



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LUCAS BRENO DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL APLICANDO O
MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS PARA O CÁLCULO DOS TRANSIENTES
HIDRÁULICOS EM UM SISTEMA DE RECALQUE**

Recife
2022

LUCAS BRENO DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL APLICANDO O
MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS PARA O CÁLCULO DOS TRANSIENTES
HIDRÁULICOS EM UM SISTEMA DE RECALQUE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Pernambuco, como requisito parcial
para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador : Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo.

Recife
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santos, Lucas Breno dos.

Desenvolvimento de um programa computacional aplicando o Método das Características para o cálculo dos Transientes Hidráulicos em um sistema de recalque / Lucas Breno dos Santos. - Recife, 2022.

100 : il., tab.

Orientador(a): José Roberto Gonçalves de Azevedo
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2022.

1. declividade longitudinal da tubulação. 2. energia cinética. 3. Golpe de Arfete. I. Azevedo, José Roberto Gonçalves de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

LUCAS BRENO DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL APLICANDO O
MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS PARA O CÁLCULO DOS TRANSIENTES
HIDRÁULICOS EM UM SISTEMA DE RECALQUE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Pernambuco, Centro de Tecnologia e
Geociências, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovado em: 27/10/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

MSc. Cláudio Henrique Milfont de Magalhães (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. Civil e Esp. Pedro Anselmo (Examinador Externo)
BRK Ambiental

Dedico esse trabalho aos meus pais, Severina Barbosa da Silva e José Roberto dos Santos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua infinita misericórdia e bondade, me concedeu saúde, sabedoria e ânimo para nunca desistir. Não tenho dúvidas que Ele foi o meu sustento e guia durante o período de graduação, porque conforme diz nas sagradas escrituras, no livro de 1 Samuel, capítulo 7 e versículo 12: “Até aqui, nos ajudou o Senhor!”

Agradecer é um ato de reconhecimento, dessa forma, torno de maneira pública que ter encerrado o ciclo da graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), só foi possível porque foi formada uma rede de apoio. Dedico, portanto, este trabalho para vocês, que fizeram parte desse coletivo em pró do objetivo: o de ser Engenheiro Civil.

Agradeço a Severina Barbosa da Silva, minha mãe, e a José Roberto dos Santos, meu pai, por sempre enfrentarem com muita coragem as adversidades e as batalhas da vida, nunca deixando de perseguir o sonho grande: oferecer ao filho a melhor educação, pois, infelizmente não tiveram a oportunidade de finalizar o ensino escolar regular. Mesmo assim, eles sabiam que a educação transforma a realidade e promove a ascensão do indivíduo nas mais diversas esferas da vida. Este trabalho, portanto, demonstra que o que era um sonho, tornou-se realidade. Nas entrelinhas desse parágrafo, estão os mais bonitos e sinceros sentimentos de um filho para com os pais, e nessas poucas linhas, reconheço que sem vocês, ser Engenheiro Civil não seria possível. Eterna gratidão.

Agradeço ao prof. José Roberto Gonçalves de Azevedo, por ter confiado à mim, a responsabilidade de dar continuidade, sob sua orientação, ao estudo dos Transientes Hidráulicos no Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), que não apenas foi base para este trabalho, quanto para artigos científicos que foram publicados. Não fosse o bastante, me foi dada a oportunidade de ser aluno monitor da disciplina Tópicos Especiais em Recursos Hídricos 3 (Canais), uma das que lecionava no curso. O profissional que tenho me tornado teve grandes contribuições dessa nossa trajetória.

Agradeço a todos avaliadores por terem aceitado o convite de fazerem parte da banca examinadora, pois dedicaram um dos bem mais precioso que possuímos, sim, o tempo, para apreciação deste trabalho, vislumbrando pontos de melhorias e garantindo assim, que seja disponibilizado para a sociedade civil e acadêmica, um trabalho com excelência.

Agradeço aos meus colegas e amigos da UFPE pelos estudos coletivos, trabalhos realizados e conversas das mais irreverentes até as mais promissoras, tornando a jornada mais leve até o fim. Torço para que nós, no papel de engenheiros e engenheiras civis, possamos desenvolver uma engenharia que cause impactos positivos para a sociedade e o meio ambiente.

Estendo os agradecimentos para aqueles familiares, colegas e amigos que não fazem parte da UFPE, por terem feito também parte da rede de apoio, assumindo muitas vezes o papel de ouvintes nos momentos de desafios que um curso de graduação traz consigo e que com muita sensibilidade, me orientavam e impulsionavam a não desistir.

Por fim, agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, que tive a oportunidade de ser aluno.

RESUMO

Um conduto hidráulico apresenta em algumas situações um regime transitório, apresentando variação na velocidade, vazão e pressão, mudando o estado de um regime permanente inicial por outro estado de regime permanente futuro. A perturbação no escoamento pode ser provocada por manobras programadas e/ou inesperadas de, por exemplo, acionamento/parada da bomba e/ou abertura/fechamento de uma válvula. As variações de velocidade não têm impacto direto no sistema, porém estão associadas as mudanças de pressão, podendo gerar ondas de sobrepressão ou de subpressão, o que pode vir a comprometer a integridade da tubulação. A análise do fenômeno durante a fase de concepção e de operação do sistema permite estabelecer medidas de proteção das infraestruturas. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um programa computacional em Microsoft Excel, que utilizou o Visual Basic for Applications (VBA) como linguagem de programação para estabelecer as rotinas de cálculo implementando as equações do Método das Características (MOC), onde foi possível determinar os principais parâmetros para o estudo dos Transientes Hidráulicos, em especial os valores das pressões mínimas e máximas, em uma tubulação de adução por recalque, durante a ocorrência do fenômeno. O estudo também tinha como interesse investigar se as parcelas da energia cinética e da declividade longitudinal da tubulação são, de fato, desprezíveis para os cálculos das cotas piezométricas. Vale destacar que o programa desenvolvido calculava o fator de atrito da fórmula universal de perda de carga de Darcy-Weisbach de acordo com a regime de escoamento (liso, rugoso ou transição). Como conclusão, temos que as parcelas da energia cinética e declividade longitudinal da tubulação não são variáveis significativas para os resultados de cotas piezométricas para nenhuma das zonas de escoamento, tendo em vista que a variação percentual, na consideração de uma ou das duas parcelas na simulação hidráulica, não ultrapassa os 0,1%. Além disso, a variação percentual, ao comparar os resultados de cotas piezométricas desconsiderando o regime de escoamento, não ultrapassa os 0,5%, portanto, na situação inicial que se desconhece a zona de escoamento, indica-se considerar a zona transição e a utilização da fórmula de Colebrook-White para a determinação do fator de resistência.

Palavras-chave: declividade longitudinal da tubulação; energia cinética; Golpe de Aríete.

ABSTRACT

A hydraulic conduit shows in some situations a transitory regime, exhibiting variation in velocity, flow rate and pressure, oscillating its states from an initial permanent regime, to another state of future permanent regime. The disturbance on the flow can be caused by expected or unexpected maneuvers, for example, turning on/off a water pump, an opening or closing of a valve. The velocity variations don't have a direct impact on the system, although, are associated with pressure changes, this way can generate overpressure and underpressure waves, which may compromise the pipe integrity. The phenomenon's analysis during the conception phase and the operation phase of the system, allows to establish infrastructure protection measures. This article has the goal to develop a computational program using Visual Basic for Applications (VBA) from Microsoft Excel, as a programming language to establish the calculation routines implementing the equations of the Characteristics Method (MOC), this way will be possible to determine the main parameters to the studies of Hydraulic Transients, in particular the values of the maximum and minimum pressure in a discharge pipeline, during the phenomenon occurrence. This study also has an interest to investigate if the kinetic energy and the longitudinal slope's portions are, in fact, negligible to piezometric dimension. It is worth mentioning that the program developed calculates the friction factor from the universal head loss formula of the Darcy-Weisbach according to flow regime (rough, smooth or transition). In conclusion, the portions of the kinetic energy and the longitudinal slope's portions are not significant variables to piezometric dimension's results in none of the drain zones, in view of the percentage variation, when considering one or both portions in the hydraulic simulation, does not exceed 0,1%. Furthermore, the percentage variation comparing the results of piezometric dimensions disregarding the flow regime, does not exceed 0,5%, therefore, in the initial situation which is unknown the drain zones, it is indicated to consider the transition zone and the use of the formula of Colebrook-White to determine the resistance factor.

Keywords: pipe's longitudinal slope; kinetic energy; Water Hammer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Casos de ocorrência dos Transientes Hidráulicos	22
Figura 2 –	SAA que atende a zona baixa e zona alta	31
Figura 3 –	Reservatório com escoamento permanente	32
Figura 4 –	Parte 1 do esquema ilustrativo do Golpe de Aríete num sistema composto por um reservatório, tubo e valvula na extremidade e fechamento instantâneo da válvula	35
Figura 5 –	Parte 2 do esquema ilustrativo do Golpe de Aríete num sistema composto por um reservatório, tubo e valvula na extremidade e fechamento instantâneo da válvula	36
Figura 6 –	Parte 3 do esquema ilustrativo do Golpe de Aríete num sistema composto por um reservatório, tubo e valvula na extremidade e fechamento instantâneo da válvula	36
Figura 7 –	Parte 4 do esquema ilustrativo do Golpe de Aríete num sistema composto por um reservatório, tubo e valvula na extremidade e fechamento instantâneo da válvula	37
Figura 8 –	Parte 5 do esquema ilustrativo do Golpe de Aríete num sistema composto por um reservatório, tubo e válvula na extremidade e fechamento instantâneo da válvula	37
Figura 9 –	Diagramas cronológicos de pressões no sistema por gravidade e por recalque, respectivamente	38
Figura 10 –	Linhas de cotas piezométricas mínimas conforme o tipo de manobra	39
Figura 11 –	Volume de Controle	48
Figura 12 –	Notação para Equação do Momento	52
Figura 13 –	Linhas Características no plano (x, t)	58
Figura 14 –	Mudança da inclinação da tubulação	60
Figura 15 –	Sistema de Recalque	62
Figura 16 –	Fronteira a jusante em carga e em superfície livre, respectivamente	63
Figura 17 –	Curvas Características de bombas	65

Figura 18 –	Interseção da curva característica da bomba com a reta no primeiro quadrante	66
Figura 19 –	Malha de nós do Método das Características	67
Figura 20 –	Sistema elevatório para análise	68
Figura 21 –	Interface do programa – Parte da seção Dados de Entrada	71
Figura 22 –	Fluxograma de dependência das variáveis que formam a solução base	72
Figura 23 –	Interface do programa - Solução base	72
Figura 24 –	Interface do programa - Valores dos parâmetros da solução base no “arranque”	73
Figura 25 –	Interface do programa - Valores dos parâmetros da solução base na 2 ^a iteração	73
Figura 26 –	Interface do programa – Cotas Piezométricas no ponto 1	74
Figura 27 –	Interface do programa – Cotas Piezométricas no ponto 21	74
Figura 28 –	Interface do programa – Cotas Piezométricas no ponto 41	74
Figura 29 –	Envoltórias de pressão calculada pelo programa desenvolvido neste trabalho.....	83
Figura 30 –	Envoltórias de pressão na tubulação de recalque com RAC simuladas na aplicação em MATLAB e no CH-FEUP	84
Figura 31 –	Animação das ondas de pressão ao longo da tubulação	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Fórmulas para o cálculo do fator de resistência	33
Quadro 2 –	Comparação do programa desenvolvido com outros programas da literatura	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Determinação da Vazão (Q), do Fator de Resistência (f) e da Altura Manométrica (H _{man}) para o Regime Permanente via solver	77
Tabela 2 –	Comparação das Cotas Piezométricas determinadas pelo programa em MATLAB com as cotas obtidas no programa desenvolvido neste trabalho	78
Tabela 3 –	Comparação das Cotas Piezométricas determinadas pelo programa desenvolvido por Silva (2014) com as obtidas neste trabalho	79
Tabela 4 –	Comparação das Cotas Piezométricas determinadas pelo programa em MATLAB com as cotas obtidas no programa desenvolvido por Silva (2014)	81
Tabela 5 –	Comparação das Cotas Piezométricas determinadas pelo programa desenvolvido por Silva (2014) com as cotas obtidas no programa desenvolvido neste trabalho	85
Tabela 6 –	Comparação das Cotas Piezométricas determinadas pelo programa desenvolvido por Medeiros (2014) com as cotas obtidas no programa desenvolvido neste trabalho	87
Tabela 7 –	Resumo das cotas piezométricas máximas e mínimas calculadas nas simulações	89
Tabela 8 –	Resumo das cotas piezométricas máximas e mínimas calculadas em todas as simulações	89
Tabela 9 –	Resultados admitindo a Energia Cinética – Cota Piezométrica Máxima	90
Tabela 10 –	Resultados admitindo a Energia Cinética – Cota Piezométrica Mínima	90
Tabela 11 –	Resultados desprezando a Energia Cinética – Cota Piezométrica Máxima	91
Tabela 12 –	Resultados desprezando a Energia Cinética – Cota Piezométrica Mínima	91
Tabela 13 –	Resultados admitindo a Declividade Longitudinal da Tubulação – Cota Piezométrica Máxima	91

Tabela 14 –	Resultados admitindo a Declividade Longitudinal da Tubulação – Cota Piezométrica Mínima	92
Tabela 15 –	Resultados desprezando a Declividade Longitudinal da Tubulação – Cota Piezométrica Máxima	92
Tabela 16 –	Resultados desprezando a Declividade Longitudinal da Tubulação – Cota Piezométrica Mínima	92
Tabela 17 –	Maior diferença percentual das cotas piezométricas máximas independentemente do regime de escoamento	93
Tabela 18 –	Maior diferença percentual das cotas piezométricas mínimas independentemente do regime de escoamento	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Apud	citado por
DEFOFO	Diâmetro Externo de Ferro Fundido
Dr.	Doutor
Dra.	Doutora
ed.	Edição
Eng.	Engenheiro
Esp.	Especialista
et al.	e outro
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto
ITB	Instituto Trata Brasil
GEHC	Grupo de Estudos em Hidráulica Computacional
JEI	Junta elástica integrada
LAHC	Laboratório de Hidráulica Computacional
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MSc	Mestre
MOC	Método das Características
nº	Número
NBR	Norma Brasileira
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
p.	Página
PIBIC	Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica
Prof.	Professor
Prof. ^a .	Professora
PVC	Policloreto de Vinila
RHO	Reservatório Hidropneumático
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SeMAE	Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNS	Secretaria Nacional de Saneamento
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
VBA	Visual Basic for Applications

LISTA DE SÍMBOLOS

δ	Camada Limite
D	Diâmetro do tubo
Re	Número de Reynolds
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach
Q	Vazão
ν	Viscosidade cinemática da água
e	Espessura da tubulação
ρ	Massa Específica
A, S	Área da seção transversal do tubo
∂t	Variação diferencial parcial do tempo
Δx	Comprimento das seções da tubulação
V	Velocidade média do fluido na seção transversal do tubo
∂x	Variação diferencial parcial do espaço no eixo x
$\partial \rho$	Variação diferencial parcial da massa específica
∂A	Variação diferencial parcial da área da seção transversal do tubo
∂V	Variação diferencial parcial da velocidade média do fluido na seção transversal do tubo
$d\rho$	Variação diferencial total da massa específica
dt	Variação diferencial total do tempo
dA	Variação diferencial total da área da seção transversal do tubo
K	Módulo de elasticidade volumétrica do fluido
R	Raio de um conduto circular
dR	Variação diferencial de um conduto circular
ϵ	Deformação circunferencial
σ_1	Tensão axial
σ_2	Tensão circunferencial
μ	Coeficiente de Poisson
E	Módulo de Young/Elasticidade do Material
$d\epsilon$	Variação diferencial total da deformação circunferencial
p	Pressão de um fluido na tubulação
$d\sigma_2$	Variação diferencial total da tensão circunferencial
dD	Variação diferencial total do diâmetro do tubo
dp	Variação diferencial total da pressão de um fluido na tubulação
a	Celeridade
∂p	Variação diferencial parcial da pressão de um fluido na tubulação
ΣF	Somatório das forças que atuam na tubulação
F_p	Força de Pressão que atua na tubulação
F_w	Força do peso no eixo da tubulação
g	Aceleração da gravidade
X	Espaço no eixo x

θ	Ângulo formado entre o eixo da tubulação e o plano horizontal
F_S	Força de cisalhamento que atua nas paredes da tubulação
τ_0	Tensão de cisalhamento das paredes do tubo sobre o fluido
∂H	Variação diferencial parcial da cota piezométrica
∂Q	Variação diferencial parcial da vazão
F	Parâmetro do cálculo do transiente de Chaudhry adaptado
L_1, L_2	Operadores Lineares do MOC
λ	Multiplicador da combinação linear do MOC
Dq	Variação diferencial total da vazão
Dx	Variação diferencial total do comprimento da tubulação
dH	Variação diferencial da carga hidráulica
C^+	Equação característica positiva
Q_P	Vazão no ponto P
Q_A	Vazão no ponto A
H_P	Carga hidráulica no ponto P
H_A	Carga hidráulica no ponto A
Δt	Passo de tempo
C^-	Equação característica negativa
Q_B	Vazão no ponto B
H_B	Carga hidráulica no ponto B
K	Fator de ponderação da integração numérica
A	Parâmetro do cálculo do transiente de Silva
C_A	Equação característica no ponto A
R_A	Parâmetro do cálculo do transiente de Silva no ponto A
T_A	Parâmetro do cálculo do transiente de Silva no ponto A
C_B	Equação característica no ponto B
R_B	Parâmetro do cálculo do transiente de Silva no ponto B
T_B	Parâmetro do cálculo do transiente de Silva no ponto B
T_{pe}	Valor de T à esquerda do ponto P
T_{pd}	Valor de T à direita do ponto P
R_P	Parâmetro do cálculo do transiente de Silva no ponto P
A_1	Parâmetro do cálculo do transiente de Silva
Z_R	Cota topográfica na seção do reservatório
K_L	Coeficiente de perda de carga no reservatório
A_2	Parâmetro do cálculo do transiente de Silva
N	Número de rotações das massas girantes da bomba
γ	Peso específico
I_0	Momento de inércia das massas girantes
Q_b	Vazão na bomba
H_b	Carga hidráulica na bomba
η	Rendimento da bomba
A, B, C, D	Coeficiente da curva característica da bomba
H_{man}	Altura Manométrica
Z_{jus}	Cota geométrica do reservatório de jusante
Z_{mont}	Cota geométrica do reservatório de montante
Δh	Perda de carga
$L(T)$	Comprimento equivalente
$L(G)$	Comprimento real
F_{maj}	Fator de majoração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	25
1.2	OBJETIVOS	26
1.2.1	Objetivo Geral	26
1.2.2	Objetivos Específicos	26
2	REFERENCIAL TEÓRICO	27
2.1	SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	29
2.2	TIPOS DE ESCOAMENTO	32
2.3	FATOR DE ATRITO	33
2.4	TRANSIENTES HIDRÁULICOS	34
2.5	EFEITOS DO FENÔMENO	39
2.5.1	Pressões	40
2.5.2	Separação da Coluna Líquida	40
2.5.3	Cavitação	41
2.5.4	Condições de vácuo	41
2.5.5	Vibração, Ressonância e Barulho	42
2.5.6	Qualidade da água	42
2.6	MÉTODO DE ANÁLISE DO GOLPE DE ARÍETE	43
2.7	NORMAS DE PROJETO	45
2.7.1	NBR 12214/2020 – Projeto de estação de bombeamento ou de estação elevatória de água	45
2.7.2	NBR 12215-1/2017 – Projeto de adutora de água, parte 1: conduto forçado.....	46
2.8	INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA DO TRANSIENTE HIDRÁULICO	47
2.8.1	Conceitos do modelo matemático	47
2.8.1.1	Principais simplificações referentes ao líquido e ao escoamento	47
2.8.1.2	Simplificações referentes ao comportamento da tubulação	48
2.8.2	Princípio da Conservação da Massa ou Equação da Continuidade	48
2.8.2.1	Forças que atuam no volume de controle	48
2.8.2.2	Tensão circunferencial em um conduto circular	49
2.8.2.3	Equação da Continuidade	51

2.8.3	Princípio do Equilíbrio Dinâmico ou Equação do Momento	51
2.8.3.1	Forças que atuam no volume de controle	52
2.8.3.2	Equação do Momento	53
2.8.4	Simplificação das Equações	54
3	MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS	56
3.1	INTEGRAÇÃO DAS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS	56
3.1.1	Operadores lineares do MOC	56
3.1.2	Equações Características	58
3.2	INTEGRAÇÃO DAS PERDAS DE CARGA	59
3.3	ALTERAÇÃO DA INCLINAÇÃO NA TUBULAÇÃO	60
3.4	CONDIÇÕES DE FRONTEIRA	62
3.4.1	Condição fronteira no reservatório	62
3.4.2	Condição fronteira na bomba	64
3.4.2.1	Lei de Parada da Bomba	64
3.4.2.2	Equação Característica da Bomba	65
3.5	APRESENTAÇÃO QUALITATIVA DA SEQUÊNCIA DE CÁLCULO	66
4	METODOLOGIA	68
4.1	APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	68
4.2	DADOS DE ENTRADA	69
4.3	SOLUÇÃO BASE	71
4.4	CÁLCULO DAS COTAS PIEZOMÉTRICAS	73
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
5.1	PROGRAMA DESENVOLVIDO POR SILVA (2014)	75
5.2	PROGRAMA DESENVOLVIDO POR MEDEIROS (2014)	75
5.3	COMPARAÇÃO QUALITATIVA DAS METODOLOGIAS PRESENTES NOS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS PELO AUTOR (2022), POR MEDEIROS (2021) E POR SILVA (2014)	76
5.4	COMPARAÇÃO DAS PIEZOMÉTRICAS APRESENTADAS NO TRABALHO DE SILVA (2014): REGIME EM TRANSIÇÃO	77
5.5	COMPARAÇÃO DAS PIEZOMÉTRICAS APRESENTADAS NO TRABALHO DE SILVA (2014): REGIME RUGOSO	85
5.6	COMPARAÇÃO DAS PIEZOMÉTRICAS APRESENTADAS NO SOFTWARE ALLIEVI: REGIME EM TRANSIÇÃO	88

5.7	VALIDAÇÃO DO MODELO	89
5.8	ESTUDO 01: ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DA PARCELA DA DECLIVIDADE LONGITUDINAL	90
5.9	ESTUDO 02: ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DA PARCELA DA ENERGIA CINÉTICA	91
5.10	ESTUDO 03: INFLUÊNCIA DO CÁLCULO DO FATOR DE RESISTÊNCIA DE ACORDO COM O REGIME DE ESCOAMENTO	93
5.11	SIMULAÇÃO DAS ONDAS DE PRESSÃO	94
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS	95
	REFERÊNCIAS	97

1 INTRODUÇÃO

No estudo da Hidráulica, a pressão em uma canalização, classifica o escoamento em forçado, quando a pressão interna é sempre diferente da pressão atmosférica, implicando que o elemento de condução do fluido precisa estar enclausurado, como ocorre em adutoras, ou livre, quando a pressão na superfície do líquido é igual à atmosférica, podendo o conduto ser aberto, como canais, ou fechados, onde a seção transversal da tubulação não é preenchida em sua totalidade, como no sistema de coleta e transporte de um sistema de esgotamento sanitário, conforme preconiza a Norma Brasileira (NBR) 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário (ABNT, 1986).

Outra classificação tem como base a direção na trajetória das partículas, podendo o escoamento ser laminar ou turbulento. Na Engenharia Hidráulica, geralmente, os escoamentos são turbulentos. Osborne Reynolds realizou um experimento no qual era injetado um corante de maneira contínua em um ponto do escoamento, permitindo, portanto, observar os dois tipos de fluxos. A partir deste estudo, foram determinados os limites dos regimes de escoamento (BAPTISTA et al. 2001).

Há ainda a classificação que tem como parâmetro o tempo, pelo qual o escoamento é dito ser permanente ou transitório. Se, por exemplo, ao decorrer do tempo os valores da velocidade e/ou da pressão se alteram, o regime é considerado transitório. Baptista et al. (2001) dividem os escoamentos transitórios de acordo com a taxa de variação da velocidade e da pressão. Se a variação ocorre de maneira lenta, a mudança é lenta e a compressibilidade do líquido não é um fator importante. Todavia, quando a mudança é brusca, são geradas ondas de pressão que são transmitidas com a velocidade de propagação do som e causam uma variação na pressão, podendo gerar pressões superiores ou inferiores ao do regime permanente. Dessa forma, a compressibilidade se torna um fator importante.

Segundo Silva (2014) os condutos forçados estão suscetíveis ao fenômeno chamado de Transientes Hidráulicos, que ocorre quando a vazão em uma tubulação sofre alteração de maneira inesperada, fazendo com que as pressões geradas após essa mudança possam comprometer ou até mesmo danificar gravemente os sistemas hidráulicos e os equipamentos instalados neles, conforme mostrado na figura 01, onde o (a) mostra um rompimento de uma adutora em Denver, (b) mostra um rompimento

de um conduto forçado na Líbia e (c) mostra um colapso da adutora de General Sampaio no Ceará.

Figura 1 – Casos de ocorrência dos Transientes Hidráulicos



Fonte: Tassinari (2017)

Essa alteração pode ser decorrente do fechamento rápido de uma válvula, para manutenção da rede, ou devido ao desligamento repentino das bombas, devido a falta de energia elétrica em um sistema de recalque. De acordo com Netto e Fernández (2015) o caso mais frequente de Transiente Hidráulico ocorre em linhas de recalque com as bombas centrífugas que são acionadas por motores elétricos, devido a interrupção do fornecimento de energia elétrica por qualquer natureza. Ocorrida a perturbação, o regime que antes era permanente, passa a ser não permanente e após certo tempo, o estado inicial é restaurado. O Transiente Hidráulico é visto como sendo justamente a variação entre esses regimes de permanência.

A mudança do regime faz com que a energia cinética seja transformada em sonora e energia potencial elástica, promovendo a deformação além do regime elástico do material da adutora, podendo ocasionar o colapso da tubulação. Desta forma, é necessário que os tubos sejam dimensionados para suportar tal deformação, não sendo possível, deve-se dimensionar e instalar dispositivos de proteção em pontos que atinja sua capacidade máxima de proteger o sistema de adução (MAGALHÃES, 2018).

Em 1789, Monge, desenvolveu o Método das Características (MOC) que é um dos métodos numéricos de integração de equações com derivadas parciais mais utilizados para a solução dos Transientes Hidráulicos, no qual utilizam as equações da Conservação de Massa e da Quantidade de Movimento como base para desenvolver as equações matemáticas (SILVA, 2014). O MOC é um dos métodos recomendados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 12215-1: Projeto de adutora de água – Parte 1, Conduto forçado (ABNT, 2017) na elaboração

de projetos de sistemas hidráulicos. Porém se observa que a maioria das aplicações do MOC não considera em sua parcela relativa à declividade longitudinal da tubulação e a da Energia Cinética, julgando-se assim que a contribuição delas é insignificante face às outras variáveis.

A NBR 12215-1 orienta que haja a análise da ocorrência dos Transientes Hidráulicos através de software que utilize métodos numéricos, como o MOC, com o objetivo de modelar matematicamente o sistema hidráulico que está sendo estudado e/ou projetado. Seja qual for o método utilizado, ele deve resolver as equações de derivadas parciais que regem o fenômeno. (ABNT, 2017).

Há diversos softwares que simulam transientes hidráulicos em condutos forçados, por exemplo, o Hammer, desenvolvido pela Bentley, o sistema UFC, desenvolvido pelo Laboratório de Hidráulica Computacional (LAHC) e pelo Grupo de Estudos em Hidráulica Computacional (GEHC) da Universidade Federal do Ceará (UFC) e o ALLIEVI, desenvolvido pelo Grupo de Engenharia e Tecnologia da Água da Universidade Politécnica de Valênciâ. Eles utilizam o MOC como método de simulação (FARIA, 2020).

De acordo com Diniz (2020) o ALLIEVI é um software livre, utilizado como ferramenta para análise e verificação dos efeitos transitórios de manobras efetuadas nos elementos presentes dos sistemas hidráulicos e que pode vir a ser empregado tanto na fase de concepção de um projeto quanto na fase de verificação da operação de um sistema.

Utilizar o software na fase de concepção permite ao projetista simular a implementação de diversos dispositivos de proteção, a fim de manter as oscilações das pressões geradas durante o Transiente Hidráulico dentro do limite predeterminado. Já na fase de verificação do sistema, o ALLIEVI traz como ganho significativo a possibilidade de diagnosticar e visualizar os efeitos do fenômeno numa instalação previamente projetada.

Silva (2014) e Medeiros (2021) desenvolveram o estudo dos Transientes Hidráulicos, elaborando um programa que implementava as equações do MOC em Visual Basic for Applications (VBA). Como estudo de caso, consideraram um sistema de adução por recalque formado por dois reservatórios que estão a um desnível geométrico de 150 metros e interligados por uma tubulação. O mesmo estudo de caso foi adotado neste trabalho assim como foram utilizados os mesmos dados de entrada.

No programa desenvolvido por Silva (2014) o fator de atrito era um dado de entrada que, quando o escoamento era dito liso ou na zona de transição, este era recalculado via processo iterativo em função da vazão. Já para o caso de regime rugoso o valor inserido era mantido constante, já que para este regime a rugosidade do material é condicionante para a determinação do fator de atrito. A dissertação de Silva (2014) faz diversas menções sobre a variação da declividade longitudinal da tubulação, sugerindo que este parâmetro foi considerado. Por fim, a vazão e a altura manométrica foram dados de entrada estabelecidos pelo fornecedor da bomba através do ponto de funcionamento. O autor comparou seus resultados com um programa desenvolvido no ano 2008 em MATLAB, bastante utilizado no contexto acadêmico da Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto (FEUP). Este programa simulava o fenômeno dos Transientes Hidráulicos apenas em sistemas elevatórios, calculando as pressões durante o regime transitório.

O programa desenvolvido por Medeiros (2021) é capaz de realizar as simulações considerando apenas o regime rugoso, no qual o fator de atrito é calculado pela fórmula de Nikuradse e despreza as contribuições da declividade longitudinal da tubulação. A altura manométrica foi calculada somando a parcela referente à altura geométrica com a parcela da perda de carga distribuída. Para fim de validação, Medeiros (2021) comparou os resultados obtido em seu programa com o apresentado por Silva (2014) e com os obtidos no ALLIEVI, após simulação do estudo de caso no software.

O trabalho aqui apresentado se propôs a desenvolver um programa computacional que aplica as equações do MOC para o mesmo sistema de adução por recalque de água para análise de eventos transitórios causados pela parada inesperada do conjunto elevatório. No entanto, o programa desenvolvido expande as premissas adotadas por Silva (2014) e Medeiros (2021), para que o problema se aproxime da realidade da engenharia hidráulica e que seja base científica para calcular o fator de atrito da fórmula universal de perda de carga de Darcy-Weisbach de acordo com o regime de escoamento (rugoso, liso ou transição) e considerar as parcelas de energia cinética e da declividade longitudinal da tubulação, possibilitando verificar se essas variáveis são ou não significativas. A validação do programa ocorreu através do comparativo com os resultados com os trabalhos de Silva (2014) e Medeiros (2021) e com o software ALLIEVI.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

O debate sobre o acesso a água se intensificou em 2020 na ocorrência da Pandemia do Novo Coronavírus (SARS-CoV-2), pois as instituições das esferas estaduais e globais que tem como foco a garantia da saúde pública e coletiva, defenderam e difundiram que uma das formas de prevenção seria a de lavar as mãos com sabão frequentemente, sendo esta considerada a mais barata e eficaz. Porém, o Painel Saneamento Brasil, de responsabilidade do Instituto Trata Brasil (ITB), revelou que no respectivo ano (ITB, 2020), cerca de 15,9 % dos brasileiros e 18,3% pernambucanos não possuem acesso a água. Segundo o estudo realizado pelo próprio ITB o volume de água perdida nos sistemas de distribuição no Brasil foi cerca de 7,2 bilhões em metros cúbicos para o ano de 2020, equivale a mais de 7800 piscinas olímpicas de água tratada desperdiçada diariamente ou sete vezes o volume do Sistema Cantareira – maior conjunto de reservatórios para abastecimento do Estado de São Paulo - perdidos em um ano (ITB, 2022).

O estudo deixa claro que quando se considera somente as perdas físicas, o volume perdido é suficiente para abastecer aproximadamente 66 milhões de brasileiros em um ano, isto não somente equivale a pouco mais de 30% da população do país em 2020, como também corresponde a quase o dobro de número de habitantes sem acesso ao abastecimento de água no referimento ano (ITB, 2022).

Adutoras são tubulações de grandes dimensões geométricas classificadas como condutos forçados que tem como objetivo transportar a água, interligando a captação de tratamento de água ao reservatório. Durante a operação e manutenção do sistema de abastecimento de água, faz-se necessário realizar variadas manobras no sistema, que podem ocasionar mudanças no regime de escoamento, resultando em alteração de pressão na tubulação. Essa variação pode ter como efeito o fenômeno dos Transientes Hidráulicos que pode causar o rompimento das tubulações pela ocorrência de ondas de sobrepressão, ou o estrangulamento delas, pela ocorrência de ondas de depressão ou subpressão.

As Normas Brasileiras (NBR) 12214: Projeto de estação de bombeamento ou de estação elevatória de água (ABNT, 2020) e a (NBR) 12215-1: Projeto de adutora de água – Parte 1, Conduto forçado (ABNT, 2017), orientam a necessidade de analisar os efeitos dos Transientes Hidráulicos. A falta de estudos dos Transientes Hidráulicos na fase de concepção de um projeto pode acarretar mudanças significativas em

etapas posteriores, como por exemplo, a obrigação da troca do material da adutora ou a instalação de dispositivos de proteção, podendo trazer inviabilidade econômica e/ou técnica.

1.2 OBJETIVOS

O programa computacional desenvolvido em Microsoft Excel, utilizou o Visual Basic for Applications (VBA) como linguagem de programação para estabelecer as rotinas de cálculo implementando as equações do Método das Características (MOC).

1.2.1 Objetivo Geral

Determinar os principais parâmetros para o estudo dos Transientes Hidráulicos, em especial os valores das pressões mínimas e máximas, em um sistema de adução por recalque, considerando o fator de atrito na fórmula universal de perda de carga de Darcy-Weisbach calculado de acordo com o regime de escoamento e a consideração da energia cinética e da declividade longitudinal da tubulação como parcelas significativas para os resultados das pressões.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) validar as rotinas e resultados do modelo hidráulico através dos trabalhos disponíveis que simularam o mesmo estudo de caso e com o software ALLIEVI;
- b) analisar a relevância da consideração do fator de atrito variável na fórmula universal de perda de carga de Darcy-Weisbach;
- c) analisar a relevância da consideração da energia cinética e da declividade longitudinal da tubulação durante transitórios hidráulicos em sistemas de bombeamento de água, tornando este trabalho base científica para consideração ou não dessas variáveis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015 estabeleceu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que se desdobram em 169 metas, vislumbrado através da construção e implementação de políticas públicas acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que todas as pessoas tenham paz e prosperidade em suas vidas, até 2030. O 6º ODS tem como título “Água potável e saneamento” no qual o propósito é assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para toda a população. Este ODS se desmembra em 6 metas, que aponta que até 2030 é necessário (ONU, 2022):

- a) alcançar a universalização igualitária do acesso a água potável e segura para todos;
- b) alcançar o saneamento e higiene adequados e igualitário para todos, e acabar com a defecação a céu aberto, com alerta especial para as necessidades das mulheres e meninas e daqueles que estão em situação de vulnerabilidade;
- c) melhorar a qualidade da água através da redução da poluição, da eliminação do despejo e minimização da liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas e aumentando substancialmente a reciclagem e reutilização segura e globalmente;
- d) aumentar significativamente a eficiência do uso da água em todos os setores e assegurar retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para enfrentar a escassez de água reduzindo significativamente que sofre com isto;
- e) implementar a gestão integrada dos recursos hídricos em todos os níveis;
- f) proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água, englobando ainda montanhas, florestas, zonas úmidas, rios, aquíferos e lagos.

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2021), que é administrado pela Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério do Desenvolvimento Regional (SNS/MDR), reuniu informações da prestação de serviços públicos de abastecimento de água em 5350 municípios, representando 96,1% dos

municípios brasileiros, abrangendo 98,6% da população total (208,7 milhões) e 99,1% da população urbana (177,9 milhões), conforme os dados de 2020:

- a) 5337 municípios possuem sistemas públicos de abastecimento de água e 13 municípios utilizam soluções individuais para suprir a falta de atendimento público, como poços, cisternas e caminhões pipas;
- b) há 728 mil quilômetros de redes públicas de abastecimento de água e houve uma expansão de 47,7 mil quilômetros em relação a 2019;
- c) o volume produzido de água chegou a 17,2 bilhões de metros cúbicos e o consumido a 9,9 bilhões de metros cúbicos;
- d) O índice de perdas na distribuição de água é de 40,1%, o que representa um crescimento contínuo após o período de estabilidade que ocorreu entre os anos de 2012 e 2015, quando chegou a ficar abaixo de 37%.

De acordo com Manzi (2020) as perdas reais são aquelas provenientes a vazamentos em redes e ramais de distribuição e pelo extravasamento de reservatórios, principalmente, e tem relação direta com os tipos de materiais das redes, ramais e reservatórios, assim como os hábitos de manutenção e pressões de operação. A maior parte dos vazamentos em sistemas de distribuição se apresenta nos ramais prediais, e não nas redes, valor que pode chegar a 2/3 (dois terços) do total. Isto mostra que a gestão dos materiais e métodos construtivos empregados na parte dos ativos merece ser priorizada. Costuma-se trocar as redes, cujo custo é mais alto, quando o problema está na verdade nas ligações prediais.

Manzi (2020) ainda afirma que o controle de pressão atua sobre as perdas físicas de forma bidirecional, ou seja, ter o bom controle pode reduzir significativamente a vazão e a frequência do surgimento de novos vazamentos, enquanto a falta de controle, aumente perigosamente esta parcela.

Em 2020 entrou em vigor a Lei nº 14.026/2020 (BRASIL, 2020), o novo Marco Legal do Saneamento, onde traz uma proposta desafiadora, mas necessária para garantir a dignidade humana, que é a universalização do saneamento, de forma que até o final de 2033 seja ampliada a cobertura do acesso à água potável, no qual 99% da população terá abastecimento de água e 90% terão acesso à coleta e tratamento do esgoto.

Dentre tantos itens que se faz necessário para atingimento dessa meta, destaca-se a de que os projetos, relacionados a água e esgoto, leve em consideração

os potenciais riscos que os efeitos do fenômeno de Transientes Hidráulicos podem gerar no sistema. Vale destacar que é inevitável a ocorrência do regime transitório, porém é evitável os seus transtornos, através de estudos e análises que permitam que o operador do sistema tome decisões de troca do material do conduto ou até mesmo a escolha e o local de implantação de um dispositivo de proteção.

2.1 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Os sistemas de abastecimento de água são formados por equipamentos, infraestruturas e serviços que têm como objetivo atender às demandas, sejam elas, domésticas, industriais, comerciais, públicas, entre outros. Em linhas gerais o ciclo de abastecimento de água é formado por cinco etapas principais, a saber: captação de água bruta, adução, tratamento, reserva e distribuição de água tratada (SNIS, 2021).

A primeira etapa é a de captação de água bruta que ocorre em mananciais hídricos superficiais ou subterrâneas e é conduzida a estações de tratamento para o sistema de adução. As obras de captação devem ser projetadas e construídas objetivando retirar o volume de água suficiente para o sistema de abastecimento e com a melhor qualidade possível, com o funcionamento ininterrupto em qualquer período do ano e que seja de fácil acesso para operação e manutenção do sistema. As obras de captação podem estar associadas às obras de uma estação elevatória a depender da localização do corpo hídrico de interesse (TSUTIYA, 2006).

A segunda etapa é a de adução que ocorre através das tubulações de grandes dimensões, chamadas de adutoras, que tem como objetivo a condução do fluido para as unidades que precedem a rede de distribuição. São elas que interligam captação, estação de tratamento e reservatórios, porém não distribuem água aos consumidores. As adutoras recebem duas classificações, sendo a primeira quanto à natureza da água transportada, ou seja, água com tratamento (adutora de água tratada) e sem tratamento (adutoras de água bruta). A segunda classificação diz respeito quanto à energia para movimentação do líquido, sendo, portanto, denominadas adutoras por gravidade e por recalque (TSUTIYA, 2006).

Para Heller e Pádua (2006, p.427) a adução por gravidade constitui o meio mais seguro e econômico de se realizar o transporte de água, que só é possível ser realizado se houver desnível suficiente para conduzir a vazão necessária entre os pontos que serão interligados. Caso o perfil topográfico seja desfavorável que o fluido

escoce por gravidade, é necessário que implante um sistema elevatório, sendo assim, a adução ocorrendo via recalque.

O transporte de água bruta é um dos sistemas fundamentais para o abastecimento de água, principalmente nas regiões onde a distância entre a captação e a unidade de tratamento é grande e/ou com diferenças de cotas consideráveis, tornado necessário um sistema elevatório, com alto custo de implementação e operação e com a atenção a confiabilidade do desempenho hidráulico do sistema, que é fortemente associado a variação na pressão decorrente de falha da bomba, o que pode gerar danos aos sistemas (MORESCHI, 2018).

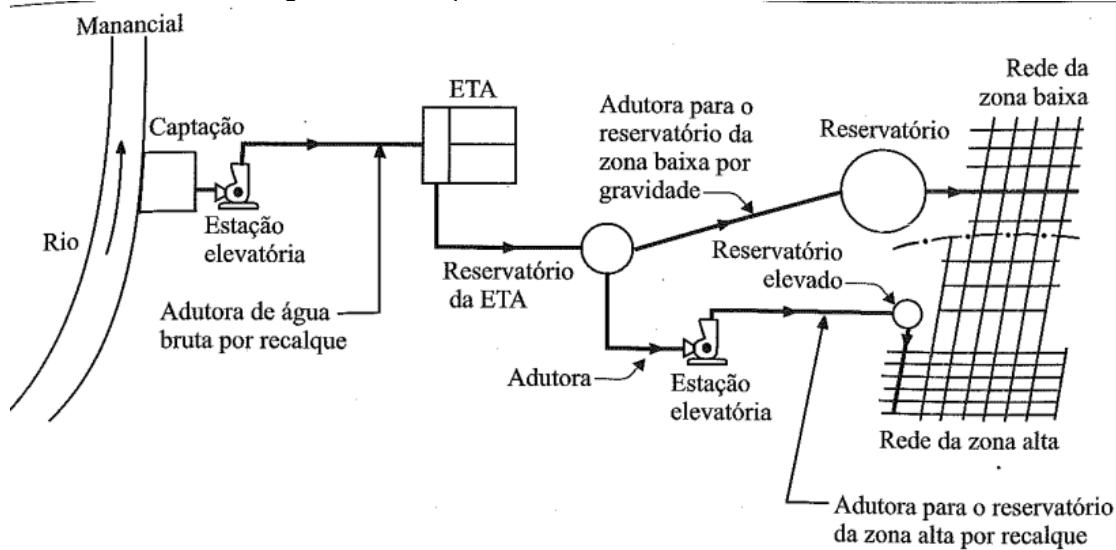
A terceira etapa é o tratamento da água bruta que ocorre a partir de processos físicos e químicos com a finalidade de retirar as impurezas. Pode ser dividida em quatro fases:

- a) 1^a Fase: é a de coagulação e flocação, que agrupa as partículas presentes na água bruta e forma grandes flocos;
- b) 2^a Fase: é a de decantação que por gravidade separa os flocos de partículas da água;
- c) 3^a Fase: é a de filtração, que através de unidades filtrantes remove partículas;
- d) 4^a Fase: é a de desinfecção e fluoretação, que é a adição de cloro ou outro agente desinfetante que elimina agentes de doenças de veiculação hídrica, e flúor, que reduz a incidência de cárie dentária.

A quarta etapa é a de reserva, no qual a água já tratada é levada para os reservatórios que tem como objetivo armazenar de modo que seja possível atender a variação de consumo e manter a pressão constante na rede.

A quinta e última etapa é a de distribuição, no qual dos reservatórios a água é distribuída para as unidades consumidoras através de redes públicas de distribuição, que são as tubulações instaladas ao longo das vias ou passeios públicos, e pelos ramais domiciliares, que são as estruturas que se conectam as redes de distribuição às unidades consumidoras (domicílios, estabelecimentos comerciais, escolas, hospitais, entre outros). A figura 2 representa um sistema de abastecimento de água (SAA):

Figura 2 - SAA que atende a zona baixa e a zona alta



Fonte: Orsini (1996) - Livro do Tsutya (2006) - página 17

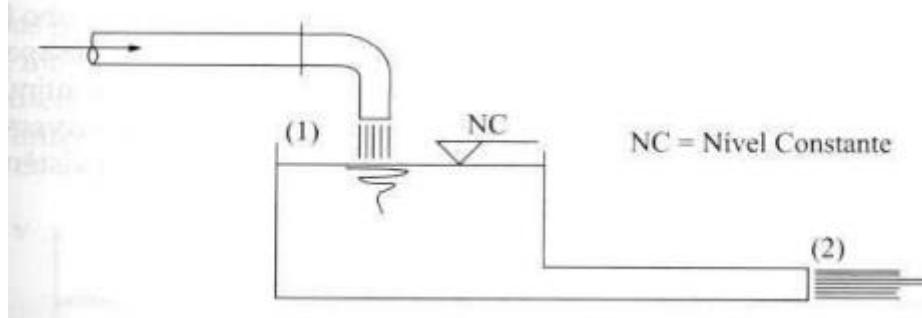
Parte integrante no SAA é a Estação Elevatória, que podem atuar na captação, adução, tratamento e rede de distribuição de água, conduzindo o líquido de cotas mais elevadas, ou aumentando a capacidade de adução do sistema. Quando as elevatórias conduzem águas não tratadas, passam a ser denominadas de elevatórias de água bruta, caso contrário, elevatórias de água tratada. A Norma Brasileira (NBR) 12214: Projeto de estação de bombeamento ou de estação elevatória de água (ABNT, 2020) especifica os requisitos para a elaboração desse tipo de projeto, apresentando o estudo de Transientes Hidráulicos como parte necessária em todas as fases do desenvolvimento do projeto.

De acordo com Gusmão et. al. (2021), uma das maiores dificuldades que os engenheiros enfrentam no que diz respeito ao abastecimento e distribuição de água nas cidades é a manutenção de um sistema eficiente que consiga atender as necessidades da população. Por conta disso, são projetadas grandes redes de distribuição que utilizam bombas, válvulas, reservatórios, entre outros dispositivos, que possibilitem que a água seja transportada desde a estação de tratamento até os ramais domiciliares. Todos esses dispositivos que facilitam a condução da água são responsáveis pelas diversas variações de pressão que ocorrem ao longo das tubulações durante o escoamento, ocasionando Transientes Hidráulicos.

2.2 TIPOS DE ESCOAMENTOS

Chama-se de regime permanente aquele em que as propriedades do fluido não variam em qualquer ponto do conduto com o passar do tempo, podendo as propriedades variarem de ponto para ponto. Considere o escoamento pela tubulação do tanque na figura 3. Admitindo que a quantidade de água que entra em (1) é a mesma quantidade que sai em (2), fazendo com que o nível do reservatório seja constante, mesmo o fluido estando em movimento, a configuração de suas propriedades como a velocidade, a massa específica, a pressão, entre outras, em qualquer instante temporal permanecerá inalterada. Se por alguma razão, o fornecimento de água por (1) for interrompido, o regime deixará de ser permanente, para ser variado, já que o reservatório não terá mais nível constante e as condições do fluido em alguns pontos e regiões passarão a variar com o passar do tempo (BRUNETTI, 2008).

Figura 3 - Reservatório com escoamento permanente



Fonte: Brunetti (2008)

O regime variado, por sua vez, pode ser definido como gradualmente variado (ou quase permanente) e rapidamente variável (transitório). No gradualmente variável, ocorre uma variação lenta das propriedades do escoamento e do fluido e as condições de compatibilidade interna são reestabelecidas rapidamente. No entanto, no rapidamente variável ocorre a variação de pressão e vazão, entrando em ação as forças elásticas de compressibilidade do líquido e de deformação do material da tubulação. No regime transitório, as condições de compatibilidade interna são reestabelecidas após intervalos de tempo extensos. Os Transientes Hidráulicos ocorrem justamente no regime transitório (SILVA, 2014).

2.3 FATOR DE RESISTÊNCIA

O líquido que escoa em uma tubulação está sujeito as forças resistentes provenientes das paredes da tubulação e por uma região do próprio líquido, chamada camada limite, que possui um alto gradiente de velocidade e seu efeito é significativo. Surgem, portanto, forças cisalhantes que diminuem a capacidade de fluidez do líquido (BAPTISTA et al. 2001).

A expressão perda de energia, ao designar a perda de carga, é frequentemente empregada, porém na realidade não se verifica uma perda de energia, e sim a dissipação sob a forma de calor, que não é mais recuperada como energia cinética e/ou potencial. A elevação da temperatura em um fluido, em consequência da perda de carga, é desprezível (NETTO E FERNÁNDEZ, 2015).

De acordo com Baptista et al. (2001) as tubulações podem ser classificadas em hidraulicamente lisas, rugosas e em transição, de acordo com os valores do fator de resistência (f), da rugosidade interna (ϵ) e da camada limite (δ), que pode ser avaliada pela equação (01), sendo “Re” o número de Reynolds calculado pela equação (02).

$$\delta = \frac{32,8 D}{Re \sqrt{f}} \quad (01)$$

$$Re = \frac{4 Q}{v \pi D} \quad (02)$$

O fator de resistência tem formulações próprias a depender do regime de escoamento. O Quadro 1 apresenta as fórmulas e suas condições.

Quadro 1 – Fórmulas para o cálculo do fator de resistência

Fórmula desenvolvida	Zonas de escoamento	Fórmula	Equação	Condições
Prandtl	Liso	$f = \frac{0,25}{\left(LOG \left(\frac{4Q\sqrt{f}}{2,51\pi v D} \right) \right)^2}$	(03)	$\epsilon < \delta / 3$
Nikuradse	Rugoso	$f = \frac{0,25}{\left(LOG \left(\frac{3,7 D}{\epsilon} \right) \right)^2}$	(04)	$\epsilon > 8 \delta$

Quadro 1 – Fórmulas para o cálculo do fator de resistência

conclusão

Fórmula desenvolvida	Zonas de escoamento	Fórmula	Equação	Condições
Colebrook-White	Transição	$f = \frac{0,25}{\left(\text{LOG} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51 \pi v D}{4Q \sqrt{f}} \right) \right)^2}$	(05)	$\delta / 3 < \varepsilon < 8 \delta$
Swamee e Jain		$f = \frac{0,25}{\left(\text{LOG} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{\left(\frac{4Q}{\pi v D} \right)^{0,9}} \right) \right)^2}$	(06)	$\delta / 3 < \varepsilon < 8 \delta$ $5 \cdot 10^3 \leq \text{Re} \leq 10^8$
Barr		$f = \frac{0,25}{\left(\text{LOG} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,13}{\left(\frac{4Q}{\pi v D} \right)^{0,89}} \right) \right)^2}$	(07)	$\delta / 3 < \varepsilon < 8 \delta$ $\text{Re} > 10^5$

Fonte: O autor (2022)

2.4 TRANSIENTES HIDRÁULICOS

A terminologia “transiente” é empregada quando o escoamento varia com o tempo, alterando a vazão, e por sua vez, a velocidade e a pressão. Quando a mudança é lenta, a compressibilidade não afeta significativamente o escoamento e pode ser considerado que o fluido está se movimentando como se fosse um corpo sólido. Para este caso, o estudo é conhecido como oscilação de massa. Porém, se a mudança é rápida, ocorrerá uma onda de pressão que percorrerá toda a tubulação, fazendo com que haja um choque violento sobre as paredes do conduto gerando um som que se assemelha ao vaivém de um aríete e, por isso, a nomenclatura de “Golpe de Aríete” (HELLER E PÁDUA, 2006).

Como este trabalho se propõe a estudar os Transientes Hidráulicos provocados por uma mudança brusca e repentina no escoamento e após definição anterior, é possível a partir deste ponto utilizar a nomenclatura “Golpe de Aríete” como sinônimo de Transiente Hidráulico.

De acordo com Netto e Fernández (2015) a velocidade de propagação da onda de pressão que transita na tubulação gerada no Transiente Hidráulico é função do

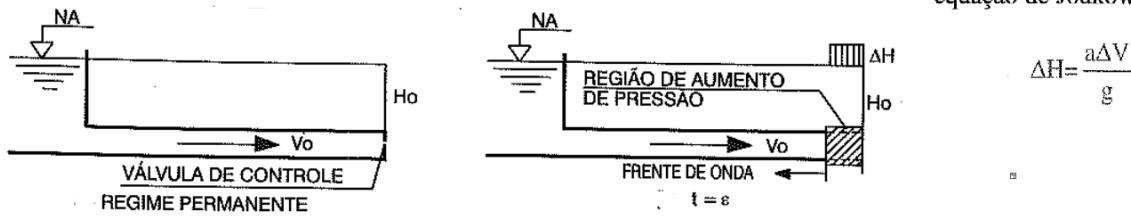
módulo de elasticidade da água e do material da tubulação, que por sua vez, por exemplo, variam com a temperatura da água. As principais causas do fenômeno são:

- o rompimento, fechamento ou abertura de válvulas;
- a partida ou parada de bombas ou turbinas;
- o rompimento ou obstrução súbita de uma seção de tubo, por exemplo, por questão de colapso estrutural em determinado ponto;
- a presença de bolsões de ar ou vapor, quando as duas frentes do líquido passam a se encontrar novamente;
- a colisão da superfície da água dentro de um tubo com a ventosa quando termina o escape do ar, se for muito rápido.

Tsutiya (2006) apresenta um modelo mais simplificado esquematizando um sistema de escoamento por gravidade constituído por um reservatório, uma tubulação e uma válvula, de forma a facilitar o entendimento do processo de passagem de um regime permanente para um transitório.

No momento inicial, a válvula está aberta, escoando a uma vazão (Q), uma carga (H_0) e uma velocidade (V_0) em regime permanente. No instante $t = t_0$, a válvula é fechada instantaneamente e o líquido junto à válvula é retido. Dessa forma, a energia cinética é transformada em pressão, que expande o tubo e faz com que a onda de pressão se propague para montante com velocidade chamada de celeridade (a). Tal situação é representada na figura 4.

Figura 4 - Parte 1 do esquema ilustrativo do Golpe de Arête num sistema composto por um reservatório, tubo e válvula na extremidade e fechamento instantâneo da válvula. equação de Joukowsky:

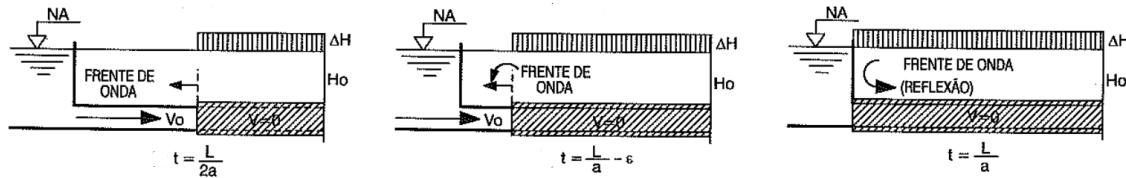


Fonte: Adaptado de Tsutiya (2006)

A onda se propagará a montante, até atingir do reservatório. Neste instante, após um tempo equivalente a L/a segundo, sendo L a extensão da tubulação, o

sistema terá velocidade $V = 0$ e o tubo expandido com a energia acumulada sob forma de energia elástica. Tal situação é representada na figura 5.

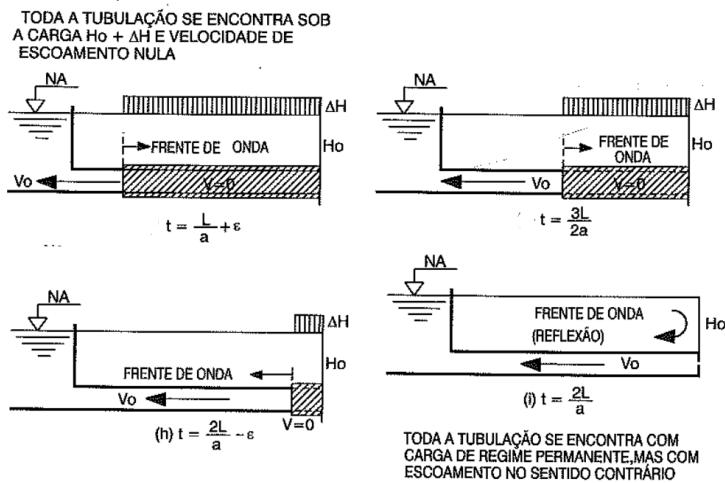
Figura 5 - Parte 2 do esquema ilustrativo do Golpe de Aríete num sistema composto por um reservatório, tubo e válvula na extremidade e fechamento instantâneo da válvula.



Fonte: Adaptado de Tsutiya (2006)

Porém, como a carga dentro do tubo é maior que no reservatório e existe uma quantidade de água comprimida dentro do tubo que está expandido, ocorrerá agora o fluxo do tubo para o reservatório ($V = V_0$) e com carga ($H = H_0$), formando assim uma frente de onda que se propagará em direção à válvula com a celeridade “-a”. Essa frente de onda chegará na válvula no instante $2L/a$. Tal situação é representada na figura 6.

Figura 6 - Parte 3 do esquema ilustrativo do Golpe de Aríete num sistema composto por um reservatório, tubo e válvula na extremidade e fechamento instantâneo da válvula.

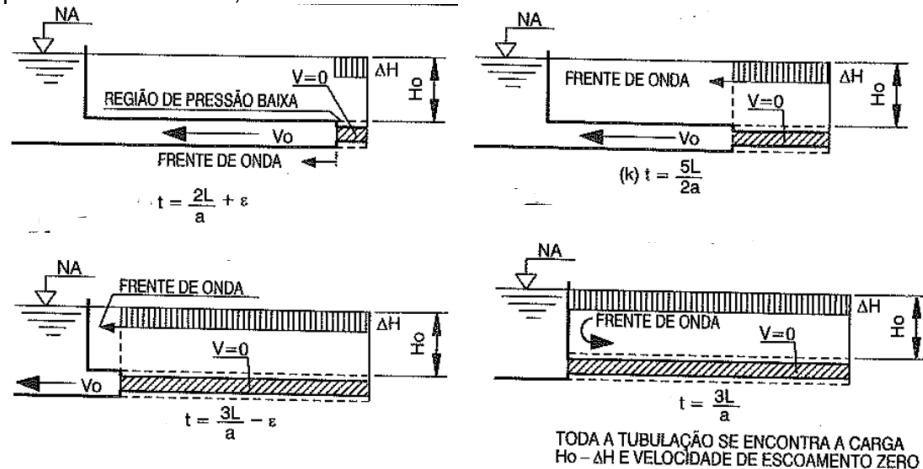


Fonte: Adaptado de Tsutiya (2006)

Porém, devida à inércia, a massa d'água na tubulação tenderá a se manter em movimento, no entanto, como a válvula está fechada, a camada junto a ela permanecerá parada, originando um abaixamento de pressão. Admitindo que a pressão seja superior à de vapor, uma onda de descompressão será formada, agora

no sentido da válvula para o reservatório. A frente de onda atingirá o reservatório no instante $3L/a$. Tal situação é representada na figura 7.

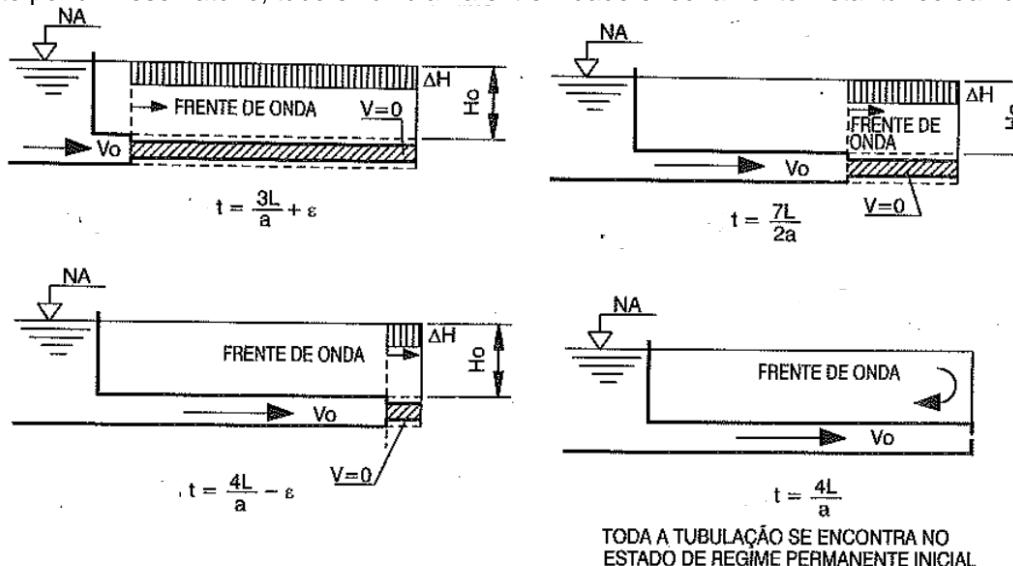
Figura 7 - Parte 4 do esquema ilustrativo do Golpe de Aríete num sistema composto por um reservatório, tubo e válvula na extremidade e fechamento instantâneo da válvula.



Fonte: Adaptado de Tsutiya (2006)

Por fim, como a carga no reservatório é maior que dentro do tubo, ocorrerá escoamento do reservatório para o tubo, com velocidade $V = V_0$ e $H = H_0$, formando assim uma nova onda que se propagará do reservatório para a válvula, restabelecendo, portanto, as condições iniciais. A onda atingirá a válvula no instante $4L/a$ e o ciclo se repetirá. Tal situação é representada na figura 8.

Figura 8 - Parte 5 do esquema ilustrativo do Golpe de Aríete num sistema composto por um reservatório, tubo e válvula na extremidade e fechamento instantâneo da válvula.



Fonte: Adaptado de Tsutiya (2006)

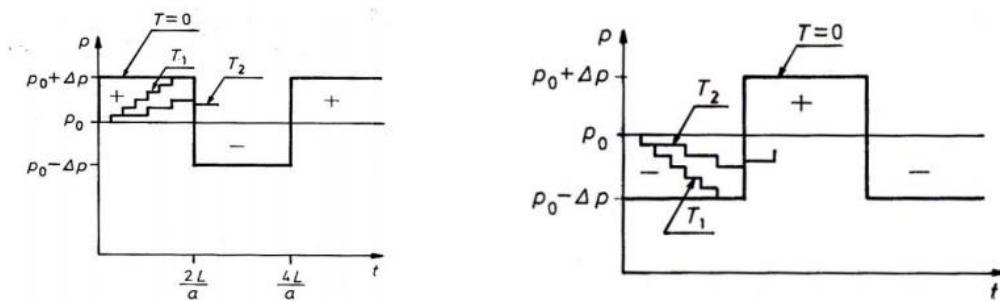
É importante pontuar que as perdas de carga foram desprezadas, no entanto, são elas que, nos casos reais, amortecem as amplitudes, cargas e vazões, sem que os períodos das ondas sejam afetados, até que o sistema atinja o repouso.

Para um sistema por gravidade o elemento estável (reservatório) está localizado a montante da tubulação, enquanto o perturbador (válvula), na fronteira oposta. Para um sistema de recalque, inverte-se a localização desses elementos, no entanto o perturbador é a bomba. Ou seja, ocorrerá a perturbação do escoamento na entrada da tubulação que é alimentada por uma bomba de motor elétrico, chamado de grupo elevatório. A parada desse grupo elevatório reduzirá a velocidade de rotação dos impulsores da bomba, que implicará a uma redução drástica da vazão impulsionada.

Nos casos reais, é colocado uma válvula de retenção a jusante do grupo elevatório de forma a garantir que a vazão terá um único sentido, protegendo a bomba. Por isso, nesse estudo isto foi considerado. Considere a variável T como o tempo necessário para que a vazão bombeada passe a ser nula após a parada do grupo elevatório ou o tempo necessário para que se estabeleça um regime permanente, no caso de arranque do grupo elevatório.

Ocorridas quaisquer uma destas situações, o diagrama de pressões do sistema de recalque é simétrico com o do sistema por gravidade, como pode ser visto na figura 9, sendo o gráfico da esquerda o do sistema por gravidade, e o da direita o do sistema por recalque. Isto se deve ao fato de que no instante de parada do grupo elevatório, por exemplo, surgirá uma pressão negativa com origem neste ponto que se propagará até a fronteira de jusante.

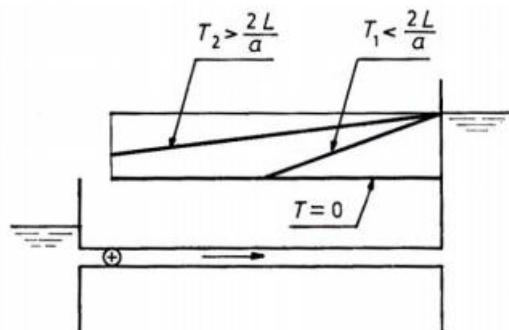
Figura 9 - Diagramas cronológicos de pressões no sistema por gravidade e por recalque, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Silva (2014)

Dessa forma, comparando T com $2L/a$, para caracterização do tipo de manobra, as pressões negativas desenvolvem igual comportamento ao que era esperado das sobrepressões em sistemas por gravidade, resultando assim nas linhas de cotas piezométricas, representadas na figura 10. Quando $T > 2L/a$ a manobra é dita lenta, e quando $T < 2L/a$ a manobra é dita rápida.

Figura 10 - Linhas de cotas piezométricas mínimas conforme o tipo de manobra



Fonte: Silva (2014)

2.5 EFEITOS DO FENÔMENO

A oscilação da pressão durante o fenômeno dos Transientes Hidráulicos pode não apenas provocar de maneira imediata o achatamento ou a ruptura da tubulação, como também acelerar problemas relacionados à fadiga das tubulações e equipamentos, e até acidentes fatais.

De acordo com Magalhães (2018), as perdas econômicas devem ser calculadas levando em consideração o custo do reparo da tubulação e/ou equipamentos, pelo lucro cessante, que são aqueles prejuízos causados pela parada de qualquer das atividades de uma instituição e/ou profissional liberal, no qual o lucro é o objeto de suas atividades, e por fim, o alto custo social através da suspensão do serviço público de tamanha importância, como é o de distribuição de água.

É importante destacar que a literatura é escassa de casos de acidentes relacionados a eventos de Transientes Hidráulicos, pois este tipo de informação não é propositalmente disseminado. (ADAMLOWSKI; LEWANDOWSKI, 2012, apud MATTIELLO, 2017, p. 42). Neste tópico, são listados os principais problemas provenientes da ocorrência do Transiente Hidráulico em uma adutora.

2.5.1 Pressões

Segundo Faria (2020), caso durante o desenvolvimento do projeto os efeitos transitórios não tenham sido corretamente calculados, as linhas de recalque poderão fazer com que os equipamentos, conexões e tubulações tenham uma redução da sua vida útil por estarem vulneráveis as condições oriundas da sobrepressão e subpressão.

As pressões negativas devem ser sempre evitadas, pois geram grandes tensões nas paredes das tubulações, sendo estas superiores às máximas admissíveis e as pressões normais de operação há risco real de haver um colapso da tubulação. (MAGALHÃES, 2018).

As pressões máximas podem:

- a) destruir dutos e túneis;
- b) causar mortes;
- c) rachaduras no revestimento interno;
- d) danos as conexões e flanges entre seções da tubulação;
- e) destruir ou deformar dispositivos de proteção contra o Golpe de Aríete, caso não sejam dimensionados e/ou localizados de maneira correta.

Vale destacar, que o dano nem sempre é perceptível no momento da ocorrência do transitório, porém resulta em fragilização daquela tubulação e, podendo reduzir a espessura da parede e, após diversas ocorrências de transientes, causar o colapso da tubulação (BOULOS et al. 2005, apud FARIA, 2020, p. 50).

2.5.2 Separação da Coluna Líquida

Segundo Sobrinho e Tsutya (2011), se a subpressão gerada atinge a pressão de vapor, haverá a formação de cavidade de vapor na tubulação podendo, a depender da intensidade, fazer com que a cavidade ocupe toda a seção da tubulação, provocando o fenômeno de “separação de colunas” que ocorre em pontos de cotas elevadas ou convexas no perfil da tubulação. As colunas de água podem se unir novamente quando a pressão negativa ao refletir no reservatório volta sob a forma de onda positiva. O ponto de atenção é que ao se unirem, ocorrerá o choque frontal entre duas colunas, acarretando uma sobrepressão.

A sobrepressão poderá provocar no tubo uma implosão, caso a parede seja muito delgada, como por exemplo, em tubos fabricados com aço. Se a ocorrência é em pontos de vazamentos, pode causar a entrada de contaminantes na linha de adução quando da onda de subpressão atuar naquele ponto. Desta forma, é mais econômico dispor de dispositivos para impedir formação dos transitórios e consequentemente da separação de coluna líquida, do que de tubos que resistam a esses efeitos (TSUTYA, 2006).

2.5.3 Cavitação

Segundo Heller e Pádua (2006), chama-se cavitação o fenômeno que provoca a formação de cavas ou bolhas no líquido, pelo ar que está dissolvido na água podendo assim se desprender do fluido quando a pressão atuante no escoamento é reduzida ao valor da pressão de vapor. As bolhas tendem a aumentar de tamanho o que pode provocar a intermitênciam do escoamento ou a separação da coluna líquida se a seção do tubo for totalmente preenchida por elas. Por sua vez, o escoamento pode mover as bolhas para pontos onde a pressão é mais alta e pela pressão externa provocar o colapso, que farão com que haja o choque entre as partículas fluidas que provocarão a flutuação na pressão e danificarão as paredes da tubulação.

Em um sistema de recalque, se o fluxo encaminha parte dessas bolhas para o interior da bomba, onde a pressão reinante é superior a pressão interna da bolha, elas tenderão a implodir e a água envolvente é levada para o centro da bolha, havendo, portanto, o choque de partículas (Golpe de Aríete). Dessa feita, ocorrerá uma onda de sobrepressão em direção contrária ao centro da bolha, o que poderá danificar as paredes internas da bomba (BAPTISTA et al. 2001).

2.5.4 Condições de vácuo

De acordo com Boulos (2005), as condições de vácuo precisam ser evitadas, sempre que for possível, porque as deformações geradas por elas são muito superiores que as que ocorrem geralmente sob condições normais de funcionamento. Rompimento de paredes das tubulações e dos blocos de ancoragem, são problemas causados aos sistemas pelas condições de vácuo, principalmente se eles não foram projetados para suportar estas deformações (apud JUNIOR, 2008, p. 13).

2.5.5 Vibração, Ressonância e Barulho

Segundo Boulos (2005), o Transiente Hidráulico pode gerar vibrações fortes nos sistemas hidráulicos, prejudicando e danificando assim, os suportes das tubulações, os equipamentos de controle e medição e a argamassa presente em dutos revestidos. Caso as vibrações continuem por muito tempo, gerarão esforços cíclicos que podem provocar o surgimento de falhas por fadiga na tubulação. Portanto, se faz necessário se atentar com que frequência ocorrem as vibrações para que elas não se aproximem da frequência natural de vibração dos dutos, evitando assim o acontecimento da ressonância e que isto destrua o sistema hidráulico (apud CARVALHO, 2020, p.7).

A ressonância tem como característica a ampliação de uma perturbação imposta ao sistema, resultando assim em grandes oscilações de pressão e escoamento, que tendem a aumentar com o passar do tempo, até que se atinja a frequência natural do sistema. Grandes oscilações de massas de água entre reservatórios, por exemplo, provocam ruídos, entrada de ar no sistema, perda temporária do controle sobre o sistema (BOULOS et al. 2005, apud MATTIELLO, 2017, p. 45).

O desconforto acústico causado pelo fenômeno foi o causador de inúmeras reclamações para o Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto (SeMAE) de São José do Rio Preto, da população que residem próximo às Estações Elevatórias, devido ao som provocado pelo fechamento das válvulas de retenção (FARIA, 2020).

2.5.6 Qualidade da água

O Fenômeno dos Transientes Hidráulicos pode causar a ressuspensão de partículas precipitadas, o desprendimento de biofilme das paredes da tubulação, a intrusão de água subterrânea contaminada por juntas mal executadas ou através de trechos danificados na tubulação, e por fim, a entrada de gases que possibilitam a corrosão da tubulação (BOULOS et al. 2005, apud JUNIOR, 2008, p. 15).

Na tubulação, os pontos suscetíveis a contaminação são as juntas. Por exemplo, quando o material da adutora é o Policloreto de Vinila com Diâmetro Externo de Ferro Fundido (PVC-DEFoFo), essa junta, geralmente é a junta elástica integrada (JEI), pelo qual possui um anel elástico na bolsa, o que faz apenas necessário

encaixar a tubulação com lubrificante. Em caso de o material da adutora ser de polietileno, as juntas são soldadas através de eletrofusão e/ou termofusão. O ponto de atenção se dá para o fato dos projetistas, no momento do dimensionamento das redes, não possuírem nenhum requisito normativo para a mínima pressão admissível para estes materiais, tendo apenas a máxima (FARIA, 2020).

Pressão admissível é aquela em que um componente pode suportar com total segurança, incluído os transitórios hidráulicos, enquanto a pressão de serviço é aquela atuante nos componentes do sistema quando ocorre regime hidráulico permanente. Por fim, a pressão de serviço máxima é aquela atuante nos componentes do sistema quando ocorre o regime transitório. (NBR 12215-1-ABNT, 2017)

No tocante a pressão mínima, no item sobre pressão de serviço, a Norma Brasileira (NBR) 12215-1 (ABNT, 2017) recomenda que as pressões mínimas, devidas aos transitórios hidráulicos atuantes em qualquer seção da tubulação, devem ser maiores que a pressão atmosférica para sistema com água tratada e de no máximo 20 kPa, aproximadamente, 2,03949 mca, para sistema com água bruta.

2.6 MÉTODOS DE ANÁLISE DO GOLPE DE ARÍTE

Vários métodos para analisar o problema dos transientes hidráulicos em condutos forçados foram desenvolvidos, sendo a maior parte deles utilizando tanto as equações do movimento, da continuidade e da conservação de energia, quanto as propriedades físicas referentes ao material da tubulação e ao tipo de fluido. A seguir, são apresentados os princípios de alguns métodos hidráulicos mostrados na literatura por Wylie e Streeter (1978) (WYLIE E STREETER, 1978).

- a) Método Algébrico: formado por duas equações características para as ondas de pressão em ambos os sentidos (positivos e negativos) da tubulação. Nestas equações o tempo está explícito e faz relação com o número de incrementos no tempo desde o início do transiente;
- b) Método de Análise Linear: a solução analítica é obtida através da linearização do termo de atrito e utilizando outros termos não lineares na equação do movimento;
- c) Método Aritmético: pode ser considerado o método de análise mais simples, pois não considera o atrito e nem outras perdas na tubulação, porém introduz aproximações;

- d) Método Gráfico: os transientes são normalmente determinados nas extremidades da tubulação e admite-se que as perdas se concentram em um único ponto, sendo este na entrada ou na saída da tubulação;
- e) Método Implícito: sua formulação foi realizada de forma que não seja necessária se construir uma relação entre o incremento de tempo e o incremento de comprimento da tubulação, porém sendo necessária soluções concomitantes para as incógnitas a cada incremento de tempo, trazendo assim flexibilidade para sistemas complexos;
- f) Métodos Simplificados de Análise: são aqueles que determinam a fase ou período da tubulação (tempo de deflexão das ondas de choque), para que seja possível as manobras rápidas, que ocorrem em tempo menor que a fase da tubulação, ou as manobras lentas, que ocorrerá em um tempo maior.

Chaudhry (2014) apresenta outros métodos para a análise das equações hiperbólicas e diferenciais parciais que caracterizam os transientes hidráulicos em condutos fechados, são estes:

- a) Métodos das Características: é bastante utilizado para estudos de transientes hidráulicos, principalmente quando a velocidade da onda é constante. É considerado superior aos demais pelo fato de apresentar bons resultados gráficos exibindo a propagação da onda, facilidade de programação e eficiência computacional;
- b) Método das Diferenças Finitas: se subdivide em explícito e implícito. No explícito, há uma dependência entre os valores de cada variável com os valores já conhecidos no instante anterior, sendo, portanto, um método mais fácil de programar, porém exige o uso de pequenos intervalos de tempo de simulação. No implícito, a programação já é mais complexa, apresentando sistemas de equações que permitem a definição das variáveis em função do instante presente e do anterior, permite ainda a utilização de intervalos de tempo de simulação maiores e sendo este o método mais estável;
- c) Método dos Elementos Finitos: exige uma complexidade computacional para a simulação muito maior e não oferece grandes vantagens para simulações onde o fluxo é considerado unidirecional quando comparado aos demais.

Vale já destacar que os 3 métodos apresentados em Chaudhry (2014) são mencionados na Norma Brasileira (NBR) 12215-1/2017 (ABNT, 2017) - Projeto de adutora de água, parte 1: Conduto Forçado, como métodos que devem estar presentes nos softwares utilizados no estudo dos transitórios hidráulicos.

2.7 NORMAS DE PROJETO

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é a instituição brasileira que objetiva elaborar, revisar e distribuir normas específicas para projetos, para que estas sejam utilizadas por profissionais, no momento de concepção, dimensionamento, execução e operação de sistemas da engenharia. Dentro da temática de interesse deste trabalho, serão apresentadas o contexto geral das Normas Brasileiras (NBR) 12214/2020 (ABNT, 2020), que trata do projeto de estação de bombeamento ou de estação elevatória de água e que substituiu e cancelou a NBR 12214/1992 (ABNT, 1992) e a NBR 12215-1/2017 (ABNT, 2017), que trata do projeto de adutora de água, parte 1: conduto forçado e que substituiu e cancelou a NBR 12215/1991 (ABNT, 1991). Estas normas foram elaboradas pelo Comitê Brasileiro de Saneamento Básico e pela Comissão de Estudo de Projetos para Sistemas de Saneamento.

2.7.1 NBR 12214/2020 – Projeto de estação de bombeamento ou de estação elevatória de água

Esta norma apresenta o estudo dos efeitos dos transientes e da seleção dos dispositivos de proteção do sistema, como uma das atividades necessárias para o desenvolvimento do projeto. A redução da ocorrência do Transiente é um dos fatores para a determinação da velocidade nos barriletes de sucção e de recalque.

Embora o dimensionamento de dispositivo(s) para proteção do sistema aos Transientes que pode(m) ser instalado(s) na estação de bombeamento ou estação elevatória não esteja presente nesta norma, e sim da NBR 12215-1 (ABNT, 2017) – Projeto de adutora de água, parte 1: conduto forçado, há indicação de situações que podem resultar na adoção de medidas de proteção, devido a possibilidade da ocorrência dos Transientes, como, por exemplo:

- a) a abertura ou fechamento de válvula de bloqueio, quando a manobra for considerada rápida;
- b) a expulsão e/ou admissão do ar, visando a melhoria da operação do sistema e as ações de enchimento e/ou esvaziamento;
- c) as condições transitórias geradas pela instalação de válvula de retenção, que evita o retorno do fluxo da água e redução dos transientes nos conjunto motor-bombas.

As estruturas precisam ser avaliadas no que diz respeito a fadiga, prevendo proteção aos esforços mecânicos, evitando assim o colapso da tubulação, devida a ocorrência das condições-limites de trabalho e/ou do transiente hidráulico, tanto para as envoltórias de mínimas quanto para as de máximas.

2.7.2 NBR 12215-1/2017 – Projeto de adutora de água, parte 1: conduto forçado

Esta norma também aponta a necessidade do estudo de Transientes, o dimensionamento e definição da localização de dispositivos de proteção hidráulica da adutora como parte integrante e necessária do desenvolvimento do projeto, que deve, através das simulações hidráulicas, apresentar características de todas as unidades necessárias do sistema de adução, como por exemplo, a proteção aos Transientes e as condições para o enchimento, o esvaziamento e as eventuais manobras a serem consideradas.

Em todas as etapas do projeto deverá ser realizada uma avaliação preliminar com análise diagnóstica do estudo de Transientes do sistema de adução sem qualquer dispositivo de proteção ao fenômeno, cabendo, então, ao projetista, a partir dos resultados obtidos, concluir sobre a necessidade de instalar o dispositivo, para atender o que é recomendado para a pressão de serviço e/ou quando a redução das pressões transitórias atuantes resultará em economia.

O estudo dos transientes deverá ser realizado com software que seja capaz de realizar uma modelagem matemática que se aproxime do modelo físico do sistema hidráulico em estudo e/ou projeto, aplicando métodos numéricos, como por exemplo, o das características, das ondas planas, das diferenças finitas, dos elementos finitos e que resolvam as equações de derivadas parciais governantes dos fenômenos

transitórios considerando as características físicas da água, e da tubulação e dos vínculos estruturais da tubulação com o meio externo.

Os Transientes deverão ser calculados, obtendo-se as variáveis de vazão e pressão em função do tempo (t) e do espaço (x), em cada seção definida no modelo matemático do sistema. O software deve apresentar as linhas piezométricas em regime permanente e em regime transitório com as envoltórias de pressões máximas e mínimas. Os resultados deverão compreender as simulações sem e com dispositivos de proteção.

2.8 INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA DO TRANSIENTE HIDRÁULICO

Para que seja possível aplicar o modelo matemático em regime transitório é necessário aplicar os princípios do Equilíbrio Dinâmico e da Conservação da Massa em uma seção com líquido sob pressão, entre duas seções da tubulação. As hipóteses simplificadoras que serão detalhadas a seguir permitirão a aplicabilidade destes princípios.

2.8.1 Hipóteses simplificadoras

As simplificações são referentes ao líquido, ao escoamento e ao comportamento da tubulação.

2.8.1.1 Principais simplificações referentes ao líquido e ao escoamento (SILVA, 2014)

- a) As equações globais que serão deduzidas consideram que o escoamento é unidirecional, com distribuição uniforme das velocidades e pressão em toda a seção transversal;
- b) Não é considerada a ocorrência de cavitação, logo a veia líquida é homogênea e monofásica;
- c) O módulo de elasticidade do líquido define a sua compressibilidade;
- d) A perda de carga no regime transitório é calculada para cada instante, da mesma forma que um regime permanente;
- e) O valor da massa específica no tubo de corrente elementar é constante

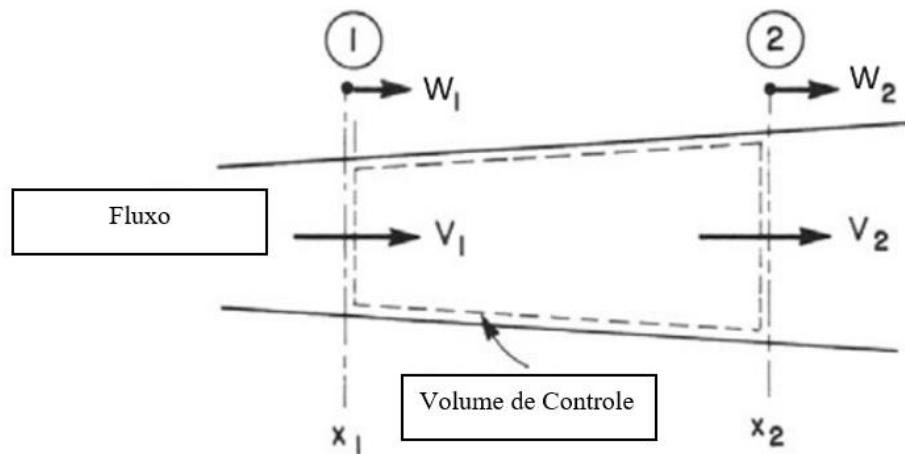
2.8.1.2 Simplificações referentes ao comportamento da tubulação (SILVA, 2014)

- a) Durante o regime transitório o eixo da tubulação permanecerá imóvel;
- b) O comportamento elástico das paredes da tubulação obedecerá à Lei de Hooke, definido pelo módulo de elasticidade e pelo coeficiente de Poisson;
- c) As características elásticas das paredes da tubulação, a sua espessura e o diâmetro interno permanecerão inalteráveis.

2.8.2 Princípio da Conservação da Massa ou Equação da Continuidade

Chaudhry (2014) aplicou a lei da Conservação da Massa em um volume de controle pré-estabelecido. Ao se tratar de um escoamento em um conduto fechado, a representação nada mais é do que uma parte da tubulação com uma seção de entrada e outra de saída, conforme é mostrada na figura 11. A Conservação da Massa define que a diferença da quantidade de massa no interior de um trecho elementar é igual à diferença entre a quantidade de massa que sai e a que entra no trecho.

Figura 11 - Volume de Controle



Fonte: Adaptado de Chaudhry (2014)

2.8.2.1 Forças que atuam no volume de controle

A equação 08 define as forças que atuam durante o escoamento do fluido no volume de controle, onde ρ é a massa específica do fluido, Δx é a distância entre x_1 e

x_2 , A é a área da seção transversal da tubulação e V é a velocidade de escoamento do fluido.

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} \Delta x + (\rho AV)_2 - (\rho AV)_1 = 0 \quad (08)$$

Dividindo a equação 08 por Δx e fazendo-a tender a zero, chega-se na equação 09. Expandindo os termos que se encontram entre parênteses, chega-se na equação 10 e rearranjando os termos e dividindo por ρA , teremos a equação 11.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho A) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho AV) = 0 \quad (09)$$

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial A}{\partial t} + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial A}{\partial x} + AV \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

2.8.2.2 Tensão circumferencial em um conduto circular

De acordo com Roberson e Crowe (1997), a equação 12 define módulo de elasticidade volumétrica do fluido, onde p é a pressão (apud CHAUDHRY, 2014, p.41)

$$K = \frac{dp}{d\rho/\rho} \quad (12)$$

Reescrevendo a equação 12, chega-se na equação 13. Admitindo um conduto circular de raio R, teremos a equação 14.

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\rho}{K} \frac{dp}{dt} \quad (13)$$

$$\frac{dA}{dt} = 2\pi R \frac{dR}{dt} \quad (14)$$

De acordo com Timoshenko (1941), assume-se que as paredes da tubulação têm comportamento elástico linear, ou seja, a tensão é proporcional à deformação linear. A equação 15 define a deformação circumferencial (ϵ), onde σ_1 é a tensão axial, σ_2 é a tensão circumferencial, E é o módulo de elasticidade do material, μ é o coeficiente de Poisson. (apud CHAUDHRY, 2014, p.41)

$$\varepsilon = \frac{\sigma_2 - \mu \sigma_1}{E} \quad (15)$$

Assume-se, por simplificação, que a tubulação tem juntas de expansão em todo o seu comprimento, logo, $\sigma_1 = 0$. Portanto, reescrevendo a equação 15, chega-se na equação 16:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_2}{E} \quad (16)$$

A equação (17) é a equação (14) reescrita tendo a posse da definição da deformação circunferencial.

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = 2 \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (17)$$

A tensão circunferencial em um conduto circular é definida pela equação (18), onde e é a espessura da parede da tubulação e D é o diâmetro. Derivando a equação (18) em relação ao tempo e aplicando a regra do produto, fica-se com a equação (19):

$$\sigma_2 = \frac{pD}{2e} \quad (18)$$

$$\frac{d\sigma_2}{dt} = \frac{p}{2e} \frac{dD}{dt} + \frac{D}{2e} \frac{dp}{dt} \quad (19)$$

Combinando as equações (16) e (19), chega-se na equação (20). Por sua vez, relacionando as equações (14), (17) e (20), chega-se na equação (21):

$$E \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{p}{2e} \frac{dD}{dt} + \frac{D}{2e} \frac{dp}{dt} \quad (20)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\frac{D}{2e} \frac{dp}{dt}}{E - \frac{pD}{2e}} \quad (21)$$

2.8.2.3 Equação da Continuidade

Das equações (17) e (21), resulta na equação (22), que juntamente com a equação (13) serão aplicadas na equação (11), chegando na equação (23)

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{\frac{D}{e} \frac{dp}{dt}}{E - \frac{pD}{2e}} \quad (22)$$

$$\frac{1}{K} \frac{dp}{dt} \left(1 + \frac{KD}{eE}\right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (23)$$

A celeridade da onda para uma tubulação de pequena espessura dotado de juntas de dilatação é definida pela equação (24). Finalmente, substituindo a equação (24) na (23), teremos a equação (25) que representa a Equação da Continuidade.

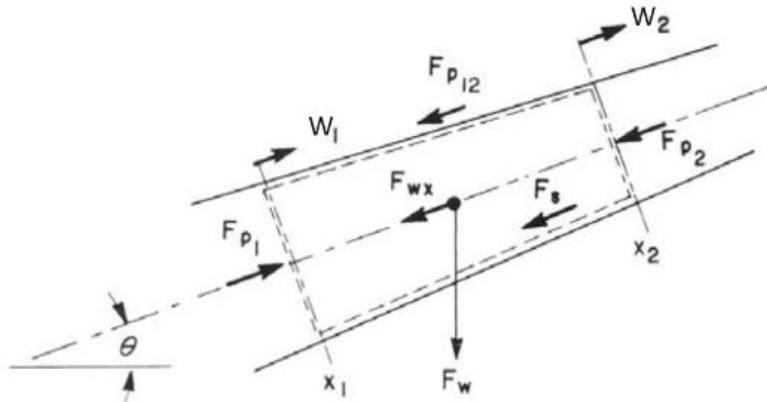
$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \left[\left(\frac{K}{E}\right) \left(\frac{D}{e}\right)\right]}} \Rightarrow \rho a^2 = \frac{K}{1 + \left[\left(\frac{K}{E}\right) \left(\frac{D}{e}\right)\right]} \quad (24)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (25)$$

2.8.3 Princípio do Equilíbrio Dinâmico ou Equação do Momento

Chaudhry (2014) aplicou o Teorema do Transporte de Reynolds no mesmo volume de controle representado na figura 12, de forma que fosse possível derivar a equação do momento e, que de maneira simplificada, pode ser escrita pela equação (26). O Princípio do Equilíbrio Dinâmico sugere que o conjunto das forças exteriores com as forças de inércia de um sistema se encontram em equilíbrio.

Figura 12 - Notação para Equação do Momento



Fonte: Chaudhry (2014)

$$\frac{d}{dt} (\rho AV) + \frac{(\rho AV)_2 - (\rho AV)_1}{\Delta x} = \frac{\sum F}{\Delta x} \quad (26)$$

2.8.3.1 Forças que atuam no volume de controle

Pela figura 12, podemos listar que as forças atuantes são:

- a) a força de pressão na seção 1 (F_{p1}), que pode ser escrita pela equação (27), onde p_1 é a pressão na seção 1 e A_1 é a área da seção transversal em 1:

$$F_{p1} = p_1 A_1 \quad (27)$$

- b) a força de pressão na seção 2 (F_{p2}), que pode ser escrita pela equação (28), onde p_2 é a pressão na seção 2 e A_2 é a área da seção transversal em 2:

$$F_{p2} = p_2 A_2 \quad (28)$$

- c) a força de pressão na redução (F_{p12}), que pode ser escrita pela equação (29):

$$F_{p12} = \frac{(p_1 + p_2)(A_1 - A_2)}{2} \quad (29)$$

- d) a componente do peso na direção do eixo da tubulação (F_{wx}), que pode ser escrita pela equação (30), onde θ é o ângulo formado pelo eixo da tubulação e a horizontal:

$$F_{wx} = \rho g A (x_2 - x_1) \sin \theta \quad (30)$$

- e) a força de cisalhamento (F_s), que pode ser escrita pela equação (31), onde τ_0 é a tensão de cisalhamento exercida pelas paredes do tudo sobre o fluido:

$$F_s = \tau_0 \pi D (x_2 - x_1) \quad (31)$$

Admitindo que o sentido positivo do escoamento é o da esquerda para a direita na figura 12, a equação (32) diz respeito ao somatório de todas as forças atuantes no volume de controle:

$$\sum F = p_1 A_1 - p_2 A_2 - \frac{(p_1 + p_2)(A_1 - A_2)}{2} - \rho g A (x_2 - x_1) \sin \theta - \tau_0 \pi D (x_2 - x_1) \quad (32)$$

Logo,

$$\sum F = \frac{(p_1 - p_2)(A_1 + A_2)}{2} - \rho g A (x_2 - x_1) \sin \theta - \tau_0 \pi D (x_2 - x_1) \quad (33)$$

Dividindo a equação (33) por Δx , tem-se a equação (34). Substituindo a equação (34) em (26) e aproximando Δx a zero por limites, chega-se a equação (35):

$$\frac{\sum F}{\Delta x} = \frac{(p_1 - p_2)(A_1 + A_2)}{2 \Delta x} - \rho g A \sin \theta - \tau_0 \pi D \quad (34)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho A V) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho A V^2) + A \frac{\partial p}{\partial t} + \rho g A \sin \theta + \tau_0 \pi D = 0 \quad (35)$$

2.8.3.2 Equação do Momento

A equação da perda de carga de Darcy-Weisbach fornece a tensão de cisalhamento na equação (36), sendo f o fator de atrito. Substituindo a equação (36) em (35), obtém-se a equação (37):

$$\tau_0 = \frac{\rho f V |V|}{8} \quad (36)$$

$$V \frac{\partial}{\partial t} (\rho A) + \rho A \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x} (\rho AV) + \rho AV \frac{\partial V}{\partial x} + A \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g A \sin \theta + \frac{\rho A f V |V|}{2D} = 0 \quad (37)$$

Rearranjando os termos da equação (37), chega-se à equação (38), porém atentando-se a equação (09), nota-se que os termos entre colchetes são iguais a zero. Portanto, dada essa simplificação e dividindo o resultado por ρA , obtém-se a Equação do Momento (39)

$$V \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho A) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho AV) \right] + \rho A \frac{\partial V}{\partial t} + \rho AV \frac{\partial V}{\partial x} + A \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g A \sin \theta + \frac{\rho A f V |V|}{2D} = 0 \quad (38)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{f V |V|}{2D} = 0 \quad (39)$$

2.8.4 Simplificação das Equações

De acordo com Chaudhry (2014) na maioria das aplicações de engenharia, os termos de aceleração convectiva, $V (\partial p / \partial x)$ e $V (\partial V / \partial x)$, são pequenos em relação aos outros termos. Semelhantemente, o termo de inclinação é geralmente pequeno e pode ser desprezado. Portanto, retirando esses termos das equações dos Princípios da Conservação da Massa e do Equilíbrio Dinâmico, chega-se, respectivamente as equações (40) e (41):

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (40)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{f V |V|}{2D} = 0 \quad (41)$$

É uma prática comum na Engenharia Hidráulica o cálculo das pressões na tubulação em termos de altura piezométrica, H , acima de um datum especificado e a utilização da vazão, Q , como a segunda variável em vez da velocidade de fluxo V . Dessa forma, $Q = VA$ e a intensidade de pressão p podem ser escritas como: $p = \rho g (H - z)$, sendo z a elevação do eixo da tubulação em relação a um datum, logo, as equações (40) e (41), tornar-se-ão nas equações (42) e (43):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (42)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f Q |Q|}{2DA} = 0 \quad (43)$$

3 MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

Como já se sabe a NBR 12215-1: Projeto de adutora de água – Parte 1, Conduto forçado (ABNT, 2017) menciona o Método das Características (MOC) como um dos vários métodos numéricos que pode ser aplicado na elaboração de projetos de sistemas hidráulicos. Neste método, o fenômeno adota uma lei de propagação de ondas que associará o tempo à abscissa x , que por sua vez, é definida ao longo do comprimento da tubulação através da celeridade. (MAGALHÃES, 2018)

3.1 INTEGRAÇÃO DAS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS

As equações do Equilíbrio Dinâmico e da Conservação da Massa regem o escoamento transitório sob pressão, onde a vazão (Q) e altura piezométrica (H) são variáveis que dependem do problema considerado. Estas equações serão integradas com o objetivo de se determinar funções que explicitam o comportamento com variáveis x e t , logo, $Q \equiv Q(x, t)$ e $H \equiv H(x, t)$. O MOC determina o valor de Q e H em um conjunto discreto de seções da tubulação e de instantes temporais, onde as equações (42) e (43), que são derivadas parciais, são transformadas em equações diferenciais ordinárias integráveis pelo método das diferenças finitas (SILVA, 2014).

3.1.1 Operadores lineares do MOC

Chaudhry (2014) define L_1 e L_2 como sendo a Equação do Momento e Equação da Continuidade nas suas versões simplificadas e definindo $F = f/(2DA)$, logo, reescrevendo as equações (43) e (42), chega-se as equações (44) e (45):

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + F Q |Q| = 0 \quad (44)$$

$$L_2 = g A \frac{\partial H}{\partial t} + a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (45)$$

Se L_1 e L_2 são iguais a zero, qualquer combinação linear das duas equações multiplicando por λ , um multiplicador desconhecido, também será nula, conforme mostrado nas equações (46) e (47):

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (46)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + F Q |Q| + \lambda \left(g A \frac{\partial H}{\partial t} + a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) = 0 \quad (47)$$

Logo, para cada valor de λ , será correspondida uma equação diferencial, logo para cada valor de λ haverá uma correspondência $A_1 = 0$ e $A_2 = 0$, conforme mostrado nas equações (48) e (49):

$$A_1 = L_1 + \lambda_1 L_2 \quad (48)$$

$$A_2 = L_1 + \lambda_2 L_2 \quad (49)$$

Dado que H e Q são funções do tempo e do espaço, as equações (50) e (51) representam suas derivadas totais:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (50)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (51)$$

Reescrevendo a equação (47), chega-se na equação (52):

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial H}{\partial x} + F Q |Q| = 0 \quad (52)$$

A equação (53), define, dessa forma, λ como sendo:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{dx}{dt} = \lambda a^2 \rightarrow \lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (53)$$

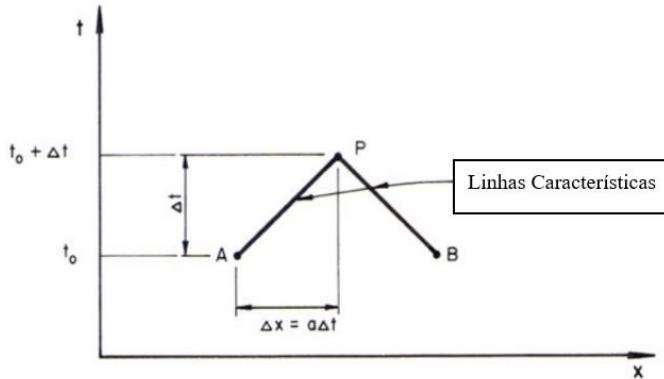
Substituindo as equações (50) e (51) em (52), chega-se nas equações (54) e (55):

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + F Q |Q| = 0 \text{ para } \frac{dx}{dt} = a, \text{ tem-se um conjunto de Equações } C^+ \quad (54)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + F Q |Q| = 0 \text{ para } \frac{dx}{dt} = -a, \text{ tem-se um conjunto de Equações } C^- \quad (55)$$

A figura 13 representa a distribuição cartesiana das variáveis x e t que por sua vez representam cada ponto da seção segundo x para dado instante t .

Figura 13 - Linhas Características no plano (x, t)



Fonte: Chaudhry (2014)

A figura acima representa duas linhas características com declividade a e $-a$, sendo possível obter a cota piezométrica e vazão no ponto P em um dado instante $t_0 + \Delta t$ a partir de A e B em um instante t_0 .

De acordo com Ferreira (2011), como λ assume dois valores, a combinação linear das duas equações diferenciais mostradas acima, resultar em equações diferenciais ordinárias, chamadas de equações de compatibilidade, válidas para pontos presentes nas regiões do interior da tubulação, sendo necessário estabelecer condições de contorno para os pontos extremos. (apud TEIXEIRA, 2021, p.42)

3.1.2 Equações Características

As equações (54) e (55) são integradas de A para P e de B para P, respectivamente, resultado nas equações (56) e (57). Estas, por sua vez, quando resolvidas, resultam nas equações características positiva (58) e na negativa (59):

$$\int_A^P dQ + \frac{gA}{a} \int_A^P dH + F \int_A^P Q |Q| dt = 0 \quad (56)$$

$$\int_B^P dQ - \frac{gA}{a} \int_B^P dH + F \int_B^P Q |Q| dt = 0 \quad (57)$$

$$C^+: Q_P - Q_A + \frac{gA}{a} (H_P - H_A) + F \Delta t Q_A |Q_A| = 0 \quad (58)$$

$$C^-: Q_P - Q_B + \frac{gA}{a} (H_P - H_B) + F \Delta t Q_B |Q_B| = 0 \quad (59)$$

As equações anteriormente desenvolvidas estão em linha com o que o professor Hanif Chaudhry, um dos maiores especialistas do mundo na área da

engenharia hidráulica forneceu em sua literatura. Há disponíveis diversas outras literaturas que desenvolvem equações equivalentes, porém com outras variáveis. É o caso do que Silva (2014) apresenta em sua dissertação. No próximo item, as equações características apresentadas por ele serão integradas, e algumas das equações resultantes fazem parte do conjunto de equações implementadas no programa desenvolvido neste trabalho.

3.2 INTEGRAÇÃO DAS PERDAS DE CARGA

Reapresentando as equações (56), (57), (58) e (59) à luz do trabalho de Silva (2014), tem-se, respectivamente, as equações (60), (61), (62) e (63):

$$C^+: dH + \frac{a}{gS} dQ + \left(\frac{f |Q|Q}{2 D S^2} - \frac{Q}{aS} \operatorname{sen} \theta \right) dx = 0 \quad (60)$$

$$C^-: dH - \frac{a}{gS} dQ + \left(\frac{f |Q|Q}{2 D S^2} - \frac{Q}{aS} \operatorname{sen} \theta \right) dx = 0 \quad (61)$$

$$C^+: H_P - H_A + \frac{a}{gS} (Q_P - Q_A) + \int_{X_A}^{X_P} \left(\frac{f |Q|Q}{2 D S^2} - \frac{Q}{aS} \operatorname{sen} \theta \right) dx = 0 \quad (62)$$

$$C^-: H_P - H_B - \frac{a}{gS} (Q_P - Q_B) + \int_{X_B}^{X_P} \left(\frac{f |Q|Q}{2 D S^2} - \frac{Q}{aS} \operatorname{sen} \theta \right) dx = 0 \quad (63)$$

Onde S é a área da seção. A troca da letra evitará confusão do entendimento das equações futuras.

Sendo as parcelas de integração correspondentes à integração das perdas de carga e da influência da inclinação da tubulação. Para realizar as integrações das equações anteriores, será necessário recorrer a um método numérico aproximado, onde será considerado a função genérica na equação (64):

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \simeq f(x_1 + K \Delta x) \Delta x \quad (64)$$

Onde $\Delta x = x_2 - x_1$ e K o fator de ponderação. Admitindo que a função é um comportamento linear de $f(x)$ no intervalo de integração, a equação (64) é reescrita conforme é apresentada na equação (65):

$$f(x_1 + K \Delta x) = (1 - K) f(x_1) + K f(x_2) \quad (65)$$

Logo, a integral será reescrita, conforme é apresentada na equação (66)

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \simeq [(1 - K) f(x_1) + K f(x_2)] (x_2 - x_1) \quad (66)$$

Aplicando a equação (66) nas equações (62) e (63), chega-se nas equações (67) e (68)

$$C^+: H_P + [A + K (R_P - T_P) |Q_P|] Q_P - C_A = 0 \quad (67)$$

$$C^-: H_P - [A + K (R_P + T_P) |Q_P|] Q_P - C_B = 0 \quad (68)$$

Onde:

$$R = \frac{f}{2gDS^2} \Delta x \quad (69)$$

$$T = \frac{\operatorname{sen} \theta}{aS|Q|} \Delta x \quad (70)$$

$$A = \frac{a}{gS} \quad (71)$$

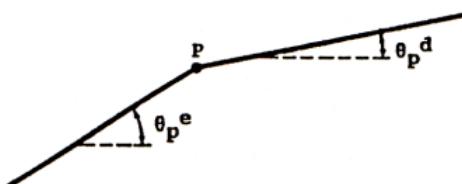
$$C_A = H_A + [A + (1 - K) (R_A - T_A) |Q_A|] Q_A \quad (72)$$

$$C_B = H_B + [A + (1 - K) (R_B - T_B) |Q_B|] Q_B \quad (73)$$

3.3 ALTERAÇÃO DA INCLINAÇÃO DA TUBULAÇÃO

Quando conhecidos os valores da vazão e da cota piezométrica nas seções A e B das equações características (67) e (68), constituirá um sistema de equações cujas incógnitas são QP e HP. A inclinação da tubulação no que se refere a seção P deverá ser considerada. Quando houver a alteração da inclinação da tubulação neste ponto, como mostrada na figura 14, deverão ser considerados os parâmetros T à esquerda e à direita desta seção, conforme as equações (67) e (68).

Figura 14 - Mudança da inclinação da tubulação



Fonte: Silva (2014)

$$T_{pe} = \frac{\operatorname{sen} \theta_{Pe}}{aS|Q|} \Delta x \quad (74)$$

$$T_{pd} = \frac{\operatorname{sen} \theta_{Pd}}{aS|Q|} \Delta x \quad (75)$$

Ao se determinar QP e HP pela soma das equações (67) e (68), considerando as alterações da inclinação da tubulação e resolvendo em a ordem a HP, obtém-se a equação (76):

$$H_P = \frac{k (T_{Pe} + T_{Pd}) |Q_P| Q_P + C_A + C_B}{2} \quad (76)$$

Da subtração das equações características resulta na equação (77), que algebricamente é uma equação semelhante a equação (78), onde a e b não são negativos e que existe apenas uma solução, sendo esta a equação (79):

$$K (2 R_P + T_{Pd} - T_{Pe}) |Q_P| Q_P + 2 A Q_P - C_A + C_B = 0 \quad (77)$$

$$a |x|x + bx + c = 0 \quad (78)$$

$$x = \frac{-2c}{b + \sqrt{b^2 + 4 a |c|}} \quad (79)$$

A equação (77) precisa respeitar duas condições, sendo elas as equações (80) e (81), sendo a primeira sempre verificada, mas a segunda não, o que pela generalidade dos casos, pode-se considerar que $R > T$ e como os parâmetros T à direita e à esquerda se subtraem, o cumprimento desta condição está segura.

$$A \geq 0 \quad (80)$$

$$2 R_P + T_{Pd} - T_{Pe} \geq 0 \quad (81)$$

Resolvendo a equação (77) em relação a vazão, chega-se na equação (82), onde é possível determinar a vazão e a carga hidráulica no ponto P, desde que se conheçam estes valores nas respectivas seções e instantes relacionados pelas linhas características.

$$Q_P = \frac{C_A - C_B}{A_1} \quad (82)$$

Onde A_1 é dada pela equação (83),

$$A_1 = A + \sqrt{A^2 + 2 K \left(R_P + \frac{T_{Pd}}{2} - \frac{T_{Pe}}{2} \right) |C_A - C_B|} \quad (83)$$

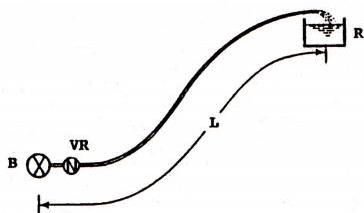
Adota-se o valor de $K = 0,5$, para valorização da perda de carga e da inclinação quando se realiza o processo de integração numérica nos extremos dos intervalos $[x_A, x_P]$ ou $[x_P, x_B]$.

3.4 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

As condições de fronteiras é o que torna possível a integração das equações dos Princípios da Conservação da Massa e do Equilíbrio Dinâmico já apresentadas, e que são equações indefinidas de um regime variável sob pressão. Elas são responsáveis em definir o comportamento nas fronteiras do escoamento, variando de acordo com o elemento instalado.

Considere o sistema de recalque da figura 15 apresentado na dissertação de Silva (2014) constituído por uma bomba B, uma válvula de retenção VR a montante da tubulação com comprimento L e um reservatório R a jusante com cota superior.

Figura 15 - Sistema de Recalque



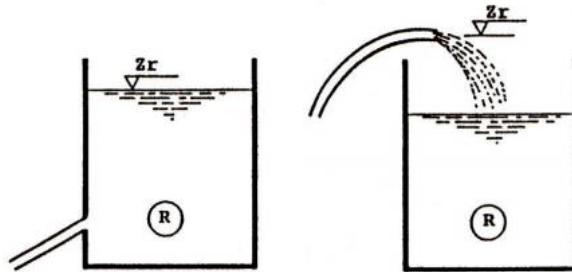
Fonte: Silva (2014)

3.4.1 Condição Fronteira no reservatório

Parte-se do pressuposto que a carga hidráulica do reservatório se mantém constante durante a ocorrência do fenômeno dos Transientes Hidráulicos, o que é coerente para cenários com reservatório de grandes dimensões, com eventos transitórios de curta duração, para tubulações que escoam o fluido para a atmosfera, ou seja, a saída da tubulação está localizada acima do nível da água no reservatório, como para o caso da tubulação escoar o fluido para o interior do reservatório, a nível

inferior ao do nível da água ali contida, como mostrada na figura 16. Isto independe do valor da vazão.

Figura 16 - Fronteira a jusante em carga e em superfície livre, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Silva (2014)

A montante da extremidade da tubulação é expressa pela equação (84), onde a segunda parcela do segundo membro desta equação representa a perda de carga localizada na extremidade da conduta. A determinação da vazão e da carga hidráulica na seção do reservatório se dará substituindo esta equação na equação (67), obtendo, após manipulações algébricas, a equação (85).

$$H_P = Z_R + K_L |Q_P| Q_P \quad (84)$$

$$(K_L + K R_P - K T_{Pe}) Q_P |Q_P| + A Q_P - C_A + Z_R = 0 \quad (85)$$

A equação (85) também é do tipo da equação (78), porém é necessário respeitar a condição da equação (86). A solução é dada pela equação (87).

$$K_L + K R_P + K T_{Pe} \geq 0 \quad (86)$$

$$Q_P = \frac{2(C_A - Z_R)}{A_2} \quad (87)$$

Onde A_2 é dada pela equação (88),

$$A_2 = A + \sqrt{A^2 + 4(K_L + K R_P + K T_{Pe})|Z_R - C_A|} \quad (88)$$

O valor de H_P é obtido pela substituição da vazão na equação (67) ou na equação (84). Se a perda de carga localizada for desprezível, o valor de K_L é zero.

3.4.2 Condição Fronteira na bomba

A curva característica da bomba relaciona a carga hidráulica e a vazão. A bomba é o elemento perturbador do escoamento e o seu escoamento pode ser considerado como passivo ou ativo. Classifica-se como passivo quando as perturbações no escoamento não são devidas à bomba que está em pleno funcionamento, e sim por outras razões, como por exemplo, a manobra de válvulas. Neste caso, a velocidade de rotação da bomba e a relação entre a altura e a vazão de recalque se mantém iguais aos considerados em regime permanente. (SILVA, 2014)

Ainda conforme Silva (2014), classifica-se como ativo quando as perturbações no escoamento são devidas a parada ou arranque da bomba, ou, ainda, pela variação da velocidade de rotação, decorrente de um variador de velocidade intercalado entre a bomba e o motor. O estudo de caso deste trabalho tem interesse no efeito oriundo da parada instantânea da bomba e, por isso, a condição de fronteira está relacionada por duas equações, sendo elas a equação a curva característica da bomba e a equação diferencial que estabelece a relação dinâmica entre a cinemática do movimento de rotação das massas girantes e o momento atuante sobre elas.

3.4.2.1 Lei de Parada da Bomba

Em relação a equação diferencial das massas girantes, se destaca a equação (89), chamada de “Lei de parada da bomba”, que provocará um processo iterativo, podendo ser evitado considerando $K = 0$, resultando na equação (90).

$$N_{i+1} - N_i = - \frac{900 \gamma}{\pi^2 I_0} \left[\frac{Q_b H_b}{N \eta} \right]_{t_i + K \Delta t} (t_{i+1} - t_i) \quad (89)$$

$$N_{i+1} = N_i - \frac{900 \gamma}{\pi^2 I_0} \left[\frac{Q_b H_b}{N \eta} \right]_{t_i} (t_{i+1} - t_i) \quad (90)$$

Onde N é o número de rotações das massas girantes da bomba, γ é o peso específico, I_0 é o momento de inércia das massas girantes da bomba, Q_b é a vazão na bomba, H_b é a carga hidráulica na bomba e η é o rendimento.

O valor de I_0 tem relação com o conjunto das massas girantes e, estão rigidamente ligadas à bomba e à massa líquida que está sendo movida. Tal parâmetro pode ser calculado em função da potência e do regime da bomba, mas recomenda-se utilizar os valores fornecidos pelo fabricante.

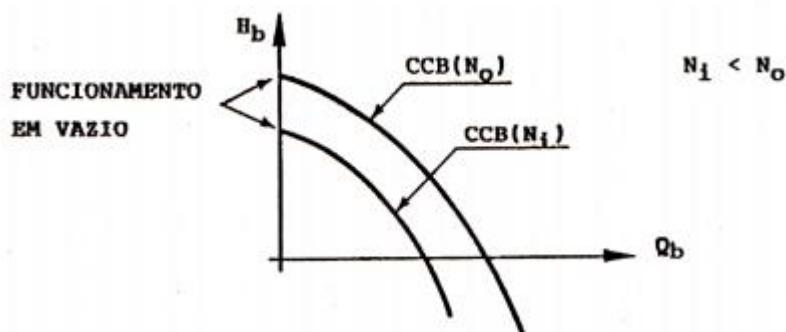
3.4.2.2 Curva Característica da Bomba

Já a curva característica da bomba traz uma relação entre a velocidade de rotação, a carga hidráulica e a vazão para uma determinada bomba. No quadrante de um plano da rotação versus vazão, as leis de comportamento de uma bomba num regime transitório indicam, para a zona normal de bombagem, que $Q_b > 0$, $H_b > 0$ e $N > 0$, e, para a zona normal de turbinagem, que $Q_b > 0$, $H_b < 0$ e $N > 0$.

A equação (91) é a relação entre estas variáveis para as bombas centrífugas, sendo A, B e C os coeficientes que caracterizam a bomba e que podem ser obtidos mediante três pares de valores conhecidos de H_b e Q_b , da curva que corresponde a N num regime permanente, conforme é mostrada na figura 17.

$$H_b = A N^2 + B N Q_b - C Q_b^2 \quad (91)$$

Figura 17 - Curvas Características de bombas.



Fonte: Silva (2014)

Ao se instalar uma válvula de retenção a jusante da bomba, admite-se que Q_b não poderá ser negativo e por isso, as diversas curvas características para diferentes regimes de rotação, cruzam a reta $Q_b = 0$ para valores de H_b superiores ao funcionamento em vazio.

Substituindo a equação (91) na equação (68) e realizando algumas manipulações algébricas, se obtém a equação (92), e simplificando esta equação,

com adoção $K = 0$, chega-se na equação (93). A letra D foi utilizada como substituição da letra A utilizada na equação (71).

$$-C Q_P^2 - K (R_P - T_{Pd}) |Q_P| Q_P + B N Q_P - A Q_P + D N^2 - C_B = 0 \quad (92)$$

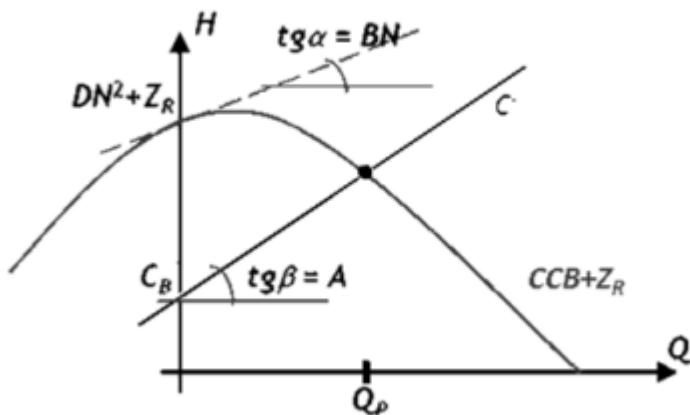
$$-C Q_P^2 + (BN - A) Q_P + D N^2 - C_B = 0 \quad (93)$$

A raiz positiva é expressa pela equação (94), que é válida para $DN^2 \geq C_B$. Este é o caso em que a representação da Curva Característica da Bomba será semelhante à figura 18 em que as raízes encontradas na equação (93), quando é adotado $K = 0$ na equação (68) serão os pontos de interseção da parábola com a reta, expressa na fórmula (95). Ao se calcular a Q_P poderá ser utilizada a equação da reta de interseção com a Curva Característica da Bomba para se obter o valor de H_P .

$$Q_P = \frac{BN - A}{2C} + \frac{1}{2C} \sqrt{(BN - A)^2 + 4C(DN^2 - C_B)} \quad (94)$$

$$H_P = A Q_P + C_B \quad (95)$$

Figura 18 - Interseção da curva característica da bomba com a reta no primeiro quadrante.



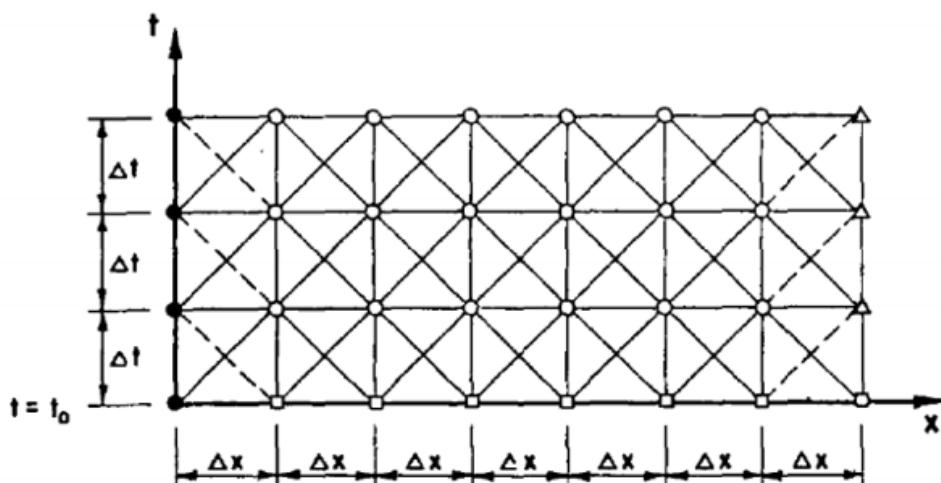
Fonte: Silva (2014)

3.5 APRESENTAÇÃO QUALITATIVA DA SEQUÊNCIA DE CÁLCULO

O procedimento de cálculo tem início pela definição da malha dos pontos determinados no plano dependente de (x, t) , definindo assim os intervalos de tempo t e o espaçamento entre cada seção de cálculo x . A determinação da cota piezométrica e vazão dependerá diretamente dos valores dessas variáveis em um passo de tempo anterior. No instante inicial será considerada a condição do regime permanente que

antecede a ocorrência do fenômeno dos Transientes Hidráulicos, logo, a vazão é constante em todas as seções, porém a cota piezométrica deverá ser calculada para cada seção, já que serão consideradas perdas de carga associadas a cada trecho. A figura 19 ilustra a referida malha.

Figura 19 - Malha de nós do Método das Características



Fonte: Silva (2014)

A fase posterior é a determinação da vazão e cota piezométrica para cada seção pertencente aos pontos interiores a malha e para cada incremento de t . Isto só é possível porque são conhecidas as variáveis nas seções imediatamente a montante e a jusante no instante anterior ao da seção em estudo. Já nas fronteiras da extremidade da tubulação, as equações características serão substituídas pelas equações que adequadas para as condições de montante ou jusante.

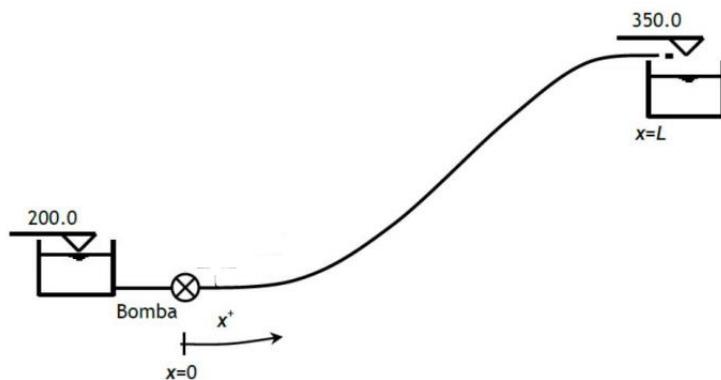
4 METODOLOGIA

Após desenvolvimento das equações matemáticas que fazem parte do Método das Características (MOC), método este não apenas neste trabalho, mas também utilizado nos programas de Silva (2014), Medeiros (2021) e no software ALLIEVI, serão apresentados a seguir o estudo de caso, o processo iterativo que determina os valores da Solução Base, que é um conjunto de parâmetros, como vazão e cota piezométrica, na primeira condição de contorno que o conjunto elevatório, e por fim, a determinação da cota piezométrica na tubulação do sistema de recalque.

4.1 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O estudo de caso hipotético está representado na figura 20 e se trata de um sistema de adução de água por recalque constituído por dois reservatórios, sendo um a montante, localizado na cota topográfica de 200 metros, e o outro, a jusante, na cota de 350 metros, interligados por uma tubulação.

Figura 20 - Sistema elevatório para análise



Fonte: Adaptado de Silva (2014)

Tanto o estudo de caso quanto os dados de entrada apresentados abaixo estão presentes na dissertação de Silva (2014).

a) Dados relacionados à tubulação:

- Diâmetro Nominal da Conduta é 0,25 m,
- Comprimento da conduta é 2000 m,
- Espessura da parede da tubulação é 6,75 mm,

- Rugosidade equivalente é 0,15 mm,
 - Módulo de elasticidade da tubulação em Ferro Fundido Dúctil é 95 GPa,
 - Módulo de elasticidade volumétrica da água é 2,03 GPa,
 - Viscosidade cinemática da água é $1,31 \times 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$,
 - A tubulação foi dividida em 40 trechos,
 - Pontos característicos do perfil segundo (x, y) em metros: (0, 200), (500, 275), (1000, 310), (1500, 275) e (2000, 350),
 - Perdas de cargas localizadas foram desprezadas.
- b) Dados relacionados ao grupo elevatório:
- Duas bombas associadas em paralelo,
 - Modelo da bomba: Multitec 65 5.1/4,
 - Inércia de cada bomba é definida pelo parâmetro $PD^2 = 18 \text{ N.m}^2$,
 - Os parâmetros que definem a curva característica e da curva de rendimento foram previamente obtidos de acordo com os catálogos fornecidos pelo fabricante.

4.2 DADOS DE ENTRADA

Os dados de entrada podem ser divididos em 4 grupos, a saber:

- a) Grupo 01 - Perfil da Tubulação e do Líquido: fazem parte deste grupo o diâmetro interno, a rugosidade, o módulo de elasticidade de Young do líquido e da tubulação, a viscosidade cinemática da água, a massa específica da água e a espessura da parede da tubulação e os pontos característicos do perfil. O comprimento da tubulação e a área da seção são calculados por fórmulas inseridas no programa.
- b) Grupo 02 - Reservatório: fazem parte deste grupo as cotas geométricas do reservatório a montante e a jusante, perdas de carga localizada e coeficiente de perda de carga no reservatório dos reservatórios.
- c) Grupo 03 - Grupo Elevatório: fazem parte deste grupo a rotação da bomba, os coeficientes A, B, C e D da Curva Característica da Bomba, os coeficientes aa, bb, cc e dd da curva de rendimento, a entidade PD^2 e o momento das massas girantes da bomba. Altura Manométrica e rendimento são calculados por fórmulas inseridas no programa.

A equação (96) determina o valor da altura manométrica, onde “Zjus” e “Zmont” representam respectivamente a cota geométrica do reservatório de jusante e montante, e a equação (97) da fórmula universal da perda de carga de Darcy-Weisbach. Adotou-se o valor de 1,1 para o Fator de Majoração (Fmaj) para o cálculo do comprimento equivalente “L(T)”, tendo o valor do comprimento real “L(G)”, dada pela equação (98).

$$H_{man} = (Z_{jus} - Z_{mont}) + \Delta h + \frac{V^2}{2g} \quad (96)$$

$$\Delta h = \frac{8fL(T)}{\pi^2 g D^5} Q^2 \quad (97)$$

$$L(T) = L(G) F_{maj} \quad (98)$$

Realizando manipulações algébricas com as equações (96), (97) e (98), chega-se a equação (99):

$$H_{man} = (Z_{jus} - Z_{mont}) + \frac{8fL F_{maj}}{\pi^2 g D^5} Q^2 + \frac{V^2}{2g} \quad (99)$$

- d) Grupo 04 - Método das Características (MOC): fazem parte deste grupo o número de trechos, o tempo de simulação, o fator de majoração para a perda de carga e o coeficiente de ponderação. A celeridade, a fase, a distância entre os trechos, intervalo de tempo para iterações até o tempo de parada da bomba, perda de carga unitária e o coeficiente A são calculados por fórmulas inseridas no programa. A vazão e o fator de resistência iniciais também fazem parte deste grupo, porém foram calculadas via Solver que é um suplemento do Microsoft Excel, utilizado para teste de hipóteses, de forma que seja possível encontrar um valor ideal para uma fórmula conforme restrições, ou limites, sobre valores já conhecidos.

Por fim, adotou-se o valor de 9,806650004 m/s² para a gravidade.

A figura 21 apresenta a interface do programa desenvolvido neste trabalho na tela de dados de entrada.

Figura 21 – Interface do programa – Parte da seção Dados de Entrada

Cota geométrica do reservatório de montante (m)	200	Zmont	Celeridade (m/s^2)	1064,51	a
Cota geométrica do reservatório de jusante (m)	350	Zjus	Fase (s)	3,78	μ
Diâmetro do tubo (m)	0,25	D	Comprimento das seções da tubulação (m)	50,3408605	Δx
Aceleração da gravidade (m/s^2)	9,80665	g	Passo de tempo (s)	0,047290172	Δt
Espessura da parede (mm)	6,75	e	Tempo de simulação (s)	60	Tsimu
Módulo Elasticidade da tubulação (GPa)	95	E	Área da seção da tubulação (m^2)	0,049087385	A, S

Fonte: O autor (2022)

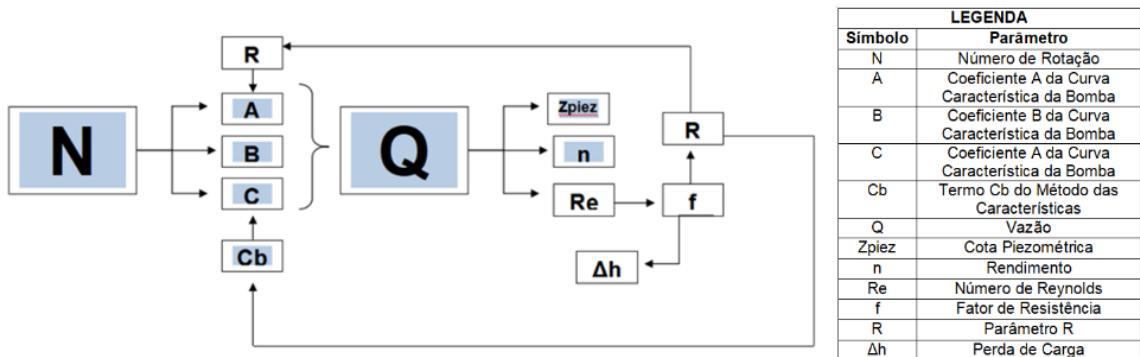
4.3 SOLUÇÃO BASE

Para que seja possível determinar os valores de pressão máxima e mínima em todo o perfil da tubulação após uma parada do grupo elevatório, é necessário obter os valores para cada intervalo de tempo dos seguintes parâmetros: rotação e rendimento da bomba, coeficientes da curva característica da bomba, vazão, cota piezométrica e coeficiente CB da equação do Método das Características (MOC). O conjunto desses parâmetros, será denominado de “Solução Base” e será determinado via processo iterativo que irá ocorrer em todos os intervalos de tempo Δt até o instante de paragem da bomba, logo o instante em que não haverá mais bombeamento da água (vazão = 0).

O tempo $t = 0$ segundos a bomba está em pleno funcionamento, portanto, o regime é permanente e uniforme. A partir do instante $t = \Delta t$ ocorrerá a perturbação no escoamento. A primeira iteração é chamada de arranque. Nesta iteração, no tempo Δt_{i+1} a solução base será calculada a partir da solução apresentada no tempo Δt_i .

O que determina o fim do processo iterativo no tempo Δt_i é a convergência do valor da rotação da bomba (N) ao se comparar o seu valor na iteração i e i+1. A figura 22 apresenta um fluxograma de dependência dos parâmetros que formam a Solução Base entre si, a partir da análise qualitativa das fórmulas já apresentadas anteriormente, e evidencia que a rotação é o parâmetro que governa.

Figura 22 - Fluxograma de dependência das variáveis que formam a solução base



Fonte: O autor (2022)

A figura 23 apresenta a solução base para o caso em que o regime é de transição, onde o fator de resistência foi calculado pela fórmula de Colebrook-White, sem a consideração das parcelas de energia cinética e de declividade longitudinal da tubulação. A figura 24 o valor dos parâmetros no “arranque” e, por fim, a figura 25, apresenta os valores dos parâmetros na 2^a iteração e o número de iterações realizadas para que o valor da rotação tenha convergido na iteração i e i+1.

Figura 23 – Interface do programa - Solução Base

				BASE				
t (s)	N (rpm)	h (%)	a	b	c	Q (m ³ /s)	HR0 (m)	Cb
0,00000	2900,0000	0,7401				0,038889	355,6510	
0,04729	2665,6879	0,7550	-55947,29	-1280,98	100,11	0,032374	341,2220	269,58246
0,09458	2472,9428	0,7334	-55948,27	-1348,25	76,45	0,026831	328,9513	269,58246
0,14187	2309,2701	0,6856	-55949,44	-1405,38	57,81	0,021950	318,1038	269,54032
0,18916	2168,0416	0,6176	-55950,92	-1454,67	42,73	0,017542	308,3180	269,51085
0,23645	2045,4885	0,5336	-55952,90	-1497,44	30,47	0,013518	299,3501	269,44702
0,28374	1939,5721	0,4364	-55955,75	-1534,41	20,43	0,009809	291,0970	269,40136
0,33103	1849,6821	0,3307	-55960,30	-1565,78	12,38	0,006427	283,5413	269,32566
0,37832	1777,0501	0,2232	-55968,98	-1591,13	6,14	0,003442	276,8833	269,27148
0,42561	1702,1780	0,0820	-55899,98	-1617,26	0,00	0,000000	269,1902	269,19015

Fonte: O autor (2022)

Figura 24 – Interface do programa - Valores dos parâmetros da solução base no “arranque”

				Iteração 1				
t (s)	N (rpm)	h (%)	a	b	c	Qb (m³/s)	HR0b (m)	Cb
0,00000	2900,00000	0,7401				0,03888932	355,6510	269,58246
0,04729	2665,68790	0,7550	-55947,29	-1280,98	100,11	0,032374	341,2220	269,58246
0,09458	2472,94282	0,7334	-55948,27	-1348,25	76,45	0,026831	328,9513	269,58246
0,14187	2309,27012	0,6856	-55949,44	-1405,38	57,81	0,021950164	318,1038	269,54032
0,18916	2168,04164	0,6176	-55950,92	-1454,67	42,73	0,017541912	308,3180	269,51085
0,23645	2045,48844	0,5336	-55952,90	-1497,44	30,47	0,013518133	299,3501	269,44702
0,28374	1939,57207	0,4364	-55955,75	-1534,41	20,43	0,009808575	291,0970	269,40136
0,33103	1849,68207	0,3307	-55960,30	-1565,78	12,38	0,00642733	283,5413	269,32566
0,37832	1777,05009	0,2232	-55968,98	-1591,13	6,14	0,003441788	276,8833	269,27148
0,42561	1702,17802	8,2048	-55925,06	-1617,26	0,00	0	275,4108	269,19015

Fonte: O autor (2022)

Figura 25 - Interface do programa - Valores dos parâmetros da solução base na 2ª iteração

				Iteração 2				
t (s)	N (rpm)	h (%)	a	b	c	Qb (m³/s)	HR0b (m)	Cb
0,00000	2900,00000	0,7401				0,03889	355,6510	269,58246
0,04729	2665,68791	0,7550	-55947,29	-1280,98	100,11	0,03237	341,2220	269,58246
0,09458	2472,94281	0,7334	-55948,27	-1348,25	76,45	0,02683	328,9513	269,58246
0,14187	2309,27013	0,6856	-55949,44	-1405,38	57,81	0,02195	318,1038	269,54032
0,18916	2168,04163	0,6176	-55950,92	-1454,67	42,73	0,01754	308,3180	269,51085
0,23645	2045,48845	0,5336	-55952,90	-1497,44	30,47	0,01352	299,3501	269,44702
0,28374	1939,57206	0,4364	-55955,75	-1534,41	20,43	0,00981	291,0970	269,40136
0,33103	1849,68208	0,3307	-55960,30	-1565,78	12,38	0,00643	283,5413	269,32566
0,37832	1777,05008	0,2232	-55968,98	-1591,13	6,14	0,00344	276,8833	269,27148
0,42561	1702,17803	0,0820	-55899,98	-1617,26	0,00	0,00000	269,1902	

Fonte: O autor (2022)

4.4 CÁLCULO DAS COTAS PIEZOMÉTRICAS

Com a solução base calculada, as cotas piezométricas mínimas e máximas em todos os 41 pontos da tubulação podem ser calculadas. O Método das Características (MOC) calcula a cota piezométrica numa seção em um dado instante $n+1$, a partir dos valores de cota piezométrica e vazão nos pontos i , $i-1$ e $i+1$, no instante anterior, n .

Nas figuras 26, 27 e 28 são apresentadas a interface do programa desenvolvido neste trabalho nos pontos 1, 21 e 41 da tubulação do sistema de recalque, apontando os valores das cotas piezométricas nos cinco primeiros tempos de simulação, também para o caso em que o regime é de transição, onde o fator de resistência foi calculado

pela fórmula de Colebrook-White, sem a consideração das parcelas de energia cinética e de declividade longitudinal da tubulação.

Figura 26 - Interface do programa – Cotas Piezométricas no ponto 1

Nós		1		
Coord.	L =	0	m	
t (s)	Ca	Q (m ³ /s)	Zpiez(m)	Cb
0,00000	0	0,038899	355,6188	0
0,04729	0,0000	0,032384	341,1912	269,5290
0,09458	0,0000	0,026843	328,9223	269,5290
0,14187	0,0000	0,021962	318,0771	269,4869
0,18916	0,0000	0,017555	308,2936	269,4575
0,23645	0,0000	0,013532	299,3283	269,3938

Fonte: O autor (2022)

Figura 27 - Interface do programa – Cotas Piezométricas no ponto 21

Nós		21						
Coord.		1006,817	m					
t (s)	Ca	Q (m ³ /s)	Zpiez(m)	Cb	A1	I	Δh(m/m)	
0,00000	0	0,038899	352,8094	0		0,019807	0,14047	
0,04729	438,8992	0,038899	352,8094	266,7196	4426,328	0,019807	0,14047	
0,09458	438,8992	0,038899	352,8094	266,7196	4426,328	0,019807	0,14047	
0,14187	438,8992	0,038899	352,8094	266,7196	4426,328	0,019807	0,14047	
0,18916	438,8992	0,038899	352,8094	266,7196	4426,328	0,019807	0,14047	
0,23645	438,8992	0,038899	352,8094	266,7196	4426,328	0,019807	0,14047	

Fonte: O autor (2022)

Figura 28 - Interface do programa – Cotas Piezométricas no ponto 41

Nós		41				
Coord.		2013,634	m			
t (s)	Ca	Q (m ³ /s)	Zpiez(m)	A2	t (s)	
0,00000	0	0,038899	350	0	0	
0,04729	436,0898	0,038899	350	4426,328	0,04729	
0,09458	436,0898	0,038899	350	4426,328	0,09458	
0,14187	436,0898	0,038899	350	4426,328	0,141871	
0,18916	436,0898	0,038899	350	4426,328	0,189161	
0,23645	436,0898	0,038899	350	4426,328	0,236451	

Fonte: O autor (2022)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas simulações realizadas pelo programa desenvolvido neste trabalho, assim como nos trabalhos de Silva (2014) e Medeiros (2021), houve regime transitório, pois, o regime de escoamento foi alterado quando as bombas pararam de maneira inesperada, provocada pela falta da energia elétrica.

5.1 PROGRAMA DESENVOLVIDO POR SILVA (2014)

O programa desenvolvido por Silva (2014), chamado de CH-FEUP, em Visual Basic for Applications (VBA) para modelagem numérica do Transiente Hidráulico aplicava o Método das Características (MOC) e tinha como objetivo a simulação do comportamento das tubulações de adução por gravidade e por recalque durante a ocorrência do transitórios hidráulicos, no qual era possível definir o escoamento (rugoso, liso ou em transição) e simular a implementação do Reservatório Hidropneumático (RAC) como dispositivo de proteção para atenuações das pressões geradas pelo fenômeno.

Silva (2014) avaliou os resultados obtidos pelo CH-FEUP comparando com uma aplicação desenvolvida em MATLAB pelo Professor Doutor Pacheco Figueiredo em 2008, no qual apresenta robustez nos resultados e reconhecimento no segmento de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Diferentemente do programa desenvolvido por Silva (2014), o programa de Figueiredo simulava apenas sistemas elevatórios considerando o escoamento turbulento liso ou em transição.

5.2 PROGRAMA DESENVOLVIDO POR MEDEIROS (2021)

O programa desenvolvido por Medeiros (2021), também em Visual Basic for Applications (VBA), para modelagem numérica do Transiente Hidráulico aplicava o Método das Características (MOC) e tinha como objetivo a simulação do comportamento das tubulações classificadas como hidraulicamente rugoso, ou seja, a rugosidade interna da tubulação caracteriza o escoamento em regime turbulento rugoso, em um sistema de adução por recalque durante a ocorrência do transitórios hidráulicos.

Medeiros (2021) avaliou os resultados obtidos pelo programa desenvolvido comparando com os resultados obtidos por Silva (2014) e com o software ALLIEVI amplamente utilizado no mercado para a resolução de transientes hidráulicos

5.3 COMPARAÇÃO QUALITATIVA DAS METODOLOGIAS PRESENTES NOS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS PELO AUTOR (2022), POR MEDEIROS (2021) E POR SILVA (2014)

Como já se sabe, o estudo de caso e seus dados principais apresentados na seção 4.1 foram extraídos da dissertação de Silva (2014), utilizados por Medeiros (2021) e agora neste trabalho. Todos utilizaram as formulações do Método das Características (MOC) e o Visual Basic for Applications (VBA) como linguagem de programação para implementação das rotinas de cálculo. No entanto há variações nas metodologias, apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Comparação dos programas desenvolvidos

Pontos analisados	Autores		
	Silva (2014)	Medeiros (2021)	Autor (2022)
Vazão para o regime permanente	Considerada a relacionada ao ponto de funcionamento da bomba		
Altura Manométrica para o regime permanente	Considerada a relacionada ao ponto de funcionamento da bomba	Calculada somando a altura geométrica e a perda de carga distribuída	São determinados via Solver, conforme descrito no item 4.2
Fator de resistência para o regime permanente	Inserido pelo usuário como dado de entrada.		
Fator de resistência durante o regime transitório	Quando o regime é classificado como liso e/ou em transição, o programa calcula pela fórmula de Colebrook-White um novo fator a partir das variações da vazão.	Utiliza apenas fórmula de Nikuradse.	Utiliza as formulações correspondentes ao regime de escoamento
Solução Base	Processo iterativo com no máximo 20 iterações		Processo iterativo sem restrições de iterações.

Fonte: O autor (2022)

Ao se calcular o fator de resistência em função do mesmo valor da vazão para todos os regimes, percebeu-se que no escoamento permanente e uniforme a cota piezométrica no reservatório de jusante apresentava um valor diferente da cota do nível de água, logo concluiu-se que a vazão não é a mesma em todos os regimes.

Na Tabela 1 estão apresentados os valores, obtidos via Solver, da vazão e do fator de resistência, calculados adotando os dados apresentados no item 4.1 Apresentação do Problema. A altura manométrica foi calculada pela equação (99) após a determinação da vazão e do fator de resistência.

Tabela 1 - Determinação da Vazão (Q), do Fator de Resistência (f) e da Altura Manométrica (Hman) para o Regime Permanente via Solver

Zonas de Escoamento	Cálculo do “f” via	Sem Energia Cinética			Com Energia Cinética		
		Q (m ³ /s)	f	Hman (m)	Q (m ³ /s)	f	Hman (m)
Liso	Equação 03	0,03955	0,01171	153,4331	0,03954	0,01171	153,4647
Rugoso	Equação 04	0,03909	0,01740	154,9852	0,03908	0,01740	155,0153
Transição	Equação 04	0,03890	0,01981	155,6188	0,03889	0,01981	155,6484
	Equação 06	0,03889	0,01993	155,6510	0,03888	0,01993	155,6805
	Equação 07	0,03889	0,01995	155,6548	0,03888	0,01995	155,6844

Fonte: O autor (2022)

5.4 COMPARAÇÃO DAS PIEZOMÉTRICAS APRESENTADAS NO TRABALHO DE SILVA (2014): REGIME EM TRANSIÇÃO

Silva (2014) disponibiliza em forma de tabela os resultados para as cotas piezométricas mínimas e máximas obtidos pelo programa em MATLAB do professor Figueiredo. Dado que Silva (2014) compara os resultados das cotas piezométricas de seu programa com o do MATLAB, neste trabalho, será considerado que o regime é o de transição, no qual o fator de resistência é calculado pela fórmula de Colebrook-White, a energia cinética foi desprezada e a inclinação foi considerada.

Primeiramente os resultados do programa desenvolvido neste trabalho serão comparados com o programa em MATLAB, conforme Tabela 2 e em seguida com o programa desenvolvido por Silva (2014), conforme Tabela 3.

Tabela 2 - Comparação das Cotas Piezométricas determinadas pelo programa em MATLAB com as cotas obtidas no programa desenvolvido neste trabalho

Ponto	Cota Piezométrica Máxima		Diferença Percentual	Cota Piezométrica Mínima		Diferença Percentual
	MATLAB – Silva (2014)	Autor (2022)		MATLAB – Silva (2014)	Autor (2022)	
1	430,8558	430,8327	0,00%	264,2795	264,2437	0,00%
2	430,7873	430,8327	0,01%	264,3488	264,2437	0,04%
3	430,7187	430,7635	0,01%	264,4181	264,3138	0,04%
4	430,6501	430,6942	0,01%	264,4874	264,3839	0,04%
5	430,5816	430,6249	0,01%	264,5568	264,4539	0,04%
6	430,5130	430,5556	0,01%	264,6261	264,5240	0,04%
7	430,4444	430,4864	0,01%	264,6954	264,5940	0,04%
8	430,3758	430,4172	0,01%	264,7647	264,6640	0,04%
9	430,3073	430,3481	0,01%	264,8340	264,7339	0,04%
10	430,2387	430,2791	0,01%	264,9033	264,8038	0,04%
11	430,1701	430,2101	0,01%	264,9726	264,8737	0,04%
12	430,1016	430,1410	0,01%	265,0419	264,9436	0,04%
13	430,0330	430,0719	0,01%	265,1112	265,0135	0,04%
14	429,9645	430,0027	0,01%	265,1804	265,0835	0,04%
15	429,8959	429,9336	0,01%	265,2497	265,1535	0,04%
16	429,8274	429,8644	0,01%	265,3190	265,2235	0,04%
17	429,7589	429,7952	0,01%	265,3882	265,2935	0,04%
18	429,6904	429,7259	0,01%	265,4574	265,3634	0,04%
19	429,6219	429,6567	0,01%	265,5267	265,4334	0,04%
20	429,5534	429,5875	0,01%	265,5959	265,5033	0,03%
21	429,4849	429,5183	0,01%	265,6651	265,5732	0,03%
22	429,4164	429,4492	0,01%	265,7343	265,6430	0,03%
23	429,3479	429,3800	0,01%	265,8035	265,7127	0,03%
24	429,2794	429,3108	0,01%	265,8728	265,7825	0,03%
25	429,2109	429,2415	0,01%	265,9420	265,8523	0,03%
26	429,1424	429,1720	0,01%	266,0112	265,9225	0,03%
27	429,0740	429,1024	0,01%	266,0804	265,9927	0,03%
28	429,0055	429,0327	0,01%	266,1495	266,0629	0,03%
29	428,9371	428,9630	0,01%	266,2187	266,1331	0,03%
30	428,8686	428,8929	0,01%	266,2879	266,2033	0,03%
31	428,8002	428,8210	0,00%	266,3571	266,2733	0,03%
32	428,7318	428,7414	0,00%	266,4262	266,3432	0,03%
33	428,6634	428,6309	0,01%	266,4954	266,4131	0,03%
34	428,5956	428,3966	0,05%	266,5639	266,4829	0,03%
35	428,2247	427,6670	0,13%	266,9543	266,5524	0,15%
36	423,9729	424,9575	0,23%	271,4669	266,6205	1,82%
37	415,5617	415,1085	0,11%	280,3956	274,3046	2,22%

Tabela 2 - Comparação das Cotas Piezométricas determinadas pelo programa em MATLAB com as cotas obtidas no programa desenvolvido neste trabalho

conclusão

Ponto	Cota Piezométrica Máxima		Diferença Percentual	Cota Piezométrica Mínima		Diferença Percentual
	MATLAB – Silva (2014)	Autor (2022)		MATLAB – Silva (2014)	Autor (2022)	
38	404,6731	401,2086	0,86%	291,9468	288,2702	1,28%
39	391,0383	385,5492	1,42%	306,4030	305,0161	0,45%
40	373,4950	368,2716	1,42%	324,9996	324,8274	0,05%
41	350,0000	350,0000	0,00%	350,0000	350,0000	0,00%
Maior Diferença Percentual		2,26%	Maior Diferença Percentual		2,22%	

Fonte: O autor (2022)

Para as cotas piezométricas máximas, foi observado que dos 41 pontos, em 39 pontos (do 1 ao 38 e 41) a variação percentual foi menor que 0,9%, indicando assim uma excelente convergência com o programa desenvolvido em MATLAB. Nos outros 2 pontos (39 e 40) a diferença percentual foi maior que 1,4% e menor que 1,5%.

Já para as cotas piezométricas mínimas, foi observado que dos 41 pontos, em 38 pontos (do 1 ao 35 e do 39 ao 41) a variação percentual foi menor que 0,5%, indicando assim uma excelente convergência com o programa desenvolvido em MATLAB. Em apenas 2 pontos (36 e 38) a diferença percentual foi maior que 1,2% e menor que a 1,9%, e em um único ponto (37) a diferença percentual foi maior que 2,2% e menor que 2,3%.

Tabela 3 - Comparação das Cotas Piezométricas determinadas pelo programa desenvolvido por Silva (2014) com as obtidas neste trabalho

Ponto	Cota Piezométrica Máxima		Diferença Percentual	Cota Piezométrica Mínima		Diferença Percentual
	CH - FEUP – Silva (2014)	Autor (2022)		CH - FEUP – Silva (2014)	Autor (2022)	
1	430,7302	430,8327	0,02%	264,3275	264,2437	0,03%
2	430,6598	430,8327	0,04%	264,3988	264,2437	0,06%
3	430,5893	430,7635	0,04%	264,4701	264,3138	0,06%
4	430,5188	430,6942	0,04%	264,5416	264,3839	0,06%
5	430,4482	430,6249	0,04%	264,6131	264,4539	0,06%
6	430,3775	430,5556	0,04%	264,6847	264,5240	0,06%
7	430,3067	430,4864	0,04%	264,7563	264,5940	0,06%
8	430,2359	430,4172	0,04%	264,8281	264,6640	0,06%
9	430,1649	430,3481	0,04%	264,8999	264,7339	0,06%
10	430,0939	430,2791	0,04%	264,9718	264,8038	0,06%

Tabela 3 - Comparação das Cotas Piezométricas determinadas pelo programa desenvolvido por Silva (2014) com as obtidas neste trabalho.

conclusão

Ponto	Cota Piezométrica Máxima		Diferença Percentual	Cota Piezométrica Mínima		Diferença Percentual
	CH - FEUP – Silva (2014)	Autor (2022)		CH - FEUP – Silva (2014)	Autor (2022)	
11	430,0229	430,2101	0,04%	265,0438	264,8737	0,06%
12	429,9517	430,1410	0,04%	265,1158	264,9436	0,07%
13	429,8805	430,0719	0,04%	265,1880	265,0135	0,07%
14	429,8091	430,0027	0,05%	265,2602	265,0835	0,07%
15	429,7377	429,9336	0,05%	265,3326	265,1535	0,07%
16	429,6682	429,8644	0,05%	265,4029	265,2235	0,07%
17	429,5991	429,7952	0,05%	265,4727	265,2935	0,07%
18	429,5300	429,7259	0,05%	265,5426	265,3634	0,07%
19	429,4609	429,6567	0,05%	265,6124	265,4334	0,07%
20	429,3919	429,5875	0,05%	265,6823	265,5033	0,07%
21	429,3228	429,5183	0,05%	265,7521	265,5732	0,07%
22	429,2537	429,4492	0,05%	265,8220	265,6430	0,07%
23	429,1847	429,3800	0,05%	265,8918	265,7127	0,07%
24	429,1156	429,3108	0,05%	265,9616	265,7825	0,07%
25	429,0466	429,2415	0,05%	266,0315	265,8523	0,07%
26	428,9775	429,1720	0,05%	266,1013	265,9225	0,07%
27	428,9085	429,1024	0,05%	266,1711	265,9927	0,07%
28	428,8395	429,0327	0,05%	266,2409	266,0629	0,07%
29	428,7704	428,9630	0,04%	266,3107	266,1331	0,07%
30	428,7014	428,8929	0,04%	266,3805	266,2033	0,07%
31	428,6324	428,8210	0,04%	266,4503	266,2733	0,07%
32	428,5634	428,7414	0,04%	266,5201	266,3432	0,07%
33	428,4944	428,6309	0,03%	266,5899	266,4131	0,07%
34	428,4111	428,3966	0,00%	266,6750	266,4829	0,07%
35	426,6692	427,6670	0,23%	268,5257	266,5524	0,74%
36	419,9471	424,9575	1,19%	275,6764	266,6205	3,40%
37	410,2811	415,1085	1,18%	285,9493	274,3046	4,25%
38	398,1760	401,2086	0,76%	298,7950	288,2702	3,65%
39	382,8454	385,5492	0,71%	315,0439	305,0161	3,29%
40	362,6574	368,2716	1,55%	336,4691	324,8274	3,58%
41	350,0000	350,0000	0,00%	350,0000	350,0000	0,00%
	Maior Diferença Percentual		3,58%	Maior Diferença Percentual		4,25%

Fonte: O autor (2022)

Para as cotas piezométricas máximas, foi observado que dos 41 pontos, em 38 pontos (do 1 ao 35, 38, 39 e 41) a variação percentual foi menor que 0,8%, indicando assim uma excelente convergência com o programa desenvolvido por Silva (2014). Nos outros 3 pontos (36, 37 e 40) a diferença percentual foi maior que 1,1% e menor que 1,6%.

Já para as cotas piezométricas mínimas, foi observado que dos 41 pontos, em 36 pontos (do 1 ao 35 e 41) a variação percentual foi menor que 0,8%, indicando assim uma excelente convergência com o programa desenvolvido por Silva (2014). Em 5 pontos (36 ao 40) a diferença percentual foi maior que 3,2% e menor que 4,3%.

As diferenças percentuais ponto-a-ponto apresentadas nas tabelas 2 e 3 estão coerentes, pois ao comparar os resultados do programa em MATLAB com o desenvolvido por Silva (2014) conforme tabela 4, para as cotas piezométricas máximas, observou-se que dos 41 pontos, 37 pontos (do 1 ao 36 e 41) a variação percentual foi menor que 1%, indicando assim uma excelente convergência entre esses programas. Em apenas 2 pontos (37 e 38) a diferença percentual foi maior que 1,2% e menor que 1,7%, e, por fim, 2 pontos (39 e 40) a diferença percentual foi maior que 2% e menor que 3%.

Já para as cotas piezométricas mínimas, observou-se que dos 41 pontos, 36 pontos (do 1 ao 35 e 41) a variação percentual foi menor que 0,6%, indicando assim uma excelente convergência entre esses programas. Em apenas 2 pontos (36 e 37) a diferença percentual foi maior que 1,5% e menor que 2%, e, por fim, 3 pontos (38 ao 40) a diferença percentual foi maior que 2,3% e menor que 3,6%.

Tabela 4 - Comparação das Cotas Piezométricas determinadas pelo programa em MATLAB com as cotas obtidas no programa desenvolvido por Silva (2014)

Ponto	Cota Piezométrica Máxima		Diferença Percentual	Cota Piezométrica Mínima		Diferença Percentual
	MATLAB – Silva (2014)	CH - FEUP – Silva (2014)		MATLAB – Silva (2014)	CH - FEUP – Silva (2014)	
1	430,8558	430,7302	0,03%	264,2795	264,3275	0,02%
2	430,7873	430,6598	0,03%	264,3488	264,3988	0,02%
3	430,7187	430,5893	0,03%	264,4181	264,4701	0,02%
4	430,6501	430,5188	0,03%	264,4874	264,5416	0,02%
5	430,5816	430,4482	0,03%	264,5568	264,6131	0,02%
6	430,5130	430,3775	0,03%	264,6261	264,6847	0,02%
7	430,4444	430,3067	0,03%	264,6954	264,7563	0,02%
8	430,3758	430,2359	0,03%	264,7647	264,8281	0,02%

Tabela 4 - Comparação das Cotas Piezométricas determinadas pelo programa em MATLAB com as cotas obtidas no programa desenvolvido por Silva (2014). conclusão

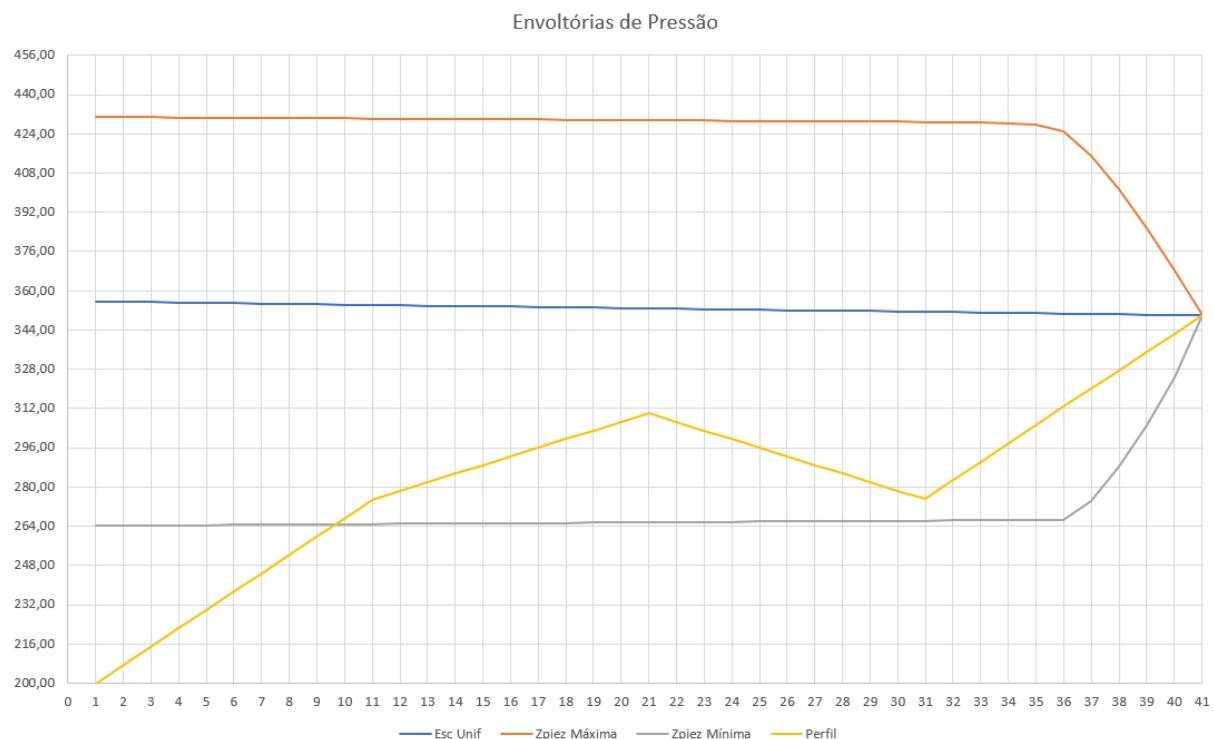
Ponto	Cota Piezométrica Máxima		Diferença Percentual	Cota Piezométrica Mínima		Diferença Percentual
	MATLAB – Silva (2014)	CH - FEUP – Silva (2014)		MATLAB – Silva (2014)	CH - FEUP – Silva (2014)	
9	430,3073	430,1649	0,03%	264,8340	264,8999	0,02%
10	430,2387	430,0939	0,03%	264,9033	264,9718	0,03%
11	430,1701	430,0229	0,03%	264,9726	265,0438	0,03%
12	430,1016	429,9517	0,03%	265,0419	265,1158	0,03%
13	430,0330	429,8805	0,04%	265,1112	265,1880	0,03%
14	429,9645	429,8091	0,04%	265,1804	265,2602	0,03%
15	429,8959	429,7377	0,04%	265,2497	265,3326	0,03%
16	429,8274	429,6682	0,04%	265,3190	265,4029	0,03%
17	429,7589	429,5991	0,04%	265,3882	265,4727	0,03%
18	429,6904	429,5300	0,04%	265,4574	265,5426	0,03%
19	429,6219	429,4609	0,04%	265,5267	265,6124	0,03%
20	429,5534	429,3919	0,04%	265,5959	265,6823	0,03%
21	429,4849	429,3228	0,04%	265,6651	265,7521	0,03%
22	429,4164	429,2537	0,04%	265,7343	265,8220	0,03%
23	429,3479	429,1847	0,04%	265,8035	265,8918	0,03%
24	429,2794	429,1156	0,04%	265,8728	265,9616	0,03%
25	429,2109	429,0466	0,04%	265,9420	266,0315	0,03%
26	429,1424	428,9775	0,04%	266,0112	266,1013	0,03%
27	429,0740	428,9085	0,04%	266,0804	266,1711	0,03%
28	429,0055	428,8395	0,04%	266,1495	266,2409	0,03%
29	428,9371	428,7704	0,04%	266,2187	266,3107	0,03%
30	428,8686	428,7014	0,04%	266,2879	266,3805	0,03%
31	428,8002	428,6324	0,04%	266,3571	266,4503	0,03%
32	428,7318	428,5634	0,04%	266,4262	266,5201	0,04%
33	428,6634	428,4944	0,04%	266,4954	266,5899	0,04%
34	428,5956	428,4111	0,04%	266,5639	266,6750	0,04%
35	428,2247	426,6692	0,36%	266,9543	268,5257	0,59%
36	423,9729	419,9471	0,95%	271,4669	275,6764	1,55%
37	415,5617	410,2811	1,27%	280,3956	285,9493	1,98%
38	404,6731	398,1760	1,61%	291,9468	298,7950	2,35%
39	391,0383	382,8454	2,10%	306,4030	315,0439	2,82%
40	373,4950	362,6574	2,90%	324,9996	336,4691	3,53%
41	350,0000	350,0000	0,00%	350,0000	350,0000	0,00%
	Maior Diferença Percentual		2,90%	Maior Diferença Percentual		3,53%

Fonte: O autor (2022)

A diferença percentual acentuada nos trechos finais, mas aceitável pela engenharia, já que não ultrapassa os 5%, pode ter relação com a condição de contorno no reservatório de jusante, que indica que a cota piezométrica é igual a cota topográfica do nível de água neste reservatório.

De acordo com a Norma Brasileira (NBR) 12215-1 Projeto de adutora de água – Parte 1: Conduto forçado, é necessário prever e verificar a necessidade de instalar dispositivos que permitam expulsar e/ou admitir ar, em pontos onde por exemplo há mudanças de declividade, e/ou pontos altos e/ou pontos suscetíveis de acumulação de ar. Observando o perfil da tubulação na figura 29, e tendo como base técnica esta NBR, seria instalado no ponto 21 algum dispositivo que permitiria expulsão e/ou admissão do ar, como por exemplo, uma ventosa, melhorando assim a operação da adutora, as operações de enchimento e/ou esvaziamento e os efeitos na ocorrência dos Transientes Hidráulicos, podendo então provocar a atenuação das pressões mínimas, ou seja, a envoltória de mínima seria deslocada para cima do perfil da tubulação, tendo em vista que no cenário sem dispositivo a partir do ponto 10, a envoltória de mínima está localizada abaixo do perfil da tubulação.

Figura 29: Envoltórias de pressão calculada pelo programa desenvolvido neste trabalho

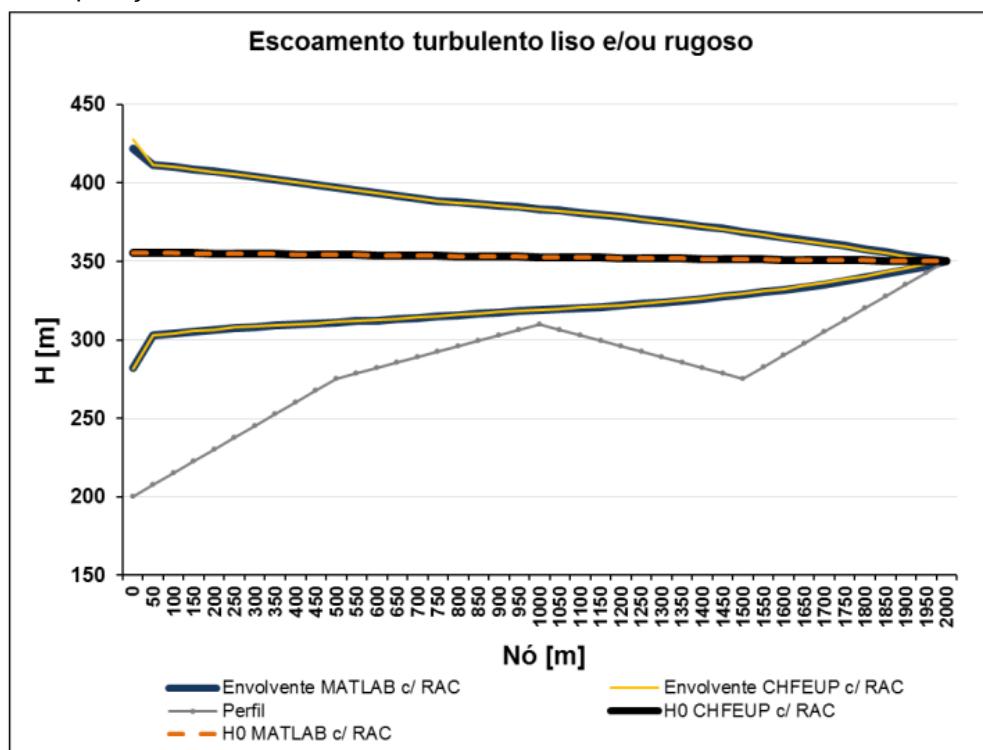


Fonte: O autor (2022)

Analizando qualitativamente os resultados de cotas piezométricas máximas e mínimas obtidas no programa desenvolvido neste trabalho e as diferenças percentuais apresentadas nas tabelas 2 e 3, pontua-se que, ainda que os pontos finais (a partir do 36 ao 40) tenham apresentados diferenças percentuais acentuadas - cotas piezométricas máximas um pouco acima e as cotas piezométricas mínimas um pouco abaixo do que Silva (2014) apresentou em seu trabalho – pelo viés da eficiência do dispositivo de atenuação das pressões, não seria recomendado instalar dispositivo nos pontos finais, afinal, fazem parte de um plano inclinado, sendo necessário estudar qual a melhor localização e o dispositivo mais eficiente para esta situação.

Silva (2014) implementou em seu programa o reservatório hidropneumático (RAC), que é um dispositivo composto por um vaso com ar sob pressão que tem como finalidade atenuar as variações de pressões oriundas dos Transientes Hidráulicos. Na figura 30, Silva (2014) apresenta graficamente as envoltórias de pressão para o caso estudado, utilizando tanto o programa em MATLAB quanto o CH-FEUP, admitindo a presença do RAC.

Figura 30: Envoltórias de pressão na tubulação de recalque com RAC simuladas na aplicação em MATLAB e no CH-FEUP



Fonte: Silva (2014)

5.5 COMPARAÇÃO DAS PIEZOMÉTRICAS APRESENTADAS NOS TRABALHOS DE SILVA (2014) E MEDEIROS (2021): REGIME RUGOSO

Silva (2014) utilizou a fórmula de Nikuradse para o cálculo do fator de atrito, desprezou a energia cinética e considerou a declividade longitudinal da tubulação. A Tabela 5 apresenta os valores obtidos por Silva (2014) e pelo programa desenvolvido neste trabalho.

Tabela 5 - Comparação das Cotas Piezométricas determinadas pelo programa desenvolvido por Silva (2014) com as cotas obtidas no programa desenvolvido neste trabalho

Ponto	Cota Piezométrica Máxima		Diferença Percentual	Cota Piezométrica Mínima		Diferença Percentual
	CH - FEUP – Silva (2014)	Autor (2022)		CH - FEUP – Silva (2014)	Autor (2022)	
1	431,7451	432,0592	0,07%	263,8572	263,5634	0,11%
2	431,6827	432,0592	0,09%	263,9202	263,5634	0,14%
3	431,6203	431,9979	0,09%	263,9833	263,6251	0,14%
4	431,5578	431,9367	0,09%	264,0465	263,6868	0,14%
5	431,4952	431,8755	0,09%	264,1096	263,7484	0,14%
6	431,4326	431,8143	0,09%	264,1729	263,8100	0,14%
7	431,3700	431,7532	0,09%	264,2361	263,8717	0,14%
8	431,3073	431,6922	0,09%	264,2995	263,9332	0,14%
9	431,2446	431,6313	0,09%	264,3628	263,9948	0,14%
10	431,1818	431,5704	0,09%	264,4262	264,0562	0,14%
11	431,1190	431,5095	0,09%	264,4897	264,1177	0,14%
12	431,0562	431,4486	0,09%	264,5532	264,1792	0,14%
13	430,9932	431,3877	0,09%	264,6168	264,2407	0,14%
14	430,9303	431,3266	0,09%	264,6804	264,3023	0,14%
15	430,8673	431,2652	0,09%	264,7441	264,3640	0,14%
16	430,8042	431,2027	0,09%	264,8078	264,4258	0,14%
17	430,7411	431,1370	0,09%	264,8716	264,4884	0,14%
18	430,6779	431,0607	0,09%	264,9354	264,5538	0,14%
19	430,6147	430,9532	0,08%	264,9993	264,6308	0,14%
20	430,5514	430,7652	0,05%	265,0633	264,7543	0,12%
21	430,4889	430,4308	0,01%	265,1264	265,0634	0,02%
22	430,4274	430,2136	0,05%	265,1885	265,4548	0,10%
23	430,3659	430,1528	0,05%	265,2505	265,5161	0,10%
24	430,3044	430,0918	0,05%	265,3126	265,5775	0,10%
25	430,2430	430,0307	0,05%	265,3747	265,6389	0,10%
26	430,1815	429,9694	0,05%	265,4367	265,7006	0,10%
27	430,1200	429,9081	0,05%	265,4988	265,7624	0,10%

Tabela 5 - Comparação das Cotas Piezométricas determinadas pelo programa desenvolvido por Silva (2014) com as cotas obtidas no programa desenvolvido neste trabalho

conclusão

Ponto	Cota Piezométrica Máxima		Diferença Percentual	Cota Piezométrica Mínima		Diferença Percentual
	CH - FEUP - Silva (2014)	Autor (2022)		CH - FEUP - Silva (2014)	Autor (2022)	
28	430,0585	429,8467	0,05%	265,5609	265,8242	0,10%
29	429,9970	429,7852	0,05%	265,6229	265,8860	0,10%
30	429,9356	429,7233	0,05%	265,6850	265,9478	0,10%
31	429,8741	429,6595	0,05%	265,7470	266,0093	0,10%
32	429,8126	429,5881	0,05%	265,8091	266,0709	0,10%
33	429,7511	429,4856	0,06%	265,8712	266,1324	0,10%
34	429,6405	429,2587	0,09%	265,9853	266,1938	0,08%
35	427,5314	428,5340	0,23%	268,2144	266,2549	0,73%
36	420,5701	425,8193	1,25%	275,5710	266,3149	3,36%
37	410,8314	425,8409	3,65%	285,8458	273,9690	4,15%
38	398,6454	401,8195	0,80%	298,6793	287,9798	3,58%
39	383,1866	385,9802	0,73%	314,9388	304,7910	3,22%
40	362,799	368,4918	1,57%	336,4148	324,6869	3,49%
41	350,0000	350,6817	0,19%	350,0000	350,0000	0,00%
	Maior Diferença Percentual		3,65%	Maior Diferença Percentual		4,15%

Fonte: O autor (2022)

Para as cotas piezométricas máximas, foi observado que dos 41 pontos, em 38 pontos (do 1 ao 35, 38, 39 e 41) a variação percentual foi menor que 0,9%, indicando assim uma excelente convergência com o programa desenvolvido por Silva (2014). Em apenas 2 pontos (36 e 40) a diferença percentual foi maior que 1,3% e menor que 1,6%, e em um único ponto (37) a diferença percentual foi maior que 3,6% e menor que 3,7%.

Já para as cotas piezométricas mínimas, foi observado que dos 41 pontos, em 36 pontos (do 1 ao 35 e 41) a variação percentual foi menor que 0,8%, indicando assim uma excelente convergência com o programa desenvolvido por Silva (2014). Em 5 pontos (36 ao 40) a diferença percentual foi maior que 3,2% e menor que 4,1%.

A conclusão qualitativa posta no item anterior também é válida para este item.

Medeiros (2021) utilizou a fórmula de Nikuradse para o cálculo do fator de atrito, desprezou a energia cinética e a declividade longitudinal da tubulação. A Tabela 6

apresenta os valores obtidos por Medeiros (2014) e pelo programa desenvolvido neste trabalho.

Tabela 6 - Comparação das Cotas Piezométricas determinadas pelo programa desenvolvido por Medeiros (2021) com as cotas obtidas no programa desenvolvido neste trabalho

Ponto	Cota Piezométrica Máxima		Diferença Percentual	Cota Piezométrica Mínima		Diferença Percentual
	Medeiros (2021)	Autor (2022)		Medeiros (2021)	Autor (2022)	
1	430,7302	432,0638	0,31%	264,3275	263,5609	0,29%
2	430,6598	432,0638	0,33%	264,3988	263,5609	0,32%
3	430,5893	432,0227	0,33%	264,4701	263,6225	0,32%
4	430,5188	431,9416	0,33%	264,5416	263,6841	0,32%
5	430,4482	431,8806	0,33%	264,6131	263,7457	0,33%
6	430,3775	431,8195	0,34%	264,6847	263,8073	0,33%
7	430,3067	431,7584	0,34%	264,7563	263,8689	0,34%
8	430,2359	431,6973	0,34%	264,8281	263,9305	0,34%
9	430,1649	431,6362	0,34%	264,8999	263,9921	0,34%
10	430,0939	431,5751	0,34%	264,9718	264,0537	0,35%
11	430,0229	431,5140	0,35%	265,0438	264,1153	0,35%
12	429,9517	431,4529	0,35%	265,1158	264,1769	0,35%
13	429,8805	431,3918	0,35%	265,1880	264,2385	0,36%
14	429,8091	431,3306	0,35%	265,2602	264,3001	0,36%
15	429,7377	431,2691	0,36%	265,3326	264,3618	0,37%
16	429,6682	431,2066	0,36%	265,4029	264,4236	0,37%
17	429,5991	431,1408	0,36%	265,4727	264,4862	0,37%
18	429,5300	431,0644	0,36%	265,5426	264,5516	0,37%
19	429,4609	430,9569	0,35%	265,6124	264,6287	0,37%
20	429,3919	430,7689	0,32%	265,6823	264,7522	0,35%
21	429,3228	430,4344	0,26%	265,7521	265,0615	0,26%
22	429,2537	430,2171	0,22%	265,8220	265,4531	0,14%
23	429,1847	430,1561	0,23%	265,8918	265,5147	0,14%
24	429,1156	430,0951	0,23%	265,9616	265,5762	0,14%
25	429,0466	430,0341	0,23%	266,0315	265,6378	0,15%
26	428,9775	429,9732	0,23%	266,1013	265,6993	0,15%
27	428,9085	429,9122	0,23%	266,1711	265,7608	0,15%
28	428,8395	429,8511	0,24%	266,2409	265,8224	0,16%
29	428,7704	429,7900	0,24%	266,3107	265,8839	0,16%
30	428,7014	429,7284	0,24%	266,3805	265,9454	0,16%
31	428,6324	429,6648	0,24%	266,4503	266,0069	0,17%
32	428,5634	429,5935	0,24%	266,5201	266,0685	0,17%
33	428,4944	429,4911	0,23%	266,5899	266,1300	0,17%
34	428,4111	429,2643	0,20%	266,6750	266,1914	0,18%

Tabela 6 - Comparação das Cotas Piezométricas determinadas pelo programa desenvolvido por Medeiros (2021) com as cotas obtidas no programa desenvolvido neste trabalho conclusão

Ponto	Cota Piezométrica Máxima		Diferença Percentual	Cota Piezométrica Mínima		Diferença Percentual
	Medeiros (2021)	Autor (2022)		Medeiros (2021)	Autor (2022)	
35	426,6692	428,5395	0,44%	268,5257	266,2525	0,85%
36	419,9471	425,8243	1,40%	275,6764	266,3126	3,40%
37	410,2811	415,8450	1,36%	285,9493	273,9683	4,19%
38	398,176	401,8222	0,92%	298,7950	287,9789	3,62%
39	382,8454	385,9822	0,82%	315,0439	304,7901	3,25%
40	362,6574	368,4928	1,61%	336,4691	324,6862	3,50%
41	350,0000	350,6817	0,19%	350,0000	350,0000	0,00%
	Maior Diferença Percentual		1,61%	Maior Diferença Percentual		4,19%

Fonte: O autor (2022)

Para as cotas piezométricas máximas, foi observado que dos 41 pontos, em 38 pontos (do 1 ao 35, 38, 39 e 41) a variação percentual foi menor que 1%, indicando assim uma excelente convergência com o programa desenvolvido por Medeiros (2021). Nos outros 3 pontos (36, 37 e 40) a diferença percentual foi maior que 1,3% e menor que 1,7%.

Já para as cotas piezométricas mínimas, foi observado que dos 41 pontos, em 36 pontos (do 1 ao 35 e 41) a variação percentual foi menor que 0,9%, indicando assim uma excelente convergência com o programa desenvolvido por Medeiros (2014). Em 5 pontos (36 ao 40) a diferença percentual foi maior que 3,2% e menor que 4,2%.

A conclusão qualitativa posta no item anterior também é válida para este item.

5.6 COMPARAÇÃO DAS PIEZOMÉTRICAS APRESENTADAS NO SOFTWARE ALLIEVI: REGIME EM TRANSIÇÃO

Medeiros (2021) comparou os resultados extraídos em seu programa, com os resultados obtidos na simulação do estudo de caso realizado no ALLIEVI. Os dados fornecidos ao software foram os mesmos já apresentados neste trabalho e que estão presentes em Silva (2014). Vale destacar que o ALLIEVI utiliza o Método das Características (MOC), considera a parcela da declividade longitudinal da tubulação,

mas despreza a energia cinética, e por fim, o fator de resistência é calculado utilizando a fórmula de Swamee e Jain.

Na Tabela 7 são apresentados apenas a maior e menor cotas piezométricas calculadas no ALLIEVI e no programa desenvolvido neste trabalho.

Tabela 7 - Resumo das cotas piezométricas máximas e mínimas calculadas nas simulações

Programa	Cota Piezométrica Máxima	Cota Piezométrica Mínima
ALLIEVI	431,33	264,59
AUTOR (2022)	430,83	264,24

Fonte: O autor (2022)

Comparando as cotas piezométricas máximas, obtém-se como diferença percentual 0,12% enquanto para as cotas piezométricas mínimas, a diferença percentual foi de 0,13%.

5.7 VALIDAÇÃO DO MODELO

A Tabela 8 apresenta o resumo das cotas piezométricas máximas e mínimas calculadas nas diversas simulações e comparações apresentadas anteriormente.

Tabela 8 - Resumo das cotas piezométricas máximas e mínimas calculadas em todas as simulações

Tabela	Regime	Comparaçāo	Cotas Piezométricas Máximas	Cotas Piezométricas Mínimas
2	Transição	Autor (2022)	430,83	264,24
		MATLAB	430,79	264,35
Diferença Percentual			0,01%	0,04%
3	Transição	Autor (2022)	430,83	264,24
		Silva (2014)	430,73	264,33
Diferença Percentual			0,02%	0,03%
5	Rugoso	Autor (2022)	432,06	263,56
		Silva (2014)	431,75	263,86
Diferença Percentual			0,07%	0,11%
6	Rugoso	Autor (2022)	432,06	263,56
		Medeiros (2021)	430,73	264,33
Diferença Percentual			0,31%	0,29%
7	Transição	Autor (2022)	430,83	264,24
		ALLIEVI	431,33	264,59
Diferença Percentual			0,12%	0,13%

Fonte: O autor (2022)

Isto posto, pode ser discutido que o programa desenvolvido neste trabalho apresenta resultados satisfatórios e coerentes com os programas apresentados em

Silva (2014), o de Medeiros (2021) e o ALLIEVI. A partir de agora, as análises sobre a influência da contribuição das parcelas de energia cinética e declividade longitudinal da tubulação são significativas para os resultados de cotas piezométricas e se o fator de resistência calculado pela fórmula correspondente ao regime de escoamento altera significativamente estes resultados.

5.8 ESTUDO 01: ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DA PARCELA DA DECLIVIDADE LONGITUDINAL

As Tabelas 9 e 10 são apresentados os resultados para cota piezométrica máxima e mínima, respectivamente, para o caso em que a energia cinética foi considerada, enquanto houve consideração ou não da declividade longitudinal da tubulação.

Tabela 9 - Resultados admitindo a Energia Cinética – Cota Piezométrica Máxima

Declividade Longitudinal da Tubulação	Regime / f calculado por	Transição			Liso	Rugoso
	Cota Piezométrica	Colebrook-White	Barr	Swamee	Prandtl	Nikuradse
Desprezada	Máxima	430,8477	430,7935	430,8488	432,4314	432,0743
Considerada	Máxima	430,8432	430,7891	430,8443	432,4267	432,0697
	Diferença Percentual	0,001%	0,001%	0,001%	0,001%	0,001%

Fonte: O autor (2022)

Tabela 10 - Resultados admitindo a Energia Cinética – Cota Piezométrica Mínima

Declividade Longitudinal da Tubulação	Regime / f calculado por	Transição			Liso	Rugoso
	Cota Piezométrica	Colebrook-White	Barr	Swamee	Prandtl	Nikuradse
Desprezada	Mínima	264,2307	264,2562	264,2252	263,3109	263,5504
Considerada	Mínima	264,2333	264,2587	264,2278	263,3135	263,5530
	Diferença Percentual	0,001%	0,001%	0,001%	0,001%	0,001%

Fonte: O autor (2022)

Já nas Tabelas 11 e 12 também são apresentados os resultados para cota piezométrica máxima e mínima, respectivamente, porém agora a parcela da energia cinética foi desprezada, enquanto houve variação ou não da declividade longitudinal da tubulação.

Tabela 11 - Resultados desprezando a Energia Cinética – Cota Piezométrica Máxima

Declividade Longitudinal da Tubulação	Regime / f calculado por	Transição			Liso	Rugoso
	Cota Piezométrica	Colebrook-White	Barr	Swamee	Prandtl	Nikuradse
Desprezada	Máxima	430,8372	430,7830	430,8383	432,4210	432,0638
Considerada	Máxima	430,8327	430,8333	430,8338	432,4163	432,0592
	Diferença Percentual	0,001%	0,012%	0,001%	0,001%	0,001%

Fonte: O autor (2022)

Tabela 12: Resultados desprezando a Energia Cinética – Cota Piezométrica Mínima

Declividade Longitudinal da Tubulação	Regime / f calculado por	Transição			Liso	Rugoso
	Cota Piezométrica	Colebrook-White	Barr	Swamee	Prandtl	Nikuradse
Desprezada	Mínima	264,2412	264,2666	264,2357	263,3213	263,5609
Considerada	Mínima	264,2437	264,2410	264,2382	263,3238	263,5634
	Diferença Percentual	0,001%	0,010%	0,001%	0,001%	0,001%

Fonte: O autor (2022)

Conclui-se, portanto, que a declividade longitudinal da tubulação não alterou significativamente os resultados de cotas piezométricas mínimas e máximas apresentados nas tabelas 9, 10, 11 e 12, nem quando a energia cinética foi considerada nem quando foi desprezada.

5.9 ESTUDO 02: ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DA PARCELA DA ENERGIA CINÉTICA

As tabelas 13 e 14 são apresentados os resultados para cota piezométrica máxima e mínima, respectivamente, para o caso em que a declividade longitudinal foi considerada, enquanto houve variação na consideração da energia cinética.

Tabela 13 - Resultados admitindo a Declividade Longitudinal da Tubulação – Cota Piezométrica Máxima

Energia Cinética	Regime / f calculado por	Transição			Liso	Rugoso
	Cota Piezométrica	Colebrook-White	Barr	Swamee	Prandtl	Nikuradse
Desprezada	Máxima	430,8327	430,8333	430,8338	432,4163	432,0592
Considerada	Máxima	430,8432	430,7891	430,8443	432,4267	432,0697
	Diferença Percentual	0,002%	0,010%	0,002%	0,002%	0,002%

Fonte: O autor (2022)

Tabela 14 - Resultados admitindo a Declividade Longitudinal da Tubulação – Cota Piezométrica Mínima

Energia Cinética	Regime / f calculado por	Transição			Liso	Rugoso
	Cota Piezométrica	Colebrook-White	Barr	Swamee	Prandtl	Nikuradse
Desprezada	Mínima	264,2437	264,2410	264,2382	263,3238	263,5634
Considerada	Mínima	264,2333	264,2587	264,2278	263,3135	263,5530
	Diferença Percentual	0,004%	0,007%	0,004%	0,004%	0,004%

Fonte: O autor (2022)

Já nas tabelas 15 e 16 também são apresentados os resultados para cota piezométrica máxima e mínima, respectivamente, porém agora a parcela da declividade longitudinal da tubulação foi desprezada, enquanto houve variação na consideração da energia cinética.

Tabela 15 - Resultados desprezando a Declividade Longitudinal da Tubulação – Cota Piezométrica Máxima

Energia Cinética	Regime / f calculado por	Transição			Liso	Rugoso
	Cota Piezométrica	Colebrook-White	Barr	Swamee	Prandtl	Nikuradse
Desprezada	Máxima	430,8372	430,7830	430,8383	432,4210	432,0638
Considerada	Máxima	430,8477	430,7935	430,8488	432,4314	432,0743
	Diferença Percentual	0,002%	0,002%	0,002%	0,002%	0,002%

Fonte: O autor (2022)

Tabela 16 - Resultados desprezando a Declividade Longitudinal da Tubulação – Cota Piezométrica Mínima

Energia Cinética	Regime / f calculado por	Transição			Liso	Rugoso
	Cota Piezométrica	Colebrook-White	Barr	Swamee	Prandtl	Nikuradse
Desprezada	Mínima	264,2357	264,2666	264,2357	263,3213	263,5609
Considerada	Mínima	264,2307	264,2562	264,2252	263,3109	263,5504
	Diferença Percentual	0,002%	0,004%	0,004%	0,004%	0,004%

Fonte: O autor (2022)

Conclui-se, portanto, que a energia cinética não alterou significativamente os resultados de cotas piezométricas mínimas e máximas apresentados nas tabelas 13, 14, 15 e 16 nem quando a declividade longitudinal foi considerada nem quando foi desprezada.

5.10 ESTUDO 03: INFLUÊNCIA DO CÁLCULO DO FATOR DE RESISTÊNCIA DE ACORDO COM O REGIME DE ESCOAMENTO

As tabelas 17 e 18 apresentam as maiores diferenças percentuais das cotas piezométricas máximas e mínimas, respectivamente, quando são comparados o conjunto de valores das cotas piezométricas obtidos para cada caso ao se calcular o fator de resistência de acordo com o regime de escoamento.

Tabela 17 - Maior diferença percentual das cotas piezométricas máximas independentemente do regime de escoamento

Caso	Energia Cinética	Declividade Longitudinal da Tubulação	Maior diferença percentual
1	Considerada	Desprezada	0,380%
2	Considerada	Considerada	0,380%
3	Desprezada	Desprezada	0,380%
4	Desprezada	Considerada	0,368%

Fonte: O autor (2022)

Tabela 18 - Maior diferença percentual das cotas piezométricas mínimas independentemente do regime de escoamento

Caso	Energia Cinética	Declividade Longitudinal da Tubulação	Maior diferença percentual
1	Considerada	Desprezada	0,359%
2	Considerada	Considerada	0,359%
3	Desprezada	Desprezada	0,359%
4	Desprezada	Considerada	0,349%

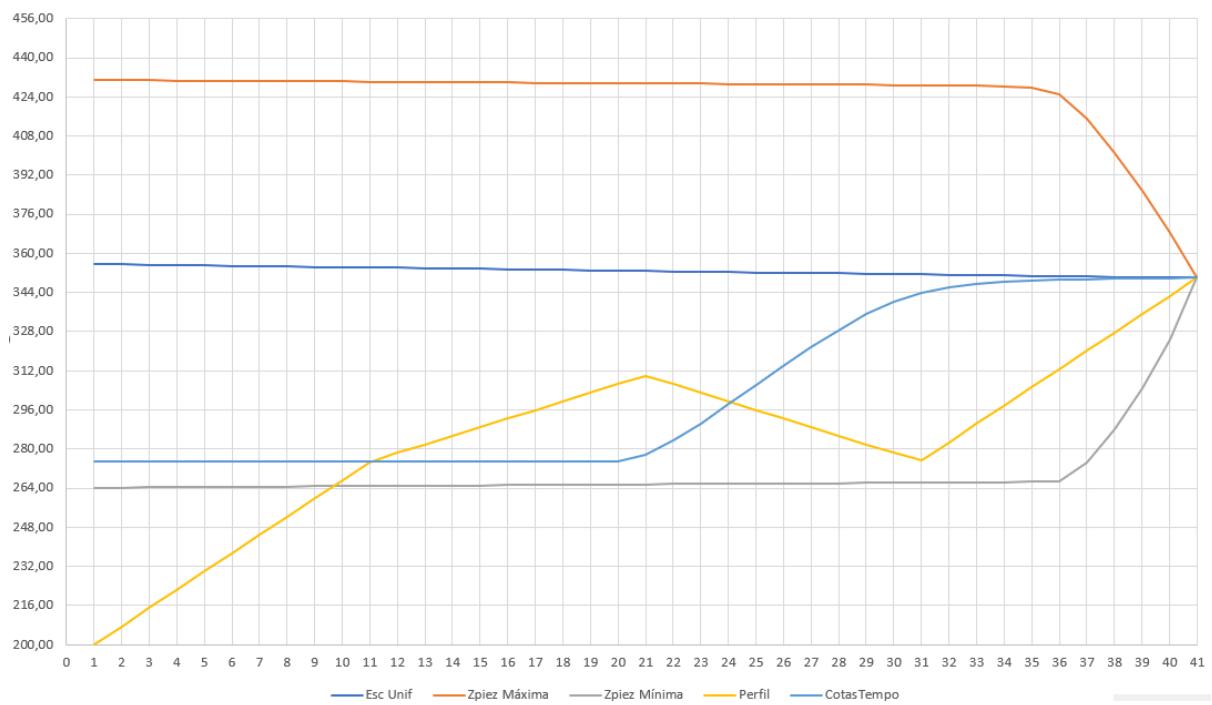
Fonte: O autor (2022)

Conclui-se, portanto, que o fator de resistência, calculado de acordo com o regime de escoamento, não alterou significativamente os resultados de cotas piezométricas mínimas e máximas para nenhum dos casos apresentados nas tabelas 17 e 18. Porém, na situação de desconhecimento do regime de escoamento, indica-se a utilização da fórmula de Colebrook-White, pois de acordo com Baptista et al. (2001), embora esta formulação inicialmente tenha sido estabelecida somente para a faixa de transição, ela apresenta bons resultados nas outras faixas, pois ela é a composição das equações para tubos lisos e rugosos, e, por isso, é a fórmula mais recomendada para a determinação do fator de resistência em escoamentos turbulentos.

5.11 SIMULAÇÃO DAS ONDAS DE PRESSÃO

O programa desenvolvido além de apresentar o gráfico com as envoltórias de pressão a partir das cotas piezométricas calculadas por ele, conforme foi mostrado na figura 29, é possível ainda simular as ondas de pressão ao longo da tubulação, conforme é mostrada na figura 31. As figuras representam o caso em que o regime é de transição, onde o fator de resistência foi calculado pela fórmula de Colebrook-White, sem a consideração da parcela de energia cinética, mas considerando a declividade longitudinal da tubulação.

Figura 31: Animação das ondas de pressão ao longo da tubulação
Ondas de Pressão



Fonte: O autor (2022)

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Por meio deste trabalho e dos resultados obtidos, foi possível investigar a influência para os resultados das cotas piezométricas máximas e mínimas, ao serem consideradas as parcelas da energia cinética e da declividade longitudinal da tubulação, assim como, o fator de atrito na fórmula universal de perda de carga de Darcy-Weisbach calculado de acordo com o regime de escoamento, durante o fenômeno dos Transientes Hidráulicos.

O programa desenvolvido apresentou resultados de cotas piezométricas mínimas e máximas muito próximas, com diferença percentual menor que 0,5%, aos programas disponíveis em outras literaturas e ao software ALLIEVI, bastante utilizado em projetos reais por engenheiros civis. Conclui-se, portanto, que o programa apresenta resultados coerentes para o caso de um sistema de adução por recalque.

Considerando o fator de resistência calculado de acordo com o regime de escoamento, admitindo a energia cinética e considerando ou não a declividade longitudinal da tubulação, a diferença percentual para as cotas piezométricas máximas e mínimas não ultrapassou o 0,001%. Desprezando a energia cinética e considerando ou não a declividade longitudinal da tubulação, a diferença percentual para as cotas piezométricas máximas e mínimas não ultrapassou o 0,012%. Dessa forma, foi possível concluir que sim, a declividade longitudinal da tubulação não é uma variável significativa para o cálculo das cotas piezométricas.

De maneira análoga, investigou-se a influência da energia cinética para o cálculo das cotas piezométricas, considerando o fator de resistência calculado de acordo com o regime de escoamento, admitindo a declividade longitudinal da tubulação e considerando ou não a energia cinética, a diferença percentual para as cotas piezométricas máximas e mínimas não ultrapassou o 0,010%. Desprezando a declividade longitudinal da tubulação e considerando ou não a energia cinética, a diferença percentual para as cotas piezométricas máximas e mínimas não ultrapassou o 0,004%. Dessa forma, foi possível concluir que sim, a energia cinética da tubulação não é uma variável significativa para o cálculo das cotas piezométricas.

As análises comparativas presentes neste trabalho através do programa desenvolvido demonstraram numericamente, saindo das simplificações da engenharia, que as parcelas de energia cinética e de declividade longitudinal da

tubulação não trazem alterações significativas para os resultados de cotas piezométricas mínimas e máximas em nenhum regime de escoamento.

As cotas piezométricas mínimas e máximas calculadas no programa desenvolvido, em cada caso simulado, convergiram, não ultrapassando a diferença percentual de 0,5%, mesmo que o fator de resistência tenha sido calculado com as formulações indicadas para cada regime. Concluiu-se, portanto, que caso o regime de escoamento seja desconhecido, pode ser admitido que o regime está na zona de transição e a fórmula de Colebrook-White pode ser utilizada para a determinação do fator de resistência.

A importância do tema para a Engenharia Civil, em especial para as áreas de hidráulico e saneamento ambiental, é que o estudo do Transiente Hidráulico durante a fase de um projeto e operação do sistema hidráulico permite diagnosticar os eventuais efeitos prejudiciais durante a ocorrência do fenômeno, de forma que, seja possível propor soluções aos elementos do sistema no tocante a resistência mecânica capaz de suportar as variações de pressão, ou apontar a necessidade da implementação de dispositivos de proteção objetivando reduzir a amplitude das variações, mantendo-as nos limites aceitáveis.

Dito isto, o programa terá fins pedagógicos, sendo no primeiro momento utilizado na pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), e no segundo momento na graduação do mesmo curso. A utilização dessa ferramenta fará com que docentes e discentes se debrucem com mais qualidade sobre o tema.

Podem ser elencadas como recomendações futuras:

- a) A possibilidade de esquematizar o perfil da tubulação numa tela de desenho, se assemelhando a interfaces dos softwares de projetos disponíveis;
- b) Implementação ao programa desenvolvido dispositivos de proteção, como por exemplo, o Reservatório Hidropneumático (RHO) e ventosas, de forma que seja possível analisar a influência destes nos alívios das pressões.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário; **NBR-9649**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estação de bombeamento ou de estação elevatória de água - Requisitos; **NBR-12214**. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de adutora de água – Parte 1: Conduto forçado; **NBR-12215-1**. Rio de Janeiro, 2017.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, M. **Manual de Hidráulica**. 9^a edição. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 2018.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P.; CIRILO, J. A.; MASCARENHAS, F. C. B; CANALO, G. V; CABRAL, J. J. S. P.; AZEVEDO, J. R. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Hidráulica Aplicada**. 1^a edição. ABRH. Porto Alegre, 2001.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2022. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421>>. Acesso em: 12, outubro de 2022.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2^a edição. Editora Pearson. São Paulo, 2008.

CARVALHO, Raphael Costa. **Problemas inversos em escoamentos transientes de líquidos em tubulações**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

CHAUDHY, M. H; **Applied hydraulic transients**. 3^a edição. Springer. New York, 2013.

DINIZ, Arthur Brito Nunes. **Modelagem e análise de transitórios hidráulicos e cavitação em linhas de recalque com ventosas**. 2020. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

FARIA, Ítalo Meireles. **Desenvolvimento de modelo computacional para simulação de Transiente Hidráulico em Linhas de Recalque**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

GUSMÃO, I. C. D.; BARRETO, A. H. S.; FERNANDES, R. T. V. F.; LIMA, V. K. P.; SILVA, M. D. **Principais Mecanismos de Alívio do Golpe de Aríete em adutoras**. 2021. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. 2021.

JUNIOR, Pedro Antonio Masiero. **Análise de Transientes Hidráulicos em adutora utilizando o método das características**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MAGALHÃES, Cláudio Henrique Milfont de. **Tubos e dispositivos de segurança utilizados para minimizar os efeitos dos transientes hidráulicos em adutoras**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

MANZI, D. **A hidráulica de todo dia no saneamento**. 1^a edição. Editora Appris. Curitiba, 2020.

MATTIELLO, Júlia Zucchetti. **Análise de ocorrência de transientes hidráulicos em um sistema de adução de água através do modelo Mike Urban**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

MEDEIROS, Pedro Impieri Farias de. **Elaboração de um programa computacional para resolução simples e entendimento de transientes hidráulicos**. 2021.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO (SNS). Diagnóstico Temático – Serviço de Água e Esgoto – Visão Geral – ano de referência 2020. 2021

MORESCHI, Isabella Cristina. **Transiente Hidráulico em sistema de água Bruta: Abordagem para situação real.** 2018. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2018.

PÁDUA, V. L.; HELLER, L. **Abastecimento de água para consumo humano.** 2^a edição. Editora UFMG. Belo Horizonte, 2010.

Objetivo de Desenvolvimento Sustentável – 6: Água Potável e Saneamento. Nações Unidas no Brasil, 2022. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6>>. Acesso em: 12, outubro de 2022.

Painel Saneamento Brasil, 2022. Disponível em: < <https://www.painelsaneamento.org.br/localidade/index?id=0>>. Acesso em: 12, outubro de 2022.

66 milhões de brasileiros poderiam ser abastecidos com a quantidade de água perdida nos sistemas de distribuição. Portal Saneamento Básico, 2022. Disponível em: < <https://saneamentobasico.com.br/acervo-tecnico/brasileiros-abastecidos-agua-perdida-sistemas-distribuicao/>>. Acesso em: 12, outubro de 2022.

SILVA, Paulo Ricardo Duarte. **Modelação Numérica do Choque Hidráulico.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Porto, 2014.

SOBRINHO, P. A.; TSUTIYA, M. T. **Coleta e Transporte de Esgoto Sanitário.** 2^a edição. Editora Escola Politécnica. São Paulo, 2000.

TEIXEIRA, Lucas Florêncio da Cunha. **Efeito da entrada da tubulação por cima do reservatório de jusante nos transientes hidráulicos.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água.** 3^a edição. ABES. São Paulo, 2006.

WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. **Fluid Mechanics.** New York, McGRAW-HILL Book Company, 1979.