

MODELAGEM MATEMÁTICA DO TRANSIENTE HIDRÁULICO APLICADO A UMA ADUTORA NO OESTE DE SANTA CATARINA¹

Mauricio Bedin²
Rodrigo Konrath³
Keila Daiane Ferrari Orso⁴

RESUMO

A ocorrência de perturbações no escoamento permanente no interior de condutos forçados, induz a ondas de choque devido à variação de pressão, sendo denominado como um Transiente Hidráulico. Este fenômeno provoca tensão interna no fluido, o qual é propagado para a tubulação, influenciando no seu funcionamento e principalmente na segurança da operação. Além disso, pode ocorrer o efeito do Golpe de Aríete provocando ruídos indesejáveis na tubulação. O presente trabalho foi realizado através de um estudo de campo em uma adutora no Oeste de Santa Catarina, visando modelar matematicamente um escoamento transiente provocado por paradas inesperadas da bomba, de acordo com condições impostas pela ABNT em sua Norma 12215-1 do ano de 2017. Foi realizado o estudo analítico utilizando-se do Método das Características e posteriormente realizado o estudo computacional através do *software ANSYS Fluent R19.2®*, com a finalidade de comparar tais resultados. Ao final do estudo de campo, obteve-se valores de vazão para o método analítico e computacional desiguais nos pontos estudados que possuem a maior extensão do duto, diferente dos menores pontos do sistema, que houve convergência entre os dois métodos. Provando-se assim, a validade da modelagem matemática.

Palavras-chave: Estudo Analítico-Computacional; Golpe de Aríete; Modelagem Matemática; Transiente Hidráulico.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas hidráulicos constituídos de tubulações sob pressão (no presente caso, uma adutora), trabalham atualmente com amplos regimes operacionais. Qualquer aceleração ou desaceleração do escoamento, leva a propagação de ondas de pressão ao longo da tubulação, ocasionando, um Transiente Hidráulico ou o popular Golpe de Aríete.

Situações em que as condições do fluxo variam com o tempo, ou também transição de um fluxo entre duas condições de estado estável, são conhecidos como transiente. Quanto maior for a mudança e mais rápido ela ocorrer, maior é a pressão transitória (TULLIS, 1989).

Chaudhry (1979) exemplifica um Transiente Hidráulico, no momento em que uma válvula é fechada rapidamente, de imediato a velocidade do fluxo diminui para zero, ocorrendo

¹ Pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

² Acadêmico do curso de Engenharia Mecânica da UCEFF. E-mail: mauriciobedin-@hotmail.com.

³ Docente do curso de Engenharia Mecânica da UCEFF. E-mail: konrath@uceff.edu.br.

⁴ Docente do curso de Engenharia Mecânica da UCEFF. E-mail: keila@uceff.edu.br.

a conversão da energia cinética do escoamento permanente, para energia na forma de pressão do escoamento transiente. Ocorre um aumento da pressão, ocasionando conseqüentemente ondas de pressão, que colidem ao longo da tubulação.

De tal modo, com a intenção de reduzir e até mesmo evitar danos causados por esse fenômeno, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em sua norma 12215-1 do ano de 2017 para projeto de adutora de água para abastecimento público, define como atividades necessárias, o estudo da possibilidade de ocorrência do Golpe de Aríete, pelo Método das Características (Brasil, 2017). De acordo com Chaudhry (1979), esse método nada mais é do que uma modelagem matemática para resolução de equações diferenciais parciais.

A adutora em estudo liga a Estação de Tratamento de Água (ETA) ao reservatório o qual, realiza a distribuição de água para a população. Com aproximadamente 1200 m de comprimento, sendo que foi construída recentemente. Ela é responsável pelo abastecimento de água já tratada para consumo. Devido a esse fato, o abastecimento não pode ser interrompido por longos períodos, pela intensa necessidade de consumo da população.

Quando não controlada a vazão mássica do escoamento, ou em sistemas que não apresentam dispositivos de controle anti-golpe eficazes, a probabilidade da ocorrência do fenômeno é muito grande. As decorrências do mesmo são intensas e irreversíveis, gerando altos custos para o sistema de abastecimento.

Em vista disso, este trabalho tem por objetivo geral realizar uma modelagem matemática para a análise do Transiente Hidráulico em um sistema de adução de água, utilizando-se do Método das Características. Primeiramente, verificar se as pressões de trabalho estão de acordo com a norma da ABNT 12215-1 do ano de 2017. Posteriormente, estabelecer um modelo computacional utilizando o software *ANSYS Fluent R19.2®* e confrontar os dados experimentais coletados com o método numérico utilizado.

No momento em que o fluxo do fluido é interrompido de maneira precipitada, a velocidade desse escoamento varia, ocasionando choques entre ondas de pressões que se deslocam ao longo da tubulação. Estas provocam grandes vibrações, podendo inclusive ocasionar o rompimento da tubulação, atingindo assim bens materiais e vidas humanas. Dessa forma, a modelagem do Transiente Hidráulico em um projeto de adutora é de suma importância, possibilitando estudar medidas de prevenção e soluções que oferecem maior confiabilidade ao sistema.

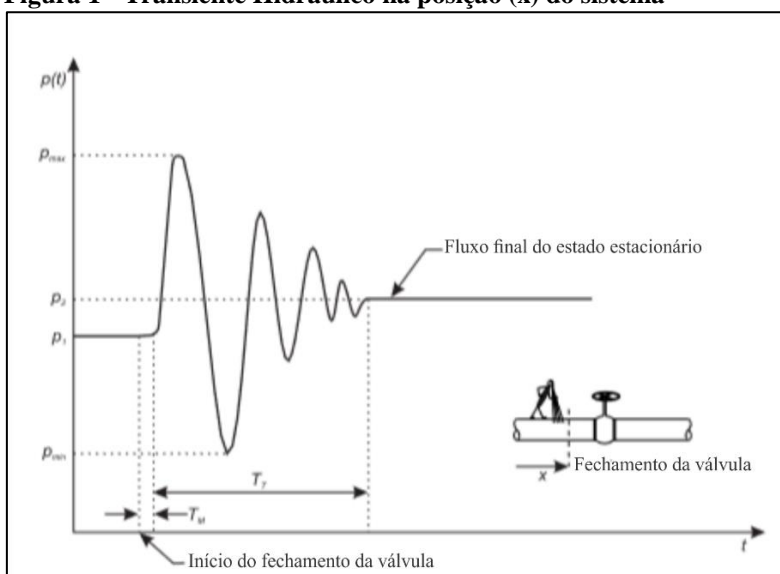
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TRANSIENTE HIDRÁULICO

Escoamentos em sistemas hidráulicos de distribuição de água trabalham com diferentes regimes de operação. Amoah e Elbashir (2007) citam que nesses sistemas, a vazão do escoamento é controlada ou alterada pela abertura e fechamento de válvulas, ou acionamentos e interrupções do funcionamento de bombas. O rápido fechamento da válvula, ou uma parada inesperada da bomba podem ocasionar o Transiente Hidráulico.

Boulos et al. (2005) complementam que com o fechamento rápido de uma válvula sucede-se a conversão de energia cinética em energia na forma de pressão (Figura 1), o qual ocasiona ondas de pressão que se deslocam ao longo da tubulação. Nem toda a energia cinética é convertida na forma de pressão, o som que é gerado pelo fenômeno (golpe de aríete) aponta a conversão também, em energia sonora. Essa energia, juntamente com outras formas de dispersão de energia (incluindo a de atrito do fluido), acarretam a diminuição da intensidade das ondas de pressão até o escoamento retornar ao estado permanente.

Figura 1 - Transiente Hidráulico na posição (x) do sistema



Fonte: Adaptado de Beckeith, et al., (1992).

Com a variação do fluxo do fluido, o escoamento deixa de ser permanente, e as condições iniciais do escoamento como velocidade média (v) e pressão (P) ao longo do duto

(x) variam com o tempo (t), até o escoamento retornar ao estado permanente (Amoah; Elbashir, 2007).

2.1.1 Modelagem Matemática do Transiente Hidráulico

De acordo com a metodologia de Chaudhry (1979), Tullis (1989) e Wylie e Streeter (1979), para a solução analítica do Transiente Hidráulico é necessário a resolução da Equação do Movimento (Equação 1) e a Equação da Continuidade (Equação 2). Sendo essas, equações que apresentam duas variáveis dependentes, altura piezométrica (H) e vazão (\dot{V}) em uma determinada posição do duto em função do tempo.

$$\frac{d\dot{V}}{dt} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f\dot{V}|\dot{V}|}{2DA} = 0 \quad (1)$$

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

Masiero Junior (2008) ressalta que estas são equações diferenciais parciais não lineares. Por não possuírem solução analítica, podem ser resolvidas por métodos numéricos.

Sendo que a velocidade pode ser calculada com duas variáveis, vazão e área do duto,

$$\dot{V} = v \times A \quad (3)$$

Deste modo, a classificação do tipo de escoamento pode ser definida, através do cálculo do número de Reynolds,

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} \quad (4)$$

onde:

ρ : densidade do fluido [kg/m^3];

v : velocidade do fluido [m/s];

D: diâmetro da tubulação [m] e

μ : viscosidade dinâmica [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$].

Para o cálculo da propagação de ondas de pressão ao longo do duto, precisa-se utilizar o conceito de celeridade, definida na Equação 5 (Brasil, 2017).

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K}{E} \times \frac{DC}{e}}} \quad (5)$$

onde:

K: módulo de elasticidade da água [Pa];

ρ : densidade do fluido [kg/m^3];

E: módulo de elasticidade do material do qual é confeccionado o tubo [Pa];

D: diâmetro da tubulação [m];

e: espessura do tubo [m];

C: fator que leva em conta o modo como o trecho do tubo é ancorado.

Nesse contexto, a ABNT em sua norma 12215-01 de 2017 ainda impõe algumas condições e orientações que são necessárias quanto ao estudo e prevenção do Golpe de Aríete. A pressão mínima para o escoamento permanente deve ser, $P_{\min} \geq 50$ kPa. Considerando um escoamento transiente recomenda-se que as $P_{\max} < P_{\text{adm}}$ da tubulação e as $P_{\min} > P_{\text{atm}}$ (BRASIL, 2017).

Conforme Tullis (1989), a Equação Diferencial Parcial do Movimento (L_1) e a Equação Diferencial Parcial da Continuidade (L_2), são as duas equações utilizadas para análise do Transiente Hidráulico pelo Método das Características.

$$L_1 = \frac{d\dot{V}}{dt} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f\dot{V}|\dot{V}|}{2DA} = 0 \quad (6)$$

$$L_2 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial \dot{V}}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

Sendo (L_1) e (L_2) as equações diferenciais de derivadas parciais, não lineares. Dessa forma, é possível realizar uma combinação linear, por meio de um multiplicador desconhecido (λ), obtendo-se:

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (8)$$

realizando a substituição:

$$\left[\frac{\partial \dot{V}}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial \dot{V}}{\partial x} \right]_I + \lambda gA \left[\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right]_{II} + \frac{f\dot{V}|\dot{V}|}{2DA} = 0 \quad (9)$$

São obtidos dois valores diferentes de zero, reais e distintos para o multiplicador (λ), formando duas equações diferenciais ordinárias, que apresentam as equações originais em

função de (H) e (\dot{V}). Como essas duas variáveis $H_{(x,t)}$ e $\dot{V}_{(x,t)}$ são funções da posição (x) e do tempo (t), o (λ) é dado em função de uma dependência com essas duas variáveis independentes (x) e (t). (SANTOS; CASTRO, 2004).

$$\frac{dx}{dt} = \lambda a^2 = \frac{1}{\lambda} = \lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (10)$$

resulta em:

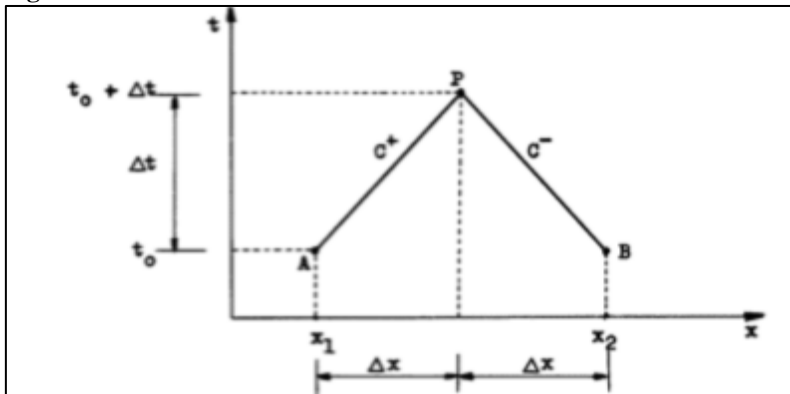
$$\frac{d\dot{V}}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f\dot{V}|\dot{V}|}{2DA} = 0 \quad \text{válida quando,} \quad \frac{dx}{dt} = a \quad (11)$$

e,

$$\frac{d\dot{V}}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f\dot{V}|\dot{V}|}{2DA} = 0 \quad \text{válida quando,} \quad \frac{dx}{dt} = -a \quad (12)$$

É de fácil visualização a solução e desenvolvimento dessas equações no plano (x-t) da Figura 2, em que (x) localiza qualquer ponto no conduto e (t) o instante em que as variáveis dependentes (\dot{V}) e (H) devem ser determinadas.

Figura 2 - Gráfico das Linhas Características



Fonte: Camargo (1991).

A Equação (11) representa a reta (AP) de inclinação $\left(\frac{1}{a}\right)$ e a Equação (12) representa a reta (BP) de inclinação $\left(-\frac{1}{a}\right)$, conhecidas como linhas características positiva e negativa.

Quando conhecidas as condições de todo o conduto em (A) (Figura 2) como $(\dot{V}_A, H_A, x_A e t_A)$, quando $(t = t_0)$. Dessa forma, no instante $(t = t_0 + \Delta t)$ as condições são determinadas por um esquema de diferenças finitas chamadas de Equações da Compatibilidade (C^+) e (C^-). Multiplicando a Equação (11) e a Equação (12) por (dt):

$$\int_A^P d\dot{V} + \frac{gA}{a} \int_A^P dH + \frac{f}{2DA} \int_A^P \dot{V}|\dot{V}|dt = 0 \quad (13)$$

$$\int_B^P d\dot{V} - \frac{gA}{a} \int_B^P dH + \frac{f}{2DA} \int_B^P \dot{V}|\dot{V}|dt = 0 \quad (14)$$

e realizando a integração de (A) à (P) e (B) à (P), se obtém:

$$C^+: (\dot{V}_P - \dot{V}_A) + \frac{gA}{a} (H_P - H_A) + \frac{f\Delta t}{2DA} \dot{V}_A |\dot{V}_A| = 0 \quad (15)$$

$$C^-: (\dot{V}_P - \dot{V}_B) - \frac{gA}{a} (H_P - H_B) + \frac{f\Delta t}{2DA} \dot{V}_B |\dot{V}_B| = 0 \quad (16)$$

sendo estas as equações das linhas características positiva e negativa.

Considera-se (f) como o fator de atrito da tubulação, estabelecido primeiramente pela Correlação de Miller (Equação 17) e em seguida pela Equação de Colebrook (Equação 18).

$$f_0 = 0,25 \left[\log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (17) \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (18)$$

Por fim, o tempo decorrido (Δt),

$$\Delta t = \frac{x}{v} \quad (19)$$

sendo este, o quociente da distância (x) estudada pela velocidade do escoamento permanente.

2.2 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

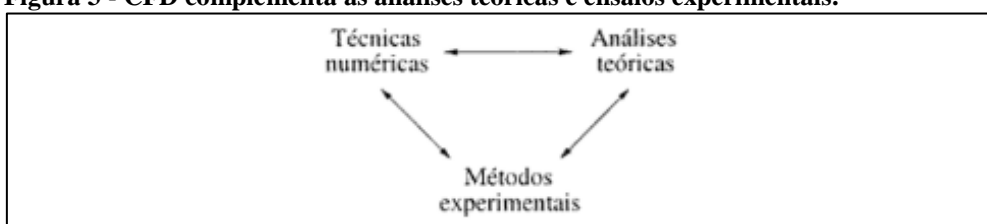
O estudo da dinâmica dos fluidos acresce no decorrer dos séculos. Inicialmente buscava-se somente o estudo experimental do movimento de fluidos em tubulações, conhecida como a hidráulica. Posteriormente com o uso de expressões matemática se estabelece ligações entre a dinâmica e as forças de movimento em fluidos, denominada hidrodinâmica (FORTUNA, 2000).

A hidrodinâmica progrediu com estudos apresentados por Leonard Euler, com suas deduções da Equação do Movimento. Esta foi influente somente depois que Claude Navier (1822), Simeon Poisson (1829) e George Stokes (1845) descreveram a Equação do Movimento e apresentaram a Equação de Navier-Stokes (Schlichting, 1979). Pompeu (2010) ressalta que são limitados os problemas resolvidos pela solução analítica de Navier-Stokes, por se tratar de

equações diferenciais parciais. A qual, a teoria matemática não se apresenta completamente desenvolvida.

O CFD parte de métodos em que ocorre a formulação do problema matemático, para que se tenha a solução a partir do uso de operações aritméticas e lógicas (Chapra, 2013). Dessa forma, Fortuna (2000) reforça que o CFD tem por fim (Figura 3), diminuir o número de testes laboratoriais realizados e possibilitar o estudo de fenômenos cuja possibilidade de serem estudados em laboratório é nula. Com o uso do CFD é possível a avaliação de variados parâmetros do problema, podendo modificá-los até que se tenha o desfecho ideal ou procurado.

Figura 3 - CFD complementa as análises teóricas e ensaios experimentais.



Fonte: Fortuna (2000).

Fortuna (2000) sustenta que com a utilização das análises teóricas e simplificações grosseiras apresentando apenas resultados aproximados, o CFD não substituirá esses métodos, apenas permitirá a redução de tempo com testes experimentais. Até porque, Miguez (2008) complementa que o CFD não está livre de erros, e ainda não substitui completamente a necessidade de experimentos e unidades piloto.

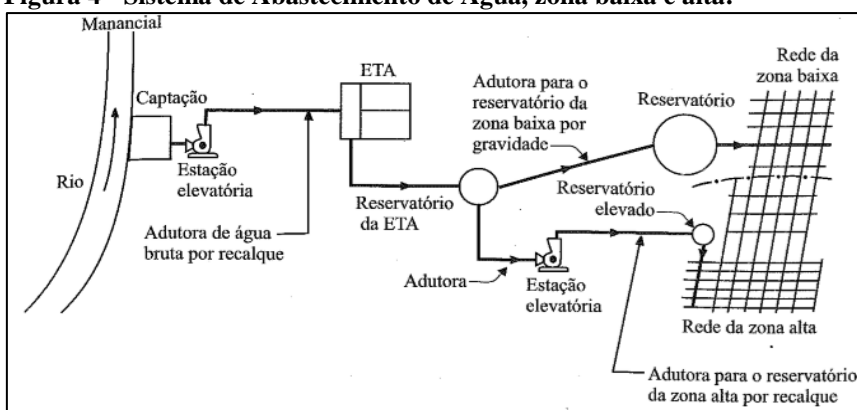
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi possível a identificação de uma adutora recém instalada para o estudo de campo, no decorrer de uma visita durante a última semana do mês de março de 2019 na Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), a qual administra o sistema de distribuição de água para abastecimento público de Santa Catarina. Através de um diálogo com um profissional da área de Engenharia Civil da companhia, verificou-se que a adutora trabalha com sua capacidade limitada por não possuir o dispositivo de proteção anti-golpe principal, (tanque hidropneumático) na tubulação de recalque. Em vista disso, obteve-se o interesse em averiguar o comportamento do fluido na referida adutora.

Após a conversa informal, durante a primeira semana do mês de agosto de 2019 foi realizado a análise do projeto da adutora (CAD), acompanhado de um engenheiro responsável

pela área de projetos, em seu escritório na companhia. Sendo assim, avaliado a tubulação de recalque da adutora, a qual possui aproximadamente 1200 m de comprimento com diâmetro nominal de 250 mm, diâmetro interno de 261,84 mm e espessura de 6,08 mm, fabricado em Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV). Como já mencionado liga a ETA ao reservatório de distribuição para a cidade, funcionando como um reservatório elevado (zona alta) (Figura 4).

Figura 4 - Sistema de Abastecimento de Água, zona baixa e alta.



Fonte: Tsutiya (2006).

A coleta de dados deu-se por meio de uma visita na adutora no mês de outubro de 2019, acompanhado pelo engenheiro civil da companhia citado acima. E assim, utilizando-se de um manômetro instalado na tubulação de recalque da bomba, foi verificado a pressão do escoamento permanente.

As diferenças de nível do terreno foram determinadas com a ajuda de um levantamento planialtimétrico realizado por uma empresa especializada do Oeste de Santa Catarina. E por fim, foi obtido a vazão da bomba com informações do sistema da CASAN, possibilitando o cálculo da velocidade do escoamento permanente (Equação 3).

O objetivo da coleta de dados foi identificar como se encontra a instalação hidráulica, isto é, realizar a análise de contorno, conhecendo as condições de operação da adutora. A partir disso, foi possível realizar a modelagem do escoamento.

Isto posto, partiu-se para a modelagem matemática referida neste artigo, derivando de um conjunto de equações, sendo a Equação do Movimento (Equação 1) e a Equação da Continuidade (Equação 2). As quais são modeladas matematicamente, por meio de condições impostas pela ABNT em sua Norma 12215-1 do ano de 2017. Denotam como necessário a utilização do Método das Características com o objetivo de chegar à equação governante,

conhecida como a Equação das Linhas Características Positiva (Equação 15) e Negativa (Equação 16).

Ademais, utilizando o *software SOLIDWORKS* foi realizado o desenho 3D da adutora, a fim de, importar e efetuar a simulação no *software* computacional de dinâmica de fluidos *ANSYS Fluent R19.2®*, o qual, apresenta resultados muito próximos à realidade.

Analisando o desenvolvimento e a finalidade desta pesquisa, a técnica de análise e interpretação de dados deu-se de forma quantitativa. Primeiramente, foi realizado a aferição da pressão na tubulação de recalque. Em seguida, foram obtidas as condições iniciais do escoamento permanente, realizados os cálculos pelo método analítico (Equações 15 e 16) e a simulação por meio do *software ANSYS Fluent R19.2®*.

Simultaneamente de caráter qualitativo, a qual corresponde na análise e comparação de dados. Verificado, se a pressão de recalque está de acordo com a Norma da ABNT acima citada. Também, realizado a comparação dos resultados obtidos analiticamente de acordo com a modelagem matemática, com a simulação realizada por meio do *software*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a finalidade de alcançar o dimensionamento correto e confiável do sistema hidráulico de adução de água, a ABNT em sua norma 12215-1 de 2017 impõe condições máximas e mínimas de pressão no duto, para escoamentos permanentes e transitórios.

Dessa forma, como o sistema hidráulico não possui o principal dispositivo de proteção ao “Golpe de Aríete” (tanque hidropneumático), não é possível reproduzir um Transiente Hidráulico e aferir a pressão desse escoamento, por questões de segurança. Porém, a pressão do escoamento permanente foi possível verificar, visualizando por meio manômetro instalado na tubulação de recalque da bomba (Figura 5).

Figura 5 - Tomada do manômetro.



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Portanto, a pressão indicada do escoamento permanente em condições normais é de aproximadamente 114 mca, a qual está sujeita a pequenas variações. Realizando a conversão para fins de comparação.

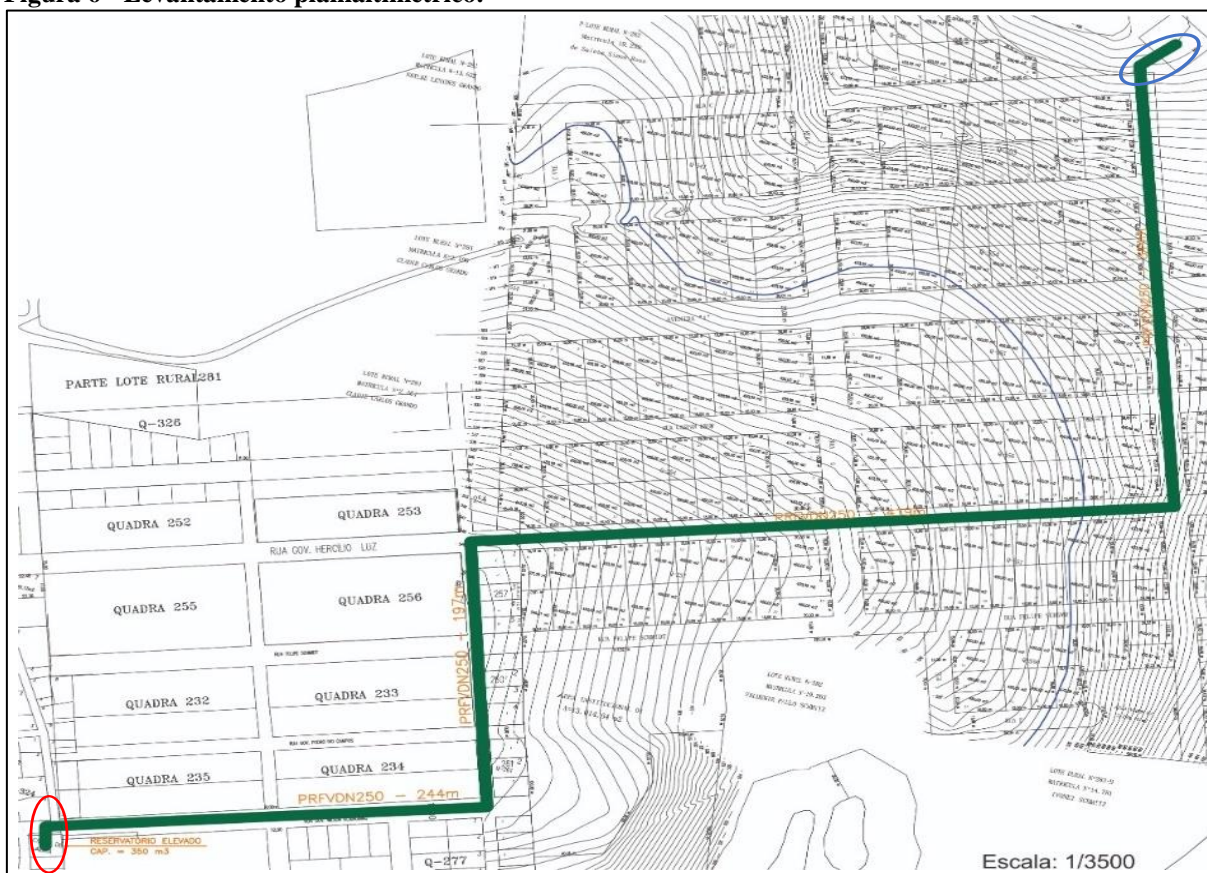
$$\frac{1 \text{ mca}}{114 \text{ mca}} = \frac{0,1 \text{ bar}}{x} \quad x = 11,4 \text{ bar}$$

$$\frac{1 \text{ mca}}{114 \text{ mca}} = \frac{9,8 \text{ kPa}}{x} \quad x = 1117,2 \text{ kPa}$$

À vista disso, a pressão na tubulação de recalque está de acordo com a citação da norma acima mencionada, considerando que a pressão mínima para o escoamento permanente deve ser, $P_{\min} \geq 50 \text{ kPa}$.

Para que a confronto de resultados, analítico e computacional ocorresse com eficácia, foi necessário considerar os desníveis do terreno (Figura 6). Sendo o arquivo (dwg) fornecido por uma empresa especializada, o qual representa (na cor verde) a adutora e suas respectivas dimensões na escala de 1/3500.

Figura 6 - Levantamento planialtimétrico.



Fonte: Adaptado de Mediter (2019).

Considerando 1200 m de comprimento da tubulação, com diâmetro nominal de 250 mm, o diâmetro interno e a espessura foram fornecidos pela CASAN, nesta ordem 261,84 mm e 6,08 mm, fabricado em Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV). O Ponto mais baixo está localizado no ETA (ponto azul) com aproximadamente 412 m, já o ponto mais alto é exatamente no reservatório elevado, considerado 555 m (ponto vermelho) (Figura 6). Dessa forma, a diferença total de níveis é de aproximadamente 143 m.

Ademais, a vazão do sistema hidráulico da CASAN foi visualizada por meio do supervisor, considerando-se $\dot{V} = 0,058 \text{ m}^3/\text{s}$. Utilizou-se da Equação 3, juntamente com o cálculo da área de um cilindro, para determinar-se a velocidade do escoamento permanente.

$$\dot{V} = v \times A \quad 0,058 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = v \times \left(\frac{\pi \times (0,26184 \text{ m})^2}{4} \right) \quad v = 1,074 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Com a modelagem matemática realizada anteriormente neste artigo e todos os dados coletados, desenvolve-se os cálculos pelo método analítico. Primeiramente, efetuado o cálculo

da celeridade (Equação 5). De forma, que as informações necessárias ao cálculo estão expostas na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados para o cálculo da celeridade

Parâmetro	Valor
K - Módulo de elasticidade volumétrica da água	2,27x10 ⁹ Pa
ρ - Massa específica da água	997 kg/m ³
E - Módulo de elasticidade do PRFV	10000 Pa
D - Diâmetro do duto	0,26184 m
e - Espessura do duto	6,08x10 ⁻³ m
ν - Coeficiente de Poisson do PRFV	0,3
C - Constante de como o trecho do tubo é ancorado	0,91
μ - Viscosidade dinâmica	0,89x10 ⁻³ N.s/m ²

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Portanto,

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K}{E} \times \frac{DC}{e}}} \quad a = \sqrt{\frac{\frac{2,27 \times 10^9 Pa}{997 \frac{kg}{m^3}}}{1 + \frac{2,27 \times 10^9 Pa}{10000 Pa} \cdot \frac{0,26184 m \times 0,91}{6,08 \times 10^{-3} m}}} \quad a = 0,51 \frac{m}{s}$$

A partir disso, o fator de atrito pode ser determinado. Inicialmente, utiliza-se a Equação 4 e calcula-se o número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} \quad Re = \frac{997 \frac{kg}{m^3} \times 1,074 \frac{m}{s} \times 0,26184 m}{0,89 \times 10^{-3} \frac{Ns}{m^2}} \quad Re = 314912$$

Em seguida para um escoamento turbulento, emprega-se a Correlação de Miller (Equação 17) para o “chute” inicial, e realizando-se duas iterações com a Equação de Colebrook (Equação 18) o fator de atrito pode ser determinado,

$$f_0 = 0,25 \left[\log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad f_0 = 0,25 [\log(0,031 + 64,65 \times 10^{-6})] \quad f_0 = 0,015472$$

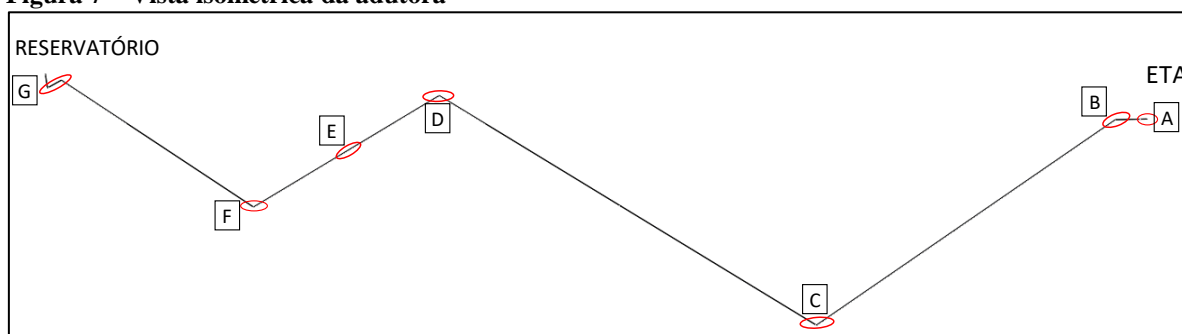
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{114,57 \times 10^{-3}}{3,7} + \frac{2,51}{4,87 \times 10^3} \right) \quad f_2 = 0,0155$$

sendo (ε) a rugosidade do tubo, fornecido pelo fabricante.

Com todos os valores de constantes definidos, é possível com as Equações das Linhas Características Positiva (Equação 15) e Negativa (Equação 16), que a ABNT impõe como necessário em sua Norma 12215-1 do ano de 2017, identificar os pontos críticos do sistema, e assim, confrontar os dados com o modelo computacional.

No entanto, para realizar as simulações em *software*, primeiramente foi desenvolvido o desenho 3D da adutora com os dados citados acima fornecidos pela CASAN, utilizando-se do *software* *SOLIDWORKS* (Figura 7).

Figura 7 – Vista isométrica da adutora



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Dessa forma, para facilitar o confronto de dados entre os dois métodos, o sistema hidráulico foi nomeado da ETA até o reservatório elevado (pontos de A à G). A análise foi realizada comparando os resultados encontrados entre os pontos representados acima.

Os parâmetros iniciais para a simulação no *software* *ANSYS Fluent R19.2®* estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros para simulação

Parâmetro	Valor
Pressão na ETA	1117,2 kPa
Velocidade inicial	1,074 m/s
Pressão no reservatório	101,325 kPa

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Através das Equações 15 e 16, as quais são expressas em termos de vazão (m^3/s), a intensidade da turbulência nos pontos pode ser determinada.

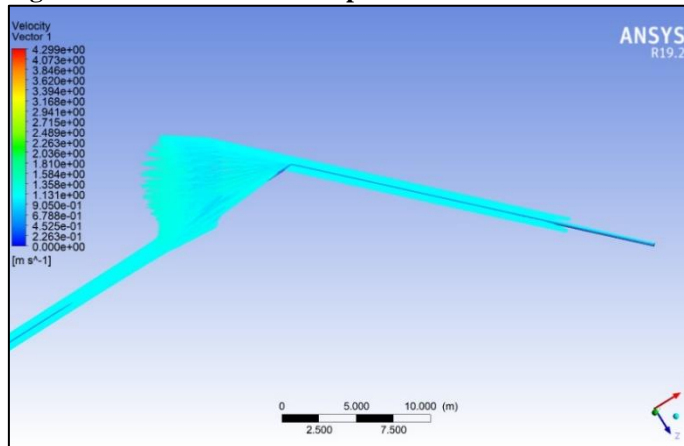
Segundo a Figura 7, os pontos A à B apresentam uma variação de vazão como descrito abaixo, do qual, o sinal de menos representa o retorno da onda,

$$C^+: 1,039 \frac{m^2}{s} (115 - 112)m + \frac{0,0155 \times 23,28 s}{0,0283 m^3} 0,0034 \frac{m^6}{s^2} = 0 \quad C^+ = 3,18 \frac{m^3}{s}$$

$$C^-: -1,039 \frac{m^2}{s} (115 - 112)m + \frac{0,0155 \times 23,28 s}{0,0283 m^3} 0,0034 \frac{m^6}{s^2} = 0 \quad C^- = -3,089 \frac{m^3}{s}$$

relacionando o método analítico com o computacional, a Figura 8 demonstra a pequena variação de vazão desses pontos, mediante a análise dos vetores velocidade.

Figura 8 - Vetores velocidade pontos A à B



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

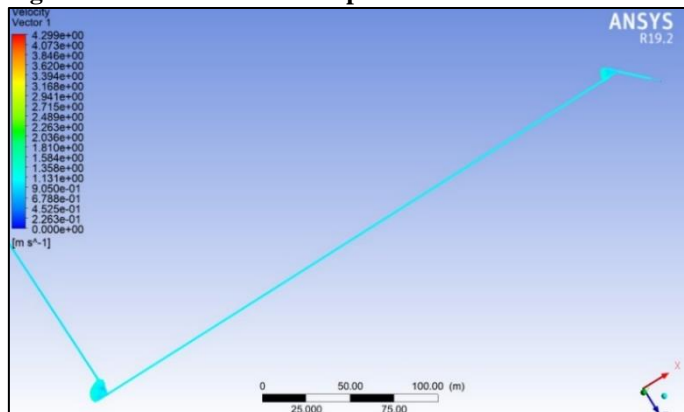
Em seguida, entre os pontos B e C (Figura 7),

$$C^+: 1,039 \frac{m^2}{s} (440 - 415)m + \frac{0,0155 \times 320 s}{0,0283 m^3} 0,0034 \frac{m^6}{s^2} = 0 \quad C^+ = 26,69 \frac{m^3}{s}$$

$$C^-: -1,039 \frac{m^2}{s} (440 - 415)m + \frac{0,0155 \times 320 s}{0,0283 m^3} 0,0034 \frac{m^6}{s^2} = 0 \quad C^- = -25,51 \frac{m^3}{s}$$

verifica-se com os cálculos acima e a simulação (Figura 9), que os pontos apresentam uma turbulência média ao longo da tubulação.

Figura 9 - Vetores velocidade pontos B à C



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

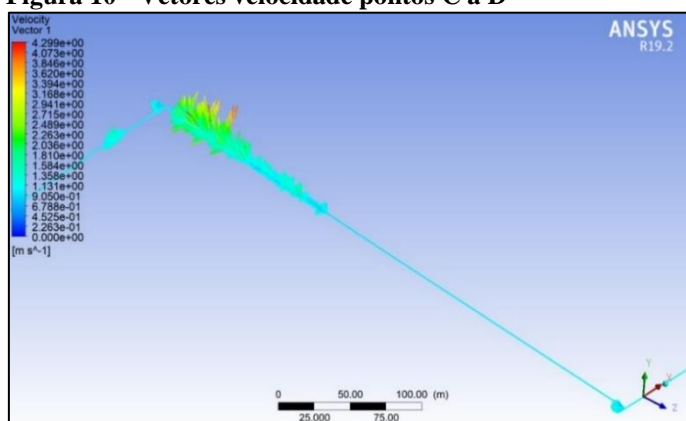
Com relação aos pontos que possuem o maior comprimento do sistema hidráulico (Pontos de C à D, Figura 7), é obtido valores altos de vazão e uma turbulência elevada,

$$C^+ : 1,039 \frac{m^2}{s} (495 - 440)m + \frac{0,0155 \times 389,77 s}{0,0283 m^3} 0,0034 \frac{m^6}{s^2} = 0 \quad C^+ = 58,15 \frac{m^3}{s}$$

$$C^- : -1,039 \frac{m^2}{s} (495 - 440)m + \frac{0,0155 \times 389,77 s}{0,0283 m^3} 0,0034 \frac{m^6}{s^2} = 0 \quad C^- = -56,71 \frac{m^3}{s}$$

as quais, podem ser verificados como um ponto crítico, apresentando uma grande variação dos vetores velocidade (Figura 10) e consequentemente de pressão.

Figura 10 - Vetores velocidade pontos C à D



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Para os pontos de D à E (Figura 7), o método analítico apresenta,

$$C^+ : 1,039 \frac{m^2}{s} (497 - 495)m + \frac{0,0155 \times 91,45 s}{0,0283 m^3} 0,0034 \frac{m^6}{s^2} = 0 \quad C^+ = 2,26 \frac{m^3}{s}$$

$$C^- : -1,039 \frac{m^2}{s} (497 - 495)m + \frac{0,0155 \times 91,45 s}{0,0283 m^3} 0,0034 \frac{m^6}{s^2} = 0 \quad C^- = -1,92 \frac{m^3}{s}$$

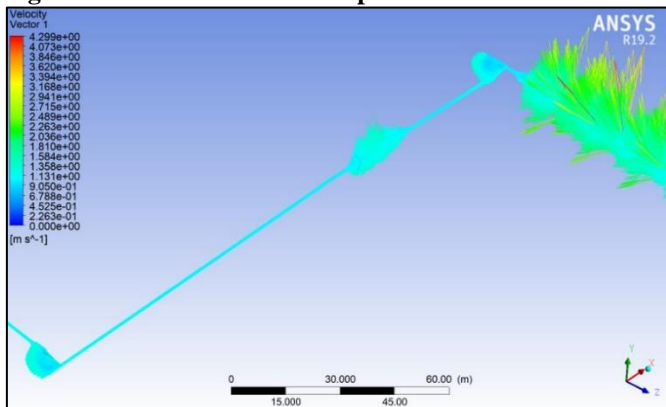
considera-se os pontos de E à F (Figura 7) com as mesmas distâncias dos pontos acima, apenas ocorrendo um declive da tubulação.

$$C^+ : 1,039 \frac{m^2}{s} (495 - 497)m + \frac{0,0155 \times 91,45 s}{0,0283 m^3} 0,0034 \frac{m^6}{s^2} = 0 \quad C^+ = -1,92 \frac{m^3}{s}$$

$$C^- : -1,039 \frac{m^2}{s} (495 - 497)m + \frac{0,0155 \times 91,45 s}{0,0283 m^3} 0,0034 \frac{m^6}{s^2} = 0 \quad C^- = 2,26 \frac{m^3}{s}$$

Percebe-se a ocorrência de uma leve alteração dos vetores velocidade devido ao ponto de aclave (Ponto E), e sucessivamente no declive o escoamento se estabiliza (Figura 11).

Figura 11 - Vetores velocidade pontos D à E e E á F



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

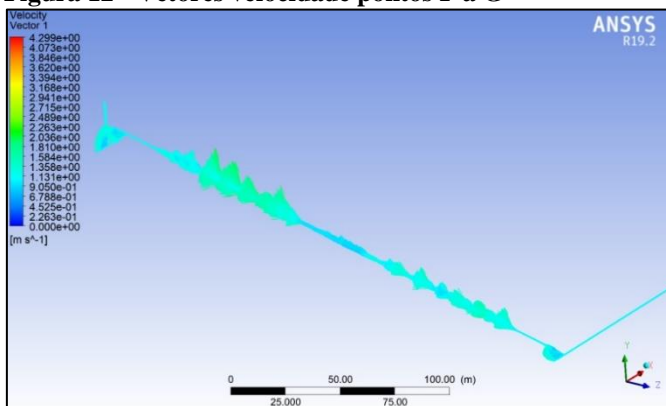
Por fim, os pontos F à G (Figura 7) que ligam ao reservatório,

$$C^+ : 1,039 \frac{m^2}{s} (555 - 495)m + \frac{0,0155 \times 226,53 s}{0,0283 m^3} 0,0034 \frac{m^6}{s^2} = 0 \quad C^+ = 63,07 \frac{m^3}{s}$$

$$C^- : -1,039 \frac{m^2}{s} (555 - 495)m + \frac{0,0155 \times 226,53 s}{0,0283 m^3} 0,0034 \frac{m^6}{s^2} = 0 \quad C^- = -62,23 \frac{m^3}{s}$$

são os pontos com a maior variação da vazão ao longo de todo o percurso (Figura 12).

Figura 12 -Vetores velocidade pontos F à G



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Como apresentado anteriormente, nota-se nos pontos as diferentes variações de velocidade analisadas do escoamento. Segundo Amoah e Elbashir (2007), com essa variação o escoamento passa a ser transiente, em que as variáveis velocidade média (v) e pressão (P) variam com o tempo (t) ao longo do duto (x), até o escoamento retornar ao estado permanente.

À vista disso, a simulação pelo método numérico apresenta nas imagens acima em sua legenda uma velocidade máxima do escoamento de $v = 4,299$ m/s a qual, é verificada na Figura 10 por meio dos vetores na cor vermelha.

Visando confrontar os resultados, analítico e computacional primeiramente nos principais pontos do sistema hidráulico, os quais apresentaram a maior turbulência. Essencialmente, é necessário determinar a vazão do escoamento, utilizando-se a Equação 3, a área da tubulação e a velocidade citada acima avaliada no *software*.

Para os pontos entre C e D (Figura 7),

$$\dot{V} = v \times A \quad \dot{V} = 4,299 \frac{m}{s} \times \left(\frac{\pi \times (0,26184 m)^2}{4} \right) \quad \dot{V} = 0,231 \frac{m^3}{s}$$

Com relação aos pontos F à G (Figura 7), é considerado uma velocidade menor por consequência do gradiente de cor dos vetores avaliado na simulação (Figura 12). Mesmo assim, atribuindo-se as piores condições.

$$\dot{V} = v \times A \quad \dot{V} = 3,168 \frac{m}{s} \times \left(\frac{\pi \times (0,26184 m)^2}{4} \right) \quad \dot{V} = 0,171 \frac{m^3}{s}$$

Percebe-se de imediato (Tabela 3) que os resultados apresentados pelos dois métodos acabam sendo desiguais, devido as simplificações realizadas no método analítico. Por mais que se utilize do Método das Características para a resolução das equações diferenciais parciais, de acordo com Pompeu (2010) os problemas resolvidos por essas equações são limitados, pois a teoria matemática não se apresenta completamente desenvolvida.

Tabela 3 - Confronto de resultados, pontos de maior comprimento e turbulência

	Pontos C à D	Pontos F à G
Método analítico	58,15 m ³ /s	63,07 m ³ /s
Método computacional	0,231 m ³ /s	0,171 m ³ /s

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Diferente do método computacional, o qual, quando possui uma malha de boa qualidade e pela quantidade de iterações fornece resultados precisos, o método analítico se torna um estudo trabalhoso devido ao fato do tamanho da tubulação ser bastante significativo. Dessa maneira, os cálculos foram realizados considerando a distância total entre pontos com apenas uma iteração com as equações, evitando assim, maiores simplificações e aproximações.

Entretanto, para os pontos de menor comprimento do sistema hidráulico, pontos de A à B e D à E (Figura 7), considerando a velocidade analisando o gradiente de cores, na ordem 1,584 m/s (Figura 8) e 2,489 m/s (Figura 11).

$$\dot{V} = v \times A \quad \dot{V} = 1,584 \frac{m}{s} \times \left(\frac{\pi \times (0,26184 m)^2}{4} \right) \quad \dot{V} = 0,09 \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{V} = v \times A \quad \dot{V} = 2,489 \frac{m}{s} \times \left(\frac{\pi \times (0,26184 m)^2}{4} \right) \quad \dot{V} = 0,13 \frac{m^3}{s}$$

Também sendo realizada apenas uma iteração com as equações das Linhas Características, porém confrontando os dois métodos chegou-se a resultados mais aproximados (Tabela 4).

Tabela 4 - Confronto de resultados, pontos com os menores comprimentos

	Pontos A à B	Pontos D à E
Método analítico	3,18 m ³ /s	2,26 m ³ /s
Método computacional	0,09 m ³ /s	0,13 m ³ /s

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Enfim, conforme Fortuna (2000), o CFD não substituirá as análises teóricas que apresentam resultados aproximados, apenas proporciona uma redução de tempo com cálculos trabalhosos. Até porque, de acordo com Miguez (2008), o *software* também é exposto a erros e ainda não substituirá completamente a necessidade de experimentos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os estudos realizados, a variação de vazão neste caso ocorre devido a alteração de valores dos vetores velocidade ao longo da tubulação em um escoamento transiente, conseqüentemente quando ocorre variação da velocidade a pressão também sofre oscilações.

A pressão indicada no recalque da bomba foi verificada segundo a Norma 12215-01 do ano de 2017 da ABNT, a qual impõe valores máximos e mínimos. Salienta-se que não se objetivou realizar um estudo analítico exaustivo, mas tão somente para fornecer recursos para um confronto de dados. Assim, foi explanada a concepção analítica do equacionamento do Transiente Hidráulico, e posteriormente, formulados pontos referentes a fluidodinâmica computacional, onde foi empregado o *software ANSYS Fluent R19.2®*.

A pressão no recalque foi apresentada considerando-se um escoamento permanente, em que, a mesma atende condições impostas pela Norma acima citada. Em relação ao confronto de dados, a análise foi realizada tendo em vista variações no campo de vazão, considerando uma

parada inesperada da bomba. Confrontando os dados experimentais com o método numérico, apesar de apresentarem discrepância entre os valores encontrados nos pontos com os maiores comprimentos do sistema por questões de simplificações e que foi realizada apenas uma iteração entre os pontos, ademais o método numérico refina os resultados, por meio da qualidade da malha gerada. Todavia, foi possível validar o método utilizado, sendo que nos pontos de menor comprimento, mesmo realizando apenas uma iteração com as equações características os valores de vazão se aproximaram.

Embora haja diferenças entre os resultados encontrados pelo método analítico e o computacional, o comportamento de um “Golpe de Aríete” é verificado por meio dos contornos de velocidade graficamente expressos, coincidindo com o apresentado na literatura ao longo deste trabalho. Complementa-se que os resultados atingidos são satisfatórios.

Por fim, como sugestão de trabalhos futuros, aponta-se a análise e a simulação do Transiente Hidráulico com a instalação de um dispositivo de proteção tanque hidropneumático verificando sua eficiência em atenuar as ondas de pressão.

REFERÊNCIAS

AMOAHA, S. O. K.; ELBASHIR, M. A. M. **Hydraulic Transient in a Pipeline Using Computer Model to Calculate and Simulate Transient**. Lund: Thesis (Master of Science)-Division of Water Resources, Department of Building and Environmental Technology, Lund University, 2007.

BECKEITH, S.; CHASE, D. V.; WALTER, G.; KOELLE, E.; METHODS, H.; SAVIC, D. A.; WALSKY, T. M. **Advanced Water Distribution Modeling and Management**. 1ª. ed. Waterbury: Haestad Press, 1992.

BOULOS, P.; KARNEY, B.; LINGIREDDY, S.; WOOD, D. Hydraulic Transient Guidelines for Protecting Water Distribution Systems. **Journal AWWA**, p. 111-124, maio 2005.

BRASIL. **NBR 12215-1 Projeto de adutora de água para abastecimento público: Conduto forçado**. Rio de Janeiro. 2017.

CAMARGO, L. A. O Golpe de Aríete em Conduitos - Análise Pelo Método das Características. **XVI Encontro de Engenheiros de Assistência Técnica**, Joinville, n. 16, Out. 1991.

CHAPRA, S. C. **Applied Numerical Methods With MATLAB for engineers and scientists**. Tradução de Rafael Silva Alípio. 3ª. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2013.

CHAUDHRY, M. H. **Applied Hydraulic transients**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1979.

- FORTUNA, A. D. O. **Técnicas Computadoracionais para Dinâmica dos Fluidos**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2000. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=J9CXhlB96skC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 20 abr. 2019.
- MASIERO JUNIOR, A. **Análise de Transientes Hidráulicos em uma Adutora Utilizando o Métodos das Características**. Florianópolis: (Projeto de Final de Curso) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- MEDITER. **Mediter Serviços de Eng e Topografia Ltda**. Chapecó: [s.n.], 2019.
- MIGUEZ, F. **Estudo em CFD do escoamento de líquido e da geração de área efetiva em recheios**. Rio de Janeiro: (Projeto de Final de Curso) - Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria, UFRJ/EQ, 2008.
- POMPEU, R. C. **Simulação Numérica e Visualização 3D Interativa de Objetos Sob Fluxos Irrotacionais em Tempo Quase-Real**. Curitiba: Tese (Doutorado) - Curso de Mecânica Computacional, Universidade Federal do Paraná, 2010.
- SANTOS, ; CASTRO, A. H. **Modelagem Computacional de Transientes Hidráulicos em Sistemas de Recalque**. João Pessoa - PB: IV SEREA – Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água., 2004.
- SCHLICHTING, H. **Boundary-Layer Theory**. Tradução de J. Kestin. 7º. ed. New York: McGraw-Hill, 1979.
- TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 3ª. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- TULLIS, J. P. **Hydraulics of Pipelines: Pumps, Valves, Cavitation, Transients**. Utah State: John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. **Fluid Transients**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1979.