



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



ALISSON GARCEZ SOUSA

APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS PARA ESTUDO DE  
TRANSIENTE HIDRÁULICO

Uberlândia  
2023

ALISSON GARCEZ SOUSA


APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS PARA ESTUDO DE  
TRANSIENTE HIDRÁULICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Professora Dra. Alice Rosa da Silva

Uberlândia  
2023

ALISSON GARCEZ SOUSA

Documento assinado digitalmente  
 ALISSON GARCEZ SOUSA  
Data: 03/05/2023 22:27:21-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

## APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS PARA ESTUDO DE TRANSIENTE HIDRÁULICO


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Uberlândia, 14 de abril de 2023

### BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Alice Rosa da Silva  
Universidade Federal de Uberlândia

Documento assinado digitalmente  
 ALICE ROSA DA SILVA  
Data: 04/05/2023 12:09:37-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Msc. Iridalques Fernandes de Paula  
Universidade Federal de Uberlândia

Iridalques  
Fernandes de  
Paula  
Assinado de forma digital por Iridalques Fernandes de Paula  
Dados: 2023.05.08 11:23:15 -03'00'

---

Bruno de Oliveira Lázaro  
Universidade Federal de Uberlândia

Documento assinado digitalmente  
 BRUNO DE OLIVEIRA LAZARO  
Data: 04/05/2023 12:32:52-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

|              |   |
|--------------|---|
| S725<br>2023 | <p>Sousa, Alisson Garcez, 2000-<br/>Aplicação do Método das Características Para Estudo de<br/>Transiente Hidráulico [recurso eletrônico] / Alisson<br/>Garcez Sousa. - 2023.</p> <p>Orientadora: Alice Rosa da Silva.<br/>Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -<br/>Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em<br/>Engenharia Civil.<br/>Modo de acesso: Internet.<br/>Inclui bibliografia.<br/>Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia civil. I. Silva, Alice Rosa da, 1971-,<br/>(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia.<br/>Graduação em Engenharia Civil. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 624</p> |
|--------------|---|

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

## RESUMO

A necessidade de água para o ser humano desempenhar suas atividades é notada desde as primeiras civilizações. As obras para abastecimento das populações foram se modernizando com o tempo e o conjunto delas é chamado Sistema de Abastecimento de Água, regulamentado por diversas normas para que ele cumpra requisitos de desempenho próprios. Um dos fatores a ser avaliado nos projetos de adutoras e redes de abastecimento de água é o transiente hidráulico ou golpe de aríete, que é a variação súbita de pressão em uma tubulação, chamada sobrepressão quando há aumento da pressão inicial e subpressão quando há diminuição, e pode causar graves danos a ela, como até mesmo o rompimento ou o colapso. Assim, este trabalho visa detalhar o método das características, muito usado para determinação dos transientes hidráulicos, apresentar as principais causas e consequências desse tipo de fenômeno e exemplificar o uso de um software gratuito criado para ser simples e direto para que profissionais de engenharia façam uso sem necessitarem de contato prévio com esse tipo de programa.

**Palavras-chave:** Golpe de Aríete; Método das características; Transiente hidráulico.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 — Transiente hidráulico na posição $x$ do sistema .....                         | 12 |
| Figura 2 — Matriz elétrica brasileira em 2020 .....                                      | 13 |
| Figura 3 — Fluxograma para controle do golpe de aríete em sistemas de distribuição ..... | 15 |
| Figura 4 — Chaminé de equilíbrio em uma adutora .....                                    | 17 |
| Figura 5 — Tanque de alimentação unidirecional .....                                     | 18 |
| Figura 6 — Notação para equação do movimento .....                                       | 19 |
| Figura 7 — Notação para equação da continuidade .....                                    | 22 |
| Figura 8 — Linhas características no plano $x,t$ .....                                   | 26 |
| Figura 9 — Reservatório de nível constante à montante .....                              | 28 |
| Figura 10 — Válvula à jusante do escoamento .....  | 31 |
| Figura 11 — Gráficos $T$ x $t$ para manobras de válvula à jusante .....                  | 31 |
| Figura 12 — Elementos básicos do Allieve .....   | 33 |
| Figura 13 — Reservatórios do Allieve .....   | 33 |
| Figura 14 — Válvulas do Allieve .....  | 33 |
| Figura 15 — Dispositivos de proteção do Allieve .....                                    | 34 |
| Figura 16 — Sistema montado para exemplificação .....                                    | 34 |
| Figura 17 — Configuração do reservatório .....   | 34 |
| Figura 18 — Configuração do tubo do problema .....                                       | 35 |
| Figura 19 — Cálculo da celeridade .....  | 35 |
| Figura 20 — Configuração da válvula de esfera .....                                      | 36 |
| Figura 21 — Manobra da válvula de esfera .....   | 36 |
| Figura 22 — Menu de opções para resultados do cálculo transitório .....                  | 37 |
| Figura 23 — Gráfico de envolventes .....   | 37 |
| Figura 24 — Pressão x tempo no ponto imediatamente à montante da válvula .....           | 38 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|     |                                     |
|-----|-------------------------------------|
| NBR | Norma Brasileira                    |
| TAU | Tanque de Alimentação Unidirecional |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|               |                                       |
|---------------|---------------------------------------|
| $\gamma$      | Peso específico do fluido             |
| $\rho$        | Massa específica                      |
| $\varepsilon$ | Deformação                            |
| $\sigma$      | Tensão radial                         |
| $\tau$        | Período da tubulação                  |
| $V$           | Volume de fluido                      |
| $A$           | Área de seção transversal de conduto  |
| $A_v$         | Área de abertura de uma válvula       |
| $c$           | Celeridade                            |
| $D$           | Diâmetro de conduto circular          |
| $E$           | Módulo de elasticidade / de Young     |
| $e$           | Espessura de parede da tubulação      |
| $f$           | Fator de atrito                       |
| $g$           | Aceleração da gravidade               |
| $H$           | Carga hidráulica                      |
| $K$           | Módulo de elasticidade volumétrico    |
| $k$           | Coefficiente de perdas localizadas    |
| $L$           | Comprimento da tubulação              |
| $P$           | Pressão                               |
| $Q$           | Vazão de fluido                       |
| $r$           | Raio do conduto circular              |
| $t$           | Tempo de manobra                      |
| $V$           | Velocidade de fluido em uma tubulação |
| $x$           | Posição de um ponto específico        |
| $z$           | Cota de um ponto                      |



## SUMÁRIO

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | 8  |
| 2     | <b>OBJETIVOS</b> .....   | 10 |
| 3     | <b>TRANSIENTES HIDRÁULICOS</b> .....                           | 11 |
| 3.1   | CARACTERIZAÇÃO DOS FENÔMENOS TRANSIENTES.....                  | 11 |
| 3.2   | PROBLEMAS ASSOCIADOS AOS TRANSIENTES HIDRÁULICOS.....          | 14 |
| 3.3   | MÉTODOS PARA AMENIZAÇÃO DOS FENÔMENOS TRANSIENTES              | 14 |
| 3.3.1 | <b>Prevenção do golpe de aríete</b> .....                      | 16 |
| 3.3.2 | <b>Influência da inércia das bombas</b> .....                  | 16 |
| 3.3.3 | <b>Chaminé de equilíbrio</b> .....                             | 16 |
| 3.3.4 | <b>Tanque de Alimentação Unidirecional</b> .....               | 17 |
| 3.3.5 | <b>Válvulas de alívio de pressão e de admissão de ar</b> ..... | 18 |
| 4     | <b>CÁLCULO DO GOLPE DE ARÍETE</b> .....                        | 19 |
| 4.1   | EQUAÇÃO DO MOVIMENTO .....                                     | 19 |
| 4.2   | EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE .....                                  | 21 |
| 4.3   | MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS.....                                | 25 |
| 4.4   | INTERPRETAÇÃO GRÁFICA .....                                    | 26 |
| 4.5   | CONDIÇÕES DE CONTORNO.....                                     | 27 |
| 4.5.1 | <b>Reservatório de nível constante à montante</b> .....        | 28 |
| 4.5.2 | <b>Válvula à jusante</b> .....                                 | 29 |
| 4.5.3 | <b>Orifício à jusante do escoamento</b> .....                  | 31 |
| 5     | <b>USO DE SOFTWARE PARA CÁLCULO DO GOLPE DE ARÍETE</b> .....   | 33 |
| 5.1   | ÁREA DE TRABALHO DO ALLIEVE.....                               | 32 |
| 5.2   | EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO ALLIEVE .....                         | 34 |
| 5.3   | RESULTADOS DA SIMULAÇÃO .....                                  | 36 |
| 6     | <b>CONCLUSÃO</b> .....   | 40 |
|       | <b>REFERÊNCIAS</b> .....                                       | 40 |

## 1 INTRODUÇÃO

O ser humano necessita de água para desempenhar diversas tarefas no seu cotidiano e desde quando as atividades agrícolas começaram a ser desenvolvidas, os povos passaram a fixar-se em vilas e foi notada a necessidade de obras para suprir às necessidades de água para a população, os animais e a irrigação, cerca de 5000 a 4000 anos A.C.. No Brasil, o Rio de Janeiro foi a primeira cidade a ter um sistema de abastecimento de água, com as obras iniciadas em 1673 e em 1723 foi construído o seu primeiro aqueduto, aduzindo águas do rio Carioca para o chafariz público (TSUTIYA, 2006).

O conjunto de obras, equipamentos e serviços destinados ao abastecimento de água potável para uma população é chamado Sistema de Abastecimento de Água. Esse sistema deve garantir água em quantidade, qualidade e confiabilidade adequada aos requisitos normativos e aos fins a que se destina (NETTO; FERNÁNDEZ, 2018). No Brasil, a norma técnica NBR 12215/2017 – Projeto de adutora de água para abastecimento público estabelece requisitos para as adutoras de água, parte do sistema de abastecimento de água, que interliga as diversas partes dele.

Para o projeto das adutoras e redes de abastecimento de água, diversos fatores devem ser avaliados e estudados, de modo que o resultado se enquadre no esperado pelas boas práticas de engenharia. Um desses fatores é o fenômeno chamado Golpe de Aríete ou Martelo Hidráulico, que consiste na variação súbita de pressão em uma tubulação, caracterizada por ser conduto forçado, e pode ser entendido como uma “pancada” sofrida pela tubulação, segundo Netto e Fernández (2018).

Essa ocorrência trata-se de um transiente hidráulico por ser um caso em que um fenômeno ondulatório percorre a tubulação numa velocidade em função do módulo de elasticidade volumétrico da água e do material da tubulação, causando sobrepressão e/ou subpressão nos condutos. As principais causas do golpe de aríete são o fechamento ou a abertura de válvulas, a partida ou parada de bombas ou turbinas, a interrupção no fornecimento de energia elétrica, o rompimento ou a obstrução de uma secção de tubo e a presença de bolsões de ar ou vapor na tubulação (NETTO; FERNÁNDEZ, 2018).

De acordo com Boulos *et al.* (2005), a análise detalhada dos transientes hidráulicos requer uma descrição quantitativa adequada. Seguindo a 2ª Lei de Newton, também chamada equação do movimento, e a lei da conservação da massa, foram desenvolvidas equações gerais que representam bem o fenômeno de propagação da onda no sistema de distribuição durante o transiente hidráulico.

Quando se deseja soluções mais precisas quanto aos efeitos do golpe de aríete, as equações gerais não se aplicam, uma vez que elas negligenciam ou simplificam as condições de contorno e de resistência do tubo. Assim, quando é desejado incluir elementos presentes ao longo da tubulação, como válvulas e tanques, métodos numéricos se fazem necessários para a solução das equações (BOULOS *et al.*, 2005).

O método numérico mais conhecido e usado é chamado Método das Características, desenvolvido por Riemann em 1860 e aperfeiçoado por vários pesquisadores até a proposta apresentada por Gray em 1953, considerada a mais precisa na sua representação. Todos os métodos das características convertem duas equações diferenciais parciais do movimento e continuidade em quatro equações diferenciais que são expressas em formas de diferenças finitas (BOULOS *et al.*, 2005).

A solução de métodos numéricos é possível ao serem utilizadas ferramentas computacionais que obtém soluções matemáticas aplicando iterações ou repetições para obter o resultado mais preciso possível. Tendo isso em vista, o Allieve é um programa que permite analisar e verificar os efeitos transitórios de manobras efetuadas no sistema hidráulico, desde que o utilizador tenha conhecimentos básico em hidráulica e não é necessária experiência com softwares similares.

Diante disso, este trabalho visa estudar os efeitos dos transientes hidráulicos em sistemas de distribuição, analisar a aplicação do Método das Características na solução matemática desse tipo de fenômeno e aplicar o método pelo software Allieve, buscando a obtenção de resultados confiáveis para os valores de sobrepressão e subpressão.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é descrever o comportamento matemático do golpe de aríete e avaliar o uso de um software, que aplica o método das características, na solução desse tipo de problema.

Além disso, será feita a caracterização dos transientes hidráulicos e seus métodos de avaliação mais comuns, somado a exemplificação de danos causados a rede por esse fenômeno e formas de evitá-lo.

### 3 TRANSIENTES HIDRÁULICOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS FENÔMENOS TRANSIENTES

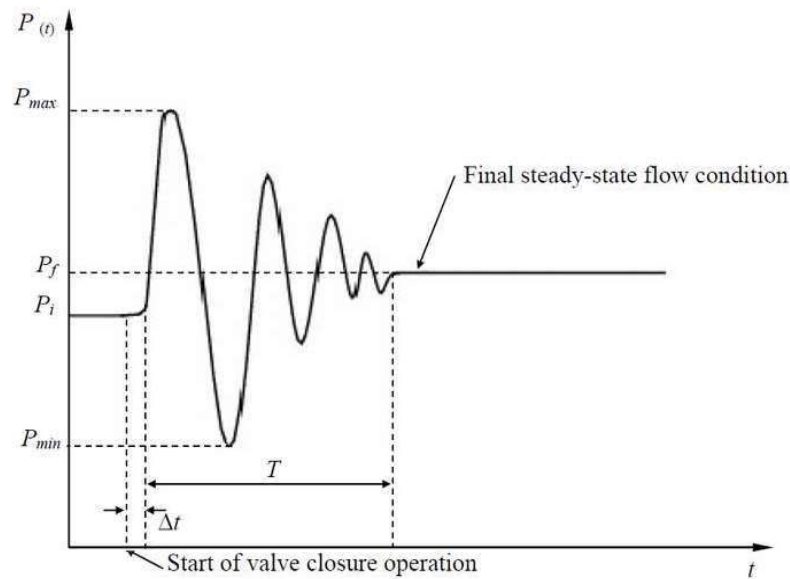
Desde as civilizações mais antigas conhecidas, a exemplo das ancestrais chinesas, maias e egípcias, são desenvolvidas formas de usar a água para atender às necessidades humanas, primeiramente para irrigação e depois para o abastecimento doméstico. As leis de Newton, do século XVII mudaram a concepção básica a respeito dos fluidos e permitiram o desenvolvimento da engenharia hidráulica como um todo. Hoje, na era dos supercomputadores, o estudo e entendimento dos princípios relacionados à essa engenharia são constantemente aperfeiçoados, de modo que a humanidade esteja em um período sem precedentes de acumulação de conhecimento (GHIDAOU et al., 2005).

De acordo com Elbashir e Amoah (2007), os sistemas de controle de fluxo integrados ao sistema de abastecimento de água, como fechamento de válvulas ou início e parada de bombas, podem causar danos graves à tubulação em casos de manobras operadas muito rapidamente.

As operações anteriormente citadas causam variação de descarga que acarretam na variação de pressão no conduto, que é a caracterização do Golpe de Aríete. Outra definição apropriada para o fenômeno é a sobrepressão/subpressão causada por alguma ocorrência transitória no escoamento em função da alteração de uma grandeza definidora dele. A energia de pressão que resulta do golpe de aríete é convertida em trabalho de compressão do fluido e deformação das paredes dos tubos, conexões e válvulas dos locais por onde a onda de sobrepressão se propaga (MACINTYRE, 1997).

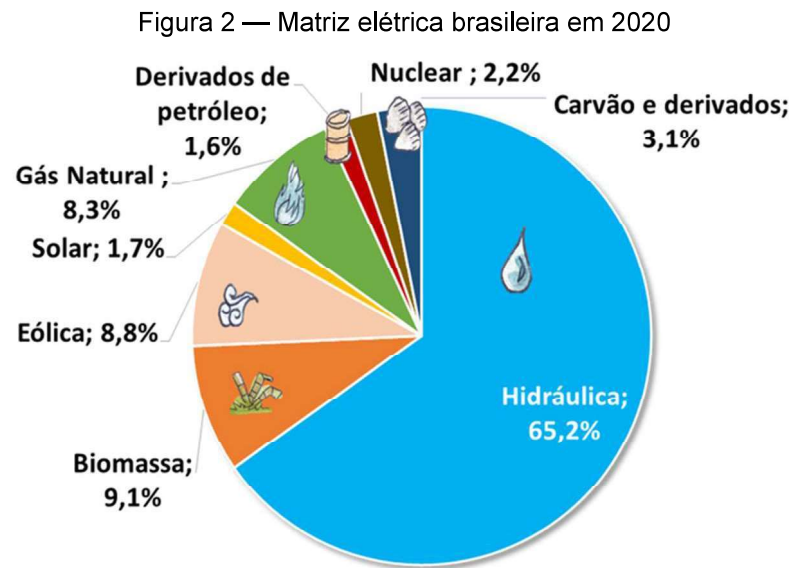
A Figura 1 é uma plotagem de variação de pressão ao longo do tempo, par ordenado ( $t, P$ ), ou seja, interpretação gráfica do golpe de aríete. Nela nota-se que existe uma pressão inicial  $P_i$  na tubulação e que após uma variação de tempo em que se inicia a manobra de fechamento da válvula, a pressão oscila entre um máximo e um mínimo até atingir um estado final de equilíbrio em uma pressão  $P_f$ .

Figura 1 — Transiente hidráulico na posição x do sistema



Fonte: Elbashir e Amoah (2007, p. 6).

O início do interesse no estudo dos transientes hidráulicos se deu na Europa, que passava pela primeira revolução industrial, no fim do século XIX, contexto em que a população urbana aumentava consideravelmente e novas indústrias surgiam com a necessidade de energia elétrica para as, então novas, máquinas de produção (GHIDAQUI et al., 2005). Naquela época, as hidrelétricas eram as principais fontes de energia elétrica e ainda hoje são relevantes na produção mundial, especialmente no Brasil, onde a contribuição das águas é majoritária, conforme Figura 2 (EPE, 2022). Nesse contexto, o entendimento do martelo hidráulico é relevante uma vez que o controle do fluxo da água através dos condutos e turbinas deve ser feito e constitui elemento de estudo em laboratórios hidráulicos que buscam formas de controlar o fenômeno, de acordo com Ghidaoui et al. (2005).



Fonte: BEN (2021), apud Empresa de Pesquisa Energética (EPE)

A princípio, aproximações matemáticas para o fenômeno podiam ser feitas desconsiderando o material da tubulação e conseqüentemente o atrito fluido-parede, principalmente porque os transientes eram influenciados majoritariamente pelo fechamento e abertura rápidos de válvulas, que geravam a maior parte da perda de carga no sistema, além da consideração de que os tubos usados tinham grandes diâmetros e os fluidos baixas velocidades, o que é possível notar pela Equação 1, chamada Equação da Continuidade em que  $Q$  é a vazão,  $V$  a velocidade do fluido e  $A$  a área de seção transversal (GHIDAOUÏ et al., 2005).

$$Q = V A \quad (1)$$

Considerando a vazão constante, quanto maior a área da seção transversal do conduto, função do diâmetro do tubo ( $D$ ), dada pela Equação 2, menor será a velocidade do fluido nele.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2)$$

Atualmente, redes que transportam fluidos a longas distâncias são comuns e sistemas de distribuição em tubos de menores diâmetros e com maiores velocidades se espalharam pelo mundo de forma que a importância do atrito e das perdas de carga aumentou, o que levou à inclusão desses termos nas equações gerais (GHIDAOUÏ et al., 2005) que serão abordadas mais detalhadamente a frente neste trabalho.

### 3.2 PROBLEMAS ASSOCIADOS AOS TRANSIENTES HIDRÁULICOS

De acordo com Elbashir e Amoah (2007), se as pressões na tubulação forem excessivamente altas, pode ocorrer falha na rede e até mesmo ruptura dela. Por outro lado, pressões muito baixas (ou negativas) podem ocasionar flambagem, colapso ou vazamentos na tubulação. Essas pressões normalmente ocorrem à jusante dos acessórios que são manobrados.

Condições de pressões subatmosféricas aumentam o risco de que alguns materiais, diâmetros e espessuras colapsem, ou ainda que não ocorra uma implosão total, a superfície interna da tubulação pode ficar danificada. Além disso, pode ocorrer o fenômeno de cavitação, se a pressão for reduzida à pressão de vapor do líquido (ELBASHIR; AMOAH, 2007).

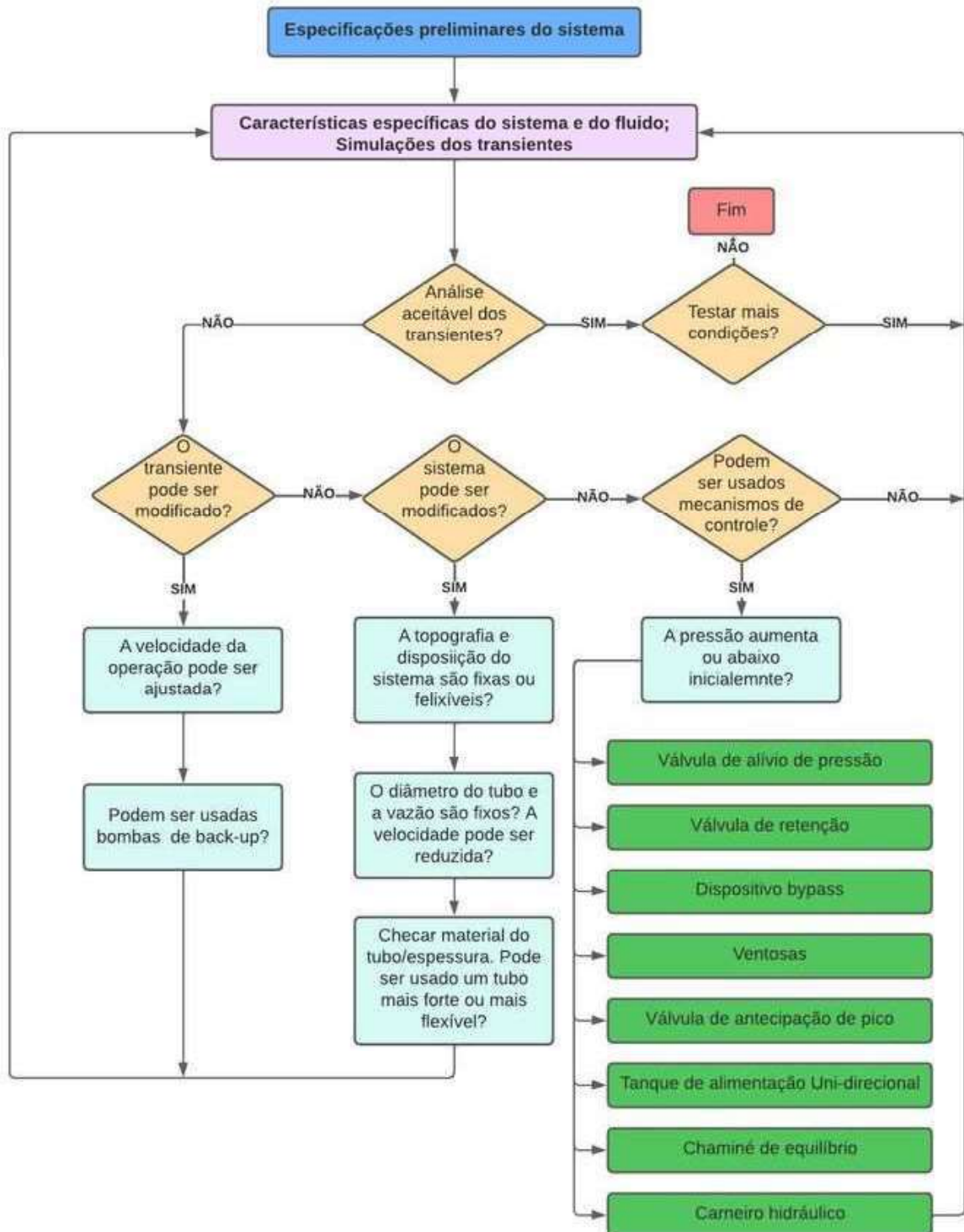
### 3.3 MÉTODOS PARA AMENIZAÇÃO DOS FENÔMENOS TRANSIENTES

Quando se trata do dimensionamento de sistemas de abastecimento de água, é necessário que sejam adotadas medidas para prevenir os transientes hidráulicos. A equipe de engenharia responsável deve identificar as condições mais críticas que podem ser geradas pelos eventos transientes, para assim adotar as medidas mais adequadas ao caso (BOULOS *et al.*, 2005). A Figura 3 é um fluxograma do que pode ser feito para evitar condições desfavoráveis nos sistemas de distribuição de água.

As principais ocorrências normalmente verificadas para projeto são: pressão máxima no sistema, cavitação, vibração da tubulação, deslocamento rápido de massas de água ou o risco de contaminação da água na tubulação (BOULOS *et al.*, 2005).



Figura 3 — Fluxograma para controle do golpe de aríete em sistemas de distribuição



Fonte: Adaptado de Boulos *et al.* (2005).

### 3.3.1 Prevenção do golpe de aríete

Uma das formas de evitar que os transientes ocorram é realizar manobras lentas de abertura e fechamento de válvulas. Tubulações mais longas normalmente requerem manobras mais lentas, assim o operador deve ser treinado para realizar essa atividade apropriadamente. Outros métodos para prevenir que o golpe ocorra são as operações apropriadas de hidrantes e controles de bombas (ELBASHIR; AMOAH, 2007, p. 6).

O tempo de manobra das válvulas pode ser classificado em rápido ou lento de acordo com o período da tubulação ( $\tau$ ), que é o intervalo de tempo que a onda de pressão gasta para ir e voltar entre a válvula de retenção e o reservatório (COSTA, 2011). A Inequação 3 é a caracterização da manobra rápida, já a 4 da manobra lenta. Nas equações,  $c$  é a celeridade ou velocidade de propagação de onda e  $L$  o comprimento do conduto.

$$t \leq \tau = \frac{2L}{c} \quad (3)$$

$$t > \tau = \frac{2L}{c} \quad (4)$$

### 3.3.2 Influência da inércia das bombas

A inércia da bomba é sua resistência à aceleração ou desaceleração e é constante para uma mesma combinação moto-bomba. Bombas com maior inércia podem ajudar a controlar os transientes porque elas continuam a mover a água por mais tempo, já que a desaceleração é mais devagar que em bombas de menor inércia. Apesar disso, aumentar a inércia de uma bomba não é efetivamente uma solução para a situação, principalmente para redes longas, já que nas operações de partida elas necessitam de mais energia e podem ocorrer diversos problemas mecânicos associados a isso (ELBASHIR; AMOAH, 2007, p. 6).

### 3.3.3 Chaminé de equilíbrio

Chaminé de equilíbrio é um dispositivo em formato de reservatório, com água em contato com a atmosfera, que recebe água em situações de sobrepressão ou

disponibiliza água em casos de subpressão. Ela permite maior rapidez para controle dos transientes, o que possibilita retomada mais rápida da operação normal do sistema, e reduz ainda o risco de pressões negativas e consequente cavitação (ISABEL, 2015). A Figura 4 é um exemplo de chaminé de equilíbrio.

Figura 4 — Chaminé de equilíbrio em uma adutora



Fonte: Oliveira (2017).

### 3.3.4 Tanque de Alimentação Unidirecional

O TAU, ou *One-Way*, é um reservatório conectado ao sistema hidráulico, tendo entre eles uma válvula de retenção que só permite o fluxo do tanque para a tubulação e não o contrário. A sua principal vantagem em relação a chaminé de equilíbrio está relacionada à presença da válvula de retenção, que permite altura menor para esse elemento que para o anterior (ELBASHIR; AMOAH, 2007, p. 6). A Figura 5 exibe um tanque de alimentação unidirecional conectado a uma adutora.

Figura 5 — Tanque de alimentação unidirecional



Fonte: GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL (2021).

### 3.3.5 Válvulas de alívio de pressão e de admissão de ar

Para proteger o sistema das condições de sobrepressão, a válvula de alívio de pressão pode ser uma opção viável. Ela abre quando a pressão pré-determinada é excedida e volta a se fechar quando a pressão volta ao intervalo de segurança. Essa válvula regula o fluxo de fluido constantemente para manter os níveis de pressão dentro do adequado (ELBASHIR; AMOAH, 2007, p. 6).

Já as válvulas de admissão de ar devem ser instaladas em pontos altos de redes e adutoras para prevenir potencial coluna de separação. Seu funcionamento consiste na permissão da entrada de ar na tubulação em casos de transientes de baixa pressão. Esse ar admitido deve ser expulso lentamente, para evitar que ocorra novo fenômeno transiente (ELBASHIR; AMOAH, 2007, p. 6).

## 4 CÁLCULO DO GOLPE DE ARÍETE

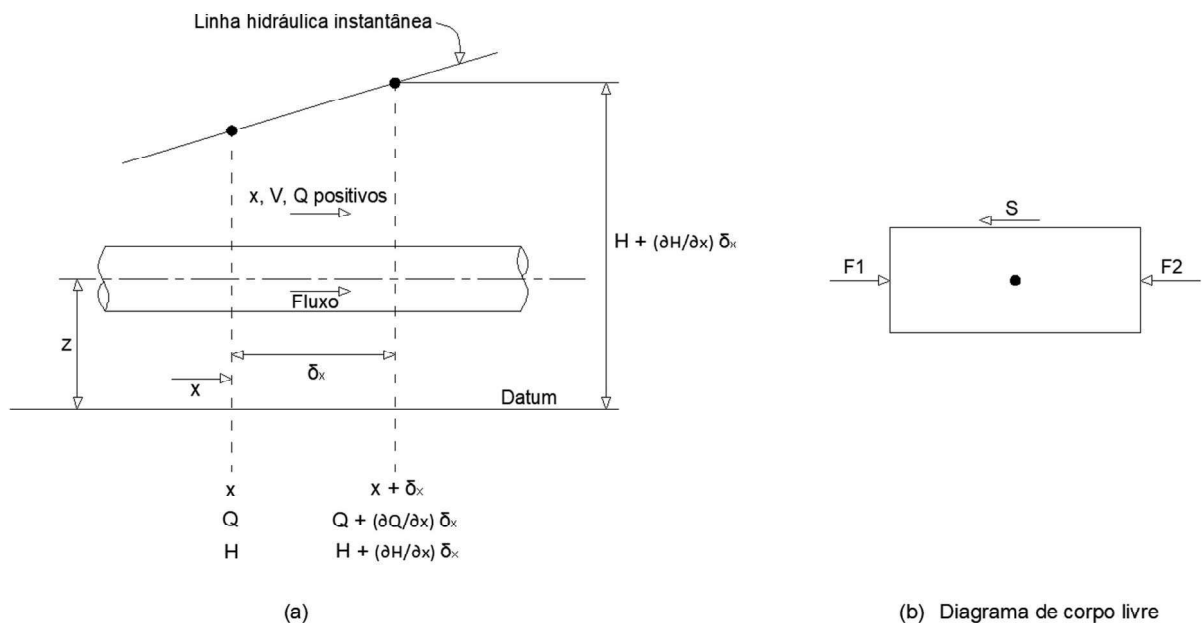
Ao longo do tempo, diversos métodos foram desenvolvidos para a determinação do golpe de aríete e estudo do transiente hidráulico, sendo que todos eles têm como equações fundamentais, a Equação da Continuidade e a Equação da Quantidade de Movimento, descritas a seguir.

### 4.1 EQUAÇÃO DO MOVIMENTO

O equacionamento aqui demonstrado foi feito de acordo com o apresentado por Chaudhry (1979).

A Figura 6 (a) mostra a notação adotada para o equacionamento a seguir. Na direção horizontal  $x$ , existem 3 forças aplicadas no elemento, como mostrado na Figura 6 (b), sendo  $F_1$  e  $F_2$  relacionadas a pressão e  $S$  a força de atrito relativa ao deslocamento de 1 para 2.

Figura 6 — Notação para equação do movimento



Fonte: Adaptado de Chaudhry (1979).

Pressão é definida como força aplicada por unidade de área e, na mecânica dos fluidos é o produto entre massa específica do fluido, aceleração da gravidade e carga ponto desejado ( $H$ ). Sabendo ainda que a massa específica pode ser reescrita

como peso específico ( $\gamma$ ) dividido pela gravidade ( $g$ ), as forças 1 e 2 são calculadas pelas Equações 5 e 6, sendo  $z$  a cota do eixo do conduto e  $x$  o deslocamento horizontal a partir da origem.

$$F_1 = \gamma A(H - z) \quad (5)$$

$$F_2 = \gamma A \left( H - z + \frac{\partial H}{\partial x} \delta x \right) \quad (6)$$

Para o cálculo da força  $S$  é possível utilizar a equação de Darcy-Weisbach, explicitada na Equação 7, em que  $f$  é o fator de atrito das paredes do tubo.

$$\Delta H = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (7)$$

A força de atrito  $S$  é dada pela Equação 8, já que para o atrito, a carga é  $\Delta H$  referente ao deslocamento que ocorre no espaço  $\delta x$ . Logo, o produto entre a Equação 7, a área no formato da Equação 2 e o peso específico do fluido resulta na força desejada, explicitada abaixo.

$$S = \frac{\gamma f V^2}{g 8} \pi D \delta x \quad (8)$$

A força resultante  $F_x$  na direção avaliada é obtida pela Equação 9, que pode ser reescrita na forma da Equação 10.

$$F_x = F_1 - F_2 - S \quad (9)$$

$$F_x = -\gamma A \frac{\partial H}{\partial x} \delta x - \frac{\gamma f V^2}{g 8} \pi D \delta x \quad (10)$$

Pela 2ª Lei de Newton, as forças podem ser calculadas como o produto da massa do corpo ( $m$ ) em movimento pela sua aceleração ( $a$ ), Equação 11.

$$F = m a \quad (11)$$

No caso dos fluidos, podem ser feitas considerações sobre a massa avaliada sendo ela em função do peso específico dele, que é a massa específica ( $\rho$ ) vezes a gravidade, e do volume considerado, esse último calculado como produto da área da seção transversal e do comprimento estudado. Já a aceleração pode ser reescrita em função da velocidade que varia ao longo do tempo. Essas representações são explicitadas na Equação 12 e na Equação 13, respectivamente.

$$m = \rho V = \frac{\gamma}{g} A \delta x \quad (12)$$

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (13)$$

Reescrevendo a Equação 11 em termos das Equações 10, 12 e 13, resulta a Equação 14.

$$-\gamma A \frac{\partial H}{\partial x} \delta x - \frac{\gamma f V^2}{g} \pi D \delta x = A \frac{\gamma}{g} \frac{dV}{dt} \delta x \quad (14)$$

Ao dividir toda a Equação 14 por  $\delta x$  e isolar o termo  $dV/dt$ , tem-se a Equação 15.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{-\gamma A \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\gamma f V^2}{g} \pi D}{\frac{\gamma A}{g}} \quad (15)$$

Ao simplificar a Equação 15 é obtida a Equação 16.

$$\frac{dV}{dt} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{f V^2}{8A} \pi D \quad (16)$$

Com a substituição de  $A$  pela Equação 2, pode-se calcular  $dV/dt$  pela Equação 17.

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x} g - \frac{f V^2}{2D} \quad (17)$$

Do cálculo elementar é conhecido que  $dV/dt$  pode ser calculado pela Equação 18, considerando apenas a direção de escoamento, ou seja, grandeza  $V$  escalar, que ao ser usada na Equação 17 resulta na Equação 19.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \quad (18)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} g + \frac{f V^2}{2D} = 0 \quad (19)$$

O termo  $V(\partial V/\partial x)$  é comumente desprezível em problemas de transientes hidráulicos. Já para considerar fluxos reversos, Chaudhry (1979) reescreveu o termo  $V^2$  como  $V^*|V|$ , sendo  $|V|$  o valor absoluto da velocidade do fluido. Desse modo, ao reescrever a Equação 19 em termos de  $Q$  e  $A$ , considerando a Equação 2, é obtida a Equação 20, em que todos os termos foram multiplicados por  $A$  para notação mais apropriada.

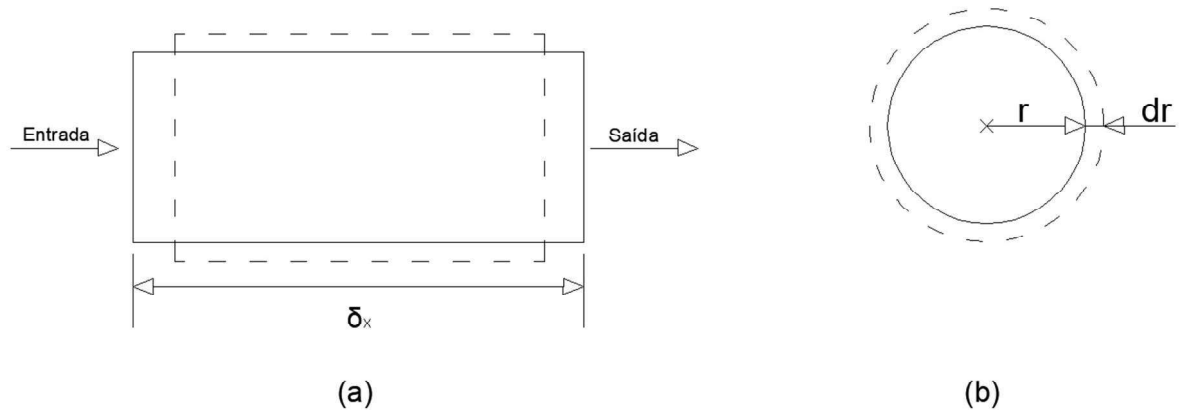
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (20)$$

## 4.2 EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

Assim como o equacionamento anterior, a equação da continuidade foi descrita segundo o que é apresentado por Chaudhry (1979).

O volume de controle é exibido na Figura 7, sendo o volume de entrada ( $\nabla_{en}$ ) calculado pela Equação 21 e o de saída ( $\nabla_{sa}$ ) pela Equação 22, sendo que a diferença entre eles se deve à variação de velocidade do fluido que ocorre no espaço avaliado.

Figura 7 — Notação para equação da continuidade



Fonte: Adaptado de Chaudhry (1979).

$$\nabla_{en} = V \pi r^2 \delta t \quad (21)$$

$$\nabla_{sa} = \left( V + \frac{\partial V}{\partial x} \delta x \right) \pi r^2 \delta t \quad (22)$$

A variação que ocorre no volume de entrada é obtida pela subtração da Equação 22 na Equação 21, que resulta na Equação 23.

$$\delta \nabla_{en} = \nabla_{en} - \nabla_{sa} = -\frac{\partial V}{\partial x} \pi r^2 \delta x \delta t \quad (23)$$

Durante o intervalo de tempo  $\delta t$ , a pressão varia segundo a Equação 24. Essa variação de pressão faz com que as paredes do conduto se expandam ou contraíam radialmente e assim o elemento de fluido aumenta ou diminua devido à sua compressibilidade.

$$\delta P = \frac{\partial P}{\partial t} \delta t \quad (24)$$

A princípio, será considerada a variação volumétrica que ocorre pela expansão ou contração das paredes do conduto. A tensão radial ( $\sigma$ ), calculada pela Equação 25, é proporcional à espessura "e" da parede.

$$\sigma = \frac{Pr}{e} \quad (25)$$



A variação na tensão, da Equação 25, pode ser dada em termos da variação de pressão da Equação 24, o que está explicitado na Equação 26.

$$\delta\sigma = \delta P \frac{r}{e} = \frac{\partial P}{\partial t} \delta t \frac{r}{e} \quad (26)$$

Como o raio variou de  $r$  para  $r + dr$ , será obtida uma variação da deformação ( $\epsilon$ ) que pode ser calculada pela Equação 27.

$$\delta\epsilon = \frac{\delta r}{r} \quad (27)$$

Assumindo que as paredes são linearmente elásticas, o módulo de elasticidade de Young ( $E$ ) pode ser obtido pela Equação 28.

$$E = \frac{\delta\sigma}{\delta\epsilon} \quad (28)$$

Substituindo as Equações 26 e 27 na Equação 28 é obtida a Equação 29, que pode ainda ser reescrita na forma da Equação 30 ao isolar o termo  $dr$ .

$$E = \frac{\frac{\partial P}{\partial t} \delta t \frac{r}{e}}{\frac{\delta r}{r}} \quad (29)$$

$$\delta r = \frac{\partial P}{\partial t} \frac{r^2}{eE} \delta t \quad (30)$$

A variação de volume devido a expansão ou contração radial do conduto é calculada pela Equação 31.

$$\delta V_r = 2 \pi r \delta x \delta r \quad (31)$$

Por fim, essa variação de volume pode ser calculada pela Equação 32, que é obtida ao se fazer a substituição da Equação 30 na 31.

$$\delta V_r = 2 \pi \frac{\partial P}{\partial t} \frac{r^3}{eE} \delta t \delta x \quad (32)$$

Agora, deseja-se determinar a variação de volume que ocorre devido à compressibilidade do fluido ( $\delta V_c$ ) que tem volume inicial ( $V_i$ ) calculado pela Equação 33.

$$V_i = \pi r^2 \delta x \quad (33)$$

É necessário introduzir a definição do módulo de elasticidade volumétrico de um fluido ( $K$ ), como apresentado na Equação 34.

$$K = \frac{-\delta P}{\frac{\delta V_c}{V_i}} \quad (34)$$

Substituindo as Equações 24 e 33 na Equação 34, obtém-se a Equação 35, que pode ser reescrita na forma da Equação 36 ao se isolar o termo referente a variação de volume relacionado à compressibilidade do fluido.

$$K = \frac{\frac{\partial p}{\partial t} \delta t}{\frac{\delta V_c}{\pi r^2 \delta x}} \quad (35)$$

$$\delta V_c = -\frac{\partial P}{\partial t} \frac{\delta t}{K} \pi r^2 \delta x \quad (36)$$

Assumindo que a densidade do fluido permaneça constante, da lei da conservação da massa é possível afirmar que a variação de volume devido à expansão ou contração radial do conduto ( $\delta V_r$ ) é igual a soma da variação do volume de entrada com a variação devido à compressibilidade do fluido, essa relação é apresentada na Equação 37.

$$\delta V_r = \delta V_{en} + \delta V_c \quad (37)$$

Ao substituir as Equações 23, 32 e 36 na equação acima e dividindo todos os termos por  $(\pi r^2 \delta x \delta t)$ , é obtida a Equação 38, que pode ser reescrita na forma da Equação 39.

$$2 \frac{r}{eE} \frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{K} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (38)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} \left( \frac{2r}{eE} + \frac{1}{K} \right) = 0 \quad (39)$$

Sabendo que  $P = \rho g H$  com  $\rho$ ,  $g$  constantes, ao aplicar a Equação da Continuidade apresentada como Equação 1, com a área constante para uma mesma tubulação, a Equação 39 pode ser reescrita na forma da Equação 40.

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \rho g \frac{\partial H}{\partial t} \left( \frac{2r}{eE} + \frac{1}{K} \right) = 0 \quad (40)$$

Tendo em vista que  $2r$  corresponde ao diâmetro  $D$  e dividindo a equação anterior pela massa específica do fluido vezes a gravidade, obtém-se a Equação 41.

$$\frac{1}{\rho g A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} \left( \frac{D}{eE} + \frac{1}{K} \right) = 0 \quad (41)$$

Simplificando a Equação 41 para que o termo  $\partial H / \partial t$  tenha o valor 1 como coeficiente, é obtida a Equação 42. Essa última pode ser simplificada ao multiplicar-se o 1º termo dela por  $(eE)/(eE)$ , o que resulta na Equação 43.

$$\frac{KeE}{\rho g A(KD + eE)} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (42)$$

$$\frac{K}{\rho g A \left( \frac{KD}{eE} + 1 \right)} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (43)$$

Por fim, para obter a Equação da continuidade desejada, deve ser inserida uma nova variável, a celeridade ou velocidade de propagação da onda do martelo hidráulico, que é representada por "c", cujo valor ao quadrado é calculado pela Equação 44, de acordo com Chaudhry (1979).

$$c^2 = \frac{K}{\rho \left(1 + \frac{KD}{eE}\right)} \quad (44)$$

Assim, a Equação 43 pode ser reescrita na forma da Equação 45.

$$\frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (45)$$

### 4.3 MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

Para o método das características, Chaudhry (1979) optou por uma combinação linear entre as equações do movimento (Equação 20) e da continuidade (Equação 45), o mesmo foi feito neste trabalho. Assim, a Equação 46 foi obtida como Equação 20 mais uma constante ( $\lambda$ ) que multiplica a Equação 45 que anteriormente foi multiplicada por  $g \cdot A$  para facilitar a obtenção da equação desejada.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2D} Q|Q| + \lambda \left( c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} \right) = 0 \quad (46)$$

A Equação 46 pode ainda ser rearranjada na forma da Equação 47.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + \lambda gA \left( \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} \right) + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (47)$$

Os termos H e Q são calculados em função do par ordenado (x, t), ou seja, as suas derivadas parciais podem ser calculadas usando as derivadas ordinárias dessas funções, como mostrado nas Equações 48 e 49 para H e Q respectivamente.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (48)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (49)$$

Por definição, o multiplicador desconhecido  $\lambda$  da Equação 46 pode ser escrito como:

$$\lambda = \pm \frac{1}{c} \quad (50)$$

Considerando as Equações 48, 49 e 50, a Equação 47 pode ser reescrita como a Equação 51 para  $dx/dt = c$  e a Equação 52 para  $dx/dt = -c$ .

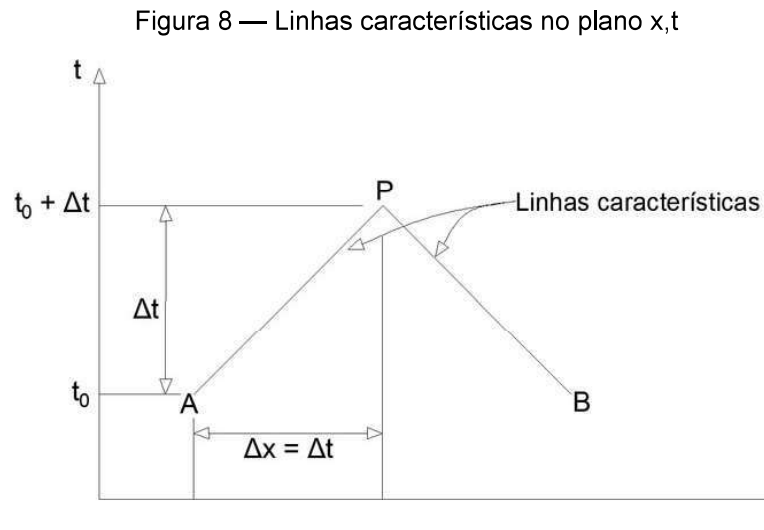
$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{c} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (51)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{c} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (52)$$

Assim, as equações diferenciais parciais 20 e 45 foram convertidas em 2 equações diferenciais ordinárias na variável independente  $t$ .

#### 4.4 INTERPRETAÇÃO GRÁFICA

Em um plano formado pelo par ordenado  $(x, t)$ , as equações  $dx/dt = a$  e  $dx/dt = -a$  representam duas linhas de inclinação  $\pm 1/a$ , as quais são chamadas de linhas características. Matematicamente, elas dividem o plano em duas regiões. Já fisicamente, elas representam o caminho percorrido por uma perturbação ao longo do tempo, como exemplificado na Figura 8, em que o fenômeno ocorrido no ponto A no tempo  $t_0$  atinge o ponto P após o intervalo  $\Delta t$ .



Fonte: Adaptado de Chaudhry (1979).

Para conhecer as condições em  $t_0 + \Delta t$ , considerando conhecida a situação no ponto A, pode-se escrever ao longo do trecho positivo AP da Figura 8, as Equações 53 e 54.

$$dQ = Q_P - Q_A \quad (53)$$

$$dH = H_P - H_A \quad (54)$$

De forma análoga, podem ser escritas as Equações 55 e 56 para o trecho negativo da Figura 8, PB.

$$dQ = Q_P - Q_B \quad (55)$$

$$dH = H_P - H_B \quad (56)$$

Ao aplicar as Equações 53 e 54 na Equação 51 e multiplicá-la por dt, obtém-se a Equação 57.

$$(Q_P - Q_A) + \frac{g^A}{c} (H_P - H_A) + \frac{f dt}{2DA} Q_A |Q_A| = 0 \quad (57)$$

Da mesma maneira, ao substituir as Equações 55 e 56 na Equação 52 e multiplicá-la por dt é obtida a Equação 58.

$$(Q_P - Q_B) - \frac{g^A}{c} (H_P - H_B) + \frac{f dt}{2DA} Q_B |Q_B| = 0 \quad (58)$$

Uma vez que as condições de contorno, inicial e final, são conhecidas, é possível afirmar que as informações dos pontos A e B não são incógnitas, de forma que apenas  $Q_P$  e  $H_P$  restam para serem calculados. Para facilitar a compreensão, as Equações 57 e 58 foram reescritas em função de constantes conhecidas,  $C_p$  para o caso positivo (Equação 57) e  $C_n$  para o caso negativo (Equação 58). Esses valores constantes são determinados pelas Equações 59 e 60 respectivamente.

$$C_p = Q_A + \frac{g^A}{c} H_A - \frac{f dt}{2DA} Q_A |Q_A| \quad (59)$$

$$C_n = Q_B - \frac{g^A}{c} H_B - \frac{f dt}{2DA} Q_B |Q_B| \quad (60)$$

Além dessas constantes, existe ainda  $C_a$ , também constante, que depende das propriedades do conduto, a qual é calculado pela Equação 61.

$$C_a = \frac{g^A}{c} \quad (61)$$

A partir disso, a Equação 57 é reescrita na forma da Equação 62.

$$Q_P = C_p - C_a H_P \quad (62)$$

Já a Equação 58 é reescrita na forma da Equação 63.

$$Q_P = C_n + C_a H_P \quad (63)$$

Como as Equações 62 e 63 formam um sistema com 2 equações e 2 incógnitas, ao somá-las é possível calcular  $Q_P$  pela Equação 64, a partir de  $C_p$  e  $C_n$ , e após isso  $H_P$  é obtido por qualquer uma das 2 equações iniciais.

$$Q_P = 0,5(C_p + C_n) \quad (64)$$

#### 4.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para a aplicação do método das características é necessário que se faça a determinação de contorno de forma que as Equações 62 e 63 sejam aplicáveis. A seguir são apresentadas 3 condições de contorno, uma para montante, onde se usa

a Equação 63 e duas para jusante da tubulação verificada, onde se aplica a Equação 62.

#### 4.5.1 Reservatório de nível constante à montante

Ao considerar que as perdas de carga na entrada de uma tubulação são desprezíveis, pode-se afirmar que a carga no ponto inicial seja igual a carga hidráulica do reservatório, ou seja, a altura do reservatório com relação ao Datum.

Por outro lado, se as perdas na entrada são consideráveis, elas podem ser calculadas pela Equação 65, das perdas de carga localizadas em função da vazão, com  $k$  que é o coeficiente de perda localizada igual a 1 para entrada de borda e 0,5 para entrada normal em tubulação.

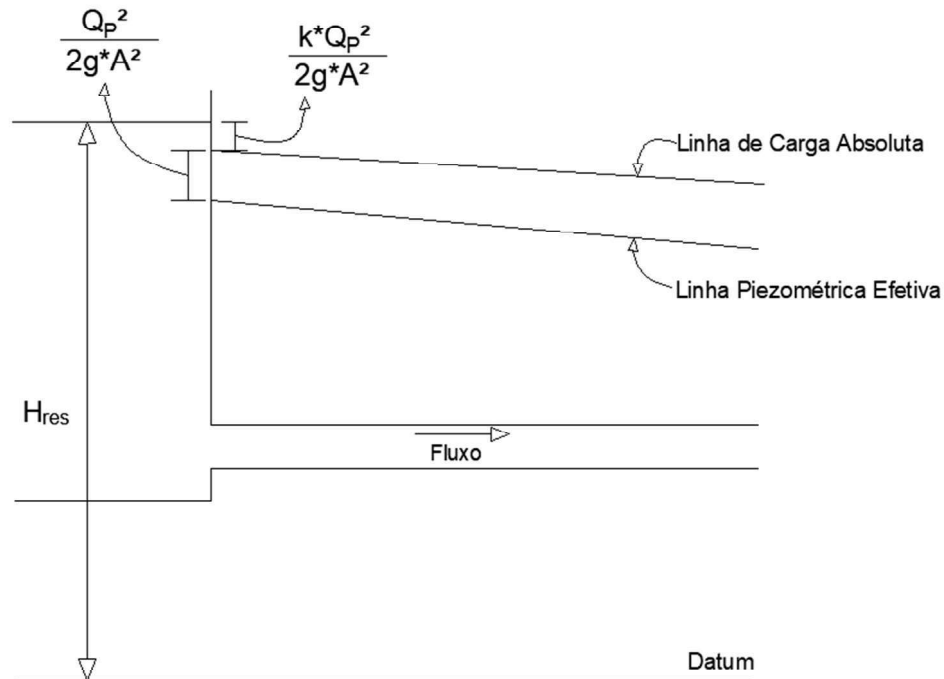
$$h_e = \frac{k Q_p^2}{2g A^2} \quad (65)$$

Diante disso, afirma-se que a carga  $H_p$  seja a diferença entre a carga no reservatório e as perdas de carga de entrada e as relacionadas à velocidade, essa última calculada por  $V^2/2g$ . Assim, a carga desejada é calculada pela Equação 66.

$$H_p = H_{Res} - (1 + k) \frac{Q_p^2}{2gA^2} \quad (66)$$

A Figura 9 esquematiza as cargas e perdas existentes na situação com reservatório superior de nível constante.

Figura 9 — Reservatório de nível constante à montante



Fonte: Adaptado de Chaudhry (1979).

Substituindo a Equação 66 na Equação 63 é possível determinar  $Q_p$ , conforme Equação 67.

$$Q_p = C_n + C_a H_{Res} - C_a (1 + k) \frac{Q_p^2}{2gA^2} \quad (67)$$

Ao rearranjar os termos da Equação 67 para a estrutura de uma equação do 2º grau no formato  $ax^2 + bx + c = 0$ , resulta a Equação 68.

$$\frac{C_a(1+k)}{2gA^2} Q_p^2 + Q_p - C_n - H_{Res} C_a = 0 \quad (68)$$

Após isso, pode ser usada a fórmula do discriminante de bhaskara para solução desse tipo de equação, nesse caso dado pela Equação 69.

$$\Delta = 1 - \frac{2(1+k)C_a}{gA^2} (-C_n - H_{Res} C_a) \quad (69)$$

Assim,  $Q_p$  pode ser calculado pela Equação 70, assumindo apenas a solução positiva dela.

$$Q_p = \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{2(1+k)}{gA^2} C_a (C_n + C_a H_{Res})}}{\frac{2C_a(1+k)}{2gA^2}} \quad (70)$$

Para simplificar a Equação 70, é possível usar uma nova constante  $K1$  comum ao numerador e ao denominador, dada pela Equação 71.

$$k_1 = \frac{C_a(1+k)}{2gA^2} \quad (71)$$

Dessa forma,  $Q_P$  é calculada pela Equação 72 e  $H_P$  pode ser calculado tanto pela Equação 63 quanto pela Equação 66.

$$Q_P = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4k_1(C_n + C_a H_{Res})}}{2k_1} \quad (72)$$

#### 4.5.2 Válvula à jusante

Para válvula completamente aberta, a Equação 73 é usada para cálculo de vazão em regime permanente.

$$Q_0 = (C_d A_v)_0 \sqrt{2gH_0} \quad (73)$$

$C_d$  é o coeficiente de descarga obtido pela multiplicação do coeficiente de velocidade pelo coeficiente de contração e  $A_v$  é a área de abertura da válvula. Já  $H_0$  é a carga hidráulica na válvula na condição inicial.

Da mesma forma, para o regime transiente, pode ser escrita a Equação 74 para determinação da vazão.

$$Q_P = (C_d A_v) \sqrt{2gH_P} \quad (74)$$

Ao dividir a Equação 74 pela Equação 73, obtém-se a Equação 75.

$$\frac{Q_P}{Q_0} = \frac{(C_d A_v) \sqrt{2gH_P}}{(C_d A_v)_0 \sqrt{2gH_0}} \quad (75)$$

Definindo que  $\tau = (C_d A_v) / (C_d A_v)_0$ , elevando os 2 termos da Equação 75, ao quadrado e isolando a variável  $Q_P$  é obtida a Equação 76.

$$Q_P^2 = \frac{(Q_0 \tau)^2 H_P}{H_0} \quad (76)$$

Isolado  $H_P$  na Equação 62 e substituindo na Equação 76 é obtida a Equação 77.

$$Q_P^2 + C_v Q_P - C_v C_P = 0 \quad (77)$$

Em que:

$$C_v = \frac{(Q_0 \tau)^2}{C_a H_0}$$

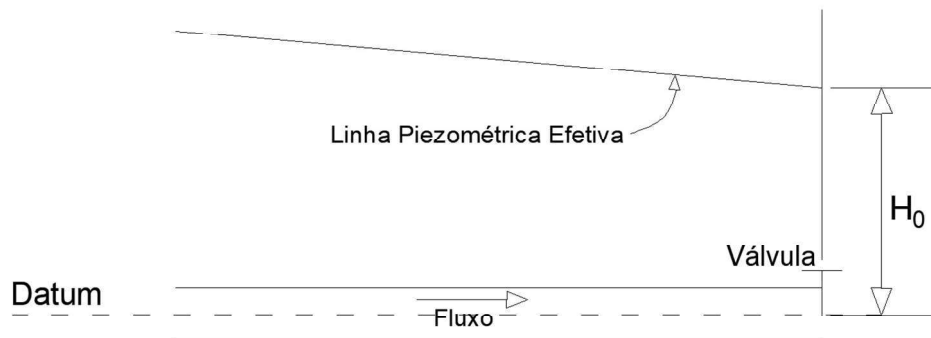
Ao solucionar a Equação 77, do segundo grau, e negligenciar a solução negativa, pode-se afirmar que  $Q_P$  é calculado pela Equação 78 e após isso  $H_P$  pela Equação 62.



$$Q_p = 0,5(-C_v + \sqrt{C_v^2 + 4C_p C_v}) \quad (78)$$

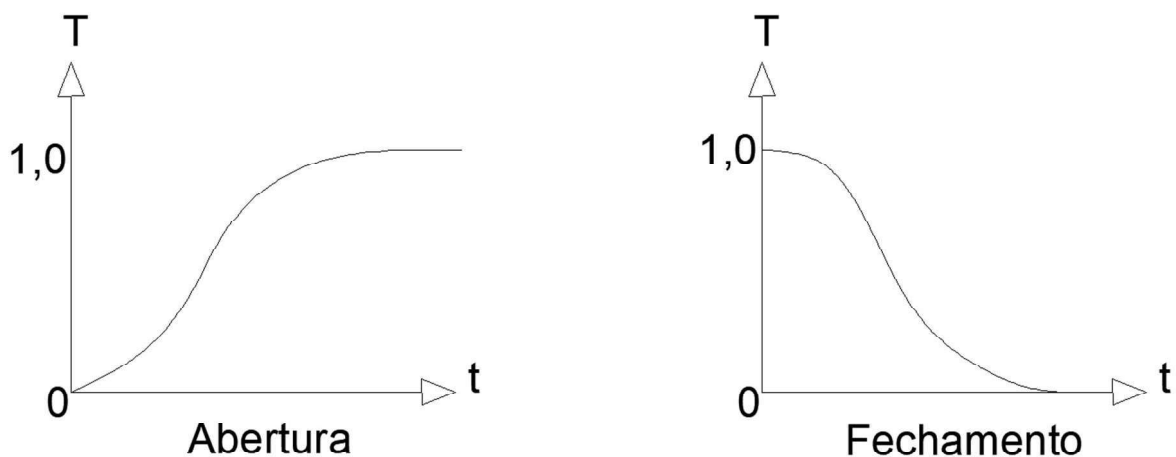
A Figura 10 apresenta a condição de válvula à jusante, e a Figura 11 tem a demonstração de 2 gráficos genéricos  $\tau \times t$ , um para abertura e outro para fechamento da válvula, sendo que para  $\tau = 1$  o regime é permanente com vazão  $Q_0$  e carga  $H_0$ .

Figura 10 — Válvula à jusante do escoamento



Fonte: Adaptado de Chaudhry (1979).

Figura 11 — Gráficos  $T \times t$  para manobras de válvula à jusante



Fonte: Adaptado de Chaudhry (1979).

#### 4.5.3 Orifício à jusante do escoamento

A abertura em orifícios permanece constante, assim as equações do item 4.5.2 permanecem válidas, porém com  $\tau = 1$ .

## 5 USO DE SOFTWARE PARA CÁLCULO DO GOLPE DE ARÍETE

Computadores e modelagem são necessidades reais quando se trata da análise do comportamento de fluidos. O uso de representação numérica dos problemas hidráulicos ajuda a prever o comportamento de tubos e conexões em diversas condições, de modo que seja possível otimizar projetos e garantir mais segurança no funcionamento dos sistemas (IZQUIERDO; IGLESIAS, 2002).

Izquierdo e Iglesias (2002) afirmam que computadores pessoais são capazes de executar cálculos cada vez mais complexos, mas é necessário que o usuário conheça potenciais falhas dos programas utilizados e faça uma análise técnica dos resultados obtidos. Além disso, afirmam que, independentemente dos métodos numéricos utilizados, os softwares de análise devem ser confiáveis, eficientes e resolver problemas rapidamente.

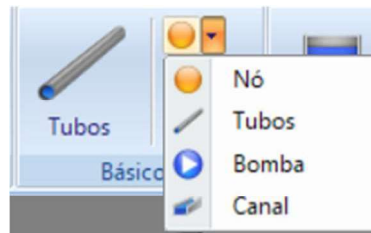
Assim, para este trabalho, foi executada uma simulação de um problema simplificado relacionado ao golpe de aríete, utilizando o programa Allieve, com o intuito de demonstrar os dados necessários para essa execução e os resultados fornecidos por ele.

Segundo a Universidade Politécnica de Valência (2010), o Allieve é um software gratuito e profissional para o cálculo e simulação de transientes hidráulicos em sistemas pressurizados ou condutos livres que garante resultados confiáveis, sem limites de nós e que possibilita a comparação entre cenários.

### 5.1 ÁREA DE TRABALHO DO ALLIEVE

A construção dos cenários no programa inicia-se com a inserção de elementos hidráulicos em uma área de projeto em branco. A primeira guia é a de elementos básicos, em que o usuário pode optar pelo uso de pontos, tubos, bombas e canais em seu trabalho, como mostrado na Figura 12.

Figura 12 — Elementos básicos do Allieve



Fonte: Autor (2023).

A guia seguinte é relacionada aos reservatórios que podem ser aplicados no projeto, sendo as opções apresentadas na Figura 13.

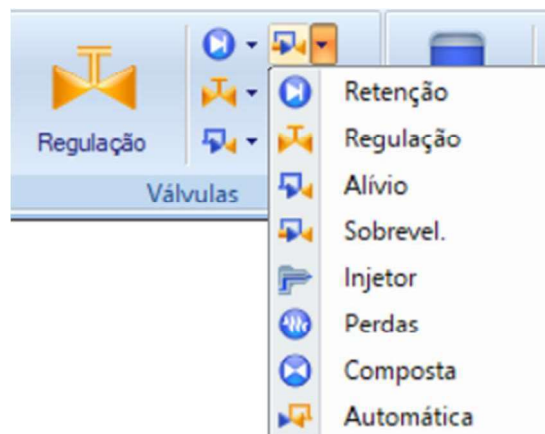
Figura 13 - Reservatórios do Allieve



Fonte: Autor (2023).

Por fim, o usuário pode optar pelo uso de válvulas e dispositivos de proteção em seu sistema, como mostrado nas Figuras 14 e 15 respectivamente.

Figura 14 - Válvulas do Allieve



Fonte: Autor (2023).

Figura 15 – Dispositivos de proteção do Allieve

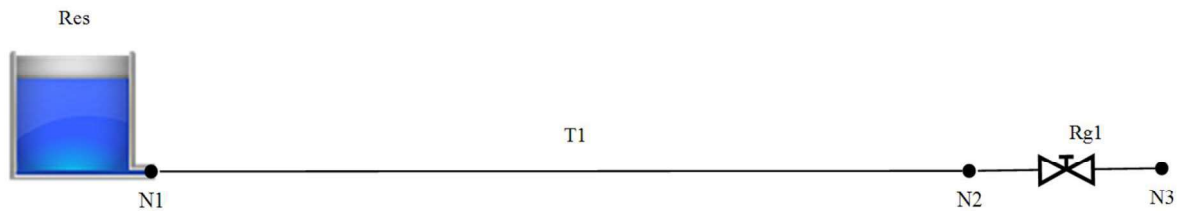


Fonte: Autor (2023).

## 5.2 EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO ALLIEVE

Para exemplificação do uso do software e dos resultados por ele obtidos, foi montado o sistema da Figura 16, em que um reservatório de nível constante (10m) alimenta um tubo de ferro fundido de 300mm de diâmetro interno e 1km de extensão até uma válvula de regulação do tipo de esfera. A configuração de cada elemento será detalhada a seguir.

Figura 16 – Sistema montado para exemplificação



Fonte: Autor (2023).

Com duplo clique em cada elemento é possível determinar as características deles. Para o reservatório foi inserido  $Z_s$  como cota de soleira no Datum, ou seja, nível 0 e  $Z_0$  que é a cota de topo foi inserida como 10m. Além disso, foi determinado que é um reservatório do tipo GD, de grandes dimensões, para que ele tenha nível constante. Esses dados foram inseridos conforme Figura 17.

Figura 17 – Configuração do reservatório

| Reserv. - Dados Básicos |     |    |        |      |                     |        |      |
|-------------------------|-----|----|--------|------|---------------------|--------|------|
| Nome                    | Ni  | Nf | Zs (m) | Tipo | S (m <sup>2</sup> ) | Z0 (m) | Zvar |
| Res                     | --- | N1 | 0      | GD   |                     | 10     |      |

Fonte: Autor (2023).

Já para o tubo entre o reservatório e a válvula foi inserida a cota inicial e final, no caso será um trecho horizontal, ou seja, com ambos os pontos na cota 0. Também foram inseridos dados para diâmetro interno do tubo e espessura de parede como 300mm e 5mm, respectivamente. O comprimento do trecho foi inserido como 1000m e o fator de atrito do tubo de ferro fundido sendo 0,03mm para cálculo de perdas pela equação de Darcy. Esses dados e a celeridade são apresentados na Figura 18. A celeridade é calculada pelo software com a Equação 44 segundo parâmetros da Figura 19 para ferro fundido (Fo.Fo.).

Figura 18 – Configuração do tubo do problema

| Tubos - Dados Básicos |    |        |    |        |           |       |        |           |        | Perdas   |      |   |
|-----------------------|----|--------|----|--------|-----------|-------|--------|-----------|--------|----------|------|---|
| Nome                  | Ni | Zi (m) | Nf | Zf (m) | Dint (mm) | L (m) | e (mm) | a (m/s)   | Perfil | Rug (mm) | k    |   |
| T1                    | N1 | 0      | N2 | 0      | 300       | 1000  | 5      | 1123,8396 | Calc.  | ----     | 0,03 | 0 |

Fonte: Autor (2023).

Figura 19 – Cálculo da celeridade

Permite atribuir um valor para a celeridade ou calculá-lo mediante a introdução de três parâmetros

Especificar celeridade

Celeridade (m/s)

Calcular celeridade

Diâmetro (mm)

Espessura (mm)

Coef. material

Celeridade (m/s)

Coeficientes do material da tubulação

Coeficiente .....: CMT = 1.0E+6/ModElastTub(Kp/cm2)

Aço:..... 0.5 MET = (2.0 - 2.12)E+6 Kp/cm2

Fo.Fo:..... 0.6 - 1.3 MET = (0.80 - 1.70)E+6 Kp/cm2

Concreto:..... 3.3 - 7.1 MET = (0.14 - 0.30)E+6 Kp/cm2

H. arm. camisa chapa:.. 2.5 MET = 0.39E+6 Kp/cm2

PVC Rígido:..... 36 - 42 MET = (2.40 - 2.75)E+4 Kp/cm2

Fonte: Autor (2023).

Por último, foi feita a configuração da válvula de esfera, que está na mesma cota que a tubulação e tem o mesmo diâmetro que ela. O coeficiente de perdas localizadas foi adotado igual a 3, de acordo com Rosa (2023) para esse tipo de válvula e a manobra dela definida como rápida, feita em 1s, já que o período da tubulação é 1,85s. Os dados referentes à válvula são apresentados na Figura 20 e a manobra dela na Figura 21.

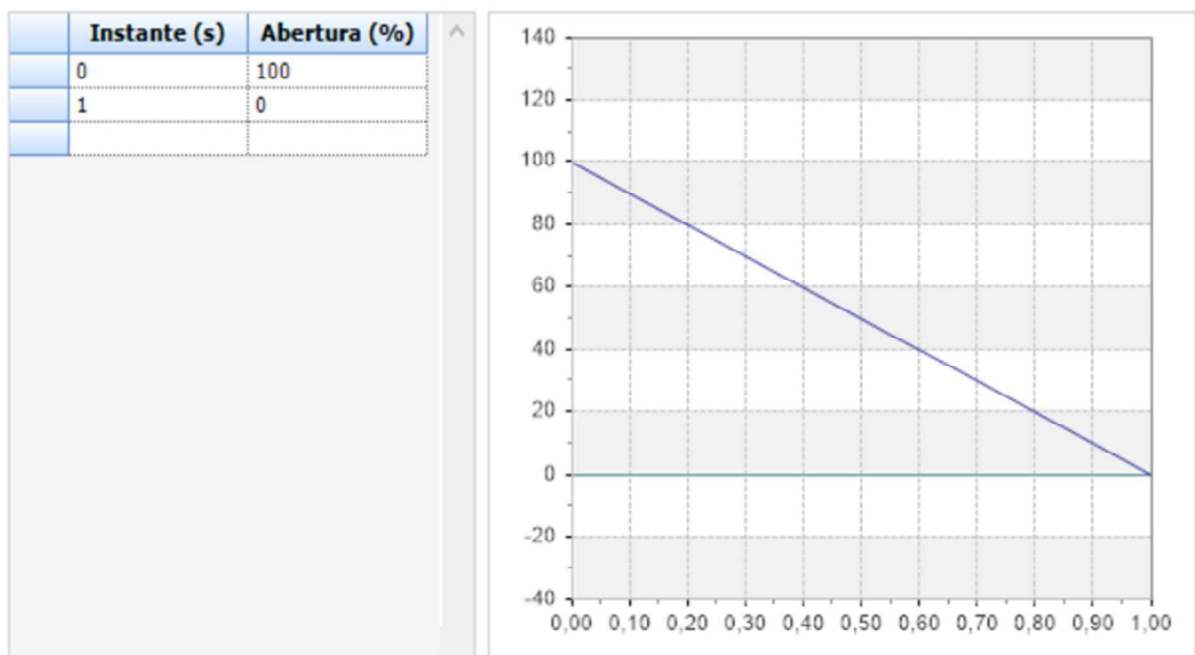
Figura 20 – Configuração da válvula de esfera

| Válvula regulação - Dados Básicos |    |    |       |         |         |          |        | Manobra  |
|-----------------------------------|----|----|-------|---------|---------|----------|--------|----------|
| Nome                              | Ni | Nf | Z (m) | DN (mm) | k Ramal | Tipo     | Modelo | Tipo     |
| Rg1                               | N2 | N3 | 0     | 300     | 3       | Esférica |        | Tabelada |

Fonte: Autor (2023).

Figura 21 – Manobra da válvula de esfera

Introduzem-se os pontos de instante e abertura que definem a manobra da válvula de regulação

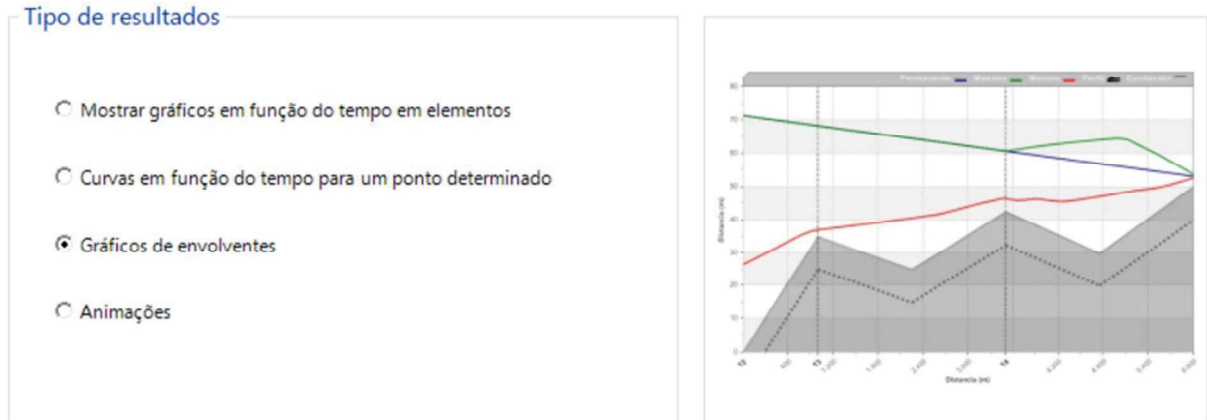


Fonte: Autor (2023).

### 5.3 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Para executar a simulação, o usuário necessita apenas clicar na aba de projeto do programa e primeiro solicitar o cálculo do regime permanente do sistema e depois do regime transitório. Ao calcular o regime transitório, o software permite que seja feita a escolha do tipo de resultado desejado por meio de um menu de opções, mostrado na Figura 22.

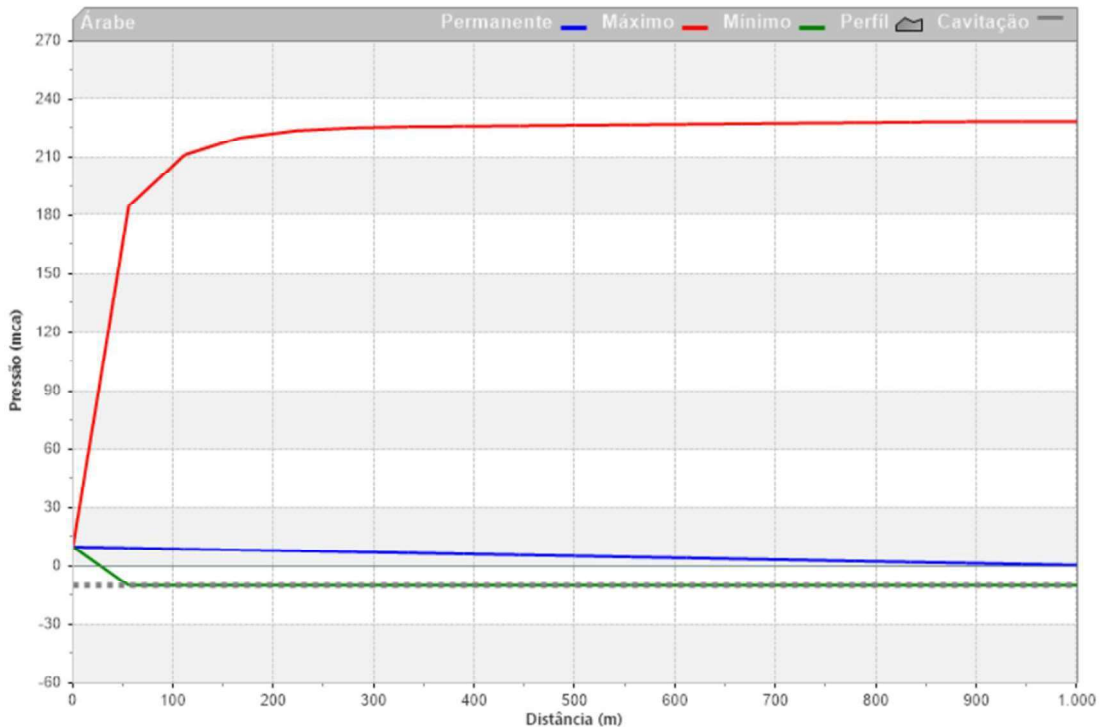
Figura 22 – Menu de opções para resultados do cálculo transiente



Fonte: Autor (2023).

A opção gráfico de envolventes exibe o valor de carga máxima e mínima em cada ponto do tubo, além da carga em regime permanente. Essas curvas estão respectivamente nas cores vermelho, verde e azul na Figura 23.

Figura 23 – Gráfico de envolventes



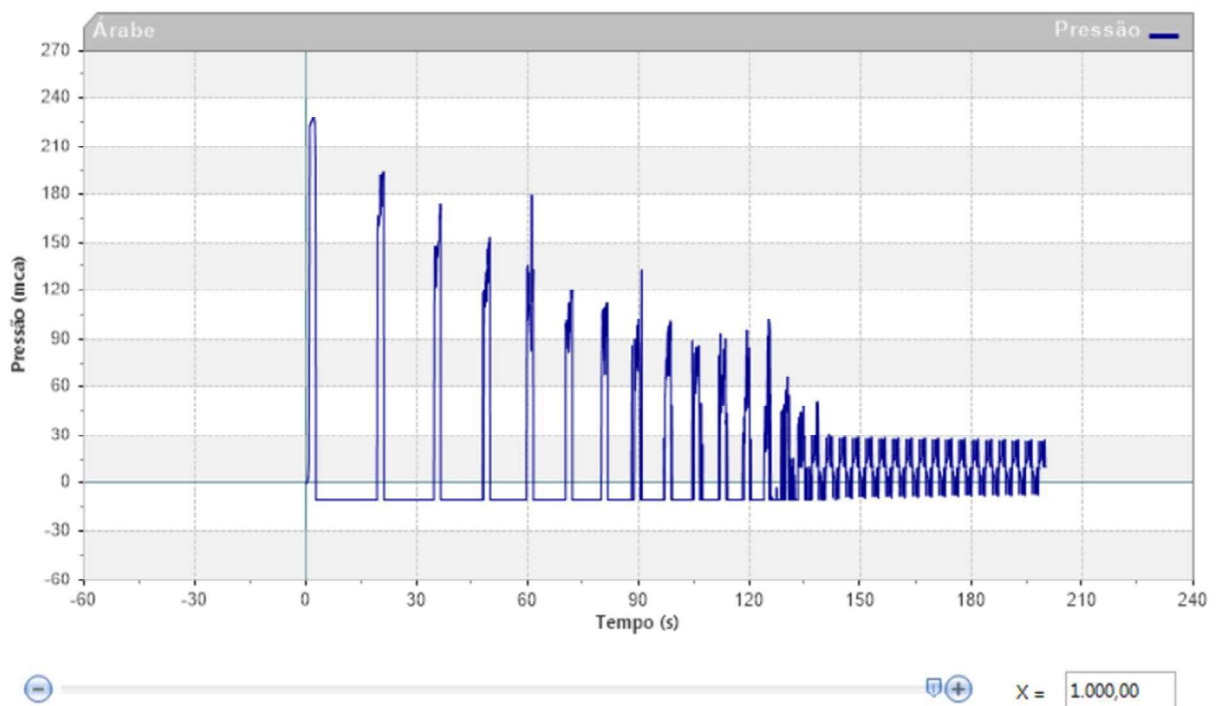
Fonte: Allieve (2023).



A Figura 23 é chamada gráfico de envolventes por apresentar a carga máxima e mínima atingida na tubulação entre o ponto zero e cada ponto até o seu final.

Outra opção no menu é a de curvas em função do tempo para um ponto determinado, em que o usuário pode optar por qual ponto deseja avaliar no tempo de simulação, nesse caso 200s, por um controle deslizante. Na Figura 24 é exibido o resultado do ponto a 1000m do reservatório, ou seja, imediatamente à montante da válvula, ponto crítico nessa simulação.

Figura 24 – Pressão x tempo no ponto imediatamente à montante da válvula



Fonte: Allieve (2023).

Os valores obtidos nos gráficos de pressão x tempo como o da Figura 24 são usados para gerar a envoltória, como a Figura 23.

Ainda na Figura 23 é possível observar a forma que a pressão varia entre sobrepressão e subpressão enquanto ocorre o transiente hidráulico, o que causa as oscilações no gráfico.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho atingiu seu objetivo de detalhar o método das características e as equações utilizadas nele, facilitando a compreensão dos parâmetros envolvidos, o que ainda hoje raramente é encontrado na literatura relacionada aos transientes hidráulicos.

Além disso, foi verificado que o software Allieve é intuitivo, não necessita de conhecimentos prévios referentes ao seu sistema, de forma que o usuário consegue usá-lo tendo como base conhecimentos gerais de hidráulica e transientes hidráulicos. Ele também apresenta resultados de maneira satisfatória com comparação de cenários e detalhamento de informações para estudo dos transientes.

Os resultados apresentados neste trabalho são apenas para fins de exemplificação do funcionamento e da capacidade de trabalho do software escolhido. Assim, o Allieve pode ser utilizado por profissionais capacitados na compreensão dos dados solicitados e gerados por ele, no estudo de casos reais relacionados ao golpe de aríete.

Diante disso, este trabalho tem potencial para contribuir com o desenvolvimento de novas pesquisas a respeito das aplicações do método das características e da importância do estudo aprofundado dos transientes hidráulicos. Sugere-se que trabalhos futuros resolvam problemas reais com o software aqui apresentado e avaliem o grau de confiabilidade dele.

## REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12215:2017**: Projeto De Adutora De Água. Rio de Janeiro, 2017.
- BOULOS, Paul F. *et al.* Hydraulic Transient Guidelines for Protecting Water Distribution Systems. **American Water Works Association**, v. 97, n. 5, p. 111-124, Maio 2005. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2005.tb10892.x>
- CHAUDHRY, M. Hanif. **Applied hydraulic transients**. Nova York: Van Nostrand Reinhold Company, 1979. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8538-4>
- COSTA, Raimundo Nonato Távora. **Golpe de aríete - Transiente hidráulico**. 2011. Disponível em: <http://www.gpeas.ufc.br/disc/hidr/aula05.pdf>. Acesso em: 18 mai. 2022.
- ELBASHIR, Mosab A. Magzoub; AMOAH, Samuel Oduro Kwame. **Hydraulic Transient in a Pipeline**: Using Computer Model to Calculate and Simulate Transient. Lund, Suécia, 2007. 96 p Tese - Lund University.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 10 mai. 2022.
- GHIDAOUI, Mohamed S. *et al.* A Review of Water Hammer Theory and Practice. **Applied Mechanics Reviews**, v. 58, p. 49-76, Jan. 2005. <https://doi.org/10.1115/1.1828050>
- GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL. Agência reguladora de águas, energia e saneamento básico do Distrito Federal. Relatório de vistoria e fiscalização, de 03 de fevereiro de 2021. Fiscalização Indireta - Sistema Corumbá IV, 5 fev. 2021.
- ISABEL, João Filipe Abelho. **Avaliação do Comportamento Dinâmico de uma Chaminé de Equilíbrio**. Lisboa, 2015. 64 p Dissertação (Engenharia Mecânica) - Universidade Nova de Lisboa.
- IZQUIERDO, J.; IGLESIAS, P. L.. Mathematical Modelling of Hydraulic Transients in Simple Systems . *In*: MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING, Valência, Espanha: Pergamon, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(02\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(02)00051-1)
- MACINTYRE, Archibald Joseph. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2 ed. Rio de Janeiro, f. 391, 1997. 782 p.

NETTO, Azevedo; FERNÁNDEZ, Miguel y Fernández. **Manual de hidráulica**. 9 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2018. 632 p.

OLIVEIRA , Bruno Alexandre de . **Conhecendo os componentes de uma usina hidrelétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 123 p.

ROSA, Eugênio. **Aula 20 - Perdas de carga localizadas**. Campinas: Unicamp, 2023. 31 slides, color.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de água**. 3 ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 643 p.