

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

PEDRO THOMAZ GONZALES VIVIANI

**ANÁLISE DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS COM O MÉTODO DAS
CARACTERÍSTICAS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM PYTHON**

UBERLÂNDIA

2026

PEDRO THOMAZ GONZALES VIVIANI

**ANÁLISE DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS COM O MÉTODO DAS
CARACTERÍSTICAS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM PYTHON**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia, como
parte dos requisitos para a obtenção do título
de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Alice Rosa da Silva

Coorientador: Bruno de Oliveira Lázaro

UBERLÂNDIA

2026

PEDRO THOMAZ GONZALES VIVIANI

**Análise de transientes hidráulicos com o método das características e
simulação computacional em Python**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia, como
parte dos requisitos para a obtenção do título
de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. Iridalques Fernandes de Paula Faculdade: Engenharia Civil - UFU.

(Membro da Banca)

Julgamento_____ Assinatura_____

Prof. Dr. Michael Andrade Maedo Faculdade: Engenharia Civil - UFU.

(Membro da Banca)

Julgamento_____ Assinatura_____

Prof. Dr. Alice Rosa da Silva Faculdade: Engenharia Civil - UFU.

(Presidente da Banca - Orientadora)

Julgamento_____ Assinatura_____

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha mãe Gisella, aos meus avós José e Rubens e a minha esposa Hyrlana. Com admiração e gratidão pelo apoio e presença durante a minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar meu agradecimento aos familiares que me acompanharam durante toda a jornada da graduação, sendo o apoio deles essencial. Também agradeço os professores e técnicos, sem os quais nada seria alcançado. Por último, minha gratidão eterna à instituição UFU.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e aplicação de um algoritmo computacional, implementado na linguagem Python, para análise de transientes hidráulicos em condutos forçados, com ênfase no fenômeno do golpe de aríete. Utilizando o Método das Características (MOC), foram formuladas e discretizadas as equações da hidráulica, considerando condições de contorno típicas de sistemas de reservatório, tubo e válvula (RTV). A simulação, aplicada a um modelo de tubulação com fechamento rápido de válvula, gerou resultados estáticos, em forma de gráficos, e dinâmicos, por meio de vídeos, evidenciando a propagação de ondas de pressão e as variações de vazão ao longo do tempo. O estudo contribui para a compreensão e visualização do comportamento transitório em sistemas hidráulicos, oferecendo uma ferramenta de baixo custo, de fácil replicação e alinhada às recomendações normativas, com potencial para aplicação acadêmica e profissional.

Palavras-chave: Golpe de aríete; Transiente hidráulico; Método das características; Modelagem; Python.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Situação modelo	23
Figura 2: Fluxo de funcionamento do programa	24
Figura 3: Representação da discretização do modelo	26
Figura 4: Representação do modelo com as matrizes de resultado	27
Figura 5: Caso 0.....	31
Figura 6: Caso 1.....	32
Figura 7: Caso 2.....	32
Figura 8: Caso 3.....	35
Figura 9: Caso 4.....	35
Figura 10: Caso 5.....	36
Figura 11: Caso 6.....	37
Figura 12: Caso 7.....	38
Figura 13: Caso 8.....	38
Figura 14: Caso 9.....	39
Figura 15: Modelagem do sistema no Allievi	44
Figura 16: Dados do reservatório.....	44
Figura 17: Dados da tubulação	44
Figura 18: Dados da válvula	45
Figura 19: Comportamento do fechamento da válvula no Allievi	45
Figura 20: Envoltórias de pressão Allievi.....	46
Figura 21: Resultados Allievi	46
Figura 32: Tabela de especificações da linha PBA (Amanco/Wavin).....	53
Figura 33: Especificações técnicas da linha PBA (Amanco/Wavin)	53
Figura 34: Tabela de especificações técnicas da linha Tupper (Arcelormital).....	54
Figura 35: Tabela de especificações dimensionais da linha Tupper (Arcelormital)	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (**ANA**)

Associação Brasileira de Normas Técnicas (**ABNT**)

Norma Brasileira (**NBR**)

LISTA DE SÍMBOLOS

$h_{m\acute{a}x}$	Sobrepresão máxima [<i>m. c. a.</i>]
c	Celeridade [<i>m/s</i>]
v	Velocidade [<i>m/s</i>]
g	Aceleração da gravidade [<i>m/s²</i>]
A	Área de seção transversal [<i>m²</i>]
t	Tempo [<i>s</i>]
Q	Vazão [<i>m³/s</i>]
H	Carga hidráulica [<i>m. c. a.</i>]
D	Diâmetro [<i>m</i>]
f	Coeficiente de atrito
k	Coeficiente de perda de carga localizada
t_m	Tempo de manobra [<i>s</i>]
τ	Fase ou período da tubulação [<i>s/m</i>]
L_t	Comprimento da tubulação [<i>m</i>]
$\frac{\partial Q}{\partial t}$	Taxa de variação da vazão em relação ao tempo [<i>m³/s²</i>]
$\frac{\partial H}{\partial x}$	Taxa de variação da pressão em relação ao comprimento longitudinal da tubulação [<i>m. c. a./m</i>]
$\frac{\partial H}{\partial t}$	Taxa de variação da pressão em relação ao tempo [<i>m. c. a./s</i>]
$\frac{\partial Q}{\partial x}$	Taxa de variação da vazão em relação ao comprimento longitudinal da tubulação [<i>m³/s · m</i>]
kc	Coeficiente que leva em conta o módulo de elasticidade do material
LE	Limite de escoamento do material da tubulação [<i>N/mm²</i>]
R	Resistência a pressão interna do tubo [<i>Mpa</i>]
ε	Módulo de elasticidade [<i>Pa</i>]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS.....	13
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
3.1. TRANSIENTE HIDRÁULICO	14
3.2. DISPOSITIVOS E ACESSÓRIOS DE CONTROLE	15
3.3. EQUAÇÕES DA HIDRÁULICA.....	16
3.4. NORMATIZAÇÃO	17
3.5. ESTADO DA ARTE	19
4. METODOLOGIA	21
4.1. MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS	21
4.2. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA	23
4.2.1. SITUAÇÃO MODELO E INICIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS	25
4.2.2. DISCRETIZAÇÃO E CÁLCULO EM REGIME PERMANENTE.....	26
4.2.3. SIMULAÇÃO	28
4.2.4. COMO OS RESULTADOS SÃO MOSTRADOS	28
4.2.5. CASOS SIMULADOS.....	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO CASO 0	30
5.2. RESULTADOS CASOS 1 E 2	31
5.3. RESULTADOS CASOS 3 E 4	34
5.4. RESULTADOS CASOS 5 E 6	36
5.5. RESULTADOS CASOS 7, 8 e 9	37
5.6. COMPARAÇÃO FINAL	39
5.7. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	40
5.8. COMPARAÇÃO COM OUTROS PROGRAMAS.....	44
5.9. COMPARAÇÃO E ERROS DE TODOS OS CASOS	47
6. CONCLUSÃO	49
7. REFERÊNCIAS	51

ANEXO A – Informações catálogo técnico dos tubos de PVC PBA (Amanco/Wavin)
53

ANEXO B – Informações catálogo técnico dos tubos de aço linha Tupper
(ArcelorMittal)54

1. INTRODUÇÃO

A água é um elemento fundamental para a vida humana, tanto do ponto de vista biológico quanto social. Também exerce papel relevante na formação das sociedades, sendo responsável pela transição de grupos nômades para sociedades agrícolas (Tsutiya, 2006). O domínio do uso da água influenciou o arranjo social humano e aumentou a dependência desse recurso pelas sociedades.

Esse recurso vital apresenta distribuição desigual em escala global. Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2025), embora cerca de 70% da superfície terrestre seja composta por água, apenas 2,5% desse volume é próprio para consumo humano e, desse percentual, aproximadamente 69% encontram-se em geleiras, o que dificulta seu acesso. Além da distribuição heterogênea, a disponibilidade hídrica sofre variações significativas ao longo do tempo (Lara Pinto Coelho e Benedito Baptista, 2010), sendo fortemente influenciada pelas estações do ano.

Devido à incerteza sobre o acesso à água, as sociedades desenvolveram técnicas para transportar, armazenar e tratar esse recurso em diferentes regiões. Com o avanço científico e da experiência, as obras hidráulicas tornaram-se mais complexas e socialmente relevantes. Assim, garantir a segurança e o funcionamento dessas instalações é essencial para a sociedade.

O estudo de transientes hidráulicos em condutos forçados é de extrema importância para a segurança operacional de uma instalação hidráulica. Esse fenômeno consiste em variações bruscas de velocidade de escoamento de um fluido. Essas variações de velocidade ocasionam ondas de subpressão e sobrepressão em condutos forçados, que transitam na tubulação como um fenômeno ondulatório que percorre o conduto com velocidade de propagação de onda, dependendo do módulo de elasticidade do material da canalização (Netto, 2015, p. 295).

Essas ondas de variação de pressão podem apresentar valores superiores ou inferiores aos observados em regime permanente. Por isso, é necessário verificar se, em caso de golpe de aríete, a tubulação continua atendendo aos critérios de segurança para operação.

A análise de fenômenos de transitórios hidráulicos envolve o desenvolvimento das equações diferenciais da hidráulica, por se tratar de um processo complexo e que demanda uma grande carga de estudo específico. Por muito tempo a análise desse fenômeno foi feita com base em equações e metodologias empíricas.

Uma das metodologias mais utilizadas é o cálculo da pressão máxima, em caso de ocorrência do golpe de aríete, pela equação de Joukowski, em que é possível determinar essa pressão através da multiplicação da celeridade pela velocidade da água na tubulação em regime permanente e dividindo esse valor pela aceleração da gravidade (Tsutiya, 2006).

Porém, com o desenvolvimento de metodologias numéricas, tornou-se possível simplificar a análise desses fenômenos. Assim, as metodologias empíricas passam a ser recomendadas apenas como formas de estimativas para cálculos expeditos. No entanto, muitos engenheiros acabam utilizando a equação de Joukowski como parte do cálculo de transientes hidráulicos, sendo uma solução inapropriada para análise desse fenômeno.

A criação de soluções acessíveis para cálculos dos efeitos de transientes hidráulicos é fundamental nesse cenário, uma vez que pode ajudar a tornar a análise desse fenômeno mais precisa para cálculos oficiais. Linguagens de programação livres como o Python e metodologias de cálculo para soluções de equações diferenciais como o método das características são grandes aliadas para a popularização e simplificação desse processo de cálculo. Dessa forma, garante-se a segurança das instalações e, por consequência, a sua durabilidade e eficiência.

Neste trabalho será desenvolvido e detalhado o processo de criação de um algoritmo simples em Python, utilizando o método das características para calcular os efeitos dos transientes hidráulicos ocasionados pelo fechamento rápido de uma válvula.

2. OBJETIVOS

Analisar o comportamento de transientes hidráulicos utilizando o Método das Características para desenvolver as equações diferenciais da hidráulica e criar uma aplicação computacional em Python para simulação e análise gráfica dos resultados.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. TRANSIENTE HIDRÁULICO

O termo transiente hidráulico refere-se à mudança de velocidade de escoamento no tempo. Quando essa variação é de transientes rápidos, ocorre uma onda de subpressão e sobrepressão que caminha na tubulação em velocidades muito elevadas (Lara Pinto Coelho e Benedito Baptista, 2010, p. 94). Esse fenômeno pode ocorrer devido a diversos fatores, como a abertura e fechamento bruscos de válvulas e início e paradas de bombas de água. Esse fenômeno é também popularmente denominado como "Golpe de aríete", que faz referência ao som violento do choque das ondas de pressão nas paredes do conduto, semelhante ao vai e vem de um aríete (Lara Pinto Coelho e Benedito Baptista, 2010, p. 95).

Uma maneira eficiente de compreendê-lo consiste na análise de um exemplo que simula o fechamento abrupto de uma válvula, localizada na extremidade de uma tubulação abastecida por um reservatório de nível constante.

Inicialmente, a válvula está aberta, permitindo o escoamento com vazão Q e velocidade v_0 , em regime permanente. Ao ser fechada subitamente no instante $t = t_0$, o líquido é freado, e sua energia cinética se transforma em pressão. Isso gera uma onda de pressão que se propaga no sentido contrário ao escoamento, com velocidade v , expandindo a tubulação.

Quando essa onda atinge o reservatório, todo o fluido no tubo está parado, e a energia se acumula como energia elástica na parede do tubo. A pressão interna então supera a do reservatório, invertendo o fluxo e reflete a onda de volta à válvula. Como ela permanece fechada, forma-se uma onda de descompressão que retorna ao reservatório, onde se reflete novamente, reiniciando o ciclo.

Esse fenômeno, conhecido como golpe de aríete, se repete diversas vezes. Na prática, perdas de energia vão amortecendo gradualmente as ondas, até que o sistema atinja o repouso.

Para se ter uma ideia da escala do problema, em uma tubulação cuja velocidade de propagação da onda de pressão seja 1300m/s uma variação de velocidade de 1m/s pode causar uma sobrecarga de pressão da ordem de 130m (Lara Pinto Coelho e Benedito Baptista , 2010).

Essa velocidade de propagação da onda de pressão é chamada, também, de celeridade (c), e é função do coeficiente de elasticidade do material da tubulação, da espessura relativa do tubo e de fatores da forma de fixação desses tubos (Netto, 2015). A fase ou período da tubulação (τ) é o tempo que essa onda de sobrepressão (ou de subpressão) leva para ir e voltar de uma extremidade a outra, e pode ser determinado dividindo duas vezes o comprimento da tubulação pela celeridade.

Esse parâmetro é de extrema importância para determinação dos efeitos de golpe de aríete, uma vez que o tempo de manobra (t_m) das válvulas do sistema é importante na geração de transientes hidráulicos. Denomina-se tempo de manobra lento se esse tempo é maior que o período da tubulação e manobra rápida se for menor que o período. Os maiores valores de sobrepressão e subpressão ocorrem quando a manobra é rápida ($\tau < t_m$) (Netto, 2015).

Nesse cenário, a análise de transientes em sistemas hidráulicos pode ser um ponto crítico para a garantia da segurança operacional da instalação. É durante a fase de projeto que são definidas quais soluções serão aplicadas para reduzir os efeitos do golpe de aríete.

3.2. DISPOSITIVOS E ACESSÓRIOS DE CONTROLE

Os transitórios hidráulicos, em especial o fenômeno de golpe de aríete, representam riscos significativos para a integridade das redes hidráulicas. Para proteger os equipamentos e a estrutura das tubulações contra pressões excessivas, é fundamental adotar medidas mitigadoras no projeto e na operação dessas instalações.

Para controlar e minimizar esses impactos, diversas tecnologias são empregadas com funções específicas. Dispositivos operacionais como ventosas, válvulas de alívio, de retenção e tanques alimentadores unidirecionais atuam no controle de bolsões de ar, no alívio rápido de sobrepressões, na prevenção do refluxo e na proteção contra a cavitação.

Paralelamente, outras soluções, como reservatórios hidropneumáticos, chaminés de equilíbrio e volantes de inércia acoplados a bombas, são essenciais para suavizar o impacto das ondas de pressão no sistema.

Sendo assim, a mitigação dos efeitos do golpe de aríete exige um profundo conhecimento físico do problema e a correta aplicação dessas tecnologias protetivas. Aliando essas alternativas a ferramentas modernas de simulação e análises detalhadas, os projetistas e operadores conseguem desenvolver sistemas hidráulicos cada vez mais seguros, eficientes e resilientes frente aos desafios operacionais.

3.3.EQUAÇÕES DA HIDRÁULICA

Para o estudo dos transitórios hidráulicos são utilizadas duas equações fundamentais da hidráulica, a equação da continuidade (Eq.1) e a equação da conservação da quantidade de movimento (Eq. 2).

$$c^2 \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

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

A partir do desenvolvimento dessas equações, é possível modelar com precisão os fenômenos do golpe de aríete (Tsutiya, 2006). O método das características constitui uma abordagem eficaz para a resolução desse tipo de equações. Por meio da combinação linear, é possível transformar equações diferenciais parciais em equações diferenciais ordinárias, válidas sob condições específicas, conhecidas como caminhos característicos.

Essas novas equações possibilitam a discretização do cálculo dos fatores hidráulicos de interesse. Assim, é possível determinar o valor da pressão e vazão em qualquer ponto do sistema em um instante definido. Para isso, deve-se considerar as condições de contorno existentes. Dependendo da complexidade da situação analisada, esse processo fica extenso para cálculos manuais, mas torna-se simples quando realizado utilizando metodologias numéricas e computadores.

Portanto, analisar os efeitos de transientes hidráulicos com foco na prevenção de golpes de aríete é um processo complexo, que exige conhecimento aprofundado da disciplina de hidráulica. No entanto, utilizando o método das características, é possível modelar instalações hidráulicas complexas de maneira relativamente simples.

Muitos programas computacionais comerciais da área de hidráulica calculam os efeitos de transientes. No entanto, por se tratar de programas fechados e muitas vezes complexos, podem dificultar a análise dos casos mais simples e o entendimento de como foram calculados os resultados. Portanto, ser capaz de modelar um caso e calcular os efeitos de interesse de maneira ágil pode ser um grande diferencial, considerando a crescente demanda por prazos de entrega mais curtos em projetos.

Dessa forma, a utilização do método das características aliado a metodologias numéricas oferece uma alternativa eficiente e acessível para o estudo dos transientes hidráulicos, especialmente no contexto de golpes de aríete.

3.4. NORMATIZAÇÃO

Para lidar com a complexidade associada aos transientes hidráulicos em sistemas pressurizados, as principais recomendações técnicas para sua análise encontram-se estabelecidas em normas brasileiras voltadas ao abastecimento público de água, como a NBR 12214 e a NBR 12218, já que no Brasil não existem normas específicas que tratem somente dos fenômenos transientes. Dentre essas, destaca-se a NBR 12215-1:2017, que trata do projeto de adutoras de água e estabelece diretrizes específicas quanto à necessidade de prever, analisar e mitigar os efeitos dos fenômenos transitórios, constituindo-se como referência fundamental para engenheiros e projetistas.

De acordo com a NBR 12215-1:2017, a análise dos transientes hidráulicos deve ser realizada em todas as fases do projeto, desde os estudos preliminares até o detalhamento executivo. A norma recomenda que, inicialmente, os efeitos transitórios sejam avaliados sem a consideração de dispositivos de controle ou proteção, de modo a identificar a condição mais crítica do sistema. Caso sejam observadas pressões excessivas ou subpressões prejudiciais, esses dispositivos devem ser dimensionados, incorporados ao projeto e, posteriormente, incluídos em uma nova análise hidráulica.

No que se refere aos procedimentos de cálculo, a norma estabelece que a avaliação dos transientes hidráulicos deve ser realizada por meio de softwares específicos, baseados em modelagem matemática capaz de representar adequadamente o comportamento físico do sistema hidráulico. Esses programas devem empregar métodos numéricos para a resolução das equações diferenciais que governam os fenômenos transitórios, sendo citados, entre outros, o Método das Características, o Método das Ondas Planas, o Método das Diferenças Finitas e o Método dos Elementos Finitos. Além disso, os resultados das simulações devem contemplar envoltórias de pressões máximas e mínimas, linhas piezométricas em regime permanente e transitório, bem como análises comparativas entre cenários com e sem dispositivos de proteção, considerando adequadamente as condições de contorno do sistema avaliado.

A norma também ressalta que a análise dos transientes hidráulicos deve permitir a determinação das vazões e pressões em qualquer instante e em qualquer seção do sistema, evidenciando a necessidade de uma avaliação tanto local quanto global dos efeitos desses fenômenos. Tal exigência reforça a importância de modelos capazes de representar adequadamente a propagação das ondas de pressão ao longo das adutoras, permitindo a identificação de pontos críticos sujeitos a sobrepressões, subpressões ou condições favoráveis à ocorrência de cavitação.

Embora a NBR 12215-1:2017 estabeleça diretrizes claras quanto à obrigatoriedade da análise de transientes hidráulicos, observa-se que a norma não detalha os procedimentos numéricos a serem adotados, nem define critérios objetivos para a escolha de parâmetros de cálculo, como a discretização temporal e espacial ou os valores de celeridade da onda. Dessa forma, a norma define o escopo da análise, mas delega ao projetista a responsabilidade pela seleção, calibração e validação do modelo matemático e do método numérico empregados. Adicionalmente, ao priorizar a apresentação de envoltórias de pressões máximas e mínimas, a norma enfatiza a segurança estrutural do sistema, mas não aprofunda a análise do comportamento transitório ao longo do tempo, o que pode ocultar fenômenos críticos de curta duração.

Dessa maneira, a normatização técnica exercida pela ABNT, especialmente por meio da NBR 12215-1:2017, revela-se essencial para garantir a segurança, a confiabilidade operacional e o adequado dimensionamento de sistemas de adução de

água. Contudo, a correta aplicação da norma exige do projetista sólido domínio teórico e numérico dos métodos de simulação de transientes hidráulicos, bem como a realização de análises complementares que permitam uma avaliação mais detalhada do comportamento dinâmico do sistema, como as desenvolvidas no presente trabalho.

3.5. ESTADO DA ARTE

Nas últimas décadas, o estudo dos transientes hidráulicos tem ganhado destaque na engenharia hidráulica devido aos riscos que esses fenômenos representam para a integridade e operação de sistemas hidráulicos. Situações como golpe de aríete, se não previstas e controladas adequadamente, podem causar danos estruturais graves e interrupções operacionais. Diante desse cenário, diversos pesquisadores têm se dedicado ao desenvolvimento e aplicação de modelos matemáticos e computacionais capazes de simular com precisão esses eventos, permitindo análises mais seguras e eficientes.

Lins e Soares (2022) apresentam uma revisão abrangente dos principais métodos numéricos aplicados à simulação de transientes hidráulicos, com ênfase nas equações governantes do fenômeno e nas formas de resolução, como o Método das Características (MOC), o Método das Ondas Características e o Método dos Volumes Finitos. O estudo destaca a importância da seleção do modelo com base na acurácia e eficiência computacional, além de apresentar uma aplicação prática com o desenvolvimento de uma rotina computacional em Python para simular o fechamento de uma válvula em um sistema reservatório-tubo-válvula. Os resultados reforçam a relevância da calibração dos parâmetros hidráulicos para representar adequadamente os efeitos do golpe de aríete em sistemas pressurizados, corroborando a abordagem adotada neste trabalho.

Nesse contexto, destaca-se o trabalho de Araújo et al. (2010), que apresenta o desenvolvimento e a validação de um modelo hidráulico baseado no Método das Características aplicado à simulação de redes de abastecimento de água em regime permanente e quase permanente. O modelo, reformulado a partir do algoritmo CALHIDREDMT, foi implementado para representar redes com diferentes elementos hidráulicos, como reservatórios de nível fixo e variável, estações elevatórias e *boosters*,

sendo seus resultados comparados ao simulador EPANET. As análises demonstraram elevada compatibilidade entre os modelos, com erros reduzidos para pressões e vazões na maioria dos casos, além de evidenciar a influência de parâmetros numéricos, como a celeridade fictícia e a introdução gradual das demandas, no processo de convergência. O estudo reforça a robustez do Método das Características não apenas para a análise de transitórios rápidos, mas também como ferramenta consistente para a obtenção do regime permanente por meio de pseudo-transitórios, contribuindo para o avanço das técnicas de modelagem hidráulica aplicadas a sistemas pressurizados.

O artigo de Souza, Silva e Lázaro (2022) se propõe a abordar de maneira detalhada o equacionamento analítico dos transientes hidráulicos, especificamente do golpe de aríete. Apesar da predominância de abordagens computacionais na literatura recente, os autores reforçam a importância da compreensão das bases matemáticas que regem o fenômeno, destacando o Método das Características (MOC) como ferramenta fundamental recomendada por normas brasileiras, como a NB-591/1991.

A partir das equações da continuidade e do movimento, o artigo demonstra como o MOC transforma o sistema de equações diferenciais parciais em equações diferenciais ordinárias, facilitando sua resolução e interpretação gráfica. São ainda discutidas condições de contorno usuais, como reservatórios, válvulas e orifícios, com exemplos práticos que ilustram a aplicação do método. Os autores concluem que o domínio analítico do método permite maior autonomia e eficiência na modelagem de sistemas hidráulicos, contribuindo para diagnósticos mais precisos e seguros.

Todo o equacionamento teórico e a estruturação matemática do modelo de transiente hidráulico desenvolvidos neste trabalho foram fundamentados nas orientações e formulações apresentadas por Souza, Silva e Lázaro (2022), cuja abordagem detalhada do Método das Características serviu como base para a simulação dos fenômenos analisados.

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do programa computacional, as equações fundamentais da hidráulica foram combinadas e resolvidas utilizando o Método das Características. Na sequência, detalha-se a elaboração do algoritmo para o cálculo dos efeitos do golpe de aríete, fundamentado na resolução numérica dessas equações.

4.1. MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

A aplicação do Método das Características nas equações (Eq. 1) e (Eq. 2) resultou na obtenção das equações características (Eq. 3) e (Eq. 4).

$$(Q_p - Q_a) + C_a \cdot (H_p - H_a) + k \cdot Q_a \cdot |Q_a| = 0 \quad (3)$$

$$(Q_p - Q_b) - C_a \cdot (H_p - H_b) + k \cdot Q_b \cdot |Q_b| = 0 \quad (4)$$

Sendo:

Q_a a vazão no instante anterior (t) no ponto característico a

Q_b a vazão no instante anterior (t) no ponto característico b

Q_p a vazão no instante $t + dt$ no ponto característico p

H_a a pressão no instante anterior (t) no ponto característico a

H_b a pressão no instante anterior (t) no ponto característico b

H_p a pressão no instante $t + dt$ no ponto característico p

$$C_a = \frac{g \cdot A}{c}$$

$$k = \frac{f \cdot dt}{2 \cdot D \cdot A}$$

Devido à relação não linear do termo de atrito (k) com a vazão, o cálculo baseado exclusivamente na vazão do instante de tempo anterior (t) pode gerar instabilidade numérica, comprometendo a representação física do amortecimento do fenômeno. Visando garantir a estabilidade do modelo computacional, adota-se a linearização

sugerida por Wylie & Streeter (1993), que vincula o fator de atrito à vazão do instante a ser calculado ($t + dt$), representada por Q_p . Dessa forma, as equações governantes assumem a forma expressa em (Eq.5) e (Eq.6).

$$C^+: (Q_p - Q_a) + C_a \cdot (H_p - H_a) + k \cdot Q_p \cdot |Q_a| = 0 \quad (5)$$

$$C^-: (Q_p - Q_b) - C_a \cdot (H_p - H_b) + k \cdot Q_p \cdot |Q_b| = 0 \quad (6)$$

Reescrevendo essas equações:

$$Q_p + C_a \cdot H_p = Q_a + C_a \cdot H_a - k \cdot Q_p \cdot |Q_a| \quad (7)$$

$$Q_p - C_a \cdot H_p = Q_b - C_a \cdot H_b - k \cdot Q_p \cdot |Q_b| \quad (8)$$

Chamando $Q_a + C_a \cdot H_a = C_p$ e $Q_b - C_a \cdot H_b = C_n$ é possível somar as equações (Eq.7) e (Eq.8) obtendo a equação (Eq.9) que possibilita o cálculo da vazão no sistema.

$$Q_p = \frac{C_p + C_n}{2 \cdot (1 + k \cdot |Q_a| \cdot |Q_b|)} \quad (9)$$

Subtraindo as equações (Eq.7) e (Eq.8) e considerando $|Q_a| \approx |Q_b|$, pois os instantes de cálculo são próximos ($dt \sim 0$), é possível determinar a equação (Eq.10) que permite calcular a pressão no sistema.

$$H_p = \frac{C_p - C_n}{2 \cdot C_a} \quad (10)$$

Conforme discutido por Wylie & Streeter (1993) o método das características trata o fluido como um meio contínuo, elástico e monofásico, assim, o modelo matemático básico não sabe dos limites físicos de pressões do líquido em escoamento. Ou seja, durante as simulações o modelo permite o cálculo de pressões menores que a pressão de vapor do fluido. Para casos em que a dinâmica do escoamento faria com que a pressão caísse abaixo da pressão de vapor é necessário a utilização de um modelo que

considera os limites físicos do líquido em sua formulação, como o modelo de cavidade de vapor discreta.

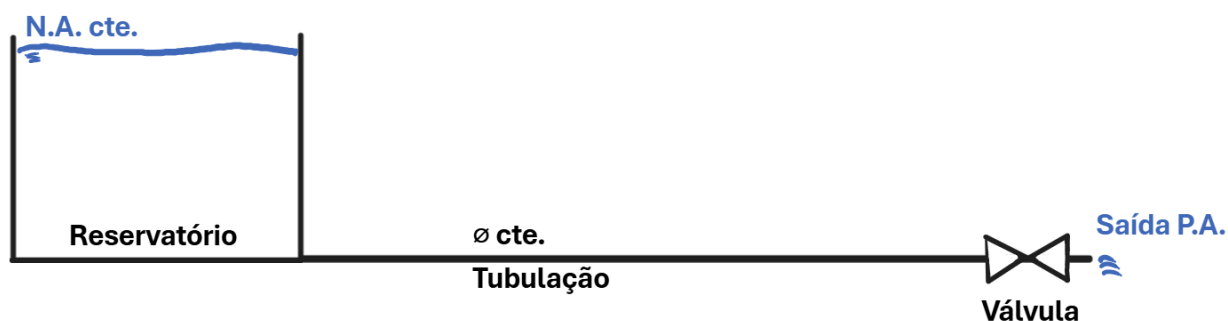
"A premissa para este esquema computacional é que, sempre que uma seção apresenta uma pressão igual ou inferior à pressão de vapor, a seção deve ser tratada como um local de pressão fixa. A pressão é mantida na pressão de vapor, as vazões de entrada e saída são computadas, e permite-se que a cavidade cresça e colapse de acordo com os princípios de conservação de massa na seção." (WYLIE & STREETER, 1993, p. 67, traduzido)

Em resumo, o método das características calcula pressões negativas por ser um modelo que não considera os limites físicos do líquido. Nesse trabalho, foi utilizado o modelo básico com o método das características, que permite o cálculo de pressões negativas, mas a análise dos resultados deve ser feita entendendo as limitações do modelo.

4.2. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA

Para o desenvolvimento do programa computacional, adotou-se um sistema hidráulico de referência simplificado. Este sistema é composto por um reservatório de grandes dimensões (assumido como de nível constante), uma tubulação de diâmetro constante e uma válvula na extremidade de jusante, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Situação modelo



Fonte: Autor

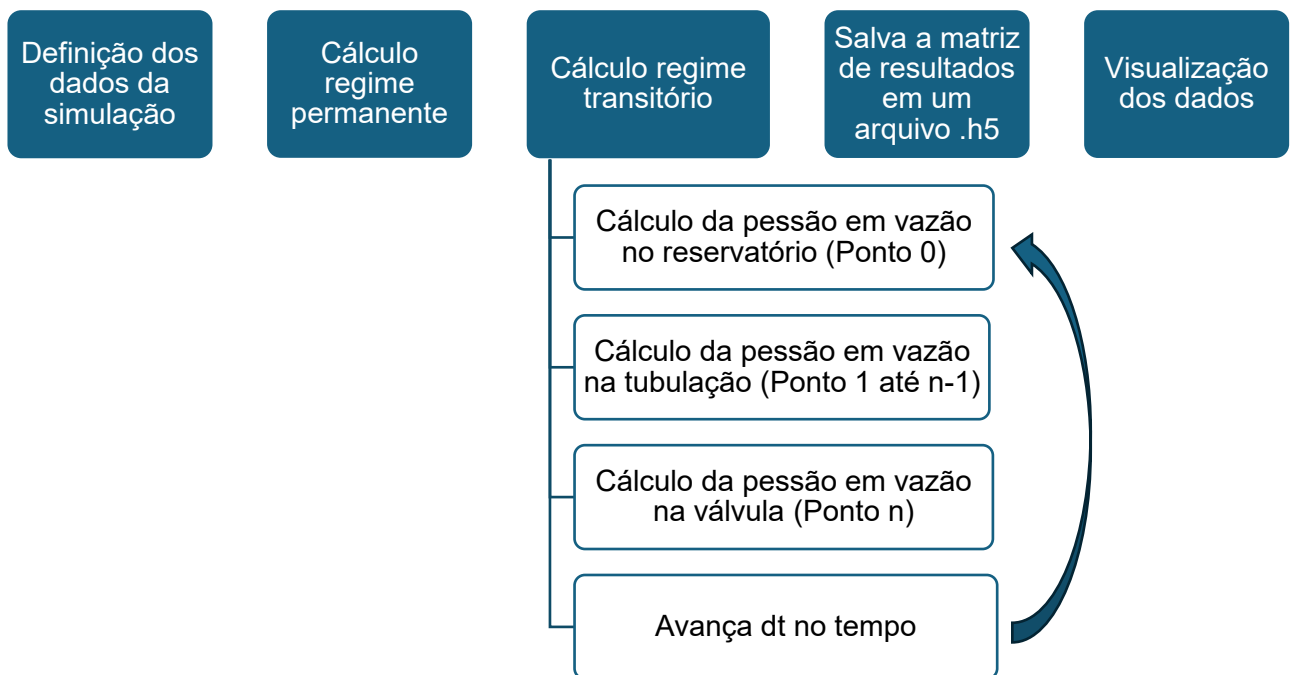
A partir da modelagem do sistema, foram obtidas as condições de contorno necessárias para a solução numérica no Método das Características. No nó de montante, a carga hidráulica do reservatório permanece constante e igual ao seu nível de água (H_0).

Desprezando-se a perda de carga localizada na entrada da tubulação, a vazão efluente do reservatório (Q_p) é calculada pela equação (Eq. 8). No nó de jusante, a carga piezométrica (H_p) junto à válvula é obtida pela equação (Eq. 7), enquanto a vazão depende da manobra de fechamento. Neste trabalho, considerou-se um fechamento linear, no qual a área efetiva de passagem da válvula reduz-se proporcionalmente ao tempo, permitindo o cálculo da vazão através da equação (Eq. 11).

$$Q_v(t) = v_0 \cdot \left(A_0 - \frac{A_0}{t_m} \cdot t \right) \quad (11)$$

Estabelecidas as equações governantes e as condições de contorno, desenvolveu-se um algoritmo computacional para simular os efeitos do golpe de aríete no sistema. A estrutura lógica e o processamento numérico desse algoritmo obedecem ao fluxo de cálculo apresentado nas Figura 2.

Figura 2: Fluxo de funcionamento do programa



Fonte: Autor

4.2.1. SITUAÇÃO MODELO E INICIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS

Na etapa inicial, o algoritmo recebe os dados de entrada que caracterizam o sistema físico e definem os parâmetros da simulação. Os dados inseridos compreendem a geometria do conduto (comprimento, diâmetro interno e espessura da parede), os parâmetros hidráulicos (fator de atrito e nível d'água do reservatório) e a discretização da malha (comprimento das seções de cálculo e tempo total de simulação). Define-se também o tempo de fechamento da válvula, expresso como uma fração do período da tubulação. A partir dessas informações, o programa calcula as condições iniciais de regime permanente: a área da seção transversal pela equação (Eq. 12), a velocidade do escoamento, aplicando-se a equação de Bernoulli entre a superfície do reservatório e a saída da tubulação (Eq. 13); a vazão inicial pela equação da continuidade (Eq. 14), e a celeridade da tubulação pela equação (Eq. 15).

$$A_0 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (12)$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{H_r \cdot 2 \cdot g}{1 + f \cdot \frac{L_t}{D}}} \quad (13)$$

$$Q_0 = A_0 \cdot v_0 \quad (14)$$

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + kc \cdot \frac{D}{e}}} \quad (15)$$

Após os parâmetros iniciais calculados, o programa calcula os coeficientes constantes utilizados no método das características, sendo eles:

$$C_a = \frac{g \cdot A}{c} \quad (16)$$

$$k = \frac{f \cdot dt}{2 \cdot D \cdot A} \quad (17)$$

$$dt = \frac{dx}{c} \quad (18)$$

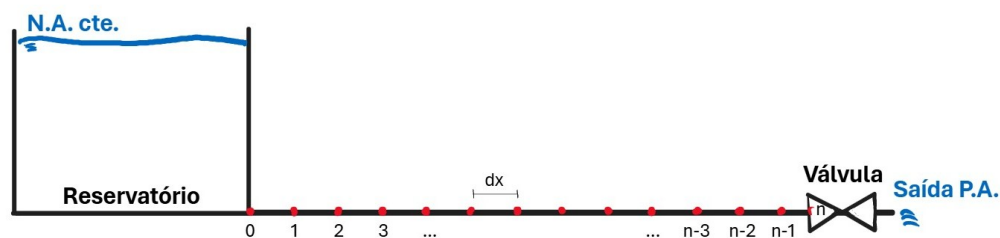
$$\tau = 2 \cdot \frac{L_t}{c} \quad (19)$$

4.2.2. DISCRETIZAÇÃO E CÁLCULO EM REGIME PERMANENTE

Após o cálculo dos parâmetros iniciais, o algoritmo faz a discretização do modelo e a inicialização das matrizes de resultados. O incremento espacial (dx), definido nos dados de entrada, estabelece a extensão dos trechos elementares da tubulação onde as variáveis de pressão e vazão serão calculadas, determinando a quantidade de elementos por linha da matriz de resultados (Figura 3).

Devido à formulação do Método das Características, esse incremento espacial condiciona diretamente o passo de tempo da simulação (dt , eq. 18), que por sua vez influencia o termo do atrito (k , eq. 17). Com isso, a diminuição do incremento espacial, diminui proporcionalmente o incremento temporal diminuindo proporcionalmente o termo do atrito. Em contrapartida, essa diminuição é compensada com mais pontos de cálculo na matriz de resultados. Assim, quanto mais refinada for a malha (menor dx) menores serão os intervalos de tempo entre as iterações, o que proporciona maior volume de dados calculados, resultando em um consequente aumento do custo computacional.

Figura 3: Representação da discretização do modelo



Fonte: Autor

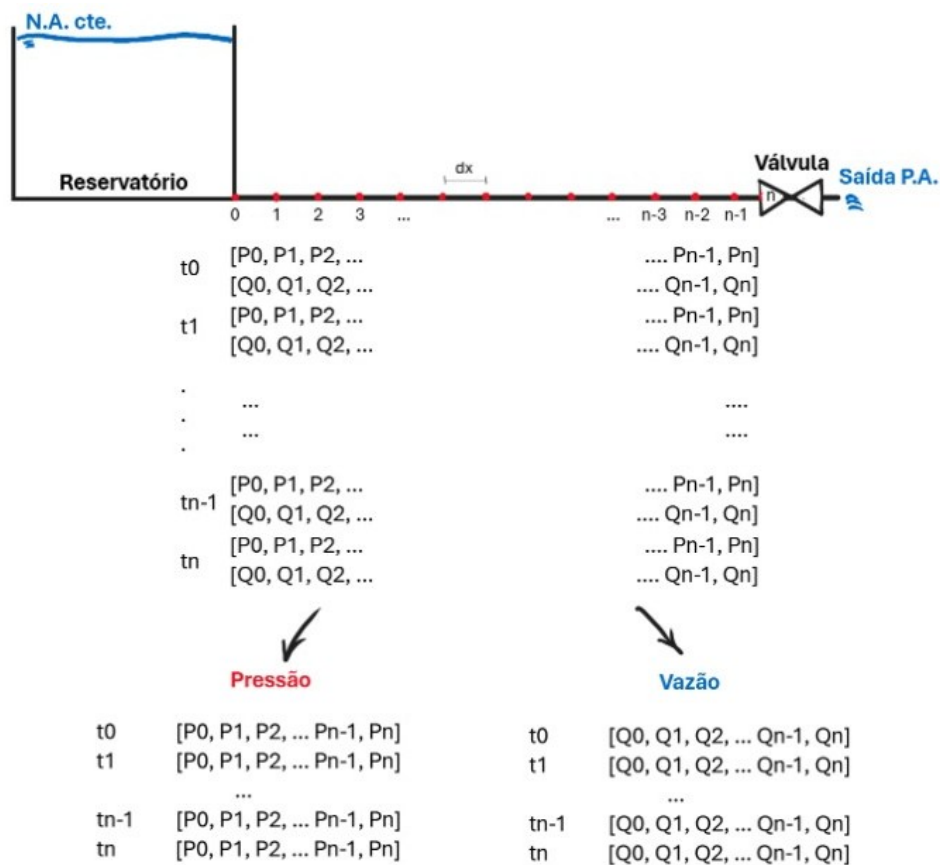
As matrizes de armazenamento de dados são dimensionadas a partir da discretização espacial (dx) e da determinação do passo de tempo de integração (dt). Este último é obtido do Método das Características, resultando da divisão do dx pela celeridade (Eq. 18).

Com essas variáveis, o algoritmo aloca as matrizes que irão conter os resultados de pressão e vazão, as quais possuem a dimensão $[Nt + 1, Nx + 1]$, Figura 4. Nesta formulação, Nt representa o número de intervalos de tempo (obtido pela razão entre o

tempo total de simulação TT e o dt) e Nx corresponde ao número de trechos computacionais (obtido pela razão entre o comprimento total da tubulação L_t e o dx).

Estruturalmente, cada linha dessas matrizes representa o estado hidráulico da tubulação em um determinado instante de tempo. A primeira linha, correspondente ao instante $t = 0s$ e armazena as condições iniciais em regime permanente, estabelecidas antes do início da manobra da válvula.

Figura 4: Representação do modelo com as matrizes de resultado



Fonte: Autor

4.2.3. SIMULAÇÃO

Concluída a determinação das condições iniciais em regime permanente para todos os pontos da malha, o algoritmo inicia a simulação do regime transiente causado pelo fechamento da válvula.

O cálculo evolui através de um laço de repetição temporal. A cada novo instante de tempo, as variáveis de pressão e vazão nos nós internos da tubulação são calculadas pelas equações (Eq. 9) e (Eq. 10) do Método das Características. Simultaneamente, as extremidades do sistema são resolvidas aplicando-se as condições de contorno preestabelecidas: no nó a montante (ponto 0), a pressão é mantida constante e igual à carga hidráulica do reservatório (H_0), enquanto no nó a jusante, a vazão é governada pela lei de fechamento da válvula, dada pela equação (Eq. 11).

Esse processo de cálculo é repetido iterativamente ao longo do tempo. Como o Método das Características tem formulação explícita, os valores de pressão e vazão em um instante $t + dt$ são calculados com base exclusivamente nos resultados do instante de tempo anterior (t). O algoritmo incrementa o tempo passo a passo, preenchendo as sucessivas linhas das matrizes de resultados, até que o tempo total de simulação estipulado nos dados de entrada seja alcançado. Ao final desse laço temporal, o programa obtém o histórico completo do transiente hidráulico em toda a extensão da tubulação, salvando os dados de pressão e vazão em duas matrizes separadas que podem ser interpretadas e com elas os gráficos e animações são montadas.

4.2.4. COMO OS RESULTADOS SÃO MOSTRADOS

Embora a simulação forneça informações de pressão e vazão em todos os pontos da tubulação e em todos os instantes de tempo, a análise dos resultados é padronizada e conduzida da seguinte forma. O programa entrega ao usuário dois gráficos principais e, opcionalmente, um gráfico dinâmico. O primeiro gráfico apresenta a envoltória de pressões, exibindo os valores máximos e mínimos em cada ponto da tubulação. O segundo gráfico representa a evolução temporal da pressão no ponto médio da tubulação.

Por fim, a animação opcional exibe a propagação da pressão ao longo da tubulação ao longo do tempo.

4.2.5. CASOS SIMULADOS

Com o intuito de avaliar a influência dos parâmetros de entrada nos resultados da simulação, foi realizada uma análise de sensibilidade composta por dez cenários, adotando-se o 'Caso 0' como condição de referência. Em cada nova simulação, alterou-se apenas uma variável, testando-se variações no diâmetro da tubulação, no tempo de fechamento da válvula, no material do conduto, na malha de discretização espacial e no tempo total de simulação.

A definição dos materiais baseou-se em catálogos comerciais. Para as simulações em aço, adotaram-se as especificações dos tubos de aço galvanizado da ArcelorMittal (linha Tupper), classe média com aço grau A ($LE = 205\text{MPa}$). Para os cenários em policloreto de vinila (PVC), selecionou-se a linha de tubos PBA classe 20 da Amanco. Os dados técnicos completos de ambos os catálogos se encontram nos Anexos A e B.

A celeridade da onda de pressão para cada material foi calculada através da equação (Eq. 15). O resumo dos dados de entrada utilizados em cada um dos dez casos está apresentado na Tabela 1.

Além dos parâmetros hidráulicos, a análise de viabilidade do sistema requer a verificação da resistência mecânica dos condutos frente à sobrepressão. Segundo as especificações do fabricante (Anexo B), o tubo de aço galvanizado apresenta resistência à pressão interna que pode ser calculada pela fórmula sugerida por E. W. McAllister (1993) adaptada (Eq. 20). Enquanto o tubo de PVC da linha PBA (Anexo A) possui uma resistência limite de 1 MPa ($101,97\text{ m.c.a.}$). A comparação entre esses valores de ruptura e os picos de pressão obtidos em cada cenário de simulação é fundamental para verificar se as tubulações resistiriam às solicitações mecânicas sem comprometer a integridade estrutural do sistema.

$$R = \frac{2 \cdot 0,6 \cdot LE \cdot e}{De} \quad (20)$$

Quadro 1: Valores dos parâmetros para cada simulação.

Caso	dx	DN	De (mm)	D (mm)	e (mm)	kc	t_m	TT	Material	Resistência (m.c.a)
Caso 0	1m	100	114,3	105,3	4,5	0,5	$0,5\tau$	60 s	Aço	987,58
Caso 1	1m	150	165,1	155,1	5	0,5	$0,5\tau$	60 s	Aço	759,68
Caso 2	1m	50	60,3	52,8	3,75	0,5	$0,5\tau$	60 s	Aço	1781,57
Caso 3	0,1m	100	114,3	105,3	4,5	0,5	$0,5\tau$	20 s	Aço	987,58
Caso 4	10m	100	114,3	105,3	4,5	0,5	$0,5\tau$	60 s	Aço	987,58
Caso 5	1m	100	114,3	105,3	4,5	0,5	$0,1\tau$	60 s	Aço	987,58
Caso 6	1m	100	114,3	105,3	4,5	0,5	2τ	60 s	Aço	987,58
Caso 7	1m	100	110	94,4	7,8	18	$0,5\tau$	60 s	PBA	101,97
Caso 8	1m	75	85	72,8	6,1	18	$0,5\tau$	60 s	PBA	101,97
Caso 9	1m	50	60	51,4	4,3	18	$0,5\tau$	60 s	PBA	101,97

Observações: DN – Diâmetro Nominal, De – Diâmetro externo (mm), D – Diâmetro interno (mm), e – Espessura (mm), TT – Tempo total simulado.

Fonte: Autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

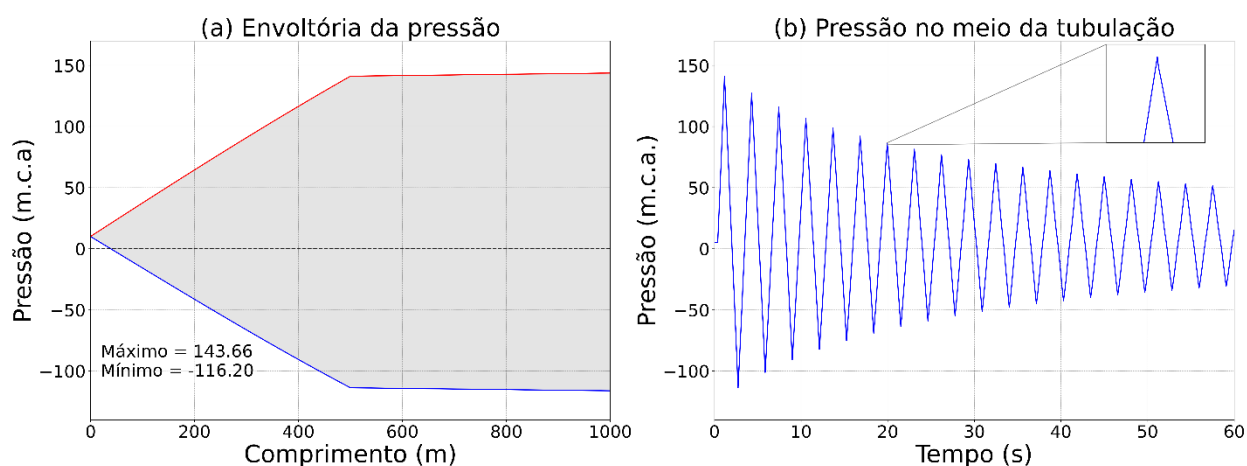
A partir da aplicação da rotina computacional desenvolvida, foi possível examinar a evolução espaço-temporal das pressões e vazões ao longo da tubulação, bem como comparar o comportamento hidráulico do sistema frente aos diferentes cenários simulados. Os gráficos e tabelas apresentados a seguir sintetizam os resultados obtidos, permitindo avaliar, de forma quantitativa e objetiva, os efeitos do golpe de aríete e a influência de cada parâmetro de entrada nas condições propostas.

5.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO CASO 0

A simulação do Cenário 0 (caso base), simulou uma tubulação de aço, com diâmetro nominal de 100mm e tempo de manobra de metade de um período. Nesse cenário foi calculado um aumento significativo da pressão na extremidade de jusante da tubulação, provocada pelo fechamento rápido da válvula. O sistema atingiu uma carga máxima de 143,66 m. c. a. e mínima de -116,20 m. c. a. (Figura 5a).

Conforme ilustrado, o comportamento da pressão ao longo do tempo apresenta natureza oscilatória, alternando entre picos de sobrepressão e subpressão, os quais são gradualmente amortecidos devido às perdas de carga por atrito.

Figura 5: Caso 0



Fonte: Autor

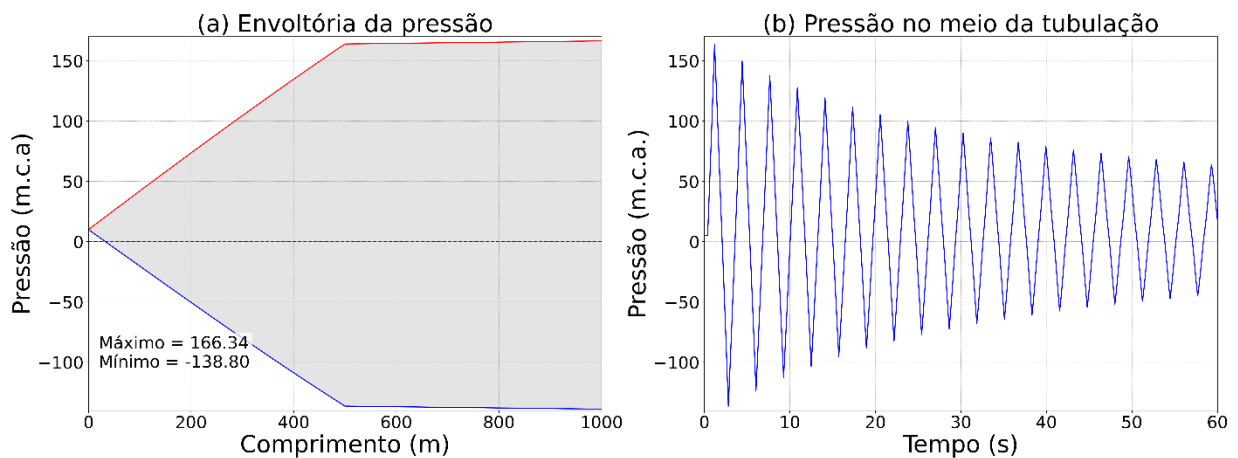
5.2. RESULTADOS CASOS 1 E 2

Para avaliar o impacto da variação das dimensões do conduto no transiente hidráulico, foram analisados os cenários correspondentes aos Casos 1 e 2. A alteração do diâmetro nominal da tubulação modifica múltiplos parâmetros físicos e numéricos que governam a magnitude e o amortecimento do golpe de aríete. A variação do diâmetro altera o valor da celeridade da onda de pressão (c), a qual por sua influência muda o valor das constantes de cálculo do Método das Características, alterando a constante C_a , o intervalo de discretização temporal dt e o período natural da tubulação τ .

No modelo numérico adotado, a discretização temporal influi diretamente no coeficiente de atrito discretizado k . Nota-se que a flutuação de k decorrente puramente da variação de dt é matematicamente compensada pelo número total de passos de tempo Nt executados na simulação. Desse modo, um menor dt reduz o valor de k individual por iteração, mas eleva o número de tempos de simulação na matriz de resultado proporcionalmente, garantindo que a discretização numérica isolada não distorça o amortecimento físico global do sistema.

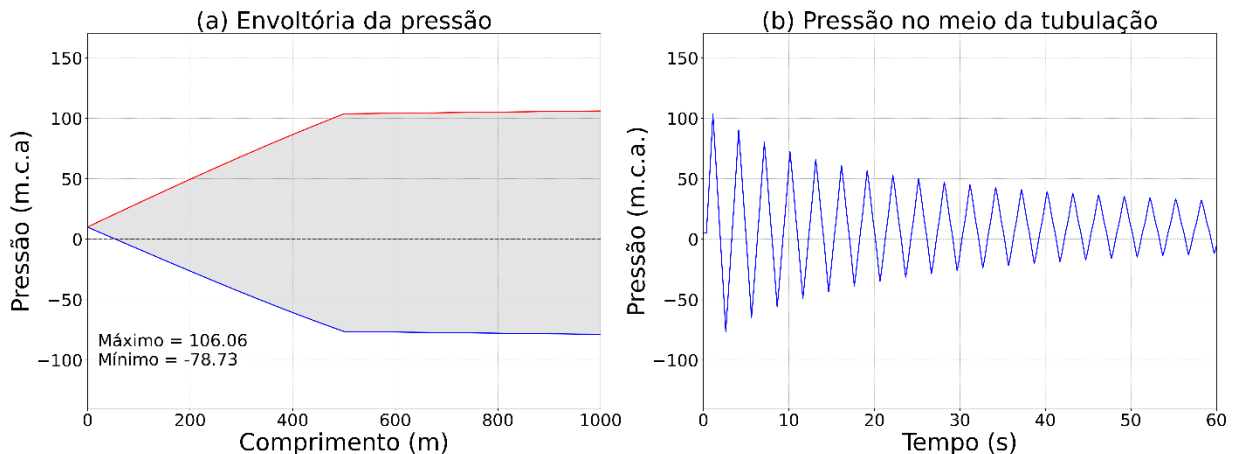
Por outro lado, a variação do diâmetro exerce um efeito físico real sobre o coeficiente k que não é neutralizado pelo arranjo da malha numérica. A redução do diâmetro (caso 2) eleva a magnitude de k , promovendo uma dissipação de energia mais acentuada, o que resulta em um amortecimento acelerado das ondas de sobrepressão e subpressão. Inversamente, o incremento do diâmetro (caso 1) atenua a influência do atrito, tornando a atenuação das oscilações mais lenta. Esse comportamento dinâmico encontra-se validado pela distribuição temporal da pressão apresentadas nas Figuras 6(b) e 7(b). Adicionalmente, a constante C_a do método das características oscila de forma combinada tanto pelas alterações geométricas diretas do conduto quanto pela resposta acoplada da celeridade.

Figura 6: Caso 1



Fonte: Autor

Figura 7: Caso 2



Fonte: Autor

Por fim, a velocidade inicial de escoamento v_0 constitui outra variável de forte influência na energia cinética inicial do transiente. Para o sistema sob análise, com comprimento da tubulação, coeficiente de atrito e nível de água constantes, o aumento do diâmetro, aumenta a velocidade inicial (Eq. 13) e diminui a celeridade (Eq. 15) e aumenta o dt (Eq. 18). Entretanto, o amortecimento (k) diminui ao invés de aumentar pois o aumento do diâmetro e da seção compensou o aumento do dt . O Quadro 2 sintetiza a sensibilidade desses parâmetros estruturais e numéricos frente às variações impostas nos Casos 1 e 2.

Quadro 2: Alteração dos dados para simulação casos 1 e 2.

Caso	D (mm)	e (mm)	A_0 (m ²)	c (m/s)	Ca	dt (s)	k	Nt	τ (s)	v_0 (m/s)
Caso 0	105,3	4,5	0,0095	1278,08	$7,3 \cdot 10^{-5}$	0,000782	0,00748	76685	1,564	1,04
Caso 1	155,1	5	0,0201	1239,34	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,000806	0,00250	74360	1,613	1,25
Caso 2	52,8	3,75	0,0019	1330,80	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0,000751	0,0765	79848	1,502	0,7

Fonte: Autor

Para quantificar essa influência, o Quadro 3 apresenta os fatores de variação correspondentes a cada parâmetro do modelo em decorrência da alteração do diâmetro nominal da tubulação. Por meio dessa síntese, evidencia-se quais variáveis físicas e numéricas apresentam maior sensibilidade à mudança geométrica do conduto.

Quadro 3: Fatores de alteração dos dados

Caso	D (mm)	e (mm)	A_0 (m ²)	c (m/s)	Ca	dt (s)	k	Nt	τ (s)	v_0 (m/s)
Caso 1	+47,3%	+11,1%	+123,3%	-3,1%	+105,5%	+3,1%	-66,6%	-3,1%	+3,3%	+20,2%
Caso 2	-49,9%	-16,7%	-90,5%	+4,1%	-80,8%	-4,0%	+922%	+4,1%	-4,0%	-32,7%

Fonte: Autor

Sendo assim, os resultados evidenciaram um aumento significativo nos extremos de pressão para o caso com maior diâmetro, atingindo pressão máxima de 166,34 *m. c. a.* e uma subpressão de -138,80 *m. c. a.* (Figura 6a). Em contrapartida, a redução do diâmetro (Cenário 2) proporcionou a atenuação do fenômeno, resultando em valores de 106,06 *m. c. a.* e -78,73 *m. c. a.* (Figura 7a), respectivamente. Observou-se também que o amortecimento das ondas de pressão foi mais rápido no cenário com menor diâmetro.

Além disso, ambos os casos, os picos de pressão calculados não ultrapassaram os limites de resistência à pressão interna especificados pelos fabricantes dos tubos.

A análise dos extremos de pressão e de seus respectivos fatores de alteração revela o impacto quantitativo da variação do diâmetro dos tubos entre os cenários. Ao comparar o Caso 0 com o Caso 1 (maior diâmetro), constatou-se um incremento de 15,8% na pressão máxima e de 19,4% na pressão mínima. Em contrapartida, a transição do Caso 0 para o Caso 2 (menor diâmetro) resultou em uma redução de 26,2% na pressão máxima e de 32,3% na mínima. Essas variações de pressão entre os casos se aproximam da variação da velocidade inicial de escoamento, indicando que influência do diâmetro nas pressões calculadas se dão principalmente por esse fator alterar significativamente a velocidade inicial. Desse modo, evidencia-se que a magnitude dos picos de sobrepressão e subpressão é fortemente ditada pelas condições do escoamento em regime permanente, especificamente pela velocidade inicial v_0 .

5.3. RESULTADOS CASOS 3 E 4

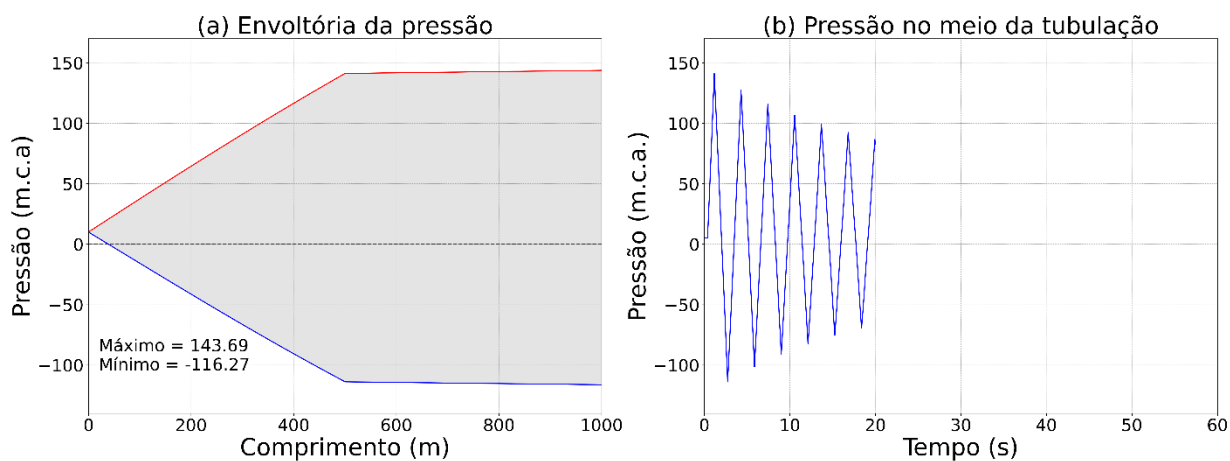
Nos Cenários 3 e 4, investigou-se a sensibilidade do modelo numérico em relação ao refinamento da malha computacional, variando-se as dimensões dos trechos elementares dx e consequentemente do passo de tempo dt . Ou seja, a simulação ocorreu com os mesmos valores iniciais do caso 0, porém diminuindo e aumentando o valor de dx . A análise evidenciou que essa alteração impacta drasticamente o tamanho das matrizes de resultado e, assim, o custo computacional do algoritmo.

Enquanto o Cenário 0 (caso base) gerou uma matriz de 76.685X1.000 elementos que levou aproximadamente 3s para ser preenchida, o Cenário 3, ao adotar o menor dx , exigiu o preenchimento de uma matriz de 255.616X10.000 elementos — mesmo com a redução do tempo total simulado (TT) para 20s — elevou o tempo de processamento para 80s. Em contrapartida, o Cenário 4, com o maior valor de dx , reduziu a matriz para 7.668X100, que foi preenchida em apenas 1s.

Apesar dessa variação no esforço computacional, a diferença nos resultados de pressão obtidos entre os casos foi da ordem de $10^{-2} m.c.a.$ (Figuras 8a e 9a). Portanto, o aumento do custo computacional verificado no Cenário 3 pode não se justificar para

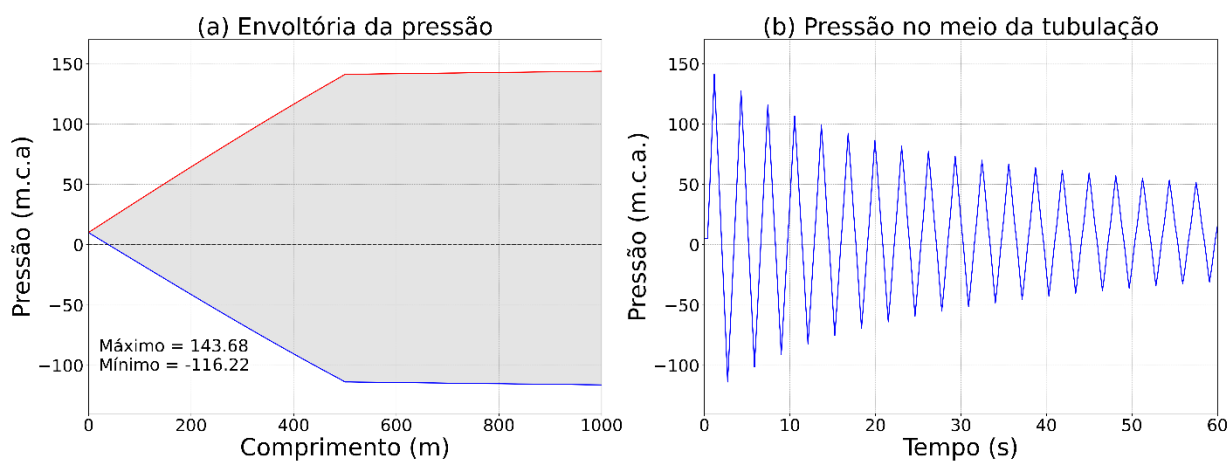
esse trabalho, validando a malha do Cenário 0 como a ideal na relação de compromisso entre precisão numérica e tempo de processamento.

Figura 8: Caso 3



Fonte: Autor

Figura 9: Caso 4



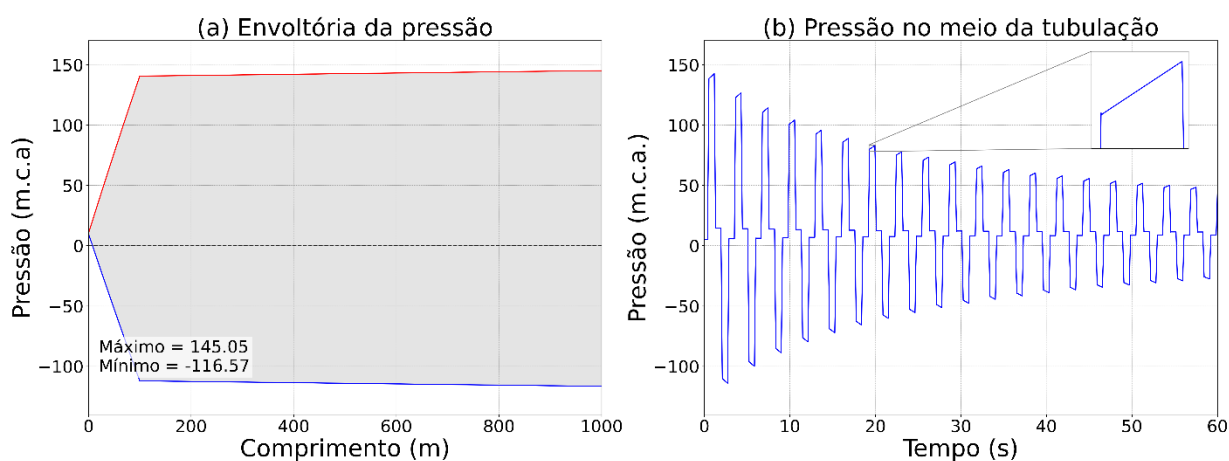
Fonte: Autor

5.4.RESULTADOS CASOS 5 E 6

Os Cenários 5 e 6 avaliaram a influência do tempo de fechamento da válvula (TF) no comportamento do transiente. O parâmetro de referência para esta análise é período (τ) da tubulação. No Cenário 5, simulou-se uma manobra de fechamento rápida ($TF = 0,1 \cdot \tau$). Apesar da rapidez da manobra, o aumento no pico de pressão foi pequeno (na ordem de 2 *m.c.a.* superior ao caso 0) (Figura 10a). No entanto, observou-se uma alteração drástica no perfil da envoltória de pressões, aumentando a pressão em trechos mais próximos ao reservatório. Outra alteração bem evidente é o aparecimento de dobras no gráfico da variação da pressão no meio da tubulação no tempo (Figura 10b).

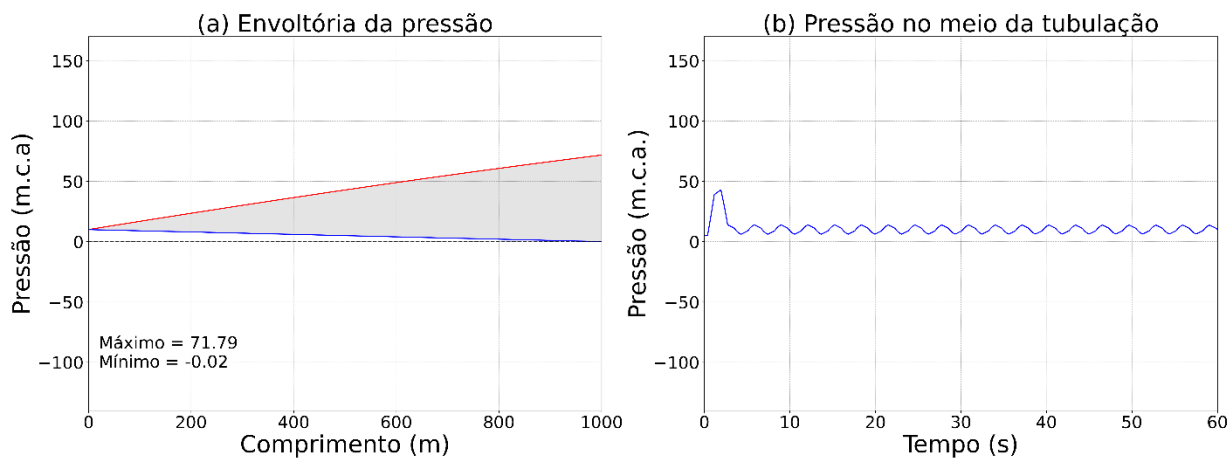
Por outro lado, o Cenário 6 simulou uma manobra lenta ($TF = 2 \cdot \tau$), que modificou radicalmente o comportamento do sistema. A pressão máxima foi reduzida consideravelmente para 71,79 *m.c.a.* e a subpressão mínima limitou-se a -0,02 *m.c.a.*. Figura 11. Além da redução dos picos, o amortecimento da onda foi significativamente mais rápido, o sistema apresentou um único pico inicial de grande magnitude e, logo em seguida, estabilizou-se em pequenas oscilações entre 5 e 15 *m.c.a.*

Figura 10: Caso 5



Fonte: Autor

Figura 11: Caso 6



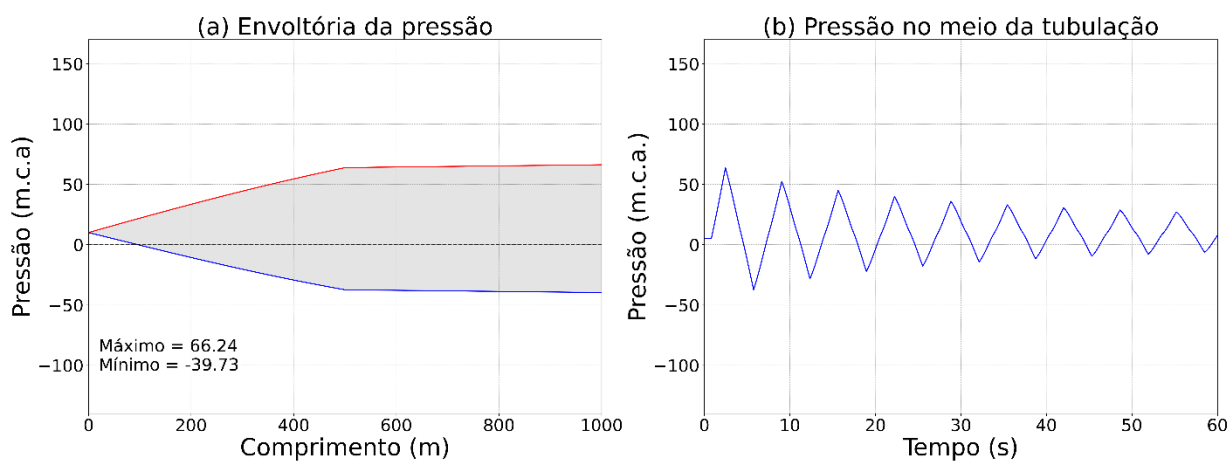
Fonte: Autor

5.5. RESULTADOS CASOS 7, 8 e 9

A influência da rigidez do material do conduto foi analisada nos Cenários 7, 8 e 9, nos quais a tubulação de aço foi substituída por policloreto de vinila (PVC). Nestes casos, variaram-se também os diâmetros internos. A mudança de material provocou redução nos picos de transiente (Figuras 12, 13 e 14). No Cenário 7, por exemplo, a sobrepressão máxima foi de 66,24 *m.c.a.* e a subpressão mínima de -39,73 *m.c.a.* Além da redução na magnitude das ondas, observou-se um aumento no período de oscilação de aproximadamente 19 ciclos em 60s para o caso 0 para 9 ciclos em 60s para o caso 7, resultando em menos ciclos de pressão dentro do intervalo de simulação de 60s, quando comparado aos casos em aço. Em todas as configurações, os picos de pressão permaneceram inferiores ao limite de resistência especificado para a classe do tubo de PVC, que é de 1 *MPa* (101,97 *m.c.a.*).

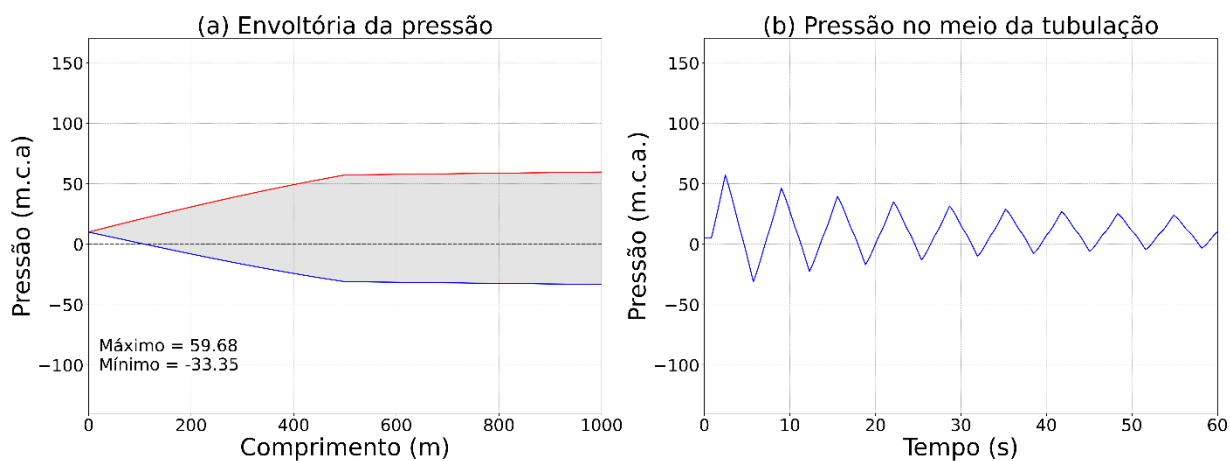
A alteração drástica no comportamento hidráulico deve-se ao menor Módulo de Elasticidade (ϵ) do PVC. Como a celeridade da onda de pressão (c) é inversamente proporcional ao coeficiente kc (Eq. 15), a onda se propaga mais lentamente no plástico do que no metal pois sendo mais flexível que o aço, absorve parte da energia da onda de pressão. Simultaneamente, o aumento no período da onda é explicado pela equação do período da tubulação (τ) (Eq. 19) em que com uma celeridade reduzida, a onda leva mais tempo para percorrer a tubulação, o que justifica a menor frequência de oscilações observada nos gráficos em um mesmo intervalo de tempo.

Figura 12: Caso 7



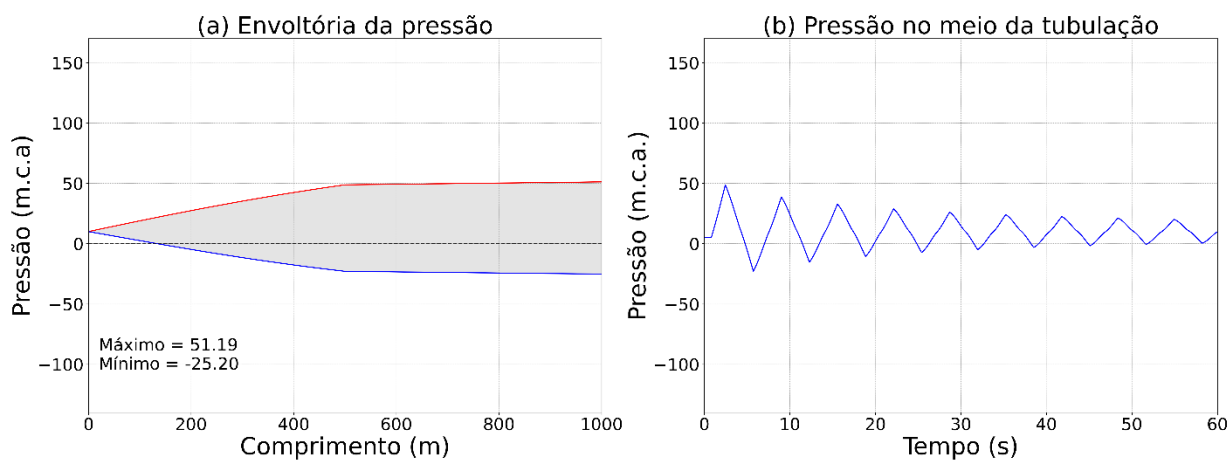
Fonte: Autor

Figura 13: Caso 8



Fonte: Autor

Figura 14: Caso 9



Fonte: Autor

5.6. COMPARAÇÃO FINAL

Após a simulação de todos os casos, foi montado o Quadro 4 com as informações de pressão máxima e mínima na tubulação.

Quadro 4: Compilação dos resultados

Caso	<i>P. máx. (m. c. a)</i>	<i>P. mín. (m. c. a)</i>
Caso 0	143,66	-116,20
Caso 1	166,34	-138,80
Caso 2	106,06	-78,73
Caso 3	143,69	-116,27
Caso 4	143,68	-116,22
Caso 5	145,05	-116,57
Caso 6	71,79	-0,02
Caso 7	66,24	-39,73
Caso 8	59,68	-33,35
Caso 9	51,19	-25,20

Fonte: Autor

A análise integrada de todos os cenários simulados permite concluir que as características geométricas e operacionais do sistema exercem impacto direto e determinante sobre a severidade do transiente hidráulico. Observou-se que o diâmetro da tubulação atua como um fator crítico, visto que condutos de maiores dimensões geram picos de pressão mais elevados e prolongam o tempo de amortecimento do sistema estudado. Simultaneamente, a celeridade da onda de pressão atua modulando tanto a magnitude dessas sobrepressões quanto o período natural de oscilação. Destaca-se, ainda, a forte influência do tempo de fechamento da válvula, que altera a distribuição espacial das cargas máximas, concentrando o pico de pressão em direção ao reservatório nas ocorrências de manobras rápidas.

5.7. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Consolidando as variações dos principais dados de simulação que interferem no efeito do transiente hidráulico é possível entender como as relações entre essas variáveis podem estar relacionadas. A Tabela 1 contém o valor da pressão máxima calculada, o valor da discretização espacial (dx), o diâmetro interno, o tempo de manobra, celeridade e a velocidade inicial de escoamento em todos os casos simulados. Além desses valores a tabela também apresenta o respectivo percentual de variação dessa variável em relação ao caso base (Caso 0).

Tabela 1: Consolidação dos valores de simulação com respectiva variação em relação ao caso 0

Cenário	<i>P</i> máx (m.c.a) [Δ%]	<i>dx</i> (m) [Δ%]	<i>Diâmetro</i> (m) [Δ%]	<i>Tempo</i> <i>Manobra</i> (s) [Δ%]	<i>Celeridade</i> (m/s) [Δ%]	<i>Velocidade</i> (m/s) [Δ%]
Caso 0	143,66 [+0%]	1,00 [+0%]	0,1053 [+0%]	0,7824 [+0%]	1278,08 [+0%]	1,0137 [+0%]
Caso 1	166,34 [+15,79%]	1,00 [+0%]	0,1551 [+47,29%]	0,8069 [+3,13%]	1239,34 [-3,03%]	1,2287 [+21,21%]
Caso 2	106,06 [-26,17%]	1,00 [+0%]	0,0528 [-49,86%]	0,7514 [-3,96%]	1330,81 [+4,13%]	0,7188 [-29,10%]
Caso 3	143,69 [+0,02%]	0,10 [-90%]	0,1053 [+0%]	0,7824 [+0%]	1278,08 [+0%]	1,0137 [+0%]
Caso 4	143,68 [+0,02%]	10,00 [+900%]	0,1053 [+0%]	0,7824 [+0%]	1278,08 [+0%]	1,0137 [+0%]
Caso 5	145,05 [+0,97%]	1,00 [+0%]	0,1053 [+0%]	0,1565 [-80%]	1278,08 [+0%]	1,0137 [+0%]
Caso 6	71,79 [-50,03%]	1,00 [+0%]	0,1053 [+0%]	3,1297 [+300%]	1278,08 [+0%]	1,0137 [+0%]
Caso 7	66,24 [-53,89%]	1,00 [+0%]	0,0944 [-10,35%]	1,6479 [+110,61%]	606,84 [-52,52%]	0,9601 [-5,29%]
Caso 8	59,68 [-58,46%]	1,00 [+0%]	0,0728 [-30,86%]	1,6385 [+109,41%]	610,32 [-52,25%]	0,8436 [-16,78%]
Caso 9	51,19 [-64,37%]	1,00 [+0%]	0,0514 [-51,19%]	1,6395 [+109,55%]	609,92 [-52,28%]	0,7092 [-30,04%]

Fonte: Autor

A partir dos dados da Tabela 1 é possível aplicar a análise de sensibilidade local determinando os coeficientes de sensibilidade relativos (ou normalizados) aplicando a Eq. (21), Tabela 2.

$$S = \frac{\Delta Y / Y_0}{\Delta X / X_0} = \frac{\Delta P / P_0}{\Delta X / X_0} \quad (21)$$

Sendo:

S o coeficiente de sensibilidade relativo

ΔP a variação da pressão máxima entre o caso 0 e o caso analisado [m. c. a]

P_0 a pressão máxima no caso 0 [m. c. a]

ΔX a variação da variável analisada entre o caso em análise e o caso 0

X_0 o valor da variável analisada no caso 0

A análise dos coeficientes da Tabela 2 permite entender o peso de cada variável no sistema. Valores absolutos maiores que 1 mostram que a instalação é mais sensível àquele parâmetro, enquanto valores menores que 1 indicam menor impacto. O sinal numérico define se a relação é direta (positivo) ou inversamente proporcional (negativo). Nos Casos 3 e 4, ao alterar apenas o tamanho da malha espacial (dx), os coeficientes ficaram muito próximos de zero. Isso mostra que ao modificar o refinamento da malha nos casos simulados não afetou os resultados físicos do transiente.

Nos casos simulados, as variáveis físicas operam de forma interligada. Nos Casos 1 e 2, a simples mudança do diâmetro da tubulação causou a alteração da velocidade de escoamento, a celeridade da onda e o tempo de manobra. Portanto, os índices de sensibilidade observados resultam de uma resposta conjunta do sistema. Por outro lado, nos Casos 5 e 6, em que o tempo de fechamento da válvula foi a principal alteração, os coeficientes negativos resultantes (-0,01 e -0,17) comprovam numericamente o comportamento esperado do fenômeno. Fechar a válvula de forma mais lenta atenua o pico de pressão, configurando-se como uma medida de proteção operacional eficiente. Em contrapartida, reduzir o tempo de manobra além do que já é considerado um fechamento rápido não agrava o efeito, pois a sobrepressão do sistema já atinge o seu valor máximo.

Por fim, a substituição da tubulação de aço por PVC (Casos 7, 8 e 9) evidencia como a rigidez do material influencia o golpe de aríete. A adoção do plástico reduz a celeridade da onda de pressão em mais da metade. Nessa condição, o coeficiente de sensibilidade da velocidade inicial atinge valores extremos, chegando a 10,18 no Caso 7. Esse salto demonstra que, ao utilizar condutos mais flexíveis, a sobrepressão final torna-se intensamente dependente da velocidade inicial da água. Isso comprova que as propriedades do material e as condições iniciais de operação atuam em conjunto para ditar a magnitude do transiente no sistema.

Tabela 2: Coeficientes de sensibilidade relativos para cada caso

Cenário	Coef. <i>dx</i>	Coef. <i>Diâmetro</i>	Coef. <i>Tempo Manobra</i>	Coef. <i>Celeridade</i>	Coef. <i>Velocidade Inicial</i>
<i>Caso 0</i>	SV	SV	SV	SV	SV
<i>Caso 1</i>	SV	0,33	5,05	-5,21	0,74
<i>Caso 2</i>	SV	0,52	6,61	-6,34	0,90
<i>Caso 3</i>	≈0	SV	SV	SV	SV
<i>Caso 4</i>	≈0	SV	SV	SV	SV
<i>Caso 5</i>	SV	SV	-0,01	SV	SV
<i>Caso 6</i>	SV	SV	-0,17	SV	SV
<i>Caso 7</i>	SV	5,21	-0,49	1,03	10,18
<i>Caso 8</i>	SV	1,89	-0,53	1,12	3,48
<i>Caso 9</i>	SV	1,26	-0,59	1,23	2,14

Fonte: Autor

Para sintetizar a influência das grandezas físicas no comportamento do sistema, a Tabela 3 apresenta um resumo consolidado dos maiores e menores coeficientes de sensibilidade obtidos para cada variável ao longo de todos os cenários. Essa compilação permite visualizar de forma direta os extremos numéricos e a amplitude do impacto que o diâmetro, o tempo de manobra, a celeridade e a velocidade inicial de escoamento exercem sobre os picos de pressão do transiente hidráulico.

Tabela 3: Consolidação dos maiores e menores coeficientes de sensibilidade para cada variável

<i>Variável</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>
<i>Diâmetro</i>	5,21	0,33
<i>Tempo Manobra</i>	6,61	-0,59
<i>Celeridade</i>	1,23	-6,34
<i>Velocidade Inicial</i>	10,18	0,74

Fonte: Autor

Assim, estabelece-se de forma clara a inter-relação entre as respostas do transiente e os principais parâmetros hidráulicos e físicos adotados na modelagem. Diante dos dados obtidos, verifica-se que o comportamento simulado está perfeitamente alinhado com o referencial teórico. Conclui-se que o algoritmo estruturado em linguagem Python, baseado na discretização do Método das Características, constitui uma

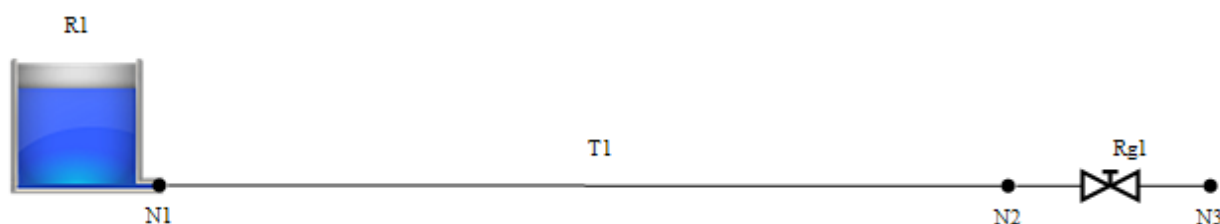
ferramenta de cálculo eficaz para a avaliação do golpe de aríete em condutos forçados, respeitando-se as simplificações inerentes ao método.

5.8. COMPARAÇÃO COM OUTROS PROGRAMAS

Para atestar a validade dos resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido, realizou-se uma análise comparativa com o software Allievi, uma ferramenta comercial amplamente difundida e consolidada na engenharia hidráulica para a simulação de transientes.

A validação adotou como referência as condições do Cenário 0, replicando-se rigorosamente os mesmos parâmetros de entrada e condições de contorno apresentados no Quadro 1, Figuras 15, 16, 17, 18 e 19. O objetivo desta etapa é avaliar a acurácia e a precisão numérica do código em Python frente ao desempenho de um modelo de mercado.

Figura 15: Modelagem do sistema no Allievi



Fonte: Autor

Figura 16: Dados do reservatório

Reserv. - Dados Básicos								Vertedor/Extravazor				Divisão e Vertedor				Extravazor móvel			
Nome	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m^2)	Z0 (m)	Zvar	L (m)	Z Crista (m)	Cq	Descarga	Si (m^2)	Z Si (m)	Sf (m^2)	Z Sf (m)	Crista	Zf (m)	Ti(s)	Tf(s)
R1	---	N1	0	GD		10													

Fonte: Autor

Figura 17: Dados da tubulação

Tubos - Dados Básicos										Perdas		Vazão nula	
Nome	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)	Perfil	Rug (mm)	k	Qin=0	H Imp
T1	N1	0	N2	0	105,3	1000	4,5	1278,08	Calc. ----	0,02	0		

Fonte: Autor

Figura 18: Dados da válvula

Válvula regulação - Dados Básicos								Manobra	Tabelada	Senoidal: $Ap(t) = Ap0 + A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t / T + B)$			
Nome	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	Modelo	Tipo	Lista	Ap0(%)	A(%)	T(s)	B(graus)
Rg1	N2	N3	0	100	0	Borboleta		Tabelada					

Fonte: Autor

Figura 19: Comportamento do fechamento da válvula no Allievi

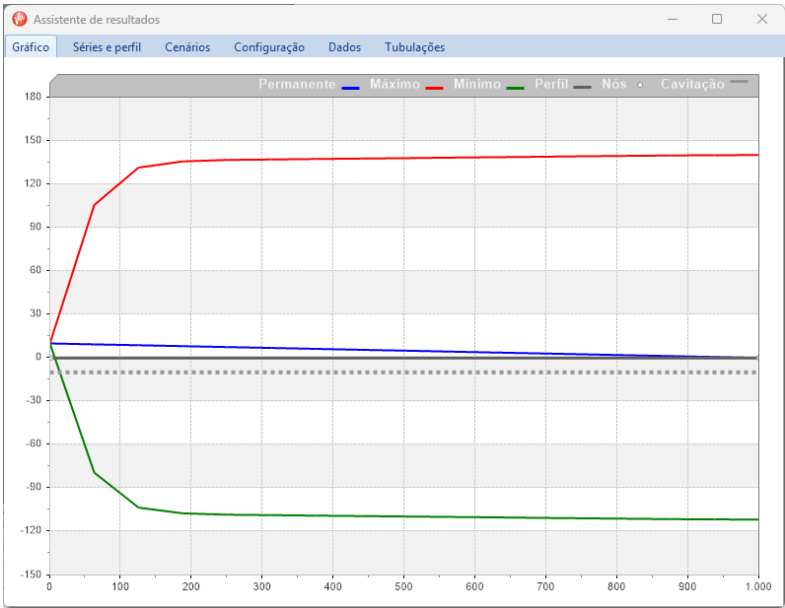


Fonte: Autor

Após a modelagem do sistema no programa, foram calculadas as pressões em regime permanente e na sequência em regime transitório. Em seguida, foi gerado o seguinte gráfico com as envoltórias de pressão no sistema.

A seguir, apresentam-se os resultados gerados pelo Allievi, Figuras 20 e 21, discutindo-se a convergência e as eventuais divergências entre as duas abordagens.

Figura 20: Envoltórias de pressão Allievi



Fonte: Autor

Figura 21: Resultados Allievi

Assistente de resultados									
Gráfico Séries e perfil Cenários Configuração Dados Tubulações									
Dados das séries									
	Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y	Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y	Nós X
0	10	0	10	10	0	10	0	0	0
62.5	9.3762788772583	62.5	105.589088439941	62.5	-79.1915817260742	1000	0	1000	
125	8.75255680084229	125	131.463150024414	125	-103.362922668457				
187.5	8.12883567810059	187.5	135.705612182617	187.5	-107.321357727051				
250	7.50511407852173	250	136.73583984375	250	-108.269454956055				
312.5	6.88139295578003	312.5	137.046356201172	312.5	-108.576240539551				
375	6.25767135620117	375	137.357009887695	375	-108.883239746094				
437.5	5.63394975662231	437.5	137.667755126953	437.5	-109.190391540527				
500	5.01022863388062	500	137.978530883789	500	-109.497566223145				
562.5	4.38650703430176	562.5	138.289321899414	562.5	-109.804763793945				
625	3.76278567314148	625	138.600143432617	625	-110.111991882324				
687.5	3.1390643119812	687.5	138.910995483398	687.5	-110.419242858887				
750	2.51534271240234	750	139.221862792969	750	-110.726516723633				
812.5	1.89162135124207	812.5	139.526565551758	812.5	-111.028007507324				
875	1.26789999008179	875	139.803207397461	875	-111.30322265625				
937.5	0.644178509712219	937.5	140.002410888672	937.5	-111.505966186523				
1000	0.0204570889472961	1000	140.106033325195	1000	-111.602905273438				

Observações: Colunas com X representam os pontos em que a pressão é calculada; Coluna Permanente Y contém os valores calculados em regime permanente; Colunas Máximo Y e Mínimo Y contêm os valores calculados em regime transiente.

Fonte: Autor

Analisando as envoltórias de pressão é possível verificar que a pressão máxima e mínima no sistema também ocorre ao final da tubulação e com valores de $140,10 m.c.a.$ e $-111,60 m.c.a.$. Esses valores são muito próximos aos calculados pelo programa, no caso 0, proposto nesse trabalho e a variação entre os resultados são calculadas da seguinte forma.

$$E\% P.máx = \frac{143,66 - 140,10}{140,10} = 2,54\%$$

$$E\% P.mín. = \frac{-116,2 - (-111,60)}{-111,60} = 4,12\%$$

5.9. COMPARAÇÃO E ERROS DE TODOS OS CASOS

É importante ressaltar que, do ponto de vista científico, a validação de um modelo que simula fenômenos físicos deve ser realizada por meio da comparação com dados experimentais ou medições de campo. A comparação entre dois programas computacionais configura-se como uma "validação cruzada". Como ambos os algoritmos utilizam o Método das Características, eles estão sujeitos às mesmas simplificações numéricas da formulação matemática. Contudo, devido à complexidade e ao custo da obtenção de dados reais de transientes em laboratório, a comparação com um software comercial amplamente consolidado e validado, como o Allievi, constitui uma metodologia adequada para atestar a consistência do código desenvolvido.

Seguindo essa premissa, todos os demais cenários (Casos 1 a 9) foram reproduzidos no Allievi, assegurando a equivalência dos parâmetros de entrada. A síntese comparativa dos picos de pressão obtidos pela rotina em Python e pelo software de referência encontra-se no Quadro a seguir.

Quadro 5: Erros relativos em comparação com as simulações no Allievi

Caso	<i>P. máx.</i> (<i>m. c. a</i>)	<i>P. Mín.</i> (<i>m. c. a</i>)	<i>P. máx.</i> (<i>m. c. a</i>) <i>Allievi</i>	<i>P. Mín.</i> (<i>m. c. a</i>) <i>Allievi</i>	<i>E% P. máx</i>	<i>E% P. mín</i>
Caso 0	143,66	-116,20	140,1	-111,6	2,54%	4,12%
Caso 1	166,34	-138,80	165,65	-137,03	0,42%	1,29%
Caso 2	106,06	-78,73	98,66	-70,5	7,50%	11,68%
Caso 3	143,69	-116,27	140,1	-111,6	2,56%	4,18%
Caso 4	143,68	-116,22	140,1	-111,6	2,56%	4,14%
Caso 5	145,05	-116,57	142,04	-113,38	2,12%	2,81%
Caso 6	71,79	-0,02	134,86	-107,13	-46,77%	-99,98%
Caso 7	66,24	-39,73	65,38	-38,1	1,32%	4,28%
Caso 8	59,68	-33,35	58,67	-31,55	1,73%	5,69%
Caso 9	51,19	-25,20	48,44	-21,74	5,67%	15,90%

Fonte: Autor

A análise comparativa revelou que o erro relativo entre as duas abordagens foi consistente, mantendo-se na ordem de 2% a 5% para a maioria das simulações. A exceção ocorreu no Cenário 6 (manobra de fechamento lento), onde se observou uma divergência maior. Esse desvio é justificado pela diferença na modelagem da condição de contorno da válvula em cada software. No algoritmo desenvolvido, impôs-se uma redução linear da vazão ao longo do tempo. Já o Allievi simula o fechamento reduzindo linearmente a área efetiva de passagem da válvula calculando a vazão em função da carga hidráulica instantânea. Sob essa formulação, mesmo com a redução da área, a vazão não decresce na mesma proporção nos instantes iniciais da manobra, concentrando a redução brusca de vazão nos momentos finais do fechamento, o que consequentemente gera um pico de pressão.

Outra característica observada em todos os cenários é que os valores de pressão calculados pela rotina computacional em Python são ligeiramente superiores aos obtidos pelo Allievi, apresentando também um amortecimento mais lento.

Contudo, do ponto de vista da engenharia de projetos, o modelo clássico do Método das Características aqui implementado apresenta um comportamento conservativo. Ao subestimar o amortecimento real, o modelo prevê oscilações mais duradouras e picos de pressão ligeiramente maiores, resultando em um dimensionamento a favor da segurança.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho atingiu seu propósito ao desenvolver, implementar e testar uma rotina computacional, em linguagem Python, capaz de simular o comportamento dos transientes hidráulicos em condutos forçados por meio do Método das Características. A formulação matemática, fundamentada nas equações da continuidade e da quantidade de movimento, permitiu reproduzir de maneira estruturada o fenômeno do golpe de aríete, contemplando as condições de contorno de um sistema reservatório–tubo–válvula e incorporando parâmetros essenciais para a evolução do escoamento ao longo do tempo.

O algoritmo criado mostrou-se capaz de representar adequadamente a propagação das ondas de pressão, fornecendo gráficos e matrizes que descrevem o comportamento transitório da instalação modelada. Os cenários simulados evidenciaram a influência direta do diâmetro da tubulação e da celeridade na amplitude das pressões extremas, corroborando conceitos clássicos da hidráulica e confirmando a sensibilidade do sistema a esses parâmetros. A análise do refinamento espacial demonstrou que a diminuição de dx aumenta o custo computacional o que reforça a importância da escolha criteriosa da malha numérica.

A comparação entre os resultados obtidos pelo algoritmo e aqueles gerados pelo software Allievi mostrou coerência entre as respostas, com diferenças pequenas nos valores de sobrepressão e subpressão. Esse paralelo reforça a confiabilidade da rotina proposta e evidencia seu potencial como ferramenta auxiliar em estudos acadêmicos e em análises preliminares de engenharia, sobretudo por ser acessível, transparente e facilmente adaptável a diferentes configurações de projeto.

O trabalho contribui ao demonstrar que metodologias numéricas, quando aliadas a linguagens de programação de uso livre, podem ampliar a autonomia do engenheiro e

favorecer a compreensão visual e conceitual dos fenômenos transitórios. Além disso, mostra que a criação de soluções personalizadas pode complementar o uso de softwares comerciais, oferecendo flexibilidade para simulações específicas e permitindo maior domínio das etapas de cálculo.

Como possibilidade de continuidade, destaca-se a inclusão de perdas localizadas, modelagem de válvulas com diferentes leis de fechamento e a incorporação de dispositivos de proteção, como chaminés de equilíbrio ou tanques hidropneumáticos. A ampliação do código para múltiplos trechos de tubulação e para geometrias mais complexas também representa um desdobramento natural deste estudo.

Assim, conclui-se que o desenvolvimento apresentado cumpre sua finalidade ao oferecer uma ferramenta funcional e, contribuindo para o entendimento e a análise dos efeitos do golpe de aríete e reforçando a importância da modelagem numérica na engenharia hidráulica contemporânea.

O código desenvolvido para a simulação, os gráficos gerados, as animações e as informações de tempos de simulação, encontra-se disponível em repositório público:

<https://github.com/pedrotgv/transientes-hidraulicos-moc-python.git>

7. REFERÊNCIAS

ANA. Portal do Governo Federal. **Governo Federal**, 2025. Disponível em:

<https://www.gov.br/ana/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/cooperacao-internacional/agua-no-mundo>. Acesso em: 27 jul. 2025.

ARCELORMITTAL. Arcelormittal Tuper. **Arcelormittal Tuper**, 02 fev. 2025. Disponível em:

https://www.tuper.com.br/downloads/?gad_source=1&gad_campaignid=17202401208&gclid=CjwKCAiAs4HMBhBJEiwACrfNZaKpZH_SL9nkZi7Q5_iYbjdyoQK1h_MHQPvIZgevkWhdrlS9CEpNBoCn94QAvD_BwE. Acesso em: 02 fev. 2026.

BORGES, Luiz Eduardo. **PYthon para desenvolvedores**. 1. ed. São Paulo: Novatec Editora LTDA, v. 1, 2014. Disponível em: [https://www.alura.com.br/apostila-python-orientacao-a-objetos/o-que-e-](https://www.alura.com.br/apostila-python-orientacao-a-objetos/o-que-e-python)

[python?utm_term=&utm_campaign=%5BAO%5D+%5BPerformance+Max%5D+%5BVenda%5D&utm_source=google&utm_medium=cpc&campaign_id=22048829191__&utm_id=22048829191__&hsa_acc=7964138385&hsa_cam=%5BAO](https://www.alura.com.br/apostila-python-orientacao-a-objetos/o-que-e-python?utm_term=&utm_campaign=%5BAO%5D+%5BPerformance+Max%5D+%5BVenda%5D&utm_source=google&utm_medium=cpc&campaign_id=22048829191__&utm_id=22048829191__&hsa_acc=7964138385&hsa_cam=%5BAO). Acesso em: 04 ago. 2025.

CHAUDHRY, M. H. **Applied hydraulic transients**. 3. ed. Nova York: Van Nostrand Reinhold Company, v. 1, 1979.

DEY, Preyanka. Sensitivity and uncertainty analysis in hydrological modeling: a case study of South Chickamauga Creek watershed using BASINS/HSPF, 2021.

GARCEZ SOUZA, Allison; ROSA DA SILVA, Alice; OLIVEIRA LÁZARO, Bruno de.

Detalhamento das equações para o cálculo do golpe de aríete pelo método das

características. **II FLUÍDROS e XVI ENES**, Curitiba, p. 8, 26 ago. 2024. Disponível em:

https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=16284&Name=detalhamento_das_equacoes_para_o_calculo_do_golpe_de_ariete_pelo_metodo_das_caracteristicas. Acesso em: 29 jul. 2025.

LARA PINTO COELHO , Márcia Maria; BENEDITO BAPTISTA , Márcio. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

MCALLISTER, E. W. **Pipe Line Rules of Thumb Handbook**. Houston: Gulf Publishing Company, 1993.

NASCIMENTO LINS, Gustavo ; KEPLER SOARES, Alexandre. Modelos de simulação para transientes hidráulicos. **XIV Encontro nacional de águas urbanas**, Brasília , p. 10, 19 set. 2022.

NBR 12215-1, ABNT. Projeto de adutora de água. Parte 1: Conduto forçado. **ABNT**, Rio de Janeiro, p. 32, 2017.

NETTO, José Martiniano de Azevedo. **Manual de Hidráulica**. São Paulo: Blucher, 2015.

SILVESTRE, Paschoal. **Hidráulica Geral**. Ed. 1. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora SA, v. Vol. 1, 1979.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de água**. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica, 2006.

WAVIN, Amanco. Amanco Wavin. **Amanco Wavin**, 02 fev. 2026. Disponível em: https://wavin.com/br/s/C51_F508_S554/pba/d. Acesso em: 2026 fev. 02.

WYLIE, E Benjamin; STREETER, L Victor. **Fluid transients in systems**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.

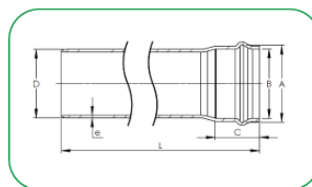
ANEXO A – Informações catálogo técnico dos tubos de PVC PBA (Amanco/Wavin)

Figura 22: Tabela de especificações da linha PBA (Amanco/Wavin)

Tubo PBA classe 20

Código	Descrição do produto	UR	Peso unit (gramas)	Processo de Fabricação	EAN unitário
14972	TUBO PBA CL20 DN 50	1	6.784,2	Extrusão	7891960767002
14973	TUBO PBA CL20 DN 75	1	13.678,7	Extrusão	7891960767019
14974	TUBO PBA CL20 DN 100	1	22.738,6	Extrusão	7891960767026

* Fornecido com o anel de vedação JERI montado no tubo



BITOLA	A	B	C	D	e	L
DN50	78,2	60,4	85,0	60,0	4,3	6.110,0
DN75	105,0	85,6	100,0	85,0	6,1	6.130,0
DN100	132,5	110,6	120,0	110,0	7,8	6.155,0

* medidas aproximadas em milímetros (mm).

** Comprimento de montagem: 6,0 metros.

Fonte: Adaptado de Wavin (2026).

Figura 23: Especificações técnicas da linha PBA (Amanco/Wavin)

2. Características Técnicas

Tubos

- **Matéria Prima:** Fabricados em Poli (Cloroeto de Vinila) não plastificado (PVC-U) com tensão circunferencial admissível de 6,3 MPa;

- **Parede dos tubos e conexões:** Formada por uma única parede maciça de PVC rígido, sendo lisas tanto interna quanto externamente;

- **Norma:** NBR 5647;

- **Cor:** Marrom;

- **Tubos:** Ponta – Bolsa;

- **Coefficiente de rugosidade equivalente** $K = 0,06$;

- Os tubos são dimensionados quanto à pressão máxima de serviço admissível, incluindo sobrepressões provenientes de variações dinâmicas, inclusive golpe de aríete em:

- Classe 12: 6,0 Kgf/cm² (0,60 MPa) - na temperatura até 25° C;

- Classe 15: 7,5 Kgf/cm² (0,75 MPa) - na temperatura até 25° C;

- Classe 20: 10,0Kg/cm² (1,00 MPa) na temperatura até 25° C.

- As conexões atendem todas as classes de pressão da linha PBA, dimensionadas para a classe 20 (1,00 MPa) á temperatura de 25° C;

- **Conexões:** Compatível com conexões em ferro fundido de PN 1,0 MPa (10,0Kg/cm²);

- **Comprimento de montagem (CM):** 6 metros.

Anel de Vedação

- **Tubos:** Junta Elástica Bilabial (JERI) fabricada em borracha EPDM (Etileno Propileno) já instalados;

- **Conexões:** Junta Elástica tipo O'Ring (JE) fabricada em borracha EPDM (Etileno Propileno) fornecidos separadamente;

Fonte: Adaptado de Wavin (2026).

ANEXO B – Informações catálogo técnico dos tubos de aço linha Tupper (ArcelorMittal)

Figura 24: Tabela de especificações técnicas da linha Tupper (Arcelormital)

Composição Química / Propriedades Mecânicas NBR-5590				
Matéria-prima Aço	Grau A		Grau B	
	Carbono - C %	*Manganês - Mn %	Carbono - C %	*Manganês - Mn %
	0,25 Máximo	0,95 Máximo	0,30 Máximo	1,20 Máximo
	LE = 205 Mínimo MPa LR = 330 Mínimo MPa		LE = 240 Mínimo MPa LR = 415 Mínimo MPa	
* Para cada redução de 0,01% abaixo do carbono máximo especificado, um aumento de 0,06% de manganês acima do máximo especificado é permitido até um máximo de 1,35% para Gr. A e 1,65% para Gr. B. O Alongamento mín. deve ser calculado conforme fórmula: A = alongamento mín. (%) S = área do corpo de prova (mm) LR = limite de resistência mín. (Mpa) $A = \frac{1942,57 \cdot S^{0,2}}{LR^{0,7}}$				
Condições de Fornecimento				
Espessura (e)	A espessura de parede <u>Mínima</u> não pode, em nenhum ponto do tubo, ser menor que 12,5% abaixo da espessura nominal especificada. A espessura Máxima é limitada pela massa nominal (kg/m), cuja tolerância é ± 10%.			
Ensaio e Testes	Submetidos a testes de Pressão Hidrostática e/ou Ensaio Eletromagnético (N.D.T.). Hidrostático: [(P = 50 kg/cm²) durante 5 segundos]			
Extremidades	Onde: P = Pressão (kg/cm²) e = Espessura (mm) LE = Limite de Escoamento (N/mm²) DE = Dimensional Externo (mm)			
Empenamento	[P = (2 x 60% LE x e) / DE] para Ø ≥ 50,00 mm			
Rebarba Interna	1 - Lisas (isentas de rebarbas - corte em serra). 2 - Chanfradas (biseladas / usinadas em ângulo).			
	5 mm/m (máximo admissível).			
	Normalmente removida (conforme solicitado no pedido).			

Fonte: Adaptado de Arcelormital (2026)

Figura 25: Tabela de especificações dimensionais da linha Tupper (Arcelormital)

Normas de Fornecimento para o Mercado Interno															
Tubos de condução pretos ou galvanizados (água, gás, vapor e fluidos não corrosivos).															
NBR 5580/2015															
Diâmetro Nominal (DN)	Diâmetro Nominal (pol.)	Diâmetro Externo (mm)	CLASSE LEVE				CLASSE MÉDIA				CLASSE PESADA				
			Espessura (mm)	Preto		Galvanizado	Espessura (mm)	Preto		Galvanizado	Espessura (mm)	Preto		Galvanizado	
				Kg/pç	Barras/ Fardo	Kg/pç		Kg/pç	Barras/ Fardo	Kg/pç		Kg/pç	Barras/ Fardo	Kg/pç	
15	1/2"	21,30	2,25	6,342	156	6,636	51	2,65	7,313	156	7,601	51	-	-	-
20	3/4"	26,90	2,25	8,207	113	8,588	44	2,65	9,509	113	9,884	44	3,00	10,609	113
25	1"	33,70	2,65	12,175	70	12,655	24	3,35	15,044	70	15,513	24	3,75	16,619	70
32	1 1/4"	42,40	2,65	15,587	51	16,201	19	3,35	19,357	51	19,961	19	3,75	21,446	51
40	1 1/2"	48,30	3,00	20,109	44	20,809	19	3,35	22,282	44	22,977	19	3,75	24,720	44
50	2"	60,30	3,00	25,436	29	26,322	10	3,75	31,379	29	32,253	10	4,50	37,155	29
65	2 1/2"	76,10	3,35	36,062	24	37,186	10	3,75	40,146	24	41,264	10	4,50	47,676	24
80	3"	88,90	3,35	42,407	19	43,729	7	4,00	50,250	19	51,562	7	4,50	56,199	19
90	3 1/2"	101,60	3,75	54,295	19	55,807	7	4,25	61,220	19	62,725	7	5,00	71,469	19
100	4"	114,30	3,75	61,342	13	63,051	7	4,50	73,111	13	74,808	7	5,60	90,072	13
125	5"	139,7	-	-	-	-	-	4,75	94,850	10	96,936	10	5,60	111,119	10
150	6"	165,1	-	-	-	-	-	5,00	118,449	10	120,924	10	5,60	132,166	10
Para fins de cálculo de peso, foi utilizado o comprimento de 6.000mm da peça. Massa mínima do revestimento = 400 g/m²															
* Sem remoção de rebarba interna. Fornecido sob consulta. Padrão de rosca BSP.															
Conforme portaria nº 169 do Inmetro, a Tuper está adequada ao fornecimento de tubos certificados, considerando as normas técnicas ABNT NBR 5580 e NBR 5590, determinado pelo regulamento ora aprovado (NR).															

Fonte: Adaptado de Arcelormital (2026)