



Bernardo Santiago Areias

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE APLICAÇÃO
DO ADESIVO E DOS PICOS DE PRESSÃO DO GOLPE DE
ARÍETE NA RESISTÊNCIA DE REPAROS COMPOSTOS EM
TUBULAÇÕES METÁLICAS.**

NITERÓI, RJ

2025

BERNARDO SANTIAGO AREIAS

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE APLICAÇÃO
DO ADESIVO E DOS PICOS DE PRESSÃO DO GOLPE DE
ARÍETE NA RESISTÊNCIA DE REPAROS COMPOSTOS EM
TUBULAÇÕES METÁLICAS.**

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 / Vibrações

Orientador:

Prof. DSc Heraldo Silva da Costa Mattos

Niterói, RJ

2025.

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

A678a Areias, BERNARDO SANTIAGO
Avaliação da Influência do Tempo de Aplicação do
Adesivo e dos Picos de Pressão do Golpe de Arfete na
Resistência de Reparos Compostos em Tubulações Metálicas. /
BERNARDO SANTIAGO Areias. - 2025.
100 f. : il.

Orientador: HERALDO SILVA DA COSTA MATTOS.
Coorientador: DOUGLAS MONTEIRO ANDRADE.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Escola de Engenharia, Niterói, 2025.

1. Reparo de tubulações. 2. Adesivos. 3. Compósitos. 4.
Pressão de falha. 5. Produção intelectual. I. COSTA MATTOS,
HERALDO SILVA DA, orientador. II. ANDRADE, DOUGLAS MONTEIRO,
coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de
Engenharia. IV. Título.

CDD - IXX

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

BERNARDO SANTIAGO AREIAS

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE APLICAÇÃO
DO ADESIVO E DOS PICOS DE PRESSÃO DO GOLPE DE
ARÍETE NA RESISTÊNCIA DE REPAROS COMPOSTOS EM
TUBULAÇÕES METÁLICAS.**

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 / Vibrações

Linha de Pesquisa: Compósitos, Pressão de falha

Aprovado em 29 de abril de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. DSc Heraldo Silva da Costa Mattos – UFF
Orientador

Prof. DSc Douglas Monteiro Andrade– UERJ
Co-Orientador

Prof. D.Sc. Felipe Bastos de Freitas Rachid – UFF

Prof. D. Sc Rogério Saldanha da Gama - UERJ

Dedicatória.

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo amor incondicional, pelos valores que me transmitiram e por serem meu alicerce em todos os momentos da vida. Ao meu irmão, pela parceria, pelo incentivo e por sempre acreditar em mim, mesmo nos desafios mais difíceis. Esta conquista é, antes de tudo, reflexo do apoio e da força da nossa família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por Sua proteção constante e por me guardar de todo mal durante esta jornada.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pela educação que me deram e pelo apoio em todas as etapas da minha vida. Vocês sempre acreditaram no meu potencial, e sem a base sólida que me proporcionaram, esta conquista não seria possível.

Ao meu irmão, pela amizade e companheirismo. Sua confiança em mim sempre foi um estímulo nos momentos de incerteza.

À minha namorada, Grace, que chegou em minha vida no momento mais difícil desta jornada. Sua presença trouxe motivação e alegria em meio aos desafios.

Aos Professores Heraldo Silva da Costa Mattos, Douglas Monteiro Andrade, João Marciano Laredo dos Reis e Maria Laura Martins Costa, pela orientação e apoio acadêmico. Suas valiosas contribuições, conselhos e paciência foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos, pela paciência, pelas palavras de incentivo e pelos momentos de descontração que tornaram essa caminhada menos árdua.

Aos professores e colegas, por todas as contribuições, aprendizados e pela troca de conhecimento ao longo desta trajetória. Cada um de vocês desempenhou um papel fundamental na construção deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que eu chegasse até aqui. Este trabalho é resultado do esforço conjunto, da persistência e do apoio daqueles que acreditaram em mim. Meu mais sincero agradecimento a todos vocês.

“A súbita interrupção do fluxo em uma tubulação pode gerar ondas de pressão que reverberam pelo sistema, desafiando a integridade das estruturas hidráulicas.”

Bernardo S. Areias

RESUMO

Título: *Avaliação da Influência do Tempo de Aplicação do Adesivo e dos Picos de Pressão do Golpe de Ariete na Resistência de Reparos Compostos em Tubulações Metálicas.*

A aplicação de luvas compostas ou remendos aderidos é uma alternativa eficaz para o reparo de defeitos por corrosão localizada com perfuração total em tubulações. A adesão entre a superfície metálica e o compósito é garantida por uma camada adesiva, cuja aplicação deve evitar descontinuidades para assegurar a eficiência do reparo. A resistência desse tipo de reparo, avaliada pela pressão de falha, é influenciada por diversos fatores, como acabamento da superfície, espessura do compósito, tempo de cura e transientes hidráulicos

Este estudo investiga dois aspectos críticos para a segurança e confiabilidade desses reparos. O primeiro é a influência do Tempo Inicial para Aplicação do Adesivo (t_i), ou seja, o intervalo entre a mistura da resina epóxi e do agente de cura e a aplicação do adesivo. Foram conduzidos testes hidrostáticos de bolhas (*blister burst tests*) em quatro intervalos de tempo (0, 4, 8 e 12 minutos), totalizando 36 ensaios. Os resultados demonstraram que t_i afeta significativamente a pressão de falha. Um modelo analítico foi desenvolvido para prever a resistência à ruptura em função desse parâmetro, com boa concordância com os dados experimentais.

O segundo aspecto analisado é o impacto dos picos de pressão causados por transientes hidráulicos, especificamente o golpe de ariete. As normas ASME PCC-2 e ISO 24817, que estabelecem critérios para a espessura do reparo, consideram apenas a pressão operacional, o que pode ser não conservativo em certos cenários. O fechamento abrupto de válvulas pode gerar ondas de choque que resultam em pressões muito superiores às condições normais de operação, comprometendo a integridade do reparo. Para abordar essa questão, foi utilizada uma abordagem simplificada baseada em mecânica da fratura elástica linear, onde a espessura do reparo é obtida considerando o aumento de pressão de Joukowski somado à pressão operacional.

Os resultados desta pesquisa contribuem para o aprimoramento dos critérios de reparo em tubulações corroídas, considerando tanto a influência do tempo de aplicação do adesivo quanto os efeitos de transientes hidráulicos. Dessa forma, são propostas adaptações que podem ser incorporadas às normas ASME PCC-2 e ISO 24817, melhorando a segurança e a confiabilidade dos sistemas de reparo com compósitos.

Palavras-chave: Reparo de tubulações, adesivos, compósitos, pressão de falha, golpe de ariete.

ABSTRACT

Title: *Evaluation of the Influence of Adhesive Application Time and Water Hammer Pressure Peaks on the Resistance of Composite Repairs in Metallic Pipelines.*

The application of composite sleeves or bonded patches is an effective alternative for repairing through-wall localized corrosion defects in pipelines. Adhesion between the metallic surface and the composite is ensured by an adhesive layer, which must be applied without discontinuities to guarantee the repair's effectiveness. The strength of such repairs, evaluated through failure pressure, is influenced by several factors, such as surface finish, composite thickness, curing time, and peak pressures.

This study investigates two critical aspects of the safety and reliability of these repairs. The first is the influence of the Initial Time for Adhesive Application (t_i), which refers to the interval between mixing the epoxy resin with the curing agent and applying the adhesive. Hydrostatic blister burst tests were conducted at four different time intervals (0, 4, 8, and 12 minutes), totaling 36 tests. The results show that t_i significantly affects failure pressure. An analytical model was developed to predict rupture strength as a function of this parameter, showing good agreement with experimental data.

The second aspect analyzed is the impact of peak pressures caused by hydraulic transients, specifically water hammer. The ASME PCC-2 and ISO 24817 standards, which define repair thickness criteria, consider only operational pressure, which may not be conservative in certain hydraulic scenarios. The abrupt closure of valves can generate shock waves, leading to pressures significantly higher than normal operating conditions and compromising repair integrity. To address this issue, a simplified approach based on linear elastic fracture mechanics was used, where the repair thickness is obtained by considering the Joukowsky pressure increase added to the operating pressure.

The findings of this study contribute to improving repair criteria for corroded pipelines by considering both the influence of the adhesive application time and the effects of hydraulic transients. Thus, adaptations are proposed that can be incorporated into the ASME PCC-2 and ISO 24817 standards, enhancing the safety and reliability of composite repair systems.

Keywords: Pipeline repair, adhesives, composites, failure pressure, water hammer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Proteção com reforço estrutural no duto, CONTINENTALMAQUINAS (2020).	20
Figura 1.2 – Tubulações danificadas pelos transientes do Golpe de Aríete, CHAUDHRY (1987).	21
Figura 2.1 – Modos de carregamento aplicados para uma trinca, Adaptado de Anderson (2005).	30
Figura 2.2 – Representação de um Material Compósito, HECK (2020).	35
Figura 2.3 – Fase Matriz e Reforço, SANTO (2016).	35
Figura 2.4 – Tipos de Matriz, BRUNELLI (2017).	36
Figura 2.5 – Etapas do processo de cura: (a) Indução, (b) Gelificação, (c) e (d) Vitrificação, Hadad (1988).	37
Figura 2.6 – Fórmula estrutural representativa do epóxi, SANTOS (2009).	38
Figura 2.7 – Fórmula estrutural do éter diglicidílico de bisfenol A, SANTOS (2009).	38
Figura 2.8 – Fórmula estrutural do anidrido hexahidroftálico (HHPA), SANTOS (2009).	38
Figura 2.9 – Viscosidade do adesivo epóxi de acordo com a conversão da resina, BROCKMANN (2009).	39
Figura 2.10 - Fibra de Vidro, da Silva (2021).	40
Figura 2.11 - Fibra de Carbono, BRUNELLI (2017).	41
Figura 2.12 – Blister Test.	57
Figura 2.13 - Fenômeno do golpe de aríete, Modo Pump Co. (2022).	60
Figura 3.1 – Substrato, SATHLER (2021).	66
Figura 3.2 - Fabricação da placa de compósito laminado, SATHLER (2021).	67
Figura 3.3 - Adesivo, Endurecedor e a Mistura, SATHLER (2021).	69
Figura 3.4 - Blister Test, SATHLER (2021).	70
Figura 3.5 - Tipos de Fratura em Juntas Coladas, Adaptado de BARCIA (2003).	70
Figura 3.6 - Placa de Compósito Laminado Após Teste, SATHLER (2021).	71
Figura 3.7 - Representação Esquemática do Descolamento entre o Laminado e o Substrato, Sathler et al. (2021).	71
Figura 3.8 - Sistema de Teste Hidrostático, 2021.	72
Figura 3.9 - Blister Test Pressurizado, 2021.	72

Figura 3.10 - Falha Típica (Descolamento), SATHLER(2021)	72
Figura 4.1 – Pressões de falha alcançadas.....	76
Figura 4.2 – Média e desvio padrão para cada intervalo de tempo.....	77
Figura 4.3 – Histórico de resposta da pressão normalizada no tubo APIL Gr B-Schedule 40.	78
Figura 4.4 – Histórico de resposta da pressão normalizada no tubo APIL Gr B-Schedule 80.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Aplicações dos materiais compósitos na indústria, Resende (2000)	34
Tabela 2.2. Temperaturas de transição vítrea dos Polímeros, BRUNELLI (2017)..	39
Tabela 2.3. Composição das fibras de vidro (%), Adaptado de BRUNELLI (2017).	40
Tabela 2.4. Classes de reparo.....	45
Tabela 2.5. Valores para o fator de redução por serviço.....	51
Tabela 2.6. Valor t de Student para significância bilateral de 0,025.	52
Tabela 2.7. Fator de serviço para laminado do reparo.	55
Tabela 3.1. Geometria do Substrato Metálico	65
Tabela 3.2. Parâmetros de rugosidade de superfície do substrato	66
Tabela 3.3. Proporções de Peso (gramas/gramas).....	67
Tabela 3.4. Propriedades do Adesivo Rengel SW 404 / Ren HY 404, HUNTSMAN, 2010.....	68
Tabela 3.5. Propriedades da Mistura, HUNTSMAN, 2010.....	69

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$A(d_i)$	função do tamanho do defeito e das propriedades do laminado de reparo
E_a	módulo de elasticidade axial do laminado de reparo, em MPa
E_{ac}	módulo de tração combinado $\sqrt{E_a \cdot E_c}$, expresso em MPa
E_c	módulo de elasticidade circunferencial do reparo, em MPa
E_s	módulo de elasticidade do substrato, em MPa
F_{ax}	carga axial aplicada, expressa em N
F_{eq}	carga axial equivalente, em N
F_{sh}	carga de cisalhamento aplicada, expressa em N
M_{ax}	momento axial aplicado, expresso em N-mm
M_{to}	momento torcional aplicado, expresso em N-mm
P_f	pressão de falha no teste de ruptura (MPa)
d_i	diâmetro do defeito, expresso em mm
f_{T2}	fator de redução por temperatura
f_{leak}	fator de redução por serviço
p_{eq}	pressão interna equivalente, em MPa
p_{live}	pressão interna durante a instalação do reparo, expressa em MPa
p_s	pressão máxima de trabalho permitida (MAWP), em MPa
t_i	espessura do laminado do reparo, expresso em mm
t_{min}	espessura mínima do laminado de reparo
t_s	espessura mínima remanescente da parede do substrato, em mm
t_v	valor t de Student
γ_{CR}	taxa crítica de liberação de energia (J/m^2)
γ_I	taxa crítica de liberação de energia no modo I (J/m^2)

γ_{II}	taxa crítica de liberação de energia no modo II (J/m ²)
γ_{LCL}	limite inferior de confiança de 95% da taxa de liberação de energia, expresso em J/m ²
ε_a	deformação axial admissível do laminado de reparo
ε_c	deformação circunferencial admissível do laminado de reparo
°C	Escala celsius
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
Bar	Bar
C	Carbono
CMC	Compósito de matriz cerâmica
CP	Corpo de prova
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>
GPa	Gigapascal
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LED	Laboratório de Ensaio em Dutos
MMC	Compósito de matriz metálica
MPa	Megapascal
p	Estatística de teste
p	Pressão de projeto na tubulação
PMC	Compósito de matriz polimérica
PSI	Libra-força por polegada quadrada
r	raio interno da tubulação
t	Espessura da tubulação

UV	Ultravioleta
α	Nível de significância
D	diâmetro externo original do componente, em mm
E	módulo de elasticidade do remendo metálico (MPa)
G	módulo de cisalhamento do remendo metálico (MPa)
G	módulo de cisalhamento do laminado de reparo, expresso em MPa
d	diâmetro do defeito (mm)
d	diâmetro do defeito, expresso em mm
p	pressão interna de projeto, expressa em MPa
$p:$	pressão interna de projeto requerida, expressa em MPa
s	tensão admissível do material do substrato, em MPa
t	espessura do remendo metálico (mm)
ν	coeficiente de Poisson do remendo metálico
ν	razão de Poisson do laminado de reparo

SUMÁRIO

Agradecimentos	1
Resumo	5
Abstract.....	7
Lista de ilustrações.....	9
Lista de tabelas.....	11
Lista de símbolos e abreviaturas	13
Sumário.....	17
1 Introdução	19
1.1 Objetivos	23
1.2 Organização do texto	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1 Sistemas de Tubulação em Ambientes Industriais e Navais.....	26
2.2 Processos Corrosivos em Tubulações de Aço.....	28
2.3 Mecânica da Fratura	30
2.4 Reparo em tubulações.....	31
2.5 Materiais compósitos	33
2.5.1 Definição.....	34
2.5.2 Estrutura dos compósitos.....	35
2.5.3 Tipos de Compósitos	36
2.5.4 Resinas Epóxi.....	37
2.5.5 Tipos de Reforço Estrutural.....	40
2.6 Estimativa da espessura do remendo de compósito.....	41
2.6.1 Norma ISO 24817:2015.....	42
2.6.2 Norma ASME PCC-2:2018	52
2.6.3 Fundamentos do Critério de Energia Crítica	56
2.7 O fenômeno do golpe de aríete.....	60

2.8	Modelagem matemática do golpe de aríete.....	63
3	Metodologia.....	65
3.1	Reparo	65
3.2	Blister test.....	69
3.2.1	Mecanismos de Falha em Juntas Unidas por Colagem	70
3.2.2	Realização dos ensaios	71
3.3	Equações de governo normalizadas.....	73
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
4.1	Pressões alcançadas	75
4.1.1	Um novo critério para a espessura do remendo compósito	77
4.1.2	Influência dos transientes de pressão na pressão de falha	78
4.2	Análise estatística dos resultados	79
4.2.1	Influência do tempo de aplicação do adesivo na pressão de falha	80
4.2.2	Efeitos do Golpe de Aríete.....	81
4.2.3	Considerações finais	82
5	Conclusões	83
5.1	Sugestões para trabalhos	84
	Referências bibliográficas	86

1 INTRODUÇÃO

As tubulações desempenham um papel fundamental na infraestrutura industrial e naval, sendo responsáveis pelo transporte de fluidos essenciais para diversas operações. No setor industrial, esses sistemas são amplamente utilizados para a condução de líquidos e gases em processos químicos, petroquímicos, de refino e em outras atividades produtivas que demandam controle rigoroso de fluxo e pressão. No ambiente naval, as tubulações são indispensáveis para o funcionamento de embarcações, permitindo a distribuição de combustíveis, água, lubrificantes e outros fluidos necessários para a operação segura e eficiente de navios cargueiros, militares e submarinos. Além disso, possuem aplicações estratégicas, como o abastecimento de helicópteros em navios-aeródromos e o reabastecimento de embarcações em alto-mar, operações que exigem alto nível de precisão e segurança.

A relevância das tubulações vai além da sua função básica de transporte de fluidos, pois sua construção e manutenção impactam diretamente na eficiência operacional, nos custos de instalação e nos aspectos de segurança. Em indústrias de grande porte e embarcações complexas, falhas nesses sistemas podem resultar em perdas operacionais significativas, riscos ambientais e ameaças à segurança humana. Dentre os desafios enfrentados, a corrosão destaca-se como um dos principais problemas em tubulações metálicas expostas a atmosferas agressivas, como é o caso das embarcações e plataformas offshore. A exposição contínua à umidade, à água salgada e às variações térmicas acelera o processo corrosivo, comprometendo a integridade estrutural e a segurança operacional desses sistemas. Em navios de guerra, onde a confiabilidade dos sistemas é essencial para missões estratégicas, a corrosão pode levar a falhas críticas em tubulações, tanques e estruturas do casco, reduzindo a vida útil do equipamento e aumentando significativamente os custos de manutenção.

Para mitigar esses efeitos, diversas estratégias são empregadas, como revestimentos anticorrosivos, proteção catódica e sistemas de monitoramento e inspeções periódicas. No entanto, quando ocorre a deterioração severa das tubulações e estruturas, soluções de reparo são necessárias para restaurar sua funcionalidade e prolongar sua vida útil. A adesão de materiais compósitos em sistemas de tubulação tem sido amplamente estudada devido à sua importância na manutenção e reparação de infraestruturas industriais e navais, conforme demonstrado na Figura 1.1. Um dos aspectos críticos dessa aplicação é a influência do tempo de aplicação após a mistura da resina com o agente de cura na camada adesiva, que pode afetar significativamente as propriedades mecânicas e adesivas do material (SERGIENKO *et al.*, 2018). A variação do

tempo entre a mistura e a aplicação pode comprometer a adesão final, reduzindo a resistência mecânica e afetando a longevidade do reparo.



Figura 1.1 – Proteção com reforço estrutural no duto, CONTINENTALMAQUINAS (2020).

Ademais, a determinação experimental da energia crítica de fratura é um fator essencial para avaliar a adesão, sendo os testes de bolha (“Blister burst tests”) amplamente empregados para essa finalidade (DE BARROS *et al.*, 2019). Esses testes fornecem informações quantitativas sobre a tenacidade de fratura, permitindo uma melhor compreensão da resistência do material sob diferentes condições operacionais. A tenacidade é influenciada pela composição da resina, condições de aplicação e tempo de cura (BUDHE *et al.*, 2020.).

Outro aspecto relevante é a determinação da pressão de falha após a aplicação do adesivo, parâmetro fundamental para a segurança e confiabilidade do reparo. A pressão de falha representa o limite mecânico em que o adesivo não consegue mais sustentar a estrutura, levando à falha do sistema (WANG *et al.*, 2022). Testes de pressurização são amplamente empregados para verificar a integridade das juntas adesivas e prever possíveis falhas catastróficas. A adição de reforços colados, como remendos metálicos ou em compósitos, aumenta significativamente a pressão máxima que o reparo pode suportar. Normas como a *American Standard Code for Pressure Piping* (ASME PCC-2) e a *International Organization for Standardization* (ISO 24817) estabelecem diretrizes para a correta aplicação dessas metodologias e incluem expressões analíticas que permitem estimar a espessura mínima necessária para evitar falhas estruturais.

No entanto, essas diretrizes baseiam-se na pressão operacional dos sistemas de tubulação, o que pode não ser uma abordagem conservadora em cenários hidráulicos sujeitos a transientes de pressão. Durante operações normais, variações súbitas no escoamento podem gerar sobrepressões que ultrapassam significativamente a pressão operacional, comprometendo a integridade dos componentes da tubulação. Assim, a análise do comportamento transitório

dos sistemas hidráulicos torna-se essencial para a concepção de reparos mais robustos e confiáveis.

Um fenômeno crítico a ser considerado na operação de sistemas de tubulação é o golpe de aríete, que ocorre devido a variações abruptas de pressão quando há uma mudança súbita na velocidade do fluido, geralmente causada pelo fechamento rápido de válvulas ou variações bruscas na vazão. Esse fenômeno pode comprometer a integridade da adesão em sistemas reparados, reduzindo significativamente a vida útil do reparo. Estudos indicam que as forças dinâmicas induzidas pelo golpe de aríete podem gerar sobrepressões muito superiores à pressão operacional do sistema, amplificando os esforços mecânicos sobre os reparos adesivos e elevando o risco de falhas estruturais nos tubos, colapsos de juntas, fadiga prematura dos materiais e até mesmo o rompimento de seções inteiras da tubulação, conforme demonstrado na Figura 1.2. Dessa forma, a análise do comportamento transitório dos sistemas hidráulicos torna-se essencial para a concepção de reparos mais robustos e confiáveis.

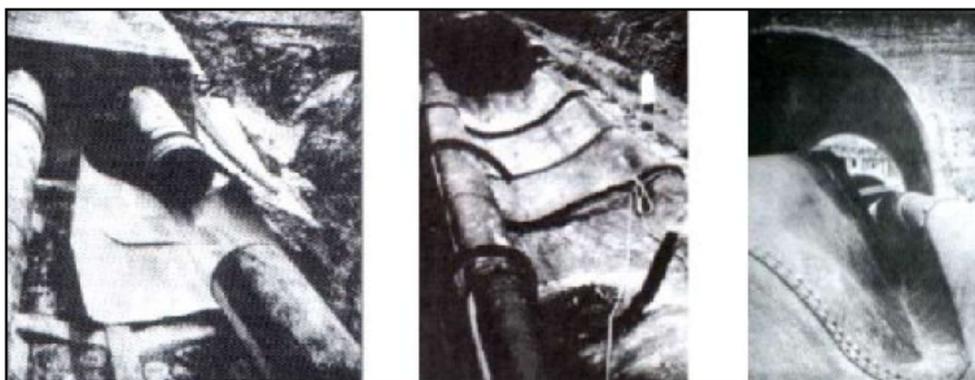


Figura 1.2 – Tubulações danificadas pelos transientes do Golpe de Aríete, CHAUDHRY (1987).

Em sistemas reparados com luvas compósitas ou remendos colados, as oscilações de pressão provocadas pelo golpe de aríete podem comprometer a integridade da adesão, reduzindo significativamente a vida útil do reparo. Pesquisas indicam que as forças dinâmicas induzidas pelo golpe de aríete podem reduzir a vida útil dos reparos e causar descolamento prematuro da camada adesiva (DE FREITAS RACHID *et al.*, 1994). Além disso, o transiente gerado pela sobreposição de ondas oriundas do golpe de aríete pode intensificar os efeitos dessas variações abruptas de pressão, amplificando os esforços mecânicos sobre os reparos adesivos e elevando o risco de falhas estruturais. Dessa forma, é essencial avaliar a influência desses picos de pressão para garantir a eficiência e segurança das soluções adesivas aplicadas.

O aumento de pressão gerado pelo golpe de aríete pode ser descrito por meio da relação proposta por Joukowski, que estabelece que a variação da pressão é proporcional à densidade

do fluido, à velocidade de propagação da onda de pressão e à variação da velocidade do escoamento. Essa relação evidencia que, quanto maior a densidade do fluido e a velocidade da onda de pressão, maior será o impacto do golpe de aríete sobre a tubulação. A compreensão desse comportamento é essencial para projetar sistemas de tubulação mais resistentes e para avaliar corretamente a espessura dos reparos adesivos aplicados em tubulações sujeitas a esse fenômeno.

Por fim, para facilitar a aplicação prática dos reparos, atualmente, normas como a ASME PCC-2 e ISO 24817 fornecem diretrizes para a definição da espessura necessária, mas estudos recentes sugerem que tais métodos podem subestimar a influência de transientes de pressão (ANTAKI, 2003.). O desenvolvimento de uma abordagem simplificada pode otimizar o processo de projeto e execução de reparos adesivos, garantindo maior previsibilidade e segurança nas aplicações industriais e navais.

A aplicabilidade desses reparos no ambiente naval e em navios é de extrema relevância, uma vez que sistemas de tubulação a bordo estão sujeitos a condições severas, como vibrações constantes, variações térmicas e pressões dinâmicas impostas pelo movimento da embarcação e pelo próprio sistema hidráulico. A necessidade de reparos eficientes e duráveis é crucial para evitar falhas que possam comprometer a segurança da tripulação e a operação da embarcação. Métodos adesivos em compósitos oferecem uma alternativa viável para a manutenção de sistemas de tubulação em navios, reduzindo o tempo de inatividade e minimizando os custos operacionais. Além disso, a resistência desses reparos a ambientes marítimos agressivos, como exposição contínua à água salgada e à corrosão, reforça sua importância no setor naval.

Um aspecto crítico na operação de sistemas de tubulação em embarcações é a possibilidade de indisponibilidade operacional do navio devido a acidentes causados pelo fechamento abrupto de válvulas. Esse evento pode gerar golpes de aríete severos, resultando em falhas estruturais nas tubulações e comprometendo a integridade do sistema hidráulico. A impossibilidade de operação de uma embarcação devido a esse tipo de falha pode gerar prejuízos financeiros significativos e colocar em risco a segurança da tripulação. Dessa forma, a aplicação de reparos adesivos eficientes é essencial para mitigar esses riscos e garantir a continuidade das operações marítimas.

Diante dessa complexidade, o presente estudo visa abordar essas questões fundamentais para aprimorar o entendimento sobre a adesão de compósitos e a influência de fenômenos hidrodinâmicos nos reparos de tubulações. Os resultados esperados contribuirão

para a melhoria dos procedimentos de reparação, aumentando a segurança e eficiência dos sistemas de tubulação na indústria e no setor naval.

1.1 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo principal investigar a segurança e a confiabilidade de reparos em tubulações corroídas por meio da aplicação de luvas compostas ou remendos aderidos, considerando dois fatores críticos que influenciam a integridade estrutural do reparo:

- Influência do Tempo Inicial para Aplicação do Adesivo (t_i):

O primeiro objetivo é avaliar o impacto do intervalo de tempo entre a mistura da resina epóxi e do agente de cura e a aplicação do adesivo na resistência do reparo, por meio de testes hidrostáticos de bolhas (blister burst tests) em quatro diferentes intervalos de tempo (0, 4, 8 e 12 minutos), totalizando 36 ensaios experimentais. Além disso, desenvolver um modelo analítico capaz de prever a resistência à ruptura em função do tempo de aplicação do adesivo, com boa concordância com os dados experimentais.

- Impacto dos Picos de Pressão Decorrentes de Transientes Hidráulicos:

O segundo objetivo é avaliar o impacto dos picos de pressão gerados por transientes hidráulicos, em especial o golpe de aríete, na integridade do reparo. Para isso, propõe-se uma abordagem baseada na Mecânica da Fratura Elástica Linear, na qual a espessura adequada do reparo é estimada considerando o aumento de pressão de Joukowski.

Os resultados obtidos podem contribuir para a melhoria dos critérios de projeto e aplicação de reparos, com sugestões para adaptações nas normas ASME PCC-2 e ISO 24817, tornando os procedimentos mais seguros e confiáveis.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esta dissertação foi estruturada de maneira sistemática para abordar a otimização da eficácia de reparos compostos em tubulações metálicas, com foco na influência do tempo de aplicação do adesivo e dos transientes hidráulicos na pressão de falha e na tenacidade da adesão. A organização abrange seções preliminares, capítulos principais e apêndices, seguindo uma progressão lógica que vai desde a introdução do problema até as conclusões e perspectivas

futuras. A seguir, detalha-se a disposição e o conteúdo de cada parte, destacando os objetivos e as contribuições específicas de cada seção para o desenvolvimento da pesquisa.

- Seções Preliminares: A dissertação inicia com seções introdutórias essenciais para contextualizar o leitor. Os Agradecimentos reconhecem o apoio recebido de orientadores, colegas e instituições durante a realização do estudo. O Resumo e o Abstract fornecem uma síntese concisa dos objetivos, metodologia, resultados e conclusões, em português e inglês, respectivamente, atendendo aos padrões acadêmicos internacionais. A Lista de Ilustrações e a Lista de Tabelas organizam figuras e tabelas presentes no texto. A Lista de Símbolos e Abreviaturas define termos técnicos como γ_{cr} (taxa crítica de energia liberada) e ASME PCC-2, facilitando a compreensão. O Sumário apresenta a estrutura completa, guiando o leitor pela disposição dos capítulos.
- Capítulo 1: Este capítulo estabelece a fundamentação da pesquisa, destacando a importância das tubulações metálicas em ambientes industriais e navais, onde a corrosão compromete a segurança e eleva custos (SERGIENKO *et al.*, 2018). A seção 1.1 define como objetivo a análise do impacto do tempo de aplicação de reparos por compósitos em tubulações e os picos de pressão do golpe de aríete na pressão de falha e na energia crítica de fratura (γ_{cr}) (DE BARROS *et al.*, 2019). A seção 1.2 descreve a estrutura da dissertação, detalhando a sequência dos capítulos subsequentes e sua interconexão, oferecendo uma visão geral do fluxo narrativo.
- Capítulo 2: O segundo capítulo compila o estado da arte, detalhando a relevância das tubulações em setores petroquímico e naval, os processos corrosivos em aço API 5L Gr B em ambientes agressivos, e os conceitos de mecânica da fratura. Analisa técnicas de reparo com compósitos, suas propriedades, estruturas, resinas epóxi e reforços estruturais, além de métodos de dimensionamento baseados nas normas ISO 24817:2015 e ASME PCC-2:2018, e o critério de energia crítica (BUDHE *et al.*, 2020; GREEN & SMITH, 2024). Explora, também, o golpe de aríete e sua modelagem matemática. Essa revisão teórica fundamenta a metodologia experimental e analítica do estudo.
- Capítulo 3: O terceiro capítulo descreve a metodologia, detalhando a aplicação de compósitos em tubos de aço com danos simulados (seção 3.1) e os testes de bolha para avaliar a pressão de falha e a energia crítica de fratura (γ_{cr}) por meio de mecanismos de falha e ensaios experimentais (seção 3.2). A seção 3.3 apresenta equações de governo normalizadas, incluindo a estimativa da pressão de falha e equações adimensionais do

golpe de aríete, utilizando a equação de Joukowsky para quantificar picos de pressão proporcionais à densidade do fluido, velocidade da onda e variação de velocidade.

- Capítulo 4: O quarto capítulo analisa resultados de dois estudos convergentes, destacando a taxa crítica de energia liberada (γ_{cr}) como parâmetro-chave para reparos compósitos em tubulações. O Estudo 1 demonstra que o tempo de aplicação de 12 minutos maximiza a pressão de falha, enquanto o Estudo 2 revela que transientes hidráulicos do golpe de aríete geram cargas variáveis (1,33 a 1,35 MPa), a depender da espessura do tubo. A análise estatística da influência do tempo de aplicação (seção 4.2) e novo critério de espessura baseado em Joukowsky (seção 4.1.1) explicam falhas em campo, sugerindo adaptações às normas ASME PCC-2 e ISO 24817, aprimorando a segurança e confiabilidade de reparos.
- Conclusões: O quinto capítulo sumariza as conclusões, destacando o desempenho otimizado aos 12 minutos e os efeitos dos transientes, com uma equação ajustada para espessura do reparo. A seção 5.1 propõe investigar atrito viscoso e interação fluido-estrutura; e
- Referências Bibliográficas: Lista todas as fontes citadas, conforme a Norma NBR 6023.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS DE TUBULAÇÃO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS E NAVAIS

As tubulações industriais compreendem um conjunto de componentes projetados para viabilizar a movimentação e distribuição de fluidos, sejam líquidos ou gasosos. Esses sistemas desempenham um papel essencial na operacionalização de processos produtivos e são compostos por tubos, conexões, válvulas e outros dispositivos auxiliares, cuja seleção e configuração são determinadas pelas necessidades específicas de cada aplicação.

Os materiais empregados na fabricação dessas tubulações são, em sua maioria, metálicos, com destaque para ligas ferrosas, devido à sua resistência mecânica e capacidade de suportar diferentes condições operacionais. Esses sistemas são amplamente utilizados em setores como a indústria química, petroquímica e de refino de petróleo, onde conduzem substâncias sob variadas temperaturas e pressões. Além disso, tubulações complexas são indispensáveis no setor naval, especialmente em navios cargueiros e embarcações militares.

No ambiente marítimo, as tubulações desempenham um papel essencial na distribuição de fluidos necessários para o funcionamento das embarcações. Em navios cargueiros, por exemplo, esses sistemas são responsáveis pelo transporte de combustíveis, óleos lubrificantes, água de resfriamento e cargas líquidas, assegurando a eficiência e segurança das operações. Em embarcações militares, além dessas funções básicas, as tubulações viabilizam o transporte de fluidos estratégicos, como combustíveis de alto desempenho para turbinas e líquidos empregados na refrigeração de equipamentos eletrônicos sensíveis. Submarinos e navios de grande porte, por sua vez, exigem tubulações pressurizadas para sistemas de propulsão nuclear e controle de lastro, o que demanda normas rigorosas de segurança e resistência às condições extremas de pressão e temperatura.

Nos navios mercantes, as tubulações são projetadas para suportar a movimentação constante de grandes volumes de líquidos, sejam combustíveis, produtos químicos ou cargas especiais. Esses sistemas são fundamentais para garantir a eficiência operacional das embarcações, proporcionando o transporte seguro e adequado dos fluidos essenciais ao funcionamento do navio. Além disso, tubulações especializadas são utilizadas em sistemas de combate a incêndio, controle de lastro e distribuição de água potável para a tripulação, sendo projetadas para atender a padrões rigorosos de segurança e durabilidade.

Já nos navios de guerra, as tubulações possuem um papel ainda mais estratégico, abrangendo não apenas os sistemas essenciais de propulsão e refrigeração, mas também aqueles dedicados à movimentação de fluidos para armamentos e sistemas defensivos. Esses navios contam com tubulações especializadas para abastecimento de torpedos, mísseis e sistemas de arrefecimento de sensores eletrônicos avançados. Além disso, os sistemas de tubulação em embarcações militares são projetados para resistir a impactos e condições adversas, garantindo a continuidade das operações mesmo em situações de combate.

Outro aspecto relevante das tubulações navais é sua função no abastecimento de aeronaves embarcadas, como helicópteros operacionais utilizados em missões militares, transporte de pessoal e operações de resgate. Sistemas especializados garantem o reabastecimento eficiente e seguro dessas aeronaves, o que é crucial para a continuidade das operações aéreas, especialmente quando o acesso a bases terrestres é limitado. Navios-aeródromos e embarcações de apoio logístico, por exemplo, são equipados com tubulações específicas para armazenar e transferir combustível de aviação de maneira rápida e segura, mesmo sob condições adversas.

Além disso, as tubulações desempenham um papel essencial no transporte de combustíveis entre embarcações em alto-mar, procedimento conhecido como reabastecimento em navegação (*underway replenishment* – UNREP). Esse processo permite que frotas militares e comerciais mantenham sua autonomia operacional em missões de longa duração, sem a necessidade de retornar a portos para reabastecimento. A operação envolve o uso de tubulações flexíveis e altamente resistentes, projetadas para suportar as exigências mecânicas e as vibrações provocadas pelo movimento das embarcações.

Em relação ao processo de fabricação, os tubos utilizados em sistemas industriais e navais podem ser classificados em duas categorias principais: tubos com costura e tubos sem costura. Os primeiros são produzidos por meio da conformação e soldagem de chapas metálicas, apresentando um custo reduzido e ampla aplicabilidade. Já os tubos sem costura, fabricados por processos como extrusão ou laminação a quente, oferecem maior resistência mecânica e confiabilidade estrutural, sendo fundamentais em aplicações sujeitas a pressões e temperaturas extremas.

Em indústrias de processamento contínuo, como refinarias e plantas petroquímicas, as tubulações representam uma parcela significativa dos custos de instalação, podendo corresponder a cerca de 20% a 25% do investimento total. Além disso, a montagem dessas

estruturas pode atingir de 45% a 50% do custo total de instalação de equipamentos, evidenciando sua importância tanto do ponto de vista técnico quanto econômico (TELLES, 1999). No setor naval, custos similares são observados, especialmente em embarcações militares e navios-tanque de apoio logístico, onde as exigências de confiabilidade e resistência impactam diretamente os custos de fabricação e manutenção.

Para garantir a segurança e eficiência desses sistemas, a concepção e implementação das tubulações industriais e navais devem seguir normas rigorosas. Um dos principais referenciais normativos é o código ASME B31, que estabelece diretrizes para o projeto e a construção de tubulações operando sob pressão interna. Esse código define requisitos para a seleção de materiais, dimensionamento estrutural e procedimentos de montagem. No setor naval, regulamentações adicionais são estabelecidas por órgãos como a *International Maritime Organization* (IMO) e normas específicas da engenharia naval, assegurando que as tubulações sejam projetadas para resistir às condições adversas do ambiente marítimo e às exigências operacionais de cada tipo de embarcação.

2.2 PROCESSOS CORROSIVOS EM TUBULAÇÕES DE AÇO

A corrosão em tubulações é um dos principais desafios enfrentados por indústrias de diversos segmentos, incluindo os setores de petróleo e gás, químico, naval e offshore. Esse fenômeno afeta diretamente a segurança operacional, a vida útil dos equipamentos e os custos de manutenção. De acordo com estudo da *NACE International* (KOCH, 2016), os impactos financeiros globais da corrosão foram estimados em US\$ 2,5 trilhões, correspondendo a cerca de 3,4% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial. Diante desse cenário, a compreensão dos mecanismos de corrosão e das técnicas de controle é essencial para garantir a integridade estrutural dos sistemas de tubulação.

A corrosão é um processo espontâneo de degradação dos metais devido a reações químicas ou eletroquímicas com o meio circundante (GENTIL, 2011). Ela pode ser classificada em diferentes tipos, sendo os mais relevantes para tubulações:

- Corrosão uniforme: afeta toda a superfície do metal de maneira homogênea.
- Corrosão localizada: ocorre de forma concentrada em pontos específicos, como na forma de pites ou frestas.
- Corrosão intergranular: ataca os contornos dos grãos da estrutura cristalina do metal.

- Corrosão por tensão: associada à presença de esforços mecânicos e ambientes corrosivos.
- Corrosão por hidrogênio: ocorre quando átomos de hidrogênio penetram no metal, fragilizando sua estrutura.

Os sistemas de tubulação estão sujeitos a condições severas de operação, incluindo altas temperaturas, pressões elevadas e presença de fluidos agressivos. No setor de petróleo e gás, por exemplo, a corrosão é intensificada pela presença de água salgada, gás sulfídrico (H₂S) e dióxido de carbono (CO₂), fatores que favorecem a formação de corrosão sulfídica e ácida.

Na indústria naval, tubulações de embarcações mercantes e de guerra estão expostas à ação corrosiva da água do mar, combinada com variações térmicas e estresses mecânicos. Navios de guerra, por exemplo, utilizam sistemas de tubulação para propulsão, refrigeração de equipamentos eletrônicos e abastecimento de aeronaves embarcadas, exigindo materiais altamente resistentes à corrosão.

Para minimizar os danos causados pela corrosão, diversas técnicas de monitoramento e controle são empregadas, incluindo:

- Proteção catódica: uso de ânodos de sacrifício ou corrente impressa para reduzir o potencial eletroquímico do metal.
- Revestimentos protetores: aplicação de tintas e barreiras poliméricas para isolar a superfície metálica do meio corrosivo.
- Inibidores de corrosão: substâncias químicas adicionadas ao fluido para reduzir a taxa de corrosão.
- Inspeções e monitoramento: uso de técnicas como ultrassom, radiografia e sensores eletroquímicos para detecção precoce de falhas.

Avanços recentes incluem o desenvolvimento de nano revestimentos anticorrosivos e sensores inteligentes para monitoramento em tempo real. Estudos indicam que a nanotecnologia tem potencial para aumentar significativamente a proteção contra corrosão em ambientes agressivos (CALLISTER, 2020).

A corrosão em tubulações é um problema crítico para indústrias e aplicações marítimas, demandando estratégias eficazes de monitoramento e controle. A adoção de tecnologias avançadas, combinada com a seleção adequada de materiais e processos de proteção, é fundamental para garantir a segurança e a longevidade das instalações.

2.3 MECÂNICA DA FRATURA

A mecânica da fratura é uma disciplina essencial para a análise da integridade estrutural de tubulações, permitindo a previsão do comportamento de materiais diante da presença de defeitos ou trincas. Esse campo de estudo investiga os mecanismos pelos quais um material pode falhar devido à propagação de trincas, especialmente sob condições de carregamento cíclico ou impacto (ANDERSON, 2005).

A fratura pode ser classificada em três modos principais:

- **Modo I (abertura):** ocorre quando uma força perpendicular age sobre o plano da trinca, promovendo a separação do material.
- **Modo II (cisalhamento no plano):** causado por forças de cisalhamento atuando paralelamente à superfície da trinca.
- **Modo III (cisalhamento fora do plano):** ocorre devido a forças de torção aplicadas ao longo da trinca.

A Figura 2.1 exemplifica os modos de carregamento aplicados para uma trinca.

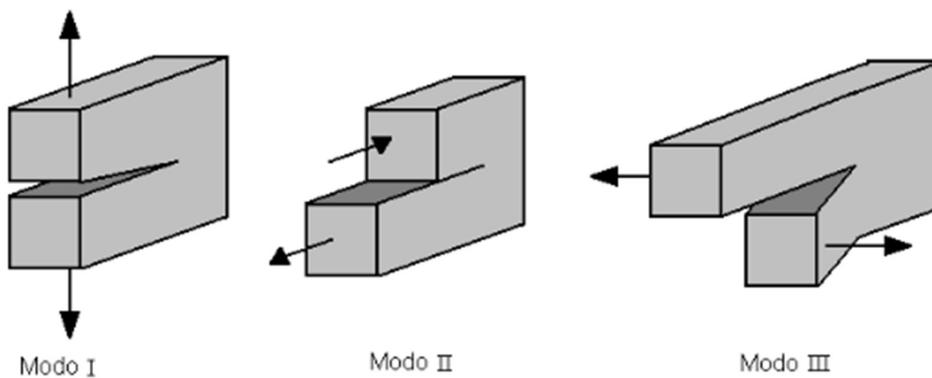


Figura 2.1 – Modos de carregamento aplicados para uma trinca, Adaptado de Anderson (2005).

O conceito de Fator de Intensidade de Tensão (K), introduzido por Griffith e posteriormente expandido por Irwin, é fundamental para a previsão da propagação de trincas. A relação entre a tensão aplicada, a geometria do defeito e a resistência do material define o comportamento da fratura. Quando o fator de intensidade de tensão atinge o valor crítico (K_{IC}), a trinca se propaga de forma instável, resultando na falha catastrófica do componente (PARIS e ERDOGAN, 1963).

No contexto das tubulações, a mecânica da fratura auxilia na determinação da vida útil de materiais sujeitos a condições extremas, como variações térmicas, pressões elevadas e

ambientes corrosivos. A interação entre corrosão e fratura por fadiga é um aspecto crítico, pois a degradação do material pode reduzir significativamente sua resistência ao crescimento de trincas.

Além disso, estudos realizados por da Costa-Mattos e Sathler (2021) destacam a importância da análise de tensões e energia crítica em juntas híbridas coladas, especialmente sob influência da temperatura. Sathler (2018) desenvolveu um critério de falha global dependente da temperatura, relevante para aplicações industriais onde variações térmicas impactam diretamente a resistência mecânica das estruturas adesivas.

Entre os diversos critérios utilizados para analisar a resistência à fratura, o critério de energia crítica se destaca por fornecer uma abordagem quantitativa para a previsão do comportamento de falha em compósitos. Este critério é baseado na análise da energia liberada durante a propagação de uma trinca, sendo essencial para a segurança e a durabilidade de estruturas submetidas a carregamentos variáveis.

2.4 REPARO EM TUBULAÇÕES

Os procedimentos para inspeção, avaliação e reparo de tubulações industriais em operação seguem diretrizes específicas que garantem a segurança, a confiabilidade estrutural e o cumprimento de requisitos normativos. Essas diretrizes diferenciam as intervenções em caráter provisório das soluções permanentes, cada uma com requisitos técnicos próprios.

As medidas corretivas temporárias são adotadas para conter danos estruturais ou vazamentos até que seja possível implementar uma solução definitiva. Dentre os métodos aplicáveis, destaca-se a utilização de luvas bipartidas, formadas por duas seções cilíndricas acopladas à área comprometida para fornecer reforço mecânico e evitar a perda de contenção. Outra abordagem permitida envolve a fixação de um envoltório metálico diretamente sobre a superfície afetada. Entretanto, caso a falha corresponda a uma trinca longitudinal, é essencial realizar uma análise criteriosa para evitar que a intervenção contribua para a propagação da descontinuidade, o que poderia comprometer a integridade do sistema.

Para tubulações operando sob tensões de escoamento inferiores a 275 MPa, um reparo emergencial pode ser executado por meio da aplicação de solda diretamente sobre a área danificada, desde que se garanta compatibilidade entre o metal base e o material de adição. Outra solução viável é a instalação de um reforço metálico fixado por soldagem sobre a região afetada. Pequenos vazamentos podem ser contidos temporariamente com dispositivos de

enclausuramento, desde que sejam considerados fatores como a natureza do fluido transportado e os riscos associados à intervenção.

Os reparos permanentes exigem a eliminação completa da falha, o que pode ser feito por meio da remoção do material comprometido e posterior preenchimento com solda. Caso a tubulação possa ser retirada de serviço, a substituição da seção danificada é a abordagem mais recomendada para restaurar plenamente a resistência estrutural.

O uso de reforços soldados como solução definitiva deve atender a critérios rigorosos, incluindo:

- Adoção de soldagem com penetração completa para garantir continuidade estrutural;
- Aplicação de cantos arredondados com raio mínimo de 25 mm para reduzir a concentração de tensões; e
- Inspeção por ensaios não destrutivos, como ultrassom ou radiografia, especialmente em tubulações transportando substâncias críticas, como hidrocarbonetos, hidrogênio ou ácidos.

Além das técnicas de soldagem, o uso de fixações mecânicas e materiais não metálicos também pode ser empregado para reparos provisórios, incluindo braçadeiras, envoltórios metálicos e compostos poliméricos. Entretanto, o uso de materiais compósitos como alternativa permanente ainda não é amplamente aceito, sendo exigida a remoção de soluções provisórias assim que viável para restabelecer as condições originais da tubulação.

Dentre as opções de reparo disponíveis, a solução adotada será a aplicação de luvas de materiais compósitos. Esse método tem se mostrado uma alternativa eficaz para reforçar a integridade da tubulação, oferecendo alta resistência mecânica, leveza e excelente desempenho contra corrosão. Além disso, as luvas compósitas possuem um processo de aplicação simplificado, o que reduz significativamente os custos de implantação em comparação com métodos tradicionais, como a soldagem. A possibilidade de instalação sem necessidade de grandes interrupções operacionais também contribui para a economia geral do processo, minimizando impactos na produção.

A evolução das tecnologias de manutenção tem proporcionado novas alternativas para reforço e reparo de tubulações industriais. O avanço dos materiais compósitos, por exemplo, tem demonstrado potencial para garantir a integridade estrutural sem a necessidade de procedimentos tradicionais de soldagem. Dessa forma, é essencial que os profissionais do setor

acompanhem as inovações e melhores práticas para otimizar a durabilidade e a segurança das instalações industriais, garantindo também uma solução economicamente viável para as empresas.

2.5 MATERIAIS COMPÓSITOS

O avanço das tecnologias de materiais nas últimas décadas reflete a busca por soluções que conciliem requisitos complexos em ambientes extremos, como os encontrados em aplicações navais, offshore e militares. Em um contexto onde eficiência energética, durabilidade e segurança são imperativos, materiais convencionais como aços de alta resistência, ligas de alumínio e polímeros não reforçados frequentemente apresentam limitações críticas. O peso elevado compromete a autonomia de embarcações, a corrosão em ambientes salinos reduz a vida útil de estruturas offshore, e a incapacidade de suportar cargas dinâmicas e balísticas simultaneamente desafia aplicações militares. Além disso, a soldagem, técnica amplamente usada para unir metais, torna-se inviável em locais de difícil acesso, como reparos subaquáticos em plataformas offshore ou em zonas de combate naval, devido à necessidade de equipamentos pesados, condições controladas e riscos associados a altas temperaturas. Nessas situações, os materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras (PMCs) emergem como alternativas estratégicas, eliminando a dependência de soldas ao permitir montagem por adesão ou fabricação monolítica, além de oferecer alta razão resistência/peso, resistência à corrosão, tenacidade e flexibilidade de projeto.

Essas propriedades tornam os PMCs ideais para cascos de navios, risers submarinos, blindagens navais e coletes balísticos. A substituição de soldas por compósitos é particularmente vantajosa em ambientes onde a logística de soldagem é impraticável, como em alto-mar ou em operações militares sob pressão temporal. A versatilidade dos PMCs permite ajustar suas características via escolha da matriz (e.g., resinas epóxi), do reforço (e.g., fibras de carbono, vidro ou aramida) e das técnicas de fabricação (e.g., enrolamento filamentoso, laminação manual). Este estudo explora os fundamentos teóricos, a estrutura e o desempenho dos PMCs, com ênfase em resinas epóxi e fibras de carbono, vidro e aramida, analisando suas aplicações em meios navais, offshore e setores militares, onde enfrentam corrosão salina, cargas hidrodinâmicas, fadiga em ambiente úmido, impactos de alta energia e restrições logísticas à soldagem.

A Tabela 2.1 descreve alguns exemplos de aplicação e suas vantagens.

Tabela 2.1. Aplicações dos materiais compósitos na indústria, Resende (2000)

Indústria	Exemplos	Vantagens
Automotiva e Transportes	Carroceria, chassis, componentes do motor etc.	Elevada firmeza, boa superfície, baixo peso (maior eficiência energética)
Civil	Peças estruturais, tanques, banheiras, móveis etc.	Elevada resistência mecânica e baixo peso
Esportes e Lazer	Raquetes de tênis, tocos de golfe, estruturas de bicicletas, carros de corrida etc.	Flexibilidade de <i>design</i> , redução nas vibrações
Mecânica e Química	Tubulações, tanques, vasos de pressão etc.	Resistência mecânica
		Resistência à corrosão
Aeroespacial	Portas, partes da fuselagem, cauda, flap etc.	Redução de peso da ordem de 20 a 35%; estabilidade dimensional e térmica
Elétrica	Circuitos impressos, isolantes, componentes de bateria etc.	Propriedades específicas
Energia eólica	Pás dos rotores etc.	Baixo peso e excelentes propriedades mecânicas
Marinha	Mastros, velas, deques, cascos etc.	Redução do peso representa possibilidade de maiores velocidades e acelerações

2.5.1 Definição

Conforme Callister e Rethwisch (2018), materiais compósitos podem ser definidos como um material multifásico, artificialmente projetado, que integra duas ou mais fases constituintes quimicamente distintas, separadas por uma interface bem definida, de modo a combinar suas propriedades intrínsecas em uma sinergia que supera as limitações de cada fase isolada. Diferentemente dos materiais monolíticos tradicionais, como metais, cerâmicas ou polímeros, os compósitos são concebidos para exibir uma proporção significativa das características de suas fases componentes, resultando em combinações de propriedades que não seriam alcançáveis de outra forma. Em PMCs, a matriz polimérica distribui tensões e protege contra degradação, enquanto as fibras aumentam a rigidez e a resistência. O objetivo principal dos compósitos é aliar as melhores características mecânicas, elétricas e térmicas de seus constituintes, aprimorando-as. Em geral, esse tipo de material apresenta leveza sem comprometer suas propriedades. A Figura 2.2 ilustra a representação de um material compósito (HECK, 2020).

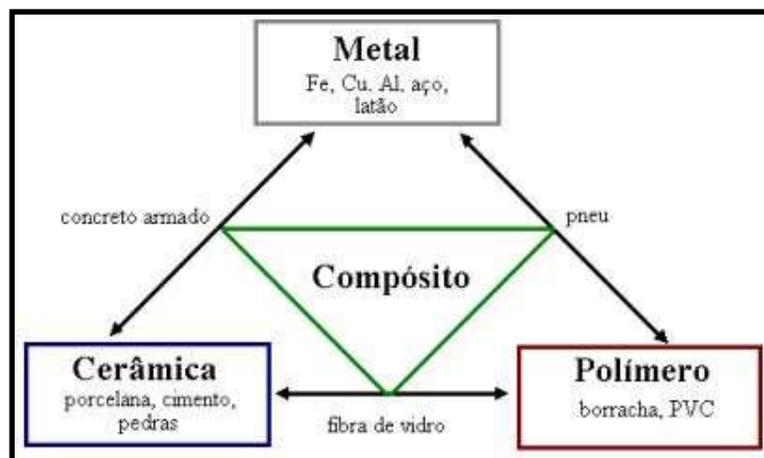


Figura 2.2 – Representação de um Material Compósito, HECK (2020).

2.5.2 Estrutura dos compósitos

A maior parte dos compósitos é constituída por duas fases: a matriz, também denominada fase contínua, composta por metais, cerâmicos ou polímeros, e a fase dispersa ou de reforço, que pode ser formada por partículas, fibras contínuas, fibras descontínuas ou folhas. A Figura 2.3 apresenta a estrutura dessas fases.

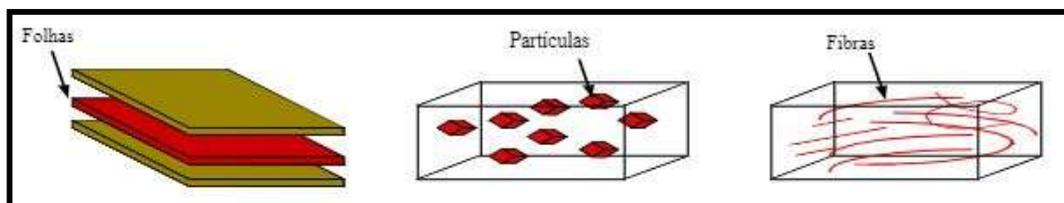


Figura 2.3 – Fase Matriz e Reforço, SANTO (2016).

A estrutura dos materiais compósitos é composta por uma fase matriz e uma fase dispersa. Em compósitos de engenharia, a matriz pode ser polimérica (PMC), cerâmica (CMC) ou metálica (MMC), enquanto a fase dispersa pode ser constituída por polímeros, cerâmicas, metais, minerais ou materiais orgânicos naturais. Tanto o reforço quanto a matriz possuem funções essenciais na composição do material. O reforço confere dureza, resistência à tração, tenacidade e rigidez, enquanto a matriz mantém as fibras na orientação apropriada, protege contra abrasão e efeitos ambientais e distribui as tensões aplicadas. A Figura 2.4 apresenta os principais tipos de matriz (BRUNELLI, 2017).

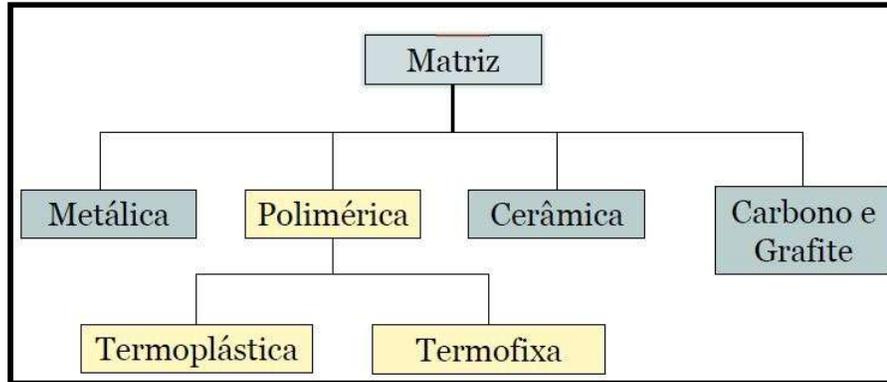


Figura 2.4 – Tipos de Matriz, BRUNELLI (2017).

2.5.3 Tipos de Compósitos

Os compósitos de matriz polimérica podem ser classificados em termoplásticos e termorrígidos.

Os compósitos termoplásticos, compostos por matrizes como polietileno (PE), polipropileno (PP), poliamida (PA) e poliéter-éter-cetona (PEEK) reforçadas por fibras de carbono, vidro ou aramida, são amplamente investigados por sua alta tenacidade, resistência ao impacto, reciclabilidade e versatilidade de processamento, distinguindo-se dos compósitos termorrígidos. Diferentemente dos termorrígidos, os termoplásticos não formam ligações cruzadas permanentes, eliminando reações químicas de cura e focando o controle do processo em parâmetros térmicos e reológicos, como temperatura de fusão e viscosidade elevada (10^2 a 10^4 Pa·s), que desafiam a impregnação das fibras e a consolidação, ao contrário das resinas líquidas (≈ 1 Pa·s). O processamento ocorre por técnicas como moldagem por compressão, injeção, pultrusão e termoformagem. Aplicados em aeroespacial, automotivo e energia renovável (e.g., turbinas eólicas com *PEEK*), enfrentam desafios como alto custo e necessidade de altas temperaturas (>300 °C), mas sua reciclabilidade, oposta à irreversibilidade dos termorrígidos (RAPONI, 2017), atende às demandas por sustentabilidade, consolidando sua relevância em materiais avançados.

Os compósitos termorrígidos, compostos por resinas como epóxi, poliéster insaturado, fenol-formaldeído e ureia-formaldeído (SAUTEREAU *et al.*, 2002), reforçadas por fibras de carbono, vidro ou aramida, destacam-se por sua elevada resistência mecânica, estabilidade térmica e rigidez, resultantes de ligações cruzadas irreversíveis formadas durante a cura. Sua degradação sem passagem pelo estado fluido ao serem aquecidos, devido à unidade básica de repetição na estrutura química (RAPONI, 2017), contrasta com termoplásticos. A cura, que os

torna infusíveis e insolúveis, ocorre em três estágios — indução, gelificação e vitrificação (HADAD, 1988), esquematizados na Figura 2.5 —, exigindo controle preciso de temperatura, tempo e viscosidade inicial ($\approx 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), impactando em propriedades como resistência à fadiga e tenacidade. Processados por técnicas como moldagem por transferência de resina (RTM), infusão a vácuo e autoclave, são aplicados na indústria aeroespacial (e.g., estruturas de aeronaves), automotiva e naval, enfrentando desafios como custos elevados, tempos de ciclo prolongados e irreversibilidade da cura, limitando a reciclabilidade (RAPONI, 2017), mas mantendo relevância em aplicações estruturais de alto desempenho com suporte de tecnologias de monitoramento avançadas.

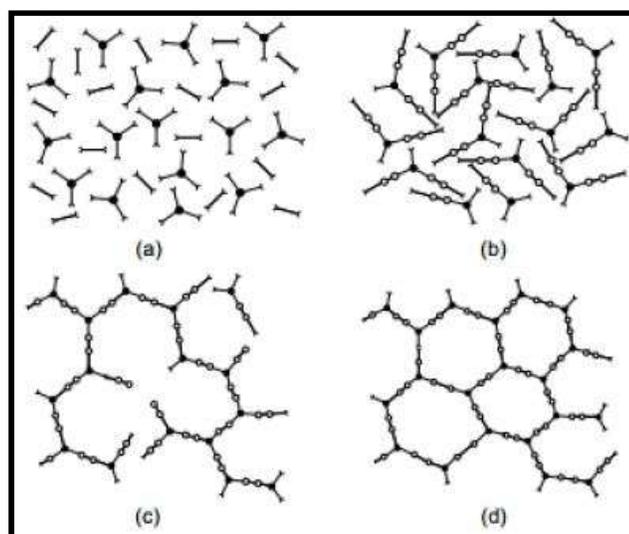


Figura 2.5 – Etapas do processo de cura: (a) Indução, (b) Gelificação, (c) e (d) Vitrificação, Hadad (1988).

2.5.4 Resinas Epóxi

As resinas epóxi, amplamente empregadas como adesivos estruturais e matrizes para compósitos (ROSU *et al.*, 2001), são obtidas por meio de uma reação de polimerização em duas etapas. A primeira envolve a obtenção de um pré-polímero epoxídico, enquanto a segunda consiste na polimerização ou cura desse material por meio de agentes de cura. Esse processo resulta em uma resina com alto grau de reticulação (SANTOS, 2009). Devido às suas propriedades térmicas, elétricas e mecânicas, as resinas epóxi são aplicadas em tintas, adesivos, revestimentos e matrizes para compósitos (COSTA *et al.*, 2011). Sua cura depende da presença de um grupo éter cíclico denominado epóxi ou oxirano, ilustrado na Figura 2.6 (SANTOS, 2009).

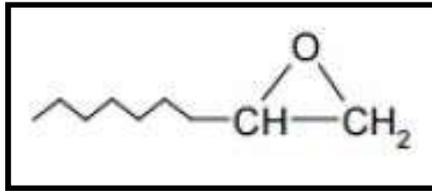


Figura 2.6 – Fórmula estrutural representativa do epóxi, SANTOS (2009).

O bisfenol A e a epiclorigidrina são os monômeros mais utilizados na preparação do pré-polímero epoxídico, resultando na formação do éter diglicídico de bisfenol A (DGEBA), cuja estrutura está representada na Figura 2.7. As resinas DGEBA variam em viscosidade conforme o valor do índice n , sendo amplamente utilizadas em combinação com endurecedores como o anidrido hexahidroftálico (HHPA), conforme ilustrado na Figura 2.8. A reação de cura dessas resinas segue uma cinética auto catalítica de ordem n , com três estágios distintos: indução, gelificação e vitrificação. Esse processo resulta em um polímero rígido, de elevada resistência térmica e mecânica (SHIGUE *et al.*, 2005).

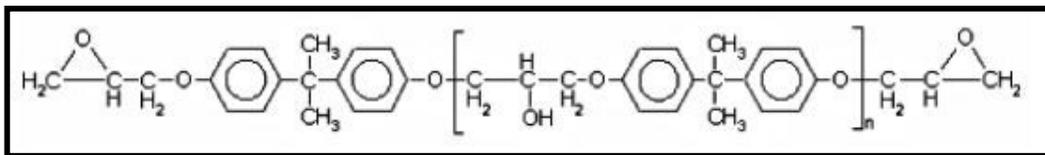


Figura 2.7 – Fórmula estrutural do éter diglicídico de bisfenol A, SANTOS (2009).

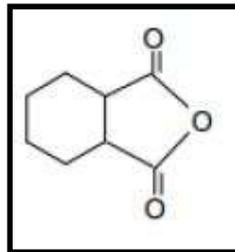


Figura 2.8 – Fórmula estrutural do anidrido hexahidroftálico (HHPA), SANTOS (2009).

A versatilidade das resinas epóxi decorre de características como flexibilidade na escolha de monômeros, possibilidade de uso de diferentes técnicas de polimerização, baixa contração durante a cura, alta adesão e capacidade de modificação para obtenção de propriedades específicas (PASCAULT e WILLIAMS, 2009). O processo de cura dessas resinas envolve variáveis como tempo e temperatura. O "*pot life*" refere-se ao tempo em que a resina mantém viscosidade adequada para aplicação, enquanto o "*gel time*" indica o período até que o sistema adquira consistência intermediária entre líquido viscoso e sólido. O tempo de cura total, essencial para que o material atinja suas propriedades finais, pode ser dividido em etapas de

endurecimento e cura completa (THE DOW CHEMICAL COMPANY®, 1976). A Figura 2.9 apresenta o gráfico do processo de cura da resina epóxi, com curvas de viscosidade e grau de conversão da resina em função do tempo (BROCKMANN, 2009). A Tabela 2.2 resume as temperaturas de transição vítrea dos polímeros (BRUNELLI, 2017).

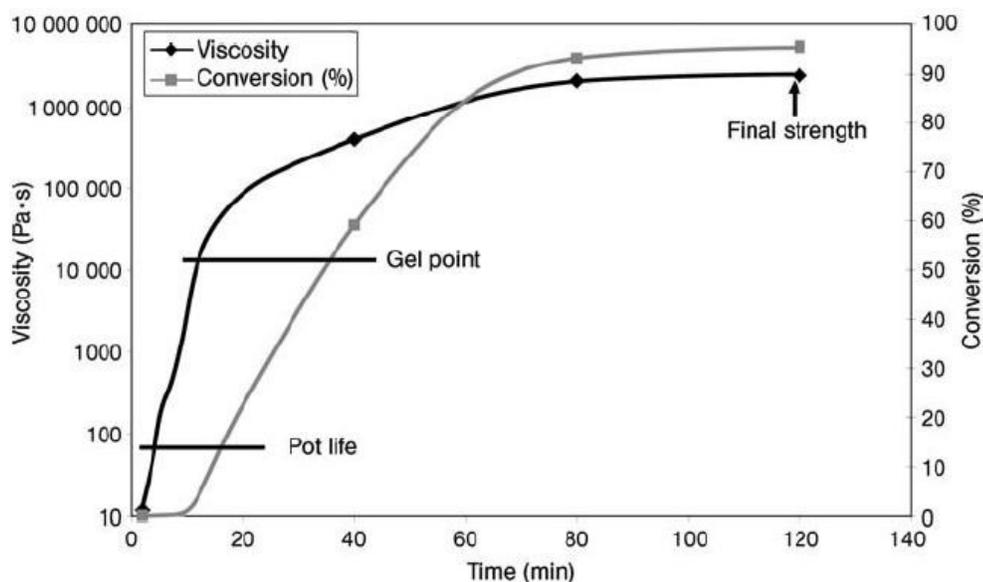


Figura 2.9 – Viscosidade do adesivo epóxi de acordo com a conversão da resina, BROCKMANN (2009).

Tabela 2.2. Temperaturas de transição vítrea dos Polímeros, BRUNELLI (2017).

POLÍMERO	Tg (°C)	Máxima Temperatura de Uso (°C)
Matriz Termorígida		
Resina Epóxi (DGBEA)	180	125
Resina Epóxi (TGDDM)	240 - 260	190
Bismaleimidas	230 - 290	232
Poliimida	320	280
Termoplásticos de uso especial		
Poli(éter-éter-cetona)	143	250
Polisulfeto de fenileno	85	240
Polisulfona	185	160
Poli(éter imida)	217	267
Poli(amida imida)	280	230

2.5.5 Tipos de Reforço Estrutural

Os principais tipos de reforço estrutural em compósitos incluem fibras de vidro, carbono e poli (aramida). As fibras de vidro, classificadas em E e S, apresentam baixo custo e alta resistência à tração, à corrosão e à fadiga, mas possuem módulo de elasticidade reduzido. A Figura 2.10 ilustra um exemplo desse material (DA SILVA, 2021), enquanto que a Tabela 2.3 demonstra a composição das fibras de vidro.

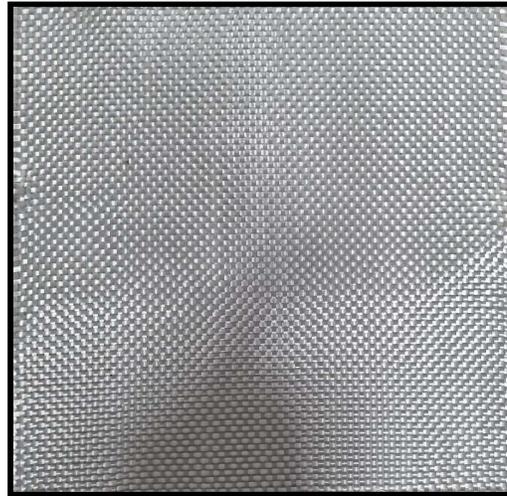


Figura 2.10 - Fibra de Vidro, da Silva (2021).

Tabela 2.3. Composição das fibras de vidro (%), Adaptado de BRUNELLI (2017).

Const.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O
Vidro-E	55,2	14,8	7,3	3,3	18,7	-
Vidro-C	65	4	5	3	14	8,5
Vidro-S	65	25	-	10	-	-

Já as fibras de carbono destacam-se pela baixa massa específica, elevado módulo de elasticidade e resistência à umidade, ácidos e solventes, sendo amplamente empregadas na indústria aeroespacial e em equipamentos esportivos. Seu alto custo, no entanto, é uma limitação (BRUNELLI, 2017). A Figura 2.11 apresenta a estrutura dessas fibras. As fibras de poli (aramida), por sua vez, possuem elevada resistência mecânica, alta tenacidade e ductilidade, sendo aplicadas em coletes à prova de bala, cordas e carcaças de mísseis. No entanto, sua resistência à compressão é relativamente baixa. Esses materiais representam alternativas avançadas para diversas aplicações industriais e tecnológicas, devido às suas propriedades mecânicas e térmicas diferenciadas.

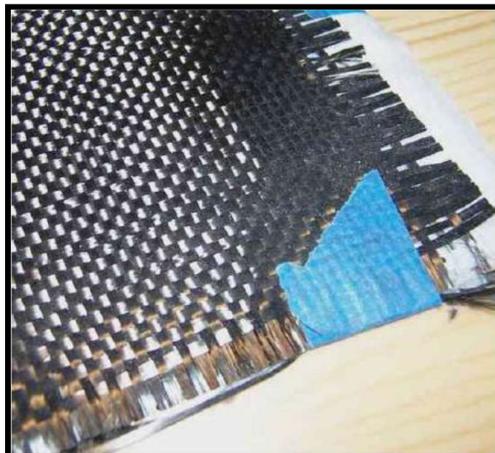


Figura 2.11 - Fibra de Carbono, BRUNELLI (2017).

2.6 ESTIMATIVA DA ESPESSURA DO REMENDO DE COMPÓSITO.

A crescente demanda por segurança e eficiência na indústria de petróleo e gás, especialmente em ambientes desafiadores como plataformas offshore, tem impulsionado a adoção de métodos avançados de reparo para dutos e tubulações. Nesse contexto, as normas ISO 24817 e ASME PCC-2 emergem como referências essenciais para a execução de reparos em compósitos, garantindo a integridade estrutural e a mitigação de riscos associados a vazamentos e falhas em sistemas críticos.

A Norma ISO 24817 é particularmente relevante em contextos onde a presença de materiais inflamáveis torna a segurança uma prioridade inegociável. O uso de camisas compósitas para reparar defeitos de corrosão transpassante se tornou uma prática comum, dada sua eficácia e a necessidade de evitar métodos que possam gerar calor ou faíscas, especialmente em locais isolados, como plataformas de petróleo.

Complementar à ISO 24817, a norma ASME PCC-2 estabelece um conjunto de procedimentos detalhados para a qualificação, projeto, instalação, teste e inspeção de reparos em compósitos. Ambas as normas colaboram na definição de espessuras adequadas de materiais compósitos, assegurando que os reparos mantenham um nível satisfatório de integridade estrutural. No caso de defeitos transpassantes, a ASME PCC-2 e a ISO 24817 utilizam conceitos fundamentais da mecânica da fratura linear para estimar a pressão de falha do reparo, sem considerar a viscosidade do fluido nem os efeitos dos transientes hidráulicos.

Essas normas são fundamentadas em pressupostos rigorosos que garantem a eficácia das intervenções. Entre eles, destaca-se a consideração de que os defeitos são suficientemente

pequenos para que a curvatura e a área da tubulação possam ser desprezadas, e que a deformação da parede da tubulação é insignificante em comparação com a deformação do remendo. Além disso, a mecânica da fratura elástica linear é aplicada para avaliar a resistência dos reparos, considerando modos mistos de falha. Embora modelos mais complexos possam ser explorados, a adesão a essas normas é crucial para a obtenção de seguros e a garantia da confiabilidade dos reparos em plataformas offshore.

Assim, a compreensão e a aplicação das normas ISO 24817 e ASME PCC-2 são imperativas para a gestão segura e eficaz de dutos e tubulações na indústria de petróleo e gás, contribuindo para a minimização de riscos e a maximização da durabilidade das infraestruturas críticas.

O presente estudo fundamenta-se na Norma ISO 24817 (2015), a qual propõe uma metodologia específica para a execução de reparos em compósitos destinados a dutos de indústrias de petróleo, petroquímicas e de gás natural.

2.6.1 Norma ISO 24817:2015

A Norma ISO 24817 (2015) foi concebida para permitir a aplicação de reparos com materiais compósitos em uma variedade de situações que envolvem a integridade estrutural de dutos de óleo, gás e utilidades. Esta norma, estabelecida inicialmente em 2006, se concentra no cálculo das variáveis críticas para a engenharia de reparos, designadamente a espessura do reparo (designado como t) e a largura do reparo ou comprimento axial do reparo (designado como L).

Além disso, a norma estende sua aplicabilidade a tubulações, tanques de armazenamento e vasos de pressão, contemplando as seguintes condições em que o uso de reparos com materiais compósitos é apropriado:

- Corrosão Externa: O reparo pode ser aplicado em casos de corrosão externa, independentemente de os defeitos serem transpassantes ou não. Essa flexibilidade permite que as intervenções sejam realizadas em diversos cenários de degradação;
- Corrosão Interna: Em situações de corrosão interna, o reparo pode ser aplicado, mesmo que o dano seja transpassante. É importante ressaltar que a corrosão e/ou erosão podem continuar a se desenvolver após a aplicação do reparo, exigindo um monitoramento contínuo;

- Fortalecimento Estrutural: O uso de reparos em áreas localizadas tem como objetivo promover o fortalecimento estrutural, evitando a continuidade da deterioração do material. Essa aplicação é essencial em contextos onde a integridade da estrutura precisa ser restabelecida; e
- Danos Externos: O reparo pode ser utilizado para endereçar danos externos, como sulcos, entalhes e corrosão, que comprometem a funcionalidade e segurança dos dutos.

2.6.1.1 *Classificação quanto aos tipos de defeitos*

Dentro dessa norma, os defeitos Tipo A e Tipo B são categorias de falhas que podem ser reparadas utilizando esses sistemas.

2.6.1.1.1 Definição dos Defeitos Tipo A

Os defeitos Tipo A correspondem a defeitos dentro do substrato, não vazantes, e que não se espera que se tornem vazantes dentro da vida útil projetada do sistema de reparo. Exemplos incluem:

- a) Perda de espessura da parede sem perfuração completa;
- b) Corrosão generalizada ou localizada;
- c) Erosão superficial;
- d) Impactos mecânicos que não causaram vazamento.

Esses defeitos podem ser reparados com sistemas de revestimento compósito, desde que a estrutura ainda mantenha resistência suficiente para suportar as condições operacionais durante a aplicação do reparo.

2.6.1.1.2 Definição dos Defeitos Tipo B

Os defeitos Tipo A correspondem a defeitos dentro do substrato, não vazantes, e que não se espera que se tornem vazantes dentro da vida útil projetada do sistema de reparo. Exemplos incluem:

- a) Perda de espessura da parede sem perfuração completa;
- b) Corrosão generalizada ou localizada;
- c) Erosão superficial;
- d) Impactos mecânicos que não causaram vazamento.

Esses defeitos podem ser reparados com sistemas de revestimento compósito, desde que a estrutura ainda mantenha resistência suficiente para suportar as condições operacionais durante a aplicação do reparo.

2.6.1.2 *Reparo*

A norma estabelece que o reparo de defeitos Tipo A e Tipo B deve considerar:

- a) Avaliação da viabilidade do reparo;
- b) Os seguintes fatores devem ser considerados pelo proprietário e pelo fornecedor do sistema de reparo ao avaliar a viabilidade de projetar e instalar um sistema de reparo;
- c) Avaliação da natureza e localização dos defeitos;
- d) Condições de projeto e operação do substrato e dos conteúdos (incluindo pressão, temperatura, tamanhos e combinações destes);
- e) Vida útil do projeto de reparo;
- f) Geometria do substrato a ser reparado;
- g) Perigos associados ao serviço do sistema;
- h) Disponibilidade de pessoal com as habilidades necessárias;
- i) Facilidade com que é prático executar operações de preparação da superfície;
- j) Desempenho em situações de falha e incidentes graves, incluindo impacto, abrasão, fogo, explosão, colisão e carregamento ambiental;
- k) Medidas operacionais, incluindo (se relevante) permissões, testes de gás e requisitos de proteção contra incêndio para garantir a segurança nas proximidades da área de reparo;
- l) Modos de falha;
- m) Inspeccionabilidade (tanto visual quanto não destrutiva) e manutenção do reparo; e
- n) Materiais do sistema de reparo.

Para esclarecimento, a avaliação não se destina a predeterminar que o sistema de reparo é a estratégia ou ação corretiva apropriada, mas sim a avaliar a viabilidade associada à aplicação do sistema de reparo.

Uma vez que a aplicação desses sistemas de reparo geralmente muda o modo de falha de ruptura do substrato para um vazamento, as consequências da falha serão, portanto, reduzidas. O objetivo é avaliar e estabelecer a classe do reparo, que determina o nível de detalhe do método

de projeto a ser realizado, juntamente com os requisitos para documentação de suporte. Isso também determina a margem de projeto ou fator de segurança a ser utilizado no projeto.

Esses requisitos garantem que os reparos sejam realizados com segurança e eficiência, restaurando a funcionalidade do equipamento sem necessidade de substituições completas.

2.6.1.2.1 Classe de reparo

A Tabela 2.4 define como cada reparo deve ser alocado a uma classe específica.

Tabela 2.4. Classes de reparo.

Classe de Reparo	Serviço Típico	Pressão de Projeto	Temperatura de Projeto
Classe 1	Deveres de baixa especificação, por exemplo, coluna estática, drenos, meio de resfriamento, água do mar (serviço).	<2 MPa	<40 °C
Classe 2	Sistemas de combate a incêndio, Sistema fixo de extinção por CO ₂	<2 MPa	<100 °C
Classe 3	Água produzida e hidrocarbonetos, fluidos inflamáveis, sistemas de gás. A Classe 3 também abrange condições de operação mais onerosas que as outras classes.	Limitada a reparos projetados para $t < D/12$ e em conformidade com a Norma.	Consultar Norma

Os reparos da Classe 1 abrangem pressões de projeto de até 2 MPa (20 bar), temperaturas de projeto de até 40 °C e são apropriados para a maioria dos sistemas de serviços utilitários. Esta classe é destinada àqueles sistemas que não estão diretamente relacionados à segurança do pessoal ou sistemas críticos para a segurança.

Os reparos da Classe 2 abrangem pressões de projeto de até 2 MPa (20 bar) e temperaturas de projeto de até 100 °C, mas excluem hidrocarbonetos. Esta classe é apropriada para aqueles sistemas que têm funções específicas relacionadas à segurança.

Os reparos da Classe 3 abrangem todos os tipos de fluidos e pressões até o limite superior de pressão qualificado. Esta classe é apropriada para sistemas que transportam fluidos produzidos.

As aplicações em que as condições de serviço são mais onerosas ou não estão incluídas nas classes acima devem ser designadas como Classe 3.

2.6.1.2.2 Tempo de Vida do Sistema de Reparo

O tempo de vida do sistema de reparo, geralmente estimado em anos, depende significativamente das condições de operação e dos tipos de defeitos encontrados. A norma estabelece que o tempo de vida mínimo do reparo é de dois anos, enquanto as vidas úteis mais prolongadas podem alcançar até 20 anos. Esses prazos são designados para situações em que se busca restabelecer a vida útil do projeto original da tubulação ou para prolongar a durabilidade do projeto por um período adicional previamente estipulado.

Caso a vida útil do reparo seja expirada, a responsabilidade recai sobre o proprietário ou o técnico encarregado do serviço, que deverá decidir entre a remoção ou a revalidação do sistema de reparo. Essa abordagem garante que a integridade e a segurança das instalações sejam mantidas ao longo do tempo, alinhando-se às melhores práticas do setor.

Assim, a Norma ISO 24817 (2015) não apenas oferece diretrizes para a execução de reparos em compósitos, mas também estabelece um marco para a gestão de ativos em ambientes industriais, promovendo a segurança e a eficiência operacional.

2.6.1.3 *Reparo para defeitos Tipo A*

No contexto do projeto de reparos com materiais compósitos, é particularmente relevante quando se considera a contribuição do substrato na capacidade de suporte de carga do sistema reparado. Este método fundamenta-se na interação mecânica entre o laminado de reparo e o substrato remanescente. A inclusão do substrato no cálculo estrutural permite uma análise mais integrada, aproveitando suas propriedades residuais para otimizar a espessura do laminado de reparo, denotada como t_{design} .

2.6.1.3.1 Limitação pela Tensão Admissível no Substrato

A determinação da espessura mínima do laminado de reparo (t_{min}), sob a condição de que esta seja limitada pela tensão admissível do substrato (s), requer o uso das Eq. (2.1) e (2.2).

$$t_{min,c} = \frac{D}{2S} \cdot \left(\frac{E_s}{E_c} \right) \cdot \left(p_{eq} + \frac{2\nu F_{eq}}{\pi D^2} - p_s \right) \quad (2.1)$$

$$t_{min,a} = \frac{D}{2S} \cdot \left(\frac{E_s}{E_a} \right) \cdot \left(\frac{2F_{eq}}{\pi D^2} - \nu \frac{E_a}{E_c} p_{eq} - p_s \right) \quad (2.2)$$

Essas expressões foram desenvolvidas para considerar as direções circunferencial (Eq. 2.1) e axial (Eq. 2.2) separadamente, refletindo a anisotropia típica de sistemas compósitos utilizados em reparos. Os parâmetros envolvidos nessas equações são definidos como segue:

- E_a : módulo de elasticidade axial do laminado de reparo, em MPa;
- E_c : módulo de elasticidade circunferencial do laminado de reparo, em MPa;
- E_s : módulo de elasticidade do substrato, em MPa;
- D : diâmetro externo original do componente, em mm;
- F_{eq} : carga axial equivalente, em N;
- ν : razão de Poisson do laminado de reparo;
- s : tensão admissível do material do substrato, em MPa;
- p_{eq} : pressão interna equivalente, em MPa;
- p_s : pressão máxima de trabalho permitida (MAWP), em MPa; e
- t_s : espessura mínima remanescente da parede do substrato, em mm.

Um aspecto crítico a ser destacado é a possibilidade de obtenção de valores negativos para $t_{min,a}$ ao aplicar a Eq. (2.2). Tal resultado indica que a espessura remanescente do substrato (t_s) é suficiente para suportar as cargas axiais aplicadas, dispensando, nesse caso, a necessidade de reforço adicional na direção axial. Ressalta-se que a contribuição da carga axial equivalente (F_{eq}) deve ser sempre considerada positiva, conforme especificado.

Os termos p_{eq} e F_{eq} são definidos pelas equações:

$$p_{eq} = p \left[1 + \frac{16}{(\pi D^2 p)^2} \left(F_{sh} + \frac{2}{D} M_{to} \right)^2 \right] \text{ para } p \geq \frac{4}{\pi D^2} \left(F_{sh} + \frac{2}{D} M_{to} \right) \quad (2.3)$$

$$p_{eq} = p + \frac{4}{\pi D^2} \left(F_{sh} + \frac{2}{D} M_{to} \right) \text{ para } p < \frac{4}{\pi D^2} \left(F_{sh} + \frac{2}{D} M_{to} \right)$$

$$F_{eq} = \frac{\pi D^2}{4} p + \sqrt{F_{ax}^2 + 4F_{sh}^2} + \frac{4}{D} \sqrt{M_{ax}^2 + M_{to}^2} \quad (2.4)$$

onde:

- p : pressão interna de projeto requerida, expressa em MPa;
- F_{sh} : carga de cisalhamento aplicada, expressa em N;
- M_{to} : momento torcional aplicado, expresso em N-mm;
- F_{ax} : carga axial aplicada, expressa em N; e
- M_{ax} : momento axial aplicado, expresso em N-mm.

A espessura de reparo projetada, t_{design} (expressa em mm), deve ser determinada como o maior valor entre $t_{min,c}$ e $t_{min,a}$, calculados pelas Eq. (2.1) e (2.2), respectivamente.

Caso o objetivo do sistema de reparo seja reforçar uma seção não danificada para suportar cargas adicionais de flexão ou outras cargas axiais, o valor de F_{eq} deve corresponder ao requisito total de carga axial aumentada, enquanto p_s deve ser tomado como a pressão máxima de trabalho permitida (MAWP) após a avaliação do defeito.

As Eq. (2.1) e (2.2) são válidas para espessuras de reparo $t_{design} < D/12$, sendo D o diâmetro externo original. Essa limitação decorre da suposição de que o substrato permanece no regime elástico, uma premissa fundamental na derivação dessas expressões.

2.6.1.3.2 Limitação pela Deformação Admissível no Laminado de Reparo

Quando a espessura de reparo é limitada pela deformação admissível do laminado de reparo, a espessura mínima do laminado de reparo, na direção circunferencial, $t_{min,c}$ (em mm), é dada pela Eq. (2.5):

$$\varepsilon_c = \frac{1}{E_c t_{min}} \left(\frac{p_{eq} D}{2} + \frac{F_{ax}}{\pi D} \right) - \frac{p_s D}{2 E_c t_{min}} - \frac{p_{live} D}{2(E_c t_{min} + E_s t_s)} \quad (2.5)$$

Na direção axial, a espessura mínima, $t_{min,a}$ (em mm), é calculada pela Eq. (2.6):

$$t_{min} = \frac{1}{\varepsilon_a} \left(\frac{F_{eq}}{\pi D} \frac{1}{E_a} - \frac{p_{eq} D}{2} \frac{\nu}{E_c} \right) \quad (2.6)$$

Os parâmetros adicionais dessas equações são definidos como:

- p_{live} : pressão interna durante a instalação do reparo, expressa em MPa;
- ε_c : deformação circunferencial admissível do laminado de reparo, expressa em mm/mm; e
- ε_a : deformação axial admissível do laminado de reparo, expressa em mm/mm.

Em situações específicas, como reparos aplicados sob pressão interna nula ($p_{live} = 0$) e com cargas axiais desprezíveis (por exemplo, em tubulações enterradas), a Eq. (2.5) pode ser rearranjada para uma forma simplificada, dada pela Eq. (2.7):

$$t_{min} = \frac{D}{2 \varepsilon_c E_c} (p_{eq} - p_s) \quad (2.7)$$

A espessura de reparo projetada, t_{design} , deve ser estabelecida como o maior valor obtido entre os resultados da Eq. (2.5) e da Eq. (2.6). Essa abordagem assegura que o laminado de reparo seja dimensionado para atender às condições mais críticas de deformação,

considerando as propriedades anisotrópicas do material compósito e as interações com o substrato.

Quando se opta por desconsiderar a contribuição do substrato na capacidade de suporte de carga, utilizando exclusivamente as propriedades de curto prazo do laminado de reparo, a integridade remanescente do substrato é irrelevante ou incerta. Na direção circunferencial, a espessura mínima do laminado de reparo, $t_{min,c}$ (em mm), que suporta pressão interna, flexão e empuxo axial, é dada pela Eq. (2.8), e a direção axial, a espessura mínima, $t_{min,a}$ (em mm), é dada pela Eq. (2.9):

$$t_{min,c} = \frac{1}{\varepsilon_c} \left(\frac{p_{eq} D}{2} \frac{1}{E_c} + \frac{F_{eq}}{\pi D} \frac{\nu}{E_c} \right) \quad (2.8)$$

$$t_{min,a} = \frac{1}{\varepsilon_a} \left(\frac{F_{eq}}{\pi D} \frac{1}{E_a} - \frac{p_{eq} D}{2} \frac{\nu}{E_c} \right) \quad (2.9)$$

2.6.1.4 Reparo para defeitos Tipo B

No contexto da análise estrutural de reparos com materiais compósitos, a caracterização de defeitos perfurantes (through-wall) assume papel central na definição das estratégias de projeto. Conforme estipulado, um defeito no substrato é classificado como perfurante se a espessura da parede, em qualquer ponto da região afetada, for inferior a 1 mm ao término de sua vida útil. Este critério reflete a necessidade de prever a evolução do dano ao longo do tempo, especialmente em aplicações sujeitas a degradação progressiva, como corrosão ou fadiga.

O método aplica-se especificamente a defeitos que já são perfurantes ou que se prevê que se tornarão perfurantes ao final da vida útil do componente. Seus requisitos complementam aqueles apresentados para defeitos Tipo A, estabelecendo uma abordagem integrada para o dimensionamento do reparo em cenários de maior criticidade. A combinação dessas diretrizes assegura que o sistema de reparo seja projetado para suportar não apenas as cargas operacionais, mas também as condições extremas associadas à perda de integridade do substrato. Essa abordagem prospectiva é essencial para garantir a durabilidade e a segurança da solução, especialmente em estruturas sujeitas a processos de deterioração contínua. A previsão do tamanho do defeito deve incorporar fatores como taxas de corrosão, desgaste mecânico ou propagação de trincas, dependendo das condições operacionais específicas.

Em certas situações, a preparação completa do substrato adjacente à área de reparo pode ser inviável devido a limitações práticas ou à necessidade de preservar a integridade remanescente do material danificado. Nesses casos, é comum o uso de uma placa metálica protetora durante procedimentos de preparação de superfície, como o jateamento com granalha, para evitar danos adicionais ao substrato comprometido. Quando essa técnica é empregada, a dimensão do defeito a ser adotada no projeto deve corresponder à área total da superfície não preparada, abrangendo tanto a placa metálica quanto eventuais materiais de transição (fairing material) utilizados para suavizar a geometria.

Adicionalmente, quando materiais de preenchimento são aplicados sobre o defeito, como em reparos que envolvem flanges ou outras irregularidades geométricas, o tamanho do defeito deve ser tomado como a área da superfície da tubulação coberta por esse material. Para um defeito circular ou quase circular, a espessura mínima do laminado de reparo, t_{min} (expressa em mm), deve ser calculada utilizando a Eq. (2.10):

$$P = f_{T2} f_{leak} \sqrt{\left\{ \frac{0,001 \gamma_{LCL}}{\frac{(1 - \nu^2)}{E_{ac}} \left\{ \frac{3}{512 t_{min}^3} d^4 + \frac{1}{\pi} d \right\} + \frac{3}{64 G t_{min}} d^2} \right\}} \quad (2.10)$$

onde:

- E_{ac} é o módulo de tração combinado $\sqrt{E_a \cdot E_c}$, expresso em MPa;
- G : é o módulo de cisalhamento do laminado de reparo, expresso em MPa;
- p : é a pressão interna de projeto, expressa em MPa;
- d : é o diâmetro do defeito, expresso em mm;
- γ_{LCL} : é o limite inferior de confiança de 95% da taxa de liberação de energia, expresso em joules por metro quadrado;
- f_{T2} : é o fator de redução por temperatura; e
- f_{leak} : é o fator de redução por serviço.

Cujo valor de f_{T2} é calculado pela Eq. (2.11) e de f_{leak} é obtido pela Tabela 2.5:

$$f_{T2} = 0,0000625 [T_m - T_d - (T_{test} - T_{amb})]^2 + 0,00125 [T_m - T_d - (T_{test} - T_{amb})] + 0.7 \quad (2.11)$$

Tabela 2.5. Valores para o fator de redução por serviço.

Classe 1	Classe 2	Classe 3
$0,83 \times 10^{-0,0122t_{\text{lifetime}}}$	$0,75 \times 10^{-0,007t_{\text{lifetime}}}$	$0,666 \times 10^{-0,0043t_{\text{lifetime}}}$

2.6.1.5 Cálculo de γ_{LCL}

O padrão ISO 24817:2015(E) fornece uma metodologia robusta para determinar a taxa de liberação de energia crítica, γ_{LCL} , expressa em J/m^2 , por meio do ajuste da Eq. (2.10) aos dados experimentais, sendo n o número de pontos observados, p_i a pressão de ruptura (em MPa) e $A(d_i)$ uma função do tamanho do defeito e das propriedades do laminado de reparo.

$A(d_i)$ é definido como:

$$p_i = A(d_i)\sqrt{\gamma_i} \quad (2.12)$$

Onde

$$A(d_i) = \sqrt{\left\{ \frac{0,001}{\left(\frac{1-\nu^2}{E_{ac}} \left\{ \frac{3}{512t_i^3} d_i^4 + \frac{1}{\pi} d_i \right\} + \frac{3}{64Gt_i} d_i^2 \right)} \right\}} \quad (2.13)$$

Com:

- d_i : é o diâmetro do defeito, expresso em mm; e
- t_i : é a espessura do laminado do reparo, expresso em mm.

A taxa média de liberação de energia, γ_{mean} , é calculada por:

$$\gamma_{mean} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n A(d_i)p_i}{\sum_{i=1}^n A(d_i)^2} \right)^2 \quad (2.14)$$

E o limite inferior de confiança, γ_{LCL} , por:

$$\gamma_{LCL} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n A(d_i)p_i}{\sum_{i=1}^n A(d_i)^2} - t_v \sigma \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n A(d_i)^2}} \right]^2 \quad (2.15)$$

com

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n A(d_i)p_i}{(n-2)}} \quad (2.16)$$

onde t_v é o valor t de Student, baseado em um nível de significância bilateral de 0,025, ou seja, um limite inferior de confiança de 95%. Os valores de t_v são fornecidos em função do número de variáveis, n , na Tabela 2.6.

Tabela 2.6. Valor t de Student para significância bilateral de 0,025.

Número de variáveis n	Graus de liberdade $(n - 2)$	Valor t de Student $t(0,025)$
7	5	2,841
8	6	2,752
9	7	2,685
10	8	2,634
11	9	2,593
12	10	2,560
13	11	2,533
14	12	2,510
15	13	2,490
16	14	2,473
17	15	2,458
18	16	2,445

2.6.2 Norma ASME PCC-2:2018

A norma **ASME PCC-2** (*Repair of Pressure Equipment and Piping*) fornece diretrizes para a reparação de equipamentos pressurizados e tubulações, abrangendo métodos projetados para restaurar a integridade estrutural desses componentes de maneira segura e eficaz. O **Artigo 401** dessa norma trata especificamente da aplicação de reparos por meio de revestimentos compósitos (*composite repair systems*), que são amplamente utilizados na recuperação de tubulações e equipamentos que sofreram danos devido à corrosão, erosão, defeitos mecânicos ou outras formas de degradação.

Este método de reparo oferece uma alternativa viável às substituições completas de componentes, proporcionando redução de tempo de inatividade, menor custo e aumento da vida útil dos equipamentos. O artigo estabelece requisitos detalhados para a seleção de materiais, projeto, qualificação, instalação e inspeção dos sistemas de reparo compósito, garantindo que a solução atenda aos padrões de segurança e desempenho exigidos para aplicações industriais críticas.

A norma classifica as aplicações dos reparos com revestimentos compósitos em dois níveis de risco: baixo risco e alto risco. Essa categorização é essencial para definir os requisitos

de qualificação e controle do processo de reparo, garantindo a segurança e confiabilidade da solução implementada.

2.6.2.1 *Definições de Risco e suas aplicações*

De acordo com a norma, a definição de risco está relacionada às consequências de uma falha no reparo:

2.6.2.1.1 Alto Risco

As aplicações de alto risco envolvem situações em que uma falha no reparo poderia resultar em consequências severas, como riscos à vida humana, impactos ambientais significativos ou paralisações críticas na operação. Caracterizam-se por:

- a) Altas pressões e temperaturas, que podem comprometer a resistência do material compósito;
- b) Reparos em equipamentos essenciais para a operação contínua da instalação;
- c) Sistemas contendo fluidos tóxicos, inflamáveis ou perigosos, aumentando os riscos associados a uma falha.
- d) Fluidos perigosos ou IDLH (*Immediately Dangerous to Life or Health*);
- e) Sistemas contendo tubulações, tanques ou vasos de pressão que são críticos para a segurança dos trabalhadores (por exemplo, sistemas de supressão de incêndios);
- f) Pressões iguais ou superiores a 150 psig (1 MN/m²);
- g) Temperaturas iguais ou superiores a 120°F (50°C);
- h) Temperaturas iguais ou inferiores a 0°F (-20°C); e
- i) O diâmetro do defeito vazante (d) e a pressão de projeto (P) satisfazem qualquer uma das seguintes relações:

- $P\sqrt{d} > 150$ psig (in.);
- $P\sqrt{d} > 0.16$ MN/m; e
- O defeito deve ser limitado a $d > 0.25 \times D$.

Nesses casos, a norma exige avaliações rigorosas, incluindo testes laboratoriais detalhados, cálculos estruturais avançados e inspeções criteriosas durante e após a aplicação do reparo, para garantir a conformidade com os critérios de desempenho estabelecidos.

2.6.2.1.2 Baixo Risco

As aplicações de baixo risco são aquelas em que uma falha no reparo não resultaria em consequências graves para a segurança, o meio ambiente ou a operação da planta. Essas aplicações geralmente envolvem:

- a) Fluidos não perigosos ou não IDLH;
- b) Sistemas contendo tubulações, tanques e vasos de pressão não críticos para a segurança dos trabalhadores;
- c) Pressões inferiores a 150 psig (1 MN/m²);
- d) Temperaturas inferiores a 120°F (50°C);
- e) Temperaturas superiores a 0°F (-20°C);
- f) Sistemas com baixas pressões e temperaturas;
- g) Danos não críticos à integridade estrutural do equipamento;
- h) Condições em que há redundância operacional ou medidas de mitigação para eventuais falhas; e
- i) O tamanho do defeito vazante (d) e a pressão de projeto (P) satisfazem as seguintes relações:
 - $P\sqrt{d} < 150 \text{ psig (in.)}$;
 - $P\sqrt{d} < 0.16 \text{ MN/m}$; e
 - *O defeito deve ser limitado a $d \leq 0.25 \times D$.*

Para esses casos, os requisitos de qualificação são menos rigorosos, podendo incluir avaliações simplificadas e ensaios menos exigentes.

Essa distinção entre alto e baixo risco permite a aplicação eficiente e segura dos reparos com revestimentos compósitos, otimizando custos sem comprometer a integridade dos sistemas pressurizados.

2.6.2.2 *Deformações Admissíveis do Laminado do reparo*

A utilização do método de projeto baseado em deformação admissível é recomendada para situações em que a contribuição do componente original é desconsiderada na capacidade de suporte de carga e quando são utilizadas propriedades de material de curto prazo.

A metodologia de projeto leva em consideração a temperatura de operação do sistema, sendo que a espessura mínima do laminado do reparo, para tensões circunferenciais decorrentes da pressão interna, é determinada pela equação:

$$t_{min} = \frac{1}{\varepsilon_c} \left(\frac{PD}{2} \frac{1}{E_c} - \frac{F}{\pi D} \frac{v_{ca}}{E_a} \right) \quad (2.17)$$

De forma semelhante, a espessura mínima para tensões axiais resultantes da pressão interna, flexão e esforço axial deve ser obtida conforme a equação:

$$t_{min} = \frac{1}{\varepsilon_a} \left(\frac{F}{\pi D} \frac{1}{E_a} - \frac{PD}{2} \frac{v_{ca}}{E_c} \right) \quad (2.18)$$

Eventos raros, como picos de pressão superiores à pressão de projeto, podem ser avaliados utilizando valores de deformação estabelecidos em normativas, desde que a ocorrência desses eventos seja limitada a dez vezes ao longo da vida do componente, com duração inferior a 30 minutos cada.

Adicionalmente, coeficientes de expansão térmica devem ser considerados, uma vez que sistemas compósitos de reparo possuem comportamentos distintos do material do substrato, gerando tensões térmicas quando há variação de temperatura superior a 40°C (72°F).

2.6.2.3 Tensões Admissíveis Determinadas por Testes de Desempenho

A determinação das tensões admissíveis do laminado do reparo pode ser feita por meio de testes de desempenho, desde que dados experimentais estejam disponíveis. Quando a contribuição do componente reparado não é considerada, a espessura mínima do laminado pode ser estimada utilizando a seguinte equação:

$$t_{min} = \left(\frac{PD}{2} - t_s S \right) \cdot \left(\frac{1}{f \cdot S_{lt}} \right) \quad (2.19)$$

Se a contribuição estrutural do componente original for levada em conta, um termo adicional é incorporado na fórmula, conforme estabelecido em normativas específicas. O fator de serviço “*f*” é determinado com base na Tabela 2.7 ou no código de construção aplicável.

Tabela 2.7. Fator de serviço para laminado do reparo.

Teste	Service factor, <i>f</i>
1.000-h data	0.5
Design life data	0.67

2.6.2.4 Componentes com Vazamento

Quando um componente está sujeito a vazamento ou há possibilidade de que ele venha a vaziar ao longo de sua vida útil, métodos adicionais de projeto devem ser considerados. Caso a espessura da parede do substrato seja inferior a 1 mm (0,04 pol.), o componente deve ser tratado como perfurado.

Para defeitos circulares ou quase circulares, a espessura mínima t_{min} do laminado do reparo é determinada iterativamente conforme a seguinte equação:

$$P = f_T f \sqrt{\left\{ \frac{\gamma_{LCL}}{\frac{(1-\nu^2)}{E_{ac}} \left\{ \frac{3}{512t^3} d^4 + \frac{1}{\pi} d \right\} + \frac{3}{64G_{31}t_{min}} d^2} \right\}} \quad (2.20)$$

A Eq. (2.20) é válida para defeitos com dimensão $d \leq \sqrt{6Dt}$, onde $E_{ac} = \sqrt{E_a E_c}$, e o valor de f é ajustado para 0.333 ou utilizar a Tabela 2.5 se houver disponibilidade de dados.

Caso o defeito possua formato não circular e uma razão de aspecto inferior a cinco, deve-se empregar um valor que contenha toda a extensão do defeito.

Ademais, sistemas de reparo que incorporam tampões para permitir a manutenção de componentes em operação devem ser submetidos a ensaios de qualificação para a determinação do valor de γ .

Os valores de E_{ac} e ν^2 na Eq. (2.20) devem ser considerados como $(E_a \cdot E_c)^{0.5}$ e $(\nu_{ca}^2 \cdot E_a/E_c)$, respectivamente, pois o laminado de reparo é anisotrópico, ou seja, suas propriedades variam entre as direções axial e circunferencial.

2.6.3 Fundamentos do Critério de Energia Crítica

Para a análise da fratura em sistemas de reparo com compósitos, será utilizado o critério de energia crítica, baseado na mecânica da fratura linear elástica, a fim de derivar sistematicamente as equações das normas ISO 24817 e ASME PCC-2. Este critério postula que a propagação de uma trinca ocorre quando a taxa de liberação de energia, composta pela relaxação das tensões elásticas e pela energia de superfície para formar novas superfícies de fratura, atinge um valor crítico. As equações do modelo permitem estimar a pressão de falha para uma dada espessura de reparo e diâmetro do furo, ou a espessura mínima do compósito para uma pressão de operação e diâmetro do furo específicos.

As normas ISO 24817 e ASME PCC-2, que orientam o projeto e a qualificação de sistemas de reparo com compósitos, adotam o critério de energia crítica, estendendo o conceito de Griffith para a propagação quase estática de trincas. A condição de fratura é expressa pela equação:

$$\gamma = \frac{\partial(W - U)}{\partial A} < \gamma_{cr} \quad (2.21)$$

onde γ é interpretado como a energia necessária para aumentar a área da trinca em uma quantidade ∂A , W é o trabalho realizado pelas forças externas e U é a energia elástica interna.

A principal suposição simplificadora é considerar o remendo metálico colado sobre a chapa como uma delaminação circular pressurizada entre um substrato rígido e uma placa elástica (semelhante ao clássico teste de blister), conforme ilustrado na Figura 2.12. O adesivo entre o compósito e a placa rígida é modelado como uma superfície (embora tenha uma espessura).

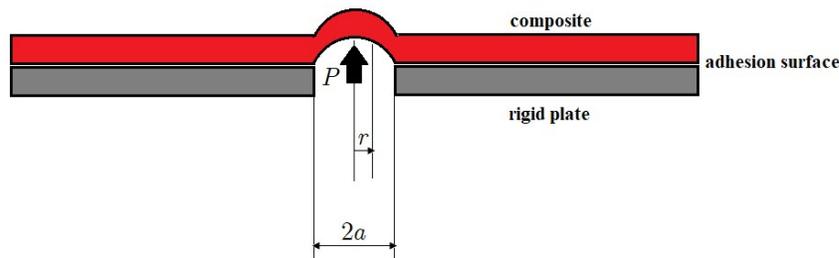


Figura 2.12 – Blister Test.

A taxa de liberação de energia γ inclui 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 em uma quantidade ∂A . O valor crítico γ_{cr} depende do adesivo (incluindo sua espessura), bem como do acabamento superficial de cada substrato.

O termo $(W - U)$ no problema ilustrado na Figura 2.12, considerando uma chapa que exibe um comportamento elástico linear a granel longe da ponta da trinca, pode ser expresso como (SATHLER *et al.*, 2021):

$$(W - U) = \frac{1}{2}PV \quad (2.22)$$

Onde V é o volume sob a delaminação. O volume V é estimado obtendo-se o deslocamento vertical y do laminado circular sob pressão interna P :

$$(W - U) = \frac{1}{2}PV = \frac{1}{2}P\pi \int_{r=0}^{r=a} y(r)rdr \quad (2.23)$$

Sendo a o raio do furo. Considerando a teoria de placas de Mindlin (1951) de segunda ordem e um comportamento elástico isotrópico, tem-se:

$$y(r) = P \left[\frac{3(1 - \nu^2)}{16Et^3} (a^2 - r^2)^2 \right] + P \left[\frac{3}{8Gt} (a^2 - r^2) \right] \quad (2.24)$$

Onde E é o módulo de Young, ν o coeficiente de Poisson e G o módulo de cisalhamento. Como o compósito não é homogêneo nem isotrópico, os valores adotados para E , ν e G são aproximações que serão discutidas nos próximos parágrafos. Essas aproximações são as mesmas utilizadas nas normas e especificações ASME e ISO e serão descritas nesta seção. A teoria de placas de Mindlin de segunda ordem (originalmente concebida para placas espessas) é adotada para levar em conta a deformação por cisalhamento e, assim, a falha no modo II.

Para uma grande espessura do remendo, o deslocamento vertical é menor e o volume V e, conseqüentemente, o termo $(W - U)$ tende a zero. Na realidade, a "placa circular" não está realmente engastada, sendo necessário considerar a tensão na ponta da trinca, que é uma singularidade. Em Sneddon (1946), a energia armazenada foi calculada para este caso (uma trinca em forma de moeda sob pressão interna). Combinando esse termo adicional com a Eq. (2.24), obtém-se a expressão para a diferença entre o trabalho externo e a energia elástica armazenada dentro do remendo:

$$(W - U) = \frac{1}{2}PV + P^2 \left[\frac{4(1 - \nu^2)a^3}{3E} \right] = \pi P \int_0^a y(r)rdr + P^2 \left[\frac{4(1 - \nu^2)a^3}{3E} \right] \quad (2.25)$$

assim,

$$(W - U) = \pi P^2 \left[\frac{(1 - \nu^2)}{32Et^3} a^6 + \frac{3}{32Gt} a^4 + \frac{4(1 - \nu^2)}{3\pi E} a^3 \right] \quad (2.26)$$

Combinando as Eqs. (2.21) e (2.26), tem-se que:

$$\frac{\partial(W - U)}{\partial A} = \frac{1}{4\pi a} \frac{\partial(W - U)}{\partial a} < \gamma_{cr} \quad (2.27)$$

então,

$$p^2 \left[\frac{(1 - \nu^2)}{E} \left\{ \frac{3}{32t^3} \left(\frac{d}{2} \right)^4 + \frac{2}{\pi} \left(\frac{d}{2} \right) \right\} \right] + p^2 \left[\frac{3}{16Gt} \frac{d^2}{2} \right] < \gamma_{cr} \quad (2.28)$$

Onde $d = 2a$. O primeiro termo no lado direito da Eq. (2.28) representa a parcela da taxa de energia associada ao modo I, enquanto o segundo termo representa a parcela associada ao modo II. Se todas as suposições simplificadoras forem válidas, o valor crítico γ_{cr} deve ser uma constante, independente do diâmetro do tubo, da espessura do compósito e do diâmetro do furo. Isso seria válido para um determinado sistema de compósito e liga do tubo, um adesivo específico, uma espessura fixa da camada adesiva e um acabamento superficial específico.

O valor γ_{cr} pode ser identificado experimentalmente por meio de um teste hidrostático no qual a pressão é aumentada monotonamente até a falha (quando o sistema vaza) em uma pressão P_{cr} :

$$\gamma_{cr} = \gamma_I + \gamma_{II} \quad (2.29)$$

com

$$\gamma_I = p^2 \left(\frac{1 - \nu^2}{E} \right) \left\{ \frac{3}{512t^3} d^4 + \frac{1}{\pi} d \right\} \quad (2.30)$$

$$\gamma_{II} = p^2 \left[\frac{3}{64Gt} d^2 \right]$$

então:

$$\gamma_{cr} = P_{cr}^2 \left[\left\{ \frac{3}{512t^3} d^4 + \frac{1}{\pi} d \right\} + \left[\frac{3}{64Gt} d^2 \right] \right] \quad (2.31)$$

assim,

$$P_{cr} = \sqrt{\left\{ \frac{\gamma_{cr}}{\left(\frac{1 - \nu^2}{E} \right) \left\{ \frac{3}{512t^3} d^4 + \frac{1}{\pi} d \right\} + \frac{3}{64Gt} d^2} \right\}} \quad (2.32)$$

A expressão para o valor crítico da pressão é a mesma apresentada nas normas ISO 24871 e ASME PCC-2, considerando E como o módulo de elasticidade combinado do laminado de reparo, ν como o coeficiente de Poisson combinado e G como o módulo de cisalhamento do laminado na direção 1-3.

2.7 O FENÔMENO DO GOLPE DE ARIETE.

Transientes em sistemas de distribuição de líquidos pressurizados ocorrem sempre que há variações no momento do fluido ou na estrutura da tubulação. A relevância do estudo desses transientes hidráulicos no contexto de infraestruturas de transporte de líquidos reside na necessidade de preservar a integridade estrutural das tubulações. A Figura 2.13 demonstra a dinâmica transitória do escoamento caracterizada pela propagação de perturbações sob a forma de ondas de pressão no fluido e ondas de tensão ao longo das paredes da tubulação, submetendo o material do duto a níveis de tensão superiores aos observados no regime permanente (GOMES DA ROCHA e FREITAS RACHID, 2012) e (DAUDE *et al.*, 2023).

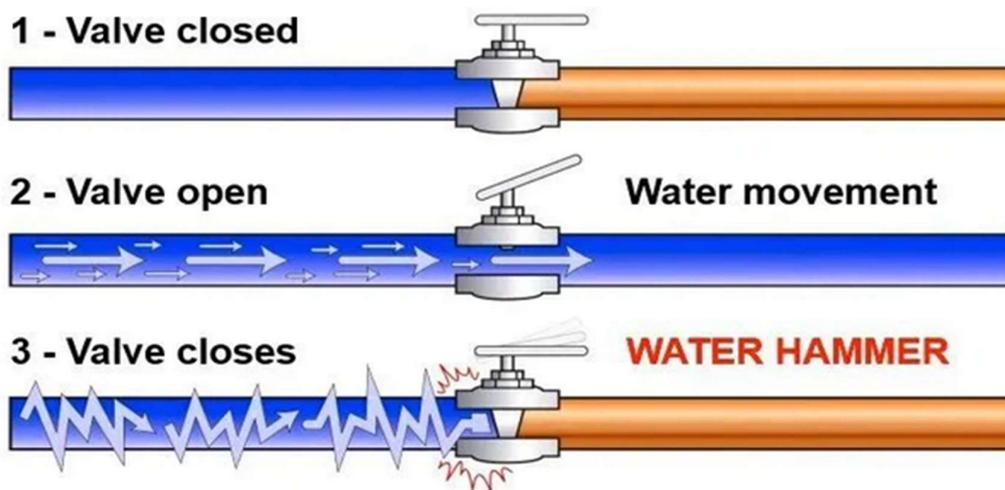


Figura 2.13 - Fenômeno do golpe de aríete, Modo Pump Co. (2022).

No setor industrial, a mitigação de transientes hidráulicos representa um desafio contínuo. Operações rotineiras, tais como fechamento ou abertura de válvulas, acionamento ou desligamento de bombas e alterações na carga transportada, modificam a quantidade de movimento do fluido, tornando as tubulações de transporte de líquidos suscetíveis a esses fenômenos.

Embora diversos cenários de transientes em fluidos possam ser previstos e controlados por meio de estratégias apropriadas, eventos inesperados, como falhas mecânicas em válvulas e bombas, além de outros incidentes hidráulicos, podem acarretar consequências severas. Estudos na literatura documentam diversos acidentes graves associados a transientes hidráulicos, incluindo falhas estruturais em sistemas de tubulação empregados em usinas hidrelétricas, nucleares e instalações do setor de petróleo e gás Daude *et al.* (2023), Bergant *et al.* (2006), Almeida e Ramos (2010) e Leishear (2017). Já foram propostas metodologias para

mitigar rupturas de tubulações associadas a esses fenômenos, como discutido no trabalho de Schmitt *et al.* (2006). Mesmo quando a magnitude do transiente não resulta em falha catastrófica, outros problemas hidráulicos podem surgir, tais como vazamentos e a contaminação de sistemas de abastecimento de água potável como mostrado em Ghidaoui *et al.* (2005) e Leishear (2020).

A relevância dos transientes hidráulicos impulsiona investigações contínuas sobre o tema, abrangendo desde a avaliação dos efeitos desses fenômenos sobre sistemas de tubulação até o desenvolvimento de estratégias de mitigação (GONZAGA FILHO; FREITAS RACHID, 2023; KERAMAT *et al.*, 2020; KUBRAK *et al.*, 2021). Além disso, algumas pesquisas exploram a utilização das respostas do transiente para a implementação de metodologias de diagnóstico em redes de tubulação (ANDRADE *et al.*, 2021). Por outro lado, análises mais aprofundadas da complexa dinâmica de fluxos não estacionários podem ser encontradas em Andrade *et al.* (2023) e Andrade *et al.* (2024). Uma revisão abrangente do tema foi publicada recentemente por Plouraboué (2024).

Dada a propagação dos picos de pressão ao longo da tubulação, a análise das respostas do transiente hidráulico é essencial para prevenir danos estruturais. Assim, o dimensionamento seguro de sistemas de transporte de líquidos depende de uma caracterização precisa da dinâmica não-permanente do conjunto fluido-tubo. Tal análise é crucial não apenas na fase de projeto, mas também para a extensão da vida útil de dutos submetidos a reparos com materiais compósitos.

Constata-se que a espessura mínima do reparo, determinada com base nas normas ASME PCC-2 e ISO 24817, é definida em função da pressão operacional. No entanto, essa abordagem não é conservadora, pois não considera os picos de pressão gerados pelos transientes hidráulicos, os quais podem exceder significativamente as pressões encontrada no regime estacionário. Dessa forma, um reparo dimensionado exclusivamente conforme as diretrizes das normas ASME PCC-2 ou ISO 24817 pode falhar criticamente sob a ação de transientes hidráulicos.

O estudo pioneiro de Saffar *et al.* (2021) abordou o impacto dos transientes hidráulicos sobre reparos compósitos, demonstrando que materiais como o plástico reforçado com fibra de vidro (GFRP) podem sofrer danos severos devido a variações abruptas de pressão. Embora o estudo tenha utilizado o critério de Hashin para avaliar os danos nos reparos, não propôs ajustes

específicos nos critérios normativos de espessura – uma das lacunas que este trabalho busca preencher.

A modelagem matemática dos transientes hidráulicos tradicionalmente adota duas estratégias principais: método desacoplado e métodos acoplado.

- Método desacoplado: esta abordagem simplifica a análise ao desconsiderar a influência da inércia da tubulação sobre a propagação do transiente. Nesse caso, as propriedades mecânicas do tubo afetam apenas a velocidade de propagação da onda de pressão no fluido; e
- Método acoplado: considera a interação fluido-estrutura, ou seja, a interdependência dinâmica entre o escoamento e a estrutura da tubulação. Esse acoplamento influencia não apenas a velocidade da onda de pressão no fluido, mas também gera efeitos adicionais no sistema fluido-tubo, incluindo acoplamentos de Poisson e de atrito, bem como uma transferência bidirecional de energia mecânica entre o fluido e a tubulação (ANDRADE *et al.*, 2022).

Efeitos termo-mecânicos, tais como atrito do fluido, cavitação e comportamento inelástico da tubulação, desempenham um papel significativo na resposta dos transientes hidráulicos. Uma modelagem precisa desses fenômenos é fundamental para garantir previsões realistas. Ao assumir um escoamento monofásico e uma tubulação com comportamento elasticamente linear, o atrito do fluido emerge como o principal fator de dispersão e dissipação de energia (GHIDAOU, 2002). A literatura propõe diversos modelos matemáticos para o atrito transitório, com formulações unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais, cada qual apresentando vantagens e limitações tanto do ponto de vista teórico quanto prático (PAL *et al.*, 2021).

Neste trabalho, o modelo mecânico adotado para descrever o transiente hidráulico considera o escoamento como invíscido, ou seja, sem contabilizar o atrito do fluido, resultando na ausência de atenuação da pressão ao longo do tempo. Conforme será abordado adiante, a análise do efeito do transiente sobre os reparos fundamenta-se na pressão máxima, verificada nos instantes iniciais do fenômeno. Assim, o modelo invíscido mostra-se adequado para a metodologia empregada.

2.8 MODELAGEM MATEMÁTICA DO GOLPE DE ARIETE

Nesta primeira abordagem, assume-se que o escoamento do fluido é invíscido. Além disso, analisa-se o transiente em uma instalação composta por reservatório, tubo e válvula, onde o fechamento instantâneo da válvula gera o transiente. As variações de pressão são analisadas com base em uma forma adimensionalizada das equações do golpe de aríete. Essa formulação revela os grupos adimensionais mais importantes do fenômeno.

As equações governantes do golpe de aríete são desenvolvidas considerando um escoamento de fluido dentro de um tubo deformável com seção transversal circular não perturbada $A_f = \pi R^2$ e perímetro $P = 2\pi R$, sendo R o raio interno do tubo. Nesse contexto, assume-se que o escoamento do fluido é unidimensional, deslocando-se ao longo da linha central do tubo (x), enquanto a inércia do tubo é negligenciada. Ao se considerar escoamentos de baixo número de Mach e desconsiderar os efeitos de forças de corpo, efeitos viscosos axiais, reações químicas e transformações de mudança de fase, as equações governantes podem ser estabelecidas conforme Chaudhry (2014):

$$\begin{aligned}\partial_t(\rho A) + \rho A \partial_x v &= 0, \\ \rho A \partial_t v + A \partial_x p &= 0.\end{aligned}\tag{2.33}$$

Para completar o modelo, basta descrever como o tubo se deforma radialmente em resposta à variação da pressão interna e fornecer uma equação de estado para o fluido. Assume-se que o fluido é um líquido levemente compressível, de modo que sua equação de estado é dada por:

$$\rho = \rho_f \left(1 + \frac{p}{K}\right)\tag{2.34}$$

em que ρ_f e K representam, respectivamente, a densidade não perturbada e o módulo de compressibilidade volumétrica do líquido. Sob a hipótese de pequenas deformações, a área da seção transversal está relacionada à deformação circunferencial da parede do tubo, ε_θ , como:

$$A = A_0(1 + 2\varepsilon_\theta)\tag{2.35}$$

onde A_0 representa a área não perturbada. Restringindo a análise a tubos de parede fina e linearmente elásticos ($\frac{R}{e} < 10$), e assumindo que o tubo está ancorado contra qualquer movimento axial, a deformação circunferencial pode ser expressa em termos da pressão como (Chaudhry, 2014):

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{pR(1 - \nu^2)}{eE} \quad (2.36)$$

onde ν , E e e representam, respectivamente, o coeficiente de Poisson, o módulo de Young e a espessura da parede do tubo. Quando as Eq. (2.34–2.36) são combinadas com a Eq. (2.33), obtêm-se as seguintes equações governantes:

$$\left[\frac{1}{\rho_f c_f^2} \right] \partial_t p + \partial_x v = 0 \quad (2.37)$$

$$\rho_f \partial_t v + \partial_x p = 0,$$

onde:

$$c_f = \left[\frac{\rho_f}{K} \frac{1}{1 + \frac{2RK(1 - \nu^2)}{eE}} \right]^{-1/2} \quad (2.38)$$

é a velocidade da frente de onda. Utilizando o método das características, as equações governantes descritas na Eq. (2.37) podem ser transformadas no seguinte conjunto de equações diferenciais ordinárias (ANDRADE e FREITAS RACHID, 2022):

$$\frac{1}{\rho_f c_f} \frac{dp}{dt} + \frac{dv}{dt} = 0, \text{ ao longo de } \frac{dx}{dt} = c_f \quad (2.39)$$

$$-\frac{1}{\rho_f c_f} \frac{dp}{dt} + \frac{dv}{dt} = 0, \text{ ao longo de } \frac{dx}{dt} = -c_f$$

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

3 METODOLOGIA

3.1 REPARO

O substrato metálico foi confeccionado usando placas de aço com 12,7 mm de espessura, feitas de aço AISI 1020, com um furo (25,4 mm de diâmetro) centralizado. O substrato metálico tem uma forma retangular e apresenta as seguintes dimensões: 250 mm x 250 mm. A Tabela 3.1 fornece as dimensões do substrato usado.

Tabela 3.1. Geometria do Substrato Metálico

Dimensões (mm)	Substrato
Comprimento	250
Largura	250
Espessura	12.7
Diâmetro	25.4

Para garantir a obtenção de resultados consistentes e confiáveis nos ensaios realizados, é imprescindível assegurar condições adequadas de preparação da superfície do substrato, de modo que esta se apresente livre de contaminantes, imperfeições e, sobretudo, corrosão. Nesse contexto, antes da aplicação da camada de adesivo epóxi e da subsequente adesão da placa de compósito ao substrato, as superfícies das placas metálicas foram submetidas a um processo de jateamento com granalha de aço, especificação G40 (shot peening). Esse procedimento de preparação superficial tem como objetivo principal promover um perfil de ancoragem otimizado na superfície, além de eliminar defeitos como incrustações e corrosão.

A avaliação dos perfis de rugosidade da superfície do substrato foi conduzida utilizando um rugosímetro da marca TAYLOR ROBSON, modelo CCIMP. Os resultados obtidos indicaram parâmetros de altura da superfície, com valores de $S_a = 9,74 \mu\text{m}$ e $S_t = 75,7 \mu\text{m}$. Esses dados referem-se à placa de substrato empregada para a medição dos perfis de altura analisados neste trabalho, após a conclusão do processo de jateamento. A Figura 3.1 corresponde à placa de substrato utilizada para medição dos perfis de altura após o processo de jateamento. Tal caracterização é essencial para compreender o comportamento da interface entre o substrato e o compósito, contribuindo para a validação dos procedimentos adotados e para a análise das propriedades mecânicas do sistema reparado.



Figura 3.1 – Substrato, SATHLER (2021).

A Tabela 3.2 apresenta os principais parâmetros de altura do substrato conforme verificação do rugosímetro, de acordo com a norma ISO 25178.

Tabela 3.2. Parâmetros de rugosidade de superfície do substrato

Parâmetros de altura (ISO 25178)		
S_q	12.2	μm
S_{Sk}	-0.0171	
S_{ku}	3.04	
S_p	41.2	μm
S_v	34.5	μm
S_z	75.7	μm
S_a	9.74	μm
Parâmetros 3D (ASME B46.1)		
S_t	75.7	μm

O sistema de reparo desenvolvido neste trabalho é baseado em um material compósito constituído por fibra de vidro tipo E e resina epóxi, sendo amplamente empregado no reforço e reparo de corrosões internas e externas em tubulações. A fibra de vidro utilizada é uma malha bidirecional do tipo WR-326, fabricada pela TEXIGLASS®, com gramatura de 326 g/m², destacando-se por suas boas propriedades mecânicas, baixo custo e representatividade como material típico em aplicações de campo. Para a fabricação das placas de compósito, foram sobrepostas 10 camadas dessa fibra, laminadas manualmente com o auxílio de um rolo laminador e pincel, aplicando-se camada por camada impregnada com resina.

Cada placa laminada apresentou dimensões de 200 mm de comprimento, 200 mm de largura e 3 mm de espessura, conforme medições realizadas em laboratório, sendo o processo de preparação detalhado na Figura 3.2. Após a laminação, o tempo de cura das placas variou entre 5 e 7 dias, seguindo as recomendações do fabricante, garantindo a consolidação do compósito. Esse sistema, composto por fibra de vidro bidirecional tipo E, é combinado com a resina epóxi MC 109[®], fabricada pela EPOXYFIBER[®], e o endurecedor FD 131, utilizados na proporção em peso de 65 g de resina para 13 g de endurecedor (5:1).



Figura 3.2 - Fabricação da placa de compósito laminado, SATHLER (2021).

Embora o fabricante forneça informações limitadas sobre as características dessa resina epóxi, as propriedades mecânicas básicas do compósito resultante foram determinadas e estão apresentadas na Tabela 3.3, enquanto uma análise mais aprofundada será discutida nas seções seguintes. A escolha da resina epóxi MC 109[®], em conjunto com a fibra de vidro, reflete sua adequação para aplicações de reparo, oferecendo uma solução eficaz e economicamente viável para o reforço estrutural e a mitigação de danos por corrosão em tubulações.

A Tabela 3.3 informa as proporções seguidas de acordo com cada reparo executado, para cada material trabalhado.

Tabela 3.3. Proporções de Peso (gramas/gramas)

Compósitos utilizados	Resina	Endurecedor	Proporção em peso (gramas/gramas)
Compósito laminado de fibra de vidro	MC 109 (Componente A)	FD 131 (Componente B)	65:13
Adesivo epóxi	Rengel SW 404 (Componente A)	REN HY 404 (Componente B)	100:9

Para a fabricação dos corpos de prova empregados neste estudo, foram utilizados os seguintes materiais e instrumentos: malha de fibra de vidro, resina e endurecedor, complementados por uma balança para precisão nas proporções, pincel e espátula para aplicação e manipulação da resina, pote de plástico para mistura dos componentes, tesoura e

estilete para corte e ajuste da malha de fibra, e rolo de compressão para assegurar a compactação das fibras durante a laminação. Esses itens foram cuidadosamente empregados para garantir a qualidade e a consistência do processo de preparação dos compósitos.

No sistema de reparo proposto, a interface entre o substrato metálico e a placa de compósito de fibra de vidro foi estabelecida por meio da aplicação de uma camada adesiva composta pelo sistema epóxi Rengel SW 404 (resina) e Ren HY 404 (endurecedor), ambos fornecidos pela HUNTSMAN®. Este adesivo epóxi, identificado como um sistema bicomponente carregado, é descrito pelo fabricante como uma solução de alta performance, caracterizada por excelente resistência à abrasão, propriedades mecânicas e químicas superiores, além de uma superfície extremamente dura, sendo amplamente utilizado como camada de superfície em diversas aplicações. As propriedades do adesivo, conforme fornecidas pela HUNTSMAN®, estão detalhadas na Tabela 3.4, evidenciando sua adequação para conferir resistência mecânica e à corrosão ao sistema reparado.

Tabela 3.4. Propriedades do Adesivo Rengel SW 404 / Ren HY 404, HUNTSMAN, 2010

Tensile strength (MPa)	50-60
Flexural strength (MPa)	120-140
Impact strength (KJ/m ²)	7.5-9.5
Density (g/cm ³)	1.8-1.9
Modulus of elasticity (GPa)	9-10
Hardness (Shore D)	85-90

A proporção em peso adotada para a mistura foi de 100 g de resina Rengel SW 404 para 9 g de endurecedor Ren HY 404 (100:9), alinhada às especificações do fabricante, embora a documentação técnica também mencione uma razão alternativa de 100:90 em peso para aplicações específicas. A preparação da mistura foi realizada em um pote de plástico, com os componentes originais acondicionados em embalagens do fabricante — um pote para a resina Rengel SW 404 e um pequeno frasco para o endurecedor Ren HY 404 —, conforme ilustrado na Figura 3.3, que documenta as etapas do processo. A aplicação do adesivo sobre o substrato metálico foi conduzida com uma espátula metálica limpa e seca, garantindo a distribuição uniforme do material em uma camada com espessura média de 1 mm, valor este verificado por meio de medições com um paquímetro Mitutoyo de resolução 0,05 mm. Esforços foram realizados para minimizar a incorporação de microbolhas de ar, obtendo-se uma espessura tão fina quanto possível durante o processo.



Figura 3.3 - Adesivo, Endurecedor e a Mistura, SATHLER (2021).

O tempo de cura do adesivo epóxi foi estabelecido em 7 dias a uma temperatura ambiente de aproximadamente 25 °C, realizada no Laboratório de Ensaios em Dutos (LED), embora o fabricante indique que a cura pode ser alcançada em 24 horas em condições de temperatura ambiente. A adoção de um período de cura mais prolongado visou assegurar a máxima integridade da interface adesiva, considerando as condições específicas do ensaio e a necessidade de otimização das propriedades mecânicas do sistema compósito. Este procedimento reflete a preocupação em alinhar as características do adesivo às demandas do reparo, promovendo uma união robusta entre o substrato metálico e a placa de compósito, cujos detalhes de preparação foram discutidos anteriormente.

A Tabela 3.5 informa as propriedades da mistura a temperatura ambiente, conforme informado pelo fornecedor.

Tabela 3.5. Propriedades da Mistura, HUNTSMAN, 2010

Análise	Método	Valores⁽¹⁾
Proporção de Mistura em peso	Visual	100:9
Tempo de Uso a 25°C (min)	Visual	20 – 30
Tempo de Endurecimento a 25°C (horas)	Visual	6 – 8
Tempo de Cura a 25°C (dias)	Visual	3 – 5
50°C (horas)	Visual	20 – 24

3.2 BLISTER TEST

A justificativa para o emprego da técnica de Blister Test neste estudo está ancorada na abordagem simplificada adotada pelas normas ISO 24817 e ASME PCC-2, referentes à qualificação e projeto de reparos em tubulações com compósitos. Essas normas não consideram o efeito da curvatura da tubulação sobre a energia de fratura, tratando o problema como uma delaminação entre uma chapa plana de aço e um laminado compósito, configuração essa que o

Blister Test reproduz. Inicialmente proposto por Dannenberg (1961) para analisar a adesão de revestimentos orgânicos a superfícies metálicas, o método foi refinado por Hinkley (1983) para filmes poliméricos e aprimorado por contribuições de Gent e Lewandowski (1987), Liechti e Hanson (1988), e Liechti e Shirani (1994). A implementação específica desta técnica neste trabalho é apresentada na Figura 3.4 (SATHLER, 2021).



Figura 3.4 - Blister Test, SATHLER (2021).

Os experimentos de Blister Test foram realizados no Laboratório de Ensaios em Dutos (LED), utilizando chapas de aço carbono AISI 1020 com espessura de 12,7 mm, nas quais foram usinados furos centralizados de 25,4 mm (1”) de diâmetro.

3.2.1 Mecanismos de Falha em Juntas Unidas por Colagem

Nas juntas coladas, dois tipos de fratura foram analisados: a fratura decoesiva (ou adesiva), que se manifesta na interface entre o adesivo e o substrato, e a fratura coesiva, que ocorre no interior do adesivo, conforme ilustrado na Figura 3.5 (BARCIA, 2003).

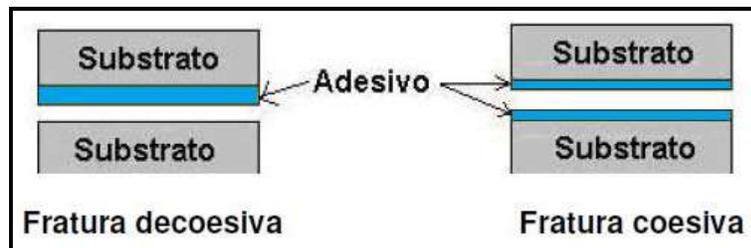


Figura 3.5 - Tipos de Fratura em Juntas Coladas, Adaptado de BARCIA (2003).

É esperado que a fratura coesiva predomine em condições de adesão adequada, isento de defeitos na região colada, enquanto a fratura decoesiva pode ser induzida por preparações insuficientes da superfície, deterioração do adesivo, cura incompleta ou processos de colagem

inadequados. Aspectos geométricos, como variações na espessura ideal do adesivo ou erros no dimensionamento da ancoragem, também podem determinar o modo de falha.

A Figura 3.6 apresenta a placa compósita após a realização do teste, revelando o descolamento do substrato metálico.



Figura 3.6 - Placa de Compósito Laminado Após Teste, SATHLER (2021).

3.2.2 Realização dos ensaios

Os testes foram planejados para determinar a pressão de ruptura logo após a aplicação do adesivo nos substratos, com a colagem efetuada em intervalos de 0, 4, 8 e 12 minutos após a mistura da resina com o endurecedor, totalizando 36 amostras (9 por intervalo). Verificou-se que, após 15 minutos, o adesivo, embora ainda não totalmente curado — processo que requer cerca de 5 dias —, já não apresentava condições de aplicabilidade devido à perda de fluidez. Todos os ensaios hidrostáticos foram executados após 7 dias de cura, assegurando a consolidação das propriedades do sistema. O descolamento entre o laminado compósito e o substrato foi esquematizado na Figura 3.7, conforme Sathler et al. (2021). A pressurização foi conduzida por meio de uma máquina hidrostática (Figura 3.8), conectada à placa por uma mangueira (Figura 3.9), com a pressão elevada manualmente por uma válvula até o descolamento ser observado (Figura 3.10).

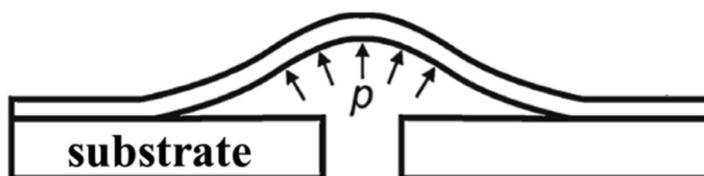


Figura 3.7 - Representação Esquemática do Descolamento entre o Laminado e o Substrato, Sathler et al. (2021).



Figura 3.8 - Sistema de Teste Hidrostático, 2021.



Figura 3.9 - Blister Test Pressurizado, 2021.



Figura 3.10 - Falha Típica (Descolamento), SATHLER(2021)

3.3 EQUAÇÕES DE GOVERNO NORMALIZADAS

Este estudo propõe um novo critério de falha para sistemas de reparo com compósitos em tubulações, fundamentado na normalização das equações governantes do golpe de aríete. A análise inicial assume o escoamento de um fluido invíscido em uma instalação composta por reservatório, tubo e válvula, onde o transiente é gerado pelo fechamento instantâneo da válvula. As variações de pressão são analisadas com base em uma forma adimensional das equações do golpe de aríete. Essa formulação revela os grupos adimensionais mais importantes do fenômeno.

Utilizando as variáveis adimensionais $x^* = x/L$, $t^* = tc_f/L$, $p^* = (p - p_0)/p_{ref}$, $v^* = v/v_0$, onde L é o comprimento do tubo, v_0 e p_0 são, respectivamente, a velocidade antes do transiente em uma determinada posição e a pressão de referência, as equações de compatibilidade podem ser reescritas na forma adimensional como:

$$\pm \frac{p_{ref}}{\rho_f c_f v_0} \frac{dp^*}{dt^*} + \frac{dv^*}{dt^*} = 0, \text{ ao longo de } \frac{dx^*}{dt^*} = \pm 1 \quad (3.1)$$

Para normalizar essas equações, a pressão de referência deve ser da mesma ordem de grandeza do produto $\rho_f c_f v_0$. Nota-se que os parâmetros do material e da geometria do tubo (E, ν, R, e), além dos parâmetros do fluido (K), estão encapsulados na velocidade da frente de onda c_f .

No presente estudo, o transiente é gerado pelo fechamento rápido de uma válvula, de modo que a velocidade próxima à válvula é nula ao final da manobra de fechamento. Assim, a pressão de referência pode ser tomada como igual ao aumento de pressão de Joukowsky, Δp (FERRAS, 2018):

$$\Delta p = -\rho_f c_f \Delta v \quad (3.2)$$

onde Δv é a variação de velocidade imediatamente próxima à válvula ($\Delta v = 0 - v_0$), de modo que a Eq. (3.8) pode ser escrita como:

$$\pm \frac{dp^*}{dt^*} + \frac{dv^*}{dt^*} = 0 \text{ ao longo de } \frac{dx^*}{dt^*} = \pm 1 \quad (3.3)$$

A Eq. (3.3) depende das propriedades elásticas do remendo metálico, do diâmetro do defeito e da espessura do remendo. A camada adesiva é considerada uma superfície, e todas as informações sobre o adesivo, espessura da camada adesiva e tratamento superficial devem ser contabilizadas por γ_{CR} . O valor de γ_{CR} pode ser determinado experimentalmente por meio de

um teste hidrostático, no qual a pressão é aumentada de forma monótona até a falha (quando ocorre vazamento), em uma pressão P_f .

Esta expressão é bastante semelhante às encontradas nas normas ASME PCC-2 e ISO 24817 para sistemas de reparo com compósitos. Esse critério é conservador, e um procedimento estatístico para obter experimentalmente uma estimativa inferior γ_{LCL} para essa taxa crítica de liberação de energia γ_{CR} pode ser encontrado nessas referências.

As normas ASME PCC-2 e ISO 24817 foram desenvolvidas assumindo uma pressão operacional constante, sendo a espessura do compósito dimensionada em função dessa pressão, com um fator de segurança apropriado. Como o comportamento do reparo é assumido como elástico, a teoria também se aplica a pressões variáveis. No entanto, devido a erros operacionais (como fechamentos abruptos de válvulas), a pressão pode oscilar significativamente acima da pressão operacional.

Este é precisamente o foco do presente estudo: fornecer uma correção simples para o dimensionamento da espessura do reparo considerando transientes de pressão, com base na pressão operacional e na velocidade do fluido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos casos de estudo a seguir, o fluido considerado é água a 20°C, o comprimento do tubo é de 271 m e o fluxo mássico é de 5 kg/s. O material do tubo é aço APIL Gr B, assumindo-se que seu módulo de Young e coeficiente de Poisson são, respectivamente, $E = 200GPa$ e $\nu = 0.3$. Neste contexto, dois casos de estudo são analisados. O diâmetro externo do tubo em ambos os casos é de 168,3 mm, enquanto a espessura é de 7,11 mm (schedule 40 - NBR 5590) para o caso 1 e de 10,97 mm (schedule 80 - NBR 5590) para o caso 2. As condições de contorno para um transiente hidráulico em uma instalação do tipo reservatório-tubo-válvula, supostamente gerado pelo fechamento instantâneo da válvula, são definidas como:

$$\begin{aligned} p(x = 0, t) &= p_{res}, \\ v(x = L, t) &= 0. \end{aligned} \tag{4.1}$$

Na Eq. (4.1), p_{res} representa a pressão do reservatório, assumida como 1 MPa em todas as simulações. Para obter soluções aproximadas do problema de valor inicial e de contorno governado pelas Eq. (3.2) e (3.3), é necessário realizar um processo de integração ao longo das curvas características. Para atingir esse objetivo, utiliza-se uma malha discreta das variáveis independentes, considerando um domínio espaço-temporal discretizado em que $x_k = (k - 1)\Delta x$ e $t_i = t_{i-1} + \Delta t$, para $k = 1, \dots, N + 1$, $i = 1, 2, \dots$, com $t_0 = 0$, $\Delta x = L/N$ e $\Delta t = \Delta x/c_f$. Com essa escolha da malha espaço-temporal discreta, a condição de estabilidade de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) é automaticamente satisfeita, permitindo que as equações de compatibilidade sejam integradas exatamente no plano $t - x$ ao longo das curvas características, para $k = 2, \dots, N$ (ANDRADE *et al.*, 2023). O valor de N adotado em todas as simulações apresentadas neste trabalho é 50.

4.1 PRESSÕES ALCANÇADAS

A Tabela 4.1 apresenta as pressões de falha obtidas para diferentes intervalos de aplicação após a mistura da resina com o endurecedor, intervalo esse que será denominado Tempo Inicial de Aplicação do Adesivo t_i .

A Figura 4.1 demonstra graficamente os resultados obtidos. Percebe-se que o tempo de aplicação de 12 minutos é o que apresenta pressão consideravelmente superior em relação aos demais tempos estudados.

Quadro 4.1 - Pressões de Falha

Testes realizados – Pressões de falha alcançadas (bar)				
Tempo	0 min	4 min	8 min	12 min
Amostra 1	10.14	9.58	9.58	15.72
Amostra 2	10.27	14.27	9.65	16.55
Amostra 3	11.45	15.17	10.55	17.65
Amostra 4	11.93	15.72	12.825	21.17
Amostra 5	16.07	15.86	12.965	23.58
Amostra 6	12.76	18.96	13.79	25.79
Amostra 7	12.48	13.31	6.969	20.68
Amostra 8	14.20	11.58	9.589	19.31
Amostra 9	15.79	18.13	11.93	22.75
Mínimo	10.14	9.58	6.963	15.72
Máximo	16.07	18.96	13.79	25.79
Amplitude	5.93	9.38	6.83	10.07
Média	12.79	14.73	10.87	20.36
Desvio Padrão	2.05	2.80	2.06	3.18
Coefficiente de variação (%)	16.02	19.00	18.90	15.60

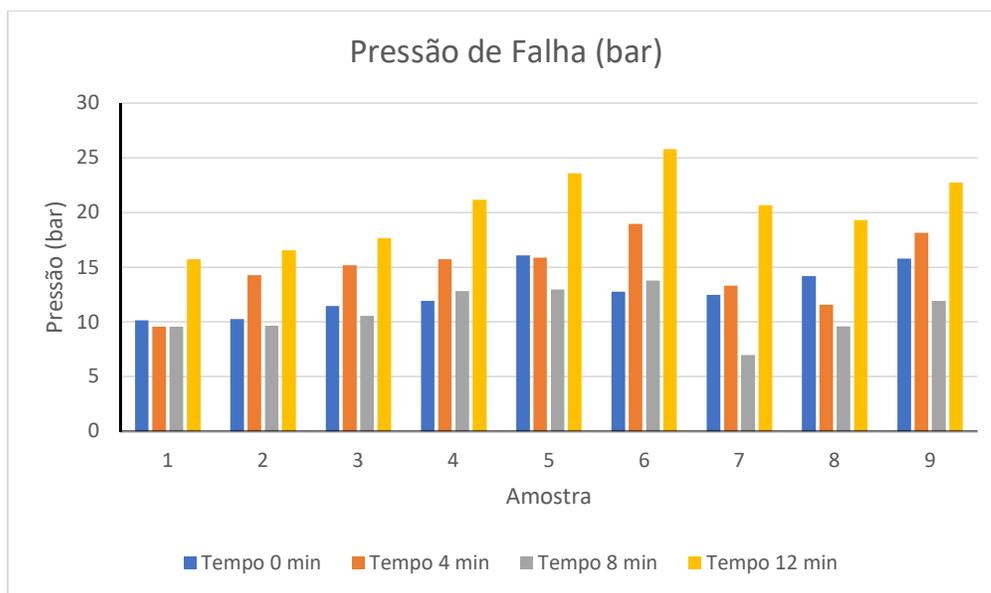


Figura 4.1 – Pressões de falha alcançadas.

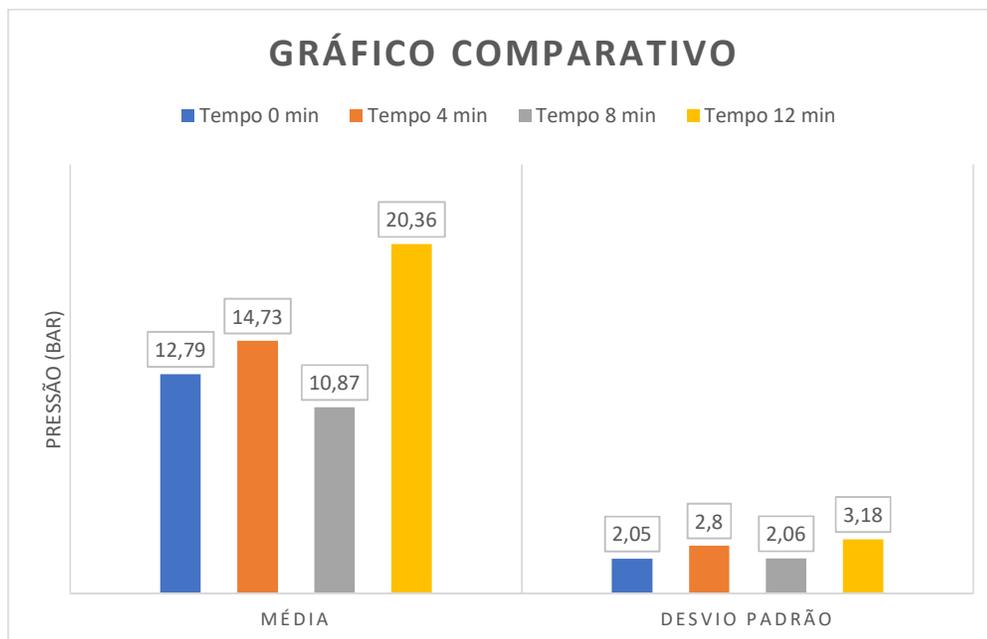


Figura 4.2 – Média e desvio padrão para cada intervalo de tempo.

Apenas o grupo de 12 minutos pode ser considerado estatisticamente diferente dos demais, com um nível de significância de 0,05. Pode-se notar que a pressão de falha tende a ser maior quando a placa é colada 12 minutos após a mistura da resina com o agente de cura ("endurecedor") na camada adesiva de um sistema de reparo compósito.

4.1.1 Um novo critério para a espessura do remendo compósito

A Eq. (2.32) para o valor crítico da pressão é a mesma apresentada nas normas ISO 24871 e ASME PCC-2. Geralmente, assume-se uma pressão máxima de operação P_0 e, para um furo de diâmetro d , a espessura adequada do reparo é obtida a partir da Eq. (2.32), substituindo P_f por P_0 :

$$t = \left[\left(\frac{512}{3d^4} \right) \left[\left(\frac{E}{1-\nu^2} \right) \left\{ 0.001 (Y_{cr}/P_0^2) - \left[\frac{3}{64Gt} d^2 \right] \right\} - \frac{1}{\pi} d \right] \right]^{1/3} \quad (4.2)$$

No entanto, para considerar um eventual pico de pressão devido ao golpe de aríete, o valor P_0 na Eq. (4.2) deve ser corrigido pelo aumento de pressão de Joukowsky, Δp :

$$P_* = P_0 + \Delta p; \quad \Delta p = -\rho_f c_f \Delta v \quad (4.3)$$

Assim, a espessura adequada do reparo deve ser determinada por:

$$t_* = \left[\left(\frac{512}{3d^4} \right) \left[\left(\frac{E}{1-\nu^2} \right) \left\{ 0.001 (\gamma_{cr}/P_*^2) - \left[\frac{3}{64Gt} d^2 \right] \right\} - \frac{1}{\pi} d \right] \right]^{1/3} \quad (4.4)$$

Portanto, a espessura correta do reparo deve ser t_* , Eq. (4.4), em vez de t , Eq. (4.2).

4.1.2 Influência dos transientes de pressão na pressão de falha

Os picos de pressão foram normalizados (p^*) e comparados à equação de Joukowsky. Os resultados das simulações foram:

- Schedule 40: Pressão máxima = 1,33 MPa ($\Delta p = 0,33$ MPa, aumento de 33%), $p^* = 1$.
- Schedule 80: Pressão máxima = 1,35 MPa ($\Delta p = 0,35$ MPa, aumento de 35%), $p^* = 1$.
- A diferença de 0,02 MPa (6% maior em Schedule 80) foi atribuída à variação em c_f , devido à espessura do tubo.

Os valores de $p^* = 1$ indicam consistência com a equação de Joukowsky em ambos os casos. Contudo, fatores como atrito viscoso e acoplamento fluido-estrutura (não considerados) podem elevar os picos além de Joukowsky.

Para avaliar as capacidades do modelo em prever as respostas de pressão durante o fluxo transiente em tubos, a Figura 4.3 e a Figura 4.4 mostram uma comparação entre as respostas numéricas do modelo de transiente hidráulico com os dados experimentais.

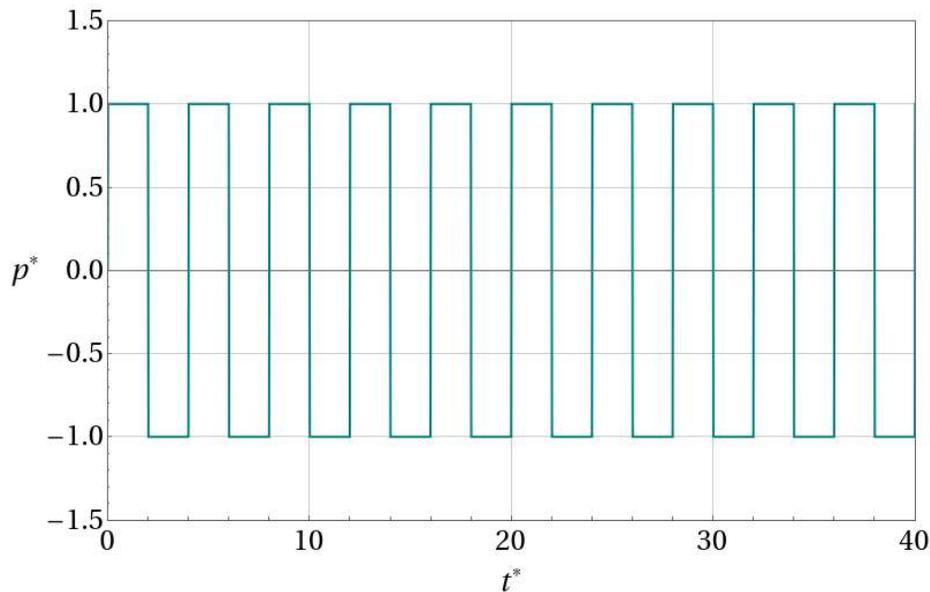


Figura 4.3 – Histórico de resposta da pressão normalizada no tubo APIL Gr B-Schedule 40.

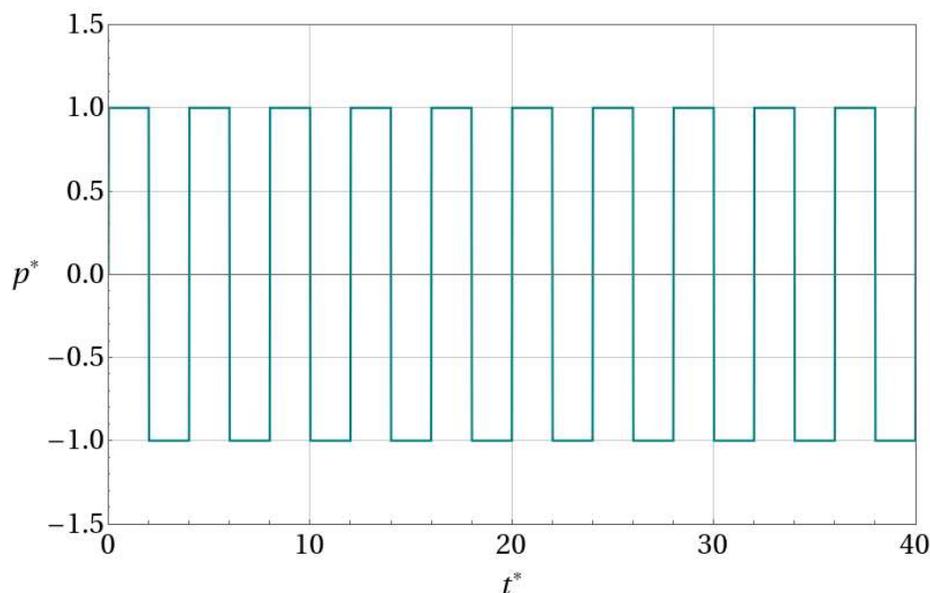


Figura 4.4 – Histórico de resposta da pressão normalizada no tubo APIL Gr B-Schedule 80.

A Figura 4.3 apresenta o histórico das respostas de pressão normalizadas quando o material do tubo é o APIL Gr B-Schedule 40, enquanto que a Figura 4.4 detalha o mesmo histórico para quando o material do tubo é o APIL Gr B-Schedule 80. Para o tubo APIL Gr B-Schedule 40 o valor absoluto da pressão registrado é de 1,33 MPa, o que corresponde a um aumento do transiente de 33% em relação ao estado inicial. Já para o tubo APIL Gr B-Schedule 80, com as alterações no diâmetro e na espessura do tubo, a velocidade da frente de onda sofre modificação, resultando em uma pressão máxima de 1,35 MPa nas proximidades da válvula, diferindo do valor de 1,33 MPa observado no caso anterior. Esses resultados reforçam a sensibilidade das respostas de pressão às variações geométricas e a robustez da normalização empregada no estudo.

4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

O estudo teve como premissa verificar dois aspectos principais:

1. **Influência do tempo de aplicação do adesivo na pressão de falha:** Avaliar o efeito do tempo de aplicação do adesivo (após a mistura da resina epóxi com o agente de cura) na pressão de falha de um sistema de reparo composto, com foco na taxa crítica de energia liberada (γ_{cr}) como parâmetro de adesão. Os tempos analisados foram 0, 4, 8 e 12 minutos.
2. **Efeitos do Golpe de Aríete:** Avaliar o impacto do golpe de aríete em tubos de aço APIL Gr B com espessuras diferentes (Schedule 40 e Schedule 80), focando nos

picos de pressão transitória e sua relação com a pressão de falha de remendos compostos.

4.2.1 Influência do tempo de aplicação do adesivo na pressão de falha

Os dados experimentais foram obtidos por meio de testes de blister, com a pressão de falha como variável resposta. A análise foi conduzida utilizando a técnica **One-Way ANOVA** com um nível de significância de 0,05 ($\alpha = 0,05$), considerando o tempo como fator de entrada em quatro níveis (0, 4, 8 e 12 minutos) e a pressão de falha como variável resposta. As premissas para a validade da análise paramétrica foram testadas:

- **Homocedasticidade:** Verificada pelos testes de Cochran-Bartlet ($p = 0,63 > 0,05$) e Levene ($p = 0,41 > 0,05$), indicando variâncias homogêneas entre os grupos;
- **Normalidade dos resíduos:** Confirmada pelos testes de Shapiro-Wilks ($p = 0,87 > 0,05$) e Lilliefors ($p \rightarrow 1 > 0,05$), mostrando que os resíduos seguem uma distribuição normal; e
- **Comparação entre grupos:** Realizada pelo teste LSD (*Least Significant Difference*) com $\alpha = 0,05$, para identificar diferenças específicas entre os tempos.

Os resultados indicaram que o tempo de aplicação é um fator estatisticamente significativo na pressão de falha ($p = 0,00083 \ll 0,05$), rejeitando a hipótese nula de ausência de efeito. O teste LSD mostrou que:

- Não houve diferença estatística entre as pressões de falha nos tempos de 0, 4 e 8 minutos, sugerindo que esses grupos pertencem a uma mesma população estatística.
- O tempo de 12 minutos apresentou uma pressão de falha significativamente superior ($p < 0,05$), sendo estatisticamente diferente dos demais.

Os resultados indicam que o tempo de aplicação afeta diretamente a pressão de falha, com o intervalo de 12 minutos otimizando o desempenho do reparo. Esse efeito está relacionado à taxa crítica de energia liberada (γ_{cr}), que caracteriza a resistência da interface adesiva entre o composto e o substrato. Para tempos de 0, 4 e 8 minutos, a ausência de diferença sugere que a formação da rede adesiva ainda não atingiu seu potencial máximo, resultando em valores de γ_{cr} próximos à média de $57 J/m^2$ ou ao limite inferior $\gamma_{LCL} = 31 J/m^2$ (DE LUCA *et al.*, 2023). Já aos 12 minutos, a maior pressão de falha implica um γ_{cr} superior, possivelmente devido a

uma adesão mais robusta próxima ao "*pot life*" do adesivo, embora esse parâmetro não tenha sido medido diretamente.

A dispersão da pressão de falha em reparos de campo, mencionada no estudo, pode ser parcialmente atribuída a variações no tempo de aplicação. Tempos subóticos (0 a 8 minutos) produzem adesões menos consistentes, enquanto o intervalo de 12 minutos maximiza γ_{cr} , reduzindo a variabilidade. Normas como ASME PCC-2 e ISO 24817 recomendam o uso de γ_{LCL} como estimativa conservadora, mas os resultados sugerem que otimizar o tempo de aplicação pode elevar γ_{cr} acima desse limite, melhorando a confiabilidade.

Além disso, a tecnologia de colagem adesiva ainda carece de diretrizes tão bem estabelecidas quanto as de juntas soldadas (BROCKMANN *et al.*, 2009). A forte dependência do desempenho em variáveis como o tempo de aplicação evidencia a necessidade de maior padronização e desenvolvimento de critérios objetivos para seleção de adesivos e otimização de processos.

4.2.2 Efeitos do Golpe de Aríete

A análise revela que a espessura do tubo influencia o pico de pressão transitória devido à alteração na velocidade da onda (c_f). A maior espessura em Schedule 80 (10,97 mm vs. 7,11 mm) reduz o termo KD/E_e , aumentando c_f e, conseqüentemente, Δp . A diferença de 0,02 MPa, embora pequena, reflete essa dependência física.

Comparando com o Estudo 1, a influência do tempo de aplicação do adesivo na pressão de falha, onde $\gamma_{cr} = 57 \text{ J/m}^2$ e $\gamma_{LCL} = 31 \text{ J/m}^2$, remendos com γ_{cr} próximo a 31 J/m^2 podem ser insuficientes para suportar tais transientes, enquanto valores acima de 57 J/m^2 ofereceriam maior segurança. A proposta de uma equação algébrica corrigida com base em Joukowski sugere ajustar a espessura do reparo para acomodar Δp , vinculando-o a γ_{cr} .

A variabilidade no comportamento de falha em campo pode ser explicada por esses transientes, que variam com as propriedades do tubo. Fatores adicionais, como atrito de Poisson e acoplamento de junção (FERRAS *et al.*, 2018; CAO *et al.*, 2022), poderiam amplificar os picos, aumentando a sollicitação sobre o reparo.

4.2.3 Considerações finais

Os dois estudos, embora distintos, convergem na importância da taxa crítica de energia liberada (γ_{cr}) como parâmetro-chave para o desempenho de reparos compostos. O Estudo 1 demonstra que o tempo de aplicação de 12 minutos maximiza a pressão de falha e γ_{cr} , oferecendo uma abordagem processual para otimizar a adesão. O Estudo 2 revela que transientes hidráulicos impõem cargas variáveis (1,33 a 1,35 MPa), que devem ser consideradas no projeto do reparo para garantir que γ_{cr} supere essas solicitações. Juntos, os resultados explicam falhas em campo e sugerem melhorias práticas e normativas, contribuindo para o avanço da engenharia de reparos em tubulações.

5 CONCLUSÕES

Este estudo investigou dois fatores críticos que afetam a eficácia de reparos com luvas compostas ou remendos aderidos em tubulações metálicas com danos por corrosão com perfuração total: o tempo de aplicação do adesivo e os picos de pressão resultantes do golpe de aríete.

A primeira análise experimental concentrou-se na influência do tempo de aplicação do adesivo após a mistura da resina epóxi com o agente de cura. Os resultados dos testes hidrostáticos de bolha mostraram que a pressão de falha pode variar significativamente em função desse intervalo de tempo, o que pode ser um fator determinante na dispersão dos valores de pressão de falha observados em reparos aplicados em campo. O tempo de aplicação de 12 minutos apresentou melhor desempenho, possivelmente por estar próximo ao *pot life* do material, permitindo a formação de uma estrutura mais densa e resistente. Com base nesses resultados, uma abordagem baseada na Mecânica da Fratura foi utilizada para introduzir um parâmetro de tenacidade (γ_{LCL}), que pode ser utilizado como um índice preliminar da eficácia da adesão, proporcionando uma estimativa conservadora da pressão de falha.

A segunda análise abordou a influência dos picos de pressão elevados, resultantes do golpe de aríete, sobre a resistência dos reparos. A análise demonstrou que os transientes hidráulicos podem impactar significativamente a pressão de falha, o que ajuda a explicar falhas inesperadas em campo, mesmo quando as condições operacionais parecem idênticas. Para mitigar esse efeito, foi proposta uma equação algébrica simples que permite ajustar a espessura do reparo, considerando o aumento de pressão de Joukowski somado à pressão operacional. Essa abordagem pode ser incorporada às normas ISO *Technical Specification 24817* e ASME PCC-2, tornando os critérios normativos mais conservadores e alinhados com cenários operacionais reais.

Os resultados deste estudo contribuem para o aprimoramento dos sistemas de reparo por compósitos, fornecendo diretrizes mais robustas para aumentar a confiabilidade estrutural das tubulações. A inclusão desses aspectos nos procedimentos normativos pode reduzir a ocorrência de falhas inesperadas e melhorar a segurança e a durabilidade dos reparos em campo.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS

Embora este trabalho proponha um critério alternativo que pode ser adotado como uma nova prática para o projeto de reparos compostos, diversos fenômenos críticos para algumas instalações de tubulação não foram contemplados na análise apresentada. Por exemplo, a cavitação e a interação fluido-estrutura, que podem amplificar os picos de pressão transitória além dos valores previstos pela equação de Joukowsky, foram desconsideradas nas simulações. Esses efeitos, mencionados em referências como Ferras *et al.* (2018) e Cao *et al.* (2022), poderiam influenciar a pressão de falha dos remendos e a taxa crítica de energia liberada (γ_{cr}), exigindo investigações futuras para avaliar sua relevância em sistemas reais. Além disso, o atrito viscoso, explicitamente excluído neste estudo, conforme indicado pela aderência à equação de Joukowsky, é outro fator crítico a ser considerado, uma vez que pode gerar efeitos de empacotamento de linha e elevar os picos de pressão acima dos 1,33 MPa e 1,35 MPa reportados (Wahba, 2008).

A análise de sistemas de tubulação complexos, incluindo variações no diâmetro ou espessura da tubulação e ramificações, também ficou fora do escopo deste trabalho. Os casos foram limitados a tubos de diâmetro externo constante (168,3 mm) e espessuras específicas (7,11 mm e 10,97 mm), sem considerar configurações mais heterogêneas que ocorrem em instalações industriais. Tais variações poderiam alterar a velocidade da onda (c_f) e os padrões de transientes hidráulicos, impactando os picos de pressão e, conseqüentemente, a solicitação sobre os reparos compostos. A inclusão do atrito viscoso nessas configurações complexas seria particularmente relevante, pois sua interação com geometrias variáveis poderia modificar ainda mais a dinâmica do fluido, afetando a carga imposta aos remendos.

Além disso, este trabalho assumiu que a interferência local causada pela presença do reparo na tubulação não afeta significativamente as respostas dos transientes hidráulicos. Essa suposição, simplificou as simulações, mas pode não ser válida em cenários onde o reparo modifica a rigidez local ou a dinâmica do fluxo, especialmente quando o atrito viscoso é considerado.

A análise do tempo de aplicação do adesivo (0, 4, 8 e 12 minutos) focou exclusivamente na pressão de falha e γ_{cr} , sem explorar como essas condições transitórias, potencialmente agravadas pelo atrito viscoso, poderiam interagir com o processo de cura do adesivo. Assim, estudos futuros devem avaliar se os transientes hidráulicos, incluindo os efeitos

viscosos, afetam a formação da interface adesiva e se o tempo ótimo de 12 minutos permanece válido sob tais condições dinâmicas.

Por fim, a integração dessas análises em um modelo mais abrangente poderia melhorar a predição do comportamento de falha dos reparos. A combinação dos efeitos do tempo de aplicação com os transientes hidráulicos, considerando fenômenos como cavitação, interação fluido-estrutura e atrito viscoso, oferece uma direção promissora para trabalhos futuros. Tal abordagem permitiria refinar as correções propostas para as normas ISO 24817 e ASME PCC-2, garantindo maior confiabilidade em aplicações práticas. Especificamente, modelar o atrito viscoso em simulações numéricas poderia quantificar seu impacto nos picos de pressão e na solicitação dos reparos, proporcionando uma base mais realista para o projeto e a validação de sistemas de reparo composto em cenários operacionais complexos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. B.; RAMOS, H. M. Water supply operation: diagnosis and reliability analysis in a Lisbon pumping system. **Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA**, v. 59, n. 1, p. 66-78, 2010.

ANDERSON, Ted L.; ANDERSON, Ted L. Fracture mechanics: fundamentals and applications. **CRC press**, 2005.

ANDRADE, Douglas Monteiro et al. Failure of composite repair systems used in corroded pipelines due to pressure transients. **Engineering Failure Analysis**, p. 109368, 2025.

ANDRADE, Douglas Monteiro; DE FREITAS RACHID, Felipe Bastos. A versatile friction model for Newtonian liquids flowing under unsteady regimes in pipes. **Meccanica**, v. 57, n. 1, p. 43-72, 2022.

ANDRADE, Douglas Monteiro; DE FREITAS RACHID, Felipe Bastos; TIJSSELING, Arris Sieno. A thermodynamically consistent model for hydraulic transients in metallic pipes undergoing elasto-viscoplastic deformations. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, v. 152, p. 104391, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.10.024>

ANTAKI, George A. Piping and pipeline engineering: design, construction, maintenance, integrity, and repair. **CRC Press**, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5590: Tubos de aço-carbono com ou sem solda longitudinal, pretos ou galvanizados - Especificação. Rio de Janeiro, 2008.

BARCIA, Fabio L.; AMARAL, Thiago P.; SOARES, Bluma G. Synthesis and properties of epoxy resin modified with epoxy-terminated liquid polybutadiene. **Polymer**, v. 44, n. 19, p. 5811-5819, 2003.

BERGANT, Anton; SIMPSON, Angus R.; TIJSSELING, Arris S. Water hammer with column separation: a review of research in the twentieth century. 2004.

BROCKMANN, Walter et al. Adhesive bonding: materials, applications and technology. **John Wiley & Sons**, 2009.

BRUNELLI, Deborah Dibbern. Materiais Compósitos Poliméricos. Departamento de Química, **Instituto Tecnológico de Aeronáutica**. Disponível em: <<https://livrozilla.com/doc/766078/materiais-comp%C3%B3sitos-polim%C3%A9ricos>>. Acesso em 20/01/2021. Brasil, 2021.

BUDHE, S.; BANEJA, M. D.; DE BARROS, Silvio. Composite repair system for corroded metallic pipelines: an overview of recent developments and modelling. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 25, n. 4, p. 1308-1323, 2020.

CALLISTER, William D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. **Editora GEN e LTC**, 7ª Edição, Rio de Janeiro, 2008.

CAO, Huade; WEI, Dingbang; XIA, Jianxin. Energy relationships in transient pipe flow with fluid–structural interaction. **Ocean Engineering**, v. 264, p. 112559, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112559>

CHAUDHRY, M. Hanif. Applied Hydraulic Transients. **(No Title)**, 2014.

DA COSTA MATTOS, H. S. et al. Analysis of a glass fibre reinforced polyurethane composite repair system for corroded pipelines at elevated temperatures. **Composite structures**, v. 114, p. 117-123, 2014.

DA COSTA MATTOS, H. S. et al. Failure analysis of corroded pipelines reinforced with composite repair systems. **Engineering Failure Analysis**, v. 59, p. 223-236, 2016.

DA COSTA MATTOS, H. S.; PAIM, L. M.; REIS, J. M. L. Analysis of burst tests and long-term hydrostatic tests in produced water pipelines. **Engineering Failure Analysis**, v. 22, p. 128-140, 2012.

DA COSTA-MATTOS, H. S. et al. An alternative methodology to repair localized corrosion damage in metallic pipelines with epoxy resins. **Materials & Design**, v. 30, n. 9, p. 3581-3591, 2009.

DA ROCHA, Rogerio Gomes; DE FREITAS RACHID, Felipe Bastos. Numerical solution of fluid–structure interaction in piping systems by Glimm's method. **Journal of Fluids and Structures**, v. 28, p. 392-415, 2012.

DA SILVA, Diogo Lieres; MIRANDA, Bruno Moura; DA COSTA MATTOS, Heraldo Silva. INFLUENCE OF THE ADHESIVES APPLICATION TIME ON COMPOSITE REPAIR SYSTEMS FOR METALLIC PIPES WITH THROUGH-THICKNESS

DAMAGE. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Heraldo-Da-Costa-Mattos/publication/378549671_INFLUENCE_OF_THE_ADHESIVES_APPLICATION_TIME_ON_COMPOSITE_REPAIR_SYSTEMS_FOR_METALLIC_PIPES_WITH_THROUGH-THICKNESS_DAMAGE/links/65df8a99adc608480aef9a10/INFLUENCE-OF-THE-ADHESIVES-APPLICATION-TIME-ON-COMPOSITE-REPAIR-SYSTEMS-FOR-METALLIC-PIPES-WITH-THROUGH-THICKNESS-DAMAGE.pdf

DANNENBERG, Hans. Measurement of adhesion by a blister method. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 5, n. 14, p. 125-134, 1961.

DAUDE, Frédéric; GALON, Pascal; SHAMS, Afaque. Numerical investigations of a two-way coupled fluid–structure interaction approach for fast transients in fluid-filled flexible piping systems. **Arabian Journal for Science and Engineering**, p. 1-26, 2023.

DE BARROS, Silvio et al. Using blister test to predict the failure pressure in bonded composite repaired pipes. **Composite Structures**, v. 211, p. 125-133, 2019.

DE FREITAS RACHID, Felipe Bastos; DA GAMA, Rogério Martins Saldanha; DA COSTA MATTOS, Heraldo. Modelling of hydraulic transient in damageable elasto-viscoplastic piping systems. **Applied mathematical modelling**, v. 18, n. 4, p. 207-215, 1994. [http://dx.doi.org/10.1016/0307-904X\(94\)90083-3](http://dx.doi.org/10.1016/0307-904X(94)90083-3)

DE LUCA, Camila R. et al. Addition of silica in the adhesive primer layer of composite systems used to repair leak defects in metallic pipelines. **Composite Structures**, v. 321, p. 117289, 2023.

DUAN, H.-F. et al. Relevance of unsteady friction to pipe size and length in pipe fluid transients. **Journal of hydraulic engineering**, v. 138, n. 2, p. 154-166, 2012.

ENNE, F. F. et al. Repair of through-wall corrosion damage in pipes using bonded metallic patches-influence of the patch thickness on the failure pressure. **The Journal of Adhesion**, v. 99, n. 7, p. 1168-1185, 2023.

FERRAS, David et al. One-dimensional fluid–structure interaction models in pressurized fluid-filled pipes: A review. **applied Sciences**, v. 8, n. 10, p. 1844, 2018. <https://doi.org/10.3390/app8101844>

GENT, A. N.; LEWANDOWSKI, L. H. Blow-off pressures for adhering layers. **Journal of applied polymer science**, v. 33, n. 5, p. 1567-1577, 1987.

GENTIL, Vicente. CORROSÃO. 6. ed. Rio de Janeiro: Genio (Gen LTC) - **Grupo Editora Nacional**, 356 p. (225336), 2011.

GHIDAOU, Mohamed S.; MANSOUR, Sameh GS; ZHAO, Ming. Applicability of quasisteady and axisymmetric turbulence models in water hammer. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 128, n. 10, p. 917-924, 2002.

GREEN, Albert Edward; NAGHDI, Paul Mansour. A theory of mixtures. **Archive for Rational Mechanics and Analysis**, v. 24, p. 243-263, 1967.

HADAD, D. K. *Epoxy resins chemistry and technology*. New York: C.A. May, 1089-1172 p., 1988.

HECK, Nestor Cezar. Introdução à Engenharia Metalúrgica. Disponível em: <<http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06638/IEM-Texto-0.pdf>>. Acesso em: 25/06/2020. Brasil, 2020.

HINKLEY, J. A. A blister test for adhesion of polymer films to SiO₂. **The Journal of Adhesion**, v. 16, n. 2, p. 115-125, 1983.
<http://dx.doi.org/10.1080/00218464.2022.2088283>

JOUKOWSKY, Dimitri. Beiträge zur Frage nach den Bedingungen der Vermehrung und des Eintritts der Konjugation bei den Ciliaten. **C. Winter**, 1898.

JUNIOR, MM Watanabe; REIS, J. M. L.; DA COSTA MATTOS, H. S. Polymer-based composite repair system for severely corroded circumferential welds in steel pipes. **Engineering Failure Analysis**, v. 81, p. 135-144, 2017.

KERAMAT, Alireza et al. Experimental investigation of transients-induced fluid-structure interaction in a pipeline with multiple-axial supports. **Journal of Fluids and Structures**, v. 93, p. 102848, 2020.

KOCH, Gerhardus. Cost of corrosion. **Trends in oil and gas corrosion research and technologies**, p. 3-30, 2017.

KUBRAK, Michał et al. Water hammer control using additional branched HDPE pipe. **Energies**, v. 14, n. 23, p. 8008, 2021.

LEISHEAR, Robert A. Nuclear Power Plant Fires and Explosions: Part IV—Water Hammer Explosion Mechanisms. In: **Pressure Vessels and Piping Conference**. American Society of Mechanical Engineers, 2017. p. V004T04A012.

LEISHEAR, Robert A. Water hammer causes water main breaks. **Journal of Pressure Vessel Technology**, v. 142, n. 2, p. 021402, 2020.

LIECHTI, K. M.; HANSON, E. C. Nonlinear effects in mixed-mode interfacial delaminations. **International Journal of Fracture**, v. 36, p. 199-217, 1988.

LIECHTI, K. M.; SHIRANI, A. Large scale yielding in blister specimens. **International Journal of Fracture**, v. 67, p. 21-36, 1994.

MATLAKHOV, Anatoliy Nikolaevich; MATLAKHOVA, Lioudmila Aleksandrovna. Corrosão e proteção dos materiais. **Paco e Littera**, 2021.

MINDLIN, RD0044. Influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropic, **elastic plates**. 1951.

OLIVEIRA, M. J. et al. Alternative surface treatments for the repair of through-wall corrosion damage in metallic pipes with bonded plates. **The Journal of Adhesion**, v. 98, n. 16, p. 2643-2661, 2022. <https://doi.org/10.1080/00218464.2021.1986395>

PAL, Susovan; HANMAIAHGARI, Prashanth Reddy; KARNEY, Bryan W. An overview of the numerical approaches to water hammer modelling: The ongoing quest for practical and accurate numerical approaches. **Water**, v. 13, n. 11, p. 1597, 2021.

PARIS, Paul; ERDOGAN, Fazil. A critical analysis of crack propagation laws. 1963.

PASCAULT, Jean-Pierre; WILLIAMS, Roberto JJ (Ed.). **Epoxy polymers: new materials and innovations**. John Wiley & Sons, 2009.

PETRIE, Edward M. Epoxy adhesive formulations. **(No Title)**, 2006.

PLOURABOUÉ, Franck. Review on water-hammer waves mechanical and theoretical foundations. **European Journal of Mechanics-B/Fluids**, 2024.

RACHID, FB Freitas; MATTOS, HS Costa. Modelling of pipeline integrity taking into account the fluid–structure interaction. **International journal for numerical methods in fluids**, v. 28, n. 2, p. 337-355, 1998. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0363\(19980815\)28:2<337::AID-FLD724>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0363(19980815)28:2<337::AID-FLD724>3.0.CO;2-6)

RACHID, Felipe B. Freitas; MATTOS, Heraldo S. Costa. Modelling the damage induced by pressure transients in elasto-plastic pipes. **Meccanica**, v. 33, p. 139-160, 1998. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004306202012>

RAPONI, O. D. A. Desenvolvimento de um módulo dielétrico para monitoramento da cura de resinas termorrígidas. Minas Gerais. Dissertação de Mestrado em Ciências em Materiais para Engenharia. **Universidade Federal de Itajubá**, 2017.

REIS, J. M. L.; COELHO, J. L. V.; DA COSTA MATTOS, H. S. A continuum damage model for glass/epoxy laminates in tension. **Composites Part B: Engineering**, v. 52, p. 114-119, 2013.

REIS, J. M. L.; COSTA, A. R.; DA COSTA MATTOS, H. S. Repair of damage in pipes using bonded GFRP patches. **Composite Structures**, v. 296, p. 115875, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115875>

ROSU, D.; MUSTATA, F.; CASCAVAL, C. N. Investigation of the curing reactions of some multifunctional epoxy resins using differential scanning calorimetry. **Thermochimica Acta**, v. 370, p. 105-110, 2001.

SAEED, Nariman; RONAGH, Hamid; VIRK, Amandeep. Composite repair of pipelines, considering the effect of live pressure-analytical and numerical models with respect to ISO/TS 24817 and ASME PCC-2. **Composites Part B: Engineering**, v. 58, p. 605-610, 2014. <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/pcc-2-repair-pressure-equipment-piping>

SAFFAR, A. et al. Studying the Effect of Water Hammer Shock Wave on Composite Repaired Patches Based on ASME PCC-2. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 21, p. 570-581, 2021.

SANTOS, R. G. S. Influência da interação carga-matriz sobre a cinética de cura de nanocompósitos de argila organofílica e resina epoxídica. **Universidade de São Paulo**. Lorena. 2009.

SATHLER, Julia Figueiredo et al. Alternative methods for fracture energy acquisition in the qualification of composite repair system. **Composite Structures**, v. 258, p. 113420, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113420>

SAUTEREAU, J. P. P. H.; VERDU, J.; WILLIAMS, R. J. J. *Thermosetting Polymers*. New York: Marcel Dekker Inc., 2002.

SCHMITT, C. et al. Water pipeline failure due to water hammer effects. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 29, n. 12, p. 1075-1082, 2006.

SERGIENKO, V. P. et al. Review on Materials for Composite Repair Systems. **Non-destructive Testing and Repair of Pipelines**, p. 169-189, 2018.

SHIGUE, C. Y. *et al.* Avaliação da cinética de cura de sistema epoxídico através de análise dielétrica. **8o Congresso Brasileiro de Polímeros**. [S.l.]: [s.n.], p. 747-748, 2005.

SMITH GONZAGA FILHO, Jaguarê; DE FREITAS RACHID, Felipe Bastos. Comparative analysis of unsteady friction models for pipe flows in light of the second law of thermodynamics. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 45, n. 2, p. 107, 2023.

SNEDDON, Ian Naismith. The distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 187, n. 1009, p. 229-260, 1946.

STREETER, V. L.; WYLIE, E. B.; BEDFORD, K. W. Fluid Mechanics McGraw-Hill. **Inc., New York, NY**, 1985.

TELLES, Pedro. C. Silva. Tubulações Industriais: Materiais, Projeto, Montagem. Livros Técnicos e Científicos. **Editora LTC**. 10ª Edição. Brasil, 2001.

The Dow Chemical Company. "Formulation with Dow Epoxy Resins". **Catálogo Técnico**. Midland Michigan. p.1-36, 1976.

TIJSSELING, A. S. Fluid-structure interaction in liquid-filled pipe systems: a review. **Journal of Fluids and Structures**, v. 10, n. 2, p. 109-146, 1996.

WAHBA, E. M. Modelling the attenuation of laminar fluid transients in piping systems. **Applied Mathematical Modelling**, v. 32, n. 12, p. 2863-2871, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2007.10.004>

WANG, Yang-yang et al. Stochastic failure analysis of reinforced thermoplastic pipes under axial loading and internal pressure. **China Ocean Engineering**, v. 36, n. 4, p. 614-628, 2022.