



GLAUBER DIAS CHAGAS FREITAS

**EFEITO DO GOLPE DE ARÍETE EM SISTEMAS DE REPARO
COM “PATCHES” METÁLICOS COLADOS**

NITERÓI, RJ

2026

GLAUBER DIAS CHAGAS FREITAS

**EFEITO DO GOLPE DE ARÍETE EM SISTEMAS DE REPARO
COM “PATCHES” METÁLICOS COLADOS**

Dissertação apresentada ao Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área: Análise estrutural / Mecânica dos sólidos

Orientador:

Prof. Dsc. Heraldo Silva da Costa Mattos

Coorientador:

Prof. PhD. João Marciano Laredo dos Reis

Niterói, RJ

2026.

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

F862e Freitas, Glauber Dias Chagas
Efeito do Golpe de Ariete em Sistemas de Reparo com Patches
Metálicos Colados / Glauber Dias Chagas Freitas. - 2026.
52 f. : il.

Orientador: . Heraldo Silva da Costa Mattos Mattos.
Coorientador: João Marciano Laredo dos Reis Reis.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Escola de Engenharia, Niterói, 2026.

1. Análise Estrutural. 2. Mecânica dos sólidos. 3.
Hidráulica. 4. Produção intelectual. I. Mattos, . Heraldo
Silva da Costa Mattos, orientador. II. Reis, João Marciano
Laredo dos Reis, coorientador. III. Universidade Federal
Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD - XXX

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

GLAUBER DIAS CHAGAS FREITAS

EFEITO DO GOLPE DE ARÍETE EM SISTEMAS DE REPARO COM “PATCHES” METÁLICOS COLADOS

Dissertação apresentada ao Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área: Análise estrutural /Mecânica dos sólidos

Linha de Pesquisa: Análise Estrutural com Ênfase em Efeitos de Choque por Carregamentos Transitórios

Aprovado em 16 de abril de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



HERALDO SILVA DA COSTA MATTOS

Data: 21/04/2026 21:03:59-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. DSc Heraldo Silva da Costa Mattos – UFF
Orientador

Documento assinado digitalmente



JOAO MARCIANO LAREDO DOS REIS

Data: 22/04/2026 13:33:03-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. PhD João Marciano Laredo dos Reis – UFF
Coorientador

Documento assinado digitalmente



MARIA LAURA MARTINS COSTA

Data: 22/04/2026 11:08:09-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. DSc Maria Laura Martins Costa – UFF
Membro interno

Documento assinado digitalmente



ROGERIO MARTINS SALDANHA DA GAMA

Data: 21/04/2026 21:24:53-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. DSc Rogério Saldanha da Gama – UERJ
Membro externo

Niterói, RJ, abril de 2026.

Dedico este trabalho, primeiramente, à minha família, pelo apoio incondicional, compreensão, paciência e incentivo constante ao longo de toda a trajetória acadêmica, mesmo diante dos desafios e renúncias exigidos por este caminho.

Dedico também aos meus orientadores e professores, cuja dedicação, conhecimento e compromisso com a formação científica foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e profissional.

À Marinha do Brasil, pela oportunidade de desenvolvimento pessoal e técnico, bem como pelo incentivo à pesquisa e à inovação, e à FAPERJ, pelo apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico que tornou possível a realização deste trabalho.

Por fim, dedico este trabalho a todos os professores e servidores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense, cujo suporte institucional e humano foi essencial para a concretização desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador e ao meu coorientador, pela orientação técnica, pela dedicação, pelas valiosas contribuições acadêmicas e pelo constante incentivo ao longo de todas as etapas deste trabalho, fundamentais para o seu desenvolvimento e conclusão.

Agradeço à Marinha do Brasil, pela oportunidade de desenvolvimento profissional e pessoal, bem como pelo incentivo permanente à capacitação técnica e científica, que possibilitou a realização deste estudo. Em especial, registro meus agradecimentos ao Comandante Cesar, pelo apoio, orientação e estímulo ao aprimoramento acadêmico e profissional.

Agradeço à FAPERJ pelo incentivo ao desenvolvimento tecnológico e pelo apoio à pesquisa científica, fundamentais para o fortalecimento da produção acadêmica e da inovação no estado do Rio de Janeiro.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PGMEC), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense, agradeço pelo suporte institucional, pela excelência acadêmica e pela contribuição direta ou indireta para a minha formação durante o curso de mestrado.

Por fim, agradeço de forma especial à minha família, pelo apoio incondicional, pela compreensão, paciência e incentivo constantes, que foram essenciais para superar os desafios desta jornada acadêmica e para a conclusão deste trabalho.

Epígrafe

“Se você quer alcançar o que deseja, lute.”

Clarice Lispector

RESUMO

Título: Efeito do golpe de aríete em sistemas de reparo com *patches* metálicos colados

Este trabalho investiga experimentalmente o comportamento estrutural de sistemas de reparo com *patches* metálicos colados aplicados em tubulações com defeitos simulados por furo passante, quando submetidos a diferentes taxas de elevação da pressão interna do fluido. Os ensaios foram realizados em tubos de aço API 5L Grau B, reparados com *patches* de aço ASTM A36 colados com adesivo epóxi estrutural, e submetidos a testes hidrostáticos monotônicos e a carregamentos com taxa elevada, representativos de condições transitórias associadas ao golpe de aríete.

Os testes foram conduzidos conforme a ASTM D1599, monitorando-se a pressão de falha e o tempo até a ruptura do sistema de reparo. Os resultados experimentais mostraram uma variação significativa da pressão de ruptura em função da taxa de carregamento, evidenciando um comportamento dependente da taxa associado à resposta viscoelástica da camada adesiva. Enquanto ensaios com carregamento lento apresentaram falhas em pressões consideravelmente menores, os ensaios com elevação rápida da pressão resultaram em valores de ruptura até cinco vezes superiores.

Com base nos resultados obtidos, foi proposta uma abordagem analítica para estimar um limite inferior conservador da pressão de ruptura do sistema reparado, fundamentada em conceitos da Mecânica da Fratura Elástica Linear e na taxa crítica de liberação de energia. Além disso, é discutida a necessidade de correções nos critérios tradicionais de projeto de reparos colados para incorporar os efeitos de picos de pressão induzidos por transientes hidráulicos e a dependência da taxa de carregamento.

Os resultados indicam que a consideração explícita dos efeitos transitórios é essencial para uma avaliação mais realista da integridade e da confiabilidade de sistemas de reparo colados aplicados em tubulações submetidas a condições dinâmicas de operação.

Palavras-chave: dutos corroídos; dano transpassante; reparos com *patches* metálicos colados; golpe de aríete; mecânica da fratura.

ABSTRACT

This study experimentally investigates the structural behavior of bonded metallic *patch* repair systems applied to pipelines with simulated through-wall defects, when subjected to different pressure loading rates. The tests were performed on API 5L Grade B steel pipes repaired with ASTM A36 steel *patches* bonded using a structural epoxy adhesive, and subjected to monotonic hydrostatic loading and high-rate pressure loading representative of transient conditions associated with water hammer.

Hydrostatic tests were carried out in accordance with ASTM D1599, with continuous monitoring of the failure pressure and the time to failure of the repair system. The experimental results showed a significant variation in failure pressure as a function of the pressure loading rate, indicating a rate-dependent behavior associated with the viscoelastic response of the adhesive layer. While slow loading tests resulted in failure at considerably lower pressures, tests with rapid pressure increase led to failure pressures up to five times higher.

Based on the experimental findings, an analytical approach is proposed to estimate a conservative lower bound for the failure pressure of the repaired pipe, grounded on concepts of Linear Elastic Fracture Mechanics and the critical energy release rate. In addition, the need for corrections to traditional bonded repair design criteria is discussed in order to account for pressure peaks induced by pressure transients and for the loading-rate dependency of the adhesive layer.

The results indicate that the explicit consideration of transient effects is essential for a more realistic assessment of the integrity and reliability of bonded repair systems applied to pipelines operating under dynamic pressure conditions.

Keywords: corroded pipelines; through-thickness damage; repairs with bonded metallic *patches*; water hammer; fracture mechanics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Dano por corrosão em tubulação de água	3
Figura 2.2 – Escalador industrial avaliando dano em tubulação	3
Figura 2.3 – Ilustração do fenômeno do golpe de aríete.	5
Figura 2.4 – Reação de cura da resina epóxi.	6
Figura 2.5 – Ilustração de reparo por <i>patch</i> metálico colado em tubulações.....	10
Figura 2.6 – Esquema 2D do reparo por <i>patch</i> metálico colado em tubulações.....	11
Figura 3.1 – Perfil de superfície 3D em aço ASTM A36.....	12
Figura 3.2 – Colagem dos <i>patches</i> metálicos.	13
Figura 3.3 – Teste de ruptura.....	13
Figura 4.1 – Gráfico dos resultados dos testes de ruptura.....	14
Figura 4.2 – Ajustes e experimentos de curvas, pressão versus tempo até a falha. ...	21
Figura 4.3 – Pressão de falha versus tempo até a falha. limite inferior.....	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Propriedades mecânicas adesivas	12
Tabela 4.1. Resultados dos testes	15

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área da seção transversal do tubo	m^2
A_t	Área da trinca	m^2
A_o	Área da seção transversal não deformada do tubo	m^2
c	Velocidade de propagação da onda de pressão	m/s
D	Diâmetro do defeito (furo)	mm
E	Módulo de elasticidade de Young	MPa
E_p	Módulo de Young do <i>patch</i> metálico	MPa
e	Espessura da parede do tubo	mm
exp	Exponencial	–
G	Módulo de cisalhamento do <i>patch</i> metálico	MPa
h	Espessura do <i>patch</i> metálico	mm
K	Módulo volumétrico do fluido	Pa
ln	Logaritmo neperiano	–
p	Pressão interna	MPa
P_f	Pressão crítica de falha (burst pressure)	MPa
P_o	Pressão operacional	MPa
Δp	Incremento de pressão de Joukowski	MPa
R	Raio interno do tubo	m
t	Tempo	s
u	Velocidade axial do fluido	m/s

x	Coordenada axial ao longo do tubo	m
γ	Taxa de liberação de energia na interface adesiva	J/m ²
γ_I	Taxa de liberação de energia – Modo I	J/m ²
γ_{II}	Taxa de liberação de energia – Modo II	J/m ²
γ_{CR}	Taxa crítica de liberação de energia	J/m ²
ν	Coefficiente de Poisson	–
ρ	Massa específica do fluido	kg/m ³
ε_θ	Deformação circunferencial do tubo	–
σ_θ	Tensão circunferencial (hoop stress)	MPa

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
SUMÁRIO.....	xv
CAPÍTULO 1 – Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Organização do texto	2
CAPITULO 2 – Revisão Bibliografia	3
2.1 Reparo de dutos com <i>patches</i> colados.....	3
2.2 Golpe de aríete	4
2.3 Adesivos estruturais à base de epóxi	6
2.4 Efeitos do golpe de aríete nos reparos colado	8
CAPÍTULO 3 – Materiais e Métodos	12
3.1 Corpod de prova e equipamentos	12
3.2 Preparação dos ensaios e corpos de prova	12
3.3 Procedimentos	14
CAPÍTULO 4 – Resultados e Discuções	15
4.1 Resultados dos testes	15
4.2 Discuções e análises dos resultados	16
4.2.1 Estimativa de um limite inferior para a pressão de ruptura de um tubo reparado.....	16
4.2.2 Equações determinantes para escoamentos de golpe de aríete.....	17

4.2.3 Contabilização de um eventual pico de pressão no caso de golpe de aríete.....	21
CONCLUSÕES.....	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

CAPÍTULO 1

Introdução

2.1 MOTIVAÇÃO

Vazamentos em dutos metálicos provocados por falhas estruturais decorrentes da corrosão, representam riscos operacionais e custos elevados à indústria, especialmente em setores como o de petróleo e gás. Reparos colados com *patch* metálicos têm se mostrado alternativas eficientes às técnicas tradicionais de soldagem, especialmente em ambientes de difícil acesso, a exemplo de plantas offshore. No entanto, a maior parte das metodologias normativas presume regime estacionário, desconsiderando variações bruscas de pressão como as provocadas pelo golpe de aríete. A motivação deste trabalho é preencher essa lacuna por meio de uma análise experimental que simula condições de transientes hidráulicos, permitindo avaliar a real confiabilidade desses sistemas de reparo sob cargas dinâmicas e seu efeito sobre a taxa crítica de liberação da energia do adesivo.

2.2 OBJETIVOS

O projeto tem como objetivo principal investigar o comportamento estrutural de sistemas de reparo com *patches* metálicos colados aplicados em tubulações com defeitos por corrosão, quando submetidos a Choques hidráulicos (golpe de aríete). O termo *patch* será usado por ser clássico na literatura em língua inglesa e porque o termo *placa* usado em alguns estudos em português, é incorreto (pois trata-se de uma casca com curvatura) e o termo alternativo *patch* pode causar a impressão de ser um processo improvisado. Contudo, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Avaliar experimentalmente a influência da taxa de carregamento na falha do sistema adesivo;
- Propor uma equação conservadora para estimativa da espessura mínima do *patch*, considerando picos de pressão e a taxa crítica de liberação da energia;
- Analisar a dependência da taxa de falha com base na mecânica da fratura e no comportamento do adesivo;

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este documento foi organizado em capítulos abordando os seguintes tópicos:

- Capítulo 1: apresentação da introdução com motivação do estudo e os objetivos do projeto de pesquisa assim como a organização do texto.
- Capítulo 2: apresenta a Revisão bibliográfica, abordando os conceitos de reparo com *patches* colados, princípio físico do golpe de aríete, adesivos estruturais à base de epóxi e o efeito do golpe de aríete nos reparos colados com adesivos epóxi.
- Capítulo 3: descrição dos materiais e métodos para realização do estudo proposto, incluindo a apresentação do aparato e procedimento experimental.
- Capítulo 4: apresentação dos resultados com discussão e análise, incluindo comparação com estudos similares e propondo uma equação para pressão de ruptura.
- Conclusões: conclusões do estudo proposto, e apresentação de propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

2.1 REPARO DE DUTOS COM *PATCHES* COLADOS

A manutenção não programada de dutos metálicos é frequentemente associada a falhas estruturais inesperadas, as quais podem impor custos operacionais significativos às atividades industriais. Entre os diversos mecanismos de degradação, a corrosão é amplamente reconhecida como um dos principais fatores responsáveis por essas falhas, contribuindo de forma direta para a perda de integridade estrutural e para a ocorrência de paradas não planejadas. Esses efeitos tornam-se ainda mais críticos em ambientes de alto risco, como plataformas de petróleo offshore, onde condições operacionais severas e ambientes agressivos aceleram os processos corrosivos e ampliam as consequências técnicas e econômicas (Dao et al., 2023; Papavinasam, 2014).



Figura 2.1 – Dano por corrosão em tubulação de água

Nessas circunstâncias, a manutenção de dutos pode exigir a implantação de escaladores industriais, ressaltando assim a necessidade de sistemas de reparo que sejam operacionalmente eficientes e fáceis de aplicar em campo.



Figura 2.2 – Escalador industrial avaliando dano em tubulação

Os reparos realizados a base de adesivos epóxi, como mangas compostas e *patches* colados, são cada vez mais utilizados como alternativas às técnicas tradicionais de soldagem no reparo de tubulações corroídas em ambientes industriais (Alabtah et al., 2021, Abd-Elhady et al., 2017, Budhe et al., 2018). Atualmente, duas normas principais regem a aplicação de sistemas de reparo de compósitos para equipamentos e tubulações sob pressão: ASME PCC-2, 2022 e ISO 24817, 2017. Para casos que envolvem defeitos na parede do duto, um *patch* colado (composto ou metálico) pode ser usado em conjunto com uma luva composta para obter um reparo confiável e estanque. O uso de *patches* metálicos colados associados à luva composta não é proibido nas normas para o projeto de sistemas de reparo de compósitos (como ASME PCC-2 e ISO 24817). No entanto, não abordam essa prática tão frequente adotada na indústria. A integração de um *patch* colado aumenta notavelmente a capacidade máxima de pressão que o reparo pode suportar. Além disso, os adesivos colados sozinhos demonstraram eficácia como soluções de reparos independentes, tanto metálicos (Oliveira et al., 2021, Enne et al., 2023) quanto compostos (Reis et al., 2022) dependendo dos requisitos da aplicação e das características do defeito.

2.2 GOLPE DE ARIETE

O golpe de aríete ou choque hidráulico comumente conhecido como transiente hidráulico, ocorre em sistemas de tubulação quando há uma alteração brusca na vazão do fluido, ou seja, quando há um aumento ou diminuição rápida de sua velocidade, causando uma onda de choque através da variação de pressão, que se propaga pelo duto e pode danificar o sistema por fadiga, deformação plástica ou ruptura. Este fenômeno é crítico em sistemas que utilizam válvulas para controle de fluxo, pois a abertura ou fechamento súbito dessas válvulas é uma das principais causas do golpe de aríete, entretanto podemos identificar este fenômeno nas falhas mecânicas de dispositivos de proteção ou controle e eventos de parada/arranque de uma turbomáquina (Camargo, 1989).

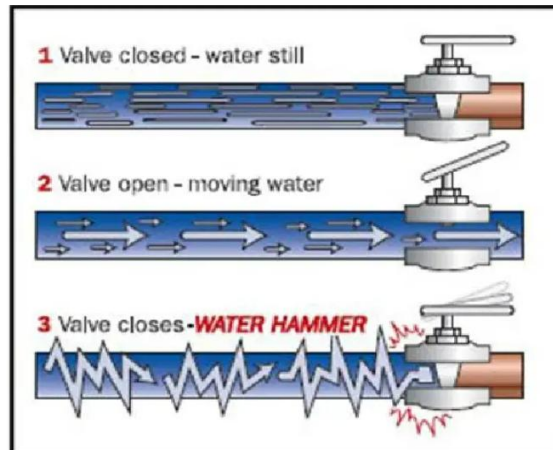


Figura 2.3 – Ilustração do fenômeno do golpe de aríete

A intensidade do golpe de aríete tem como pontos críticos o comprimento do tubo (antes da válvula) e o tempo que a válvula leva para fechar. A variável mais importante neste caso é a velocidade média do fluxo que influencia diretamente na intensidade dos picos máximos de pressão. Esta flutuação máxima de pressão pode ser explicada pela fórmula do suto de pressão de Joukowski (Broens 2012).

A equação fundamental do golpe de aríete, comumente chamada de equação de Joukowski, relaciona a variação da pressão (Δp) com a variação da velocidade (Δu) e é descrita da seguinte forma (Tijsseling; Anderson, 2007):

$$\Delta p = \rho c \Delta u \quad (1)$$

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho(1 + \frac{DK}{eE})}} \quad (2)$$

Os termos ρ e c representam a massa específica e a velocidade do som no fluido respectivamente.

O termo c pode ser definido em função o módulo de Bulk (k) do fluido, da massa específica (ρ) do fluido, do módulo de elasticidade longitudinal (E) da parede do duto, de sua geometria espessura (e) e diâmetro (D), conforme a Eq 2 (Tijsseling; Anderson, 2007).

O fenômeno do golpe de aríete acarreta tensão interna no material, que no caso dos fluidos se propaga e é transmitida para as paredes do recipiente que o contém, devido a sua capacidade de se contrair e expandir, portanto a intensidade do movimento pode ser mensurada e depende da pressão aplicada (Goldman, 1953).

Assim, podemos observar os princípios da a 1ª Lei de Newton na geração das tensões durante o movimento e variações da velocidade e pressão do fluido que escoar dentro do duto. Desta forma, quanto mais rápida for a variação de velocidade do escoamento do fluido, maior será a sua expansão ou compressão (Goldman, 1953).

2.3 ADESIVOS ESTRUTURAIS À BASE DE EPÓXI

Os adesivos estruturais à base de epóxi são amplamente utilizados em situações que exigem elevada resistência mecânica, estabilidade térmica e forte adesão a diferentes substratos. Sua popularização em setores como aeroespacial, automotivo e de transporte de fluidos está relacionada não apenas às propriedades intrínsecas da matriz epoxídica, mas também à possibilidade de modificações químicas e físicas que aumentam sua tenacidade e reduzem sua fragilidade (Budhe et al., 2018). A composição típica envolve resinas do tipo diglicidil éter do bisfenol-A ou F, curadas por agentes anímicos ou anidrínicos, cujo grau de reticulação define o módulo de elasticidade, a resistência à tração e a temperatura de transição vítrea (T_g). Em muitos casos, o reforço com partículas elastoméricas, nano cargas inorgânicas ou sistemas núcleo-casca permite maior dissipação de energia e melhora do desempenho sob carregamentos complexos (Müller-Pabel et al., 2022, Sampaio, 2009).

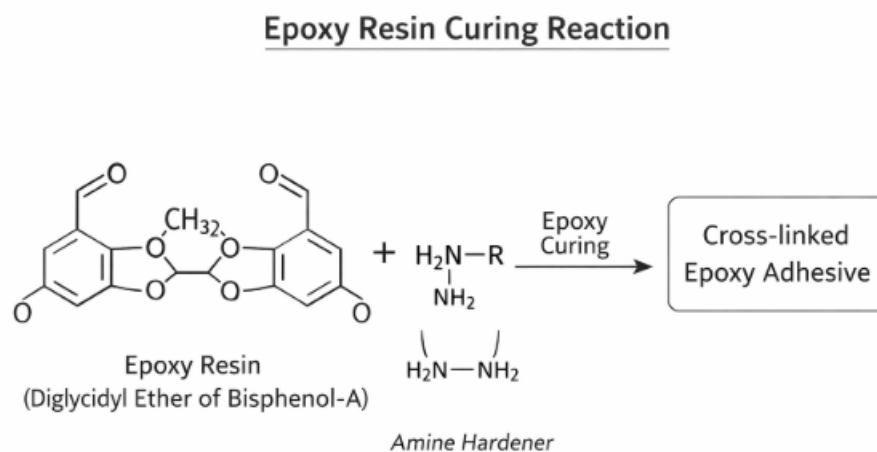


Figura 2.4 – Reação de cura da resina epóxi

O comportamento mecânico dos adesivos epóxi é fortemente dependente da temperatura e da taxa de deformação, consequência de sua natureza viscoelástica. Ensaio de análise dinâmico-mecânica (DMA) mostram que, em temperaturas abaixo da T_g , o material apresenta resposta vítrea e elevada rigidez, enquanto próximo ou acima desse limite ocorre relaxação da matriz e consequente perda de resistência. Tal dependência pode ser descrita pela superposição tempo-temperatura (Time-Temperature Superposition, TTS), modelada pela

equação de Williams-Landel-Ferry, permitindo extrapolar o desempenho para diferentes condições operacionais (Müller-Pabel et al., 2022; Silvano et al., 2025). Nesse contexto, a taxa de deformação funciona de forma análoga à temperatura: um aumento de velocidade de solitação tende a enrijecer o material, enquanto reduções de taxa produzem respostas mais dúcteis.

Ensaio em condições de tração dinâmica demonstram que os epóxis apresentam aumento de resistência e de módulo conforme a taxa de deformação cresce, embora com perda de ductilidade. Goglio et al. (2008) observaram que a tensão máxima em resinas epoxídicas aumenta significativamente quando a taxa passa de condições quase-estáticas para regimes de impacto, confirmando a sensibilidade à velocidade de solitação. Em juntas adesivadas, os estudos de Lißner et al. (2013) apontam que há também variação no modo de falha: em baixas taxas predominam falhas coesivas, enquanto em altas taxas há maior tendência à falha adesiva, devido à incapacidade da interface de relaxar tensões rapidamente. Esse efeito reforça a equivalência entre fatores térmicos e dinâmicos na definição do desempenho estrutural.

A explicação para a dependência do comportamento mecânico dos adesivos epóxi não modificados, constituídos exclusivamente por resina epoxídica e agente de cura, em relação à taxa de deformação está associada à sua natureza viscoelástica e ao mecanismo de escoamento termicamente ativado típico de polímeros amorfos vítreos. De acordo com a teoria de Eyring, o processo de deformação plástica ocorre por saltos moleculares ativados por energia térmica, resultando em uma dependência aproximadamente logarítmica da tensão de escoamento com a taxa de deformação (Eyring, 1936).

Esse formalismo foi posteriormente estendido para polímeros vítreos, incluindo resinas epoxídicas, demonstrando que o aumento da taxa de deformação reduz o tempo disponível para relaxação molecular, exigindo níveis mais elevados de tensão para ativar os mecanismos de escoamento (Argon, 1973). Como consequência, adesivos epóxi não tenacificados apresentam aumento de rigidez e resistência aparente com o incremento da taxa de carregamento, acompanhado por redução da deformação última e comportamento progressivamente mais frágil em regimes dinâmicos.

Ensaio mecânicos realizados em resinas epoxídicas sob diferentes taxas de deformação confirmam esse comportamento, evidenciando que, em condições quase estáticas, a matriz polimérica possui maior capacidade de relaxação viscoelástica, enquanto em altas taxas a resposta é dominada pelo caráter vítreo do material (Goglio et al., 2008; Park & Liechti, 2003).

Esse efeito é particularmente relevante em aplicações estruturais sujeitas a carregamentos transientes, nas quais a resposta mecânica do adesivo pode diferir significativamente daquela obtida em ensaios quase estáticos.

2.4 EFEITOS DO GOLPE DE ARIETE NOS REPAROS COLADOS

Dentro dos padrões normais de operação, a espessura de reparo ou *patch* metálico necessária é calculada com base na pressão nominal de operação do sistema de tubulação. No entanto, essa suposição de projeto pode não ser conservadora o suficiente em muitas aplicações hidráulicas. Os procedimentos operacionais de rotina podem induzir transientes hidráulicos gerando picos de pressão que excedem significativamente a pressão operacional nominal. Essas sobrepressões induzidas por transientes têm o potencial de causar falhas estruturais e funcionais em vários componentes do sistema de tubulação (Freitas Rachid e da Costa Mattos, 1998 e Andrade et al., 2023).

Consequentemente, uma análise abrangente do comportamento hidráulico transiente do sistema é fundamental para o projeto e a confiabilidade dos componentes de retenção de pressão na infraestrutura hidráulica. Textos fundamentais que abordam esse assunto incluem obras de Leishear, 2012 e Van Duyne e Merilo, 1996.

Testes hidrostáticos foram realizados para verificar como as variações de pressão podem gerar deformações inelásticas na camada adesiva que une o *patch* de metal ao tubo e como a dependência da taxa afeta a pressão de ruptura. A pressão de ruptura em testes monotônicos pode ser modelada usando conceitos básicos da mecânica da fratura elástica linear. Embora a suposição de um comportamento frágil-elástico do sistema de reparo seja adotada em todos os padrões, não é no caso de testes com transientes de pressão. Conforme observado em De Lucca et al., 2024, o *patch* e o tubo não estão sujeitos a deformações permanentes significativas, enquanto a camada adesiva tem um comportamento inelástico. Os resultados mostram que os reparos têm um comportamento dependente e bastante sensíveis às taxas de pressão. Com o tempo, isso pode enfraquecer a ligação entre o tubo e o *patch* metálico, resultando na falha prematura do reparo devido aos danos acumulados causados pelo processo de carregamento. O projeto de reparo requer a estimativa da resistência dos tubos reparados sob históricos de pressão complexos. A análise de integridade torna-se mais desafiadora quando é necessário considerar tanto o comportamento inelástico quanto o acúmulo de danos na camada adesiva sob condições dinâmicas.

Como as normas ASME PCC-2 e ISO 24817 não incorporam os efeitos dos transientes de fluido em suas metodologias de projeto, o desempenho dos sistemas de reparo à base de adesivo pode ser comprometido sob condições transitórias severas. Como resultado, podem ocorrer falhas inesperadas, principalmente quando os picos de pressão excedem as suposições do projeto com base apenas nas condições operacionais de estado estacionário. A potencial falta de confiabilidade dessas técnicas de reparo em tais cenários não decorre de falhas inerentes à metodologia de reparo em si, mas sim de limitações na estrutura de projeto atual, que negligencia a influência das flutuações de pressão dinâmica induzidas por fenômenos de fluxo transitório.

Esta situação destaca duas considerações principais. Primeiro, embora o fenômeno do golpe de aríete seja bem reconhecido na comunidade, suas implicações ainda não são totalmente apreciadas pelo setor de reparo de dutos. Em segundo lugar, mesmo entre aqueles que reconhecem os efeitos prejudiciais dos transientes hidráulicos, permanece uma necessidade crítica de um critério de projeto que considere explicitamente os picos de pressão induzidos por transientes. Tal critério deve encontrar um equilíbrio entre rigor analítico e aplicabilidade prática para ser efetivamente adotado na prática de engenharia.

Estudos recente destaca a importância de considerar o comportamento viscoelástico da camada adesiva em condições dinâmicas. Estudos como os de Reis et al. (2014, 2016, 2018) e De Lucca et al. (2024) mostram que a interface adesiva pode apresentar deformações inelásticas dependentes da taxa de aplicação da carga, afetando diretamente a resistência à falha do sistema. Enne et al. (2023) propuseram um modelo analítico baseado em mecânica da fratura elástica linear para prever a pressão crítica de ruptura de reparos colados metálicos, considerando a delaminação circular pressurizada entre o tubo e o *patch*.

Por sua vez, Andrade et al. (2025) abordam especificamente os efeitos de transientes de pressão em sistemas de reparo compósitos, propondo correções à equação clássica da pressão de projeto com base no aumento de pressão de Joukowski. Ainda assim, o efeito da taxa de carregamento sobre a liberação de energia crítica permanece pouco explorado e carece de investigações mais sistemáticas.

O presente trabalho busca abordar essa lacuna na literatura por meio dos resultados de ensaios experimentais realizados em tubos reparados com *patches* metálicos colados com defeito (furo) localizado na parede (Figuras 2.5 e 2.6) e submetido a diferentes taxas de elevação da pressão do fluido. A literatura e as normas não consideram o comportamento viscoso dos

adesivos poliméricos. Diversos estudos realizados pelos autores apresentam tal comportamento (Motta et al., 2019, Reis et al. 2018, Reis, 2016 e Reis et al. 2014).

Portanto, os testes hidrostáticos foram realizados a uma temperatura ambiente e com aumento da pressão do fluido uniforme e contínua até a falha do corpo de prova, conforme a ASTM 1599, 2024. Neste contexto, o tempo até à falha deve situar-se entre 60 e 70 segundos. Em seguida, os testes hidrostáticos foram executados com a máquina em sua velocidade máxima para mostrar a dependência da resistência do reparo com a taxa de carregamento elevada.

Finalmente, devemos observar a pressão operacional usada e a pressão máxima durante um evento transitório, considerando sempre o tempo para ocorrência da falha.

Os padrões são brevemente examinados através das lentes da teoria da mecânica da fratura linear antes que a dinâmica transitória do fluido e seus efeitos no projeto do sistema de reparo sejam discutidos.

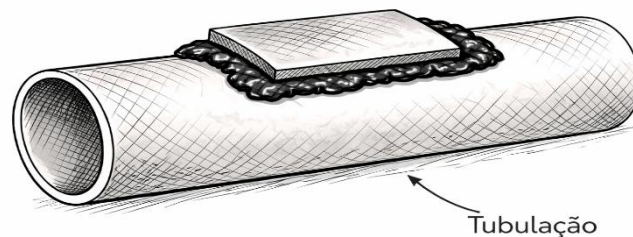


Figura 2.5 – Ilustração de reparo por *patch* metálico colado em tubulações

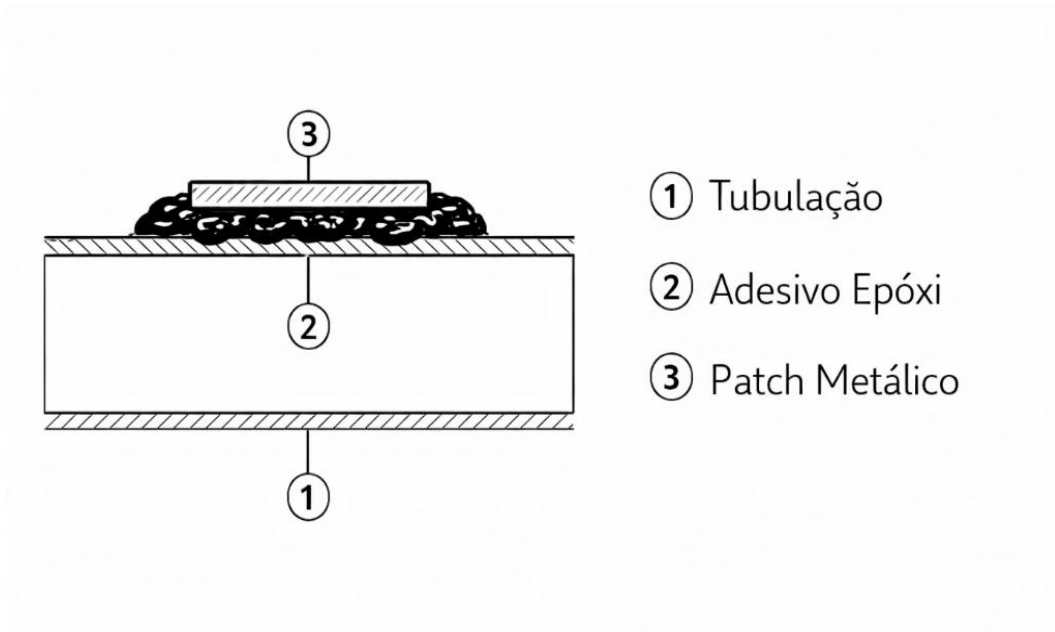


Figura 2.6 – Esquema 2D do reparo por *patch* metálico colado em tubulações

CAPÍTULO 3

Materiais e métodos

3.1 CORPOS DE PROVA E EQUIPAMENTOS

Os tubos, corpos de prova, foram confeccionados com o padrão e características API 5 L gr. B sch.40, com um orifício circular no meio do tubo. Os *patches* metálicos foram obtidos por meio do corte e calandragem de uma chapa de aço de baixo carbono ASME A36. O adesivo estrutural utilizado foi o RenGel SW 404 combinado com o endurecedor Ren HY 404 fabricado pela Huntsman. Este sistema epóxi tem dois componentes com relação de peso 100:9. Segundo o fabricante, o tempo de cura é de 24 h à temperatura ambiente. A Tabela 3.1 apresenta as propriedades adesivas fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.1 Propriedades mecânicas adesivas.

Resistência à tração (MPa)	50–60
Resistência à flexão (MPa)	12–14
Resistência ao impacto (KJ/m ²)	7.5–9.5
Densidade (g/cm ³)	1.8–1.9
Dureza (Shore D)	85–90
Módulo de elasticidade (GPa)	9–10

Os testes foram realizados utilizando uma máquina de ensaio hidrostático Flutrol® modelo 145 FLUASF100-MS7 capaz de realizar mais de trinta 30 (trinta) aferições por segundo, no Laboratório de Engenharia Mecânica (LEM) da Universidade Federal Fluminense.

3.2 PREPARAÇÃO DO ENSAIO E CORPOS DE PROVA

Os 06 tubos foram preparados para o ensaio com um furo central de 25 mm, simulando uma falha estrutural causada por corrosão através da parede. Os *patches* foram confeccionados no formato retangular de 100 mm × 100 mm, com a mesma curvatura do tubo e 3mm de espessura. O material do *patch* é aço ASTM A36 com módulo de Young $E = 200$ GPa e coeficiente de Poisson = 0,3. Para atingir os níveis de rugosidade necessários para o uso do adesivo selecionado (de 25 a 75 μ m), a preparação da superfície foi realizada por jateamento abrasivo reciclável para obter uma aparência de metal branco e remover parte da camada de óxido existente.

O tratamento superficial foi realizado utilizando granalha de aço G40 com uma pressão de ar comprimido de 0,9 Mpa, na superfície do tubo e *patch*. Este tratamento foi realizado manualmente por aproximadamente 30 segundos.

As morfologias da superfície do corpo de prova da placa e do tubo foram medidas por um perfilômetro tridimensional Talysurf CCI MP-Lite (Taylor Hobson). Para o tubo, a rugosidade foi obtida em 12 pontos diferentes no mesmo sentido longitudinal (para cada tubo). A Figura 3.1 apresenta o perfil de rugosidade da superfície.

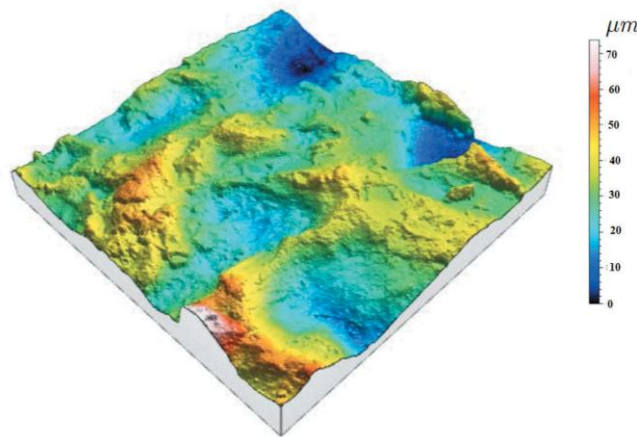


Figura 3.1 - Perfil de superfície 3D em aço ASTM A36.

A rugosidade média (S_a) das *patches* é de 8,24 μm e a rugosidade média (S_t) de 73,8 μm . A rugosidade da superfície foi considerada altamente sensível ao processo de jateamento. O perfilômetro mostra uma superfície não uniforme com picos e vales bem acentuados.

Após o tratamento superficial os *patches* foram colados ao tubo com a camada adesiva de espessura média em torno de 1 mm, buscando posicionar da chapa com o furo do tubo. A Figura 3.2 mostra o processo de colagem do *patch* metálico à superfície do tubo.



Figura 3.2 - Colagem dos *patches* metálicos.

3.3 PROCEDIMENTOS

Uma vez que todos os tubos foram preparados, foi dado um intervalo de 5 dias entre a preparação dos corpos de prova e os testes para garantir que o adesivo estaria totalmente curado. Após este período, os testes hidrostáticos foram realizados primeiramente em 3 corpos de prova de acordo com a ASTM 1599, 2024, que exige um aumento da pressão do fluido de maneira uniforme e contínua até que ocorra a falha. Em seguida, testes hidrostáticos foram executados em mais 3 corpos, desta vez utilizando a velocidade máxima da máquina para verificar a dependência da resistência do reparo (*patch* colado) à elevação brusca da pressão do fluido, ou seja, uma taxa de carregamento elevada. Este último procedimento busca simular um comportamento transitório equivalente a um choque hidráulico.

Os testes hidrostáticos foram realizados à temperatura ambiente de acordo com a ASTM D1599 e na velocidade máxima da máquina para obter a pressão de falha.

Finalmente, foram aferidas as pressões máximas suportada pelos corpos de prova até a ruptura dos seus *patches* colados e o tempo entre o acionamento da máquina e a falha.



Figura 3.3 – Teste de ruptura.

CAPÍTULO 4

Resultados e Discursões

4.1 RESULTADOS DOS TESTES

A Tabela 4.1 apresenta as pressões de ruptura obtidas para diferentes taxas de pressão (os históricos de carregamento são apresentados na Fig. 4.1). A pressão de ruptura varia de 20,57 bar a 108,88 bar, dependendo da taxa de carregamento.

Tabela 4.1 Resultados do teste

Espécime	Pressão de falha (bar)	Tempo até a falha (s)
1	108.88	2.7
2	111.55	2.5
3	110.01	2.85
4	20.05	64.8
5	22.43	63.1
6	20.57	66.6

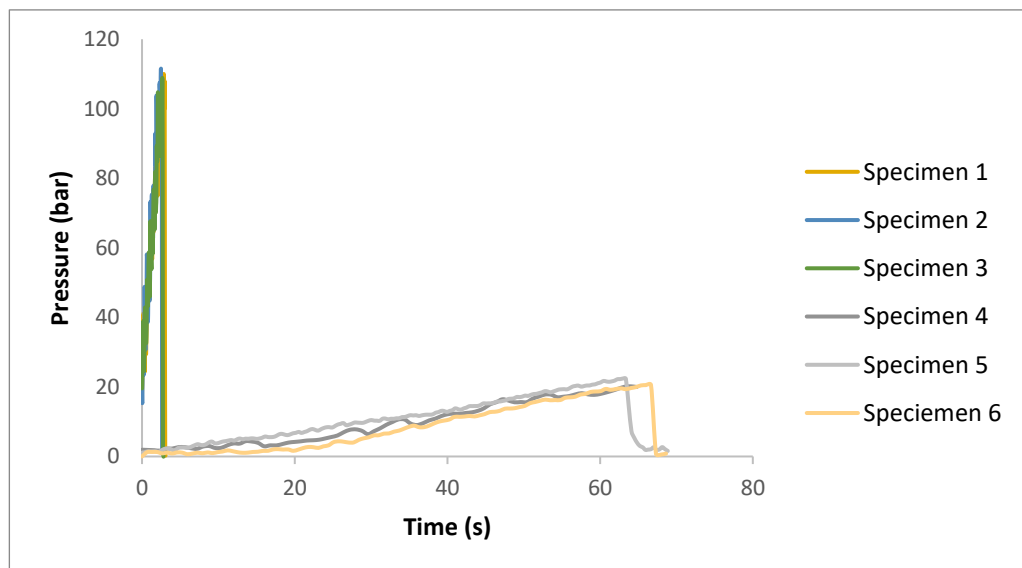


Figura 4.1 – Gráfico dos resultados dos testes de ruptura.

4.2. DISCUSÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.2.1 Estimativa de um limite inferior para a pressão de ruptura de um tubo reparado

A estimativa de um limite inferior para a pressão de ruptura de um tubo reparado pode ser feita usando conceitos básicos da Mecânica da Fratura Elástica Linear. Esta estimativa é válida para qualquer diâmetro de tubo, diâmetro de furo e espessura de *patch*. O acabamento das superfícies, as propriedades adesivas e sua espessura são responsáveis por uma taxa crítica de liberação de energia. Esses resultados foram apresentados pela primeira vez para *patches* metálicas em Enne et al. 2023. O problema se reduz à análise de uma delaminação circular pressurizada entre um substrato rígido (tubo de aço) e o reparo (*patch*). Na análise, uma variável γ que contabiliza todas as perdas de energia ao redor da ponta da trinca e pode ser descrita como a energia necessária para aumentar a área da trinca A_t , em uma quantidade ∂A_t é introduzida (geralmente, o símbolo G é usado em vez de γ . O símbolo γ será adotado nas próximas equações, uma vez que G será usado para o módulo de cisalhamento).

Se uma pressão monotonamente crescente for aplicada, o critério de falha é assumir uma propagação instável (delaminação) quando uma taxa crítica de liberação de energia γ_{CR} for atingida: $\gamma = \gamma_{CR}$. A chamada pressão crítica é a pressão de ruptura associada à taxa de energia crítica. Para este problema, é possível obter analiticamente a seguinte expressão para γ .

$$\gamma = \gamma_I + \gamma_{II} \text{ com } \gamma_I = P_f^2 \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) \left\{ \frac{3}{512h^3} d^4 + \frac{1}{\pi} d \right\} \text{ e } \gamma_{II} = P_f^2 \left[\frac{3}{64Gh} d^2 \right] \quad (3)$$

Com γ_I e γ_{II} sendo, respectivamente, as parcelas da taxa de liberação de energia no modo I e no modo II, respectivamente. Uma vez que, para uma propagação estável, é necessário que $\gamma < \gamma_{cr}$, quando:

$$P_f^2 \left[\left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) \left\{ \frac{3}{512h^3} d^4 + \frac{1}{\pi} d \right\} + \left[\frac{3}{64Gh} d^2 \right] \right] = 0.001 \gamma_{cr} \quad \text{Sendo } \gamma = \gamma_{cr} \quad (4)$$

Onde γ_{cr} é a taxa de liberação de energia crítica em (J/m γ_{cr} 2), E é o módulo de tração do *patch* metálico, expresso em MPa; G é o módulo de cisalhamento da mancha metálica, expresso em Mpa; P_f é a pressão de ruptura no ensaio de ruptura, expressa em MPa; ν é o

coeficiente de Poisson da mancha metálica; d é o diâmetro do defeito, expresso em mm; h é a espessura do *patch* metálico, expressa em mm. Isolando a pressão na Eq.(4), obtemos a seguinte expressão:

$$P_f = \sqrt{\frac{0.001\gamma_{CR}}{\left[\left(\frac{1-\nu^2}{E}\right)\left\{\frac{3}{512h^3}d^4 + \frac{1}{\pi}d\right\} + \left[\frac{3}{64Gh}d^2\right]\right]}} \quad (5)$$

A Eq. (3) depende das propriedades elásticas do *patch* metálico, do diâmetro do defeito e da espessura do *patch*. A camada adesiva é considerada uma superfície, e todas as informações sobre o adesivo, espessura das camadas adesivas e tratamento de superfície devem ser contabilizadas pela γ_{CR} . A Expressão (3) é bastante parecida com as encontradas nas normas ASME PCC-2, 2022 e ISSO 24817, 2017 para sistemas de reparo de compósitos. Esse critério é conservador e um procedimento estatístico para obter experimentalmente uma estimativa menor γ_{LCL} dessa taxa crítica de liberação de energia γ_{CR} pode ser encontrado nessas referências. Para esta classe de sistema de reparo, temos $\gamma_{LCL} = 33$ (J/m²) (Enne et al., 2023).

Embora a hipótese de comportamento elástico frágil dê bons resultados no caso de uma carga monotônica de baixa taxa, uma pequena deformação inelástica (ou irreversível) da camada adesiva pode afetar fortemente a resistência ao reparo. Uma maneira simples de contornar essa limitação, mantendo a mesma estrutura, é assumir que o parâmetro γ_{CR} é dependente do histórico e calcular os transientes gerados em situações clássicas de golpe de aríete em tubulações.

4.2.2 Equações determinantes para escoamentos de golpe de aríete

Nesta primeira abordagem, o fluxo de fluido é considerado invíscido. Além disso, o transiente é analisado a partir de uma instalação reservatório-tubo-válvula, onde um fechamento instantâneo da válvula gera o transiente. Os históricos de pressão são analisados com base em uma forma adimensional das equações de golpe de aríete. Tal forma revela os grupos adimensionais mais importantes do fenômeno.

As equações que regem o golpe de aríete são desenvolvidas considerando um fluxo de fluido dentro de um tubo deformável com a área da seção transversal circular (πR^2) e perímetro ($2\pi R$) não perturbados, onde R é o raio interno do tubo. Em tal contexto, o fluxo de fluido é assumido unidimensional para que possa se mover ao longo da direção da linha central do tubo (x), enquanto a inércia do tubo é negligenciada. Ao assumir fluxos de baixo número de Mach e desconsiderar os efeitos das forças do corpo, efeitos viscosos axiais, reações químicas e transformações de mudança de fase, as equações governantes podem ser estabelecidas como Chauldry, 2014:

$$\partial_t(\rho A) + \rho A \partial_x u = 0, \tag{6}$$

$$\rho A \partial_t u + A \partial_x p = 0.$$

Para completar o modelo, basta descrever como o tubo se deforma radialmente com a variação da pressão interna e fornecer uma equação de estado para o fluido. O fluido é considerado um líquido ligeiramente compressível, de modo que sua equação de estado é dada por

$$\rho = \rho_f \left(1 + \frac{p}{K}\right), \tag{7}$$

Neste caso ρ_f e K representa a densidade não perturbada e o módulo de massa líquida, respectivamente. Sob a suposição de pequena deformação, a área da seção transversal é conectada à deformação circunferencial da parede do tubo ε_θ , como:

$$A = A_0(1 + 2\varepsilon_\theta), \tag{8}$$

Onde A_0 representa a área não perturbada. Restringindo a análise para paredes finas ($\frac{R}{e} < 10$) e comportamento linear-elástico dos tubos, assumindo que o tubo está ancorado contra qualquer movimento axial, a deformação circunferencial pode ser escrita em termos de pressão como (Chauldry, 2014):

$$\varepsilon_\theta = \frac{pR(1 - \nu^2)}{eE} \quad (9)$$

Onde, ν , E e e representam o coeficiente de Poisson, módulo de Young e espessura do tubo, respectivamente. Quando as Eqs. (5–7) são combinados com a Eq. (4), as seguintes equações governantes são encontradas:

$$\left[\frac{1}{\rho_f c_f^2} \right] \partial_t p + \partial_x u = 0, \quad (10)$$

$$\rho_f \partial_t v + \partial_x p = 0, \quad \text{onde}$$

$$c_f = \left[\frac{\rho_f}{K} \left(1 + \frac{2RK(1 - \nu^2)}{eE} \right) \right]^{-1/2}, \quad (11)$$

é a velocidade da frente de onda. Ao apelar para o método das características, as equações governantes descritas na Eq. (7) podem ser transformadas no seguinte conjunto de equações diferenciais ordinárias (Andrade & Freitas Rachid, 2025):

$$\frac{1}{\rho_f c_f} \frac{dp}{dt} + \frac{du}{dt} = 0, \quad \text{onde} \quad \frac{dx}{dt} = c_f \quad (12)$$

$$-\frac{1}{\rho_f c_f} \frac{dp}{dt} + \frac{du}{dt} = 0, \quad \text{sendo } \frac{dx}{dt} = -c_f.$$

Cada uma dessas equações diferenciais ordinárias é chamada de equação de compatibilidade do modelo.

Ao apelar para as variáveis adimensionais, $x^* = x/L$, $t^* = tc_f/L$, $p^* = (p - p_0)/p_{ref}$, $u^* = u/u_0$, onde L é o comprimento do tubo, u_0 e p_0 são a velocidade e pressão pré-transitória em um local específico e p_{ref} é uma pressão de referência, as equações de compatibilidade podem ser reescritas em uma forma adimensional como:

$$\pm \frac{p_{ref}}{\rho_f c_f u_0} \frac{dp^*}{dt^*} + \frac{du^*}{dt^*} = 0, \quad \text{logo } \frac{dx^*}{dt^*} = \pm 1. \quad (13)$$

Para normalizar essas equações, a pressão de referência deve ser da mesma ordem que o produto $\rho_f c_f u_0$. Pode-se notar que o material do tubo e os parâmetros geométricos (E, ν, R, e), além dos parâmetros (K) do material fluido, são encapsulados na velocidade da frente de onda, c_f .

No presente estudo, o transiente é gerado por um fechamento rápido da válvula, de modo que a velocidade próxima à válvula seja nula ao final da manobra de fechamento. Então, a pressão de referência pode ser considerada igual ao aumento da pressão de Joukowsky, Δp conforme Eq 01, (Ferrás, 2018).

$$\Delta p = -\rho_f c_f \Delta u$$

Onde Δu é a velocidade muda bem ao lado do vale ($\Delta u = 0 - u_0$), de tal forma que a Eq. (13) pode ser escrita como:

$$\pm \frac{dp^*}{dt^*} + \frac{du^*}{dt^*} = 0, \quad \text{onde } \frac{dx^*}{dt^*} = \pm 1 \quad (14)$$

4.2.3 Contabilização de um eventual pico de pressão no caso de golpe de aríete

O critério apresentado na Eq. (5) é conservador e um procedimento estatístico para obter experimentalmente uma estimativa mais baixa γ_{LCL} dessa taxa crítica de liberação de energia γ_{CR} pode ser encontrada nas referências.

Normalmente, assume-se que uma pressão operacional máxima permitida P_o e para um furo com diâmetro d , a espessura adequada para o reparo é obtida da Eq. (16) substituindo P_f por P_o .

$$h = \left[\left(\frac{512}{3d^4} \right) \left[\left(\frac{E}{1-\nu^2} \right) \left\{ 0.001 (\gamma_{cr}/P_o^2) - \left[\frac{3}{64Gh} d^2 \right] \right\} - \frac{1}{\pi} d \right] \right]^{1/3} \quad (16)$$

No entanto, para ter em conta um eventual de pico de pressão no caso de golpe de aríete, o valor de P_o na Eq. (16) deve ser corrigido utilizando o aumento de pressão de Joukowsky Δp .

$$P_* = P_o + \Delta p ; \quad \Delta p = -\rho_f c_f \Delta u \quad (17)$$

$$h_* = \left[\left(\frac{512}{3d^4} \right) \left[\left(\frac{E}{1-\nu^2} \right) \left\{ 0.001 (\gamma_{cr}/P_*^2) - \left[\frac{3}{64Gh} d^2 \right] \right\} - \frac{1}{\pi} d \right] \right]^{1/3} \quad (18)$$

Assim, a espessura de reparo adequada deve ser h_* (Eq. 18) em vez de h (Eq. 16).

Em Andrade et. al (2025), foi analisado o fechamento abrupto de válvulas em sistemas de tubulação que podem desencadear ondas de choque que reverberam por todo o sistema, resultando em picos de pressão substancialmente superiores aos em condições normais de operação, fenômeno referido na literatura como golpe de aríete. Este trabalho propôs um critério de espessura de reparo adequado que leva em conta o pico de pressão máxima que ocorre durante o golpe de aríete. No entanto, não levou em conta o efeito da dependência da taxa de liberação de energia crítica γ_{CR} .

A Figura 5 mostra a relação da pressão de ruptura e o tempo de falha, utilizando os dados obtido nos ensaios (Tabela 4.1). Os gráficos foram gerados utilizando duas conversões possíveis, logarítmica e exponencial, conforme Eq 19 e Eq 20 respectivamente.

$$P_f = -27.9 \ln(t) + 137.7; \quad R^2 = 0.9995 \quad (19)$$

$$P_f = 118.3 \exp(-0.027 t); \quad R^2 = 0.9997 \quad (20)$$

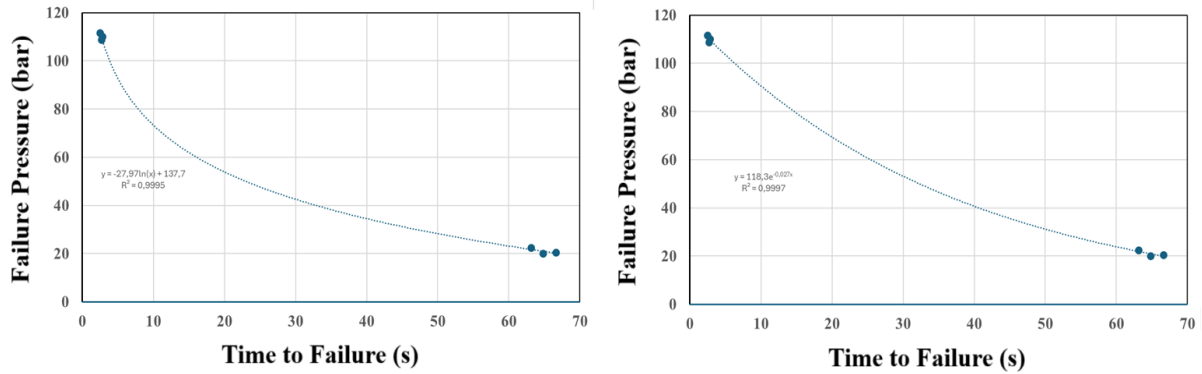


Figura 4.2 – Ajustes e experimentos de curvas, pressão versus tempo até a falha.

Embora ainda seja necessário obter mais pontos experimentais intermediários, a pressão de ruptura apresenta um comportamento clássico para materiais viscosos: ela aumenta com o aumento da taxa de carregamento até atingir algum "limite de saturação" além do qual a pressão de ruptura é pouco afetada por taxas de carregamento mais altas. Mais fácil do que supor equações empíricas complexas é usar um enorme fator de correção para a taxa de liberação de energia crítica γ_{CR} . Como a pressão de ruptura pode variar cerca de 5 vezes, é aconselhável usar um fator de segurança de 25 (consulte a Eq.05) para obter um limite inferior seguro.

$$\frac{P_f}{5} = \sqrt{\frac{0.001 (\gamma_{CR})_{cor}}{\left[\left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) \left\{ \frac{3}{512h^3} d^4 + \frac{1}{\pi} d \right\} + \left[\frac{3}{64Gh} d^2 \right] \right]} \quad (21)$$

sendo $(\gamma_{CR})_{cor} = \frac{\gamma_{CR}}{25} \quad (22)$

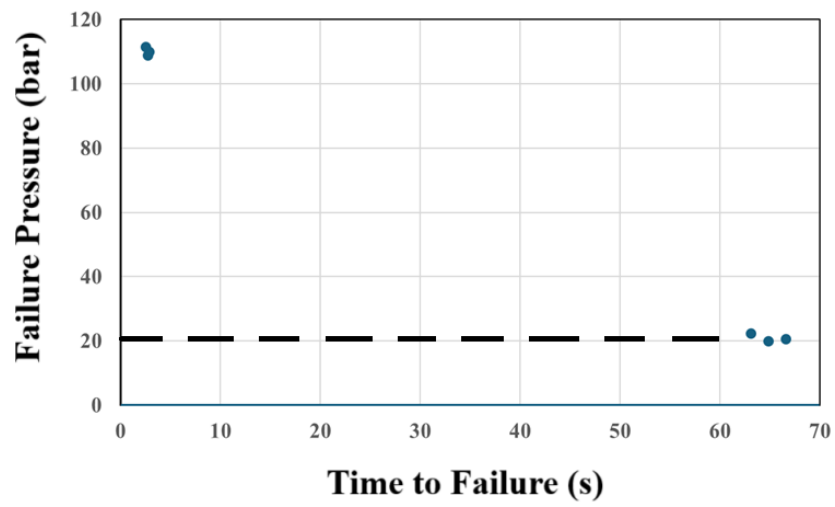


Figura 4.3 – Pressão de Falha versus Tempo até a Falha. limite inferior.

CONCLUSÕES

O presente estudo investiga a influência dos picos de alta pressão, resultantes do golpe de aríete, em *patches* colados utilizados para reparar danos por corrosão através da parede em tubulações transportadoras de líquidos. A principal motivação desta análise foi entender melhor como os choques hidráulicos causados pelo golpe de aríete podem afetar a resistência à ruptura do *patch*. A análise da dependência do comportamento de falha devido à dependência da taxa de elevação da pressão neste tipo de sistema de reparo ainda é um tópico pouco explorado. Este estudo aborda uma lacuna na literatura existente, uma vez que, até onde sabemos, nenhuma pesquisa anterior examinou esse tópico específico.

Propõe-se uma equação algébrica simples que permita obter a espessura de reparo adequada (ou, para uma determinada pressão, uma estimativa inferior da pressão de ruptura). Uma correção, baseada no aumento da pressão de Joukowsky na pressão de operação, pode ser introduzida na expressão clássica para o sistema de reparo encontrada nas normas ISO Especificação técnica 24871 e ASME PCC-2. Além disso, um fator de correção deve ser usado na taxa de liberação crítica para levar em conta a dependência da taxa.

Os resultados mostram um comportamento dependente da taxa (que é mais significativo na presença de deformação inelástica). Embora tanto o tubo quanto o *patch* não tenham sofrido deformação plástica significativa, a dependência da taxa pode ser explicada pelo comportamento viscoso da camada adesiva. Esses resultados preliminares explicam por que reparos aparentemente preparados e aplicados exatamente na mesma condição em campo e com a mesma pressão operacional podem ter diferentes comportamentos de falha na presença de transientes de pressão. Esta é provavelmente uma questão importante para explicar falhas inesperadas observadas em situações práticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, D.M., Areias, B.S., Martins Costa, M.L. Freitas Rachid, F.B., da Costa Mattos, H. 2025. “Failure of composite repair systems used in corroded pipelines due to pressure transients”. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 164, 108657. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109368>

ASME PCC-2: repair of pressure equipment and piping. The American Society of Mechanical Engineers, non-metallic and bonded repairs; 2022. <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/repair-of-pressure-equipment-and-piping>.

ASTM D1599-18(2024), Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings., West Conshohocken, PA, USA.

Carvalho, J.C.M., Martins, D., Simoni, R., and Simas, H., 2018. *Multibody Mechatronic Systems - Proceedings of the MUSME Conference held in Florianópolis, Brazil, October 24-28, 2017*. Mechanisms and Machine Science. Springer International Publishing.

Chaudhry, M.H., 2014. *Applied Hydraulic Transients* Springer: New York, NY, USA.

Choma, E.F. and Ugaya, C.M.L., 2017. “Environmental impact assessment of increasing electric vehicles in the brazilian fleet”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 152, pp. 497–507.

De Lucca, C. R, Sathler, J.F., Enne, F.F., Reis, J. M, da Costa Mattos, H.S., 2024. “Cyclic inelastic behaviour of a bonded patch repair system used for pipes with through-wall corrosion damage”. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 164, 108657

EPE, 2022, National Energy Balance 2022, Final Report (in Portuguese), Empresa de Pesquisa Energética EPE, Rio de Janeiro, e.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicação-675/topico-638/BEN2022.pdf. Accessed 02 May 2025.

Fernandes, G.H.N., Bazon, V.T., Barbosa, L.M.Q., França, P.H.P., da Silva, M.B., Uddin, M., Martins, P.S. and Machado, Á.R., 2023. “Performance comparison between internally cooled tools and flood cooling during grey cast iron turning”. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 85, pp. 817–831.

Ferras, D. Manso, P. A., Schleiss, A.J. and Covas, D.I.C., 2018. “One-dimensional fluid-structure interaction models in pressurized fluid-filled pipes: a review”. *Appl Sci*. Vol. 8, 1844. <https://doi.org/10.3390/app8101844>

ISO 24817:2017. Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Composite repairs for pipework — Qualification and design, installation, testing and inspection, 2017. <https://www.iso.org/standard/70958.html>.

Mendes, N., Moura, L.M. and Riquelme, S., 2024. “Device for measuring atmospheric longwave radiation and its measurement method (in Portuguese)”. Patent, INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial, Registry number: BR1020180737406, Application date: November 19, 2018, Grant date: September 10, 2024.

Mendonça, P.T.R. and Fancello, E.A., 2019. The method of finite elements applied to mechanics of solids (in Portuguese). Editora Orsa Maggiore, Florianópolis.

Miyawaki, B., Mariano, A., Vargas, J., Balmant, W., Defrancheschi, A., Corrêa, D., Santos, B., Selesu, N., Ordonez, J. and Kava, V., 2021. “Microalgae derived biomass and bioenergy production enhancement through biogas purification and wastewater treatment”. *Renewable Energy*, Vol. 163, pp. 1153–1165.

MLA, 2020. *MLA works cited: Electronic sources (web publications)*. Modern Language Association, Purdue Online Writing Laboratory, Purdue University, https://owl.purdue.edu/owl/research_and_citation/mla_style/mla_formatting_and_style_guide/mla_works_cited_electronic_sources.html. Accessed 12 January 2021.

Nostrani, M.P., Kruss, P., De Negri, V.J. and Dell’Amico, A., 2019. “An aircraft actuator driven by digital hydraulic pumps”. In *Proceedings of the XVIII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics - DINAME 2019*. ABCM - Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Armação de Búzios, RJ, Brazil.

Pitz, D.B., Marxen, O. and Chew, J.W., 2017a. “Direct numerical simulation of vacillation in convection induced by centrifugal buoyancy”. In *APS Division of Fluid Dynamics Meeting Abstracts*. pp. F33–006.

Pitz, D.B., Marxen, O. and Chew, J.W., 2017b. “Onset of convection induced by centrifugal buoyancy in a rotating cavity”. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 826, pp. 484–502.

Porto-Hernandez, L., Vargas, J., Munoz, M., Galeano-Cabral, J., Ordonez, J., Balmant, W. and Mariano, A., 2023. “Fundamental optimization of steam rankine cycle power plants”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 289, p. 117-148.

Santos, D.D., Furtado, G.M., Frey, S.L., Naccache, M.F. and de Souza Mendes, P.R., 2013. “Numerical investigation of elastic and viscous effects on inertial viscoplastic fluid flows”. In *Proceedings of the 22nd International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2013*. Ribeirão Preto, Brazil.

Santos, V.O., 2020. Experimental and numerical analysis of the fretting corrosion mechanism at the stem-head and stem-cement contact surfaces of hip prostheses (in Portuguese). Master’s thesis, Graduate Program in Mechanical Engineering, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

Sestito, G.S., Venter, G.S., Ribeiro, K.S.B., Rodrigues, A.R. and da Silva, M.M., 2022. “In-process chatter detection in micro-milling using acoustic emission via machine learning classifiers”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 120, No. 11, pp. 7293–7303.

Souza, F.C.R., 2022. Effect of Texturing on PCD Tools in the Turning of Aluminum 2011-T4 (in Portuguese). Ph.D. thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

Vargas, J.V.C., Ordonez, J.C., Gardolinski, J.E.F.C., Hovsopian, R. and Raimundo, R.C., 2021. “Real time hydrogen selfsupplied alkaline membrane fuel cell stack”. Patent, United States Patent and Trademark Office, Registry number: US20210194027A1, Application date: June 24, 2021.

Camargo, A. *Golpe de aríete em sistemas hidráulicos*. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 156 p.

Goldman, K. *Water hammer*. New York: McGraw-Hill, 1953. 278 p.

Eyring, H. 1936. Viscosity, plasticity, and diffusion as examples of absolute reaction rates. *Journal of Chemical Physics*, Vol. 4, pp. 283–291. <https://doi.org/10.1063/1.1749836>.

Argon, A.S. 1973. A theory for the low-temperature plastic deformation of glassy polymers. *Philosophical Magazine*, Vol. 28, pp. 839–865. <https://doi.org/10.1080/14786437308220987>

Goglio, L., Rossetto, M., Migliavacca, F. 2008. High strain-rate compression and tension behaviour of an epoxy bi-component adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 28, pp. 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2007.08.004>.

Park, S.J., Liechti, K.M. Rate-Dependent Large Strain Behavior of a Structural Adhesive. *Mech Time-Depend Mater* 7, 143–164 (2003). <https://doi.org/10.1023/A:1025616409697>.

Tijsseling, A.S., Anderson, A. 2007. Johannes von Kries and the History of Water Hammer, *Journal of Hydraulic Engineering*. Volume 133, Issue 1, 1 – 8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:1(1)).

Broens, F.; Menne, D.; Pothof, I.; Blankert, B.; Roesink, H.D.W.; Futselaar, H.; Lammertink, R. G. H.; Wessling, M. 2012. Water hammer reduces fouling during natural water ultrafiltration. *Water Research*, Vol. 46, No. 8, pp. 2669–2678. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.02.040>.

Lißner M, Alabort E, Cui H, et al., On the rate dependent behaviour of epoxy adhesive joints: experimental characterisation and modelling of mode I failure. *Composite Structures*, Volume 189, 1 April 2018, Pages 286-303 <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.019>.

Müller-Pabel, Michael; RODRÍGUEZ AGUDO, José Alberto; GUDE, Maik. Measuring and understanding cure-dependent viscoelastic properties of epoxy resin: a review. *Polymer Testing*, Volume 114, October 2022, p. 107701 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.011>.

Budhe, S., Banea, M.D. & de Barros, S. Bonded repair of composite structures in aerospace application: a review on environmental issues. *Appl Adhes Sci* 6, 3 (2018). <https://doi.org/10.1186/s40563-018-0104-5>.

Silvano, Thiago F.; Di Benedetto, Ricardo M.; Sonogo, Marilia; Souza, Angelo. DMA master curves for long-term life prediction of epoxy resins and composites using time–temperature superposition. *Materials Research*, São Carlos, v. 28, supl. 1, e20250246, 2025. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2025-0246>.

Dao, U.; Sajid, Z.; K, F.; et al. Modeling and analysis of internal corrosion induced failure of oil and gas pipelines. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 234, 109215, 2023. DOI: 10.1016/j.ress.2023.109215

Papavinasam, Sankara. Modeling – internal corrosion. In: Papavinasam, Sankara. *Corrosion control in the oil and gas industry*. Oxford: Elsevier, 2014. cap. 6. Pages 301-360 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397022-0.00006-6>