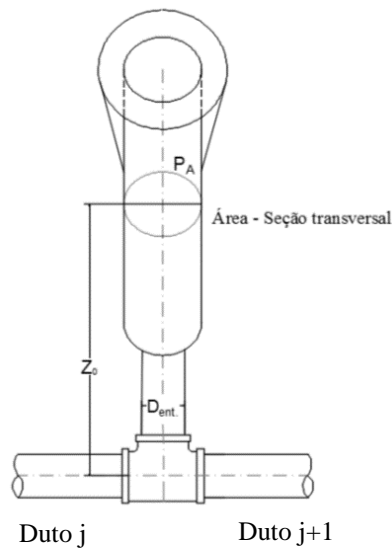


Figura 3.8 – Chaminé de equilíbrio entre dos dutos (modificado – Nascimento, 2002).

Para obter-se o sentido do escoamento na chaminé de equilíbrio, se utiliza o parâmetro ψ , o qual é determinado pela Equação (3.61), apresenta em baixo:

$$\psi = (1 + C_7 C_6 - 2C_8 C_5 C_6)^2 - 4C_8 C_6^2 (C_8 C_5^2 - P_C - \bar{z}_0 \rho g - C_7 C_5 - C_7 V_{ent}) \quad (3.61)$$

Onde,

$$C_5 = \frac{C_3 A_j - C_1 A_{j+1}}{A_{ent}} \quad (3.62)$$

$$C_6 = \frac{C_4 A_j + C_2 A_{j+1}}{A_{ent}} \quad (3.63)$$

$$C_7 = \rho g \frac{A_{ent}}{A_{ch}} \frac{\Delta t}{2} \quad (3.64)$$

$$C_8 = \frac{\rho}{2} \left(1 - \left(\frac{A_{ent}}{A_{ch}} \right)^2 \right) \quad (3.65)$$

Onde, P_A : Pressao atmosferica;

A_{ent} : Área do duto que Esferacta com a chamine de equilibrio;

V_{ent} : Velocidade no regime permanente;

A_j : Área do duto j;

A_{j+1} : Área do duto j+1.

Se o parâmetro ψ é maior que zero, o escoamento está entrando na chaminé de equilíbrio, sendo então a Equação (3.66) a expressão usada para determinar a variável P_p .

$$P_p = \frac{\sqrt{\psi} - (1 + (C_7 C_6) - (2C_8 C_5 C_6))}{2C_8 C_6^2} \quad (3.66)$$

Se o parâmetro ψ for menor que zero, o escoamento está entrando na chaminé de equilíbrio, sendo a Equação (3.67) a expressão usada para determinar a variável P_p .

$$P_p = \frac{\sqrt{\psi} + (1 + (C_7 C_6) + (2C_8 C_5 C_6))}{2C_8 C_6^2} \quad (3.67)$$

Se $A_{ent} = A_{ch}$ a variável C_8 é igual a zero, e a Equação (3.68) fornecerá a expressão para se determinar a variável P_p .

$$P_p = \frac{P_C + (\bar{z}_0 \rho g) + C_7 (C_5 + V_{ent})}{1 + C_7 C_6} \quad (3.68)$$

A chaminé de equilíbrio tem sistemas de proteção para evitar a saída do líquido quando se apresenta um acréscimo excessivo de pressão. A Equação (3.69) determina o valor máximo do nível (h) que o líquido pode alcançar.

$$h \geq \frac{P_p - P_c}{\rho g} \quad (3.69)$$

Se o mecanismo de segurança fecha, na chaminé de equilíbrio a pressão no ponto é determinada pela Equação (3.70). Dependendo da situação que se apresente, se determina a variável P_p e as demais variáveis com as seguintes expressões:

$$V_{PPj,N} = C_3 - C_4 P_p \quad (3.70)$$

$$V_{PP(j+1),0} = C_1 + C_2 P_p \quad (3.71)$$

3.4.3.6 Condições entre tubos – Conexão em Galho (Ramificação)

Nesta condição se adiciona um duto no qual parte do fluido pode também percorrê-lo como se ilustra na Figura 3.9.

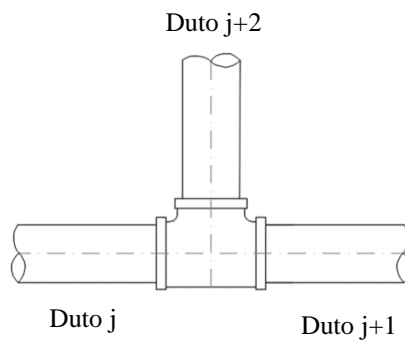


Figura 3.9 – Conexão em Galho.

As variáveis P e V são determinadas pelo seguinte conjunto de equações:

Para o tubo j :

$$V_{PPj,N} = C_3 - C_4 P_{PPj,N} \quad (3.72)$$

Para o tubo $j+1$:

$$V_{PPj+1,0} = C_1 + C_2 P_{PPj+1,0} \quad (3.73)$$

Para o tubo j+2:

$$V_{PPj+2,0} = C_5 + C_6 P_{PPj+2,0} \quad (3.74)$$

No duto j+2 as variáveis C_5 e C_6 são constantes semelhantes às constantes C_1 e C_2 correspondentes ao duto j+1.

Depois de manipulações matemáticas com as equações expostas anteriormente, se determina a variável $P_{PPj,N}$ pela a Equação (3.75).

$$P_{PPj,N} = \frac{C_3 A_j - C_1 A_{j+1} - C_5 A_{j+2}}{C_4 A_j + C_2 A_{j+1} + C_6 A_{j+2}} \quad (3.75)$$

Na junção os dois dutos têm a mesma pressão, de acordo a essa hipótese se chega a Equação (3.76).

$$P_{PPj,N} = P_{PPj+1,0} = P_{PPj+2,0} \quad (3.76)$$

Substituindo a Equação (3.75) na Equação (3.76) em conjunto com as Equações (3.38), (3.39) e (3.74) se obtém a velocidade para cada duto.

3.4.3.7 Condições de final do sistema – Válvula à Jusante

Esta condição é determinada pela velocidade de fechamento da válvula na saída da tubulação. Caso ela seja fechada de uma forma instantânea, a condição de contorno imposta é V_s (velocidade de saída do fluido) é igual a zero. Quando se fecha esta válvula em função do tempo, a condição de contorno a jusante também varia no tempo. Assim a comporta (válvula) pode ser tratada como um orifício variável no tempo.

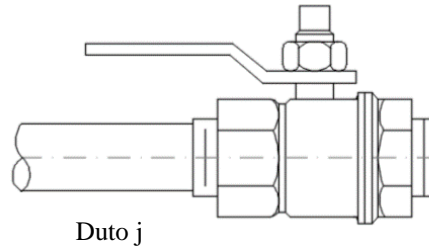


Figura 3.10 – Válvula no final à jusante.

Trata-se de uma condição localizada a direita e no final do sistema, e a equação que a representa é dada por:

$$V_{PPj,N} = C_3 + C_4 P_{PPj,N} \quad (3.77)$$

Ainda para esta condição se tem as seguintes expressões:

$$V_N = -\frac{C_4}{2} + \sqrt{\frac{C_4^2}{4} + C_3 C_4} \quad (3.78)$$

$$P_N = \frac{V_N^2 P_0}{V_0^2 \tau^2} \quad (3.79)$$

Os gráficos da forma da curva de fechamento, que é dada pelo coeficiente de abertura da válvula em função do tempo, podem ser determinados pela seguinte expressão:

$$\tau = \left(1 - \frac{t_i}{t_c}\right)^n \quad (3.80)$$

Onde, τ : Coeficiente de abertura da válvula;

t_i : Ponto da malha de tempo;

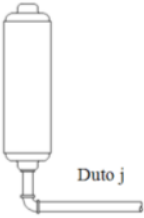
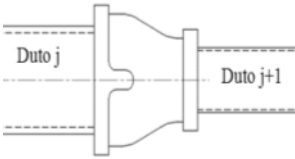
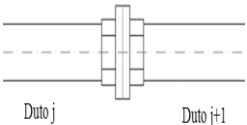
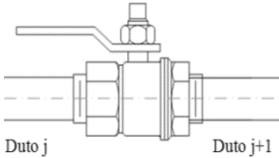
t_c : Tempo de fechamento da válvula;

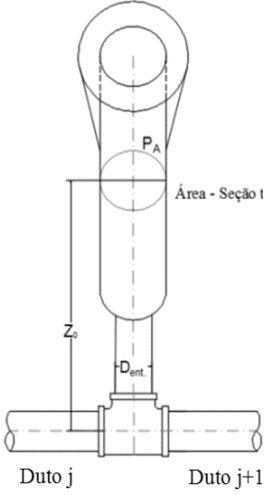
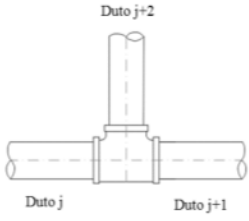
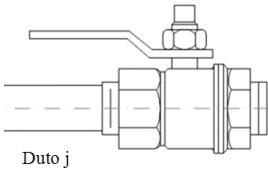
n : Exponente da curva.

Modificando-se a função de abertura da válvula, se modifica o valor de τ . Os novos valores de V_N e P_N são obtidos pelas Equações (3.8) e (3.86), anteriormente apresentados.

A continuação se apresenta a Tabela 3.1 com as condições de contorno utilizadas nesta dissertação.

Tabela 3.1 – Condições de contorno utilizadas

Condição de contorno	Ilustração gráfica	Equações de pressão	Equações de velocidade
Reservatório o nível fixo - Início do sistema		$P_{PPj,0} = P_0$	$V_{PPj,0} = C_1 + C_2 P_0$
Mudança de diâmetro – Condição entre tubos		$P_{PP(j+1),0} = \frac{A_j V_{PPj,N} - C_1 A_{j+1}}{C_2 A_{j+1}}$ $P_{PPj,N} = \frac{C_3 A_j - C_1 A_{j+1}}{C_2 A_{j+1} + C_4 A_j}$	$V_{PP(j+1),0} = C_1 + C_2 \frac{A_j V_{PPj,N} - C_1 A_{j+1}}{C_2 A_{j+1}}$ $V_{PPj,N} = C_3 - C_4 \frac{C_3 A_j - C_1 A_{j+1}}{C_2 A_{j+1} + C_4 A_j}$
Perda singular – Condição entre tubos		$P_{PP(j+1),0} = \frac{V_{PP(j+1),0} - C_1}{C_2}$	$V_{PP(j+1),0} = \frac{V_{PPj,N} \cdot A_j}{A_{j+1}}$
Válvula na linha do sistema – Condição entre tubos		$P_{PP(j+1),0} = \frac{V_{PP(j+1),0} - C_1}{C_2}$ $P_{PPj,N} = \frac{C_3 - V_{PPj,N}}{C_4}$	$V_{PP(j+1),0} = \frac{A_j}{A_{j+1}} V_{PPj,N}$

<p>Chaminé de equilíbrio – Condição entre tubos</p>		$P_p = \frac{\sqrt{\psi} - (1 + (C_7 C_6) - (2C_8 C_5 C_6))}{2C_8 C_6^2}$ $P_p = \frac{\sqrt{\psi} + (1 + (C_7 C_6) + (2C_8 C_5 C_6))}{2C_8 C_6^2}$ $P_p = \frac{P_c + (\bar{z}_0 \rho g) + C_7 (C_5 + V_{ent})}{1 + C_7 C_6}$	$V_{PPj,N} = C_3 - C_4 P_p$ $V_{PP(j+1),0} = C_1 + C_2 P_p$
<p>Conexão em Galho (Ramificação) – Condição entre tubos</p>		$P_{PPj,N} = \frac{C_3 A_j - C_1 A_{j+1} - C_5 A_{j+2}}{C_4 A_j + C_2 A_{j+1} + C_6 A_{j+2}}$ $P_{PPj,N} = P_{PPj+1,0} = P_{PPj+2,0}$	$V_{PPj,N} = C_3 - C_4 P_{PPj,N}$ $V_{PPj+1,0} = C_1 + C_2 P_{PPj+1,0}$ $V_{PPj+2,0} = C_5 + C_6 P_{PPj+2,0}$
<p>Válvula a Jusante - Final do sistema</p>		$P_N = \frac{V_N^2 P_0}{V_0^2 \tau^2}$	$V_{PPj,N} = C_3 + C_4 P_{PPj,N}$

3.5 ASPECTOS COMPUTACIONAIS

O programa TRANSPETRO 1-D foi desenvolvido com a teoria descrita neste presente estudo além da apresentada na dissertação de mestrado de Nascimento (2002). Destaca-se que, neste estudo, o código foi escrito em linguagem C++, com a utilização do programa Visual C++ 6.0, o qual permite a criação de recursos gráficos que facilita a interação programa-usuário.

3.5.1 Principais conceitos do visual C++ 6.0

O Visual C++ é um compilador que permite a criação de projetos de programas que incluem diversos arquivos simplesmente estruturados como o MFC (Microsoft Foundation Classes), equivalentes ao OWL (Object Window Library) Borland. Essas classes fornecem a programação do Windows sem usar a API do Windows diretamente porque as bibliotecas do Windows são agrupadas em classes C ++.

A linguagem de programação Visual C++ está subdividido em duas partes principais, classes e funções membro, esta última é uma sub-rotina orientada a objetos, a qual é responsável por uma única função que pode, por sua vez, chamar funções membro da mesma classe.

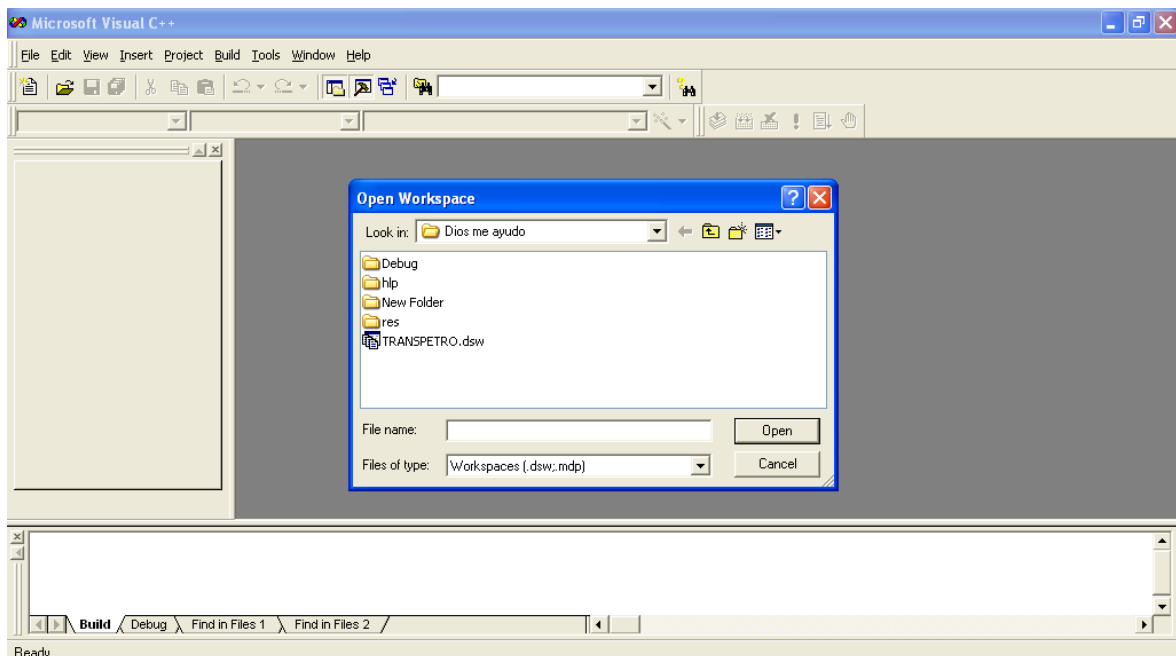


Figura 3.11 - Tela de programação do programa Visual C++.

3.5.2 Desenvolvimento do programa TRANSPETRO-1D

As primeiras rotinas computacionais foram apresentadas pelo Streeter e Wylie (1967). O Grupo de Dinâmica e Fluido Estrutura, baseado nestas rotinas, desenvolveu novos programas na linguagem computacional FORTRAN90: primeiro o TRANS (Pedroso *et al.*, 1994a) e posteriormente RETRANS (Neri e Pedroso, 1999), ambos orientados a problemas transientes em circuitos de reatores Nucleares. Com a experiência obtida na validação da formulação e a teoria empregada, elaborou-se um novo programa reorientado para problemas transientes do setor petrolífero chamado TRANSPETRO 1-D.

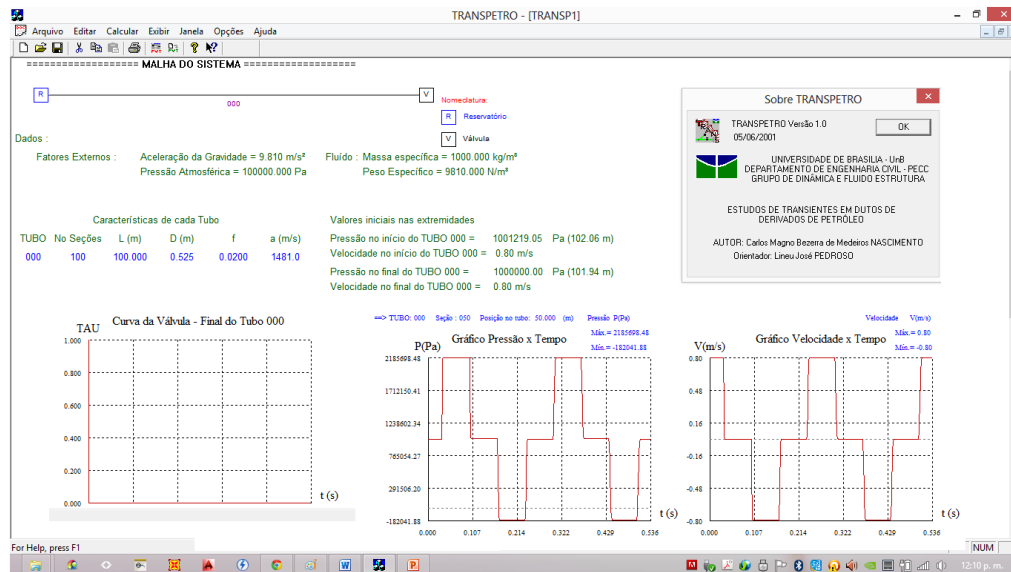


Figura 3.12 - Tela de exibição de TRANSPETRO-1D, caixa de diálogo e gráficos da curva da válvula, pressão e velocidade em função do tempo (modificado – Nascimento, 2002).

Dentre os estudos recentes focados na elaboração de um programa computacional que permite estudar o fenômeno transiente, se tem uma importante experiência acumulada com mais de duas décadas nesta área pelo Grupo de Dinâmica e Fluido-Estrutura (GDFE) da UnB, onde se tem gerado diferentes programas como TRANS (Pedroso *et al.*, 1993a), TRANS-II e TRANS-III (Pedroso *et al.*, 1994a), RETRANS (Neri e Pedroso, 1999) e TRANSPETRO-1D (Nascimento, 2002). A linguagem de programação Visual C++ esta subdivido em duas partes principais, classes e funções membro, esta ultima é uma sub-rotina orientada a objetos, a qual é responsável por uma única função, esta pode chamar funções membro da mesma classe para fazer parte dela.

3.5.3 Arquitetura do programa e principais funções membros

CTRANSPETROView é a classe principal no desenvolvimento do programa. É a responsável por chamar as demais classes com as propriedades físicas e mecânicas implementadas no programa e permite fazer a maioria dos cálculos matemáticos e a saída gráfica pela janela principal. As principais funções membro da classe são:

Calcular Manualmente: Utiliza além da entrada de dados via teclado ou mouse, outras funções membro e as outras classes para fazer os cálculos matemáticos do programa e gerar um arquivo de dados utilizado em outra função membro.

Calcular Arquivo de dados: Faz o mesmo trabalho que a função anterior. Contudo, a entrada de dados é gerada pelo arquivo de dados padrão.

Cálculos Preliminares: Determina a constante de passo de tempo com relação a todos os tubos que compõem o sistema.

VarCalcInterativos: Determina as variáveis de cálculo interativo, como o número do passo de tempo.

TerVálvulaF: Verifica a existência de válvulas no sistema, em caso afirmativo, determina a função Curva ou obtém $T_{válvula}$ com os dados de fechamento da válvula.

VelocidadeF: Calcula a velocidade na extremidade do sistema, a qual é utilizada na próxima função.

Permanente: Calcula as grandezas de pressão e velocidade ao longo do sistema no regime permanente ($t = 0$), executando tal tarefa no sentido do fim para o início do circuito.

Permanente2: Faz o mesmo trabalho que a função anterior, entretanto, executa o cálculo no sentido do início para o fim do sistema.

ArmPerm: Armazena os resultados do regime permanente.

InicioCC: Calcula ou atribui as condições de contorno no início do sistema.

Pinter: Calcula as variáveis de pressão e velocidade para os pontos internos (PR e PS) do(s) tubo(s) para atribuição nas equações características.

Contorno: Calcula e atribui as condições de contorno entre tubos e determina as variáveis de pressão e velocidade nos mesmos.

FinalCC: Faz o mesmo trabalho que a função anterior, só que relaciona as condições de contorno no final do sistema.

ArmTrans: Armazena os resultados de pressão e velocidade no regime transiente.

EscreveARQ: Escreve o arquivo de resultados para as seções dos tubos.

INTERFACE: Responsável pela saída gráfica dos resultados. Elabora os gráficos da pressão e velocidade em função do tempo com os resultados obtidos por outras funções membro.

Na figura 3.13 apresenta-se a arquitetura simplificada do programa TRANSPETRO-1D, nesta observa a interação entre cada uma das funções membro descritas.

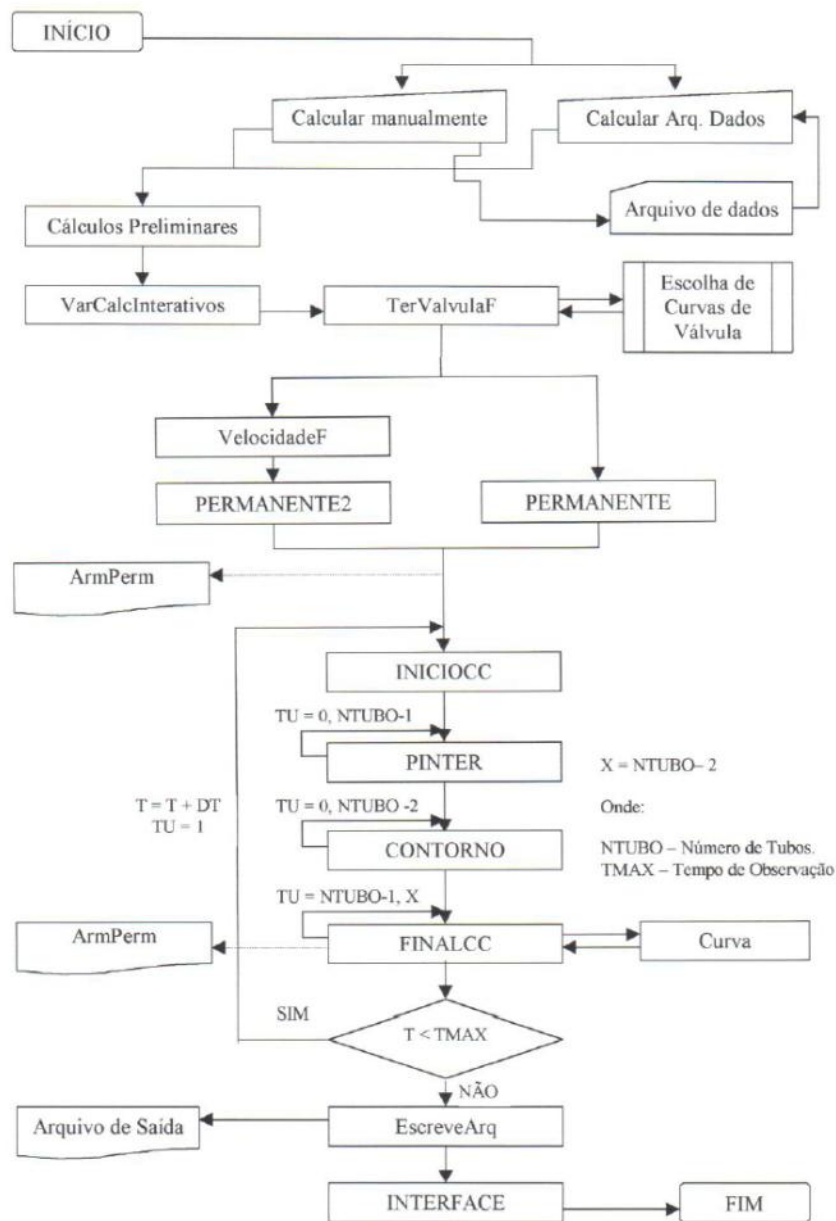


Figura 3.13 – Arquitetura do programa (Nascimento, 2002).

3.5.4 Descrição da contribuição realizada

No programa computacional TRANSPETRO-1D foram feitas as seguintes contribuições:

- Entrada de dados: Implementou-se nas janelas de entrada as opções para ingressar as propriedades físicas do fluido e as propriedades físicas e mecânicas do duto incluindo a inclinação do mesmo. Nas Figuras 1.14 e 1.15 se apresenta as implementações no programa.

The 'Características Gerais' dialog box is divided into several sections. On the left, 'Número de Tubos' is set to 1, and 'Tempo de Observação (s)' is empty. Below this, 'Características do Fluido' has 'Líquido' selected. 'Massa Específica (kg/m³)' is 1000, 'Viscosidade C (Pa*s)' is 0.001, and 'Expansão V (Pa)' is 100000000. On the right, 'Fatores Externos' includes 'g (m/s²)' at 9.81, 'Pressão Atmosférica (Pa)' at 100000, 'Velocidade P (m/s)' at 0.08, 'Pressão P (Pa)' at 1000000, and 'Peso Esp. (N/m²)' at 9180.0. 'OK' and 'Cancel' buttons are on the right side.

Figura 3.14 – Implementações nas características do fluido e dos fatores externos.

The 'Características do Tubo' dialog box is titled 'Tubo No 0'. It contains input fields for 'Comprimento L (m)', 'Diâmetro D (m)', 'Inclinacao (deg)', 'Modulo E (Pa)', 'Espesura (m)', 'Rugosidade (m)', and 'Coef. Poisson', all set to 0. On the right, 'Reynolds =', 'C =', 'A (m/s) =', 'Fator de Atrito f = 0', 'Velocidade do Som', and 'a (m/s) ='. An 'OBS:' box at the bottom right contains the text 'Tubo 0 = Tubo Inicial'. 'OK' and 'Cancel' buttons are on the right side.

Figura 3.15 - Implementações nas características do duto e dos fatores transientes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES (EXEMPLOS E APLICAÇÕES)

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pelo programa TRANSPETRO- 1D na simulação de diferentes sistemas hidráulicos. É realizada a comparação com os dados experimentais colhidos em publicações científicas. Os resultados vão ser apresentados de acordo com a seguinte subdivisão:

- a) Validação: Apresenta uma comparação entre os resultados experimentais, analíticos e numéricos dependendo do caso de estudo.
- b) Influência de parâmetros: Apresenta uma análise unidimensional fazendo um conjunto de simulações com intervalos de valores de cada uma das propriedades principais envolvidas neste fenômeno, tais como propriedades mecânicas e físicas do duto (geometria e materiais), as propriedades físicas do fluido (densidade e módulo de compressibilidade), juntamente com as condições de contorno envolvidas no sistema, tais como válvulas, com suas curvas típicas e tempo de fechamento característico, entre outros.
- c) Exemplos de casos em circuitos reais. Utilizam-se casos existentes, gerando novas condições e fenômenos nele, como a inclinação do duto e a cavitação. Se apresentam os resultados numéricos obtidos pelo programa TRANSPETRO-1D.
- d) Simulações. Reproduzem-se circuitos tubulares existentes em reatores nucleares e hidroelétricas. Através das devidas simplificações, se criam os modelos adequados por estas simulações.

Para todos os casos serão descritos a modelização utilizada, os dados e os resultados alcançados. Sempre que possível, as simulações serão comparadas com resultados da literatura, experimentos, e/as soluções analíticas. Finalmente para cada caso haverá uma interpretação, discussões e comentários sobre os resultados obtidos. Alguns dos desenhos apresentados neste capítulo são obtidos e modificados a partir das bibliotecas existentes no programa computacional AutoCAD, a faculdade de tecnologia da Universidade de Brasília conta com este programa.

4.1 VALIDAÇÃO

Nesta seção serão apresentados casos de base que servem para os primeiros testes, validações, e a qualificação do programa TRANSPETRO-1D.

4.1.1 Caso 01 – Cavidade conectada a um duto reto

Este experimento foi realizado por Contractor (1965), e serve como base para a comparação dos resultados. A Figura 4.1 mostra um esquema do experimento em que se tem uma câmara de pressão fixa em um extremo e no outro extremo uma válvula com sua respectiva curva de fechamento.

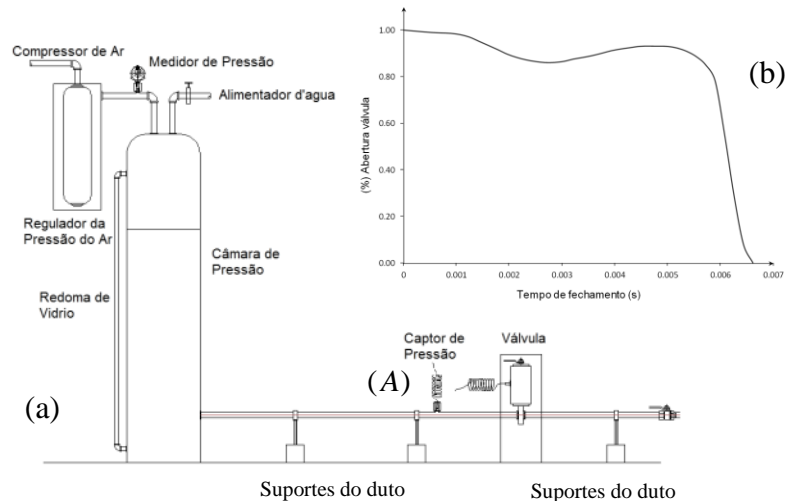


Figura 4.1 - Bancada de Ensaio (modificado - Contractor, 1965) (a) e curva de fechamento da válvula (b).

Compara-se a variação da pressão experimental com os resultados numéricos obtidos pelo programa TRANSPETRO-1D, Figura 4.2, as medidas de pressão são feitas por um sensor de pressão localizado a 9,15 m da câmara de Pressão. Os dados gerais para este experimento são: comprimento do duto $L = 12.2$ m, diâmetro interior $D = 0.1$ m, espessura do duto $e = 0.016$ m, coeficiente de atrito do fluido com o tubo $f = 0.024$, densidade do fluido (água a 20°C) $\rho = 998.2$ kg/m³, a aceleração da gravidade $g=9.81$ m/s², velocidade de propagação a do som no fluido, $a = 1149.5$ m/s, velocidade inicial do escoamento na válvula $V_0 = 0.366$ m/s e pressão inicial na válvula, $P_0 = 597213.972$ Pa.

A Figura 4.2 compara os resultados experimentais com a simulação numérica observa-se uma grande semelhança entre os resultados experimentais e numéricos no primeiro ciclo. Nos ciclos posteriores se apresentam diferenças cada vez mais importantes. Uma das explicações para tal diferença de comportamento das curvas é o efeito de degasagem e a existência de perdas geradas pelo fator de atrito que ainda não é possível de se representar adequadamente no programa.

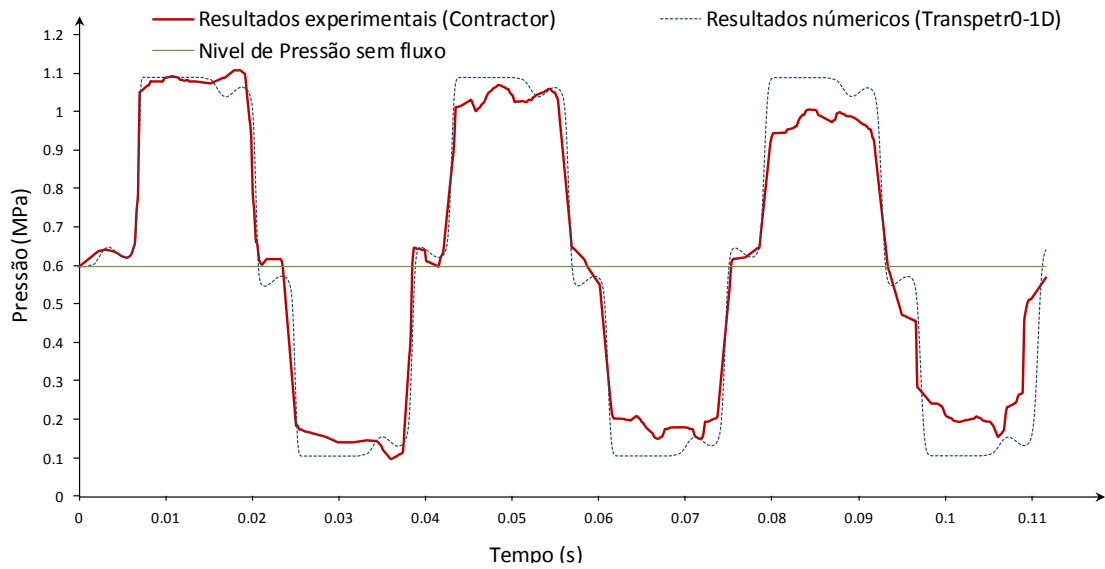


Figura 4.2 - Evolução da pressão no ponto A – Resultados experimentais e numéricos (modificado – Contractor, 1965).

Como o fenômeno transiente varia no tempo e no espaço, a Figura 4.3 ilustra os resultados numéricos da variação da pressão no tempo para cada ponto do duto ao longo de seu comprimento.

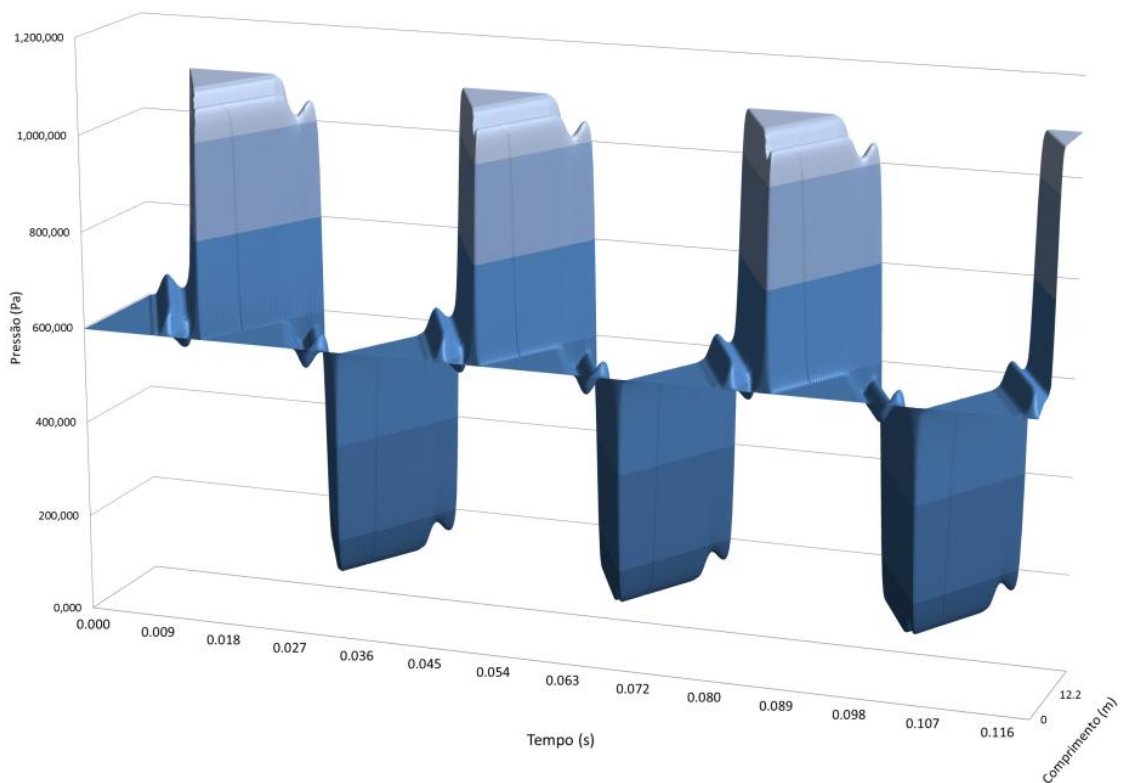


Figura 4.3 - Superfície da onda de pressão no duto.

Este gráfico da pressão em função do tempo e do espaço é bastante esclarecedor do fenômeno observado no sistema, permitindo se inferir uma série de aspectos do comportamento das ondas de pressão.

4.2 INFLUENCIA DE PARÂMETROS

Nos casos estudados nesta seção serão colocados em evidencia uma série de parâmetros que influenciam no fenômeno, o sistema elegido se apresenta a continuación ele apresenta as mesmas características e os componentes do sistema da bancada Contractor (1965), uma câmara de pressão constante, uma válvula no final do sistema e duto reto e horizontal. Os componentes se apresentam na Figura 4.4 e o sistema geral na Figura 4.5.

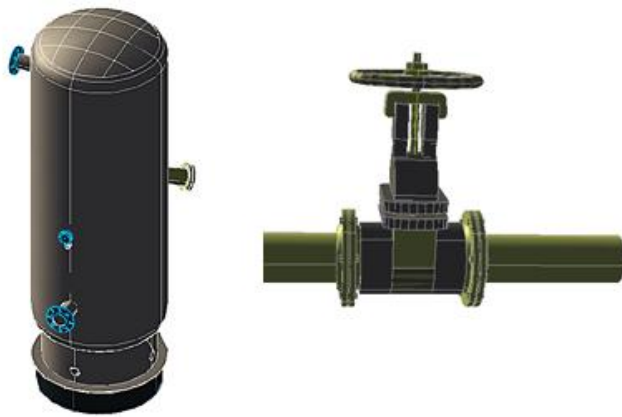


Figura 4.4 – Componentes principais do sistema hidráulico.



Figura 4.5 – Sistema hidráulico horizontal.

4.2.1 Caso 02 – Tempo de fechamento da válvula

Fechar uma válvula em um tempo inferior à $(2L/a)$ é conhecido como um fechamento rápido e, quando o tempo de fechamento é superior à $(2L/a)$ o fechamento é dito lento (Wylie e Streeter, 1982). A Figura 4.4 mostra cinco curvas da porcentagem de abertura da válvula em função do tempo. Estes tempos de fechamento foram escolhidos por estar diretamente relacionados com o tempo que a onda transiente leva para percorrer o duto completamente ($0L/a = 0.000$ s, $L/a = 0.009$ s, $2L/a = 0.018$ s, $3L/a = 0.027$ s e $4L/a = 0.036$ s).

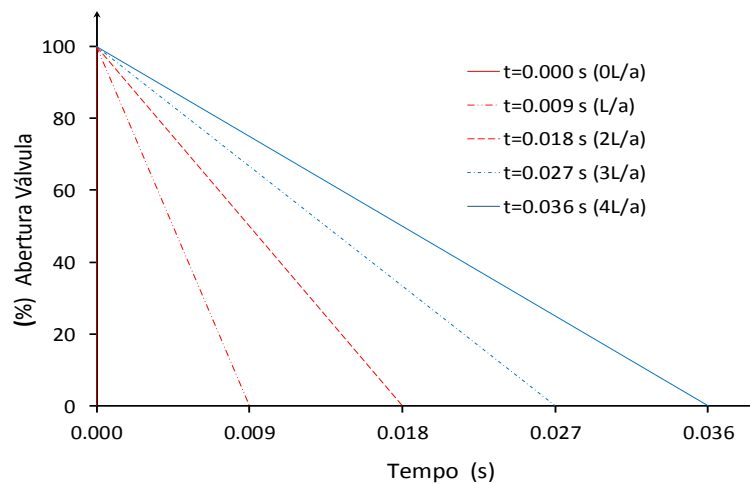


Figura 4.6 - Porcentagem de abertura da válvula em função do tempo.

Na análise desta figura se utiliza a equação analítica de Joukowsky para se obter a sobrepressão (ΔP) gerada pela variação da velocidade (Δv) para um escoamento sem atrito (Wyllie E Streeter, 1967; Isgott, 1996), Equação (4.1):

$$\Delta P = \rho \cdot a \cdot \Delta v \rightarrow P_f = P_0 + (\rho \cdot a \cdot \Delta v) \quad (4.1)$$

Onde, ΔP : Sobrepressão;

P_0 : Pressão inicial no sistema;

ρ : Massa específica do fluido;

Δv : Variação da velocidade.

A Figura 4.5 mostra os resultados obtidos pelo programa TRANSPETRO-1D onde se usa a relação da pressão inicial sobre a pressão final (P_f / P_0) para cada um dos tempos de fechamento da válvula em três seções diferentes do duto (6.1 m, 9.14 m e 12.2 m). A linha vertical localizada no meio da Figura representa o limite para os tempos de fechamento, e,

a linha horizontal superior representa a maior relação de pressões gerada no transiente dado pela Equação (4.1).

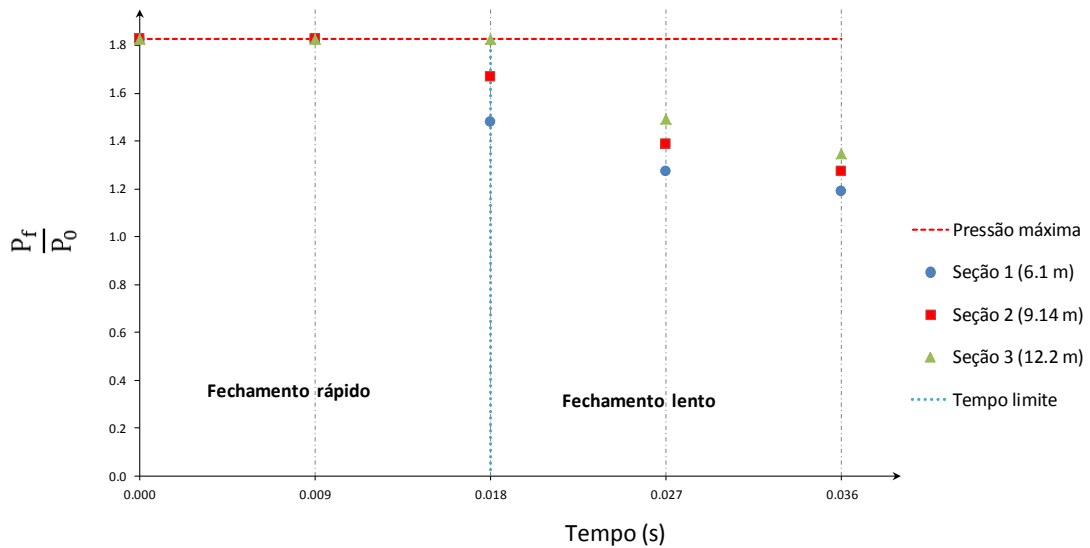


Figura 4.7 - Relação entre pressão final e pressão inicial em função do tempo.

Observa-se que os resultados numéricos e analíticos são muito próximos na zona denominada de fechamento rápido. Este o resultado avalia o programa para análise transiente na região de fechamento rápido da válvula. Além disso, se observa também que para um fechamento rápido da válvula produz a mesma sobrepressão ao longo de todo o duto.

Nos casos onde tubulações apresentam um tipo de problema às válvulas tem que ser acionadas com um fechamento rápido produzindo este tipo de comportamento. Observa-se ainda que para um fechamento lento se tenha uma menor sobrepressão no sistema. No fechamento brusco, quando o tempo de fechamento aumenta a sobrepressão vai diminuindo gradualmente, até o tempo limite ($2L/a$) o qual é o tempo que a onda leva para ir e voltar e gera a máxima sobrepressão no ponto extremo da tubulação, razão pela qual as próximas análises serão feitas nesta região. Ainda para um fechamento súbito da válvula, quanto mais longe se encontra um ponto desta, menor vai ser a sobrepressão medida neste ponto, devido às perdas pelo atrito.

4.2.2 Caso 03 – Tipo de fechamento de válvulas em experimentos

Diferentes tipos de válvulas podem apresentar diferentes curvas de fechamento para um dado tempo específico. Analisam-se na Figura 4.8 três tipos de fechamento da válvula usados em ensaios: Bancada Contractor, e Bancada Claudia, e fechamento linear (numérico). O tempo de fechamento de referência foi tomado da Bancada Contractor (1965).

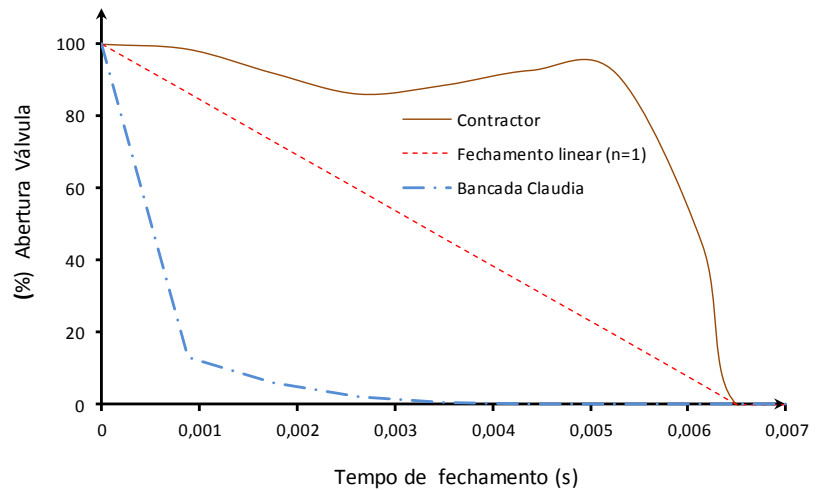


Figura 4.8 - Porcentagem de abertura da válvula em função do tempo de fechamento.

A Figura 4.9 mostra a relação entre a pressão final e a pressão inicial para três pontos ao longo do duto para os três tipos de fechamento.

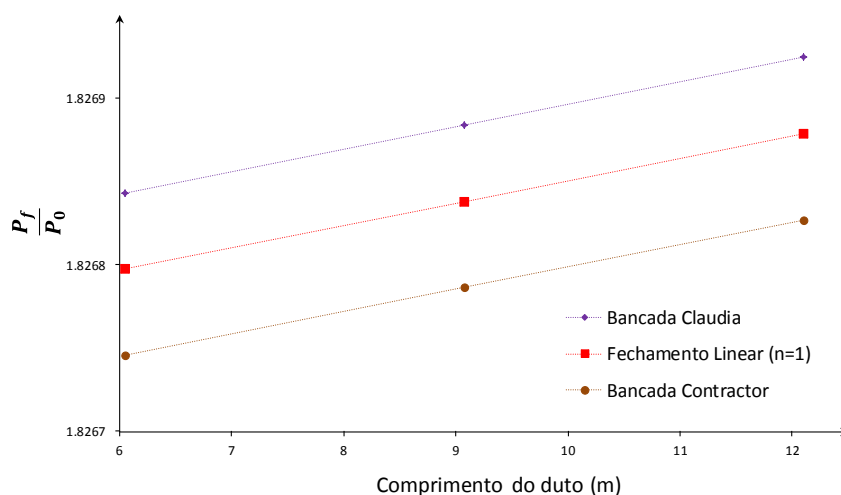


Figura 4.9 - Relação entre pressão final e pressão inicial em três secções do duto (6.1 m, 9.14m e 12.2 m) para um tempo constante de 0.0065 s.

Observa-se um bom acordo entre todos os resultados, quando comparados com os resultados fornecidos pelo programa TRANSPETRO-1D. A maior pressão é gerada pela curva obtida pelo fechamento experimental da Bancada de Claudia (1994), e a menor pressão é produzida pela curva de fechamento mais lento do ensaio experimental de Contractor (1965). Este comportamento pode ser explicado com ajuda da Figura 4.8 que mostra a curva da Bancada de Claudia como mais semelhante ao fechamento súbito da válvula, efeito que gera a maior sobrepressão.

4.2.3 Caso 04 – Tipo de fechamento (Válvulas comerciais)

Nesta seção serão mostradas para um dado ponto do sistema as pressões transientes provocadas por fechamentos de válvulas comerciais em relação ao fechamento súbito de uma válvula idealizada. O tempo utilizado é de 0.0065 s, o qual se encontra localizado na zona de fechamento rápido e gera a máxima sobrepressão, além de permitir o completo desenvolvimento da curva de fechamento. Estas simulações são feitas no sistema mostrado na Figura 4.5, na mesma se apresenta o ponto onde foram feitas as medições das ondas transientes de pressão.

4.2.3.1 Válvula tipo Globo

Este é um dispositivo mecânico utilizado para a frequente regulação de vazão a alta ou baixa pressão em tubulações de vapor, gás natural, ar, petróleo e água. Seu mecanismo consiste de um disco móvel e um anel fixo em um corpo geralmente esférico que gera uma mudança brusca na direção do fluido, razão pela qual apresenta uma elevada perda de carga. Suas principais vantagens são permitir um controle mais eficiente do fluido, desgastes mínimos com a erosão, abertura e fechamento mais rápido do que as válvulas de gaveta, entre outros. Num sistema hidráulico este tipo de válvula se localiza só na linha do sistema.

A Figura 4.10 apresenta a curva de fechamento para a válvula tipo Globo e uma ilustração gráfica desta. A partir da se observa que este tipo de válvula permite um fechamento total, e só permite uma porcentagem da abertura da mesma (aproximadamente 41%). O comportamento da curva de fechamento é irregular, mas não se apresentam variações bruscas.

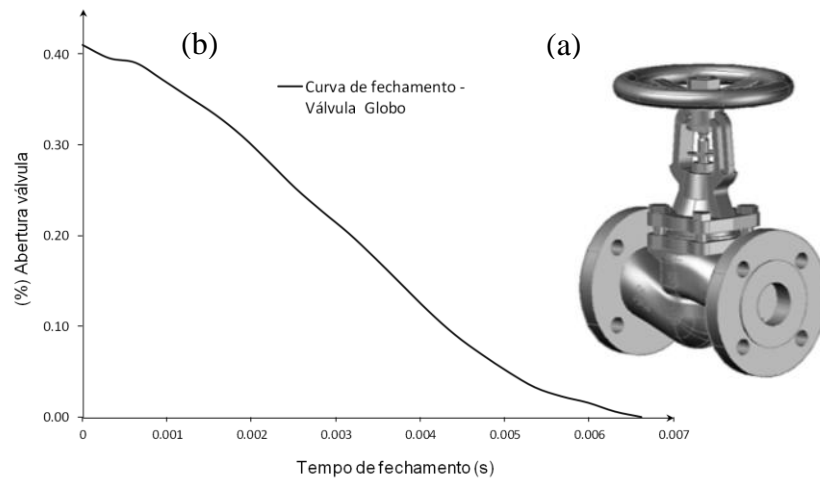


Figura 4.10 – Válvula Globo (a) e sua curva de fechamento (b).

Na Figura 4.11 se apresenta o histórico das ondas transientes de pressão para dos tipos de fechamento, o fechamento súbito e o fechamento com a válvula tipo globo, estes dados foram obtidos no ponto A apresentado na Figura 4.1.

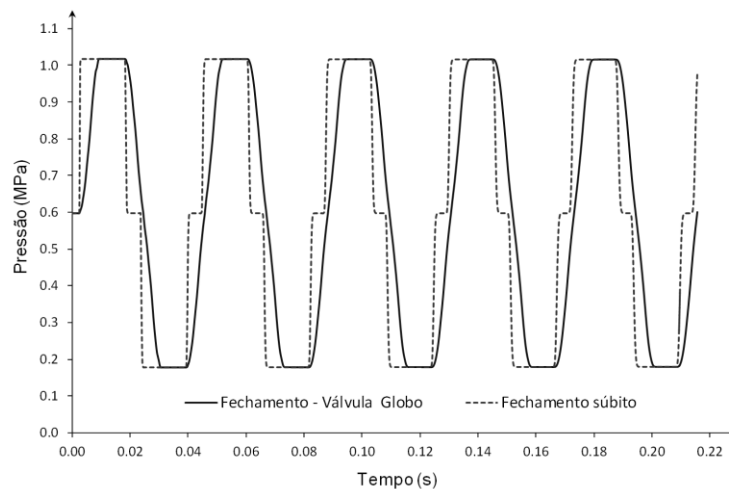


Figura 4.11 – Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento súbito e o fechamento com a válvula Globo.

As duas curvas apresentam a mesma sobrepressão para todos os ciclos medidos, e a válvula Globo mostra uma leve variação na inclinação vertical da forma da curva de pressão, a qual está diretamente relacionada ao tipo de sua curva de fechamento. Isto se percebe associando as Figuras 4.10 e 4.11.

4.2.3.2 Válvula tipo Guilhotina

Este é o dispositivo mecânico mais utilizado para o bloqueio da vazão em tubulações de fluidos provenientes das indústrias químicas, petroquímicas e de saneamento, é empregado em processos onde a abertura e fechamento não são frequentes. Seu mecanismo consiste num corpo interno (haste), o qual apresenta um deslocamento linear quando é acionado por um volante. Suas principais vantagens são: possui um ótimo custo/benefício; passagem desimpedida (quando é totalmente aberta); usada em qualquer tipo de fluido; e permite o fluxo nos dois sentidos, entre outras. Num sistema hidráulico este tipo de válvula pode se localizar no interior da linha e/ou no final do sistema.

Na Figura 4.12 se mostra a curva de fechamento para este tipo de válvula e uma ilustração de seu formato real.

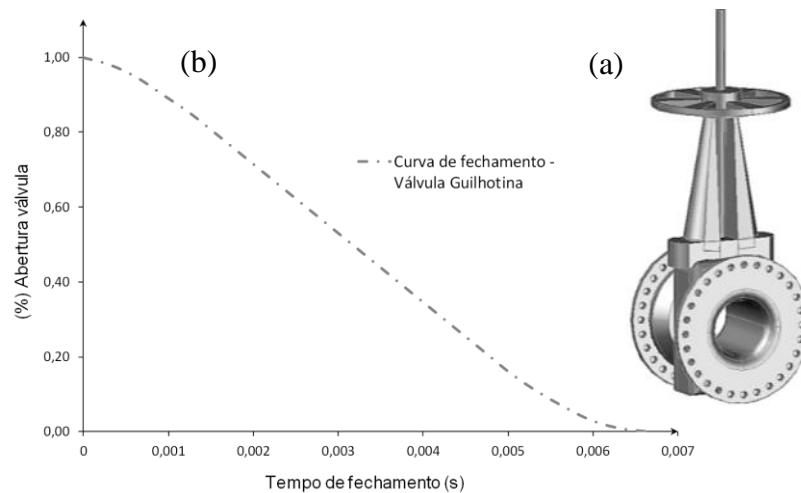


Figura 4.12 - Válvula Guilhotina (a) e sua curva de fechamento (b).

Observa-se na Figura 4.12 que este tipo de válvula permite uma abertura e um fechamento total, independente da sua posição no sistema. O comportamento da curva de fechamento é quase linear, mas apresenta leves inflexões na parte inicial e na parte final da mesma.

Os históricos das ondas transientes de pressão para dois tipos de fechamento (súbito e válvula tipo Guilhotina) são expostos na Figura 4.13. A evolução da onda de pressão apresenta o mesmo comportamento se a válvula Guilhotina se localizasse na linha ou no final do sistema, razão pelo qual só se apresenta um gráfico.

Na Figura 4.13 se observa que as duas curvas apresentam a mesma sobrepressão para todos os ciclos medidos. Tal como na válvula Globo existe uma leve variação na forma das curvas de pressão, provocada pelo tipo de forma da curva de fechamento.

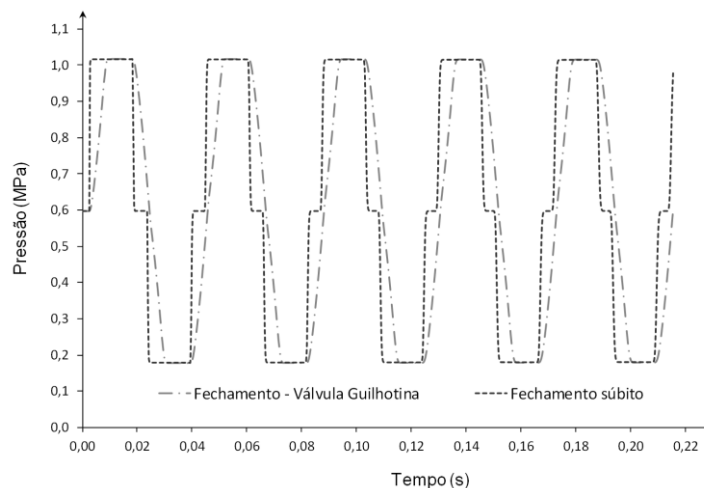


Figura 4.13 - Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento súbito e o fechamento com a válvula Guilhotina.

4.2.3.3 Válvula tipo Esfera

Este é um dispositivo mecânico utilizado para o bloqueio ou abertura de vazão em tubulações de gases ou líquidos em condições de baixa ou alta pressão. Seu mecanismo consiste num obturador com forma esférica que permite o vazamento do fluido quando está totalmente alinhado com a tubulação, e bloqueia a passagem totalmente quando seu furo fica perpendicular ao sentido do fluxo. Suas principais vantagens são a rápida abertura e fechamento, total estanqueidade mesmo a altas pressões, e possui uma perda de carga praticamente desprezível. Num sistema hidráulico este tipo de válvula pode se localizar na linha e/ou no final do sistema.

Apresenta-se a Figura 4.14 a curva de fechamento para este tipo de válvula quando esta se encontra na linha ou no final do sistema. Adicionalmente, apresenta - se uma ilustração caracterizando a forma que esta pode ter na realidade.

Na Figura 4.14 se observa que este tipo de válvula não permite uma abertura total. Possui com uma porcentagem de abertura maior para o caso quando esta se encontra na linha do sistema. Nota-se também que o comportamento das curvas de fechamento é similar a uma curva descrita por uma parábola. Quando esta se encontra no final do sistema permite o

vazamento, gerando desta forma uma menor variação na velocidade do escoamento no sistema.

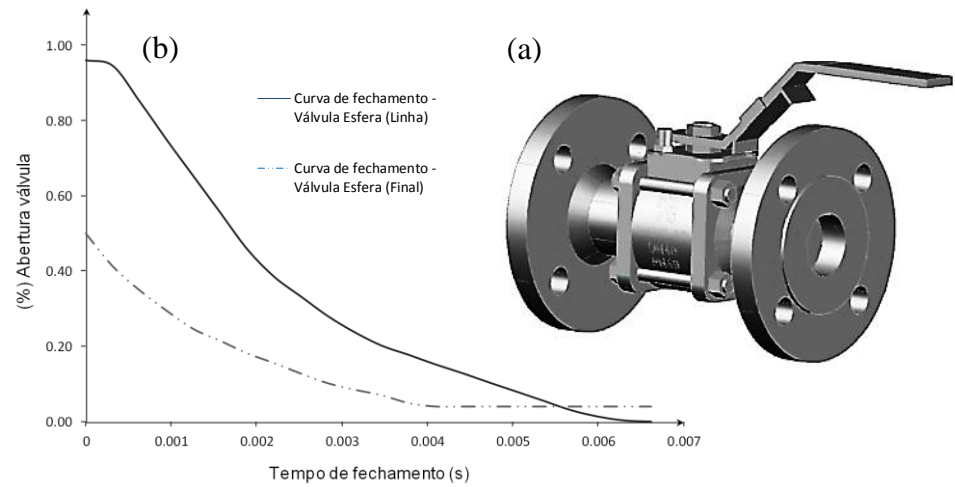


Figura 4.14 - Válvula Esfera (a) e suas curvas de fechamento (b).

A Figura 4.15 mostra o histórico das ondas transientes de pressão para três tipos de fechamento: o súbito, com a válvula tipo Esfera na linha, e com esta no final do sistema.

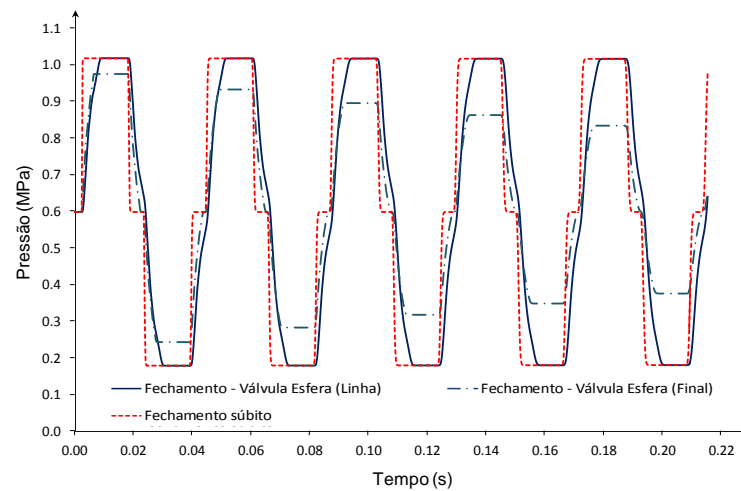


Figura 4.15 - Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento súbito e o fechamento com a válvula Esfera.

Nota-se na Figura 4.15 que as curvas do fechamento súbito e da válvula na linha apresentam a mesma sobrepressão para todos os ciclos. Uma leve inflexão no ramo vertical das curvas evidencia o fato delas estarem diretamente relacionada com o tipo de fechamento. Para o caso da válvula que se localiza no final do sistema há uma menor

sobrepessão devido à uma menor variação na área de fechamento da mesma, além disso, é produzido uma maior atenuação das ondas de pressão aspecto que diminui a fadiga que pode ser gerada nos dutos do sistema.

4.2.3.4 Válvula tipo Borboleta

Este é um dispositivo mecânico utilizado para a regulação de vazão ou pressão em tubulações de gases ou líquidos em condições de baixa pressão. Seu mecanismo consiste num anel do mesmo tamanho da tubulação com um disco que gira dentro dele em torno de um eixo, o qual regula a passagem do fluido. Este tem mecanismo que assegura a válvula na posição desejada. Suas principais vantagens são a baixa perda da pressão, rápida ação e baixo custo. Num sistema hidráulico este tipo de válvula pode estar localizado na linha e/ou no final do sistema.

Na Figura 4.16 se apresenta a curva de fechamento para este tipo de válvula quando esta se encontra na linha ou no final do sistema. Adicionalmente, é mostrada uma ilustração do aspecto que esta mesma pode assumir na realidade.

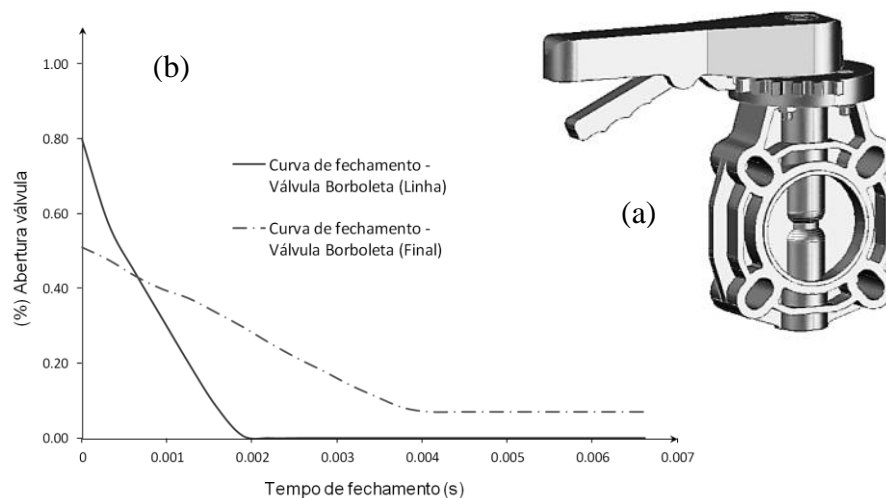


Figura 4.16 - Válvula Borboleta (a) e suas curvas de fechamento (b).

Infere-se da Figura 4.16 que este tipo de válvula não permite uma abertura total. Todavia, se tem uma porcentagem maior de abertura; quando esta se encontra na linha do sistema. O comportamento das curvas de fechamento é mais irregular, quando esta se encontra no final do sistema, permitindo um vazamento residual, e produzindo desta forma uma menor variação na relação do percentual aberto para o fechado da válvula.

A Figura 4.17 ilustra o histórico das ondas transientes de pressão para três tipos de fechamento: o súbito, aquele com a válvula tipo Borboleta na linha e no final do sistema.

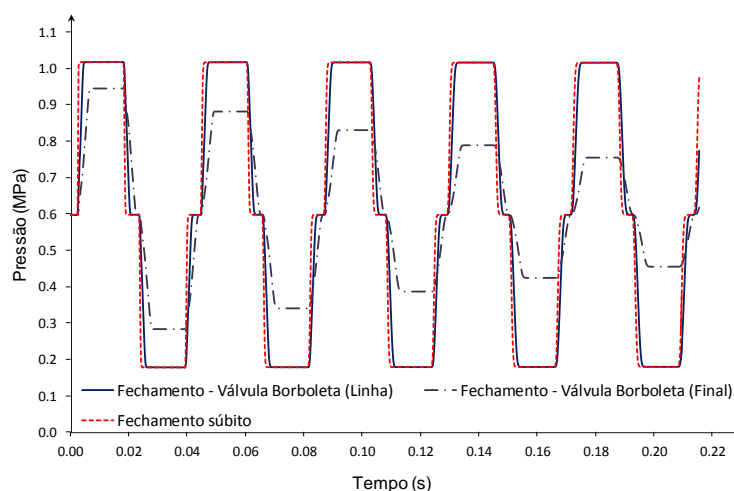


Figura 4.17 - Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento súbito e o fechamento com a válvula Borboleta.

Analisando-se a Figura 4.17, observa-se que as amplitudes das curvas para o ponto na linha tem a mesma sobrepressão para todos os ciclos medidos, e uma leve variação na forma das curvas, a qual está diretamente relacionada ao tipo de fechamento da mesma. Para o caso da válvula localizada no final do sistema, ela não interrompe o vazamento total do fluido, razão pela qual é produzida uma menor sobrepressão no sistema devido a uma menor variação da velocidade.

4.2.3.5 Válvula tipo Howell-Bunger

Este é um dispositivo utilizado para a descarga de água com alta pressão proveniente de reservatórios ou condutos forçados na atmosfera. Seu mecanismo consiste num tubo com uma esfera soldada na extremidade e na outra um duto atua como um obturador, o qual se desliza linearmente no corpo pelos suportes até fazer contato com o Esfera para fechar completamente a válvula. Suas principais vantagens são: o controle na descarga dos reservatórios; válvulas de fornecimento, e dissipação de energia sem sofrer cavitação ou vibração, entre outros. Num sistema hidráulico este tipo de válvula se localiza só no final do sistema.

Na Figura 4.18 se apresenta a curva de fechamento para este tipo de válvula e uma ilustra como esta pode se assumir na realidade.

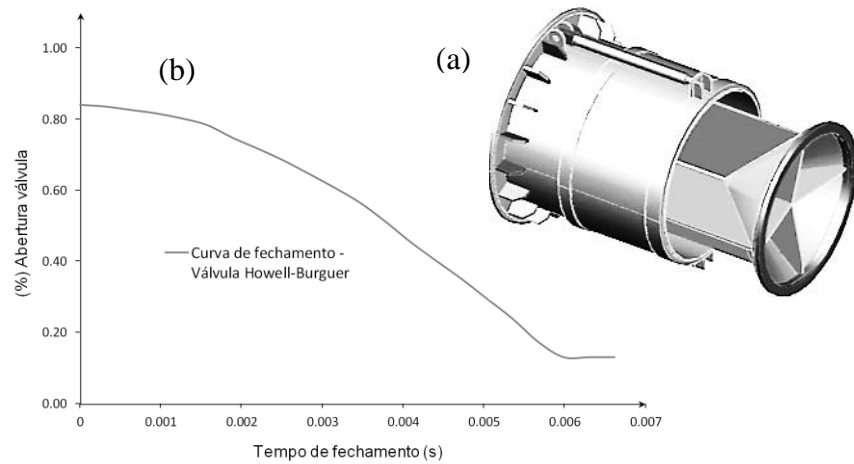


Figura 4.18 - Válvula Howell-Burguer (a) e sua curva de fechamento (b).

Observa-se a Figura 4.18 nota-se que este tipo de válvula também não permite uma abertura total da mesma. O comportamento da curva de fechamento permite um vazamento residual, produzindo desta forma uma menor variação na velocidade do escoamento no sistema, e conseqüentemente numa menor sobrepressão.

A Figura 4.19 mostra o histórico das ondas de pressão para dois tipos de fechamento: o súbito e aquele com a válvula tipo Howell-Bunger.

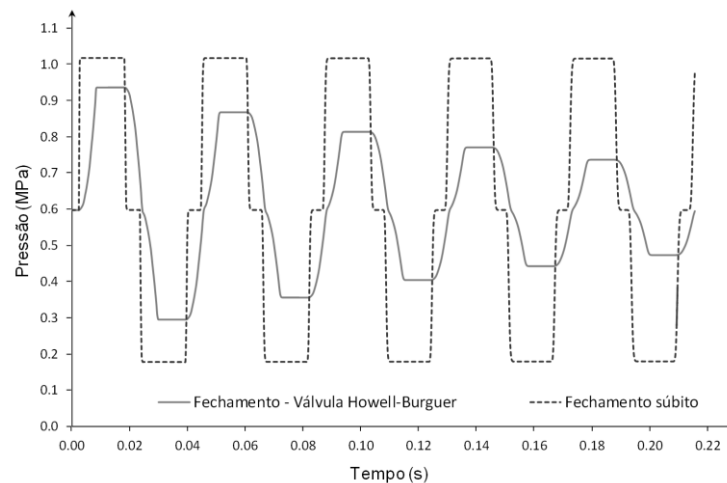


Figura 4.19 - Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento súbito e o fechamento com a válvula Howell-Bunger.

Observa-se pela Figura 4.18 que a válvula Borboleta apresenta diferente sobrepressão ao longo dos ciclos avaliados. Isto se deve ao fato dela apresentar um vazamento residual, que de certa forma atenua as ondas de pressão.

4.2.3.6 Válvulas em linha

Uma comparação das curvas de fechamento para os quatro tipos de válvulas analisadas é apresentada na Figura 4.20. As válvulas tipo globo, Guilhotina, Esfera e borboleta são localizadas no interior da linha do sistema hidráulico em questão.

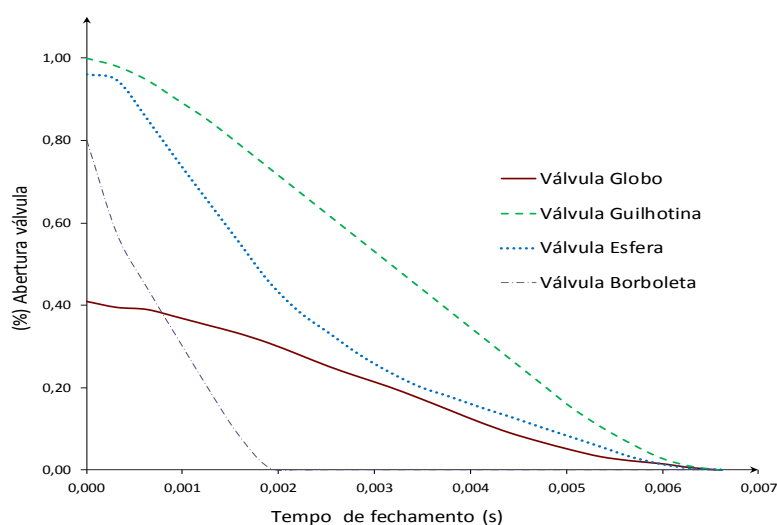


Figura 4.20 – Curvas de fechamento de válvulas na linha do sistema hidráulico.

De acordo com a Figura 4.20 a válvula tipo Guilhotina é a única que permite uma abertura total, pois as demais só permitem uma abertura parcial. Observa-se que a válvula tipo Borboleta é a que apresenta um fechamento mais parecido ao súbito, e válvula tipo globo é a que tem a menor porcentagem de abertura.

Mostra-se na Figura 4.21 uma comparação no histórico das ondas de pressão para os quatro tipos de válvulas localizadas na linha do sistema. Observa-se que todas geram a mesma sobrepressão no sistema independente da porcentagem de abertura. Percebe-se também um deslocamento horizontal nas curvas de pressão que apresentam as maiores taxas de abertura. As válvulas que apresentam as menores relações das taxas de abertura (Globo e Borboleta) têm frentes de onda mais quadradas e se comportam de forma similar a onda transiente gerada num fechamento súbito.

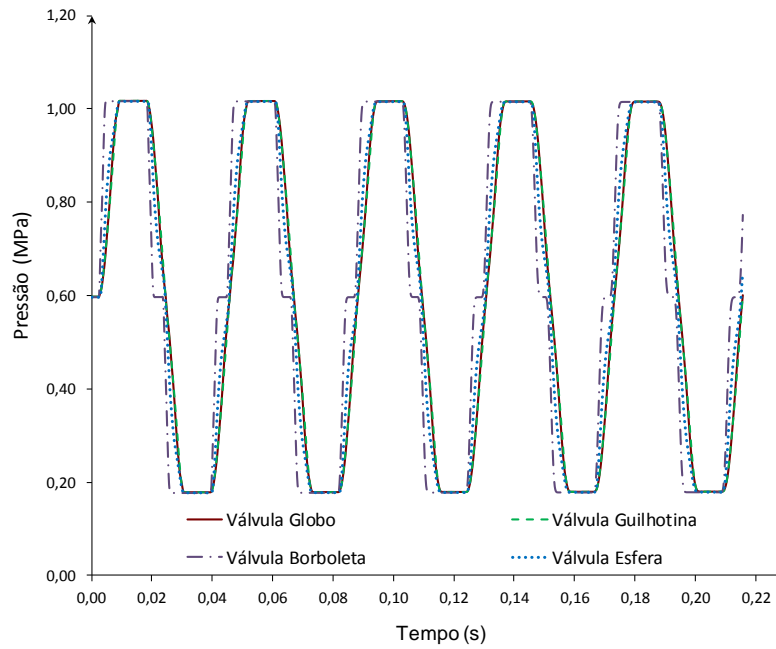


Figura 4.21 - Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento das diferentes válvulas na linha do sistema hidráulico.

4.2.3.7 Válvulas no final

A Figura 4.22 apresenta uma comparação das curvas de fechamento para os quatro tipos de válvulas que podem ser localizadas no final de um sistema hidráulico (válvula tipo Guilhotina, Esfera, borboleta e Howell-Burguer).

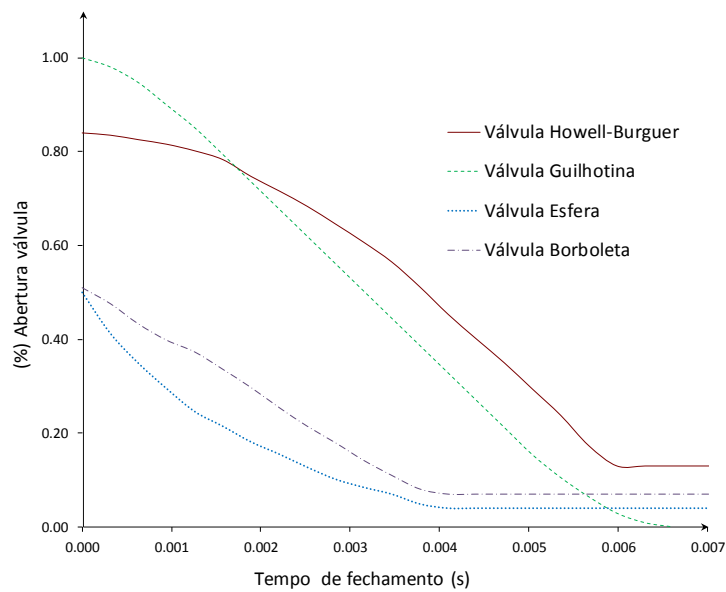


Figura 4.22 - Curvas de fechamento de válvulas localizadas no final do sistema hidráulico.

De acordo a Figura 4.22, tal como foi dito observa-se que a válvula tipo Guilhotina é a única que permite uma abertura e um fechamento total. Os outros tipos de válvulas só permitem um fechamento parcial. Nota-se que a válvula tipo Howell-Burguer é a que permite maior vazamento (escoamento residual) no final de um determinado circuito tubular.

Na Figura 4.23 fez-se uma comparação no histórico das ondas transientes de pressão para os quatro tipos de válvulas localizadas no final do sistema.

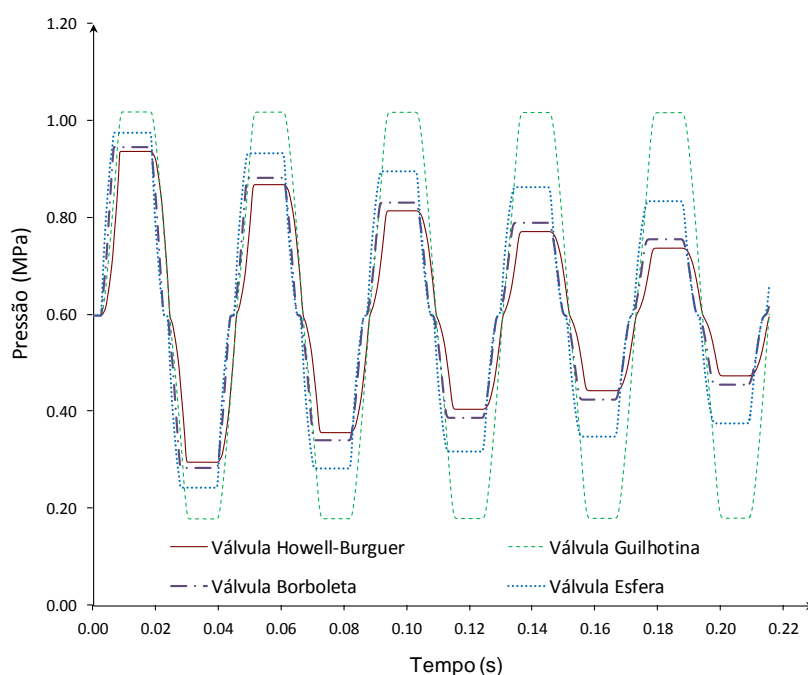


Figura 4.23 - Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento das diferentes válvulas localizadas no final do sistema hidráulico.

Pela Figura 4.23 observa-se que a única válvula que não permite a atenuação da onda de pressão, é a válvula tipo Guilhotina. Adicionalmente esta apresenta um leve deslocamento horizontal, provocado pela forma da curva de fechamento. Os demais tipos de válvulas apresentam atenuação, mas a válvula tipo Howell-Burguer é a que mostra a maior atenuação ao longo do tempo, como ela não se fecha completamente, há um escoamento residual, e toda a onda que chega ao final do circuito, só parte dela é refletida. Assim há uma corte na onda principal a cada passagem pela extremidade do sistema e a menor sobrepressão.

De acordo aos resultados vistos pode-se concluir que a maior sobrepressão é produzida quando se tem um fechamento total da válvula sem levar em conta a curva de fechamento, e a percentagem da abertura inicial.

4.2.4 Caso 05 – Variação da rugosidade relativa do material

Mostra-se na Figura 4.24 a onda de pressão para um ponto (A) localizado no duto a 9.15 m de distância ao captor de pressão (Figura 4.1). Neste caso tem-se um duto de concreto de 0.452 m de diâmetro interno, uma espessura de 0.045 m, e rugosidades relativas de 0.003 m ($f = 0.0329$) e 0.0003 m ($f = 0.0186$).

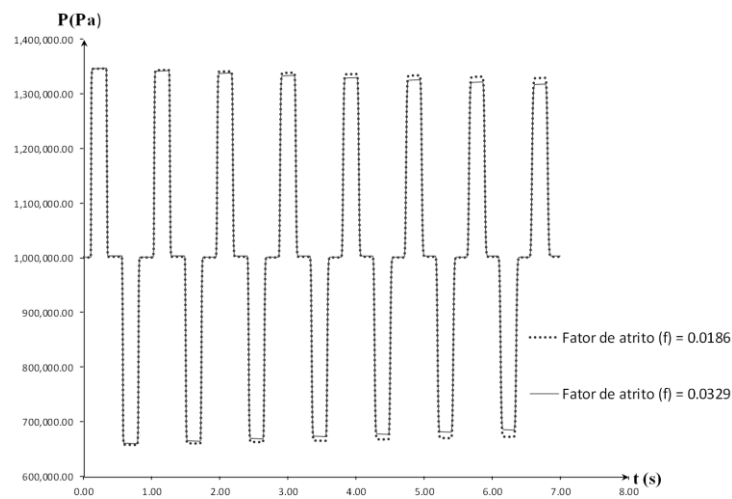


Figura 4.24 - Onda transiente de pressão em função do tempo (Para diferentes rugosidades relativas).

Pela Figura 4.24, observa-se que as respostas não têm muita diferença no primeiro ciclo, mas depois do terceiro ciclo se percebe uma diferença gerada justamente pela diferença no fator de atrito, sendo que quanto maior o fator de atrito, maior será a queda na onda transiente de pressão.

4.2.5 Caso 06 – Variação da relação espessura/Diâmetro interno (e/D)

Na Figura 4.25 apresenta-se a onda transiente de pressão para um ponto (A) localizado no duto a 9.15 m de distância ao captor de pressão (Figura 4.1). Toma-se um duto de concreto com diferentes relações entre a espessura (e) e diâmetro interno (D), $e/D = 0.005$, e, $e/D = 0.09$.

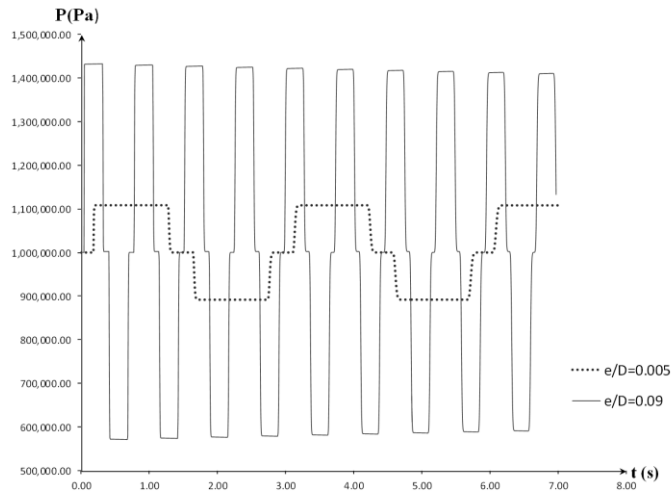


Figura 4.25 - Onda transiente de pressão em função do tempo (Para diferentes diâmetros internos).

Analisando-se a Figura 4.25, observa-se uma diferença considerável na amplitude e período da onda transiente de pressão no sistema. À medida que a relação espessura/diâmetro aumenta as pressões e o número de ciclos também aumentam.

4.2.6 Caso 07 – Variação do material do duto

A Figura 4.26 apresenta a onda transiente de pressão para um ponto (A) localizado no duto a 9.15 m de distância ao captor de pressão (Figura 4.1). Neste caso foi considerado um duto de concreto e outro de aço com as mesmas dimensões e configurações ($e/D = 0.005$).

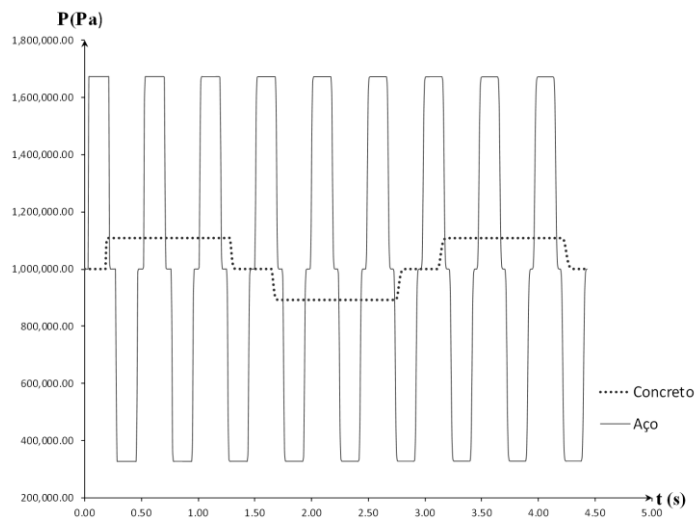


Figura 4.26 - Onda transiente de pressão em função do tempo (Para dois diferentes materiais).

Observa-se na Figura 4.26 uma diferença considerável na onda de pressão, sendo que para o aço é o material com maior rigidez, e, portanto induz se tem maiores pressões e mais ciclos de oscilações no tempo, do que o concreto.

4.2.7 Caso 08 – Variação das propriedades mecânicas e físicas do duto

Com o objetivo de estudar a influência das principais propriedades do duto no fenômeno transiente, foi feito um conjunto de simulações nas quais se apresentam duas variações importantes: uma nas propriedades mecânicas dando diferentes valores para a relação (e/D_{int}) e a outra nas propriedades físicas, onde se utilizam cinco tipos diferentes de materiais usados na construção de dutos. As propriedades dos materiais são mostradas na Tabela 4.1, enquanto o diâmetro interno e a espessura do duto se ilustram na Figura 4.27.

Tabela 4.1 - Materiais utilizados na simulação

Material	E (GPa)	ϵ (10^{-4} m)	μ (adm)
Aço comercial	210	0.45	0.30
Ferro galvanizado	19	1.50	0.29
Ferro fundido	10	2.6	0.28
Concreto	3.7	3 - 0.3	0.11 - 0.21
Policloreto de vinilo (PVC)	2.26	0.015	0.45

Onde, E: Módulo de elasticidade;

ϵ : Rugosidade relativa do material;

μ : Coeficiente de Poisson.

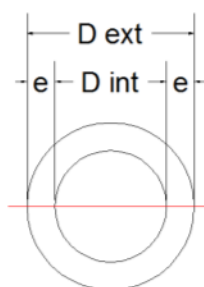


Figura 4.27 – Seção transversal do duto.

Mostra-se no gráfico da Figura 4.28 o parâmetro “C” cuja expressão matemática se encontra na Equação (3.27). Este gráfico ilustra a variação do parâmetro (C) em função da relação geométrica (e/D_{int}) para os cinco diferentes tipos de materiais utilizados na simulação.

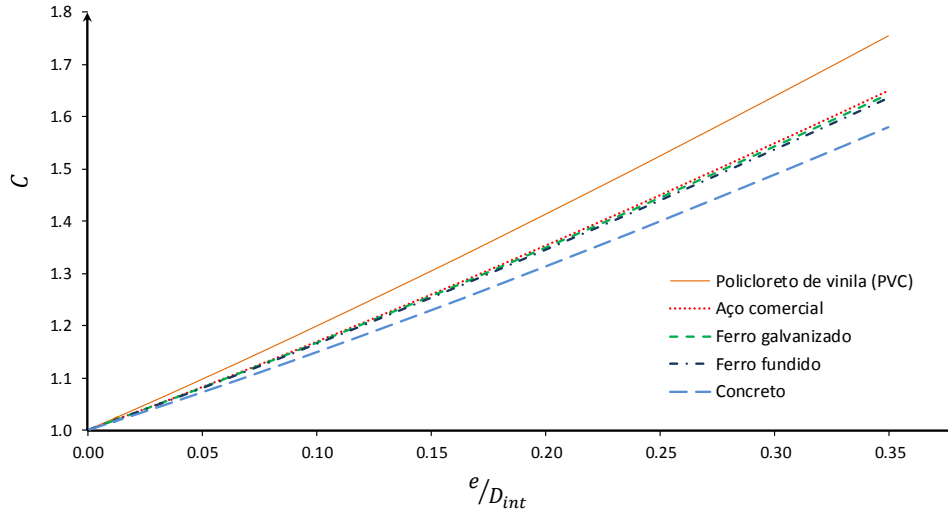


Figura 4.28 – Parâmetro C em função da relação e/D_{int} .

Com os resultados da Figura 4.28, pondera-se que o parâmetro “C” apresenta uma maior influência na celeridade da onda transiente para o Policloreto de vinila (PVC) e uma menor influência para o concreto. Este comportamento está diretamente relacionado com o coeficiente de Poisson. Lembrando que a magnitude deste parâmetro é independente do tipo de fluido que este percorrendo o duto.

A Figura 4.29 apresenta o gráfico do fator atrito (f) em função do número de Reynolds fornecido pelas Equações (3.9) e (3.10) para os cinco diferentes tipos de materiais utilizados na simulação.

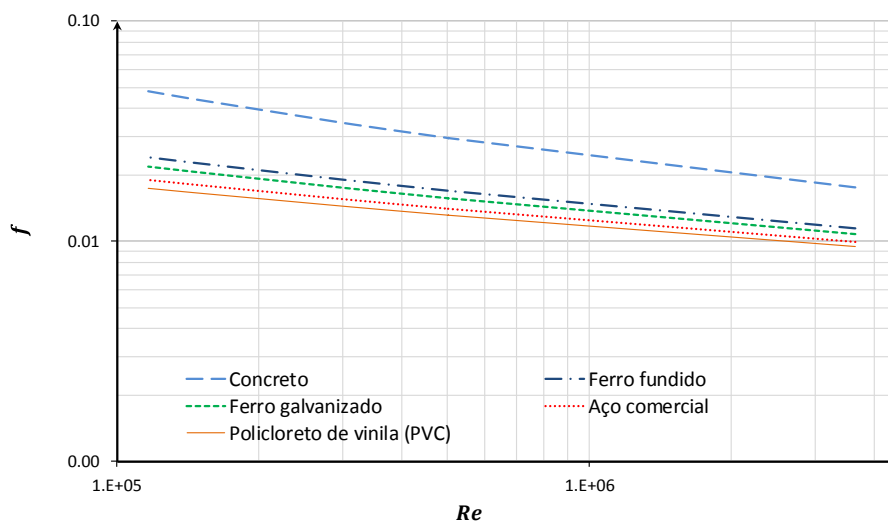


Figura 4.29 - Fator de atrito "f" em função do Número de Reynolds "Re" (5 tipos de materiais).

Interpretando os resultados da Figura 4.29, as seguintes observações podem ser feitas: O fator de atrito é proporcional à rugosidade relativa do material. O concreto é o material muito útil na construção de dutos, no entanto apresenta o maior atrito, fato que gera as maiores quedas de pressão. Nota-se também um deslocamento nas curvas dado pelo fator de atrito para diferentes materiais.

Tomando-se as Equações (4.1) e (3.6) e fazendo-se uma divisão pela pressão inicial (P_0), obtêm-se a Equação (4.2), que permite se calcular analiticamente a relação entre a pressão inicial e a pressão final gerada por um fechamento súbito da válvula, para diferentes parâmetros adimensionais do problema, no início do transiente, ou seja:

$$\frac{P_f}{P_0} = 1 + \frac{\rho \cdot \Delta v}{P_0} \cdot \sqrt{\frac{k/\rho}{1 + (k/E)(D/e)C}} \quad (4.2)$$

Para se fazer uma comparação entre resultados analíticos e numéricos, se elegem inicialmente cinco relações de e/D_{int} dadas pela Tabela 4.2. Para estas relações foram feitas simulações no programa TRANSPETRO-1D para os cinco diferentes materiais.

Tabela 4.2. Geometria dos dutos utilizados na simulação

e / D_{int}	D_{int} (m)	e (m)
0.005	5.005	0.025
0.090	0.452	0.041
0.018	0.201	0.036
0.250	0.182	0.045
0.350	0.161	0.056

A Figura 4.30 apresenta os resultados analíticos dados pela Equação (4.2) e os numéricos obtidos com a simulação feita no programa TRANSPETRO-1D. Estes resultados são apresentados para a água a 20°C cujas propriedades se apresentam na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Propriedades do fluido.

Água	ρ (kg/m ³)	998.2	Densidade
	k (Pa)	2.0E+09	Módulo de expansão volumétrica
	μ_f (Pa*s)	1.10E-03	Viscosidade cinemática

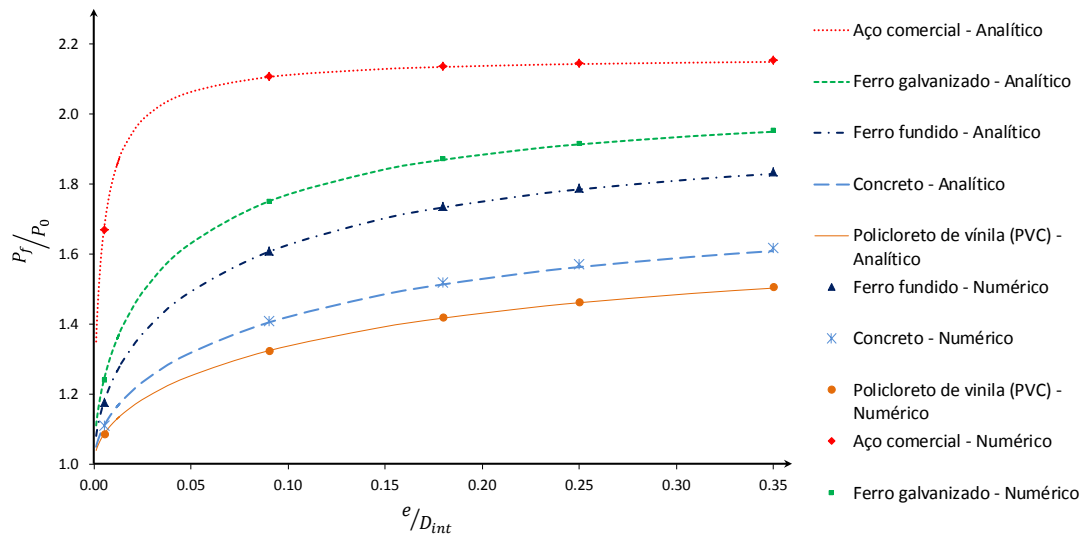


Figura 4.30 - Resultados analíticos e numéricos para a relação entre pressões em função da relação geométrica do duto variando seu tipo de material.

Analisando-se a Figura 4.30, observa-se para relações (e/D_{int}) menores a 0,25 uma maior variação nas pressões, e quando estas relações são maiores o comportamento é regido pela Equação (4.3) tendência a uma assíntota. Neste caso, as propriedades físicas e geométricas do duto não influenciam na resposta transiente da pressão.

$$\lim_{e/D \rightarrow \infty} \frac{P_f}{P_0} = 1 + \frac{\rho \cdot \Delta v}{P_0} \sqrt{k/\rho} \quad (4.3)$$

Percebe-se um maior nível de pressões para materiais mais rígidos, devido a uma menor flexibilidade do duto. Observa-se ainda que o aço apresenta maior nível de pressão no fechamento súbito da válvula, enquanto que as menores pressões são observadas para o PVC.

A Tabela 4.4 apresenta os erros absolutos encontrados entre os resultados analíticos e numéricos obtidos nas diferentes simulações.

Tabela 4.4 - Tabela de erros nos resultados para os materiais utilizados.

e/D_{int}	Aço comercial	Ferro galvanizado	Ferro fundido	Concreto	Policloreto de Vinila (PVC)
0.005	0.019 %	0.005 %	0.006 %	0.010 %	0.005 %
0.090	0.050 %	0.068 %	0.082 %	0.169 %	0.047 %
0.180	0.132 %	0.176 %	0.208 %	0.455 %	0.188 %
0.250	0.145 %	0.190 %	0.223 %	0.509 %	0.201 %
0.350	0.173 %	0.221 %	0.256 %	0.583 %	0.221 %

Com base nos resultados mostrados na Tabela 4.4 se observa se que o programa apresenta uma boa concordância com os resultados analíticos (erros menores que 1%). Adicionalmente, percebe-se que os maiores erros são dados para as maiores relações entre a espessura e o diâmetro interno.

A partir dos resultados obtidos pelas diferentes simulações cria-se um parâmetro (β) que sintetiza todos os efeitos reunidos, e é definido pela Equação (4.4). Ele é determinado a partir da expressão que define a celeridade da propagação das ondas transiente e utilizada para se encontrar uma tendência do fenômeno, quando se varia o diâmetro interno, a espessura e o modulo de elasticidade do material.

$$\beta = \frac{a}{\sqrt{k/\rho}} = \frac{1}{\sqrt{1+(k/E)(D/e)C}} \quad (4.4)$$

A Figura 4.31 mostra um gráfico unificador de todos esses parâmetros, representados pelo fator (β), dado pela Equação (4.4) para as simulações realizadas.

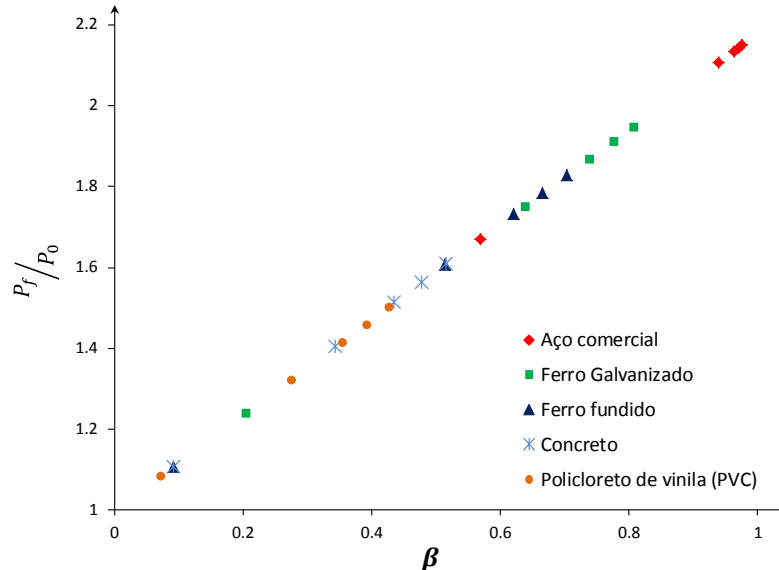


Figura 4.31 - Resultados analíticos da relação entre as pressões em função do parâmetro (β).

Analisando-se a Figura 4.31 observa-se que a relação entre a pressão final é diretamente proporcional ao parâmetro (β), onde a variação do diâmetro interno e a espessura do duto apresentam pouca influência na magnitude do fenômeno transiente, em comparação com a influência exercida pela rigidez do material. O aço, por ser o material mais rígido, conduz

a uma maior relação entre a pressão final e a pressão inicial dentre todos os materiais analisados. Já o PVC, por ser o material menos rígido, apresentou a menor relação entre as pressões.

4.2.8 Caso 09 – Variação das propriedades físicas do fluido

Com o objetivo de estudar a influência das principais propriedades do fluido no fenômeno transiente, foi feito um conjunto de simulações nas quais se apresentam duas variações importantes, uma delas nas propriedades mecânicas dando-se diferentes valores para a relação (e/D_{int}) , e a outra nas propriedades físicas do fluido, onde foram utilizados cinco tipos diferentes de fluidos que poderiam ser transportados por dutos. As propriedades dos fluidos utilizados a uma temperatura de 20°C se apresentam na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Fluidos utilizados na simulação.

Fluido	ρ (kg/m ³)	k (GPa)	μ_f (Pa*s)
Água	998,2	2.21	1.00E-03
Octano	702	0.978	5.42E-07
Álcool metílico	792	0.823	7.37E-07
Álcool etílico	789	0.902	1.52E-06
Benzeno	879	1.06	6.52E-04

A Figura 4.32 apresenta o gráfico do fator atrito em função do número de Reynolds feito de acordo as Equações (3.9) e (3.10) para os cinco diferentes tipos de fluidos utilizados.

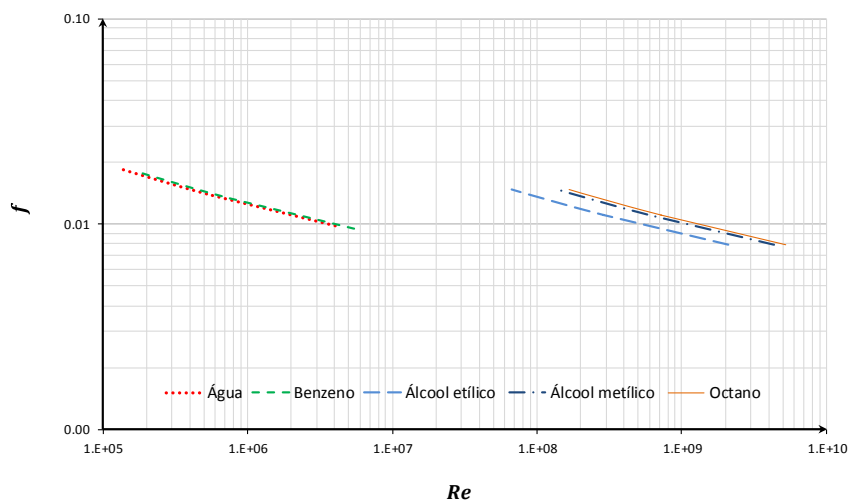


Figura 4.32 - Fator de atrito "f" em função do Número de Reynolds "Re" (5 tipos de fluidos).

De acordo com a Figura 4.32, observa-se uma separação horizontal nas curvas do fator de atrito para os diferentes fluidos. Sendo respectivamente, a água e o octano os fluidos com menor e maior atrito, num determinado sistema hidráulico.

Na Figura 4.33 são mostrados os resultados analíticos dados pela Equação (4.2) e os numéricos obtidos com a simulação feita no programa TRANSPETRO-1D. Neste os resultados são usados os fluidos cujas propriedades foram apresentadas na Tabela 4.5.

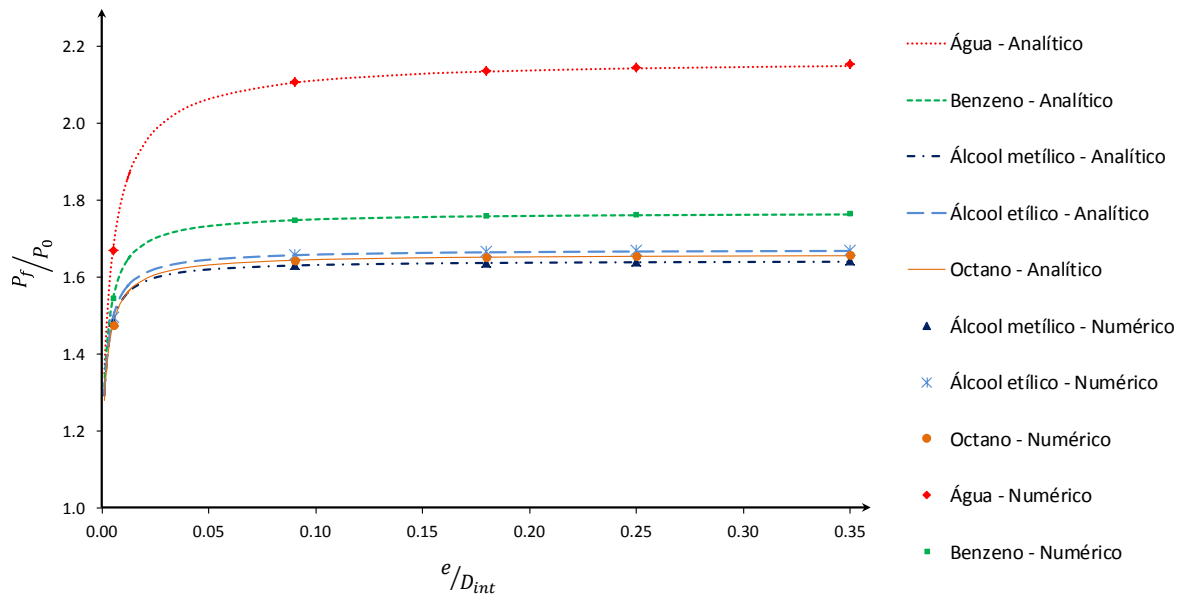


Figura 4.33 - Resultados analíticos e numéricos para a relação entre pressões em função da relação geométrica do duto, variando o diâmetro do duto e as propriedades do fluido.

Extraí-se da Figura 4.33, que tem maior influência sobre as pressões as relações (e/D_{int}) menores a 0.1, e quando estas relações são maiores, o comportamento das pressões é regido pelas propriedades do fluido sem influenciar as propriedades do duto. Ademais, se mostra uma maior relação entre pressões para fluidos com maiores módulos de elasticidade. Observa-se que a água apresenta maior aumento na pressão devido ser quase incompressível, enquanto o menor valor é observado para o álcool metílico. Este comportamento está diretamente relacionado ao módulo de expansão volumétrica, que é um indicador do grau de compressibilidade do fluido.

Em função dos resultados mostrados na Tabela 4.6 se chegam às mesmas conclusões tiradas da Tabela 4.4 validando-se as implementações feitas no programa TRANSPETRO-1D, para as situações aqui apresentadas.

A Tabela 4.6 apresenta os erros absolutos entre os resultados analíticos e numéricos.

Tabela 4.6 - Tabela de erros nos resultados para os fluidos utilizados.

e/Dint	Água	Octano	Álcool metílico	Álcool etílico	Benzeno
0,0010	0,019%	0,004%	0,003%	0,128%	0,002%
0,0057	0,050%	0,053%	0,041%	0,040%	0,036%
0,0163	0,132%	0,133%	0,106%	0,104%	0,093%
0,0488	0,145%	0,147%	0,043%	0,115%	0,103%
0,0995	0,173%	0,176%	0,142%	0,139%	0,125%

4.2.9 Caso 10 – Variação das propriedades do duto e do fluido

Com o objetivo de estudar a influência das propriedades do duto e do fluido em conjunto, no fenômeno transiente, se utiliza o parâmetro (β) definido na Equação (4.4) para os cinco tipos de fluidos, simulados anteriormente. Nesta parte também se varia o módulo de expansão volumétrica do fluido, em conjunto com as principais propriedades do duto. Os resultados analíticos são apresentados na Figura 4.34 em termos da relação entre a pressão inicial e a pressão final em função do parâmetro (β) para os cinco tipos de fluidos utilizados.

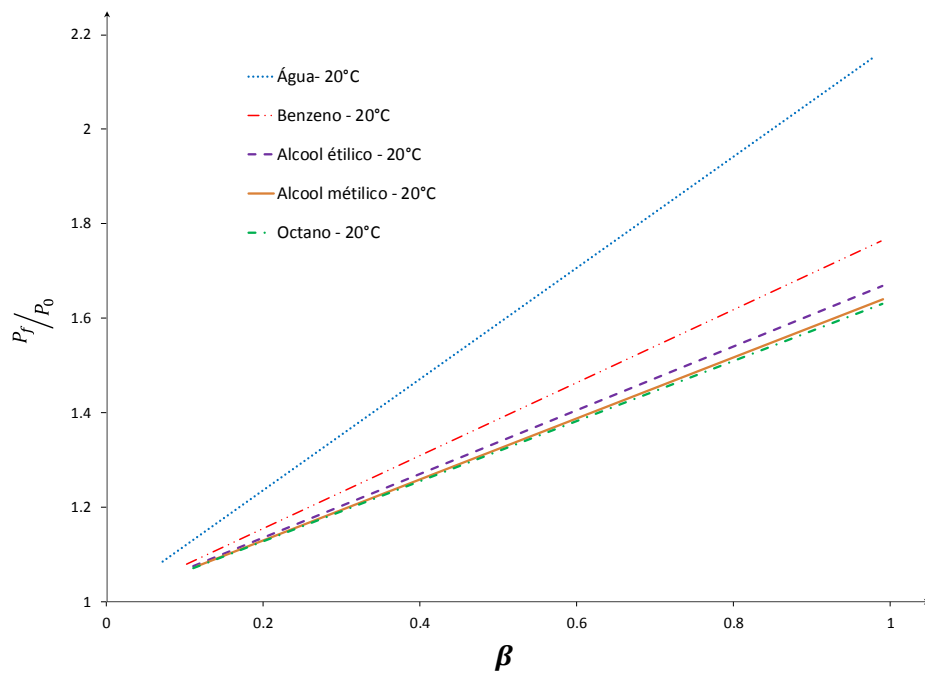


Figura 4.34 - Resultados analíticos e numéricos para a relação entre pressões em função do parâmetro (β) (Para 5 tipos diferentes de fluidos).

De acordo a esta Figura se observa que todas as curvas se iniciam no ponto onde não se apresenta ainda o fenômeno transiente, e a tubulação se encontra em regime permanente ($P_f = P_i$). Uma vez iniciado o fenômeno transiente as propriedades físicas e mecânicas dos componentes do sistema (duto e fluido) evidenciam suas influências. A água é o fluido que apresenta a maior sobrepressão independente das propriedades físicas e mecânicas do duto. Os demais fluidos induzem a níveis de pressão menores conclui-se assim, que a modelagem dos sistemas hidráulicos como a água conduziria a resultados mais conservadores (em favor da segurança).

Simulações variando a temperatura do fluido foram feitas, mas não se mostraram importantes, por isso, estes resultados são apresentados no Anexo E.

4.3 EXEMPLOS DE CASOS COM CIRCUITOS REAIS

4.3.1 Caso 11 – Bancada Contractor - Sistema com duto inclinado

O sistema hidráulico da bancada de Contractor (1965) tem sido muito utilizado neste trabalho. Para calibração dos resultados com os resultados experimentais para um duto horizontal, estes vão servir de referência para os resultados obtidos num duto inclinado. Na Figura 4.35 se ilustra o sistema com uma inclinação, na Figura 4.36 se mostra o esquema das simulações feitas com as respectivas inclinações (em graus) e na Figura 4.37 tem se a curva de fechamento.

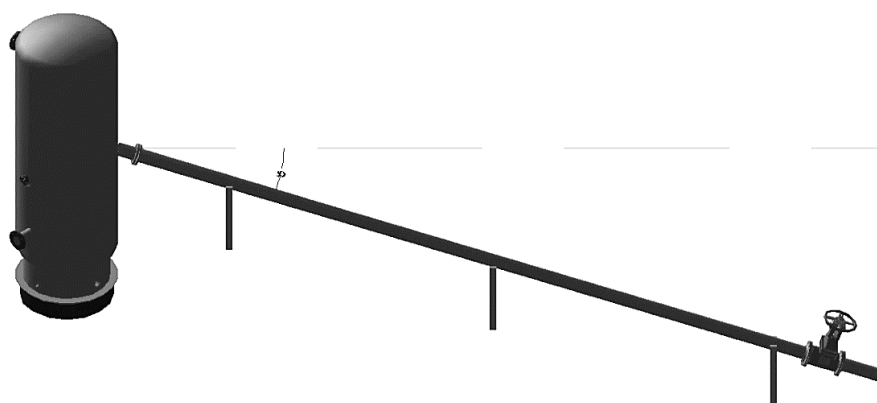


Figura 4.35 – Esquema do sistema hidráulico inclinado (modificado - Bancada Contractor).

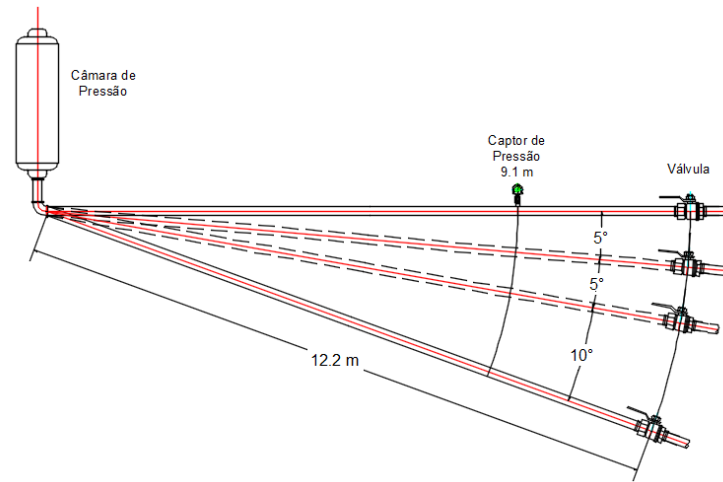


Figura 4.36 – Esquema da simulações com o tubo inclinado.

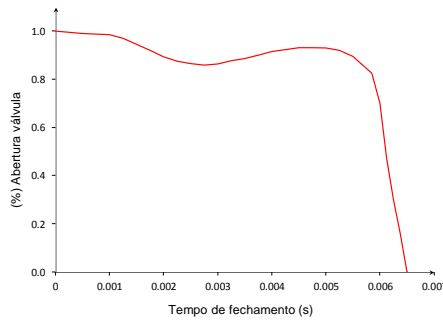


Figura 4.37 – Curva de fechamento da válvula (modificado - Contractor, 1965).

A Figura 4.38 apresenta-se a onda transiente de pressão para um ponto localizado no captor de pressão (Figura 4.36).

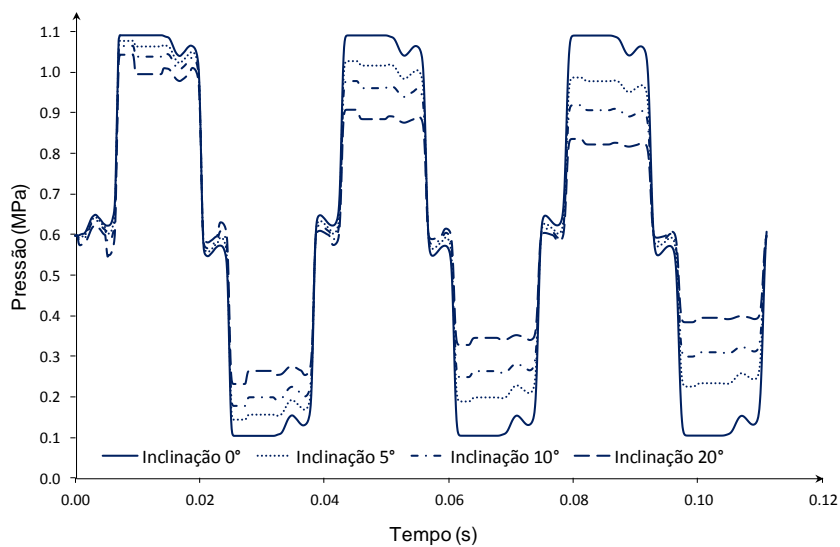


Figura 4.38 – Ondas transientes de pressão para as diferentes inclinações.

Observa-se na Figura 4.38 uma diferença importante nas ondas transiente de pressão à medida que se aumenta a inclinação do duto, sendo maiores as diferenças para cada ciclo transcorrido.

Mostra-se na Figura 4.39 a onda transiente de velocidade para um ponto localizado no captor de pressão (Figura 4.36).

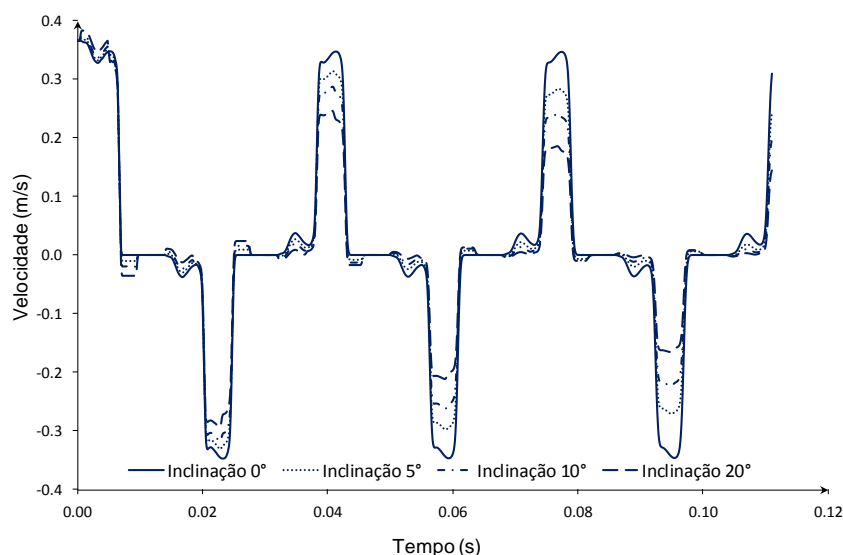


Figura 4.39 – Ondas transientes de velocidade para as diferentes inclinações.

Na Figura 4.39 se percebe nas ondas transiente de velocidade uma diminuição à medida que se aumenta a inclinação do duto. Adicionalmente, se observa que as perdas são maiores para cada ciclo transcorrido.

Os gráficos apresentados nas figuras 4.38 e 4.39 apresentam o mesmo comportamento ante o efeito da inclinação do duto, fazendo uma análise detalhada se identifica que quando um deles apresenta as maiores magnitudes ou outro apresenta os menores valores. Isto devido à relação existe entre as ondas de pressão e velocidade, onde a velocidade é uma derivada proporcional da pressão.

Como conclusão importante pode-se dizer que na medida em que se aumenta a inclinação do duto são menores as sobre pressões geradas num determinado fenômeno transiente, sendo conservador fazer uma análise do duto com o mesmo comprimento em posição horizontal. Esta conclusão é parcial, sendo necessária ser avaliada com resultados experimentais ou numéricos de softwares já avaliados.

4.3.2 Caso 12 – Representação aparente da cavitação como corte da onda na região negativa

A cavitação é um efeito relatado na literatura, cuja ocorrência é proveniente de um decréscimo de pressão abaixo de pressão de vapor do líquido. Assim a zona negativa da pressão nos gráficos de representação da pressão transientes, caracteriza mal o que realmente ocorre. Na realidade isso não ocorre, visto que quando a pressão chega próximo de zero (pressão de vapor do fluido), começa a se formar bolhas no fluido, e a pressão não baixa mais no sistema. Além dessa pressão (P_{cav}). Verificou-se por alguns resultados experimentais com o fluido sendo a água, que a pressão no momento da cavitação ficava em torno de:

$$P_{cav(agua)} = 0.5bar = 0.5(100000Pa) = 50000Pa = 0.5MPa \quad (4.5)$$

Os dados principais do sistema hidráulico a se modela se apresentam na Tabela 4.7, estes dados são inseridos no programa TRANSPETRO - 1D para fazer as simulações.

Tabela 4.7 - Dados de simulação do sistema.

Propriedades do sistema	V	0.8	Velocidade permanente
	P (Inicial)	500000	Pressão permanente
Propriedades do Fluido	ρ (kg/m ³)	998.2	Densidade
	k (Pa)	2.00E+09	Módulo de expansão volumétrica
	μ_f (Pa*s)	1.10E-03	Viscosidade dinâmica
Propriedades do Duto	L (m)	100	Comprimento
	Dint (m)	0.2	Diâmetro interno
	e (m)	0.005	Espessura
	α	0	Inclinação do duto
	E (Pa)	2.10E+11	Módulo de elasticidade
	ϵ (adm.)	0.000045	Rugosidade relativa
	μ (adm.)	0.3	Coeficiente Poisson

Na Figura 4.40 se apresenta a configuração do sistema hidráulico que será utilizado nesta simulação, o duto nesta situação é mais logo do que nas outras simulações.

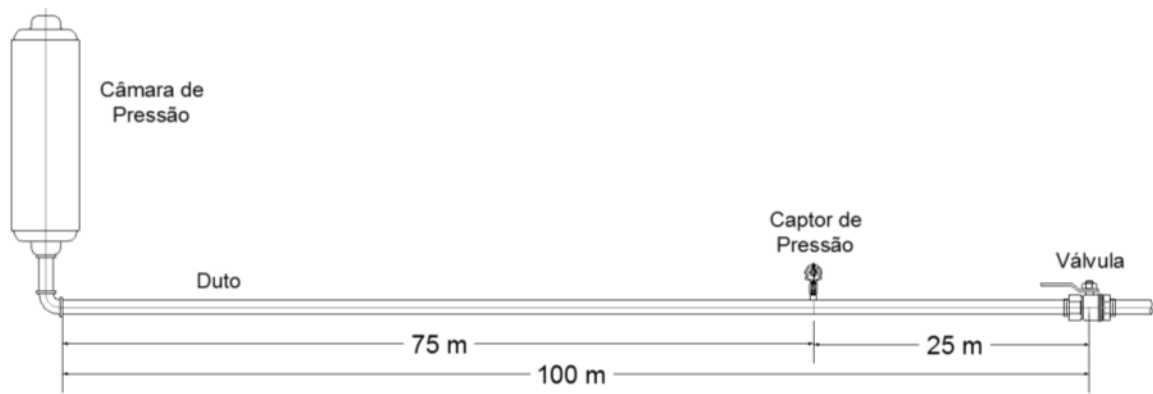


Figura 4.40 - Configuração do sistema hidráulico.

Como no programa ainda não existe um modelo de cavitação implementado, na zona de pressões negativas (descompressão do fluido), possui ramos similares à zona de pressão positiva (compressão do fluido). E isso fisicamente não ocorre então na hora da representação, deixa-se de mostrar a curva dada pelo programa, cortando-a no limite da pressão de vapor do líquido.

Na Figura 4.41 são apresentados os resultados numéricos da onda de pressão obtida pelo programa TRANSPETRO-1D para o ponto do duto onde se encontra o Captor de Pressão, localizado a $\frac{3}{4}$ partes do comprimento do duto entre a câmara de pressão e a válvula (75 m). Na zona negativa das curvas, as pressões foram limitadas a pressão de vapor na representação.

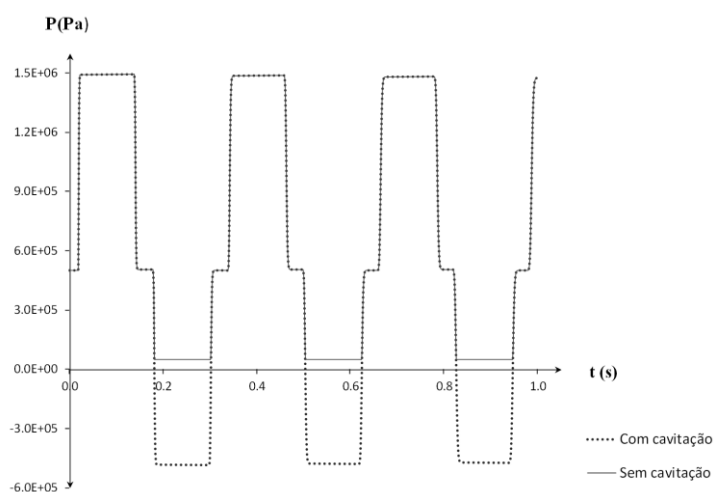


Figura 4.41 - Onda transiente de pressão em função do tempo no Captor de pressão (P).

4.4 SIMULAÇÕES

Nesta seção será apresentada uma bancada usada para estudos da propagação da propagação em centrais nucleais.

4.4.1 Setor nuclear - Bancada Claudia

Esta bancada de ensaio é descrita na literatura (PEDROSO, 1994b), onde os resultados são também explorados aqui para qualificar o programa TRANSPETRO-1D. Esta apresentava cerca 20.20 m de tubo de aço fundido com diâmetro interno de 0.146 m, ao longo da tubulação foram distribuídos captores de pressão, extensores, medidores de vazão entre outros. No ensaio experimental mantiveram-se todas as válvulas abertas com a exceção da A-R que se fecha durante o ensaio, foram computadas as perdas singulares.

Nas Figuras 4.42 e 4.43 se apresenta a representação em diferentes ângulos de vista do sistema hidráulico a ser analisado.

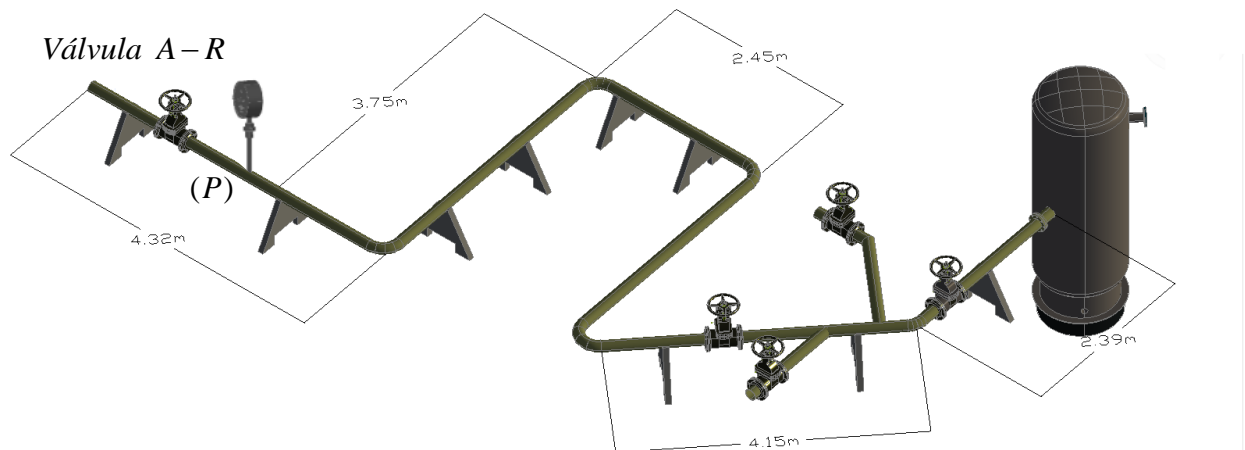


Figura 4.42 - Representação em isométrico do sistema hidráulico da bancada Claudia.

A curva de fechamento da válvula se apresenta na Figura 4.44 esta foi inserida no programa TRANSPETRO-1D utilizando a opção função pré-definida.

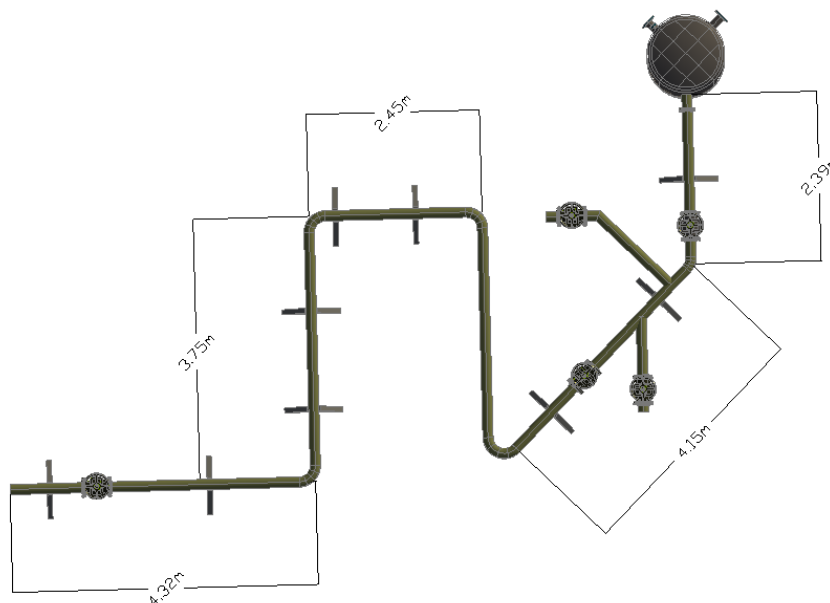


Figura 4.43 - Representação em planta do sistema hidráulico da bancada de Claudia.

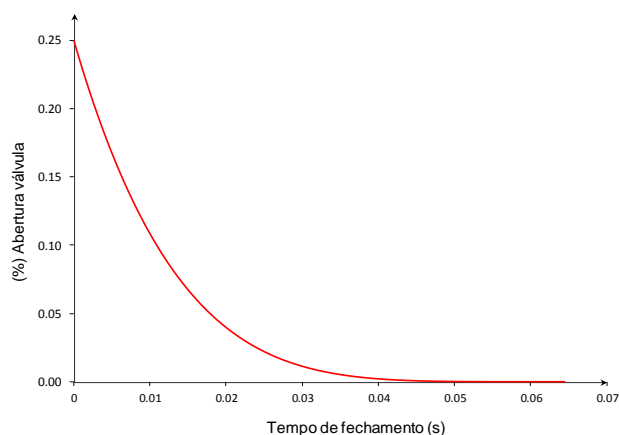


Figura 4.44 – Curva de fechamento da válvula (modificado - Nascimento, 1965).

Para a simulação no programa TRANSPETRO-1D, dividiu-se o sistema em 9 tubos, cada um deles inicia e termina onde se apresenta um dispositivo ou uma singularidade. No programa foram atribuídos os seguintes dados iniciais: $V_0 = 12.5 \text{ m/s}$, $P_0 = 2.8 \text{ Mpa}$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $a = 835 \text{ m/s}$, $P_{\text{atm}} = 100 \text{ KPa}$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

Nas Figuras 4.45 e 4.56 se exibem as ondas transientes de pressão experimental e numérica, respectivamente. Resultados que foram obtidos na Bancada Claudia (PEDROSO, 1994b) e com o programa TRANSPETRO-1D para o ponto A. Neste caso foi estudado o sistema com o fechamento da válvula apresentado na Figura 4.44.

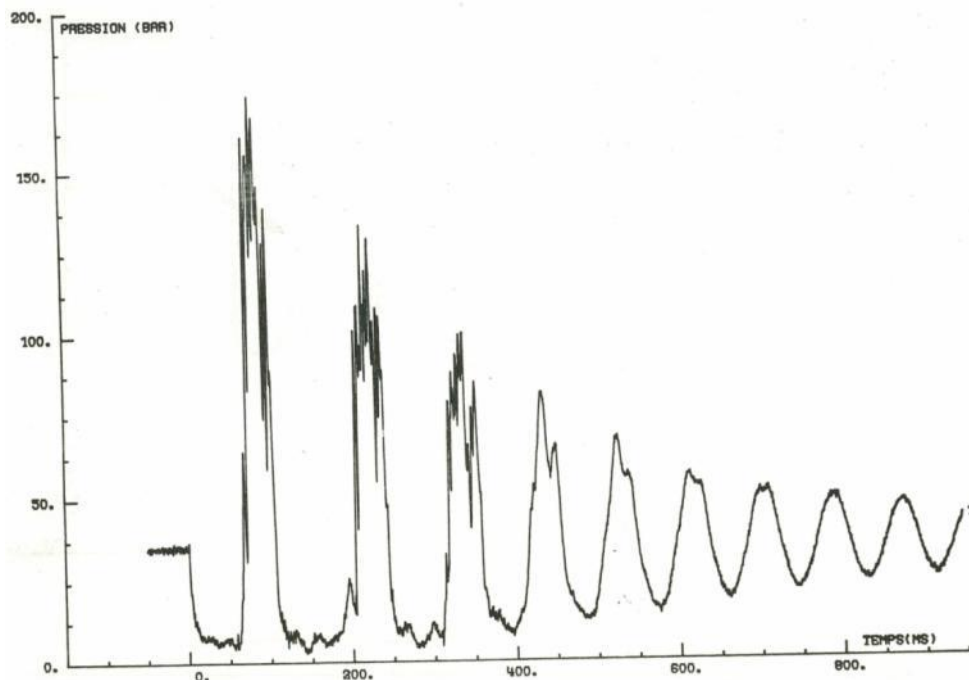


Figura 4.45 – Evolução de pressão experimental na bancada Claudia no captor de pressão (P).

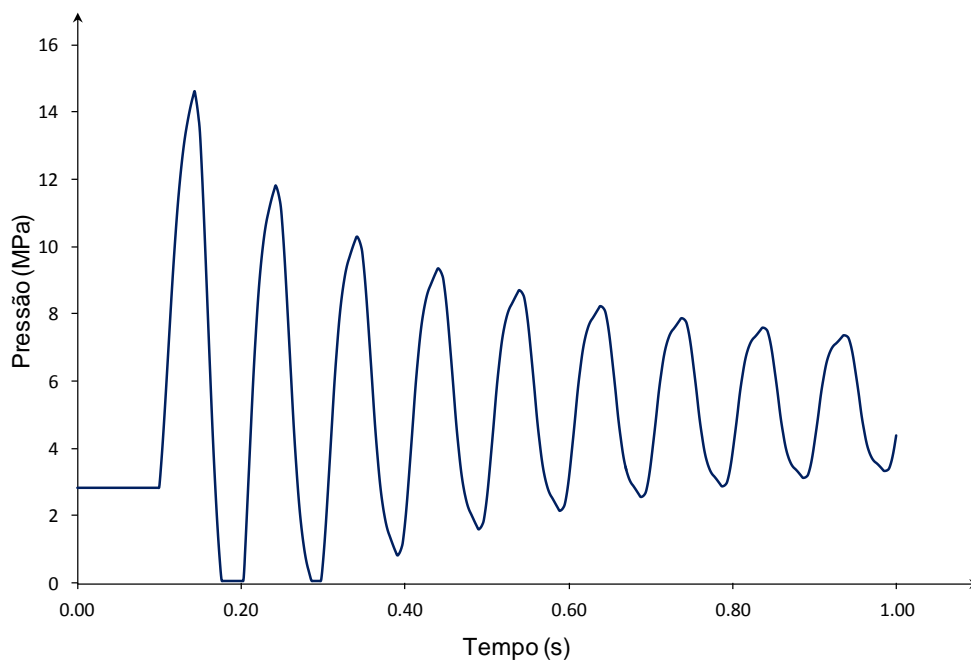


Figura 4.46 – Evolução da pressão numérica no captor P (Resultado TRANSPETRO-1D).

Comparando as ondas de pressão apresentadas nas Figuras 4.45 e 4.46 podem se fazer as seguintes constatações:

- As curvas apresentam certa similaridade nas amplitudes, larguras e quantidade dos picos.
- A maior similaridade entre as formas das ondas se observa a partir do quarto pico.
- As diferenças observadas nos resultados tal como nas amplitudes, período e forma dos ciclos consequências da falta de implementação dos mecanismos mais complexos no sistema, tais como a cavitação, degasagem, dupla-fase, etc., fatores que atenuam as ondas e alteram a celeridade.
- A implementação gráfica feita nos primeiros dois ciclos para apresentar os resultados com o efeito da cavitação consegue representar melhor o fenômeno.

Para se obter maior informação dos resultados obtidos na Bancada Claudia o leitor poderá recorrer aos textos de Pedroso (1994b) e Nascimento (2002).

4.4.2 Setor hidroelétrico – Usina hidroelétrica

Este caso trata de uma usina hidroelétrica, onde se apresenta um importante sistema tubular com multiplexagem (ramificação/duplicidade) componentes, o sistema tem as seguintes componentes: uma estrutura de captação, um conduto forçado com várias inclinações, uma chaminé de equilíbrio, uma mudança de diâmetro, uma bifurcação no final do sistema é uma válvula. Nas Figuras 4.47 e 4.48 se ilustram graficamente o sistema, a cor vermelha representa a linha principal simulada no programa TRANSPETRO-1D.

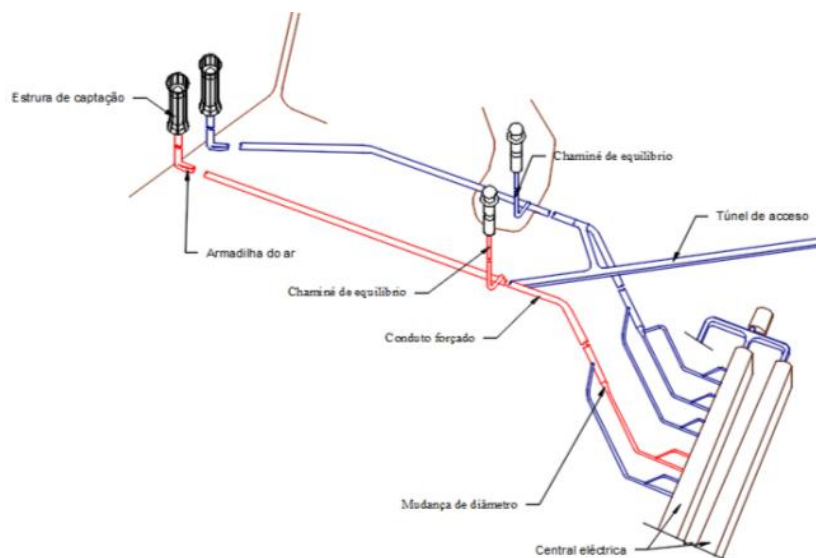


Figura 4.47 - Representação em isométrica de uma usina hidroelétrica (Fonte: Obtida em site {6}).

Para a simulação no programa TRANSPETRO-1D, dividiu-se o sistema em 9 tubos, cada um deles inicia e termina onde se apresenta um dispositivo ou uma singularidade. No programa foram atribuídos os seguintes dados iniciais: $V_0 = 1.95 \text{ m/s}$, $P_0 = 3.8 \text{ Mpa}$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $a = 1400 \text{ m/s}$, $P_{\text{atm}} = 100 \text{ KPa}$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $f = 0.02$, $D_1 = 5.5 \text{ m}$, $D_2 = 3.3 \text{ m}$.

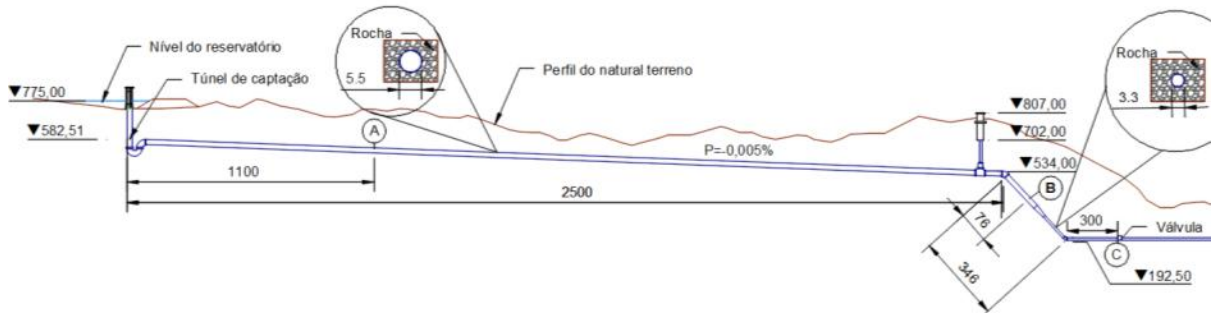


Figura 4.48 - Perfil da linha hidráulica simulada.

As Figuras 4.49 e 4.50 se exibem respectivamente as ondas de pressão e velocidade. Esses resultados que foram obtidos com o programa TRANSPETRO-1D para os pontos A, B e C com um fechamento súbito na válvula da adutora apresentada anteriormente, no ponto C.

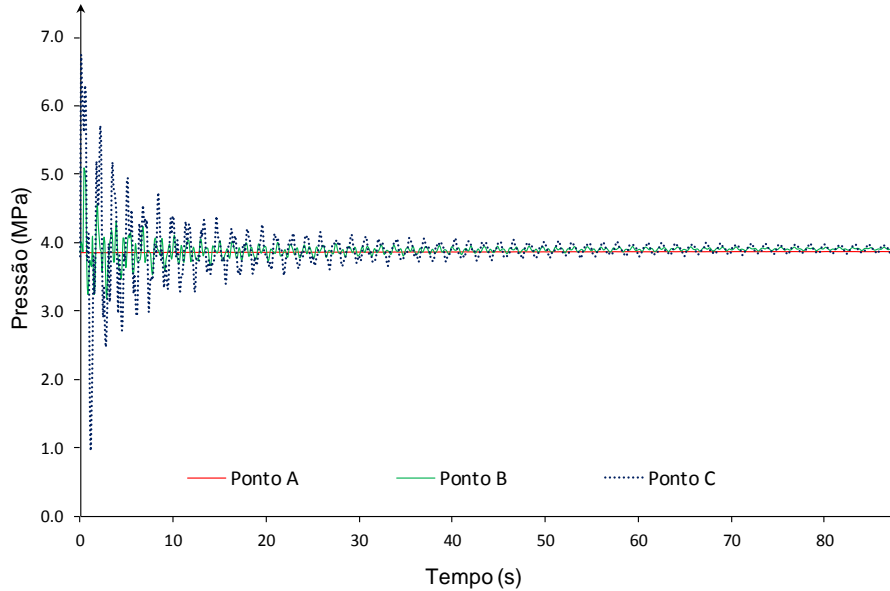


Figura 4.49 - Evolução da pressão para os pontos A, B e C.

A partir da Figura 4.49 podem-se fazer as seguintes observações para as ondas de pressão:

- No ponto A não se apresenta a sobrepressão gerada pelo fechamento súbito da válvula comprovando a eficiência da chaminé de equilíbrio,

- Observa-se que nos pontos B e C se apresenta uma sobrepressão de maior amplitude de oscilação. Fato esperado já que estes pontos se localizam antes da chaminé de equilíbrio.
- A diferença entre as amplitudes das ondas apresentadas para os pontos B e C é produzida basicamente pela inclinação, e perdas singulares introduzidas pelas mudanças de direção e de diâmetro.

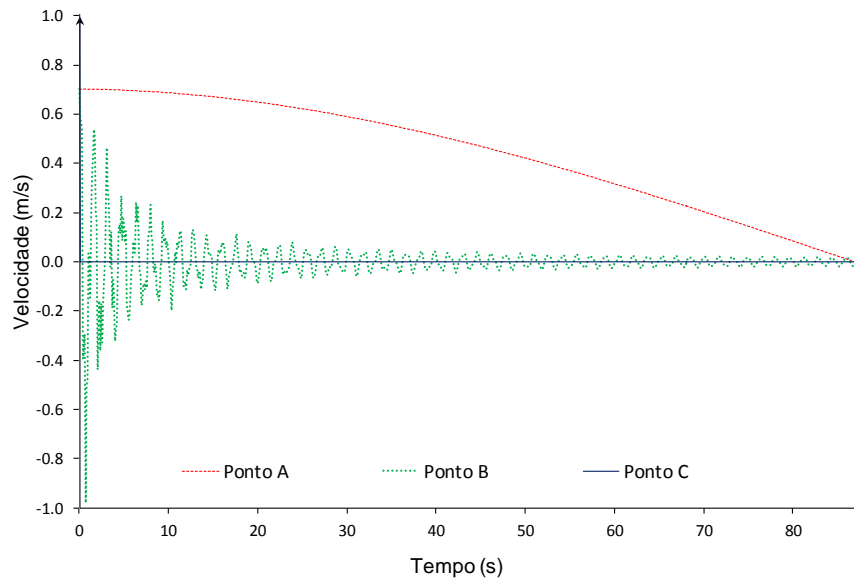


Figura 4.50 - Evolução da velocidade para os pontos A, B e C.

Da Figura 4.50 podem-se fazer as seguintes observações para a onda transiente de velocidade:

- O ponto C não apresenta variação na onda de velocidade, este apresenta um valor nulo, resultado já esperado no ponto onde se gera o fechamento súbito.
- No ponto B a onda oscila em torno da velocidade nula. Estas oscilações são de pequena amplitude e curto período.
- No ponto A, a onda oscila com um comportamento oscilatório, neste caso para o tempo elegido ela desmuni até chegar a velocidade zero.

Nota: Os resultados das simulações mostradas para a adutora deste caso, por conter elementos adicionais (chaminé de equilíbrio, inclinação, ramificação e mudança de diâmetro) apresentam respostas mais complicadas, que ainda não foram suficientemente analisadas e precisam ser avaliadas com resultados numéricos e/ou experimentais.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção serão apresentadas as principais conclusões que ficaram evidenciadas nos resultados alcançados durante essas pesquisas.

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Observa-se, que as propriedades físicas e mecânicas do duto e as propriedades físicas do fluido influenciam na magnitude da celeridade da onda transiente. Esses aspectos interferindo na celeridade da onda, indiretamente afetam o comportamento do fenômeno.

O algoritmo que calcula o fator de atrito (f) apresenta resultados similares aos obtidos experimentalmente para escoamentos em regime permanente. Considerando que o resultado obtido numericamente com (f) permanente representa apenas uma aproximação ao fenômeno real, já que (f) corretamente deveria ser extraído de um regime transiente. Em todo o caso os resultados obtidos experimentais não produziram aberrações para o fator de atrito usado.

Os resultados numéricos obtidos pelo programa TRANSPETRO-1D permitem representar bem a evolução da pressão de um fenômeno transiente em seus primeiros ciclos, conforme os resultados obtidos na comparação com os resultados experimentais. Para ciclos longos, fatores como o degasagem provocam alterações que o programa não consegue representar.

As ondas transientes de pressão e velocidade variam no tempo e no espaço gerando superfícies as quais são possíveis de se obter pelo programa TRANSPETRO-1D. Todavia esta representação requerer o auxílio de um programa que plote gráficos em três dimensões (3D), o qual pode ser Excel (utilizado neste trabalho) ou outros mais avançados disponíveis no mercado de softwares.

Considerando o estudo paramétrico feito neste trabalho, o qual foi comparado com soluções analíticas aproximadas (para a magnitude da pressão) se obtêm o conjunto de conclusões abaixo:

- i. O tempo de fechamento da válvula é um fator de fundamental importância, devido ao fato de que, quando se procede a um fechamento rápido da válvula (não

necessariamente súbito), pode ser produzido um aumento considerável na magnitude da pressão reinante no sistema (acima de 40%).

- ii. O tipo de fechamento da válvula não apresenta uma grande influência no aumento da pressão do sistema. No entanto, as curvas de fechamento que se apresentam mais próximas ao fechamento súbito são as que proporcionam os maiores aumentos na pressão.
- iii. As válvulas comerciais que se localizam em dutos não apresentam uma considerável influência no aumento da pressão do sistema. Verifica-se que produzem apenas variações na forma da onda transiente de pressão, a qual depende da forma da curva de fechamento da válvula.
- iv. Nas simulações observa-se que a válvula Howell-Burguer localizada no final da linha principal do sistema hidráulico é a melhor para sistemas que permitam um vazamento pequeno (usinas hidroelétricas) em função de provocar um transiente menor e maior atenuação das ondas de pressão.
- v. A rugosidade da tubulação não apresenta uma grande influência sobre as ondas transientes de pressão, no entanto é uma variável importante nos escoamentos em regime permanente.
- vi. A relação espessura/diâmetro interno do duto (e/D_{int}) tem uma faixa de valores onde tem uma importante influência na magnitude da onda de pressão e na sua celeridade (a faixa na relação é desde 0.00 até 0.25 aproximadamente quando se fazem variações no material e até 0.10 quando se fazem variações no fluido).
- vii. A variação do material do duto apresenta uma grande influência na magnitude da onda de pressão e na celeridade da mesma, produzindo maiores solicitações e também fadiga no material.
- viii. O aço é o material que apresenta maior sobrepressão durante um transiente denominado golpe de aríete devido ao fato dele ser um material muito rígido (maior resistência a deformação) gerando um maior aumento na pressão interna

do conduto forçado. Ou seja, para um dado transiente são as tubulações em aço que experimentam as maiores pressões.

- ix. Entre os líquidos a água é o fluido que apresenta maior sobrepressão durante um transiente, devido ao fato que este fluido é o que tem o maior módulo de expansão volumétrica (quase incompressível) produzindo a maior pressão interna no conduto forçado.
- x. Os módulos de expansão volumétrica do fluido e de elasticidade do material são as propriedades físicas do fluido e do material, respectivamente, que mais influenciam na resposta transiente de pressões nas adutoras.

Ou seja, as maiores magnitudes das ondas de pressão aparecem para condutos forçados cujo material da elaboração do duto é o aço e o fluido é a água, independente das propriedades físicas e mecânicas do sistema.

A implementação da inclinação do duto apresenta os resultados aparentemente coerentes, estes ainda devem ser validados com resultados experimentais, ou com resultados obtidos por softwares comerciais, para que conclusões confiáveis sejam tiradas.

Os resultados obtidos na simulação da bancada Claudia, reproduz aqueles com uma boa aproximação, mas o programa tem as limitações que não permitem representar os efeitos de degasagem e cavitação, os quais se encontram presentes no experimento dessa bancada de ensaios.

Os resultados obtidos na simulação da usina hidroelétrica estão dentre os resultados esperados, no entanto estes precisam ser avaliados com resultados experimentais (muito caro) ou resultados numéricos obtidos de modelações em softwares comerciais.

Finalmente, constata-se que os objetivos planejados nesta pesquisa foram alcançados, com alguns resultados interessantes para o setor de tecnologia de adutoras, qualificando o programa TRANSPETRO-1D, como uma ferramenta adequada para fazer análise do fenômeno transiente neste domínio.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho trouxe apenas um pequeno aporte técnico na linha de pesquisa sobre transientes desenvolvida pelo Grupo de Dinâmica e Fluido Estrutura da UnB (GDFE), mas que pode e deve ter continuidade. Para a continuação em trabalhos futuros se apresentam as seguintes sugestões e recomendações:

- Validar mediante os ensaios experimentais os aspectos relacionados à inclinação do duto, principalmente em sistemas hidráulicos reais.
- Elaborar algoritmos no programa TRANSPETRO-1D que permitam fazer os gráficos das superfícies das ondas transientes de pressão e velocidade, e também a possibilidade de realizar gráficos em todos os pontos do sistema num determinado tempo.
- Implementar alguma formulação que permita o cálculo do fator de atrito e perdas singulares em regimes transientes. Estes fatores podem produzir efeitos diferentes de aqueles típicos dos escoamentos no regime permanente.
- Introduzir novas efeitos no programa TRANSPETRO-1D, tais como: interação fluido-estrutura, degasagem, cavitação, gradientes de temperatura, etc.
- Adicionar novas condições de contorno no programa TRANSPETRO-1D, tais como: vazamento, bomba na linha, sistemas de redes, pressurizadores, etc.
- Implementar a formulação teórica para fluidos de baixa densidade (gás) apresentada no Anexo B da tese de Nascimento (2002).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, B. A. KOELLE, E. (1992). “Fluid Transients in Pipe Networks”. CMP, Elsevier Applied Science. EUA. New York.

ALLIEVI, L. (1903). “Teoría del colpo d’ariete”. Anais do Collegio degli Ingegneri ed Architetti. Milan.

ALLIEVI, L. (1925). “Notes I-IV”, Theory of Waterhammer. Roma.

AMEIN, M. CHU, H. L. (1975). “Implicit Numerical Modeling of Unsteady Flow”. Journal of the Hydraulic Division (ASCE). Vol. 101, pages: 717-731.

ANDRZEJEWSKI, E. A. (2009). “Avaliações numéricas de chaminés de equilíbrio: subsídios para projetos de circuitos de geração”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná.

BERGERON, L. J. B. (1961). “Water Hammer in hydraulics and surges in electricity”. Wiley.

BRATLAND, O. (1986). “Frequency-Dependent Friction and Radial Kinetic Energy Variation in Transient Pipe Flow”. 5th International Conference on Pressure Surges, Paper D2, BHRA.

Bratland, O. (1995). “Simulation Models of Subsea Umbilicals, Flowlines and Fire Pump Systems”. Offshore Technology Center, 7715.

BRATLAND, O. (2009). “Pipe flow 1: Single-phase Flow Assurance”.

BRATLAND, O. (2013). “Pipe flow 2: Multi-phase Flow Assurance”.

BREKKE, H. (1984). “A stability study on hydro power plant governing including the influence from a quasi non-linear damping of oscillatory from the turbine characteristics”. Doctoral thesis, NTNU, Trondheim.

BRUNONE, B. (2000). "Velocity Profiles and Un-steady Pipe Friction in Transient Flow". Journal Resources Planning and Management (ASCE). pages: 236-244.

CHAUDHRY, H. M. (1988). "Applied Hydraulic Transients". Van Nostrand Reinhold, New York.

CONTRACTOR, D. N. (1965). "The Reflection of Waterhammer Pressure Waves From Minor Losses". J. of Basic Engineering, pages: 445–452.

COVAS, D. I. C. (2003). "Inverse transient analysis for leak detection and calibration of water pipe systems modelling special dynamics effects". Doctoral thesis. Imperial College and Science, Technology and Medicine.

CRUZ, E. (2009). "Acidente em Usina Hidrelétrica na Rússia". Trad e Adap: Gilson Cardoso.

CURTIS, G. F. (1973). "Applied Numerical Analysis". Addison Wesley P.

FONTES, A. M. LIMA, R. F. BEZERRA, L. M. (2011). "Determinação Prática de Fadiga em Tubulação sob Transiente Fluído". In: XXXII Iberian-Latin Congresso computational methods in Engineering (CILAMCE – XXXII),

GIBSON, N. R. (1920). "Pressure in Penstocks Caused by Gradual Closing of Turbine Gates". Trans., Amer. Soc. Civil Engers. Vol. 83, pages: 707-775.

Gilbert, R. J. (1988). Vibrations Des Estruturas: Interactions avec les Fluides - Sources d'Excitation Aléatoires: CEA - EDF - INRIA: Eyrolles, Paris.

GRAY, C. A. M. (1954). "Analysis of water hammer by characteristics". Proc. Amer. Soc. Civil Engers. Vol. 119, pages: 1176-1189.

HAM, A. (1982). "On The Dynamics of Hydraulic Lines Supplying Servosystems". Laboratorium Voor Verktuigkundige Meet – En Regeltechniek, Delft.

IZQUIERDO, J. IGLESIAS, P. L. (2002). “Mathematical Modeling of Hydraulic Transients in Simple Systems”. *Mathematical and Computer Modeling* 35, pages 801-812.

IZQUIERDO, J. IGLESIAS, P. L. (2004). “Mathematical Modeling of Hydraulic Transients in Complex Systems”. *Mathematical and Computer Modeling* 39 (4-5), pages 529-540.

JOUKOWSKY, N. (1898). “On the hydraulic hammer in water supply pipes”. *Memoires de l'Académie Imperiale des Sciences de St.-Petersbourg*.

JOUKOWSKY, N. (1900). “On the hydraulic hammer in water supply pipes”. *Mémoires de l'Académie Impériale des Sciences de St.-Pétersbourg*, Series 8, Vol. 9, No. 5.

LAROCK, B. E. JEPPSON, R. W. WATTERS, G. Z. (1999). “Hydraulic of Pipelines Systems”. CRC Press, New York.

LESSA, R. C. (1984). “Transientes Hidráulicos em Sistemas Complexos de Adução de Agua”. Dissertação de Mestrado. EESC/USP.

LI, W. H. (1972). “Differential Equations Hydraulic Transients, Dispersion and Groundwater Flow”. *Mathematical Methods in Water Resources*. Prentice-Hall, EUA.

LIBERMAN, P. BROWN, E. A. (1960). “Pressure Oscillations in Water-Cooled Nuclear Reactor Induced by Water-Hammer Waves”. *J of Basic Engineering*, pages: 901-911.

LIMA R. F. PEDROSO L. J. (2004). “Frequências e Modos de vibração em Dutos através de análise Transiente”. XXXI, Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Mendoza.

LOEFFLER, C.F. RACHID, F. B. BULCÃO, A. “Simulação de Transientes Hidráulicos Rápidos Através do Método dos Elementos de Contorno”. *COTEQ*, pages: 235 – 238, Brasil, 1996.

MAGZOUN, E. KWAME, A. (2007). “Hydraulic transient in a pipeline. Using Computer Model to Calculate and Simulate Transient”. Master thesis. Lund University.

MENDONÇA, L. C. (1986). “Estudo dos Transientes Hidráulicos em uma Instalação de Bombeamento”. Dissertação de Mestrado. EESC/USP.

NASCIMENTO, C. M. B. (2002). “Estudo de Transientes em Dutos derivados de Petróleo”. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília.

NASCIMENTO, C. M. B. PEDROSO, L. J. (2002). “Ondas de Pressão em Dutos Induzidas por Escoamento Transientes”, VII PACAM, Temuco.

NASCIMENTO, C. M. B. LIMA, R. PEDROSO, L. J. (2002). “Estudo da Propagação de Ondas em Tubulações de Petróleo Contendo Atenuadores de Pressão”. XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Universidade de Brasília.

NEVES, C.E.V. (2004). “Estudos Analíticos e Numéricos de Transientes e vibrações Livres em Adutoras de Barragens”. Relatório de iniciação científica, Universidade de Brasília.

NERI, L. PEDROSO, L. J. (1999). “Aspectos Numéricos na Avaliação de Escoamentos Transientes em Tubulações”. Universidade de Brasília, 1999.

PARMAKIAN, J. (1963). “Waterhammer Analysis”. Dover Publications Inc. New York.

PEDROSO L. J. (1986). “Qualification Expérimentale des Méthodes de Calculs des Interactions Fluide-Structures dans les Circuits Tubulaires de Réacteurs Nucléaires”. These de Doctoral: INSTN/ Laboratoire de Vibrations et Seismes, DDMT/SMTS. Centre d'Études Nucléaires de Saclay-France.

PEDROSO L. J. GILBERT, R. J. (1987). “Experimental Study of the Pressure Drop of Perforated Plates in Unsteady Ducted Flow”. In: 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology.

PEDROSO, L. J. (1990). “Estudo experimental da Atenuação de Ondas Orientado aos Transitorios ocasionados pela Reação Explosiva Sódio-Água”. In: 6th Brazilian Symposium on piping and pressure vessel. Rio de Janeiro, pages: 303-321.

PEDROSO, L. J. (1992). “Estudo teórico sobre os Mecanismos de Perdas de Pressão e Reflexões de Ondas por Oscilação de um Transiente”. RTP-005/92. Universidade de Brasília.

PEDROSO, L. J. BARBOSA, A. N. (1993a). “Ondas transientes em circuitos tubulares pressurizados: reflexões e amortecimentos”. XIV CILAMCE; IPT-SP, pages: 812-821.

PEDROSO, L. J. CARVALHO, M.A.M, MACEDO, A. P. (1993b). “Analytical approach on pressure drop sources and waves reflections in nuclear due to transients”. 12th SMIRT, Univ. Stuttgart-RFA, E11/3, pages: 115-120.

PEDROSO, L. J. BARBOSA, A. N. (1993c). “Perdas de Pressão em escoamentos Transientes: reflexões de ondas e amortecimentos”. RPT- 003/93 – PJ/PQ – 4(1), CNPQ.

PEDROSO, L. J. MACEDO, P. BARBOSA, A. (1993d). “Calculations of the loads induced by pressure wave flow in nuclear reactor due to transients”. 12th SMIRT.

PEDROSO, L. J. (1994b). “Análise e discussões sobre os resultados experimentais da Bancada de Claudia”. [Referência: Note Technique DRE/STRE/LMA 85/685 (Bucle Claudia – Essais D’un Clapet a Battant Bouvier DN150) – CEA – CEN/Cadaruche – France 07/85] – Nota técnica de Pesquisa, UnB/FT, ENC.

PEDROSO, L. J. BRITO, V. J. L. BARBOSA, A. N. (1994a). “TRANS – A computer Code for the Analysis of Transients in Nuclear Reactors Piping Networks”. In: V general conference on nuclear Energy, Rio de Janeiro.

PEDROSO, L. J. BARBOSA, A. N. MORAIS, M. V. G. (1995). “Pressure Waves in a Water Cooled Nuclear Reactor Induced by Transients”. 13th Internacional conference on Structural Mechanics in reactor Tecnology, 13 SMIRT, UFRS, P. Alegre.

PEDROSO, L. J. NERI L. NASCIMENTO, C. M. B. (2001). “A Computer Code for Analysis of Pressure Waves Induced by Transients in Nuclear Reactor Piping Systems – RETRANS”. 16th SMIRT, Washington.

PEDROSO, L. J. BARBOSA, A. N. (2005). “Pressure Waves Induced by Transients in a Pipe Flowing Fluid-Cavitation Effects”. In: 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology – (18th SMIRT).

PEDROSO, L. J. NEVES, C. E. V. (2006). “JTRANS – Programa Interativo para Simulação da propagação de transients em Adutoras de Barragens”. In: XXXII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural.

PEDROSO, L. J. GOMEZ, V. W. NASCIMENTO, C. M. B. (2014). “Estudo dos parâmetros básicos que influenciam na resposta das pressões em escoamentos transientes”. In: XXXV Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, CILAMCE 2014.

PEZZINGA, G. (1999). “Quasi -2D model for unsteady flow in pipe networks”. J. Hydraulic Eng., 125(7), 676-685. 1999.

PIRES, L. F. G. BARRETO, C.V. LADEIA, R. C. C. (2004). “Análise de Transientes Devido ao Fechamento Rápido de Válvulas em Dutos Curtos”. In: III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2004, Belém. Anais do III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.

RAMPINELLI, C. BARBOSA, A. N. PEDROSO, L. J. (2008). “Rotinas em JAVA para a análise de transientes em adutoras de barragens”. In: XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural.

SANTOS, F. O. (2010). “Simulação de escoamentos transientes em dutos de transporte de líquido”. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SELEGHIM P. J. (2011). “Metodologia de Caracterização da Propagação acústica em Tubulações de transporte de fluidos bifásicos gás-líquido”. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo.

SIRVOLE, K. (2007). “Transient Analysis in Pipe Networks”. Master thesis. Virginia Polytechnic Institute & State University.

- STREETER, V. WYLIE, E. (1967). "Fluid Transients". McGraw-Hill Company.
- TAYLOR, S. E. M., JOHNSTON D. N., LONGMORE, D. K. (1997). "Modelling of Transient Flow in Hydraulic Pipelines, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers". Journal of Systems And Control Engineering, v. 211, pages: 447 – 456.
- TOWLER, B. "Swamee - Jain Friction Factor". UMass Amherst, 2012.
- TULLIS, J. P. WYLIE, E. STREETER, V. (1976). "Waterhammer Analysis with Air Release". Conference on Pressure surges, Bedford, England.
- TRIKHA, A. K. (1975). "An efficient method for simulating frequency-dependent friction in liquid flow". J. Fluids Eng., Vol. 97(1), pages: 97 – 105.
- VARDY, A. E. HWANG, K. (1991). "A Characteristics Model of Transient Friction". Journal of Hydraulics Research 29, No. 5, pages: 669-684.
- WALSKI, T. M. CHEASE, D. V. SAVIC, D. A. (2003). "Advanced Water Distribution Modeling and Management". Haestad Press, Waterbury, Conn.
- WANG, X. F. TANG, R. M. YAO, Z. H. (1992). "The Simulating Calculation of Waterhammer in MFWS of PWR Nuclear Power Plant". 12th SMIRT.
- WIGGERT, D. C. SUNDQUIST, M. J. (1979). "The effect of gaseous cavitation on fluid transients". J. Fluids Eng., ASME, 101(3), pages: 79-86.
- WOOD, D. J. R DORSCH, R. LIGHTNER, C. (1966). "Wave Analysis of Unsteady Flow in Conduits." Journal of Hydraulics Division ASCE, March 1966, Vol. 92, pages: 83 – 220.
- WYLIE, E. B. STREETER, V. L. (1978b). "Column separation in horizontal pipelines". In: Proceedings of the Joint Symposium on Design and Operation of Fluid Machinery, IAHR/ASME/ASCE, Colorado State University, Fort Collins, USA, Vol. 1, 3-13.

WYLIE, E. (1984). "Fundamental equations of waterhammer". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 4, pages. 539-542.

WYLIE, E. STREETER, V. SUO, L. (1993). "Fluid Transients in Systems". McGraw-Hill Company.

ZARZYCKI, Z. (2000). "On Weighing Function for Wall Shear Stress During Unsteady Turbulent Pipe Flow". Proc. of the 8th International Conf. on Pressure Surges, BHRGroup, The Hague, The Netherlands.

SITES

<http://bookings.brol.com/brolmedia/gallery/ground/fozdoiguacu/itaipu.jpg>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2015.

<http://areaseg.com/vote2/html/un.html>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2015.

<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/terminais-e-oleodutos/terminal-ribeirao-preto.htm>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2015.

<http://www.russobras.com.br/subdiv/cacassia.php>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2015.

http://en.wikipedia.org/wiki/Sayano%E2%80%93Shushenskaya_Dam. Acesso em: 15 de fevereiro de 2015.

https://www.isagen.com.co/comunicados/Central_sancarlos_2013.pdf. Acesso em: 10 de janeiro de 2015.

file:///G:/Stoner_Pipeline_Simulator_Brochure.pdf. Acesso em: 30 de março de 2015.

file:///G:/Stoner_Pipeline_Simulator_Brochure.pdf. Acesso em: 28 de março de 2015.

<http://eng-software.com/products/pipeflo/features.aspx>. Acesso em: 29 de março de 2015.

http://www.energy-solutions.cn/pdf/pipe_studio_gas2.pdf. Acesso em: 27 de março de 2015.

<http://www.intsok.com/style/downloads/Kongsb-PDF-LedaFlow-by-Kongsber.pdf>. Acesso em: 28 de março de 2015.

<https://www.ljll.math.upmc.fr/ERTint/pdf/Tacite.pdf>. Acesso em: 29 de março de 2015.

http://www.software.slb.com/lists/salesandmarketingdocuments/attachments/326/olga_ps.pdf. Acesso em: 30 de março de 2015.

ANEXOS

ANEXO A – ALGUNS PROGRAMAS COMERCIAIS PARA A SIMULAÇÃO DE TRANSIENTES

Os programas comerciais desenvolvidos para analisar o fenômeno transiente em dutos para transporte de petróleo ou gases, até o momento possuem dois ramos: monofásicos e multifásico.

A.1 PROGRAMAS MONOFÁSICOS

A.1.1 Pipeline studio (TGNET E TLNET)

Este programa gera modelos de gasodutos que vão desde simples linhas de transmissão de entrega até sistemas complexos de redes que contem múltiplas entradas, pontos de entrega, compressores e outros equipamentos que afetam as operações de dutos e taxa de transferência. O simulador incorpora técnicas avançadas de solução numérica, modelagem detalhada de equipamentos e um ambiente de configuração gráfica.

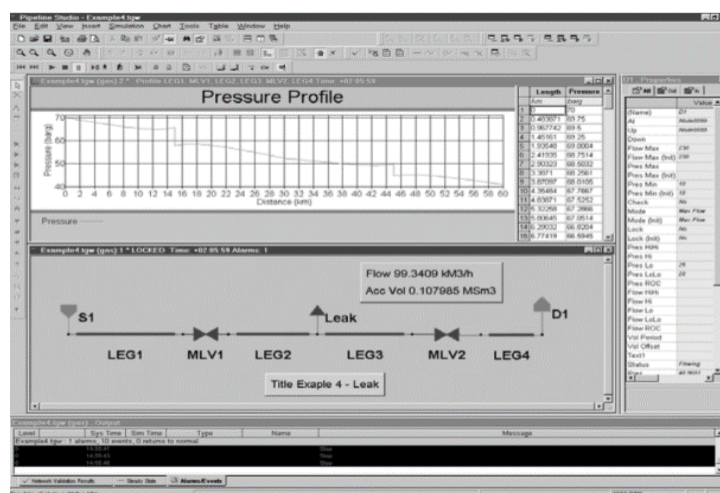


Figura A.1 - Perfil Pressão - Pipeline Estúdio.

Vantagens:

- Apresenta configuração gráfica, arraste e desenvolvimento, caixas de diálogo com guias, ajudas, várias Interfaces com bibliotecas, etc.
- Rede de visualização, planilhas, Tabelas e diagramas simultâneos.

- Planilhas configuráveis para entrada de dados e visualização de resultados de simulação.
- Verificação automática de dados para permitir a visualização rápida de erros.
- Configuração de caixas de diálogo.
- Escolha de sistemas de unidades.
- Ajuda On-line.
- Valores de entrada padrão.
- Configurações simultâneas.
- Compartilhar os dados com planilhas, processadores de texto ou programas para apresentação.
- Simulação iterativa para regime de escoamento transiente.

A.1.2 Stoner pipeline simulation (SPS)

Stoner Pipeline Simulator (SPS) é o programa computacional líder mundial nas simulações de escoamento em regime transiente de fluido em redes de gás natural. Possibilita as análises de controle de sistemas, de desempenho do equipamento, da temperatura, de composição do sistema hidráulico, da capacidade de pressão de fluxo, ou qualquer combinação destes que possa ser simulada com precisão e facilidade. O SPS realiza simulações simplificadas bem idealizadas. Permite ao usuário escolher o grau de complexidade para atender às suas necessidades.

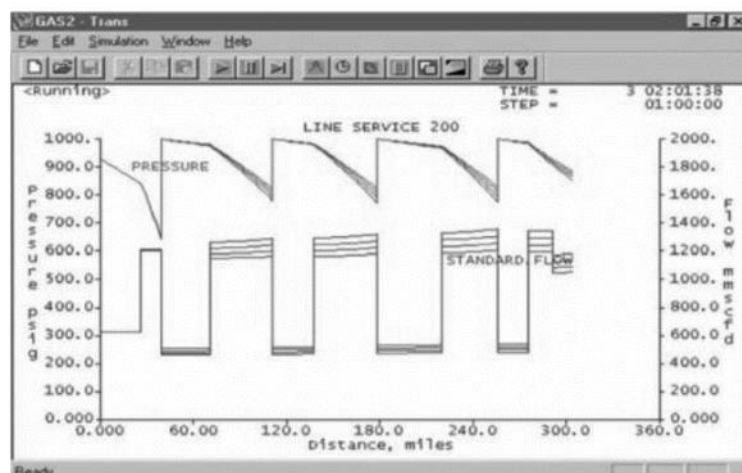


Figura A.2 - Line service – Stoner Pipeline Simulation.

Vantagens:

- Simula todo o equipamento existente, incluindo tubos, compressores, reguladores, válvulas, registro e trocadores de calor, exatamente como configurado em campo.
- Sistema de controle, sensores, controladores, relés e atuadores.
- Controles idealizados para simulações mais simplificadas.
- Compressores projetados, perfeitamente detalhados.
- Introduce os dados de desempenho do compressor centrífugo a uma velocidade única e aplica as leis de escoamento para completar o mapa de desempenho.
- O usuário pode especificar a curva completa de desempenho para o compressor e/ou turbina direcionadora, assim como simular compressores com palhetas variáveis. Para compressores alternativos se utiliza tanto unidades simplificadas ou compressores mais detalhados que consideram deslocamento e índices de folga.

A.2 PROGRAMAS MULTIFÁSICOS

A.2.1 Olga

Os modelos Olga simulam o comportamento de escoamento dinâmico multifásico dependente do tempo ou escoamento transiente, para maximizar o potencial de produção. A modelagem transiente é um componente essencial para estudos de viabilidade e projetos desenvolvidos em campo. A simulação dinâmica é essencial em águas profundas e é amplamente utilizada em estudos de estruturas tipo offshore e onshore onde se investiga o comportamento de oleodutos e de poços.

A Simulação transiente com o programa OLGA fornece uma dimensão adicional à análise do estado estacionário por meio de analogia com sistemas dinâmicos onde ocorrem mudanças na variação do tempo nas taxas de escoamento, nas composições de fluidos, na temperatura, a deposição de sólidos, e mudanças operacionais. Situações operacionais, tais como alterações na taxa de fluxo, desligamento e inicialização são inerentemente ao escoamento transiente e solicita ao programa OLGA a aquisição em detalhes do comportamento total do sistema. Perdição adequada destas características dinâmicas tem um impacto importante sobre o projeto, operabilidade e otimização do sistema.

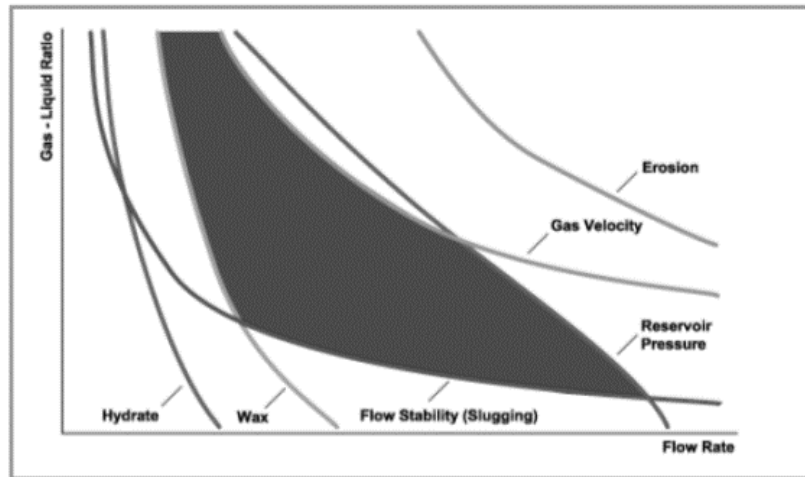


Figura A.3 – Solução dinâmica para uma ótima produção – OLGA.

Vantagens:

- Maximiza o potencial de produção modelando o comportamento dependentes do tempo.
- Reduz as despesas de capital através do dimensionamento correto de instalações.
- Reduz o tempo de inatividade ao garantir a produção de várias fases, possibilitando atuar em qualquer nível de produção e sob qualquer conjunto de condições.
- Tecnologia dinâmica multiface comprovada.
- Interface intuitiva e contínuo escoamento de trabalho.
- Gestão e otimização de riscos.
- Estudos paramétricos e sensibilidade.
- Área de trabalho interativa e personalizada.

A.2.2 LedaFlow

LedaFlow baseia-se em modelos que estão mais perto da física real de escoamento multifásico e proporciona uma mudança de passo em detalhes, fidelidade, qualidade, precisão e flexibilidade sobre a tecnologia de simulação de escoamento multifásico existente. Ele tem sido extensivamente validado confrontando os melhores conjuntos de dados experimentais disponíveis e mais abrangentes para garantir que os modelos são tão representativos quanto possível. Este programa é projetado com uma interface intuitiva

com o usuário para garantir que a produtividade seja melhorada e com um banco de dados para assegurar que todos os casos são armazenados e disponíveis para avaliação.

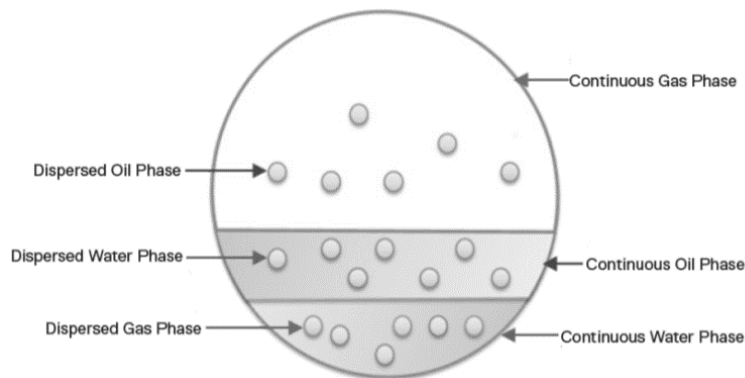


Figura A. 4 – Modelo Leadflow.

Vantagens:

- Nove equações de massa
- Três equações de tempo para fazer uma melhor análise do tempo de mudança de óleo-água e deslizamentos de terra resultantes.
- Três equações de energia que fazem previsões mais precisas de temperatura e perdas de calor.
- Resolver as equações de balanço de massa para todos os nove campos (gás, óleo e água no volume e dois campos dispersos).
- Os balanços de massa adicionais fornecem o potencial para aperfeiçoar as regras de fechamento para coincidir com os novos dados de laboratório mais de perto
- Isso melhora a precisão na simulação de eventos transitórios críticos e, conseqüentemente, proporciona uma mudança de patamar no entendimento do comportamento de fluido.
- O programa melhora a resolução de modelagem, resolvendo as equações de massa, energia e conservação do momento para cada uma das três fases do escoamento (petróleo, gás e água).

A.2.3 Pipephase Tacite

Este programa simula as condições transientes redes de distribuição de fluidos. Possui características multicomponentes do fenômeno transiente. Simula o escoamento multifásico para as etapas de implantação e controle de oleodutos, gasodutos e poços de produção. Prevê a propagação de pistões de líquido durante a condição de escoamento transiente multifásico nos oleodutos, bem como aqueles criados durante as mudanças da taxa de fluxo, pressurização no gasoduto, ligar/desligar ou variações na topografia do terreno onde se instala o gasoduto. Utiliza um método de controle computacional, onde fenômenos como o acúmulo de componentes mais pesados nos pontos baixos no perfil da canalização também pode ser previsto.

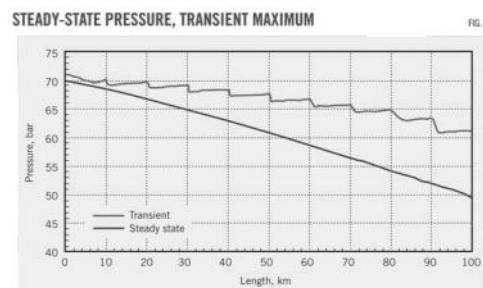


Figura A. 5 – Diagrama de solução - Pipephase Tacite

Vantagens:

- Aperfeiçoa o projeto do gasoduto e prevê o aumento na produção dos poços de petróleo;
- Reduz as dimensões das instalações e despesas com investimento inicial;
- Tacite é uma ferramenta única para o projeto econômico de gasodutos, além de permitir orientações operacionais tendo em vista a segurança devido à sua capacidade de prever as condições de fluxo.
- Está totalmente integrado ao Pipephase - simulador multifásico de rede - permitindo que o usuário selecione uma determinada seção de um modelo de rede no estado estacionário como o estado inicial para o subsequente fenômeno transiente.

ANEXO B – FATOR DE ATRITO TRANSIENTE

Os diagramas apresentados do fator de atrito e suas correlações são todas baseadas no escoamento permanente, os quais também são usados para fluxos transientes. Alguns pesquisadores como Trikha (1975), Ham (1982), e Bratland (1986) desenvolveram métodos para o cálculo do fator de atrito transiente com muita precisão para escoamento laminar, e fazê-lo deve agora ser considerado relativamente trivial.

O fenômeno da fricção turbulenta transiente é muito mais frequente, em geral, não é bem compreendido. É claro que os transientes podem fazer a fricção em várias ordens de magnitude maior do que o fator de atrito no escoamento permanente. Brekle (1984) desenvolveu um modelo no domínio da frequência para uma melhor análise de estabilidade de usinas hidrelétricas. Um termo estimador do atrito transiente parece funcionar para pulsações sobrepostas em uma vazão média relativamente alta. Entretanto modelos mais gerais foram apresentadas por Zarzycki (2000), Vardy e Hwang (1994) e vários outros, representaram uma melhoria clara em comparação ao uso direto de fatores de atrito no estado de regime permanente. Mas o assunto é complicado, e não existe uma teoria geral, bem documentada e prática, se tem algumas regras para fugir do uso de atrito no estado estacionário em vez de ir a uma maior sofisticação.

Em condutos muito longos, levam-se horas e até mesmo dias para alterar significativamente a velocidade. Em tais condições, o atrito transiente pode seguramente ser negligenciado. O fator de atrito pode simplesmente ser calculado em função do número de Reynolds. As exceções são os sistemas em que ocorrem mudanças rápidas no número de Reynolds. Essas mudanças tem um efeito significativo sobre os problemas de interesse.

Existem pelo menos duas situações importantes nas quais o fator de atrito transiente não pode ser negligenciado:

- ✓ Em dutos longos com baixa pressão e variações na massa do escoamento o atrito pode ser calculado como se fosse um escoamento em regime permanente.
- ✓ Em alguns casos, estudar atenuação de ruído hidráulico, por exemplo, a jusante de bombas. A previsão precisa do amortecimento não é, obviamente, possível, usando o

atrito no estado estacionário. No caso de um escoamento laminar, modelo do domínio da frequência de Ham (1982) pode oferecer a abordagem mais simples e mais eficaz.

Todo o atrito discutido até agora é do tipo hidráulico. Mas a energia também pode ser dissipada nas paredes do tubo. Este tipo de atrito não é hidráulico, e só afeta os fluidos em escoamento no regime transiente. Para o escoamento no regime permanente, o atrito da parede do tubo não desempenha um papel importante, e pode ser ignorado para o cálculo de escoamento em regime transiente para dutos metálicos. A dissipação de energia devido ao atrito na parede do tubo é muito baixa em tubos de aço e com segurança pode ser negligenciado na maioria dos gasodutos (Bratland, 1995).

Para tubos circulares transportando fluidos newtonianos monofásicos, o cálculo do fator de atrito pode ser resumido. A definição do coeficiente de atrito f é dada pela expressão de Darcy-Weisbach.

$$f = \frac{\Delta P}{\rho \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2}} \quad (\text{B.1})$$

O diagrama tradicional do Moody ainda é a forma mais utilizada para determinar f , apesar de algumas das principais limitações. Para grandes projetos de dutos, pode ser rentável para melhorar a precisão através da realização de medições em seções de dutos em laboratório antes de tomar a decisão final sobre diâmetro e tratamento de superfície interna. Mesmo mudanças moderadas na rugosidade relativa devido à corrosão, desgaste, danos de revestimento, e outros desenvolvimentos desfavoráveis com o tempo podem ter um efeito muito significativo sobre a capacidade do duto. Portanto, é desejável para estimar esses efeitos durante o projeto, e considerar o superdimensionamento de acordo com incertezas em relação às estimativas. Em alguns cálculos, o atrito transiente é importante. Isso é mais provável quando se investiga o ruído devido a pulsações hidráulicas, ou estabilizadores reguladores de ação rápida, como os que regem as turbinas de água. As propriedades visco-elásticas da parede do tubo podem também ser importantes, particularmente, para condutos não metálicos (tubos em polietileno, PVC, etc.).

ANEXO C – FATORES QUE AFETAM A CELERIDADE DA ONDA TRANSIENTE NOS SISTEMAS HIDRÁULICOS

C.1 INTRODUÇÃO

Em sistemas hidráulicos se tem situações em que a velocidade do fluido pode mudar, se o sistema hidráulico tem um duto relativamente longo, as propriedades elásticas do tubo e o líquido tornam-se fatores importantes. Neste anexo vai se apresentar o desenvolvimento teórico e aplicações para estes tipos de situações onde a velocidade da onda transiente varia de acordo as propriedades mecânicas e físicas do sistema. Apresentam-se dos tipos de teorias uma existente no livro *Hydraulics of Pipeline Systems* (Larock *et al.*, 1999) e a teoria do livro *Vibrations des structures: interactions avec les fluides, sources d'excitation aléatoires* (Gilbert, 1988).

C.2 CELERIDADE DA ONDA TRANSIENTE

C.3.1 Equação para a variação de pulso de pressão ΔH

Uma mudança na velocidade ΔV causará uma mudança na cabeça pressão ΔH gerando uma onda que se propaga no sistema a uma velocidade “a”. Para desenvolver a equação para ΔH será usada a Equação de movimento linear. Na Figura A.1 se apresenta uma seção de tubo de comprimento incremental δL , onde δL é arbitrariamente pequeno, mas não diferencialmente pequeno como seria dL . Qualquer escolha de uma referência daria essencialmente os mesmos resultados porque esta é uma situação de escoamento instável, a Equação de quantidade de movimento para escoamento constante não se aplica.

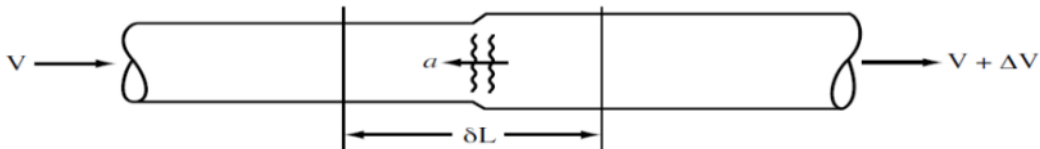


Figura C.1 – Volume de controle de escoamento transiente para análise de momento (Larock *et al.*, 1999).

No entanto, aqui, é possível usar um sistema de coordenadas onde o escoamento instável parece ser estável, como mostrado na Figura A.2

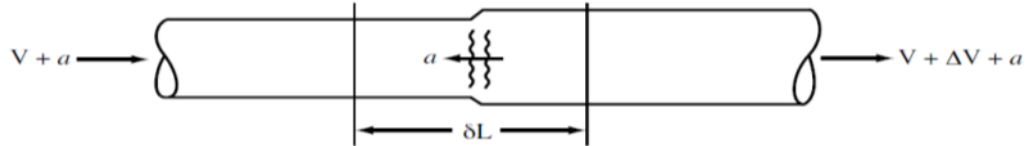


Figura C.2 - Volume de controle de escoamento permanente para análise de momento (Larock *et al.*, 1999).

Se o sistema de referência se move para a esquerda a uma velocidade “a” se tem um escoamento constante. A partir de mecânica básica de fluidos que pode, então, aplicar a uma Equação de quantidade de movimento linear dimensional estável.

$$\sum F_{ext} = (\sum Q\rho V)_{entrada} - (\sum Q\rho V)_{saida} \quad (A.1)$$

Onde: Q = descarga;

ρ = densidade do fluido;

$\sum F_{ext}$ = soma das forças externas agindo.

O fator de correção dinâmica de perfis de velocidade não é uniforme neste caso é assumido como 1,00. Considerando apenas o componente paralelo do vector da equação para o tubo e verificando que o escoamento que entra e sai da secção de tubo do comprimento δL em cada secção transversal, se tem:

$$\left(\sum F_{ext}\right)_x = Q\rho(V_{saida} - V_{entrada}) \quad (A.2)$$

Para aplicar a Equação de quantidade de movimento se especifica um volume de controle e todas as forças que atuam sobre o fluido no volume de controle num determinado instante, naquele mesmo instante se avalia a quantidade de movimento do escoamento dentro e fora do volume de controle. Escolhe-se o volume de controle de forma a coincidir com a parte interna das paredes do tubo ao longo do comprimento δL e incluem a secção transversal do escoamento em cada extremidade desta secção de tubo. Este volume de controle, o fluido nele, e as forças externas que atuam são mostrados na Figura A.3:

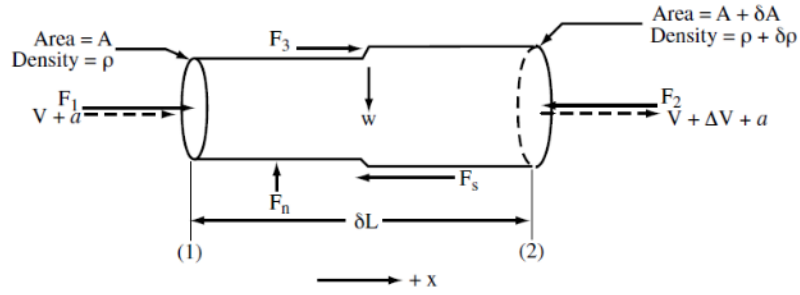


Figura C.3 - Volume de controle do escoamento permanente com todas as forças que atuam (Larock *et al.*,1999).

A força de cisalhamento (F_s) causada pela fricção é negligenciada porque seu tamanho é proporcional à δL . Além disso, se consideram materiais de tubos relativamente fortes (aço, concreto, etc.), a protuberância da tubulação é muito pequena e por isso F_3 também é desprezível. Equação (A.2) com estas simplificações da:

$$F_1 - F_2 = Q\rho[(V + \Delta V + a) - (V + a)] = Q\rho[\Delta V] \quad (\text{A.3})$$

Onde: $Q\rho = (V + a) A\rho$.

Se a pressão em (1) foram P_0 , em seguida, a pressão em (2) seria $P_0 + P$, e

$$P_0 A - (P_0 + \Delta P)(A + \delta A) = A\rho(V + a)(\Delta V) \quad (\text{A.4})$$

Ampliando a Equação (A.4) e reconhecendo que $\Delta P = \gamma\Delta H$ e δA é muito pequena em comparação com AH , A e γ , se desprezam os termos pequenos com o seguinte resultado:

$$-\Delta H \gamma A = A\rho(V + a)(\Delta V) \quad (\text{A.5})$$

A Equação (A.5) pode ser escrita como:

$$\Delta H = -\frac{\rho}{\gamma} \Delta V (V + a) \quad (\text{A.6})$$

$$\Delta H = -\frac{a\Delta V}{g} \left(1 + \frac{V}{a}\right) \quad (\text{A.7})$$

Em situações de tubos mais rígidos (mesmo para o PVC com uma velocidade de onda de apenas 365,8 m/s), o valor de (V/a) é menor do que 0,01. Por conseguinte, a Equação (A.7) é geralmente aplicada como:

$$\Delta H = -\frac{a}{g} \Delta V \quad (\text{A.8})$$

A partir da Equação (A.8) se observa que uma redução na velocidade de ΔV provoca um aumento na cabeça ΔH . Além disso, ΔH depende da velocidade da onda “a” e não pode ser determinado até que um valor de “a” não seja estabelecido.

C.2.2 - Velocidade da onda de tubos de paredes delgadas

Para desenvolver uma equação para a celeridade da onda, se considera a conservação de massa na seção de tubo δL . Examina-se o escoamento de massa dentro e fora da secção de tubo sobre o período de tempo necessário para que a onda possa passar através da parte do tubo. A entrada da massa líquida será equiparada ao aumento de armazenamento da massa em δL para produzir uma equação para a velocidade de onda “a”. Supõe-se que uma redução na velocidade deve ocorrer, portanto, a massa se acumula. Para começar a notar que a situação quando a onda tenha atingido o primeiro volume de controle e, em seguida, no momento em que a onda tenha acabado de passar através da secção um tempo δt mais tarde, δL e δt estão relacionados através da velocidade de onda como $\delta L = a \delta t$.

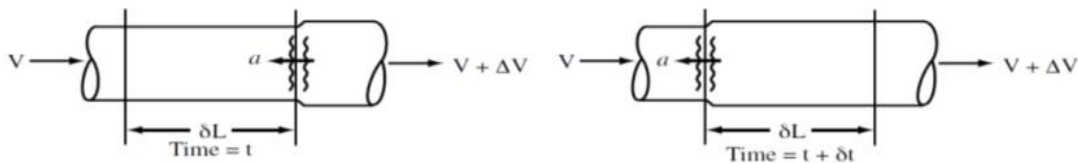


Figura C.4 - Propagação da onda transiente de pressão em dois instantes (Larock *et al.*, 1999).

Durante o intervalo de tempo necessário para a onda de passar através do controle do volume, uma quantidade da massa se acumulou na secção e é obtida pela Equação:

$$\delta M = VA\rho\delta t - (V + \Delta V)(\rho + \delta\rho)(A + \delta A)\delta t \quad (\text{A.9})$$

Expandindo os parênteses e negligenciando termos pequenos, tem-se:

$$\delta M = -A\rho\Delta V\delta t \quad (\text{A.10})$$

Ou, em termos de velocidade de onda e δL ,

$$\delta M = -A\rho\Delta V\frac{\delta L}{a} \quad (\text{A.11})$$

O líquido extra é armazenado no volume de controle em parte por ser comprimido a uma densidade ligeiramente maior e, em parte, ao ocupar espaço adicional fornecida pelo alongamento do tubo de secção transversal de uma pequena quantidade. Depois se quantificam as variações de volume do líquido e da tubulação.

A pressão aumenta durante a passagem de uma onda de pressão positiva causada por uma redução na velocidade, o volume de líquido na secção é comprimido até uma densidade ligeiramente superior. A equação que relaciona o aumento da pressão e diminuição do volume é a equação que define o módulo de elasticidade para grandes quantidades de um líquido, como pode ser encontrado em qualquer texto elementar de mecânica de fluidos:

$$K = -\frac{dp}{d\forall/\forall} \quad (\text{A.12})$$

Onde, K= Módulo de volume de elasticidade do líquido;

P = Pressão do liquido;

\forall = Volume do líquido.

Uma vez que K é relativamente constante ao longo de uma ampla gama de pressões (assumindo que não há gases no líquido), se pode deixar $dP = \Delta P$ e escrever a Equação (A.6) da seguinte forma:

$$d\forall = -\Delta p\frac{\forall}{K} \quad (\text{A.13})$$

Onde $d\forall$ representa a mudança no volume do líquido no volume de controle devido a uma mudança da pressão ΔP .

A.2.2.1 - Mudança no volume da tubulação devido à elasticidade

Quando o aumento da pressão do tubo se estende, há mais espaço disponível para armazenar o líquido acumulado. O tubo pode se estender tanto circunferencial e longitudinal, por isso devem-se considerar todas as contribuições para a variação do volume do tubo.

Desenvolvimentos básicos de mecânica de materiais sólidos mostram a relação entre as estirpes da parede do tubo em suas direções perpendiculares. Se um material é esticado num sentido por uma quantidade ε_1 , em seguida, uma tensão ε_2 irá ocorrer na direção perpendicular desde que o material esteja livre de tensão, sem desenvolver uma tensão nesse sentido) de acordo com $\varepsilon_2 = \mu\varepsilon_1$, em que μ é o coeficiente de Poisson. Se existe uma restrição à tensão livre nos dois sentidos causada por contenção ou estresse aplicado, a relação é mais complicada. Um texto sobre a mecânica de materiais irá fornecer as seguintes equações para o esforço bidimensional que pode ser aplicado a tubos de paredes finas:

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2}{1 - \mu^2} E \rightarrow \varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 - \mu\sigma_2}{E} \quad (\text{A.14a})$$

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1}{1 - \mu^2} E \rightarrow \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2 - \mu\sigma_1}{E} \quad (\text{A.14b})$$

Aqui σ_1 e ε_1 são a tensão e deformação, respectivamente, na direção ao longo do tubo eixo, σ_2 e ε_2 são os valores na direção circunferencial, e E é o módulo de elasticidade do material da parede do tubo. Se o material da parede não é homogêneo e isotrópico, então é necessária uma análise mais complexa.

Para ondas de pressão do golpe de aríete não é normal uma tensão e deformação já existente no tubo causado pelo escoamento permanente. Por isso escrevem-se as equações anteriores com as seguintes variações:

$$\Delta\sigma_1 = \frac{\Delta\varepsilon_1 + \mu\Delta\varepsilon_2}{1 - \mu^2} E \rightarrow \Delta\varepsilon_1 = \frac{\Delta\sigma_1 - \mu\Delta\sigma_2}{E} \quad (\text{A.15a})$$

$$\Delta\sigma_2 = \frac{\Delta\varepsilon_2 + \mu\Delta\varepsilon_1}{1 - \mu^2} E \rightarrow \Delta\varepsilon_2 = \frac{\Delta\sigma_2 - \mu\Delta\sigma_1}{E} \quad (\text{A.15b})$$

A alteração do volume provocada pelo alongamento circunferencial é:

$$\delta V_c = \pi D \frac{\delta D}{2} \delta L \quad (\text{A.16})$$

Onde $\pi\delta D = \pi D\Delta\varepsilon_2$. Combinando as duas equações, tem-se:

$$\delta V_c = \frac{1}{2} \pi D^2 \delta L \Delta\varepsilon_2 \quad (\text{A.17})$$

A alteração do volume provocada pelo alongamento longitudinal é:

$$\delta V_l = \frac{\pi}{4} D^2 \delta L \Delta\varepsilon_1$$

(A.18)

Combinando-se as Equações (A.17) e (A.18) tem-se a variação do volume total devido ao tubo estendendo-se, obtendo-se assim a Equação (A.19):

$$\delta V = \frac{\pi}{4} D^2 \delta L (\Delta\varepsilon_1 + 2\Delta\varepsilon_2) \quad (\text{A.19})$$

Faz-se a substituição das expressões de deformação com as expressões de tensões e pressão. A alteração na tensão circunferencial na parede do tubo em condições estáticas se apresenta na seguinte expressão:

$$\Delta\sigma_2 = \frac{\Delta p D}{2e} \quad (\text{A.20})$$

Em que “e” é a espessura da parede do tubo. No entanto, a condição transiente do golpe de aríete geralmente causa a resposta dinâmica que pode ser analisada cuidadosamente considerando a massa dos materiais de tubos e de montagem, bem como apoios de tubos. Ou seja, quaisquer válvulas, tubos, e outros dispositivos, além do peso do tubo devem ser

deslocados por mudanças de pressão. Estes deslocamentos são por sua vez afetados pelo tipo e comportamento elástico dos apoios de tubos. Este tipo de análise seria demasiadamente complexo para realizar, em geral, se assume que as condições estáticas se aproximam adequadamente ao comportamento dinâmico. Os resultados experimentais ao longo dos anos têm geralmente validados esta abordagem. Substituindo a Equação (A.20) na Equação (A.15b), tem se:

$$\frac{\Delta P \cdot D}{2e} = \frac{\Delta \varepsilon_2 + \mu \Delta \varepsilon_1}{1 - \mu^2} E \quad (\text{A.21})$$

Enquanto a relação entre a tensão circunferencial e pressão é válida para todos os tipos de contenção, a relação entre a tensão longitudinal e a deformação varia com o tipo de restrição. Por exemplo, se o tubo foi engastado numa extremidade e livre de esticar longitudinalmente (tal como um vaso de pressão longo e delgado), a tensão longitudinal submetida a condições estáticas seria:

$$\Delta \sigma_1 = \frac{\Delta P \cdot D}{4e} \quad (\text{A.22})$$

Por outro lado, se o tubo estiver engastado nas duas extremidades para evitar qualquer deformação axial, então $\Delta \sigma_1 = \mu \Delta \sigma_2$ porque $\Delta \varepsilon_1 = 0$. No entanto, se o tubo possuir juntas de expansão ao longo do seu comprimento, $\Delta \sigma_1 = 0$ e $\Delta \varepsilon_1$ não é de interesse. Seguindo a nomenclatura de WYLIE; STREETER (1993), identificamos os casos acima da seguinte maneira:

Caso (a) Tubo engastado – livre



Figura C.5 - Tubo engastado – livre (Nascimento, 2002).

Caso (b) Tubo biengastado

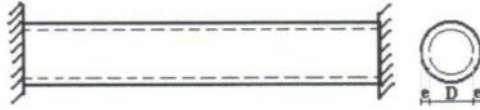


Figura C.6 - Tubo bi-engastado (Nascimento, 2002).

Caso (c) Tubo com juntas de dilatação longitudinais ao longo do duto.



Figura C.7 - Tubo com juntas de dilatação longitudinais ao longo do duto (Nascimento, 2002).

Em um sentido prático a situação real de retenção do tubo provavelmente não estará em conformidade com precisão para qualquer um desses casos, mas encontra-se em algum lugar nesta gama de possibilidades. Para tubulações enterradas que são relativamente comuns vai ser analisado como um caso (b) para calcular a velocidade da onda onde se espera que o deslocamento axial seja contido por blocos de atrito do solo.

Velocidade da onda para o caso (b)

Neste caso $\Delta\varepsilon_1 = 0$, substituindo na Equação (A.15a), tem-se:

$$\Delta\sigma_1 = \frac{\mu\Delta\varepsilon_2}{1-\mu^2} E \rightarrow \Delta\sigma_1 = \mu\Delta\sigma_2 \quad (\text{A.23})$$

E na Equação (A.21), tem-se:

$$\frac{\Delta p D}{2e} = \frac{\Delta\varepsilon_2}{1-\mu^2} E \quad (\text{A.24})$$

Substituindo a Equação (A.19) no lugar de $\Delta\varepsilon_2$ a variação do volume total é:

$$\delta V = \frac{\pi}{4} D^2 \delta L \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right) \left(\frac{\Delta p D}{e} \right) \quad (\text{A.25})$$

Com base na conservação de massa (Equação A.11), calcula-se a massa incremental que se acumulou no volume de controle tubo no tempo δt . Se subtrai a massa no tubo antes da passagem da onda a partir da quantidade existente, após a passagem da onda, tem-se:

$$\delta M = (\rho + \delta\rho)(A\delta L + \delta\forall) - A\rho\delta L \quad (\text{A.26})$$

Igualando essa expressão para δM com a de Equação (A.11), em expansão, e desprezando os termos pequenos, se tem:

$$\delta\rho A\delta L + \delta\forall = A\rho\Delta V \frac{\delta L}{a} \quad (\text{A.27})$$

Para organizar esta equação em uma forma mais utilizável, para uma dada massa de material, um aumento na pressão provoca um decréscimo em volume e um aumento na densidade. Isto é, $\forall \rho = \text{constante}$ de modo $\forall \delta\rho + \rho\delta\forall = 0$ e,

$$\delta\rho = -\frac{\delta\forall}{\forall} \rho \quad (\text{A.28})$$

Substituindo este resultado na Equação (A.13), tem-se:

$$\delta\rho = \rho \left(\frac{\Delta p}{K} \right) \quad (\text{A.29})$$

Substituindo ΔP com $\gamma\Delta H$ na equação anterior, substituindo-o na Equação (A.25) e depois na Equação (A.27), tem-se:

$$\Delta H \gamma \left[\frac{1}{K} + \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right) \frac{D}{e} \right] = \frac{\Delta V}{a} \quad (\text{A.30})$$

Combinando a Equação (A.30) com a Equação (A.8), se tem a seguinte expressão:

$$a^2 \rho \left[\frac{1}{K} + \frac{D}{e} \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right) \right] = 1 \quad (\text{A.31})$$

ou, na forma convencional para a velocidade da onda no caso (b),

$$a = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1 + \frac{K D}{E e} (1-\mu^2)}} \quad (\text{A.32})$$

De acordo a esta equação é possível calcular a velocidade da onda e aumento de pressão diretamente em situações simples, onde a Equação (A.8) aplica.

Wylie e Streeter (1993) mostram que as equações de velocidade de onda podem ser convenientemente apresentadas sob a forma geral:

$$a = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1 + \frac{K D}{E e} C}} \quad (\text{A.33})$$

$$\text{Caso (a)} \quad C = \frac{5}{4} - \mu \quad (\text{A.34a})$$

$$\text{Caso (b)} \quad C = 1 - \mu^2 \quad (\text{A.34b})$$

$$\text{Caso (c)} \quad C = 1.0 \quad (\text{A.34c})$$

Este conjunto de equações para a velocidade da onda só se aplica aos tubos de paredes finas, Se as paredes do tubo são suficientemente espessas, as equações acima devem ser modificadas. A Tabela A.1 tem valores para E e μ os quais são usados para calcular as velocidades de onda em tubos feitos de materiais comuns.

C.2.3 - Velocidade da onda transiente em dutos de paredes espessas

O caso de tubos de paredes finas foi utilizado para derivar as equações de onda velocidade que são essenciais para o cálculo das pressões de martelo de água. No entanto, é comum a prática de fabricar tubos de materiais que resultam em tubos com paredes grossas; por exemplo, concreto, fibrocimento, ou de ferro fundido dúctil. Além disso, o tubo pode ser fabricado a partir de mais de um material, o mais comum dos quais é concreto armado. Conduto também pode ser esculpido em pedra e, possivelmente, forrado com aço ou concreto, onde se apresenta a necessidade de calcular a velocidade de onda em todos esses casos.

A análise para tubos de paredes espessas procede seguindo as mesmas linhas de tubos de paredes finas. No entanto, para os tubos de parede espessa, a variação na tensão e

deformação através da parede do tubo é levada em consideração. A análise leva à mesma equação para a velocidade de onda como para tubos com paredes finas, e se apresenta uma redefinição dos coeficientes C para cada caso:

$$\text{Caso (a)} \quad C = \frac{1}{\left(1 + \frac{e}{D}\right)} \left[\left(\frac{5}{4} - \mu\right) + 2 \frac{e}{D} (1 + \mu) \left(1 + \frac{e}{D}\right) \right] \quad (\text{A.35a})$$

$$\text{Caso (b)} \quad C = \frac{1}{\left(1 + \frac{e}{D}\right)} \left[(1 - \mu^2) + 2 \frac{e}{D} (1 + \mu) \left(1 + \frac{e}{D}\right) \right] \quad (\text{A.35b})$$

$$\text{Caso (c)} \quad C = \frac{1}{\left(1 + \frac{e}{D}\right)} \left[(1.0) + 2 \frac{e}{D} (1 + \mu) \left(1 + \frac{e}{D}\right) \right] \quad (\text{A.35c})$$

C.2.4 - Velocidade da onda transiente em túneis circulares

As equações de velocidade de onda de túneis circulares podem ser derivadas a partir da equação da espessura de parede, fazendo com que a espessura da parede tenda ao infinito. Quando C para o caso (a) é inserido para a velocidade da onda na Equação (A.33) o termo D/e é quase zero, o resultado é:

$$a = \frac{\sqrt{k/\rho}}{\sqrt{1 + \frac{2K}{E}(1 + \mu)}} \quad (\text{A.36})$$

Para os túneis que são revestidos de concreto ou com o apoio de concreto revestido de aço, a análise é bem mais complexa. Consulte Halliwell (1963) para as equações bastante longa necessária para calcular a velocidade da onda nessa situação.

C.3 – VELOCIDADE DO SOM MODIFICADA PELA DEFORMAÇÃO DO DUTO EM MODO DE RESPIRAÇÃO (EXPANSÃO - CONTRAÇÃO DO DIÂMETRO)

As alternâncias da pressão podem provocar os movimentos dos modos de vibração da tubulação. Para um tubo flexível, a cada passagem da onda plana de pressão gera-se ao tubo uma flexão adicional que é somada a compressibilidade do fluido, com a introdução de uma velocidade de som modificada pode ser representado este efeito.

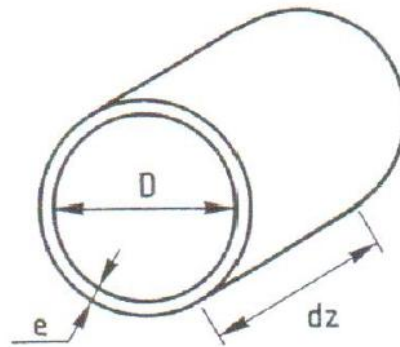


Figura C.8 - Tubo de seção circular (Gilbert, 1988).

Onde, dz: Comprimento do duto;

e: Espessura do duto;

D: Diâmetro interno do duto;

P: Variação da pressão;

E: Módulo de elasticidade do material do duto.

A variação do volume esta associada a uma variação da pressão provocando um deslocamento de X_f do fluido ao longo do tubo.

$$d\forall = A \frac{\partial x_f}{\partial z} dz + \frac{\pi D^2}{2} \varepsilon dz \rightarrow \frac{1}{A} \frac{d\forall}{dz} = \frac{\partial x_f}{\partial z} + 2\varepsilon \quad (\text{A.37})$$

A deformação especifica do tubo é dada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{P \cdot D}{2Ee} \quad (\text{A.38})$$

Substituindo a Eq. (2.2) na Eq. (2.1), tem-se a Eq. (2.3) que representa a variação relativa do volume do fluido.

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{dz} = \frac{\partial x_f}{\partial z} + \frac{P \cdot D}{Ee} \quad (\text{A.39})$$

A seguinte expressão Eq. (2.4) representa a variação da pressão (Gilbert, 1988):

$$P = -p_f \cdot a^2 \cdot \frac{1}{A} \frac{dv}{dz} \quad (\text{A.40})$$

Substituindo a Eq. (2.4) na Eq. (2.3), tem-se a Eq. (2.5):

$$P = -\frac{p_f \cdot a^2}{1 + p_f \cdot a^2 \cdot \frac{D}{eE}} \cdot \frac{\partial x_f}{\partial z} \quad (\text{A.41})$$

Esta última é a relação de elasticidade para ondas planas na tubulação flexível.

$$P = -p_f \cdot \bar{a}^2 \cdot \frac{\partial x_f}{\partial z} \quad (\text{A.42})$$

Onde a velocidade do som corrigida (\bar{a}) é dada por:

$$\bar{a} = \frac{a}{\sqrt{1 + p_f \cdot a^2 \cdot \frac{D}{eE}}} \quad (\text{A.43})$$

C.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A velocidade da onda é uma quantidade que depende de diferentes fatores os quais se apresentam na Equação (A.33), e é afetado não só pela razão e/D , mas quando este fator se torna extremamente pequeno pode ser útil à equação simplificada para a equação de parede fina em cada caso. Em 1984 Watters concluiu que a utilização de equações de paredes grossas para um termo $D/e > 40$ geralmente não produz nenhuma melhoria significativa na precisão da velocidade da onda, exceto quando o material do tubo é PVC. Se pode tentar

remover ao máximo possível a imprecisão sempre usando equações parede fina e espessa. Esta abordagem será bem-sucedida sempre que uma aplicação é representada por um dos casos de retenção, mas a precisão pode ser de outra forma falsa quando em nenhum caso uma restrição representa verdadeiramente o caso estudado. Note também que as equações de velocidades de paredes finas levarem a ondas mais altas e, portanto, os resultados são muitas vezes mais conservadores.

Note-se que uma tubulação pode se tornar infinitamente forte ($E \rightarrow \infty$), sem que a velocidade de onda tenda ao infinito. A partir da Equação (A.33) é evidente que esta situação faz com que o denominador da equação seja 1,0, resultando numa velocidade de onda $a = \sqrt{K / \rho}$, no caso quando o fluido é água o valor de velocidade é cerca de 1430 m/s; este número não tem significado prático no projeto, porque é demasiado elevado. Mesmo com limitada experiência, um designer pode estimar adequadamente a velocidade de onda no tubo em consideração.

ANEXO D – ANALISE DO EFEITO DA TEMPERTATURA NO FLUIDO

Com o objetivo de estudar a influência das principais propriedades do fluido no fenômeno transiente em diferentes condições, se faz uma simulação agua para cinco diferentes temperaturas. As propriedades se apresentam na Tabela D.1.

Tabela D.1 - Fluidos utilizados na simulação

Água	ρ (kg/m ³)	k (GPa)	μ_f (Pa*s)
0° C	999,8	1.98	1.78E-03
10° C	999.7	2.10	5.42E-03
20° C	998,2	2.17	1.10E-03
30° C	995.7	2.25	7.08E-04
50° C	988	2.29	5.47E-04

De acordo a Tabela D.1 observa-se que entre mais alta seja a temperatura menor densidade tem a água e maior modulo de expansão volumétrica apresenta sendo quase incompressível a maiores temperaturas.

A Figura D.1 apresenta o gráfico do fator atrito em função do número de Reynolds feito de acordo as Equações (3.9) e (3.10) para os cinco diferentes tipos de temperaturas utilizados na simulação.

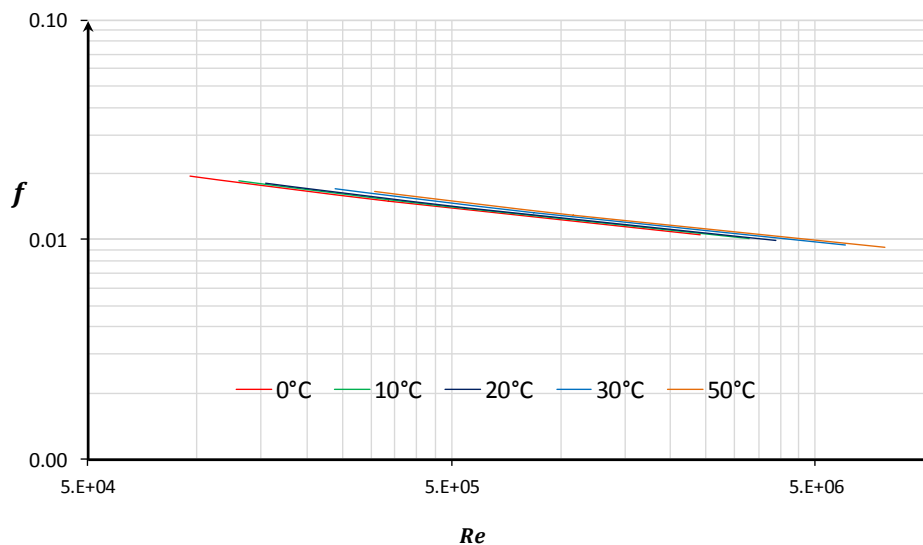


Figura D.1 - Fator de atrito "f" em função do Número de Reynolds "Re" (5 tipos de temperaturas).

De acordo com a Figura D.1, observa-se uma separação horizontal nas curvas do fator de atrito para os diferentes fluidos. Sendo respectivamente, a água a 0°C e a 50°C os fluidos com o menor e o maior atrito.

Na Figura D.2 são mostrados os resultados analíticos dados pela Equação (4.2) e os numéricos obtidos com a simulação feita no programa TRANSPETRO-1D. Neste os resultados são usados os fluidos cujas propriedades foram apresentadas na Tabela D.1.

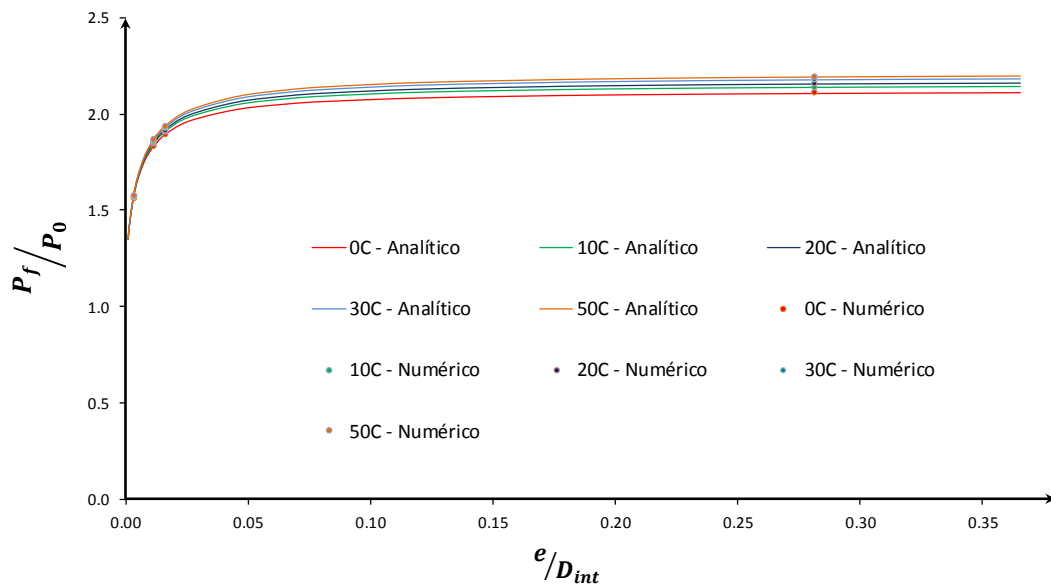


Figura D. 2 - Resultados analíticos e numéricos para a relação entre pressões em função da relação geométrica do duto, variando o diâmetro do duto e as propriedades do fluido.

De acordo na Figura D.2, observa-se uma maior influência sobre o fenômeno transiente para relações (e/D_{int}) menores a 0.07 e quando estas relações são maiores o comportamento é regido pelas propriedades do fluido sem influenciar as propriedades do duto. Ademais, se mostra uma maior relação entre pressões para fluidos com maiores temperaturas. Observa-se que a água a 50°C apresenta maior aumento na pressão devido ser quase incompressível.

Com o objetivo de estudar a influência das propriedades do duto e do fluido a diferentes temperaturas em conjunto, no fenômeno transiente, se utilizo o parâmetro (β) definido na Equação (4.4). Nesta se varia o módulo de expansão volumétrica do fluido, em conjunto com as principais propriedades do duto. Os resultados analíticos obtidos se apresentam na Figura D.3 onde uma vez, mas se apresenta a relação entre a pressão inicial e a pressão

final em função deste parâmetro para os cinco tipos de materiais e os cinco tipos de fluidos utilizados.

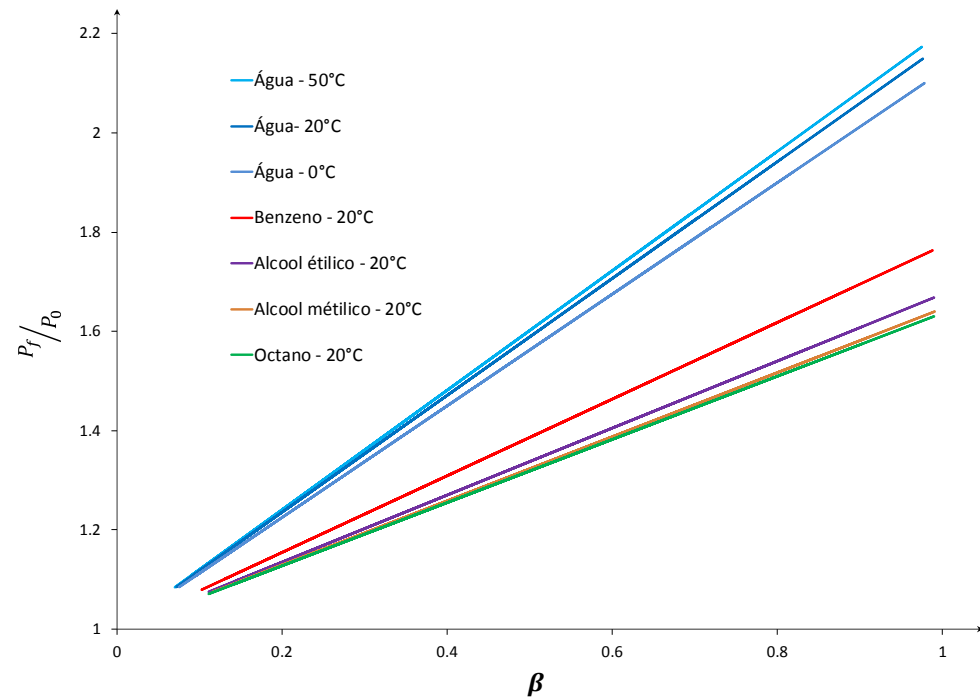


Figura D. 3 - Resultados analíticos e numéricos para a relação entre pressões em função do parâmetro (β) (7 tipos diferentes de fluidos).

Na Figura D.3 observa-se que todas as curvas se iniciam no ponto onde não se apresenta ainda o fenômeno transiente, e a tubulação se encontra em regime permanente ($P_f = P_i$). A água a 50°C é o fluido que apresenta a maior sobrepressão independente das propriedades físicas e mecânicas do duto. Concluindo que quando se apresentam câmbios térmicos no fluido se apresentam fenômenos transientes de maior magnitude.