

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA EFETIVIDADE DE REPAROS COMPÓSITOS  
EM TUBULAÇÕES DE AÇO PRESSURIZADAS**

por

Daniel Luís da Silva

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, dezembro de 2022.

**AVALIAÇÃO DA EFETIVIDADE DE REPAROS COMPÓSITOS EM TUBULAÇÕES  
DE AÇO PRESSURIZADAS**

por

Daniel Luís da Silva  
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Coorientador: Dr. Leonel Echer

Aprovada por:

Prof. Dr. Felipe Tempel Stumpf ..... PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke ..... PPGE3M / UFRGS

Prof. Dr. Alberto Tamagna ..... Membro Externo

Prof. Dr. Felipe Roman Centeno  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 14 de dezembro de 2022

*Dedico esse trabalho aos meus pais, Dejalmo (in memoriam) e Ana, à minha esposa, Camila e à  
minha filhota, Mariana.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por todas as oportunidades recebidas. Gostaria de agradecer também à minha família, aos meus pais, irmãos, esposa e à minha filha por todo apoio e incentivo para que eu sempre continue investindo nos meus estudos e para meu progresso pessoal.

Agradeço ao meu orientador Ignacio Iturrioz e ao meu coorientador, Leonel Echer, pela mentoria de excelência a mim despendida durante a elaboração dessa dissertação. Também agradeço à Boris Rojo Tanzi, que muito contribuiu durante a etapa dos ensaios de campo para essa pesquisa.

Agradeço à Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) por acreditar no meu potencial e me possibilitar associar os conhecimentos obtidos na academia durante minha vida profissional.

Finalmente, agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela excelência do programa de mestrado, que tanto contribuiu para a minha qualificação como profissional.

## **RESUMO**

A presente pesquisa tem como objetivo principal estudar o comportamento de reparos construídos com material compósito de fibras de vidro e resina polimérica para a aplicação em tubulações de aço pressurizadas internamente. Para tanto, foi projetada e construída uma tubulação para ensaio, na qual foi inserido artificialmente um defeito. A tubulação foi posteriormente reparada através da aplicação de um compósito projetado de acordo com as normas de projeto mais difundidas, observando o comportamento deste reparo às pressões internas impostas durante os testes hidrostáticos da tubulação. Foi provido um sistema de aquisição de dados especificamente construído para a pesquisa, com o objetivo de analisar os dados de emissões acústicas durante a pressurização da tubulação. Após a realização dos testes hidrostáticos, foram realizados ensaios não destrutivos complementares para avaliar a qualidade do reparo e sua aplicabilidade prática no meio industrial. Avaliações e conclusões sobre a utilidade das normas de projetos de reparos compósitos, sobre as questões que envolvem o estudo prévio da mecânica da fratura e os cuidados que devem ser levados em consideração na realização dos ensaios de emissões acústicas, são itens tratados também na presente pesquisa.

Palavras-chave: Compósitos; Reparos; Tubulações; Emissões Acústicas; Defeitos.

## **ABSTRACT**

The main objective of this research is to study the behavior of composite repairs (glass fibers and polymeric resin) for application in internally pressurized steel pipes. For this purpose, a piping was designed and built, in which a defect was artificially applied. The piping was repaired with a composite designed in accordance with the most disseminated design standards, observing the behavior of this repair to the internal pressures imposed during the hydrostatic tests of the piping. A data acquisition system specifically built for the research was provided, with the objective of analyzing the acoustic emissions data during the pressurization of the piping. After perform the hydrostatic tests, complementary non-destructive tests were carried out to evaluate the quality of the repair and its practical applicability in the industrial environment. Assessments and conclusions on the usefulness of the standards for composite repair projects, on issues involving the prior study of fracture mechanics and the care that must be taken when testing acoustic emissions, are items addressed by this research.

**Keywords:** Composites; Repairs; Piping; Acoustic Emissions; Defects.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	Contextualização .....	12
1.2	Estado da Arte em Reparo Utilizando Materiais Compósitos em Tubulações.....	16
1.3	Justificativa.....	21
1.4	Objetivos.....	23
1.5	Contribuição da Presente Pesquisa .....	24
1.6	Organização do Trabalho.....	25
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>27</b>
2.1	Tubulações Industriais.....	27
2.1.1	Cálculo da Pressão Máxima Admissível para Tubulações e Flanges de Tubulações.....	28
2.1.2	Morfologia dos Processos Corrosivos em Tubulações de Aço .....	30
2.1.3	Análise da Mecânica da Fratura em Cilindros Pressurizados .....	31
2.2	Reparos em Tubulações.....	35
2.3	Materiais Compósitos .....	37
2.3.1	Conceitos e definições .....	38
2.3.2	Danos em compósitos reforçados com fibras .....	40
2.3.3	Seleção dos Compósitos .....	42
2.3.4	Resistência dos Materiais Compósitos Reforçados com Fibras Contínuas.....	45
2.4	Normas para reparos compósitos para tubulações.....	55
2.4.1	Norma ISO 24817 – Reparos compósitos para tubulações - qualificação e projeto, instalação, testes e inspeção.....	55
2.4.2	Norma ASME PCC-2 – Reparos não Metálicos e Colados .....	56
2.4.3	Breve Comparação entre as Normas ISO 24817 e ASME PCC-2 Parte 4.....	56
2.5	Técnicas de Ensaio Não Destrutivos.....	60
2.5.1	Ensaio de Emissões Acústicas .....	61
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>65</b>
3.1	Descrição Geral do Experimento.....	65
3.2	Projeto e Construção da Tubulação .....	65
3.3	Inserção da Descontinuidade na Tubulação .....	69
3.4	Estabelecimento dos Limites de Pressão Admissível.....	71
3.5	Procedimento de Dimensionamento do Reparo Aplicado.....	73
3.5.1	Estimativa Preliminar do Número de Camadas de Fibras.....	76
3.6	Procedimento de Aplicação do Reparo de Material Compósito.....	79
3.7	Procedimento de Teste Hidrostático e Aquisição de Sinais de Emissões Acústicas....	83
3.7.1	Aquisição e processamento de dados oriundos emissões acústicas .....	89

3.8	Ensaaios Não Destrutivos Complementares .....	91
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>93</b>
4.1	Discussão das Questões que Envolvem o Projeto de Reparos Compósitos .....	93
4.2	Avaliação dos Resultados dos Testes de Pressurização da Tubulação.....	94
4.3	Avaliação dos Dados de Emissões Acústicas.....	95
4.4	Avaliação dos Ensaaios Complementares.....	99
	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>102</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>105</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>108</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.1 - Impacto de vazamento de óleo na Baía de Guanabara .....	15
Figura 1.1.2 - Medidas de contenção no desastre ambiental da Baía de Guanabara.....	14
Figura 1.1.3 - Contaminação de rios por vazamento de petróleo no PR.....	14
Figura 1.1.4 - Exemplo de corrosão severa.....	15
Figura 2.1.3.1 - Modos básicos de abertura da uma trinca. ....	32
Figura 2.1.3.2 - Equilíbrio de tensões.....	34
Figura 2.2.1 - Reparo do tipo duas “meia canas” .....	35
Figura 2.2.2 - Reparo do tipo abraçadeira aparafusada. ....	36
Figura 2.3.2.1 – Principais mecanismos de falha em compósitos .....	41
Figura 2.3.4.1 - Compósito de camada única de fibras contínuas alinhadas sob carregamento uniaxial. ....	46
Figura 2.3.4.2 - Laminado de várias camadas. ....	54
Figura 2.3.4.3 - Tensões Principais em Cilindros Pressurizados I e II.....	54
Figura 2.5.1.1 - Sistema de coleta de sinais.....	62
Figura 2.5.1.2 - Parâmetros de Análise de Emissões Acústicas. ....	63
Figura 3.2.1 - Desenho da Tubulação Ensaçada. ....	67
Figura 3.2.2 (a) Preparação de bisel da tubulação para soldagem.....	68
Figura 3.2.2 (b) - Execução do ponteamto para fixação dos flanges.....	68
Figura 3.2.2 (c) -Flange ponteadado e alinhado, preparado para solda de enchimento .....	68
Figura 3.2.2 (d) - Execução de soldagem das conexões auxiliares. ....	68
Figura 3.2.2 (e) - Acabamento da solda das conexões .....	69
Figura 3.2.2 (f) - Conexões completamente instaladas. ....	69
Figura 3.2.2 (g) - Conclusão da etapa de pintura.....	69
Figura 3.2.2 (h) - Acabamentos. ....	69
Figura 3.4.1 -Vista esquemática da descontinuidade inserida na tubulação. ....	70
Figura 3.4.2 - Aspecto geral da trinca. ....	71
Figura 3.4.3 - Medição do comprimento da trinca na parede interna e externa .....	71
Figura 3.4.4 - Largura da trinca imposta Largurada trinca imposta.....	71
Figura 3.5.1 - Representação esquemática da fibra plana utilizada nos ensaios. ....	74
Figura 3.5.1.1- Curvas de temperatura média. ....	77
Figura 3.6.1 - Visão geral do reparo previsto antes da instalação.....	79
Figura 3.6.2 - Visão interna da descontinuidade e aspecto do reparo na superfície externa....	81
Figura 3.6.3 -Detalhe do apresilhamento do reparo para espera da cura do compósito .....	82

Figura 3.6.4 - Visão geral da tubulação, após o apresilhamento do reparo.....	82
Figura 3.6.5 - Visão geral da tubulação após a cura inicial do reparo.....	82
Figura 3.6.6 - Aspecto do reparo após a cura inicial.....	82
Figura 3.7.1 (a) - Visão geral da tubulação já com o reparo finalizado .....	83
Figura 3.7.1 (b) - Tubulação após desbaste da espessura de reparo.....	83
Figura 3.7.2 - Grupos de riscos estabelecidos pela N-2688 para testes de pressão.....	84
Figura 3.7.3 Patamares e tempos adotados no teste hidrostático inicial da tubulação. ....	85
Figura 3.7.4 - Enquadramento no Grupos de riscos estabelecidos pela N-2688.....	86
Figura 3.7.5 - Patamares de pressão e tempos adotados na primeira etapa de testes hidrostáticos.....	86
Figura 3.7.6 - Enquadramento no Grupos de riscos estabelecidos pela N-2688.....	88
Figura 3.7.7 - Patamares de pressão e tempos adotados na segunda etapa de testes hidrostático. ....	88
Figura 3.7.1.1 - Arranjo da instrumentação instalada para a aquisição dos sinais de emissões acústicas.....	89
Figura 3.7.1.2 - Computador acoplado ao sistema de aquisição de dados. ....	90
Figura 3.7.1.3 - Padrão de sinal esperado de ser identificado na análise de emissões acústicas .....	91
Figura 4.3.1 - Sinal obtido após aplicação de filtro carregamento da tubulação até a pressão de 6,86 MPa, após a remoção de 25% da sua espessura e limitaram-se à análise do sensor piezolétrico I.....	96
Figura 4.3.2 - Trecho do sinal, onde foi identificado um possível padrão de sinal de emissão acústica.....	97
Figura 4.3.3 - Sobreposição do sinal filtrado, considerando o filtro passa banda entre 25 kHz e 100 kHz e entre 5 kHz e 25 kHz.....	97
Figura 4.3.4 - Sobreposição do sinal filtrado, considerando uma janela de 0,15 s.....	98
Figura 4.3.5 - Aspecto do reparo pós falha.....	100
Figura 4.3.6 - Aspecto do reparo pós ensaio de líquidos penetrantes.....	100
Figura 4.3.7 - Inserção da sonda para realização de ensaio de visualização boroscópica.....	101
Figura 4.3.8 - Aspecto da trinca na face interna do substrato metálico.....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.3.3.1(a) - Classes de fibras de vidro previstas na ASTM D578, com as respectivas composições químicas. ....	44
Tabela 3.2.1 - Lista de Componentes da Tubulação.....	67
Tabela 3.5.1 - Propriedades Mecânicas da fibra de vidro utilizada em configuração de tecido... ..	74
Tabela 3.5.2 -Propriedades mecânicas da base polimérica utilizada.....	75
Tabela 3.5.3 Propriedades mecânicas de um compósito bidirecional típico feito com tecido de fibra de vidro (0/90) e matriz epóxi.....	76
Tabela 3.5.1.1 - Valores das propriedades físico-químicas utilizadas no dimensionamento do reparo compósito. ....	78
Tabela 3.6.1 - Configuração de camadas do reparo adotado.....	80

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	tamanho característico da trinca.
$c$	índice dependente do tipo de flange e fixação, conforme figura UG-34 da Norma ASME VIII, Divisão 1.
$C$	sobre espessura de corrosão de uma tubulação.
$CVM$	resultado em Joules para o teste de impacto Charpy com entalhe em “V”.
$d$	comprimento crítico de uma fibra.
$D$	diâmetro externo de uma tubulação.
$E$	coeficiente de eficiência de uma solda.
$f$	fator de serviço conforme norma ISO 24817.
$f_T$	fator de redução devido à temperatura para a norma ASME PCC-2.
$f_{T2}$	fator de redução devido à temperatura norma ISO 24817.
$f_{leak}$	fator de serviço conforme norma ASME PCC-2.
$E$	módulo de elasticidade
$F$	fator geométrico para cálculo do fator de intensidade de tensão de um defeito.
$G$	módulo de cisalhamento do laminado a ser utilizado em um reparo.
$H_g$	braço de momento ao qual está exposta uma junta de vedação.
$KI$	fator de intensidade de tensão para a geometria na presença de um defeito.
$KIC$	tenacidade à fratura do material
$lc$	comprimento crítico de uma fibra.
$L$	medida de diâmetro entre os furos de fixação de um flange cego.
$P$	pressão manométrica agindo internamente à uma tubulação ou componente.
$P_{MTA}$	pressão máxima de trabalho admissível em uma tubulação.
$P_{proj}$	pressão de projeto de uma tubulação.
$P_t$	pressão de teste.
$R$	raio interno da uma tubulação.
$R_m$	raio médio considerando a espessura da parede de uma tubulação.
$Sh$	tensão admissível para o material de uma tubulação.
$t$	espessura de uma tubulação.
$t_h$	espessura mínima de um conjunto flange.
$t_{min}$	espessura mínima de um reparo laminado.

$T_{amb}$	temperatura ambiente.
$T_d$	temperatura de projeto de um reparo laminado.
$T_m$	limite superior da temperatura de operação previsto de um reparo laminado.
$T_{test}$	temperatura de teste de um reparo laminado.
$W$	força imposta pelos parafusos sobre um flange.
$Y$	coeficiente de redução, função do tipo de material e temperatura de projeto de uma tubulação.
$\beta$	ângulo formado entre a direção do comprimento do defeito e a direção circunferencial de uma seção tubular.
$\varphi$	ângulo de orientação do defeito com relação ao eixo axial de uma tubulação.
$\gamma_{LCL}$	taxa de liberação de energia, com confiança mínima de 95% no teste de impacto.
$\nu$	coeficiente de Poisson.
$\sigma$	tensão de tração na ponta de uma trinca que atua no modo que propicia a falha.
$\sigma_c$	tensão circunferencial em um cilindro;
$\sigma_f$	limite de resistência à tração de uma fibra.
$\gamma_s$	densidade de Energia de Superfície

## 1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação trata da avaliação da efetividade do uso de reparos construídos com materiais compósitos em tubulações de aço pressurizadas, sendo o foco de interesse aquelas instaladas em unidades industriais de processamento contínuo, na indústria de óleo e gás, e sob condições específicas de trabalho.

Neste sentido, no primeiro capítulo é feita uma abordagem sobre a importância da indústria de petróleo e gás em um contexto histórico mundial e também nacional. A partir de tal contextualização, é pontuada a relevância deste campo de estudo, tanto no campo tecnológico, quanto no campo econômico. Por fim, são estabelecidos os objetivos da presente pesquisa.

### 1.1 Contextualização

Desde o início da indústria moderna de exploração e refino de petróleo, o rápido desenvolvimento tecnológico pôs em evidência a sua importância estratégica. O marco inicial desta indústria se deu em agosto de 1859, quando o americano Edwin Laurentine Drake perfurou o primeiro poço, na Pensilvânia, nos Estados Unidos. Passando pela hegemônica atuação do empresário John D. Rockefeller e o início da Primeira Guerra Mundial, cerca de 50 anos se passaram. Neste relativo curto lapso temporal, surgiram os submarinos movidos a motores a diesel e os aviões, que foram massivamente usados como armas decisivas no confronto que envolveu as principais nações do planeta.

Paralela à transformação das táticas militares trazidas pelo petróleo e o uso generalizado de seus derivados, ganhava corpo a indústria automobilística. Isso fez com que o petróleo fosse mais do que uma fonte estratégica de matéria-prima para uso militar: tornou-se essa fonte energética o motor da economia das principais nações do mundo.

A história do petróleo no Brasil começou na Bahia, no ano de 1858, com o decreto Nº 2266 assinado pelo Marquês de Olinda, que concedeu a José Barros Pimentel o direito de extrair mineral betuminoso, para fabricação de querosene de iluminação, em terrenos situados nas margens do Rio Maraú, na Província da Bahia (UNICAMP, 2018). Apesar das pesquisas prospectivas para extração de petróleo no Brasil terem se iniciado em período próximo às perfurações em solo americano, aqui, o desenvolvimento do setor se deu acentuadamente mais lento. Somente em 1930, cerca de setenta anos depois do início das pesquisas exploratórias e após vários poços perfurados sem sucesso, foram

encontradas evidências de existência de óleo nos arredores da cidade de Lobato-BA. Somente em 21 de janeiro de 1939, nesta mesma cidade, já tendo sido criado o Conselho Nacional de Petróleo - CNP, o petróleo foi finalmente comercialmente produzido.

O parque de refino no Brasil começou a ser desenvolvido nos anos 1930, processando matéria-prima importada, e foi na década de 1950 que foi instituído o monopólio estatal do petróleo no Brasil. A partir desse momento, foram realizados vários investimentos, que garantiram o aumento da produção e atendimento do mercado interno de derivados.

Dados do ano de 2017, obtidos do Banco de Dados Estatísticos do BNDES, davam conta que, naquele ano, o Brasil era o quinto maior mercado de derivados de petróleo do mundo. O país possuía 17 refinarias com capacidade instalada de refino de quase 2,3 milhões de barris por dia, sendo 56% desta capacidade instalada no Sudeste, 23% no Nordeste e 19% no Sul. A Petrobras detinha, na época, 98% da capacidade instalada.

A partir do início dos anos 2000, foi iniciado um novo ciclo, com diversas empresas brasileiras e estrangeiras da cadeia de petróleo e gás realizando investimentos na busca de aumento da capacidade de produção e melhoria da qualidade dos derivados produzidos. Foi também feito grande investimento para a busca da superação de desafios tecnológicos no setor.

Todavia, mesmo passando por um ciclo de investimentos massivos no desenvolvimento tecnológico do setor, alguns eventos reforçaram ainda mais a necessidade de intensificação do monitoramento e inspeção de sistemas em operação. Como exemplos (ver Figuras 1.1.1 até 1.1.3), destacam-se o episódio ocorrido em janeiro de 2000, quando um duto rompeu-se provocando um vazamento de 1,3 milhão de litros de óleo combustível nas águas da Baía da Guanabara, e o evento ocorrido em julho deste mesmo ano, que acarretou no vazamento de petróleo em grandes quantidades, na região metropolitana de Curitiba. Eventos como estes ainda estão, de certa forma, vivos na memória de muitos técnicos e engenheiros e, paradoxalmente, impelem que profissionais da área evitem a adoção de novas práticas arrojadas, consideradas inovadoras e menos difundidas. Esta afirmação se torna particularmente importante, quando se trata da manutenção e reparos de tubulações em operação de escala industrial.



Figura 1.1.1 - Impacto de vazamento de óleo na Baía de Guanabara [divulgação: Museu do Amanhã]



Figura 1.1.2 – Medidas de contenção no desastre ambiental da Baía de Guanabara [reprodução IG notícias].



Figura 1.1.3 – Contaminação de rios por vazamento de petróleo no PR [Foto: Sindipetro PR e SC].

Na indústria de petróleo e gás, grandes perdas de produção com potencial prejuízo ambiental e risco à segurança estão relacionados a processos corrosivos. Esses processos (ver Figura 1.1.4) podem ser retardados, entretanto não podem ser totalmente eliminados. Para que se possa ter dimensão dos prejuízos econômicos causados pelas diversas formas de corrosão em escala mundial, um estudo da National Association of Corrosion Engineers (Koch *et al.*, 2016), aponta que o custo global da corrosão é estimado em



US\$ 2,5 trilhões, o que equivale a 3,4% do Produto Interno Bruto (PIB) global do ano de 2013. Isso, ainda, sem considerar os prejuízos ambientais associados a este tipo de processo, algo extremamente difícil de se computar.



Figura 1.1.4 - Exemplo de corrosão severa [Environews Nigéria, 2022].

Paradas de manutenção não previstas e não planejadas têm correlação direta do efeito da corrosão sobre tubulações e dutos em operação na indústria de óleo e gás. Em muitos casos, onerosos e longos tempos de parada da produção são necessários para a descontaminação de sistemas visando à realização de atividades de corte e solda de reparo. Esse procedimento, além de acarretar grandes prejuízos econômicos, traz grandes riscos, dada a condição dificultada de descontaminação completa de alguns sistemas, que operam com hidrocarbonetos ou outros sistemas de produtos tóxicos e/ou inflamáveis.

Neste contexto, diversas iniciativas têm sido promovidas na busca de alternativas ao processo tradicional de soldagem. Destas, a alternativa mais promissora para substituição do processo tradicional de soldagem em campo é a utilização de materiais reforçados híbridos, chamados de compósitos, em suas mais variadas formas.

Com o objetivo de trazer luz ao que vem sendo desenvolvido em relação ao estudo dos materiais compósitos e sua aplicação dentro do tema proposto pela presente pesquisa, são abordados, a seguir, estudos de relevância no que pode ser considerado o estado da arte neste campo de pesquisa. Acredita-se que estudos como os discorridos a seguir, possam contribuir para a quebra de paradigmas quanto à adoção de procedimentos de reparos alternativos à soldagem tradicional na indústria e, dessa forma, contribuir para a redução de custos e para o aumento da disponibilidade dos ativos, através da difusão destes novos procedimentos.

## 1.2 Estado da Arte em Reparo Utilizando Materiais Compósitos em Tubulações

Apesar do conservadorismo marcante e compreensível quanto às práticas adotadas pelas indústrias na manutenção de dutos e tubulações industriais, o advento de novos materiais e o desenvolvimento de novos compósitos têm proporcionado novas possibilidades e impulsionado a realização de muitos estudos promissores nos últimos anos. Estes estudos têm sido fundamentais para impulsionar uma quebra do paradigma sobre a viabilidade de reparos permanentes em dutos e tubulações pressurizadas, construídos a partir de materiais compósitos. Este passo é vital para que estas novas técnicas sejam aceitas e incluídas nas normas que regem operações de manutenção e reparação de dutos.

Diversos estudos experimentais têm sido realizados, ao longo das últimas três décadas, com o objetivo de agregar conhecimento quanto ao comportamento de tubulações e dutos pressurizados quando reparados através de técnicas alternativas que consideram a aplicação de materiais compósitos. Neste sentido, podem ser citados Lim *et al.* (2015), que realizaram um estudo comparativo das diversas opções de reparo possíveis de tubulações de aço, confrontando as metodologias tradicionais, como enclausuramento com sobreposição de duas meias seções cilíndricas soldadas ou a instalação de abraçadeira metálica aparafusada sobre a área avariada, com as técnicas de reparo com material compósito.

O estudo de Lim *et al.* (2015) menciona que reparos feitos com a utilização de fibra de vidro reforçada com plástico são, em média, de 24% até 73% mais baratos, quando comparados à substituição do trecho danificado da tubulação de aço e o enclausuramento com sobreposição de duas meias seções cilíndricas soldadas. Os autores ponderam, no entanto, que o desempenho em longo prazo é a principal preocupação quando se trata de reparo feito com material compósito. O estudo concluiu que o dimensionamento do reparo não depende da forma do defeito e que os parâmetros mais importantes no desempenho de um reparo de material compósito são o diâmetro do tubo, a pressão e a resistência à tração do reparo.

O estudo experimental de Ayaz *et al.* (2016) considerou ensaios em reparos em corpos de provas constituídos de tubos de aço com trincas de 8 mm de comprimento, sobre as quais foram instalados reparos de materiais compósitos com espessuras, comprimentos e ângulos de orientação de fibras variáveis. Os diversos corpos de provas foram internamente pressurizados até a ocorrência da falha. Adicionalmente aos testes,

foi desenvolvido um modelo de elementos finitos (EF) para que se pudesse comparar os resultados dos ensaios aos resultados obtidos do modelo matemático. Os resultados do ensaio prático evidenciaram que a variação do ângulo de orientação das fibras resulta em variação da carga de falha e que o aumento da espessura do reparo também resulta no aumento da pressão de falha do reparo, porém não de forma proporcional.

Alexander (2007) investigou a viabilidade da aplicação das técnicas de reparo utilizando materiais compósitos em *risers* ligados a plataformas de petróleo. No caso de *risers offshore*, diferentemente da maioria das aplicações de tubulações e dutos *onshore*, os esforços principais são as cargas axiais e de flexão. Para tanto, foram desenvolvidos métodos analíticos e experimentais e o projeto de um sistema de reparo de material compósito à base de carbono, otimizado por simulação numérica, realizando testes de protótipo. Esta abordagem possibilitou a avaliação da tensão de cisalhamento na ligação do aço e o compósito e a tensão em ambos: no substrato metálico e no reparo, em diferentes estados de carga. De acordo com o autor, os resultados demonstraram que os modelos computacionais, juntamente com testes em escala real, representaram adequadamente o desempenho esperado do reparo compósito em *risers offshore* quando em serviço, considerando viável a aplicação dessa solução.

Já Shabibi *et al.* (2020), propuseram um procedimento de qualificação para a aplicação de reparos compósitos para reparos de dutos de alta pressão, realizando uma série de testes com tubos artificialmente danificados. Diversos métodos analíticos e numéricos foram realizados para examinar a eficácia de tais reparos, verificando o efeito do número de camadas com relação à efetividade do reparo, para o caso de trinca passante através de toda a espessura do tubo e para o caso de trinca não passante.

Diversos autores se dedicaram a analisar a eficácia das principais normas de projeto atualmente disponíveis para a especificação de reparos feitos com materiais compósitos para a aplicação em tubulações e dutos pressurizados internamente. Budhe *et al.* (2019) realizaram um estudo comparativo com relação ao resultado obtido no dimensionamento de reparos de materiais compósitos em um cilindro internamente pressurizado, a partir de códigos de Projeto mais difundidos (ISO 24817 e ASME PCC-2, Parte 4), comparando esses resultados com um modelo de EF desenvolvido para esse fim. O estudo realizado concluiu que as espessuras de reparo feitos de materiais compósitos com base na ISO 24817 e ASME PCC-2 são mais conservadores para defeitos de menor perda de parede e subdimensionado quando a espessura da perda de parede é superior a 70%. Os autores apontam para o fato de que os reparos do tipo envoltório feitos

com material compósito não são otimizados, na medida que existe material desnecessário ao redor de todo o perímetro da tubulação, o que aumenta o custo do reparo. Além disso, conforme os autores, as normas não consideram a deformação plástica e o encruamento no substrato metálico, que podem ocorrer em casos específicos, para determinar uma espessura de reparo de forma mais precisa. Os pesquisadores ressaltam, ainda, que as principais normas disponíveis não abrangem a seleção do material (fibra, resina e massa elástica para enchimento) e que a seleção dos materiais tem relação direta com o desempenho do reparo.

Barron (2016) e Dumitrescu *et al.* (2021) desenvolveram pesquisas bastante similares à pesquisa de Budhe *et al.* (2019), buscando verificar a análise de EF, a segurança dos reparos feitos com materiais compósitos, através das soluções analíticas propostas pelas normas ASME PCC-2 e ISO 24817.

A conclusão do estudo de Barron (2016) é crítica com relação à adequação das principais normas disponíveis para o dimensionamento de reparos compósitos. De acordo com este autor, nenhuma das duas normas citadas criam reparos seguros e duráveis, sobretudo, quando a perda de espessura das tubulações é severa, para tubulações em operação. Para baixas taxas de corrosões, os valores fornecidos pelas normas são extremamente conservadores, entretanto, para valores de corrosão mais acentuada, as normas não fornecem valores de espessuras de reparo adequados para garantia dos fatores de segurança originalmente previstos para o substrato metálico. O autor destaca que a ferramenta de EF é a que apresenta os resultados mais seguros e otimizados com relação ao dimensionamento dos reparos compósitos, contudo, considera que a aplicação desta solução no meio industrial não se torna prática e sugere revisões nas normas para melhor atendimento e segurança dos reparos aplicados no ramo industrial.

Já o estudo de Dumitrescu *et al.* (2021) concluiu que o método de reparo com materiais compósitos é viável e vantajoso, por permitir o reparo em serviço. Diferentemente de Budhe *et al.* (2019) e Barron (2015), os autores consideram que as espessuras obtidas pelas Normas ISO 24817 e ASME PCC-2 Parte 4 são válidas na maior parte das situações de campo, onde as espessuras calculadas dos reparos se situem em valores máximos de até 1/6 do diâmetro externo da tubulação a ser reparada. Os autores ainda observam que, apesar de não haver, até o momento, método de projeto amplamente aceito, a metodologia mais adequada de cálculo para a espessura do envoltório do reparo de material compósito é o apresentado pelas normas ISO 24817 e ASME PCC-2 Parte 4, observando, no entanto, as limitações de ambas as normas.

Percebe-se as ressalvas quanto à aplicação das normas de projeto, a infinita variedade possível de projetos e composições de reparos propostos a partir da aplicação de materiais compósitos e a necessidade de obtenção de soluções que não comprometam a disponibilidade dos sistemas em operação, nem a segurança de pessoas e do meio ambiente. Observa-se ainda, o avanço da disponibilização dos recursos de processamento de dados, juntamente com a aplicação da análise de EF, que tem originados vários estudos, com resultados relevantes na pesquisa e na aplicação de materiais compósitos. Abdellah *et al.* (2021) realizaram testes que visaram conhecer os modos de falha sob o efeito da pressão interna e também sob o efeito de impacto de baixa energia, por meio de modelo de dano progressivo de tubulações enterradas, fabricadas com materiais compósitos na condição de perfeita integridade estrutural ou na presença de trincas. No bojo da pesquisa foi também desenvolvido um novo modelo de EF para uso industrial que possibilita prever o comportamento mecânico destas estruturas. Conforme os autores, o modelo pode ser aplicado em diversos tubos compostos reforçados por fibra de vidro com diferentes formas e geometrias, sendo necessário, porém, o conhecimento das características mecânicas do material testado. O estudo também produziu um modelo numérico, que possibilita a modificação da equação de Lamé clássica, aplicável a qualquer geometria de trinca, não somente para a trinca elíptica do modelo de Newman.

O estudo de Miao *et al.* (2021) também fez uso da ferramenta de análise por EF aplicado aos materiais compósitos. Neste caso, foi realizada a avaliação do comportamento mecânico de dutos de aço danificados reparados com material compósito plástico reforçado com fibra de vidro, comparando reparos do tipo envoltório com reparos do tipo remendo, verificando as respostas mecânicas da tubulação. As conclusões do estudo foram de que reforços do tipo remendo tendem a apresentar menores tensões na parede da tubulação. Todavia, reforços do tipo remendo tendem a causar maior tensão de cisalhamento na interface que os reparos do tipo envoltório, o que pode ser reduzido usando reparos do tipo remendo com maior espessura.

Já Jiang *et al.* (2019) estudaram através da simulação com EF, um sistema de reparo compósito que consiste em fibra de vidro reforçada com polímero e massa de vidraceiro como material de preenchimento. Os autores informam que estudos anteriores assumiram que a massa só funcionaria como material de preenchimento da seção corroída e dessa forma, desconsideraram a contribuição da massa como elemento estrutural. Conforme os autores, os resultados do estudo apontaram que, ao incorporar a contribuição

de força de massa de vidraceiro como elemento estrutural, há potencial para aumentar a pressão máxima suportada pela tubulação em cerca de 5%.

Além de dimensionamento e instalação, item igualmente relevante para a garantia de integridade dos reparos é a necessidade de qualificação para procedimentos de inspeção e aprovação deste tipo de solução alternativa de engenharia. Neste sentido, diversos estudos estão sendo realizados no campo de pesquisa de métodos de inspeção.

Pode ser citada a pesquisa de Saedifar *et al.* (2020) que avaliou as vantagens da aquisição de Emissões Acústicas (EA) no processo de monitoramento da saúde estrutural, através da observação da resposta mecânica e da avaliação em tempo real através da instalação de sensores permanentemente instalados em materiais compósitos. O estudo abordou a utilização da técnica para detecção do início do processo de falha, para identificação dos diferentes mecanismos de danificação, bem como para o prognóstico pós a ocorrência do dano.

Dentre outras conclusões, os autores ressaltaram em seu estudo que os parâmetros que definem os sinais de emissão acústica, tais como amplitude máxima do sinal, a energia associada a ele, tempo no qual o sinal atinge sua magnitude máxima, entre outros parâmetros, são altamente afetadas pela distância do sensor com relação à fonte de emissão, do tipo de sensor, da geometria da estrutura e da aderência entre as camadas do material compósito. Destacam, ainda, a qualidade do acoplamento dos sensores na estrutura, o estado de integridade da estrutura e de parâmetros de amostragem definidos pelo usuário para a aquisição dos dados. Além disso, os autores ponderaram o fato de muitos pesquisadores terem proposto critérios descritivos e/ou qualitativos para a detecção do início da falha em materiais compósitos, através da aquisição de sinais de EA, o que pode trazer diferentes interpretações quanto ao início do dano.

Conhecer a estabilidade das propriedades físico-químicas, a degradação e o envelhecimento dos materiais compósitos em função do meio, é fundamental quando se pensa em desenvolver uma solução de reparo que seja efetiva e perene no campo da aplicação industrial. Neste sentido, a pesquisa de Garcia *et al.* (2012) realizou ensaios para verificar o comportamento quanto à degradação de reparos feitos em material compósito aplicados em duto submerso em água do mar e petróleo. Os resultados dos testes demonstraram que não houve variação de degradação do reparo durante os testes e que não houve alteração significativa das propriedades mecânicas de flexão para os corpos de provas ensaiados. Além disso, o estudo verificou que o comportamento

mecânico é sensivelmente dependente do tipo de resina adotado na fabricação do reparo, mesmo que o tipo de fibra não seja modificado.

O avanço na aplicação de materiais compósitos na manutenção de sistemas de tubulações envolve a produção e transporte de materiais perigosos e inflamáveis. Isso demanda que se possa ter uma uniformidade das características dos remendos compósitos projetados e aplicados. Com relação a esse tema, ganha relevância especial as pesquisas que buscam associar o desenvolvimento de novos materiais compósitos à fabricação aditiva, através de impressão 3D. Nesta linha de desenvolvimento científico Goh *et al.* (2019) abordaram as tecnologias de impressão 3D considerando a aplicabilidade das várias tecnologias existentes, como fabricação por fusão de filamento, dispersão concentrada de partículas em líquido, estereolitografia, sinterização seletiva a laser e fabricação de objetos laminados, verificando vantagens e desvantagens de cada uma à aplicação para fabricação de materiais compósitos. Os autores ressaltam no estudo, que a fabricação aditiva de materiais compósitos tem atraído atenção especial e surge como a ousada promessa de se tornar a metodologia de fabricação de compósitos de próxima geração. Atualmente, os desafios estão relacionados à processabilidade das fibras, bem como às propriedades e à adesão entre camadas dos compósitos fabricados através de impressão 3D. Neste sentido, a pesquisa e o desenvolvimento de polímeros são objetivos determinantes para que se possa vir a obter materiais com melhor desempenho mecânico.

Tendo em vista as pesquisas que estão sendo desenvolvidas na área de desenvolvimento de compósitos e, sobretudo com relação à aplicabilidade como solução alternativa ao procedimento tradicional de soldagem para reparo de tubulações em operação, fica claro que existe ainda um grande espaço para novos desenvolvimentos. Tais estudos devem levar em consideração aspectos como aprimoramento das normas de projeto de compósitos, padronização de insumos, desenvolvimento de procedimentos e normas de ensaios não destrutíveis com critérios de qualificação e aprovação específicos para materiais compósitos, além do desenvolvimento de compósitos fabricados através de impressões 3D. Dessa forma, estas ações podem contribuir de forma substancial com relação à previsibilidade do comportamento dos reparos após sua construção e aplicação.

### **1.3 Justificativa**

A justificativa para a realização da presente pesquisa está suportada em fatores econômicos e de segurança dos ativos e das pessoas. Abordando os fatores econômicos,

vislumbra-se que a massificação de procedimentos de qualificação de reparos de tubulações a partir da aplicação de materiais compósitos reduziriam sensivelmente os tempos de paradas de manutenções não planejadas.

No ano de 2020, a Petrobras detinha cerca de 98,5% da capacidade instalada de refino de Petróleo bruto. Neste mesmo ano, a companhia processou cerca de 1.850.000 barris de petróleo equivalentes por dia, considerando um fator de disponibilidade dos ativos de cerca de 97%. Mesmo tendo uma indisponibilidade de somente 3% em relação à sua capacidade, houve um custo total de 7,436 bilhões de reais, devido às paradas não programadas e gastos pré-operacionais (PETROBRAS, 2020). Importante ressaltar que esses valores levam em consideração apenas os custos de manutenção, sem considerar a perda de receita pela paralisação da produção, que efetivamente é a maior perda quando da ocorrência destes eventos. Neste sentido, é pertinente a pesquisa do ponto de vista econômico, se considerarmos que grande parte das paradas não programadas têm origem em situações associadas à corrosão e/ou falha de tubulações e dutos. Os procedimentos de aplicação de reparo com materiais compósitos não demandam o esgotamento e a descontaminação completa dos sistemas no entorno, pois não há adição de fontes de calor (com potencial significante de ignição) na sua execução e, dessa forma, poderiam contribuir para a redução dos tempos não produtivos para manutenção.

O fato de não haver fontes de calor na execução agrega também ganhos relativos à segurança dos ativos e das pessoas. Não faltam exemplos de acidentes graves envolvendo presença concomitantes de materiais orgânicos e/ou inflamáveis e fontes de ignição/calor. Em agosto de 2020, ocorreu um evento de grandes proporções na zona portuária de Beirute, no Líbano, que acarretou na morte de 218 pessoas, ferindo outras 7.000 e danificando 77.000 residências. Conforme relatório da ONG Human Rights Watch (HRW, 2020), embora a investigação não esteja concluída na data de elaboração do presente texto, há evidências de que o evento tenha sido iniciado devido à realização de atividades de solda no entorno dos galpões, que abrigavam 2.750 toneladas de nitrato de amônia.

Atividades de corte e soldas são executadas em larga escala dentro de instalações de processamento de óleo e gás e, dadas as circunstâncias, acidentes causados pela presença de fontes de ignição e vapores orgânicos amiudadamente resultam em perdas humanas, bem como severas perdas econômicas derivadas destes acidentes. Apenas a título de exemplificação, cita-se a explosão na refinaria de Pennzoil Rouseville, Pensilvânia, no ano de 1995, acarretando na morte de cinco pessoas e na destruição de



grandes partes dos ativos. Este fato ocorreu devido à realização de um procedimento de soldagem em uma estrutura metálica localizada entre dois tanques, dos quais houve emanção de vapores inflamáveis, sem que houvesse sido feita a completa descontaminação do entorno (U.S. CHEMICAL SAFETY AND HAZARD INVESTIGATION BOARD, 2010). Diversos outros casos de acidentes similares poderiam ser citados, fato é que eventos como esses justificam a necessidade de, tanto quanto possível, eliminar ou minimizar atividades de manutenção e reparo que demandem fontes externas de calor dentro deste tipo de instalação industrial.

Dadas as justificativas acima expostas, acredita-se que a pesquisa e o desenvolvimento de novos remendos compósitos, associados ao estabelecimento de procedimentos consistentes de qualificação e inspeção ao longo da vida útil, podem contribuir de forma sensível para o aumento da confiabilidade e disponibilidade das unidades de produção. Podem, ainda, apoiar a segurança das pessoas e das instalações durante as atividades de reparo e operação de tubulações industriais e dutos de transporte.

#### **1.4 Objetivos**

A presente pesquisa visa estudar o comportamento de reparos construídos com material compósito de fibras de vidro e resina polimérica para a aplicação em tubulações de aço pressurizadas internamente.

Dentro deste objetivo geral, tem-se como objetivos específicos:

- Estudar os principais tipos de materiais compósitos, suas características, mecanismos de falhas e suas possíveis aplicações na construção de reparos para tubulações em operação.
- Ensaaiar uma tubulação a fim de observar a resistência dos reparos em serviço.
- Avaliar os critérios de dimensionamento e qualificação de reparo com material compósito com vistas ao seu uso na indústria de óleo e gás.
- Avaliar o fenômeno de emissões acústicas na investigação da integridade de reparos produzidos com material compósito.

## 1.5 Contribuição da Presente Pesquisa

Apesar de um dos objetivos específicos da presente pesquisa ser avaliar um método simplificado de dimensionamento e qualificação de reparo com material compósito que possa a ser adotado na indústria, a pesquisa ora apresentada não tem como objetivo fim propor um procedimento geral e amplo que possa ser aplicado em todo o tipo de reparo, abrangendo de forma geral todas as situações e defeitos que possam se apresentar. Contudo, entende-se que o estudo, ao abordar pontos essenciais que devem ser observados quanto ao projeto de reparo, seu dimensionamento, aplicação, testes de qualificação e ensaios de inspeção pós-instalação, possa contribuir na difusão de alternativas que envolvam a aplicação de materiais compósitos na manutenção, que possam ser sopesadas e aplicadas à alternativa da soldagem de reparo, principalmente na indústria de óleo e gás.

Neste sentido, a contribuição da presente pesquisa passa pela demonstração de que existe viabilidade prática na aplicação desta classe de material, e que, dentro de critérios técnicos e de engenharia, é possível se obter soluções seguras e não provisórias. Assim, contribuindo para a quebra do paradigma que paira sobre esse tipo de solução, encarada, muitas vezes, mais como uma improvisação de campo do que uma definitiva solução baseada em conceitos consolidados na engenharia mecânica.

É importante ressaltar que como fruto direto do presente trabalho, o seguinte artigo foi publicado nos anais do BCCM2022:

- D.L. da Silva, L. Echer, B.N. Rojo Tanzi, R.J. Marczak, I. Iturrioz. “Investigation of the failure behavior of fiber-reinforced patches in the repair of locally damaged steel pipes”. In Proceedings of the 6th Brazilian Conference on Composite Materials (Part of ISSN 2316-1337), Organised and Edited by R.J. da Silva & T.H. Panzera, 2022, pp. page interval. DOI: <https://doi.org/10.29327/566492>

Ademais, por convite do comitê técnico desse congresso, um segundo artigo foi preparado e submetido para a JBSMSE, sendo que o manuscrito se encontra sob apreciação do *jornal* no momento de elaboração do presente texto:

- DL da Silva, L Echer, BN Rojo Tanzi, RJ Marczak, I Iturrioz. “Experimental Investigation of the Structural Performance of Fiber-Reinforced Repair Patches in the Repair of Locally Damaged Steel Pipes”. Submetido para edição especial da JBSMSE - Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (Springer ISSN 1806-3691)

## 1.6 Organização do Trabalho

A presente dissertação está dividida em quatro capítulos:

O primeiro capítulo refere-se à introdução do trabalho, onde inicialmente é estabelecido um resumo histórico da indústria de petróleo, considerando o início da exploração comercial desta fonte de energia e o seu desenvolvimento no Brasil. Neste ponto, também é considerada a importância da disciplina de capital e o impacto dos fatores inerentes à necessidade de manutenção constante neste ramo de indústria, onde o assunto referente à presente pesquisa se insere.

Neste contexto, ainda no primeiro capítulo, é feita uma avaliação do estado da arte, abordando, de forma resumida, as rotas de pesquisas que estão sendo promovidas para o desenvolvimento de materiais e de procedimentos. Ou seja, ferramentas que buscam contribuir para tornar viável, aos olhos dos profissionais da área de manutenção de plantas de processamento na área de hidrocarbonetos, a aplicação destes materiais na manutenção de tubulações e dutos corroídos. Ao final do primeiro capítulo, com base na contextualização geral e suportando-se nas pesquisas que já vêm sendo desenvolvidas, são traçados o objetivo geral e os específicos do presente estudo.

O segundo capítulo trata da bibliografia dos temas pertinentes ao estudo. Para tanto, são apontados os principais conceitos relativos ao dimensionamento e as questões relacionadas ao processo de corrosão metálica e à mecânica da fratura de tubulações industriais, tema central que motiva a busca por uma alternativa, ou seja, o mote da presente pesquisa.

Neste segundo capítulo, também é dado enfoque aos conceitos relativos à concepção de materiais compósitos, à seleção de componentes como fibras e resinas e os principais mecanismos de falha deste tipo de material multifásico. As normas mais difundidas para o reparo de tubulações pressurizadas através de aplicações de materiais compósitos, são consideradas neste segundo capítulo. Ao final, são tratados os principais tipos de ensaios não destrutivos aplicáveis na avaliação de materiais compósitos e, com um maior aprofundamento, é abordado o conceito de análise de emissões acústicas.

Já no terceiro capítulo, é descrita a parte experimental do projeto de pesquisa. Assim, primeiramente é apresentado o projeto e informações relativas à construção da tubulação, detalhando o procedimento de cálculo, a especificação do reparo compósito e o procedimento de testes adotado. Por fim, são descritos os ensaios não destrutivos

realizados após os testes de pressurização da tubulação e após a instalação do reparo de material compósito.

Finalmente, no capítulo quatro são apresentados os resultados e conclusões da presente pesquisa, fazendo uma análise crítica e apresentando sugestões para a continuidade desta pesquisa em trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo tem por objetivo desenvolver referencial teórico relativo aos temas pertinentes à pesquisa em questão. Neste sentido, faz-se necessário ressaltar que a profundidade com a qual será abordado cada um dos temas aqui mencionados guardará relação direta com a relevância de cada assunto para com o objetivo geral e com os objetivos específicos estabelecidos para a presente pesquisa.

### 2.1 Tubulações Industriais

Denominam-se tubulações industriais o conjunto de componentes destinados à distribuição e transporte de gases ou líquidos para fins de processamento, dentro do limite da área industrial. Neste conceito, estão inclusos tubos, conexões, válvulas e demais componentes acessórios. Estes são comumente fabricados em materiais ferrosos, sendo itens amplamente utilizados nas indústrias químicas, petroquímicas, em refinarias, entre outras.

Os tubos encontrados nas tubulações industriais podem ser, quanto ao processo de fabricação, divididos em duas categorias distintas: os tubos com costura e os tubos sem costura. Os tubos de aço com costura são os mais comuns e baratos, os quais são bastante versáteis e possuem aplicação mais generalista. Já os tubos sem costura, de processo de fabricação mais complexo, e, portanto, mais caro, apresentam-se na forma de peça monolítica e são utilizados em condições mais severas, onde não podem ser toleradas a presença de peças soldadas.

Conforme Telles (1999), na indústria de processamento contínuo como no refino de petróleo e petroquímica, o valor das tubulações representa, em média, de 20% a 25% do custo total da instalação industrial. Já o custo de montagem destes itens atinge, em média, de 45% até 50% do custo total da montagem de todos os equipamentos.

Em se tratando de projetos de tubulações, uma das principais referências é a American Standard Code For Pressure Piping – ASME B.31 – Código geral sobre tubulações industriais. Este código de projeto especifica os requisitos de engenharia para projeto e construção de tubulações que trabalham sob pressão interna.

### 2.1.1 Cálculo da Pressão Máxima Admissível para Tubulações e Flanges de Tubulações

De acordo com o *American Standard Code for Pressure Piping* (ASME B.31), o cálculo da espessura mínima de tubos sujeitos à pressão interna, pode ser feito conforme a seguinte equação:

$$t = \frac{PD}{2(S_h E + PY)} + C. \quad (\text{Equação 2.1.1.1})$$

Onde:

- a)  $t$  é a espessura da tubulação;
- b)  $P$  é a pressão manométrica agindo internamente;
- c)  $D$  é o diâmetro externo da tubulação;
- d)  $S_h$  é a tensão admissível para o material;
- e)  $E$  é o coeficiente de eficiência de solda;
- f)  $Y$  é o coeficiente de redução, função do tipo de material e temperatura de projeto;
- g)  $C$  é a sobreespessura de corrosão.

Importante ressaltar que a equação acima é aplicável em trechos retos e também em trechos curvos da tubulação, desde que a ovalização ou o adelgaçamento de paredes resultantes do processo de encurvamento não sejam superiores a 8% do diâmetro e da espessura de paredes, respectivamente (TELLES, 2006).

Em se tratando de flanges, a norma ASME VIII, Divisão 1 estabelece os padrões dimensionais para cada tipo e diâmetro, que são também são determinados pela espessura mínima deste componente e determinam também a quantidade de parafusos, bem como o diâmetro dos mesmos. Neste sentido, a espessura mínima do flange cego pode ser determinada pela expressão 2.1.1.2, a seguir:

$$t_h = d \sqrt{\frac{c \cdot P}{S \cdot E} + \frac{1,9 \cdot W \cdot H_g}{S \cdot E \cdot L^3}}. \quad (\text{Equação 2.1.1.2})$$

Onde:

- a)  $t_h$  é a espessura mínima do conjunto flange;
- b)  $L$  é a medida do diâmetro que passa pelo centro dos furos de fixação do flange cego;
- c)  $c$  é um índice dependente do tipo de flange e fixação, conforme Figura UG-34 da Norma ASME VIII, Divisão 1;
- d)  $P$  é a pressão interna agindo sobre a parede do flange cego;
- e)  $E$  é a eficiência de junta soldada, conforme estabelece a Tabela UW-12 da Norma ASME VIII, Divisão 1;
- f)  $H_g$  é o braço de momento da junta de vedação, ou seja, a distância entre o centro de um parafuso de fixação e o ponto de raio médio da junta de vedação;
- g)  $W$  é a força imposta pelos parafusos sobre o flange. Esta força deve ser tal que resista a força causada pela pressão interna, somada à reação relativa ao aperto de torque dado para deformação da junta de vedação. A Tabela 2-5.1 da Norma ASME VIII Divisão 1, sugere a utilização de um valor de duas vezes a força causada pela pressão interna, para juntas de fibras minerais e espessura de 3,2mm, que foi o material utilizado para junta de vedação, para efeito dessa variável.

Substituindo o valor de  $W$  na Equação 2.1.1.2 acima, pela expressão  $2 \cdot P \cdot \pi (R_i^2)$ , sendo  $R_i$  o raio interno da seção vazada do flange de pescoço no qual será fixado o flange cego, temos:

$$t = d \sqrt{\frac{c \cdot P}{S \cdot E} + \frac{1,9 \cdot 2 \cdot P \cdot \pi \cdot (R_i^2) \cdot H_g}{S \cdot E \cdot L^3}}. \quad (\text{Equação 2.1.1.3})$$

O correto dimensionamento dos componentes de tubulação é essencial para que se possa garantir a segurança e a operação pela vida prevista de projeto, mesmo que sofrendo desgastes tanto pela ação abrasiva do fluido, quanto pela corrosão externa causada pelo meio. Estes processos podem ser retardados, porém nunca completamente evitados, o que faz com que esse assunto seja de vital importância quando se trata das

estratégias de manutenção das tubulações e dutos em operação na área industrial e para transporte.

### 2.1.2 Morfologia dos Processos Corrosivos em Tubulações de Aço

O conhecimento dos principais mecanismos de corrosão em tubulações é essencial para os profissionais que atuam nas áreas de projeto e manutenção em indústrias em geral, sobretudo para aqueles que atuam na área de óleo e gás. Os custos associados à ocorrência de corrosão são deveras relevantes nesta indústria, além deste fenômeno ser a principal causa de falhas e vazamentos em sistemas em operação. Em relação ao impacto negativo que a corrosão desempenha na economia mundial, de acordo com um estudo da Nace, *International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study* (KOCH, 2016), o custo global desta foi estimado em US\$ 2,5 trilhões no ano de 2013, o que equivalia a 3,4% do Produto Interno Bruto (PIB) global da época. Essa informação já foi apresentada no capítulo introdutório, mas devido à importância dos montantes envolvidos, se faz relevante ressaltar estes dados.

A indústria de petróleo e gás é uma indústria de capital intensivo, contando com sistemas como poços, *risers*, sondas, plataformas, gasodutos, oleodutos, terminais e refinarias. Todos estes são considerados sistemas extremamente susceptíveis à ocorrência de corrosão. Importante citar que, muitas vezes, por questões técnicas ou logísticas, estes sistemas localizam-se dentro da área marítima ou próximo ao litoral, o que agrava ainda mais a questão da corrosividade nestes ativos.

Os processos de corrosão são considerados reações químicas heterogêneas ou reações eletroquímicas que se passam geralmente na superfície de separação entre o metal e o meio corrosivo. A corrosão é um modo de destruição do metal. (GENTIL, 2011). A caracterização segundo a morfologia dos principais fenômenos de corrosão em aço, pode ser estabelecida da seguinte forma:

- **Corrosão uniforme** - É a corrosão que ocorre de forma generalizada em toda a extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura.
- **Corrosão por placas** - É a corrosão localizada em regiões da superfície metálica e não em toda sua extensão, formando placas com escavações.



- **Corrosão alveolar** - É a corrosão que ocorre na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, com fundo arredondado e profundidade geralmente menor que o seu diâmetro.
- **Corrosão puntiforme ou por pite** - É a corrosão que ocorre em pequenas áreas localizadas na superfície metálica, com ocorrência de cavidades que apresentam o fundo angular e profundidade maior do que o seu diâmetro.
- **Corrosão intergranular** - É a corrosão que ocorre entre os grãos da rede cristalina do material metálico, com perda das propriedades mecânicas.
- **Corrosão por empolamento pelo hidrogênio** - É a corrosão que ocorre quando o hidrogênio atômico consegue penetrar no material metálico, exercendo pressão em descontinuidades pré-existentes, originando o empolamento do substrato metálico.
- **Corrosão em torno do cordão de solda** - É a corrosão que ocorre em torno de cordão de solda, sendo normalmente incidente em aços inoxidáveis não estabilizados ou aços com teores de carbono maiores que 0,03%.

Não citado por Gentil (2011) como um dos tipos morfológicos de corrosão em materiais metálicos, porém muito comum, é o mecanismo de **corrosão em fresta**. Este tipo de fenômeno corrosivo normalmente ocorre em ligações mecânicas com a utilização de arruelas, porcas, roscas e parafusos. Neste caso, a severidade da corrosão é proporcional à profundidade e inversamente proporcional à largura da fresta.

Ainda, as formas localizadas (alveolar, puntiforme e intergranular) são mais prejudiciais aos equipamentos, pois, embora a perda de massa seja pequena, as perfurações ou fraturas podem ocorrer em pequeno período de tempo. Portanto, são esses os mecanismos que devem despertar a maior atenção e preocupação das equipes de inspeção e manutenção de ativos na indústria de óleo e gás.

### 2.1.3 Análise da Mecânica da Fratura em Cilindros Pressurizados

Além dos processos corrosivos, outro ramo de extrema importância na indústria de processamento contínuo, principalmente aquelas que atuam constantemente sob a presença de elementos tóxicos e inflamáveis é a mecânica da fratura. Este ramo se dedica à avaliação da integridade estrutural de partes e peças na presença de defeitos e descontinuidades, pois permite a quantificação do grau de severidade dessas anomalias

com relação ao nível de tensão ao qual as estruturas estão submetidas. Este tipo de avaliação é o dia a dia dos engenheiros que atuam neste setor da indústria, sobretudo daqueles que atuam como profissionais habitados pela Norma NR-13 (Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques de armazenamento).

O conhecimento dos fundamentos da mecânica da fratura é, portanto, de especial importância para que se possa realizar uma correta avaliação quanto à criticidade de um defeito e sobre a real necessidade da proposição de qualquer reparo, seja para uma tubulação em serviço ou para qualquer outro componente ou equipamento, daí a importância do tema para a presente pesquisa.

Em se tratando da ocorrência de um defeito, a variação total na energia de um corpo está relacionada com a variação do tamanho do defeito, sendo que, somente se a energia total decrescer, o defeito poderá crescer espontaneamente pela ação da tensão aplicada (ROSA, 2002).

A Figura 2.1.3.1 apresenta os modos de abertura de um defeito (trinca). Estes modos de abertura da trinca são os modos básicos, de forma que uma situação geral de carregamento sobre um corpo trincado sempre pode ser decomposta nestes três modos. Para os casos usuais, pode-se dizer que o modo I de sollicitação é o mais crítico, pois pode excitar o mecanismo de ruptura por clivagem, logo levando a uma ruptura frágil, com pequena absorção de energia no processo de fratura (ROSA, 2002).

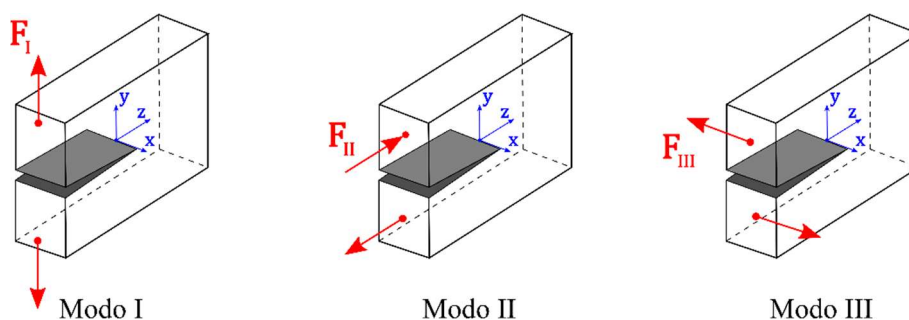


Figura 2.1.3.1 - Modos básicos de abertura da uma trinca [ROSA, 2002].

O modo de abertura I é comumente considerado como o mais crítico, tendo em vista a orientação da carga e a rigidez do corpo nesta configuração. Dessa maneira, via de regra, é baseado neste modo que se estabelece um procedimento para a avaliação da severidade da descontinuidade presente no substrato. A falha ocorre quando o fator de intensidade de tensão,  $K_I$ , é maior ou igual ao  $K_{IC}$ , sendo este último a tenacidade à

fratura do material, que é função do Módulo de Elasticidade, E e da Densidade de Energia de Superfície,  $\gamma_s$ .

Assim, um valor do fator de intensidade de tensão KI deve ser quantificado no intuito de apurar o nível de sollicitação que ocorre dentro do material situado à frente do extremo da trinca. Este parâmetro une características geométricas da trinca com o nível de carregamento aplicado na peça, e pode ser determinado através da Equação 2.1.3.1.

$$K_I = F \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a}. \quad (\text{Equação 2.1.3.1})$$

Onde:

- a)  $K_I$  é o fator de intensidade de tensão para a geometria;
- b) F é o fator geométrico;
- c) a é o tamanho característico da trinca;
- d)  $\sigma$  é a tensão de tração na ponta da trinca que atua no modo que propicia a falha.

É importante ressaltar que, como a solução de KI é baseada no comportamento elástico linear do material, é possível o uso do princípio da superposição de efeitos.

Conforme Gdoutos (2020), um cilindro de raio R e espessura t, que contenha uma trinca de comprimento 2a orientada em um ângulo  $\beta$  com a direção circunferencial, submetido a uma pressão interna P, pode ter seu KI, calculado através da Equação 2.1.3.2 abaixo. A validade desse equacionamento está condicionada ao equilíbrio de tensões, conforme ilustrado na Figura 2.1.3.2

$$K_I = \frac{P \cdot R_m}{2t} \sqrt{\pi \cdot a} (1 + \text{sen}^2 \cdot \beta). \quad (\text{Equação 2.1.3.2})$$

Onde:

- a) P é a pressão interna agindo na tubulação;
- b)  $R_m$  é o raio médio considerando a espessura da parede da tubulação;
- c) t é a espessura da tubulação;
- d) a, neste caso, é a dimensão correspondente à metade do comprimento da trinca;

- e)  $\beta$  é o ângulo formado entre a direção do comprimento da trinca e a direção circunferencial da tubulação.

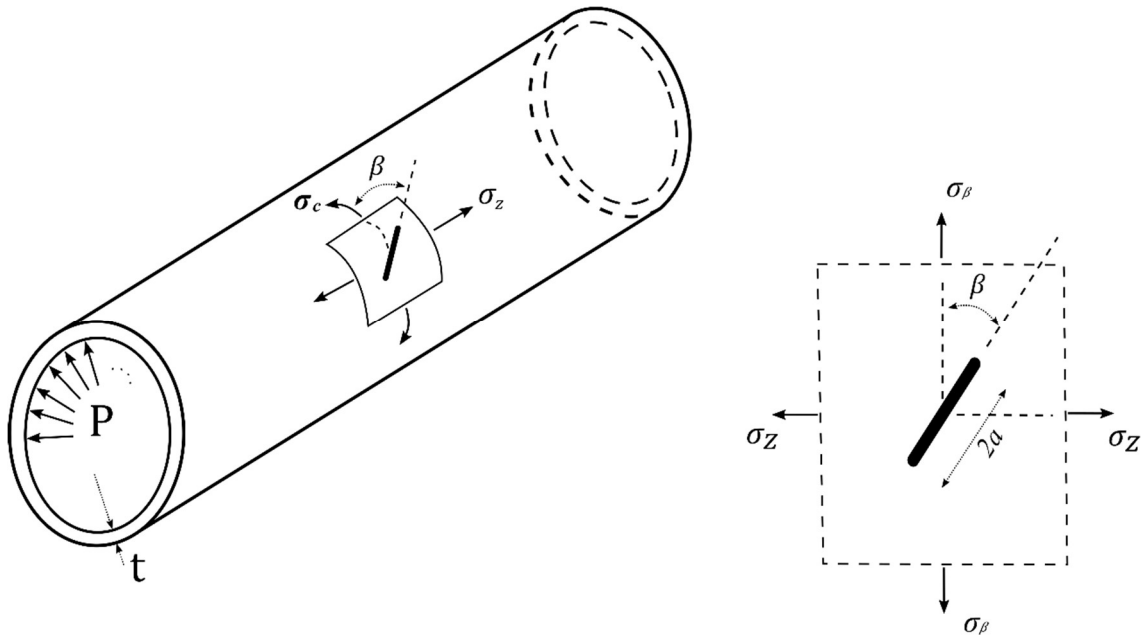


Figura 2.1.3.2 - Equilíbrio de tensões. [Gdoutos, 2020].

Já conforme Thorby e Ferguson (2002), para materiais com energia de impacto no ensaio de Charpy entre 6 e 55 Joules, um valor aproximado do KIC deve ser expresso em termos de uma relação com unidades  $Pa \cdot \sqrt{m}$ . Essa relação pode ser calculada através da seguinte equação:

$$KIC = 18,2 \cdot 10^6 (CVM)^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{Equação 2.1.3.3})$$

Onde:

CVM é o resultado em Joules para o teste de impacto Charpy com entalhe em “V”.

Relacionado as Equações 2.1.3.2 e 2.1.3.3 acima e tendo em vista a condição necessária para a estabilidade do defeito, para cilindros pressurizados internamente, tem-se que:

$$P < \frac{18,2 \cdot 10^6 \sqrt{CVM} \cdot 2 \cdot t}{R \sqrt{\pi} \cdot a \cdot (1 + \text{sen}^2 \beta)}. \quad (\text{Equação 2.1.3.4})$$

## 2.2 Reparos em Tubulações

A norma API 570 - Código de Inspeção de Tubulação: Inspeção, Classificação, Reparo e Alteração de Sistemas de Tubulação em Serviço - estabelece as diretrizes básicas para o reparo de tubulações em serviço. Esta norma divide os reparos a serem realizados em reparos temporários e reparos definitivos.

Para reparos temporários, os quais devem a priori ser substituídos na primeira oportunidade oportuna, esta norma aceita a soldagem de uma luva, dividida em duas partes, comumente chamadas de duas “meia canas” ou a soldagem de uma clausura sobre a área danificada ou corroída. Deve-se ter atenção, no entanto, para reparos de defeitos das trincas longitudinais, por isso, nestes casos, deve-se ter a certeza com relação à estabilidade do defeito, de forma a garantir que não haverá a propagação da trinca sob o reparo soldado. Se houver a possibilidade de propagação, esse tipo de reparo não pode ser empregado.

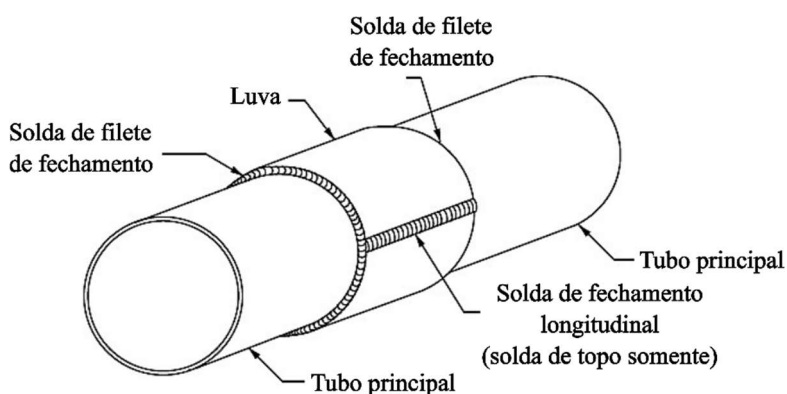


Figura 2.2.1 – Reparo do tipo duas “meia canas” [API 570, 2016].

Para defeitos localizados em tubulações com tensões de escoamento menores que 275 MPa, um reparo temporário pode ser feito através da deposição direta por solda sobre a área do defeito. Mas, para tanto deve ser considerada a similaridade de composição química e propriedades mecânicas do material de adição. Outra opção para os casos em que há dano localizado em tubulações com tensões de escoamento menores que 275 MPa é a inclusão de uma sela ou remendo soldado sobre a área danificada.

Para pequenos vazamentos o enclausuramento pode ser realizado. Neste caso, a viabilidade de execução deve ser analisada criteriosamente, levando em consideração a

toxicidade do produto transportado pela tubulação e o risco de que a tubulação rompa durante o processo de soldagem.

Com relação aos reparos definitivos, a norma API 570 estabelece que os reparos de defeitos podem ser feitos primeiramente através da goivagem para a remoção completa do defeito e posteriormente, com o preenchimento da área com a deposição direta por solda sobre a área do defeito. Na possibilidade de realizar a retirada da tubulação de operação, recomenda-se a substituição do trecho de tubulação danificada.

No caso de reparos definitivos, as selas ou remendos soldados só podem ser aceitos nas seguintes condições:

- Uso de solda de filete com penetração total;
- Cantos arredondados com raio mínimo de 25 mm;
- Ensaios de radiografias ou ultrassom com procedimento aprovado por inspetor certificado em 100% das soldas para tubulações que transportem hidrocarbonetos, hidrogênio e ácidos ou que operem em condições com maior potencial de geração de uma emergência imediata com impacto à segurança das pessoas, das instalações ou ambientais.

A norma API 570 aceita ainda, a execução de reparos não soldados, exclusivamente de caráter temporário. São aceitos, neste caso, abraçadeira aparafusada (ver Figura 2.2.2), invólucro feito com material compósito, invólucros metálicos e epóxi, ou outro reparo temporário aplicado não soldado. Não é prevista nesta norma a utilização de reparo do tipo remendo feito de material compósito.

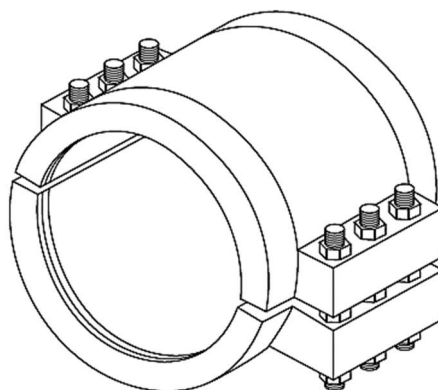


Figura 2.2.2 - Reparo do tipo abraçadeira aparafusada [API 570, 2016].

A norma API 570 estabelece que dispositivos temporários devem ser removidos na primeira oportunidade. Com isso, busca-se reestabelecer as condições originais de projeto sempre e com máxima brevidade.

Os métodos de reparos acima citados são os mais tradicionais, porém não os únicos. O desenvolvimento de novos materiais e novas tecnologias construtivas estão levando a novas estratégias de reparos, sem comprometimento da qualidade do serviço nem à segurança das instalações. Neste sentido, várias iniciativas vêm sendo executadas com o objetivo de difundir a aplicação de materiais compósitos como alternativas aos métodos tradicionais citados anteriormente, conforme discutido ao longo do capítulo introdutório do presente texto.

### **2.3 Materiais Compósitos**

Pode ser considerado um compósito qualquer material multifásico natural ou artificialmente fabricado, com fases constituintes quimicamente dissimilares, separadas por uma distinta interface e que exhibe uma significativa proporção de propriedades de ambas as fases constituintes, de tal maneira que uma melhor combinação de propriedades é realizada (CALLISTER, 1999). Via de regra, os compósitos mais comuns são constituídos por duas fases, a saber: uma matriz, que pode ser polimérica, cerâmica ou metálica e uma fase dispersa de reforço, que geralmente é composta de fibras ou partículas.

Materiais compósitos ocorrem de forma espontânea na natureza, em diversos biomas e até mesmo no nosso próprio corpo. Exemplo disso é a morfologia encontrada em ossos de humanos e outras espécies, bem como nas conchas vistas à beira da praia ou na madeira que é extraída em qualquer lugar do nosso planeta.

Contudo, é difícil precisar em que momento se inicia o desenvolvimento de materiais compósitos não naturais pelo ser humano. Pode-se afirmar, no entanto, que o grande avanço no desenvolvimento desta tecnologia se deu a partir dos anos de 1930, com o aumento dos polímeros derivados de petróleo.

Alguns marcos merecem importante destaque a respeito deste tema:

- Advento do poliéster, em 1930;
- Surgimento da resina epóxi e da fibra de vidro contínua, em 1938;
- Surgimento do plástico reforçado com fibra de vidro, em 1942;

- A Construção do primeiro componente aeronáutico feito de material compósito, em 1943;
- Advento da fibra de carbono, em 1959;
- Formulação da Teoria da Laminação dos Compósitos, em 1960.

O desenvolvimento de tecnologias aplicadas aos materiais compósitos progrediu de forma contínua após os anos 1960 e, atualmente, os materiais compósitos estão presentes em uma infinidade de aplicações. Dentre elas, passando pela indústria de embalagens, automobilística, óleo e gás, mineração, construção civil, entre várias outras, inclusive na área médica, onde possibilitou grande avanço no desenvolvimento de próteses ortopédicas e até mesmo para fabricação de órgãos artificiais para usos específicos.

O desenvolvimento de materiais compósitos busca a obtenção de materiais com propriedades previamente projetadas, com maiores vantagens quando comparadas aos materiais homogêneos. De forma geral, visa-se a obtenção de melhores características de rigidez, tenacidade, resistência mecânica e peso, para aplicações de alta demanda estrutural onde se quer uma boa relação resistência/peso.

Nos compósitos reforçados por fibras, objeto do presente estudo, a matriz tem as seguintes funções: manter unidas as fibras e protegê-las de danos superficiais, sejam causadas por carregamentos ou ação química do meio externo, distribuir os carregamentos e evitar a propagação de trincas frágeis de uma fibra para a outra, o que poderia resultar em uma falha catastrófica. Já a fase dispersa, que para o presente estudo adotou-se o tipo de fibras contínuas, tem como objetivo principal o aumento de resistência mecânica e da rigidez do compósito. Dessa forma, ao associar materiais adequados para a matriz e para a fase dispersa na formação de uma peça feita de material compósito, pretende-se obter elementos com boa ductibilidade, alta rigidez, resistência mecânica satisfatória e boa estabilidade físico-química.

### **2.3.1 Conceitos e definições**

Dado o conceito apresentado anteriormente, o que se pode classificar como um compósito, é natural que exista uma vasta gama de utilizações para essa classe de material, bem como várias subclasses através dos quais eles podem ser devidamente enquadrados. Como o tema é extremamente amplo, sendo por si só um ramo importante



da Engenharia de Materiais, no presente estudo, será dado foco restrito aos compósitos reforçados por fibras, pois, além da sua relevância no ramo industrial pela versatilidade e abrangência de aplicações, é também aquele que será utilizado nos ensaios experimentais mais adiante demonstrados.

Os objetivos de projeto dos compósitos reforçados com fibras incluem com frequência a alta resistência e/ou rigidez em relação ao seu peso. Essas características são expressas em termos dos parâmetros resistência específica e módulo específico, os quais correspondem, respectivamente, às razões do limite de resistência à tração em relação à densidade relativa e ao módulo de elasticidade em relação à densidade relativa (CALLISTER, 1999).

As características mecânicas de um compósito reforçado com fibras não dependem somente das propriedades da fibra, mas também do grau segundo o qual uma carga aplicada é transmitida para as fibras pela fase matriz. A magnitude da ligação interfacial entre as fases fibra e matriz é importante para a extensão dessa transmissão de carga. Sob a aplicação de uma tensão, essa ligação fibra-matriz cessa nas extremidades da fibra, produzindo um padrão de deformação da matriz. Um certo comprimento crítico de fibra é necessário para que exista um efetivo aumento da resistência e um enrijecimento do material compósito (DANIEL, 2006).

Esse comprimento crítico,  $l_c$ , depende do diâmetro da fibra,  $d$ , e da sua resistência final (ou limite de resistência à tração),  $\sigma_f$ , bem como da força da ligação entre a fibra e a matriz (ou da tensão limite de escoamento cisalhante da matriz, o que for menor),  $\tau_c$ , de acordo com a relação:

$$l_c = \frac{\sigma_f}{2\tau_c} d. \quad (\text{Equação 2.3.1})$$

Para várias combinações matriz-fibra de vidro ou de carbono, esse comprimento crítico é da ordem de 1 mm, o que varia entre 20 e 150 vezes o diâmetro da fibra. As fibras para as quais o comprimento é muito superior ao valor do comprimento crítico (normalmente mais de 15 vezes), são chamadas contínuas, já as fibras descontínuas ou curtas são consideradas aquelas em que a relação é entre  $l$  e  $l_c$  é menor que 15. Para que se desenvolva uma melhoria significativa na resistência do compósito, as fibras devem ser contínuas (DANIEL, 2006).

A disposição das fibras, que pode ser alinhada ou aleatória, também tem grande influência nas propriedades mecânicas dos compósitos. No caso dos compósitos reforçados com fibras contínuas, diz-se que a melhor combinação dessas propriedades é obtida através de uma distribuição alinhada e uniforme da fase dispersa.

### **2.3.2 Danos em compósitos reforçados com fibras**

Da mesma forma que se faz importante o conhecimento dos requisitos de projeto e a degradação das ligas metálicas quando se opta pela rota tradicional de projeto, construção e manutenção, o mesmo paralelo se deve fazer quando se opta pela adoção de aplicação de reparos de materiais não metálicos, como os materiais compósitos, algo que será tratado de forma mais específica na presente pesquisa.

Realizando uma comparação do comportamento de ligas metálicas e os compósitos, com relação aos mecanismos de falhas conhecidos, sabe-se que as ligas metálicas apresentam falhas na presença de gradientes de tensão acentuados ou então em tensões cíclicas mais baixas, de forma mais lenta (AGARWAL, 2015). Além disso, é comum que, em estruturas práticas, trincas macroscópicas produzam gradientes de tensão acentuados, o que pode ocorrer durante os vários processos de fabricação. Neste sentido, o estudo do crescimento quase-estático da trinca pode fornecer informações úteis sobre a sensibilidade a falhas do material e para estabelecer requisitos de inspeção para determinar a criticidade das trincas.

Todavia, nos compósitos os processos de fratura são significativamente diferentes e mais complexos do que em materiais homogêneos, como metais. Pode-se presumir que a falha em um material compósito reforçado por fibra provém de pequenos defeitos inerentes ao material. Esses defeitos podem resultar em fibras quebradas, falhas na matriz ou descolamento de interface (AGARWAL *et al.*, 2015).

A seguir, serão descritos os principais mecanismos de falha para materiais compósitos, a saber: fratura da fibra, deformação e fratura da matriz, separação entre as fases da fibra e da matriz, arrancamento de fibra e a trinca de delaminação. Esses principais mecanismos também são ilustrados na Figura 2.3.2.1.

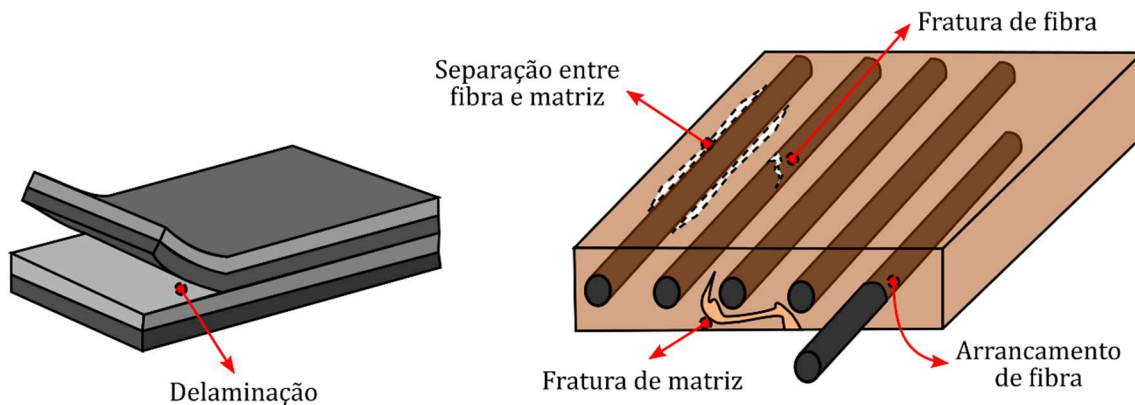


Figura 2.3.2.1 – Principais mecanismos de falha em compósitos [Autor, 2022].

### 2.3.2.1 Fratura da fibra

Quando a trinca se propaga na direção normal à fibra, estas acabam por se romper, o que acaba causando a falha completa do laminado. Isto ocorre sob carregamento de tração, quando a tensão máxima admissível das fibras é excedida, ou seja, as fibras fraturam quando atingem o seu limite máximo de deformação.

Cabe ressaltar que, apesar das fibras serem responsáveis pela resistência mecânica do material, a fratura das fibras representa uma percentagem de energia muito baixa relativamente à quantidade de energia absorvida pelo material compósito. No entanto, a presença das fibras influencia a tensão de escoamento do material, e, por conseguinte, atua fortemente na energia total absorvida na zona elástica (DANIEL, 2006).

### 2.3.2.2 Deformação e fratura da matriz

Para ocorrer a fratura total do compósito, o material da matriz que envolve as fibras deve fraturar completamente. As resinas termoendurecíveis, tal como as resinas de epóxi e poliéster são materiais frágeis. Assim, a quantidade de energia absorvida por elas mediante impacto é praticamente insignificante, apesar de haver uma pequena parcela de absorção de energia devido à deformação da matriz (AGARWAL *et al.*, 2015).

### 2.3.2.3 Separação entre as fases da fibra e da matriz

Durante a propagação de trincas pode ocorrer a separação entre a matriz e as fibras, quando esta propagação ocorre paralelamente às fibras. Neste processo, as ligações químicas ou secundárias entre as fibras e a matriz são quebradas. Este tipo de defeito

ocorre normalmente quando há grandes diferenças nos módulos de elasticidade e tensão de escoamento entre as fases. O aumento da energia absorvida em testes de impacto pode aumentar com a diminuição da força de ligação presente nas interfaces, uma vez que tal característica promove delaminação entre fibra/matriz com consequente absorção de energia (CALLISTER, 1999).

#### **2.3.2.4 Arrancamento de fibra**

Este dano ocorre quando fibras frágeis ou fibras descontínuas são embebidas numa matriz de elevada resistência, cuja fratura das fibras origina uma concentração de tensões local onde a fibra foi quebrada. Esta concentração de tensões pode ser aliviada através da matriz, evitando que esta quebre. Nesta situação, as fibras são arrancadas do interior da matriz.

A diferença entre arrancamento e separação das fibras/matriz consiste no fato de que a separação da fibra e da matriz ocorre quando a trinca na matriz é incapaz de se propagar através da fibra. Já no arrancamento de fibra, o evento deve-se à falta de capacidade da trinca, iniciada na quebra da fibra, se propagar pela matriz.

Os arrancamentos de fibra são geralmente acompanhados pela deformação extensiva da matriz, o que não acontece na separação fibra/matriz. Apesar de estes fenômenos parecerem semelhantes por se darem na região da interface, estes acontecem mediante condições distintas. No entanto, ambos são responsáveis por um aumento de energia absorvida durante a fratura (AGARWAL *et al.*, 2015).

#### **2.3.2.5 Trinca de delaminação**

A propagação de uma trinca por uma camada pode parar quando atinge as fibras de uma camada adjacente. Devido às altas tensões de corte adjacentes à ponta da trinca, esta última pode dividir-se e propagar-se paralelamente ao plano de interface das camadas. Estas trincas são chamadas de trincas de delaminação. A delaminação ocorre frequentemente quando os laminados são testados à flexão (AGARWAL *et al.*, 2015).

### **2.3.3 Seleção dos Compósitos**

Para que o compósito possa ser efetivo em sua aplicação, faz-se necessário conhecer previamente quais condições a que será submetido o material. Neste sentido, o regime de tensões e deformações e, também, a temperatura, a presença de umidade e a

ocorrência de agentes agressivos são informações mínimas e necessárias para fazer a melhor escolha durante o projeto e seleção de compósitos.

Desse modo, a seguir, são discutidos os requisitos normativos do código ASTM D578, que versa sobre os tipos de fibras de vidro, suas características e aplicações. Em sequência, aborda-se as principais características das resinas epóxi, materiais esses utilizados na fase experimental da presente pesquisa.

### **2.3.3.1 Especificação de Fibras de Vidro de Acordo com a ASTM D578**

A norma ASTM D578 cobre os requisitos para fibras contínuas e fios de fibra de vidro descontínua, incluindo fios simples, dobrados, múltiplos e também cobre fios de fibra de vidro texturizada. Esta especificação tem como objetivo auxiliar os usuários finais, designando a nomenclatura geral para os produtos de fios fabricados na indústria de fibra de vidro.

As fibras de vidro são produzidas com várias composições, com uma variedade de usos sob condições específicas, como alto estresse físico ou químico, alta umidade, alta temperatura ou ambientes elétricos, sendo as principais classes descritas a seguir:

- a) As fibras de vidro da classe "C" são compostas principalmente pelos óxidos de sódio, cálcio, boro, alumínio e silício com uma composição química certificada e que apresenta uma boa resistência ao meio ácido, com exceção ao ácido fluorídrico (HF).
- b) As fibras de vidro da classe "E" são compostas principalmente por os óxidos de cálcio, alumínio e silício, com composições químicas certificadas para usos gerais, como por exemplo, dispositivos elétricos para alta tensão, postes de luz, isolantes elétricos de ferramentas, telhas, pisos, filtros, isolamentos acústicos, entre outros.
- c) A nomenclatura "E-CR" é usada para fibras de vidro da classe "E" sem boro, para melhorar a resistência a corrosão no uso em meios ácidos, quando houver essa necessidade.
- d) As fibras de vidro da classe "S" são compostas principalmente pelos óxidos de magnésio, alumínio e silício, com uma composição química certificada para as aplicações onde é requerida alta resistência mecânica do material.
- e) Por fim, as fibras de vidro da classe "R" possuem composição química livre de boro e são compostas principalmente pelos óxidos de silício, alumínio, cálcio e magnésio. Materiais da classe "R" possuem excelente resistência a meios aquosos e ácidos, além de maior resistência mecânica que os materiais da classe "E".

A relação completa das classes de fibras de vidro previstas na norma ASTM D578, com as respectivas composições químicas, encontram-se na Tabela 2.3.3.1(a).

Tabela 2.3.3.1(a) - Classes de fibras de vidro previstas na ASTM D578, com as respectivas composições químicas. [Polser, s/a].

Classe	A	C	D	E		E-CR	AR	R	S
Componente	%	%	%	%		%	%	%	%
Dióxido de Silício (SiO <sub>2</sub> )	63-72	64-68	72-75	52-56		54-62	55-75	56-60	64-66
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0-6	3-5	0-1	12-16		9-15	0-5	23-26	24-26
Óxido de Boro (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0-6	4-6	21-24	5-10		-	0-8	0-0,3	<0,05
Óxido de Cálcio (CaO)	6-10	11-15	0-1	16-25		17-25	1-10	8-15	0-0,2
Óxido de Magnésio (MgO)	0-4	2-4	-	0-5		0-4	-	4-7	9,5-10,3
Óxido de Zinco (ZnO)	-	-	-	-		2-5	-	-	-
Óxido de Bário (BaO)	-	0-1	-	-		-	-	0-0,1	-
Óxido de Lítio (Li <sub>2</sub> O)	-	-	-	-		-	0-1,5	-	-
Óxido de Sódio + Óxido de Potássio (Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O)	14-16	7-10	0-4	0-2		0-2	11-21	0-1	<0,3
Dióxido de Titânio (TiO <sub>2</sub> )	0-0,6	-	-	0-0,8		0-4	0-12	0-0,25	-
Dióxido de Zircônio (ZrO <sub>2</sub> )	-	-	-			-	1-18	-	-
Óxido de Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0-0,5	0,8	0-0,3	0-0,4		0-0,8	0-5	0-0,5	0-0,1
Flor (F <sub>2</sub> )	0-0,4	-	-	0-1		-	-	0-0,1	-

Cabe ressaltar que a norma ASTM D578 não aborda as questões de segurança associadas ao seu uso. Portanto, é responsabilidade do usuário o estabelecimento das práticas adequadas de segurança, saúde e meio ambiente e determinar a aplicabilidade das limitações regulamentares da norma.

### 2.3.3.2 Matriz Polimérica Epóxi

Conforme já mencionado, as principais funções da matriz em um compósito reforçado por fibras é manter unidos os filamentos, conferir proteção contra danos superficiais ou contra a ação química provocada pela interação com o meio, bem como possibilitar a distribuição do carregamento de forma mais uniforme para a malha de fibras. Por isso, a especificação da resina utilizada como matriz tem influência direta do desempenho do material compósito. Além disso, são fatores de grande importância a estabilidade quanto à composição química, seu estado físico e morfológico e também a eventual presença de impurezas, as quais devem, necessariamente, ser levadas em consideração na especificação deste material.

Tratando-se especificamente das resinas epóxi, ou poliepóxido, esse é um polímero termofixo que se endurece quando se mistura com um agente catalisador ou "endurecedor". As resinas epóxi mais frequentes são produtos de uma reação entre

epicloridrina e bisfenol-a. Existem ainda as resinas à base de bisfenol F e as resinas epóxi novolac, hidrogenadas, halogenadas e alifáticas.

Essas resinas são termofixas, ou termorígidas, e apresentam larga gama de viscosidades, podendo ser encontradas resinas na faixa de 400 cP até 15000 cP, apresentando boa resistência mecânica e química, com excelente capacidade de aderência a metais, cerâmicas e madeiras. Além disso, também apresentam a possibilidade de vasta aplicação para compósitos elaborados através do processo de pré-impregnação (*prepregs*) e também para aplicação de adesivos estruturais.

As vantagens das resinas epóxi com relação a outros tipos de resinas empregadas em compósitos reforçados com fibras são a alta resistência mecânica, excelente adesão, baixo índice de dilatação e contração térmica e sua facilidade de processamento. Por outro lado, apresentam como desvantagens a baixa ductibilidade e a deterioração de suas propriedades na presença de umidade.

#### **2.3.4 Resistência dos Materiais Compósitos Reforçados com Fibras Contínuas**

Um conhecimento adequado da teoria clássica da laminação pode, em casos específicos, prover soluções bastante otimizadas quando se leva em consideração determinadas situações de reparos de tubulações, sobretudo quando se considera trechos curvos, pontos onde há imposição de esforços externos ou mesmo em pontos nos quais outras variáveis devam ser respeitadas, como por exemplo quando há requisito de rigidez máxima, que possa vir a limitar a adição de uma quantidade demasiada de camadas de material compósito sobre um trecho da tubulação. Neste caso, um estudo mais apurado pode determinar a adição de fibras em orientações específicas, que podem resultar em um projeto adequado com uma menor espessura de reparo.

Para compósitos que possuem fibras contínuas alinhadas, além das questões das propriedades e frações volumétricas das fases das fibras e da matriz, as propriedades mecânicas e o comportamento tensão-deformação são altamente anisotrópicas (CALLISTER, 1999).

Tomando como base um material compósito de camada única de fibras contínuas alinhadas sob carregamento uniaxial e dentro do regime elástico, conforme a figura 2.3.4.1, ao se considerar que a ligação interfacial entre as fibras e a matriz é ideal, acarreta na adoção da hipótese de que a deformação da matriz e das fibras é a mesma.

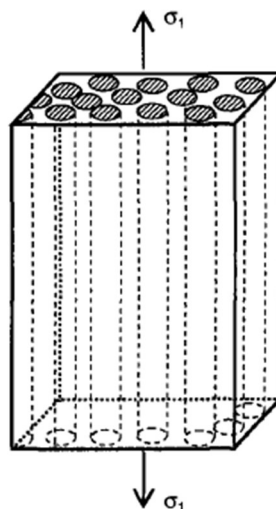


Figura 2.3.4.1 - Compósito de camada única de fibras contínuas alinhadas sob carregamento uniaxial. [DANIEL, 2006].

Dessa forma, pode-se dizer que a carga suportada por determinado componente,  $F_{cp}$ , é a soma das cargas suportadas pela matriz,  $F_m$ , e pelas fibras,  $F_f$ , ou seja:

$$F_{cp} = F_m + F_f. \quad (\text{Equação 2.3.4.1})$$

Considerando, ainda, que em um carregamento axial de tração a tensão é o resultado da razão da força aplicada pela área da seção transversal ao carregamento, temos que:

$$\sigma_{cp} A_{cp} = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f. \quad (\text{Equação 2.3.4.2})$$

Portanto:

$$\sigma_{cp} = \sigma_m \frac{A_m}{A_{cp}} + \sigma_f \frac{A_f}{A_{cp}}. \quad (\text{Equação 2.3.4.3})$$

Ponderando que o comprimento das fibras e da matriz é igual, nas hipóteses adotadas neste caso, tem-se que a razão entre a área da matriz e a área do compósito equivale à fração volumétrica da matriz com relação ao compósito. Por conseguinte, a razão da área das fibras e a área do compósito equivale à fração volumétrica das fibras



com relação ao compósito. Assim, pode-se reescrever a equação acima nos seguintes termos:

$$\sigma_{cp} = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f. \quad (\text{Equação 2.3.4.4})$$

Utilizando-se da hipótese de que não há diferença entre o comprimento das fibras e da matriz antes, durante e após o carregamento, tem-se que  $\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$ . Assim, pode-se dividir sem prejuízo à coerência matemática, cada um dos termos por sua deformação específica, resultando na seguinte equação.

$$\frac{\sigma_{cp}}{\varepsilon_{cp}} = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} V_f. \quad (\text{Equação 2.3.4.5})$$

Considerando a Lei de Hooke, que estabelece que  $\sigma = E\varepsilon$ , e desconsiderando as tensões cisalhantes, devido à magnitude quando comparadas à tensão principal para o carregamento axial aqui tratado, chega-se à seguinte expressão para o módulo de elasticidade de um compósito de camada única de fibras contínuas alinhadas, para carregamento uniaxial, dentro do regime elástico:

$$E_{cp} = E_m(1 - V_f) + E_f V_f. \quad (\text{Equação 2.3.4.6})$$

Ao considerar este mesmo material compósito de camada única de fibras contínuas perfeitamente alinhadas, para um carregamento transversal, tem-se que a tensão à qual estão submetidas ambas as fases é a mesma, ou seja,  $\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma$ . Já a deformação para esse estado de carregamento, pode ser considerada como sendo:

$$\varepsilon_{cp} = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f. \quad (\text{Equação 2.3.4.7})$$

Analogamente ao caso anterior, com  $\sigma = E\varepsilon$ , pode-se reescrever a Equação 2.3.4.7 da seguinte forma:

$$\frac{\sigma}{E_{cp}} = \sigma \frac{V_m}{E_m} + \sigma \frac{V_f}{E_f}. \quad (\text{Equação 2.3.4.8})$$

Por fim, ao dividir todos os termos da Equação 2.3.4.8 acima pela tensão  $\sigma$ , obtém-se:

$$\frac{1}{E_{cp}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f}. \quad (\text{Equação 2.3.4.9})$$

Assim, chega-se a seguinte expressão para o módulo de elasticidade de um compósito de camada única de fibras contínuas alinhadas, para carregamento transversal, dentro do regime elástico:

$$E_{cp} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f)E_f + V_f E_m}. \quad (\text{Equação 2.3.4.10})$$

Uma das vantagens mais importantes dos compósitos fibrosos é que a anisotropia ou propriedades podem ser controladas de forma muito eficaz, isto é, desejados valores de propriedade em diferentes direções podem ser obtidos facilmente alterando as variáveis de material e o modo de manufatura. (AGARWAL *et al.*, 2015).

Em se tratando de compósitos de múltiplas camadas, tem-se as tensões variando de camada para camada. A Teoria da Laminação estabelece como conveniente tratar o sistema como sendo um sistema de uma única camada sobre a qual atua um sistema de forças e momentos equivalentes. As forças (cujos valores são dados em termos de força por unidade de comprimento) são obtidas pela integração das tensões incidentes ao longo da espessura  $h$ , conforme Equações 2.3.4.11, 2.3.4.12 e 2.3.4.13 abaixo:

$$N_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x dz, \quad (\text{Equação 2.3.4.11})$$

$$N_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y dz, \quad (\text{Equação 2.3.4.12})$$

$$N_{xy} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xy} dz. \quad (\text{Equação 2.3.4.13})$$

Analogamente, os momentos (cujos valores são dados em termos de momento por unidade de comprimento) são obtidos através da integração ao longo da espessura  $h$  do momento em relação ao plano central, conforme Equações 2.3.4.14, 2.3.4.15 e 2.3.4.16 a seguir.

$$M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x Z dz, \quad (\text{Equação 2.3.4.14})$$

$$M_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y Z dz, \quad (\text{Equação 2.3.4.15})$$

$$M_{xy} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xy} Z dz. \quad (\text{Equação 2.3.4.16})$$

Ao considerar um laminado de várias camadas, conforme a Figura 2.3.4.1, pode-se reescrever as equações para o sistema de forças e momentos, levando em consideração a sumarização das integrais e a contribuição de cada camada, conforme as expressões a seguir:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dZ = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k dZ. \quad (\text{Equação 2.3.4.17})$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} Z dZ = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k Z dZ. \quad (\text{Equação 2.3.4.18})$$

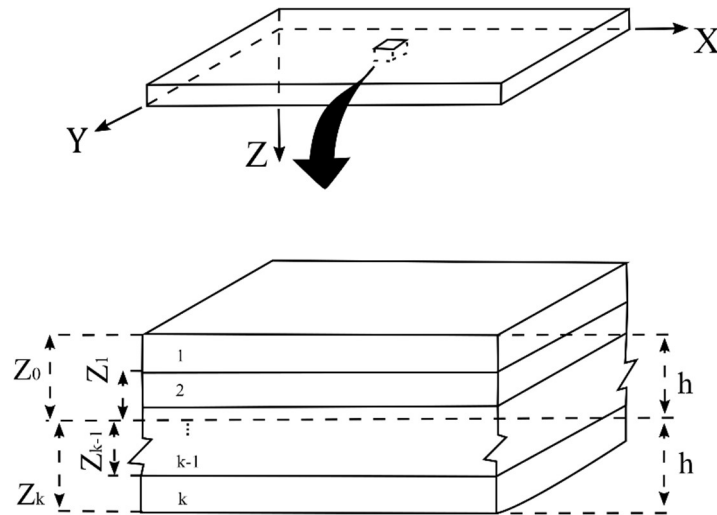


Figura 2.3.4.2 - Laminado de várias camadas [Departamento de Defesa dos EUA - COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK, 2002].

Para placas de materiais compósitos ortotrópicos, considerando eixos arbitrários, as relações de tensões e deformações podem ser descritas conforme a Equação 2.3.4.19 abaixo, considerando a existência de seis constantes elásticas:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (\text{Equação 2.3.4.19})$$

É possível descrever as deformações em qualquer ponto de uma placa de camada única, através do conhecimento das deformações no plano central, as curvaturas e sua distância do plano central, já as deformações variam linearmente através da espessura da placa. Essa variação linear está baseada na hipótese de que as placas adjacentes não influenciam no comportamento umas das outras. Deformações lineares irão produzir variações lineares de tensões para um material com propriedades uniformes através de toda a espessura (AGARWAL *et al.*, 2015).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + Z \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (\text{Equação 2.3.4.20})$$

Substituindo a Equação 2.3.4.20 nas Equações 2.3.4.17 e 2.3.4.18, tem-se novas relações que consideram as tensões e as deformações para compósitos de várias camadas, conforme:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} &= \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_K \begin{Bmatrix} \varepsilon_X^0 \\ \varepsilon_Y^0 \\ \gamma_{XY}^0 \end{Bmatrix} dZ \right. \\ &\quad \left. + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_K \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} Z dZ \right\}, \end{aligned} \quad \text{(Equação 2.3.4.21)}$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} &= \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_K \begin{Bmatrix} \varepsilon_X^0 \\ \varepsilon_Y^0 \\ \gamma_{XY}^0 \end{Bmatrix} Z dZ \right. \\ &\quad \left. + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_K \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} Z^2 dZ \right\}. \end{aligned} \quad \text{(Equação 2.3.4.22)}$$

As Equações 2.3.4.21 e 2.3.4.22 acima, podem ser simplificadas, obtendo-se:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} &= \left[ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_K \int_{h_{k-1}}^{h_k} dZ \right] \begin{Bmatrix} \varepsilon_X^0 \\ \varepsilon_Y^0 \\ \gamma_{XY}^0 \end{Bmatrix} \\ &\quad + \left[ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_K \int_{h_{k-1}}^{h_k} Z dZ \right] \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}, \end{aligned} \quad \text{(Equação 2.3.4.23)}$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} &= \left[ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_K \int_{h_{k-1}}^{h_k} Z dZ \right] \begin{Bmatrix} \varepsilon_X^0 \\ \varepsilon_Y^0 \\ \gamma_{XY}^0 \end{Bmatrix} \\ &\quad + \left[ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_K \int_{h_{k-1}}^{h_k} Z^2 dZ \right] \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad \text{(Equação 2.3.4.24)}$$

Por fim, pode-se estabelecer uma forma simplificada, através de três novas matrizes, conforme:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (\text{Equação 2.3.4.25})$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (\text{Equação 2.3.4.26})$$

As matrizes [A], [B] e [D] são chamadas de matriz de rigidez à tração, matriz de acoplamento e matriz de rigidez à flexão, respectivamente, e são dadas pelas seguintes relações:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}), \quad (\text{Equação 2.3.4.27})$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2), \quad (\text{Equação 2.3.4.28})$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3). \quad (\text{Equação 2.3.4.29})$$

Assim, a matriz [B] é igual a zero para laminados simétricos, nos quais para cada camada acima do plano médio há uma camada idêntica colocada a uma distância equivalente abaixo do plano médio. Os laminados simétricos possuem equações de tensões e momentos desacopladas, as quais são dadas pelas Equações 2.3.4.30 e 2.3.4.31:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix}, \quad (\text{Equação 2.3.4.30})$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (\text{Equação 2.3.4.31})$$

Os laminados simétricos são comumente construídos de forma a evitar empenamentos durante a cura ou durante o serviço. Conforme Agarwal *et al.* (2015), outra possibilidade é a fabricação de um laminado que se comporte como uma camada ortotrópica com relação às forças e deformações no plano. Isso pode ser obtido quando  $A_{16} = A_{26} = 0$ . Essa configuração é adquirida para orientações de fibras em  $0^\circ$  ou  $90^\circ$ , sendo que para este tipo de arranjo, tem-se que similarmente,  $D_{16} = D_{26} = 0$ . Como será abordado mais adiante, esta foi a configuração adotada no experimento de campo, objeto da presente dissertação.

Ressalta-se que não há aqui a anulação do acoplamento entre as tensões normais e as tensões de flexão, o que implica que tal arranjo seja expresso nos termos das Equações 2.3.4.32 e 2.3.4.33, abaixo:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (\text{Equação 2.3.4.32})$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (\text{Equação 2.3.4.33})$$

Outra abordagem mais simples para o cálculo de tensões em compósitos reforçados com fibras é a Teoria da Resistência da Malha, através da qual o material é avaliado sob a ótica de um comportamento de membrana. Neste caso, o carregamento é suportado pelas fibras, sendo que a matriz tem como única utilidade agregar e manter a coesão geométrica dos filamentos. Neste caso, as relações tensão-deformação no material em relação às direções principais podem ser escritas como:

$$\sigma_x = E_x \varepsilon_x^0. \quad (\text{Equação 2.3.4.34})$$

Onde  $E_x$  refere-se à rigidez da fibra e  $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$ .

Em se tratando de reparos de formatos cilíndricos, as tensões principais estão demonstradas nas Figuras 2.3.4.2 e 2.3.4.3, salientando que, neste caso, apenas as tensões circunferenciais são consideradas, de modo que:

$$\sigma_x = \sigma_c = \frac{P R}{t}. \quad (\text{Equação 2.3.4.35})$$

Onde:

- a)  $\sigma_c$  é a tensão circunferencial;
- b)  $P$  é a pressão interna;
- c)  $R$  é o raio interno da tubulação;
- d)  $t$  é a espessura da parede.

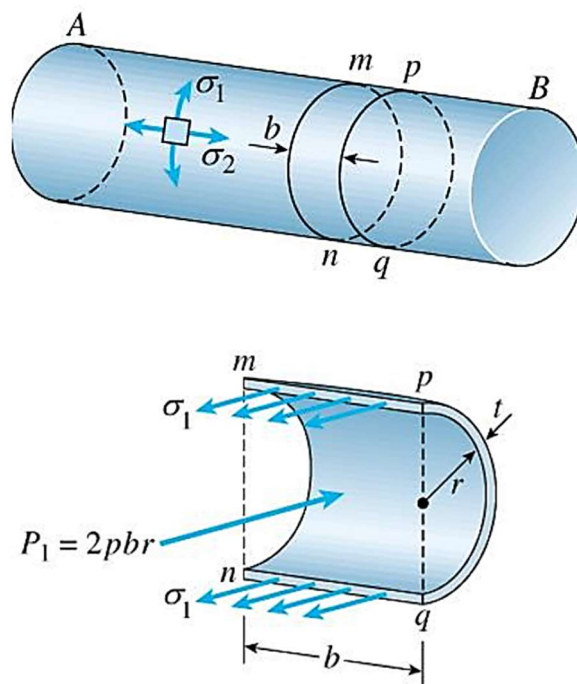


Figura 2.3.4.3 - Tensões Principais em Cilindros Pressurizados – I e II. [Buffoni, s/a].

Assim, pode-se calcular a espessura mínima da camada de material compósito,  $t_{\min}$ , a fim de suportar uma pressão interna. Considerando caso de um cilindro pressurizado internamente, tem-se:



$$t_{\min} = \frac{PR}{\sigma_T}. \quad (\text{Equação 2.3.4.36})$$

Como  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ , temos que:

$$t_{\min} = \frac{1}{\varepsilon_f} \left( \frac{P \cdot D}{2} \frac{1}{E_f} \right). \quad (\text{Equação 2.3.4.37})$$

Essa teoria acarreta menor rigidez quando comparada ao modelo da Teoria Clássica da Laminação, cujos preceitos já foram explanados anteriormente, dada a desconsideração da rigidez transversal e de cisalhamento. Conforme o Departamento de Defesa dos EUA (COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK, 2002), a utilização da abordagem de Análise da Resistência da Malha acarreta, conforme alguns estudos realizados, em uma rigidez aproximadamente 10% menor, quando comparado com os resultados obtidos pela aplicação da Teoria Clássica da Laminação, sendo esta última teoria a que apresenta resultados mais realistas. Todavia, a abordagem apresenta resultados conservadores, o que torna válida a sua utilização em muitos casos, dada a sua praticidade, principalmente quando se busca um valor mínimo de resistência para o material compósito.

## 2.4 Normas para reparos compósitos para tubulações

Outra possibilidade de caminho para o dimensionamento de reparos de materiais compósitos é a utilização de normas de projeto que se prestam a esse fim. A seguir, são apresentadas, de forma sucinta, as duas normas mais utilizadas para o projeto de reparos feitos com materiais compósitos para tubulações: A norma ISO 24817 – Reparos compósitos para tubulações - qualificação e projeto, instalação, testes e inspeção e a norma ASME PCC-2 Parte 4 – Reparos de equipamentos pressurizados e tubulações: Reparos não Metálicos. Posteriormente, é realizada a comparação entre as duas, abordando as similaridades e diferenças.

### 2.4.1 Norma ISO 24817 – Reparos compósitos para tubulações - qualificação e projeto, instalação, testes e inspeção

A Organização Internacional de Normalização, através da norma ISO 24817 fornece requisitos e recomendações para a qualificação e projeto, instalação, testes e inspeções para a aplicação de reparos externos. Dentre os objetos de abrangência dessa norma está o reparo em superfícies corroídas ou danificadas de tubulações, dutos, tanques e embarcações utilizados nas indústrias de petróleo, petroquímica e de gás natural.

Os materiais compósitos que constituem o laminado de reparo considerado neste documento são normalmente aqueles com fibra de aramida (AFRP), carbono (CFRP), vidro (GRP) ou poliéster (ou material similar) reforço em uma matriz de polímero de poliéster, vinil éster, epóxi ou poliuretano. Outros tipos de fibras e matrizes também são permitidos uma vez qualificados. Assim, os substratos de tubulação e vasos considerados dentro do padrão incluem aço carbono, aço C-Mn, aço inoxidável, aço duplex, aço super duplex, GRP, Cobre, alumínio, aço galvanizado e titânio (ISO 24817, 2017).

#### **2.4.2 Norma ASME PCC-2 – Reparos não Metálicos e Colados**

Já a Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos, através da norma ASME PPC-2, em sua Parte 4, fornece métodos para reparo de equipamentos, tubulações e equipamentos auxiliares associados, dentro do escopo dos Códigos e Normas ASME, depois de terem sido colocados em serviço. Esses métodos de reparo incluem projeto, práticas de fabricação, inspeções e testes, prevendo reparos provisórios ou permanentes, dependendo das circunstâncias.

Os materiais compósitos permitidos para o sistema de reparo incluem, mas não são limitados a reforços de fibra de vidro, aramida ou carbono. Considera-se permitido o uso de matrizes em polímero termofixo (por exemplo, poliéster, poliuretano, fenólica, éster vinílico ou epóxi). As fibras devem ser contínuas e obrigatoriamente devem contar com uma orientação preferencial, ou seja, a orientação aleatória das fibras de reforço não é permitida (ASME PCC-2, 2018).

#### **2.4.3 Breve Comparação entre as Normas ISO 24817 e ASME PCC-2 Parte 4**

O escopo das Normas ISO 24817 e ASME PCC-2 Parte 4 é praticamente idêntico, e pode-se afirmar que as duas normas são essencialmente equivalentes em todos os principais aspectos do projeto. Todavia, existem algumas diferenças sutis entre as duas. Por exemplo, quanto à vida útil do reparo, a utilização da A ISO 24817 possibilita projetar

reparos com vidas útil variando entre 2 e 20 anos, enquanto no caso da ASME PCC-2 Parte 4, define-se por premissa uma condição de vida útil de 20 anos. Ensaios realizados pela Armor Plate, Inc (2017) informam que essas diferenças pontuais não prejudicam a equivalência na maioria das aplicações de reparo.

Para o caso de defeitos não passantes (que não trespassam toda a espessura do substrato metálico), ambas as normas utilizam, para o cálculo de espessura mínima, o valor previamente calculado da deformação. No cálculo da deformação entra um fator de serviço ( $f_T$ ) que difere nas duas normas. No caso da ASME PCC-2 Parte 4, são previstos quatro casos de classificação, a depender da frequência de falha que se espera ao longo da vida útil da tubulação. Já no caso da ISO 24817 esse fator de serviço varia em função da vida útil estipulada para o reparo.

Ainda com relação aos defeitos passantes, de forma geral as equações de cálculo são bastante similares para as duas normas de referência. A norma ISO 24817 estabelece que um defeito dentro de um substrato deve ser considerado como passante quando a espessura da parede em qualquer ponto da área afetada é inferior a 1 mm no final de sua vida útil, classificando esse tipo de defeito como tipo B. A dimensão do defeito passante a ser considerada no projeto deve ser baseada no tamanho estimado do defeito quando se atinge o final da vida de projeto do substrato metálico. Conforme esta norma, para o caso de trincas será necessário avaliar se a aplicação do reparo interromperá o crescimento do defeito ou se um reparo maior deve ser previsto, prevendo o comprimento final do defeito.

Considerando o caso da presente pesquisa, como um defeito passante, de sentido axial ou próximo de axial com relação ao sentido do eixo principal da tubulação, a espessura mínima para um laminado de reparo,  $t_{\min}$  expressa em milímetros, é calculada usando a Equação 2.4.3.1:

$$P = f_{T2} f_{\text{leak}} \cdot \sqrt{\frac{0,001 \gamma_{LCL}}{\frac{(1-n^2)}{E_{ac}} \left[ \frac{\pi D}{8} \varphi + \frac{D^4}{384 t_{\min}^3} \varphi^4 + \frac{D^4 \left( \frac{E_{ac}}{4G} + 2 \right)}{11520 t_{\min}^3} \varphi^6 \right]}} \quad (\text{Equação 2.4.3.1})$$

Onde:

- $E_{ac}$  é o módulo elasticidade combinado  $\sqrt{E_a * E_c}$ , expresso em MPa;
- $G$  é o módulo de cisalhamento do laminado de reparo, expresso em MPa;
- $P$  é a pressão interna, expressa em MPa;

- d)  $\nu$  é o coeficiente de Poisson do laminado de reparo;
- e)  $D$  é o diâmetro externo da tubulação, expresso em mm;
- f)  $t_{\min}$  é a espessura do laminado de reparo, expressa em mm;
- g)  $\varphi$  é o ângulo de orientação do defeito com relação ao eixo axial em rad;
- h)  $\gamma_{LCL}$  é a taxa de liberação de energia, expresso em  $J/m^2$  (com confiança mínima de 95%);
- i)  $f_{T2}$  é o fator de redução devido à temperatura;
- j)  $f_{\text{leak}}$  é o fator de serviço.

Cabe ressaltar que a norma estabelece procedimento experimental específico para a determinação da taxa de liberação de energia  $\gamma_{LCL}$  do reparo a ser utilizado no cálculo da equação acima. Mais ainda, a norma estabelece três classes de reparos, sendo a mais crítica a classe 3. Nesta classe estão enquadrados todos os reparos em sistemas que operam a pressões maiores que  $20 \text{ kgf/cm}^2$  ( $1,96 \text{ MPa}$ ) e/ou temperaturas maiores que  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  e/ou hidrocarbonetos. Para este grupo, o fator de serviço é dado por:

$$f_{\text{leak}} = 0,666 \cdot 10^{-0,01584 (t_{\text{life time}}^{-1})}. \quad (\text{Equação 2.4.3.2})$$

Sendo que  $t_{\text{life time}}$  é o tempo de vida da tubulação em anos. Já o fator de temperatura  $F_{T2}$  deve ser calculado pela seguinte equação:

$$f_{T2} = 0,0000625 [T_m - T_d - (T_{\text{test}} - T_{\text{amb}})]^2 + 0,00125 [T_m - T_d - (T_{\text{test}} - T_{\text{amb}})] + 0,7. \quad (\text{Equação 2.4.3.3})$$

Onde:

- a)  $T_m$  é o limite superior de temperatura para o sistema em  $^\circ\text{C}$ ;
- b)  $T_d$  é a temperatura de projeto do reparo em  $^\circ\text{C}$ ;
- c)  $T_{\text{test}}$  é a temperatura de teste do reparo em  $^\circ\text{C}$ ;
- d)  $T_{\text{amb}}$  é a temperatura ambiente em  $^\circ\text{C}$ .

Para defeitos passantes (tipo B da norma), enquadrados na classe 3, conforme especificado acima, a temperatura de projeto é limitada à temperatura de transição do

vidro, descontados 20 °C, ou à temperatura de distorção da resina, descontados 15°C, o que for menor.

O critério adotado pela norma ASME PCC-2 para enquadramento de defeitos passantes é o mesmo da norma ISO 24817, inclusive considerando dois tipos de defeitos: A e B, sendo essa última classificação recebida por falhas com vazamento do inventário da tubulação. A forma para o cálculo do reparo também é bastante similar à ISO 24817, sendo que para a norma ASME PCC-2, deve ser utilizada a seguinte equação de cálculo:

$$P = f_T f \sqrt{\frac{\gamma_{LCL}}{\frac{(1-n^2)}{E_{ac}} \left[ \frac{\pi D}{8} \varphi + \frac{D^4}{384 t_{min}^3} \varphi^4 + \frac{D^4 \left( \frac{E_{ac}}{4 G_{31}} + 2 \right)}{11520 t_{min}^3} \varphi^6 \right]}} \quad (\text{Equação 2.4.3.4})$$

Onde:

- $E_{ac}$  é o módulo elasticidade combinado  $\sqrt{E_a * E_c}$ , expresso em Pa;
- $G$  é o módulo de cisalhamento do laminado de reparo, expresso em Pa;
- $P$  é a pressão interna, expressa em Pa;
- $\nu$  é o coeficiente de Poisson do laminado de reparo;
- $D$  é o diâmetro externo da tubulação, expresso em m;
- $t_{min}$  é a espessura do laminado de reparo, expressa em m;
- $\phi$  é o ângulo de orientação do defeito com relação ao eixo axial em rad;
- $\gamma_{LCL}$  é a taxa mínima de liberação de energia, expresso em J/m<sup>2</sup>;
- $f_T$  é o fator de redução devido à temperatura;
- $f$  é o fator de serviço.

Cabe ressaltar que, da mesma maneira que a ISO 24817, a ASME PCC-2 também estabelece procedimento experimental específico para a determinação da taxa de liberação de energia  $\gamma_{LCL}$  do reparo a ser utilizado no cálculo da equação acima.

Por outro lado, diferentemente da norma ISO 24817, a norma ASME PCC-2, não estabelece grupos estratificados de classes para reparos no estabelecimento do fator de trabalho. No caso da ASME PCC-2, este fator é dado pelo tempo de teste de qualificação do reparo, sendo esse índice igual a 0,5 para testes de até 1000 horas e 0,67 em caso de

dados de projeto qualificado através de ensaios de laboratório, conforme estabelecidos em apêndice específico da norma em questão.

Na norma ASME PCC-2 o fator de temperatura  $F_T$  deve ser calculado pela seguinte equação:

$$f_{T2} = 0,00006 [T_m - T_d]^2 + 0,001 [T_m - T_d] + 0,7014. \quad (\text{Equação 2.4.3.5})$$

Onde:

- a)  $T_m$  é o limite superior de temperatura para o sistema em °C;
- b)  $T_d$  é a temperatura de projeto do reparo em °C.

Ambas as normas informam que a aplicabilidade das equações Eq. 2.4.3.1 e 2.4.3.4 é limitada a defeitos longitudinais que apresentem um ângulo máximo de 1 rad (cerca de 57°) entre o sentido de propagação do defeito a linha de eixo da tubulação. Adicionalmente, para defeitos passantes (tipo B da norma ASME PCC-2), a temperatura de projeto é limitada à temperatura de transição do vidro, descontados 30 °C ou à temperatura de distorção da resina, descontados 25 °C, o que for menor.

Por fim, pode-se afirmar que, no que diz respeito ao projeto de reparos as duas normas resultam em especificações de reparos muito similares, sendo que a norma ISO 24817 permite certa flexibilidade na especificação da vida útil do reparo a ser instalado, enquanto a ASME PCC-2 Parte 4 fornece um reparo menor (tanto em comprimento quanto em largura), para o mesmo defeito.

## 2.5 Técnicas de Ensaios Não Destrutivos

Embora não seja o foco principal da presente pesquisa, faz-se necessária a abordagem, mesmo que de forma sucinta, da questão dos ensaios não destrutivos. Isso porque a disseminação de novas técnicas de reparos a serem aplicados em sistemas tubulares de alta criticidade, que operam com fluídos perigosos e nocivos, não ocorrerá sem que as técnicas de inspeção e qualificação desses reparos alternativos possam conferir acurácia na avaliação desses novos procedimentos.

Neste sentido, considera-se fundamental que o conhecimento e o desenvolvimento de novas técnicas e materiais de reparo caminhe em paralelo com a inovação e o conhecimento das técnicas de ensaios aplicáveis a esses novos materiais. Embora a

presente pesquisa não tenha se debruçado primariamente na avaliação de uma técnica específica para inspeção de tubulações metálicas reparadas com materiais compósitos, entende-se que o assunto central de presente pesquisa não pode ser desenvolvido sem que seja abordada a questão dos ensaios não destrutivos disponíveis uso neste tipo de evento.

No caso de aplicações em materiais compósitos, os ensaios não destrutivos devem possibilitar que se avalie tanto a qualidade superficial do material, como também possíveis danos e inclusões, como vazios, delaminações e microfissuras na matriz. Assim, o tipo e extensão de ensaio não destrutivo aplicável aos compósitos é dependente da forma, da composição e da aplicação da peça em questão.

A inspeção visual/dimensional é o ensaio não destrutivo mais elementar e visa confrontar as dimensões da peça pronta com as especificadas no projeto, bem como verificar a eventual ocorrência de imperfeições superficiais como bolhas, depressões, contaminações e distorções. Para avaliações mais criteriosas, além do ensaio visual/dimensional, comumente soma-se a avaliação através de ensaios por ultrassom. Estes possibilitam, também, além das avaliações superficiais e dimensionais da peça, identificar vazios, delaminações e porosidade no interior da peça.

Pode-se citar também as avaliações por gamagrafia e raios-X, as quais têm como inconveniente as questões relacionadas às restrições e raios de isolamento, devido à radioatividade das fontes de emissão utilizados neste tipo de ensaio. Dessa forma, são utilizados em casos específicos, onde o ensaio por ultrassom não possibilita obter um resultado satisfatório, como por exemplo na avaliação de compósitos com núcleo do tipo de favo (colmeia).

Outros métodos podem ser utilizados, como por exemplo inspeção por líquidos penetrantes, inspeção infravermelha, holográfica e emissões acústicas, sendo essa última abordada em maiores detalhes na sequência dessa dissertação, haja vista sua aplicação na presente pesquisa.

### **2.5.1 Ensaios de Emissões Acústicas**

A EA é uma técnica de ensaio não destrutivo que detecta diversas anomalias, como trincas, vazamentos, processos corrosivos, descargas parciais, entre outros. Para tal, sensores são instalados na estrutura, captando informações das ondas mecânicas elásticas geradas quando uma irregularidade surge ou se propaga no material. As informações são então processadas por um *software* de EA, gerando indicadores sobre o tipo de anomalia

e a sua localização, possibilitando com isso o uso pontual de outras técnicas de inspeção e de Ensaios Não-Destrutivos (ENDs) para avaliar a estrutura (FILIPPIN *et al.*, 2017). A energia liberada se propaga (onda) por todo o material a partir da fonte. Essas ondas podem ser detectadas com o auxílio de sensores adequados, que convertem as oscilações na superfície do material de ondas mecânicas para sinais elétricos (ver Figura 2.5.1.1).

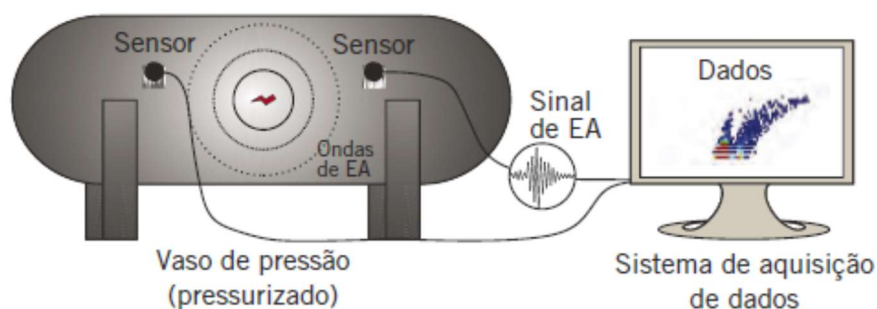


Figura 2.5.1.1 – Sistema de coleta de sinais [FILIPPIN *et al.*, 2017].

As principais vantagens da EA em relação às outras técnicas de ENDs são a capacidade de inspecionar a estrutura em sua totalidade, a possibilidade de monitoramento contínuo em serviço, a execução relativamente rápida e a intrusão mínima no processo. Essa combinação torna a EA uma ferramenta com potencial para diminuir os custos do plano de inspeção e manutenção das plantas industriais (GROSSE e OHTSU, 2008).

Como as estruturas usualmente analisadas pela ET apresentam, geralmente, emissões de baixas amplitudes e elevadas frequências (entre centenas de kHz e algumas dezenas de MHz), são requeridos sensores de alta sensibilidade, os quais são propensos a sofrer Interferência Eletromagnética (EMI). Por esse motivo, é necessário um sistema de condicionamento de sinal, com o propósito de atenuar os níveis de ruído do sistema, além de requerer um sofisticado processamento de dados (CARPINTERI *et al.*, 2008b; CARPINTERI e LACIDOGNA, 2008; GROSSE e OHTSU, 2008; OHTSU, 2015).

### 2.5.1.1 Parâmetros de Medida dos Efeitos de Emissão Acústica

Os parâmetros de controle demonstrados na Figura 2.5.1.2, são de relevante importância no estudo e execução dos Ensaios de Emissões Acústicas, pois guardam



informações relevantes no campo da engenharia aplicada, tais como a medição de intensidade e a duração de eventos em estruturas, determinação do mecanismo da falha de componentes, dentro outros fatores.

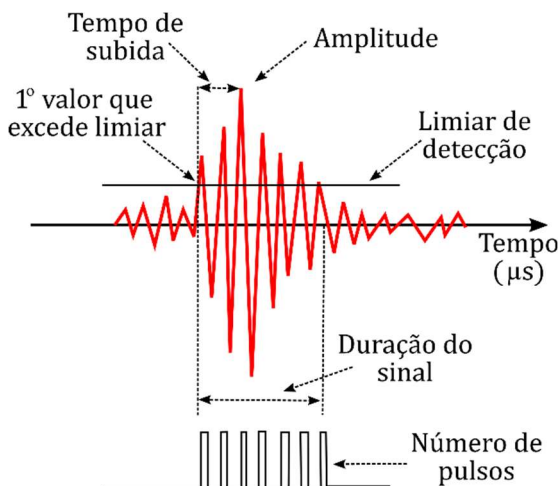


Figura 2.5.1.2 - Parâmetros de Análise de Emissões Acústicas [Autor, 2022].

### 2.5.1.2 Amplitude

A amplitude é um dos parâmetros mais básicos da EA e é definida como sendo a altura da crista (ou vale) de maior magnitude da forma de onda. Esse valor, usualmente convertido para decibéis (dB), é medido do ponto central da forma de onda, no qual a medida do sinal é igual a zero, até o pico.

### 2.5.1.3 Contagem (Número de Pulsos)

A contagem também é um parâmetro básico da EA e é definido como sendo o número de vezes que as cristas da forma de onda atingem um valor superior ou igual ao valor do limiar de detecção, definido pelo técnico de inspeção, com base no tipo de evento esperado e no material que está sendo inspecionado. Ou seja, a contagem é a quantidade de picos, do lado positivo da forma de onda, que ultrapassam o limiar de detecção pré-definido.

### 2.5.1.4 Contagem ao Pico

Objetiva analisar a parte inicial da forma de onda, sendo este parâmetro definido como o número de picos acima do valor do limiar de detecção, até que seja atingido o pico do sinal.

#### **2.5.1.5 Energia**

O parâmetro da energia pode ser calculado através das informações obtidas na integração da forma de onda elevada ao quadrado, dividindo o resultado pela impedância do sistema de EA (geralmente 50 Ohms). A prática para análise das informações relativas à energia da propagação das ondas nas análises de emissão acústica, no entanto, costuma levar em consideração a integração direta da curva Tensão (mV) pelo tempo (ms), na qual os limites de integração no tempo são o início pela primeira passagem pelo limiar de detecção, e o fim. Ou seja, a última passagem pelo limiar de detecção, o que não representa o valor de energia exato, mas tão somente uma medida relativizada desta (FILIPPIN *et al.*, 2017).

#### **2.5.1.6 Duração**

A duração é um parâmetro de medida de tempo decorrido entre o início e o fim do evento. Também pode ser definido como o intervalo de tempo que determina o tamanho da forma de onda, levando em consideração a primeira e a última passagem do sinal pelo valor de limiar de detecção.

De forma similar à duração, o tempo de subida é um parâmetro que mede tempo decorrido, porém é definido como sendo o intervalo de tempo contido entre a primeira passagem da forma de onda pelo limiar de detecção até o instante de ocorrência do pico de maior magnitude. Esse parâmetro é importante para a análise do comportamento inicial da forma de onda, que pode variar significativamente entre mecanismos de dano.

No presente ponto, tendo abordado uma sucinta revisão dos conceitos mais relevantes para a presente pesquisa, no capítulo a seguir, serão descritos os materiais e métodos utilizados durante a realização do presente estudo.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

A presente seção tem como objetivo descrever de forma detalhada as etapas adotadas para realização dos ensaios de campo. Nelas, buscou-se avaliar o comportamento de um reparo construído com material compósito de fibras de vidro e resina polimérica aplicado sobre uma tubulação de aço pressurizada internamente, avaliando o dimensionamento e a qualificação desse tipo de reparo com vistas ao seu uso na indústria de óleo e gás.

#### **3.1 Descrição Geral do Experimento**

Todos os experimentos de campo descritos a seguir ocorreram ao longo do mês de novembro de 2021. Estes foram realizados nas instalações do GASLUB, Unidade da PETROBRAS localizada em Itaboraí/RJ.

A parte experimental da presente pesquisa envolveu as etapas de projeto e construção da tubulação e do reparo de material compósito, testes de estanqueidade, atividade de inserção do defeito na tubulação, montagem da instrumentação para a aquisição de dados de emissões acústicas, realização de testes hidrostáticos, operações de desbaste do reparo e a realização de novos testes hidrostáticos, sucessivamente até a falha da tubulação ensaiada. Ainda foram realizados ensaios não destrutivos e analisados dados de emissões acústicas adquiridos, visando-se atestar a viabilidade da solução alternativa de reparo. As etapas desta parte da pesquisa serão descritas em maiores detalhes ao longo do presente capítulo.

#### **3.2 Projeto e Construção da Tubulação**

A tubulação utilizada nos experimentos do estudo foi concebida para simular o comportamento de tubulações de aço carbono pressurizadas em serviço. Isso ocorreu com o intuito de verificar em que condições poderiam ser adotados procedimentos de reparo através da aplicação de compósitos ao invés de se realizar o processo de soldagem convencional. Por uma questão de viabilidade e logística, foram utilizados materiais que estavam disponíveis para a construção da peça para ensaio nas instalações do GASLUB. Portanto, não foram realizados cálculos de dimensionamento prévio, mas sim, uma

verificação posterior dos limitantes em função das partes utilizadas na construção do espécime de testes.

Buscou-se nas normas mais utilizadas na indústria brasileira identificar os materiais aplicados em sistemas de hidrocarbonetos para condições de temperatura e pressões moderadas. A decisão por considerar apenas sistemas de condições menos severas de temperatura e pressão advém da criticidade e dos possíveis impactos em eventuais falhas de tubulações neste tipo de empreendimento. Dessa forma, procurou-se uma posição conservativa, entendendo que, caso encontre-se viabilidade na utilização de reparos compósitos para situações menos críticas, a evolução dos materiais de aplicação, bem como novas pesquisas sobre o tema, podem contribuir para que, gradativamente, esse tipo de solução possa ser adotado para casos mais críticos.

Atualmente, a norma brasileira mais empregada para a especificação de materiais em sistemas de tubulações a partir das condições de temperatura, pressão e condição de agressividade de toxicidade dos fluidos, na área de processamento de petróleo e derivados é a N-76 (PETROBRAS, 2004). Utilizou-se nos testes uma tubulação que atende aos requisitos das famílias A e B desta norma. Isso, na prática, equivale a verificar a aplicabilidade de reparos feitos com materiais compósitos em tubulações que operem a uma pressão de até 20 kgf/cm<sup>2</sup> (1,96 MPa) e temperaturas de até 100 °C. Ademais, isso resulta em tubulações que operem para condução das seguintes correntes:

- a) Água: bruta, de resfriamento, clarificada, de máquinas, industrial, de incêndio, salgada ou decationizada;
- b) Solução de espuma em água;
- c) Ar de serviço;
- d) Nitrogênio para instrumentação;
- e) Solução diluída de ácido sulfúrico;
- f) Hipoclorito de sódio;
- g) Álcool anidro;
- h) Álcool hidratado.

De acordo com a Norma N-76, o material que atende as aplicações acima é o aço API 5L Gr B PSL1, com ou sem costura, que possui 0,28% C, 1,2% Mn, no máximo 0,030% de S e P (TUBOSIDER, 2022). Quanto às conexões e acessórios, as famílias A e B preveem itens de classe de pressão 150 e montagem de flanges com face e ressalto.

Estabelecidos esses parâmetros, decidiu-se pela utilização de tubulação de 4 polegadas, com espessura de parede de 6,02 mm (Sch 40), por ser de fácil disponibilidade. Estabeleceu-se um comprimento de 1 m para a tubulação, para que se pudesse ter área suficiente para a inserção da descontinuidade, elaboração e instalação do reparo compósito, instalação dos sensores para coleta dos dados de emissões acústicas, além das conexões de tubulações auxiliares para montagem do indicador de pressão e vias de pressurização e depressurização do sistema.

A Figura 3.2.1 traz o desenho de conjunto da tubulação construída, em uma visão esquemática, já com a instalação do reparo com material compósito.

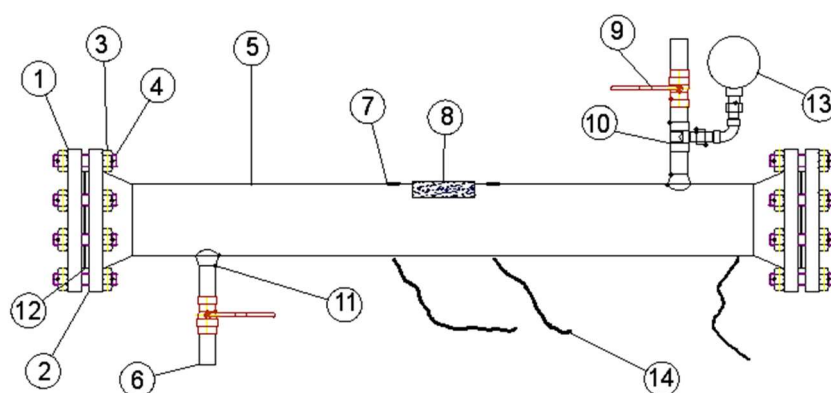


Figura 3.2.1 - Desenho da Tubulação Ensaçada [Autor, 2022].

A Tabela 3.2.1, traz a listagem com a especificação básica e as quantidades dos materiais utilizados na confecção da tubulação utilizada nos testes de campo.

Tabela 3.2.1 - Lista de Componentes da Tubulação [Autor, 2022].

LISTA DE MATERIAIS		
ITEM	DESCRIÇÃO	QUANT.
14	CABOS DE CONEXÃO PARA SENSORES	1
13	INDICADOR DE PRESSÃO	1
12	JUNTA ESPIROMETÁLICA	2
11	COLAR PARA SOLDA DIAM. 3/4" A.C.	2
10	TÊ DIAM 3/4" X DIAM 1/2" A.C.	2
9	VÁLVULA ESFERA 3/4" A.C.	2
8	REPARO COM REFORÇO COMPÓSITO	1
7	SENSOR PIEZOELÉTRICO	3
6	TUBO 3/4" API 5L Gr B DIAM. 3/4"	2
5	TUBO API 5L Gr B DIAM. 4" Sch 40 x 1m	1
4	ESTOJO M18	16
3	PORCA M18	32
2	FLANGE DE PESCOÇO 4" #150 A.C.	2
1	FLANGE CEGO 4" #150 A.C.	2

Cabe ressaltar que se realizou a construção da tubulação com o apoio de mão de obra mobilizada no GASLUB, no canteiro de obras de implantação da Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN). Logo, todo o processo de soldagem foi efetuado por profissionais altamente qualificados e seguindo protocolos de qualidade empregados no GASLUB.

A sequência das Figuras 3.2.2 (a) a 3.2.2 (h) traz algumas das etapas de construção desta tubulação.



Figura 3.2.2 (a) - Preparação de bisel da tubulação para soldagem [Autor, 2022].



Figura 3.2.2 (b) - Execução do ponteamto para fixação dos flanges [Autor, 2022].



Figura 3.2.2 (c) - Flange ponteadado e alinhado, preparado para solda de enchimento [Autor, 2022].

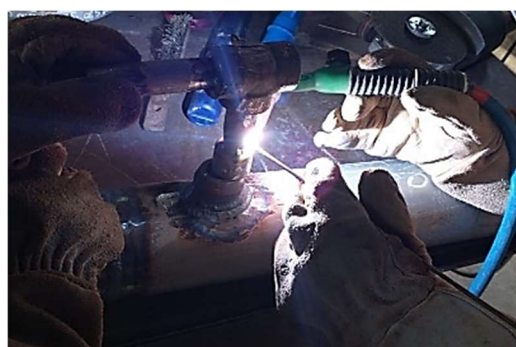


Figura 3.2.2 (d) - Execução de soldagem das conexões auxiliares [Autor, 2022].



Figura 3.2.2 (e) - Acabamento da solda das conexões [Autor, 2022].



Figura 3.2.2 (f) - Conexões completamente instaladas [Autor, 2022].



Figura 3.2.2 (g) - Conclusão da etapa de pintura [Autor, 2022].



Figura 3.2.2 (h) – Acabamentos [Autor, 2022].

Terminada a fabricação da tubulação, fez-se necessária a realização de inspeção na peça produzida. Assunto este que é melhor detalhado ao decorrer do presente capítulo.

### 3.3 Inserção da Descontinuidade na Tubulação

O processo de inclusão de descontinuidade na tubulação teve como objetivo simular o comportamento do reparo na presença de uma trinca passante pela seção do substrato metálico. Neste sentido, previu-se o corte com disco abrasivo de diâmetro 115,2mm e 1,7mm de espessura, com a qual inseriu-se uma descontinuidade na geratriz superior da tubulação principal da tubulação, rotacionada em 45° em relação ao plano da seção transversal desta tubulação.

Tendo em vista a dificuldade de medição do comprimento efetivo na superfície interna da tubulação de forma mais precisa, realizou-se uma modelagem prévia em CAD 3D da descontinuidade produzida na tubulação. Essa abordagem teve como objetivo verificar de forma preliminar as dimensões que seriam obtidas para a trinca imposta ao substrato metálico, nas faces externa e interna, para posteriormente aplicar o reparo de material compósito. Esta verificação resultou em um comprimento de aproximadamente 50 mm na superfície externa e de 27 mm de comprimento na superfície interna da tubulação. É importante ressaltar que essa diferença entre comprimentos interno e externo, se deve ao formato da ferramenta utilizada para gerar a trinca, i.e., um disco de corte abrasivo.

A Figura 3.4.1 demonstra de forma ilustrativa a orientação e forma da descontinuidade projetada antes da sua execução na tubulação.

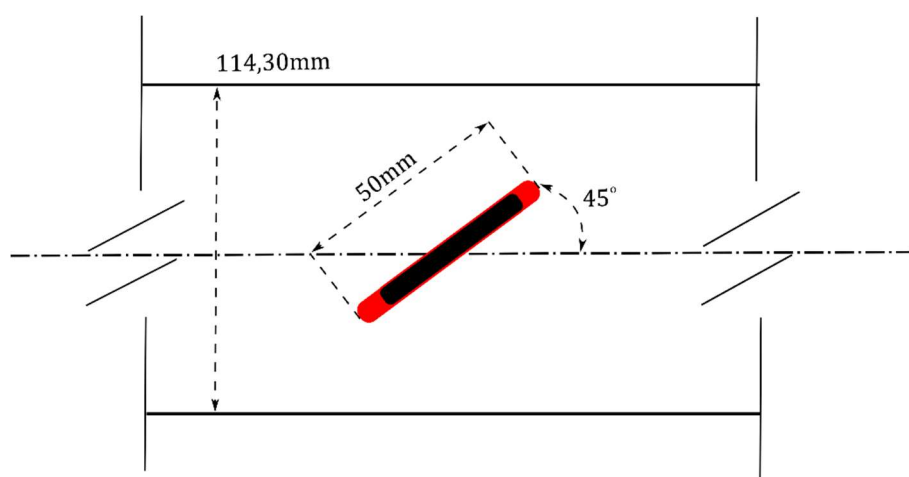


Figura 3.4.1 - Vista esquemática da descontinuidade inserida na tubulação [Autor, 2022].

Pode-se verificar nas Figuras 3.4.2, 3.4.3 e 3.4.4, que as dimensões finais da descontinuidade construída na tubulação divergiram ligeiramente com relação ao que foi planejado, apresentando 48 mm de comprimento (contra cerca de 50 mm projetado) e 3 mm de largura (contra 1,7 mm projetado). O comprimento obtido na parede interna ficou em cerca de 24 mm (contra cerca de 27 mm projetado). A discrepância em termos da largura da trinca ocorre devido a espessura do disco abrasivo empregado, 3 mm.





Figura 3.4.2 - Aspecto geral da trinca [Autor, 2022].

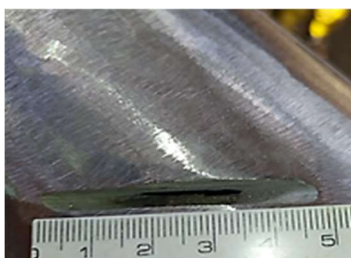


Figura 3.4.3 - Medição do comprimento da trinca na parede interna e externa [Autor, 2022].



Figura 3.4.4 – Largura da trinca imposta [Autor, 2022].

Faz-se importante ressaltar que a variação dimensional acima informada, não prejudica a metodologia e as conclusões do presente estudo, sendo que a simulação da descontinuidade em CAD 3D teve como objetivo principal o projeto preliminar do sistema de reparo e as dimensões das camadas de compósito a serem aplicados. Conforme descrito na sequência das próximas seções.

### 3.4 Estabelecimento dos Limites de Pressão Admissível

Para a verificação das condições limites para o carregamento da tubulação, verificou-se os limites individuais dos componentes, obedecendo aos requisitos das normas de projeto. Assim, a verificação da integridade da tubulação atendeu aos requisitos da Norma ASME B.31.3. Para os flanges utilizou-se a Norma ASME VIII Divisão 1 e para as juntas verificou-se a informação técnica de catálogo de fabricante, quanto à pressão limitante.

Em primeira instância, foi desconsiderada a presença da descontinuidade no substrato metálico, sendo que a análise da estabilidade da descontinuidade foi verificada num segundo momento, segundo análise da Mecânica da Fratura da tubulação.

#### I. Calculo da Pressão Suportada pelo trecho cilíndrico tubular:

Tendo em vista que a tubulação utilizada possui diâmetro externo de 114,3 mm e espessura de parede de 6,02 mm, que a tensão admissível para o aço API 5L Gr B é de 241 MPa, que o coeficiente de solda é igual a 1, devido ao fato de a tubulação ser do tipo sem costura, considerando ainda que a temperatura de operação será inferior a 485°C, o

que implica a adoção de um coeficiente de redução de 0,4 em função do material e temperatura e finalmente desconsiderando a sobre espessura de corrosão, ao aplicar a Equação 2.1.1.1, referente ao critério de cálculo da Norma ASME B.31.3 obteve-se:

$$0,00602 = \frac{P_{MÁX} \cdot 0,1143}{2(241 \cdot 10^6 \cdot 1 + P_{MÁX} \cdot 0,4)}, \quad e \quad P_{Máx} = 26,42 \text{ MPa}$$

## II. Cálculo da Pressão Suportada pelo Conjunto Flanges-Parafusos-Porcas:

Para o cálculo da máxima pressão suportada pelo conjunto de flanges, utilizou-se o critério da ASME VIII, Divisão 1. Neste caso, tendo em vista que o conjunto de flanges utilizados possuem espessura de 24,3 mm, com diâmetro médio da superfície de vedação de 19,0 mm, medida do raio interno da superfície do flange cego exposta à pressão interna da tubulação igual a 57,15 mm, braço de momento sobre a junta de vedação de 30,2 mm, que a tensão admissível para o material ASTM A 105 é de 248,2 MPa, que o coeficiente de junta soldada de é 0,55, conforme tabela UW-12 da ASME VIII Div.1, e que o coeficiente de forma de 0,3 conforme a figura UG-34 da ASME VIII Div.1, ao aplicar a Equação 2.1.1.3 obteve-se:

$$0,0243 = 0,190 \sqrt{\frac{0,3 \cdot P}{248,2 \cdot 10^6 \cdot 0,55} + \frac{1,9 \cdot 2 \cdot P \cdot \pi \cdot (0,05715^2) \cdot 0,0302}{248,2 \cdot 10^6 \cdot 0,55 \cdot 0,190^3}}$$

Assim resultando em  $P = 5,78 \text{ MPa}$ .

## III. Pressão Máxima Admissível das Juntas de Vedação:

Com relação à pressão máxima suportada pela junta de vedação de fibra de aramida utilizada, considerou-se a pressão máxima informada para esse tipo de componente, conforme informado pelo fabricante Juntax em seu sítio eletrônico, onde foi identificado o limite de 71,4 kgf/cm<sup>2</sup> ou 7,0 Mpa.

## IV. Verificação da Estabilidade da Descontinuidade:

A verificação da estabilidade da descontinuidade leva em consideração o cálculo da pressão máxima imposta à tubulação, para que seja garantida a não propagação da trinca imposta ao substrato metálico. A verificação da estabilidade é essencial, visto que,

se houver possibilidade de propagação da trinca sob o reparo, há a necessidade de que o projeto do reparo leve essa variável em consideração, o que acarretará em uma necessidade de um reparo que envolva todo o perímetro da tubulação e não apenas um reparo do tipo remendo.

Tendo em vista que o material da tubulação (API 5L Gr B), deve apresentar, conforme especificação deste material, um resultado mínimo de 27 J no teste de impacto de Charpy, que o comprimento da trinca imposta ao substrato metálico foi de 27,1 mm, que a espessura da parede do tudo é de 6,02 mm e que a direção da trinca está orientada a 45° em relação ao eixo da tubulação, ao aplicar a Equação 2.1.3.4 chega-se ao resultado abaixo:

$$P < \frac{18,2 \cdot 10^6 \sqrt{27} \cdot 2,00602}{0,05715 \sqrt{\pi} \cdot 0,01355 \cdot (1 + \text{sen}^2 45^\circ)} \quad P < 64,4 \text{ MPa}$$

Dado que o valor calculado através Equação 2.1.3.4 para que haja a propagação da trinca é muito superior à pressão de projeto dos componentes da tubulação, pode-se afirmar que a conclusão é que não haverá falha catastrófica pela propagação da descontinuidade imposta ao substrato metálico.

Conforme estes resultados, estabeleceu-se a pressão de projeto da tubulação, como sendo a equivalente a 75% da máxima pressão suportada pelo componente de menor resistência calculada. Como a menor resistência calculada foi estabelecida para o conjunto de flanges cegos (5,78 MPa), a pressão de projeto estabelecida para o conjunto foi de 4,34 MPa.

É importante ressaltar que a Norma N-76 estabelece uma pressão máxima de trabalho admissível (PMTA) de 20 kgf/cm<sup>2</sup> (1,96 MPa) para tubos de 4 polegadas Sch 40 e flanges classe 150. Obviamente, a diferença entre os valores de pressão de projeto e pressão máxima de trabalho admissível se dá pelas questões de margem de segurança.

### 3.5 Procedimento de Dimensionamento do Reparo Aplicado.

Para a execução do reparo, previu-se a inclusão sucessivas camadas de fibras e resina epóxi na geratriz superior da tubulação principal da tubulação. Optou-se, portanto, pela utilização de matriz em fibra de vidro de tecido bidirecional, com trama plana e tecido com 50% de fibras de vidro orientadas a 0° e 50% de fibras orientadas a 90°.

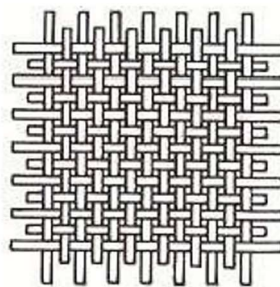


Figura 3.5.1 - Representação esquemática da fibra plana utilizada nos ensaios [Autor, 2022].

Este tecido apresenta densidade de 83 g/m<sup>2</sup>, com uma espessura de 0,12 mm e fibras de vidro do tipo “E”, conforme designação de fibra pela ASTM D578. Essa classe de tecido apresenta alta resistência e baixo peso, sendo compatível com resinas poliéster, estervinílica e epóxi.

Ocorre que, ainda hoje, apesar da grande versatilidade do campo de aplicação dos tecidos e fibras, muitas das vezes os valores informados para os parâmetros de resistência variam consideravelmente a depender da fonte de consulta. Pode ser observado na Tabela 3.5.1, valores de referência com relação à resistência à tração para tecidos de fibra de vidro da classe “E”, de acordo com algumas das fontes consultadas.

Tabela 3.5.1 - Propriedades Mecânicas da fibra de vidro utilizada em configuração de tecido (0/90). [Joshi Group, 2012].

Resistência à Tração (GPa)	Joshi Group China	Texiglass Brasil	Owens Corning Brasil
	1,72 a 3,45	2,00	3,30

Com relação à matriz, utilizou-se uma pasta de base polimérica de nome comercial PLASTEEL 4:1. Esse composto é fabricado pela empresa Quimatic Tapmatic do Brasil. Trata-se de um composto fornecido em duas partes em embalagens distintas, sendo uma dessas, a resina base epóxi com carga metálica e a outra parte o catalisador, composto por derivados de aminas.

O fabricante do composto PLASTEEL MASSA 4:1 informa que o material é indicado para reparos, manutenção e ferramentaria industrial em geral, obtendo sua cura primária 2 horas após a aplicação, quando a temperatura ambiente é de 25 °C, devendo para tanto, ser previamente preparado na proporção de quatro partes resina base epóxi

para cada parte de catalisador. Ainda, segundo o fabricante, as propriedades mecânicas finais são alcançadas após 7 dias completos de cura, quando se obtém as propriedades mecânicas citadas na tabela 3.5.2, considerando a sua forma pura, sem o acréscimo de fibras de reforço.

Deve-se salientar que não foram realizados ensaios de laboratório no sentido de apurar as propriedades mecânicas obtidas para o compósito a partir dos insumos escolhidos, porém buscou-se referências de literatura que pudessem subsidiar os cálculos de dimensionamento e obtenção da espessura de reparo, para o estabelecimento do número de camadas para a composição deste, na execução do experimento.

Tabela 3.5.2 - Propriedades mecânicas da base polimérica utilizada. [Autor, 2022].

CARACTERÍSTICA	VALOR
Densidade 20°C	2,0 - 2,5 g/cm <sup>3</sup>
Contração conforme ASTM D-2566	0,0005 – 0,0007 cm
Resistência à compressão (ASTM D-695-08)	95 ± 12 MPa
Resistência à tração (ASTM D-638-10)	16 ± 3 MPa
Dureza (ASTM D-2240-10)	82 – 83 Shore D
Resistência à adesão por cisalhamento (ASTM D-1002-05)	24,9 ± 3,4 Kgf/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidade (ASTM D-638)	8307 ± 932 kgf/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de expansão térmica (ASTM D-696)	(23 – 25) x 10 <sup>-6</sup> cm/cm.°C
Condutividade térmica (ASTM C-177)	(1,25 – 1,27) x 10 <sup>-3</sup> cal.cm/s.cm <sup>2</sup> .°C
Resistência Térmica Constante	90°C, com picos de 120°C

De acordo com Daniel (2006), as propriedades esperadas para um compósito bidirecional proposto a partir de tecido de fibra de vidro e matriz epóxi são os expressos na Tabela 3.5.3. Os valores apresentados nessa tabela são aqueles que correspondem a uma classe de lâmina de compósito formada por tecido de fibra de vidro (0/90) e matriz epóxi que melhor se assemelham à configuração de remendo que foi empregada no presente trabalho.

Tabela 3.5.3 - Propriedades mecânicas de um compósito bidirecional típico feito com tecido de fibra de vidro (0/90) e matriz epóxi [DANIEL, 2006].

PROPRIEDADE	VALOR
Relação de volume de fibra	0,45
Densidade, g/cm <sup>3</sup>	2,2
Módulo de elasticidade longitudinal, GPa	29,7
Módulo de elasticidade transversal, GPa	29,7
Módulo de cisalhamento no plano, GPa	5,3
Maior coeficiente de Poisson	0,17
Menor coeficiente de Poisson	0,17
Resistência à tração longitudinal, MPa	367
Resistência à tração transversal, MPa	367
Resistência ao cisalhamento no plano, MPa	97,1
Deformação específica longitudinal	0,025
Deformação específica transversal	0,025
Resistência à compressão longitudinal, MPa	549
Resistência à compressão transversal, MPa	549

Pelas características apontadas na literatura, a união do tipo de fibra de vidro e matriz epóxi, tem-se condições de gerar um reparo com boa resistência mecânica, com rigidez apropriada e baixo peso, caracterizadas dentro das condições previstas para a aplicação de projeto, possibilitando um reparo de baixa espessura e alta durabilidade.

### 3.5.1 Estimativa Preliminar do Número de Camadas de Fibras

O dimensionamento do reparo instalado na tubulação metálica na presença do defeito foi realizado levando em consideração o estabelecido pelas duas normas de referência: ISO 24817 e ASME PCC-2, considerando a presença de um defeito do tipo passante (através de toda a espessura da tubulação), realizando também uma comparação dos valores obtidos para a espessura através destas duas normas.

A partir do dimensionamento do reparo, foi estabelecido o número de camadas de fibras e resina instaladas sobre o defeito.

Para os cálculos foram feitas as seguintes considerações:

- a) Defeito classificado como tipo B nas Normas ISO 24817 e ASME PCC-2.

- b) Todos valores das propriedades físico-químicas de referência foram obtidos a partir de Daniel (2006), exceto a taxa de liberação de energia, cujo valor de referência foi obtido de Petersen (2017).
- c) Foram considerados os valores máximos para o fator de serviço ( $F_{leak}$ ), em cada norma. Cabe ressaltar que a norma ISO 24817 estabelece o valor em função da vida esperada do reparo em anos e a ASME PCC-2 estabelece o fator em função de procedimento específico de qualificação do reparo. Como o escopo de trabalho da presente pesquisa não abrangeu testes de longa duração, levou-se em consideração a condição mais crítica, consequência do maior valor do fator de serviço, que resulta na menor espessura de reparo.
- d) A temperatura de teste foi considerada como sendo a temperatura média histórica diária para o município de Itaboraí-RJ, para o mês de novembro, período programado previamente para a execução dos ensaios de campo, conforme pode ser verificado na Figura 3.5.1.1.

Cabe destacar que o tipo de reparo mais usual dimensionado pelas normas ISO 24817 e ASME PCC-2 prevê o enrolamento de todo o perímetro da tubulação metálica com sucessivas camadas e tecido e resina. Todavia no presente experimento, optou-se pela instalação de um reparo localizado, visto que existem menos casos de estudo neste tipo de solução. Considerou-se importante aprofundar os estudos deste tipo de reparo, haja vista que o mesmo tem como grande vantagem a versatilidade da aplicação em geometrias mais complexas, bem como gerar menos influência com relação à flexibilidade original da tubulação reparada.

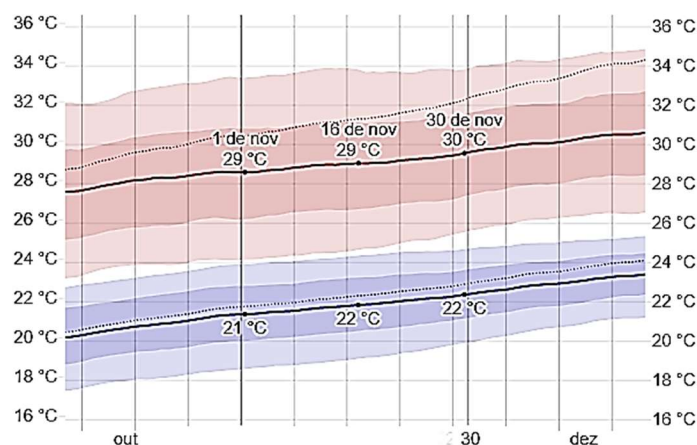


Figura 3.5.1.1 – Curvas de temperatura média [Weather Spark, 2022].

O gráfico da figura 3.5.1.1 demonstra as médias para as temperaturas mínimas e máximas diárias para a cidade de Itaboraí-RJ, no mês de novembro, bem como as o comportamento dessas temperaturas, dentro de uma faixa de distribuição de que considera as médias  $\pm 25\%$  das medidas (sombreado azul e vermelho mais intenso) e a média  $\pm 40\%$  das medidas (sombreado azul e vermelho menos intenso).

Uma lista completa com os dados de entrada usados nas equações estabelecidas pelas duas normas objeto de avaliação na presente pesquisa, encontra-se na Tabela 3.5.1.1, a seguir.

Tabela 3.5.1.1 – Valores das propriedades físico-químicas utilizadas no dimensionamento do reparo compósito [Autor, 2021].

VARIÁVEL	ISO 24817	ASME PCC-2
D	114,3 mm	114,3 mm
$E_{ac}$	29700 MPa	29700 MPa
$F_{leak}$	0,6648	0,67
$F_T$	0,91875	-
$F_{T2}$	-	0,9
G	5300 Mpa	5300 Mpa
P	4,34 MPa	4,34 MPa
$T_{amb}$	25 °C	-
$T_d$	100 °C	100 °C
$T_m$	150 °C	150 °C
$T_{test}$	25,5 °C	-
$\phi$	0,785 rad	0,785 rad
$\gamma_{LCL}$	100 J/m <sup>2</sup>	100 J/m <sup>2</sup>
v	0,17	0,17

Os valores de espessura mínima obtidas pelas normas ISO 24817 e ASME PCC-2 calculadas foram de 19,38 mm e 19,65 mm, respectivamente. Fica claro, que as pequenas diferenças entre os valores obtidos pelas duas normas, de cerca de 1,4% deve-se fundamentalmente pelos fatores de temperatura e de serviço que apresentam sutis diferenças entre as duas normas, na forma de cálculo em cada uma das normas. Entretanto, tais diferenças são mais detalhadamente explicadas no capítulo de discussões e resultados.

Considerando que cada uma das camadas perfaça cerca de 1,5 mm de espessura, levando-se em consideração o tecido de fibras de vidro e a cobertura (bastante densa) de massa epóxi, optou-se pela aplicação de 12 camadas para a confecção do reparo.



### 3.6 Procedimento de Aplicação do Reparo de Material Compósito

O procedimento de aplicação do reparo de material compósito foi executado basicamente nas seguintes etapas:

- a) Limpeza e preparação da superfície;
- b) Aplicação das sucessivas camadas de manta de fibra de vidro e massa epóxi bicomponente com carga metálica;
- c) Apresilhamento do reparo e espera do tempo de cura;
- d) Acabamento superficial.

As teorias da interligação mecânica propõem o mecanismo de adesão através da penetração do adesivo nas irregularidades superficiais, promovendo, dessa maneira, o ancoramento entre os substratos (aderência). Logo, o ancoramento depende tanto da preparação da superfície quanto das características do adesivo a ser usado.

Na pesquisa ora apresentada, previamente à aplicação do reparo, realizou-se uma limpeza preliminar e esmerilhamento, de acordo com o procedimento previsto na NBR 15239 (ABNT, 2005). Ou seja, garantiu-se uma superfície livre de contaminantes visíveis como óleo, graxa, sujidades e também de contaminantes com fraca aderência como carepa de laminação, corrosão, pintura antiga e materiais estranhos, apresentando substrato com brilho metálico.

A preparação da superfície toma importância adicional com relação ao procedimento de reparo da tubulação, visto que a eficiência da ancoragem do material compósito no substrato metálico dependerá da limpeza e acabamento superficial adequado. A Figura 3.6.1 demonstra o acabamento na região de aplicação do reforço compósito após a preparação desta superfície.



Figura 3.6.1 - Visão geral do reparo previsto antes da instalação [Autor, 2022].

Alinhou-se a diagonal do reparo paralela e coincidente com a linha média da trinca, ou seja, alinhou-se as camadas de tecido que formaram o reparo com um padrão (45/-45) em relação ao eixo da trinca. Decidiu-se pela divisão das 12 camadas em quatro grupos de camadas idênticas entre si (iguais dentro de cada grupo e distintas para grupos diferentes).

O primeiro grupo (camadas 1 até 4) contou com dimensões 60 mm por 60 mm, resultando em um comprimento diagonal 254% maior que a extensão da trinca. O segundo grupo (camadas 5 até 8) contou com um tamanho característico 33% maior que o primeiro grupo, essa mesma lógica foi usada para os grupos três e quatro. Os parâmetros geométricos que definem as 12 camadas do remendo são apresentados na Tabela 3.6.1 abaixo, sendo a camada 1, a instalada imediatamente sobre o substrato metálico.

Tabela 3.6.1 – Configuração de camadas do reparo adotado [Autor, 2021].

Grupo	Quantidade de Camadas	Dimensões da Camada
1	4 camadas (0/90)	3600 mm <sup>2</sup>
2	3 camadas (0/90)	6400 mm <sup>2</sup>
3	3 camadas (0/90)	10000 mm <sup>2</sup>
4	2 camadas (0/90)	14400 mm <sup>2</sup>

A utilização de camadas com áreas maiores não é uma recomendação de norma. Esta solução foi adotada com o objetivo de garantir uma área adicional de reforço em caso de falha das camadas mais profundas do reparo. Além disso, as dimensões do tecido depositado em cada camada serviram como referência durante a etapa de redução da espessura do reparo, conforme procedimento detalhado na etapa III do item 3.7.

Nota-se que, independentemente do fato das dimensões referentes às camadas mais externas serem superiores às primeiras camadas depositadas sobre o substrato, o espalhamento da resina após o apressilhamento, faz com que o aspecto final previsto para o reparo após a cura seja o demonstrado no esquema da Figura 3.6.2, abaixo.

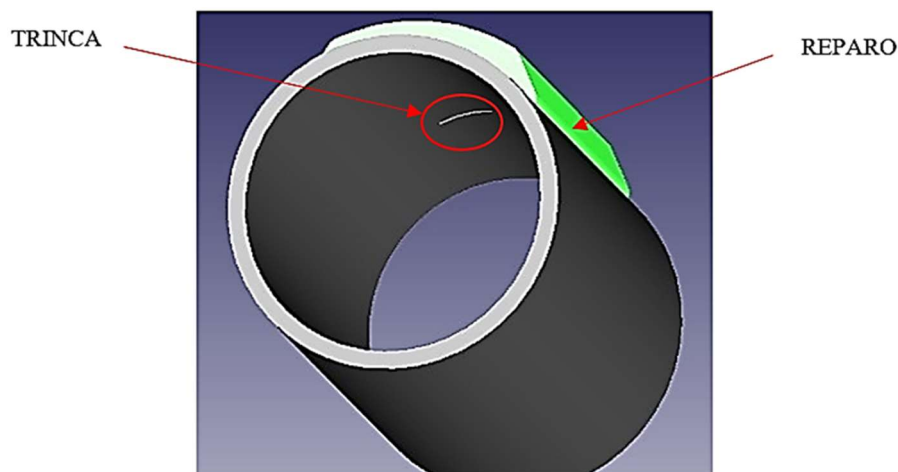


Figura 3.6.2 - Visão interna da descontinuidade e aspecto do reparo na superfície externa [Fonte: Autor, 2020].

O emprego desse tipo de configuração para o reparo teve como objetivo possibilitar que as camadas mais externas ofereçam proteção e ganho de resistência para as camadas internas, as quais atuam conferindo mais rigidez na região diretamente superior à trinca, otimizando a distribuição localizada de rigidez sem gerar uma região excessivamente inflexível ao longo da extensão da tubulação.

Em meios como o aeroespacial, esse tipo de configuração não é muito utilizado devido ao acabamento superficial não resultar em um conjunto tão aerodinâmico como em configurações do tipo *scarf*. Contudo, na reparação de componentes para o setor de Óleo e Gás, arranjos similares a esse são comumente empregados e apresentando resultados de eficiência equivalentes aos de reparos *scarf*, que são considerados os mais eficientes por alguns setores da engenharia (ALEXANDER, 2007).

A configuração adotada não prevê o enrolamento do material compósito na circunferência de todo o perímetro do tubo compreendendo a região avariada. Assim, apresenta-se como vantagem a pouca interferência com relação à flexibilidade de projeto da tubulação, item esse muito crítico em tubulações que operam em condições críticas de pressão e temperatura.

Após a montagem das camadas de fibra impregnada com a massa polimérica, realizou-se o apressilhamento do reparo e aguardou-se pela cura por 12 horas. Este espaço de tempo foi suficiente para ultrapassar o período de cura inicial, para então iniciar os procedimentos de teste hidrostático, com a pressurização da tubulação e aquisição de

dados de emissões acústicas. As Figuras 3.6.3 e 3.6.4 abaixo, demonstram a tubulação durante o período de cura do reparo e após a cura inicial.



Figura 3.6.3 - Detalhe do apresilhamento do reparo para espera da cura do compósito [Autor, 2022].



Figura 3.6.4 - Visão geral da tubulação, após o apresilhamento do reparo [Autor, 2022].



Figura 3.6.5 - Visão geral da tubulação após a cura inicial do reparo [Autor, 2022].



Figura 3.6.6 - Aspecto do reparo após a cura inicial [Autor, 2022].

Por fim, transcorrido o tempo de cura estabelecido, realizou-se o desprendimento das presilhas de fixação do reparo no substrato metálico, concluindo assim, a fase de instalação do reparo, conforme pode ser visto na Figura 3.6.3 e 3.6.4, acima. Concluída esta etapa, partiu-se para a etapa de instalação dos sensores para a aquisição dos dados de emissão acústica durante o teste hidrostático realizado já na presença da trinca e instalação do reparo, conforme será detalhado na sequência.

### 3.7 Procedimento de Teste Hidrostático e Aquisição de Sinais de Emissões

#### Acústicas

O objetivo da execução do teste hidrostático foi o acompanhamento da resposta, tanto do substrato metálico, quanto do reparo, quanto à propagação de defeitos durante a pressurização do sistema. Foi estabelecido que os testes hidrostáticos seriam realizados em três etapas, sendo uma executada antes da execução da trinca e posterior instalação do reparo, denominada aqui de Etapa I e outras duas etapas após a instalação do reparo, denominadas de Etapas II e III. A Etapa III ficou estabelecida como condicionada à não falha da tubulação durante a execução dos testes da Etapa II.

Não foi prevista a aquisição de dados de emissões acústicas durante a Etapa I, tendo essa previsão sido feita para os testes das Etapas II e III. O monitorado através da análise de emissões acústicas, além de buscar identificar o momento inicial de uma falha instável, buscou também a identificação da ocorrência de pequenos danos não catastróficos, de ordem microscópica ou mesmo de ordem macroscópica, mas em camadas mais profundas do reparo, que não teriam como ser identificadas através de um exame visual mais direto.

As Figuras 3.7.1(a) e 3.7.1(b) representam a estrutura de testes montada e o detalhe do aspecto do reparo durante a execução da Etapa III, detalhada na sequência.



(a)



(b)

Figura 3.7.1 (a) - Visão geral da tubulação já com o reparo finalizado (b) - Tubulação após desbaste da espessura de reparo [Autor, 2022].

A norma N-2688 classifica os testes de pressão em três grupos de riscos (1, 2 ou 3), determinando critérios de segurança para o estabelecimento de raios de isolamento e limitação de acesso de pessoas e também para o estabelecimento de patamares de pressão e seus respectivos tempos de permanência, com base na pressão de teste e o volume do item a ser testado. Para melhor compreender a definição de cada um desses grupos, é apresentada na Figura 3.7.2.

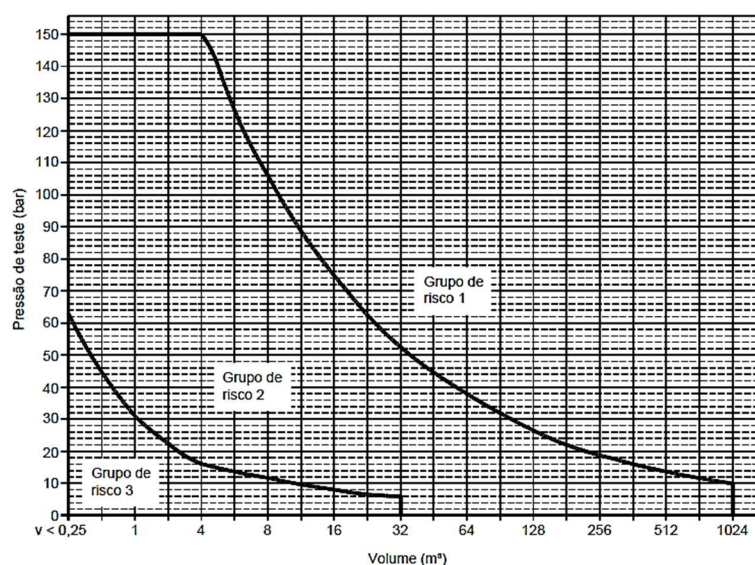


Figura 3.7.2 - Grupos de riscos estabelecidos pela N-2688 para testes de pressão [Autor, 2022].

A seguir, são apresentadas cada uma das etapas de testes, os respectivos patamares de pressão, os tempos de permanência e o enquadramento quanto ao estabelecido na N-2688.

### **I. Etapa I: Teste de Estanqueidade**

O objetivo da Etapa I (teste de estanqueidade) foi verificar a fixação dos flanges cegos e o assentamento de juntas de vedação, bem como atestar a qualidade primária do processo de soldagem das partes e peças, de forma a evitar qualquer retrabalho antes das etapas II e III. Com relação ao valor de pressão estabelecido para os testes da Etapa I, observou o critério da Norma N-1673, que estabelece as diretrizes para projetos de sistemas de tubulação em plantas de unidades de processo, em consonância com a ASME B.31.3, cuja pressão de teste é estabelecida conforme a equação 3.7.1, abaixo:

$$P_t = 1,5 P_{MTA} \quad (\text{Equação 3.7.1})$$

Onde:

- a)  $P_t$  é a pressão de teste e,
- b)  $P_{MTA}$  é a pressão máxima de trabalho admissível da tubulação.

Tendo em vista que a Norma N-76 estabelece para as famílias A e B uma pressão máxima admissível de 20 kgf/cm<sup>2</sup> (1,96 MPa), e considerando a temperatura máxima de 100 °C, tem-se que a pressão de teste para a tubulação construída para o experimento deve ser de 30 kgf/cm<sup>2</sup> ou 2,94 MPa, conforme patamar mais alto da curva de pressurização adotada na Etapa I. Curva esta que é demonstrada na Figura 3.7.3.

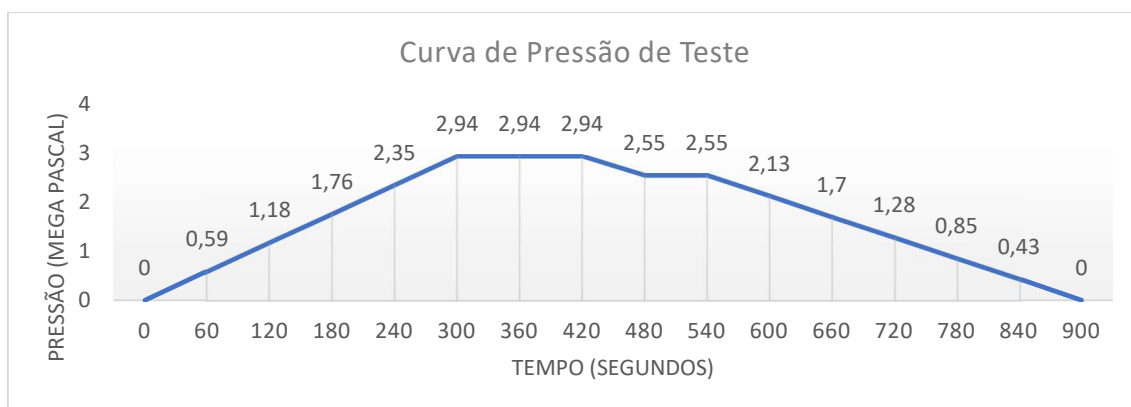


Figura 3.7.3 - Patamares e tempos adotados no teste hidrostático inicial da tubulação. [Autor, 2022].

A curva de pressurização do teste de estanqueidade adotada para a Etapa I conforme Figura 3.7.3 foi estabelecida por procedimento próprio com a premissa de uma mínima permanência no patamar de mais alta pressão, apenas para que se pudesse confirmar a estanqueidade da tubulação, indicando necessidade de retrabalhos ou reaperto caso algum vazamento fosse detectado.

## **II. Etapa II: Teste hidrostático sem desbaste do reparo:**

Para a Etapa II (teste hidrostático sem desbaste do reparo, ou seja, remendo intacto) foi utilizado o mesmo critério para o estabelecimento da pressão de teste adotado

na Etapa I. Todavia, quanto ao estabelecimento dos tempos de permanência nos patamares de pressão e gradientes de aumento e redução de pressão no início e no final do teste, foram considerados os critérios da N-2688. Neste caso, tendo em vista que o volume calculado total da tubulação é de cerca de 0,08m<sup>3</sup>, o teste de pressão executado, situa-se dentro do grupo de risco 3, conforme pode ser verificado pela marcação em vermelho na Figura 3.7.4.

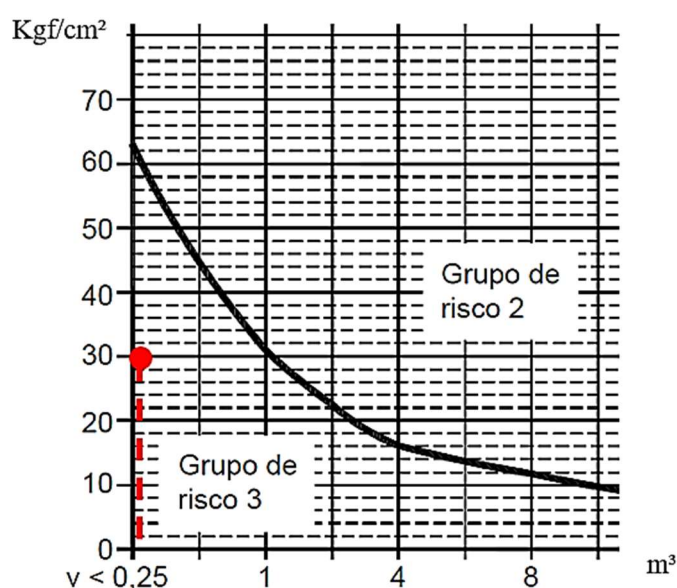


Figura 3.7.4 – Enquadramento no Grupos de riscos estabelecidos pela N-2688 [Autor, 2022].

Dessa forma, em atendimento à norma N-2688, a Etapa II obedeceu aos seguintes patamares de pressões e tempos:

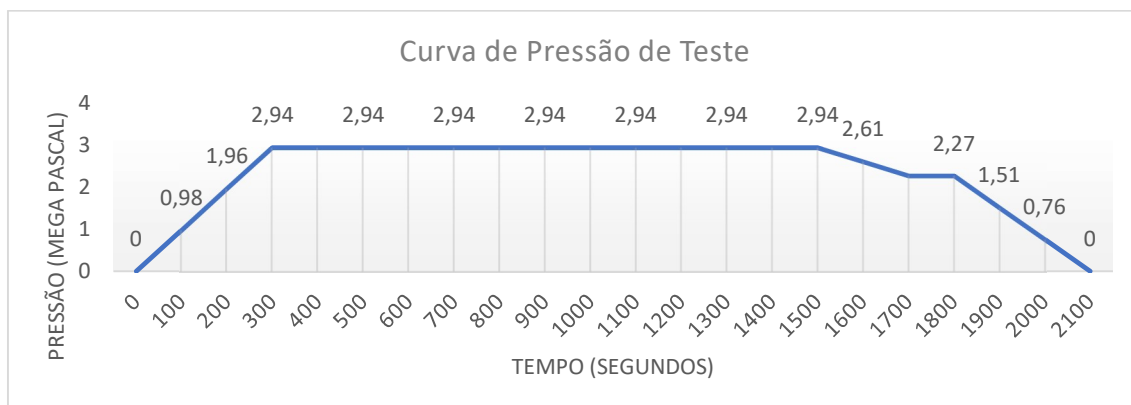


Figura 3.7.5 - Patamares de pressão e tempos adotados na Etapa II de testes hidrostáticos [Autor, 2022].



A Etapa II, ao contrário da etapa anterior, previu a aquisição de sinais de emissões acústicas, visando posterior análise dos sinais adquiridos e a eventual identificação de eventos de propagação de defeitos no substrato metálico e no reparo compósito instalado.

### **III. Etapa III: Teste hidrostático com desbaste do reparo:**

A etapa III (teste hidrostático com desbaste do reparo) considerou uma condição de teste mais severa em relação à etapa anterior, elevando o patamar de pressão, bem como considerando sucessivas reduções na espessura do reparo instalado. Para tanto, a redução na espessura do remendo foi realizada através de remoção mecânica (lixamento abrasivo) da superfície externa do remendo.

Nesta Etapa III, foram feitos três ciclos de testes hidrostáticos consecutivos, cuja condição da tubulação em cada um deles foi a seguinte:

- Primeiro Ciclo: Teste do reparo com espessura de projeto.
- Segundo Ciclo: Teste do reparo com espessura igual a 75% do projeto.
- Terceiro Ciclo: Teste do reparo com espessura igual a 50% do projeto.

O objetivo foi submeter o sistema a uma condição crítica do ponto de vista de exigência estrutural, observando assim, o comportamento do reparo nestas condições. Para essa terceira fase de testes, foi considerado o seguinte critério próprio de cálculo para o estabelecimento da pressão limite de teste.

$$P_t = 1,5 P_{proj} \quad (\text{Equação 3.7.2})$$

Onde:

- a)  $P_t$  é a pressão de teste e;
- b)  $P_{proj}$  é a pressão de projeto da tubulação.

Levando em consideração que a pressão de projeto calculada foi de 4,34 MPa à temperatura ambiente, tem-se que a pressão de teste para a tubulação construída para o experimento ficou situada em 6,51 MPa. Apenas por uma questão de precisão dos manômetros disponíveis e da unidade de medida destes instrumentos, foi estabelecido o limite de 70 kgf/cm<sup>2</sup> (equivalente a 6,86 MPa), para efeitos práticos de controle da pressão durante a realização dos testes de campo.

Considerando, ainda, o volume calculado total de cerca de  $0,08 \text{ m}^3$ , o teste de pressão executado, ficou situado dentro do grupo de risco 2 da Norma N-2688, conforme pode ser verificado na Figura 3.7.6.

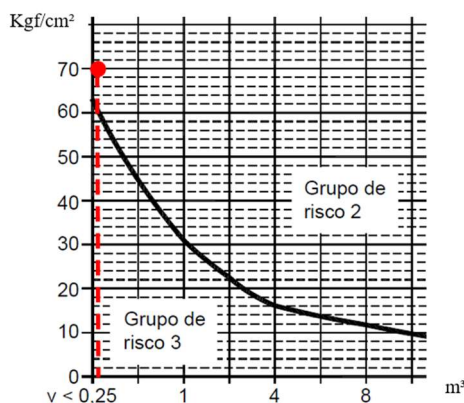


Figura 3.7.6 – Enquadramento de riscos estabelecidos pela N-2688 [Autor, 2022].

Para esta etapa, não foram seguidos os patamares de valores de pressão e tempos estabelecidos para classe 2 da norma N-2688. Optou-se, nesta etapa, pela utilização de uma única rampa de pressurização e a realização de tempos menores de teste. Considerou-se que atividade de pressurização, feita com bomba manual, além do baixo volume da tubulação (que acarreta pouca energia armazenada durante a pressurização), o adequado afastamento da peça e a necessidade da realização de sucessivos testes hidrostáticos, após cada operação de desbaste do reparo, justificaram a adoção de uma curva de pressurização específica, mesmo que em desacordo com a norma de referência. Dessa forma, os seguintes patamares de pressões e tempos foram empregados durante a Etapa III:

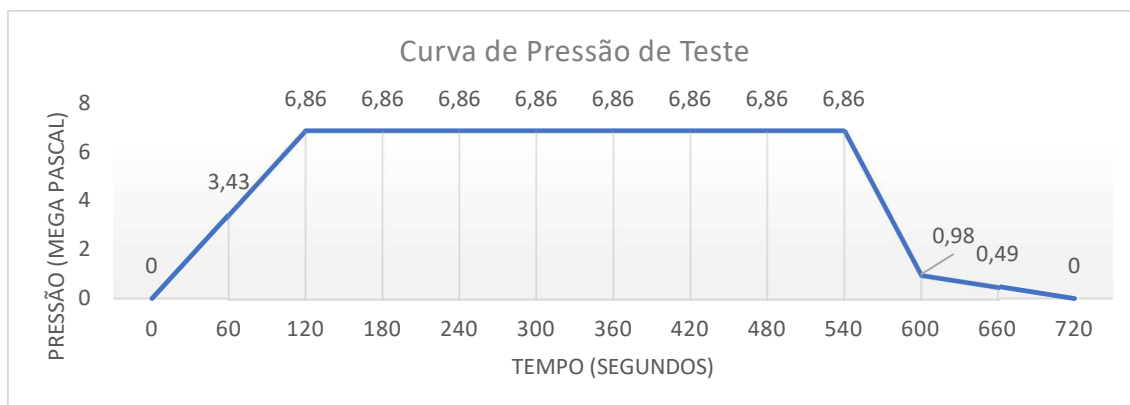


Figura 3.7.7 - Patamares de pressão e tempos adotados na Etapa III de testes hidrostáticos [Autor, 2022].

Em síntese, o procedimento de teste hidrostático que foi dividido em três etapas teve como objetivos: a verificação de conformidade do processo de montagem da tubulação, a verificação de resistência do reparo nas mesmas condições de operação previstas para uma tubulação metálica nova, atestar a resistência do reparo na pressão limite de projeto e, por fim, buscar a ocorrência de colapso do reparo, visando capturar os dados de emissões acústicas e assim, estudar o fenômeno.

### 3.7.1 Aquisição e processamento de dados oriundos emissões acústicas

Conforme descrito anteriormente, o comportamento da tubulação, incluindo todos os componentes e o reparo de material compósito, foi acompanhado mediante a aquisição de dados de emissões acústicas, durante as Etapas II e III de testes hidrostáticos com o objetivo de identificar ocorrências de liberação de energia devidas ao alívio de tensões que ocorre nas propagações dos defeitos, principalmente no material compósito, nas fases iniciais de falha. Optou-se pela utilização do monitoramento de emissões acústicas devido à possibilidade de inspecionar o comportamento durante a fase de pressurização, e não depois, com o mínimo de intervenção na tubulação.

Dois sensores piezoelétricos e os dois extensômetros foram fixados no substrato metálico: dois sensores piezoelétricos no entorno da região, onde foi instalado o reparo e dois extensômetros aplicados diretamente na superfície do tubo, sendo o primeiro no centro do tudo (metade do comprimento da tubulação) e o segundo, próximo à região danificada. Observa-se esse posicionamento, conforme a Figura 3.7.1.1.



Figura 3.7.1.1 - Arranjo da instrumentação instalada para a aquisição dos sinais de emissões acústicas [Autor, 2022].

Para a aquisição dos dados foi montado um sistema de aquisição composto de uma placa DAQ USB OMEGA<sup>®</sup> modelo OM-USB-1208HS configurada com quatro entradas analógicas e taxa de amostragem de 250kHz conectada a um computador portátil, possibilitando o monitoramento do comportamento dos dados em tempo real e a gravação desses dados para processamento posterior.

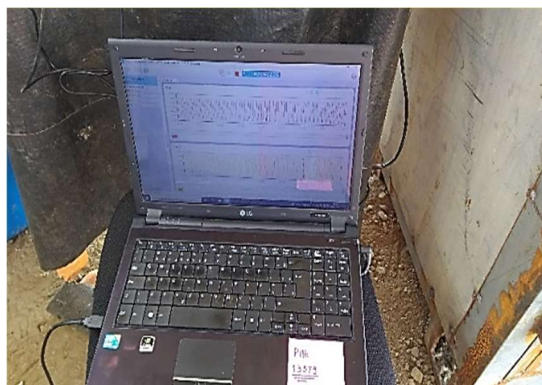


Figura 3.7.1.2 - Computador acoplado ao sistema de aquisição de dados [Autor, 2022].

A importação para o MATLAB dos dados de aquisição foi realizada em segmentos de análise de no máximo 1s, ou seja, 250.000 pontos. Como em cada coleta foram adquiridos cerca de 1.000.000 de pontos, cada uma acarretou em quatro importações para cada sensor utilizado, dado que de outra forma o processamento seria dificultado pelo volume de dados (limitação do *hardware*). Pelo teorema da amostragem, com essa taxa de aquisição, a frequência máxima de captura é de 125 kHz, dado que para que seja possível reconstituir o sinal original é necessário que a frequência de amostragem seja, no mínimo, igual ao dobro da frequência máxima contida no sinal analógico.

O procedimento de processamento adotado levou em consideração a aplicação de filtro passa banda entre 25 kHz e 100 kHz com atenuação de 60db da intensidade dos sinais fora da banda e *Stepness* de 0.9999 como uma tentativa de minimizar o efeito do ruído. Buscou-se a minimização da incidência de ruído e, com isso, possibilitar a identificação de trechos de sinais “candidatos” para uma investigação mais detalhada. Um exemplo de padrão de sinal que se pretendeu obter através da aplicação dos filtros mencionados encontra-se na Figura 3.7.1.3.

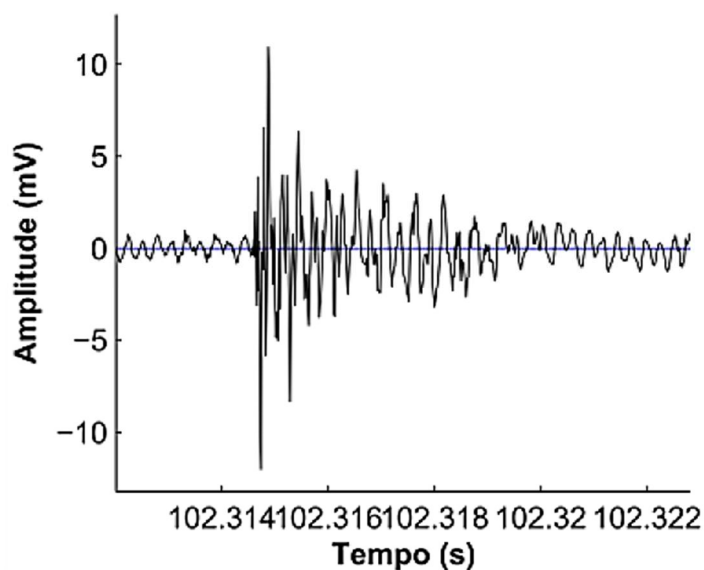


Figura 3.7.1.3 - Padrão de sinal esperado de ser identificado na análise de emissões acústicas [MAGGI, 2018].

A partir dos sinais adquiridos e filtrados, foi realizada a varredura completa da faixa temporal, utilizando janela de largura igual a 0,005 s. A partir destas janelas temporais se buscou identificar padrões de sinais de emissões acústicas similares aos do exemplo da Figura 3.7.1.3, visando uma análise mais aprofundada de cada um dos trechos a fim de confirmar a caracterização.

### 3.8 Ensaios Não Destrutivos Complementares

Como já mencionado em capítulos anteriores, os materiais compósitos são propensos a tipos específicos de defeitos, sendo seu comportamento extremamente influenciado pela qualidade dos insumos, pelo projeto específico e também pela mão de obra e procedimento previsto para aplicação/fabricação. Sendo assim, da mesma forma como é extremamente necessária a adoção de critérios adequados de projeto e na fase de aplicação do material compósito, também é com relação ao cuidado necessário no tocante à adoção de um plano adequado de inspeção, pós-instalação ou fabricação da peça pronta. Neste sentido, no presente estudo, complementarmente à execução do teste de pressão instrumentado e análise dos sinais de emissões acústicas, foi prevista a realização de ensaio não destrutivo de líquidos penetrantes, com a intenção de avaliar a presença de poros e trincas superficiais na face externa do reparo a também a realização do ensaio não

destrutivo de visualização boroscópica, com objetivo de confirmar a hipótese de não propagação da trinca do substrato metálico. Contudo, estes testes são assumidos como complementares, e seus resultados são discutidos no próximo capítulo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

É importante ressaltar que o tema proposto para a presente pesquisa é amplo e diversos enfoques podem ser dados quando se trata da aplicação de materiais compósitos no reparo de tubulações e dutos pressurizados. Dessa forma, os resultados e as discussões aqui contidos não se propõem a exaurir as questões que tangem à ampla aplicabilidade de reparos de tubulações através do uso de materiais compósitos, mas sim dar mais um passo no que se refere ao desenvolvimento de conhecimento científico e na disseminação de técnicas alternativas que venham a ser, de forma mais consistente, adotadas pelos engenheiros e técnicos da área de manutenção. Assim, ao longo do presente capítulo são tratados os resultados considerados mais pertinentes no que se propôs investigar na presente pesquisa.

### 4.1 Discussão das Questões que Envolvem o Projeto de Reparos Compósitos

Deve-se sempre ressaltar que o sucesso ou insucesso na execução de reparo, seja pelo método convencional de soldagem ou pelo método proposto neste estudo, depende primeiramente da elaboração de um projeto adequado, baseado nas condições a que a peça ou componente será exposto. Isso é intrinsecamente dependente da correta seleção de materiais e seu adequado dimensionamento.

Ao longo da pesquisa foi verificado, que diferentemente da classe dos metais, onde existem normas reconhecidas internacionalmente para normatizar as composições desses materiais e suas propriedades mecânicas, no caso dos compósitos essa padronização é dificultada, dado que é uma constituição de dois ou mais tipos de materiais, que podem variar em suas proporções ou forma de produção. Apesar deste inconveniente, existem normas que estabelecem diretrizes de projeto para auxiliar o seguro dimensionamento de reparos compósitos, a despeito da grande dificuldade que, por vezes, se apresenta em se obter dados fornecidos pelos próprios fabricantes de insumos quanto às propriedades físico-químicas destes materiais utilizados nos reparos.

Conforme já informado durante o presente texto, as normas utilizadas nesta pesquisa foram a ISO 24817 e a ASME PCC-2. Ao comparar o resultado das espessuras do reparo para a condição de projeto obtidas para a tubulação ensaiada, verificou-se que a norma ISO 24817 resultou em uma espessura cerca de 1,3% maior, quando comparado com o resultado obtido através da norma ASME PCC-2. As diferenças devem-se,

fundamentalmente, pela forma como são determinados os fatores de temperatura e de serviço nas as duas normas.

Enquanto para o dimensionamento do reparo conforma a norma PCC-2 foi desprezada a diferença entre a temperatura de realização dos testes e a temperatura ambiente, no caso do dimensionamento pela a ISO 24817, essa variação, que foi de 0,5°C, foi considerada. Além disso, no dimensionamento pela norma ISO 24817 foi considerado um tempo de vida de até 1 ano para o reparo. A norma PCC-2, por outro lado, considera um tempo de vida fixo e máximo de 20 anos, todavia, como é estabelecido por essa norma um fator de serviço de 0,5 para testes de até 1000 horas, este foi o valor utilizado como fator de serviço.

Além da escolha dos insumos e adequação do dimensionamento do reparo, é essencial que antes da sua aplicação seja atestada a estabilidade do defeito ou trinca que estará sob o reparo após a aplicação. Caso haja a possibilidade de continuidade de propagação da falha do material de base, a aplicação do reparo compósito pode se tornar inócua e pode haver uma falha catastrófica ainda mais grave. Neste sentido, os estudos realizados apontaram de forma determinante que, no caso mencionado, não haveria propagação instável do defeito, já que a pressão determinada pelo estudo da mecânica da fratura constatou que, para que o defeito propagasse de forma instável, haveria a necessidade de impor à tubulação uma pressão interna equivalente a 64,4 MPa, sendo a maior pressão considerada nos testes foi da ordem de 10,7 % deste valor.

#### **4.2 Avaliação dos Resultados dos Testes de Pressurização da Tubulação**

Os resultados obtidos durante os testes de pressurização da tubulação atestaram o correto dimensionamento do reparo e sua adequação para a condição ensaiada. Mais ainda, mesmo após degradação de grau médio a severo da superfície do remendo, este resistiu à sequência de testes hidrostáticos. Isso ateste a capacidade de resistência mecânica consideravelmente superior ao mínimo admissível para uma tubulação de mesma classe àquela testada.

Na Etapa I de testes não foi identificado nenhum problema de construção ou montagem da tubulação. Além disso, a Etapa II de testes foi concluída sem que houvesse ocorrido a falha catastrófica do reparo e do substrato metálico, algo que era esperado. Como não houve falha na Etapa II, foi realizada a Etapa III, conforme previsto.



Na Etapa III de testes, nenhuma falha no reparo ou no substrato metálico foi identificada a partir da inspeção visual durante a execução dos dois primeiros ciclos de pressurização da tubulação. Ou seja, tanto o reparo, quanto o substrato metálico suportaram um carregamento, que levou em conta uma pressão 58,2% superior à pressão de projeto da tubulação (4,34 MPa) e 250% superior à pressão máxima de trabalho admissível (1,96 MPa). Mais ainda, considerando o estabelecido na norma N-76, mesmo com um desgaste que removeu 25% da espessura do reparo previamente instalado, este foi capaz de suportar o estado de carregamento imposto.

O reparo somente falhou, de forma não catastrófica, quando submetido a uma pressão de cerca de 3,43 MPa, após a remoção de 50% da espessura do reparo previamente instalado. É muito importante ressaltar que, mesmo após o reparo ter sido reduzido à metade de sua espessura de projeto, a falha só ocorreu a uma pressão superior à estabelecida como máxima de trabalho admissível pela Norma N-76. Isso comprova o desempenho adequado do remendo em todas as situações testadas.

### **4.3 Avaliação dos Dados de Emissões Acústicas**

Os resultados obtidos através da aquisição de dados de emissões acústicas não foram plenamente satisfatórios, pois além de não terem sido identificados sinais oriundos da propagação de falhas no metal base ou no reparo, houve grande dificuldade na interpretação desses dados. Isso ocorreu, tendo em vista, a grande quantidade de ruído no sinal obtido e também pelo fato de que os ensaios foram realizados na frente de trabalho das instalações do GASLUB. Isso certamente prejudicou a qualidade dos sinais obtidos devido à grande quantidade de máquinas pesadas, veículos de carga e pessoas atuando no entorno da bancada de testes preparada para o experimento.

As informações a seguir dizem respeito aos dados do sensor piezelétrico I da Figura 3.7.1.1, que ficou situado mais próximo ao reparo instalado, dados esses adquiridos na Etapa III, durante o segundo ciclo de pressurização (teste com espessura do reparo igual a 75% daquela de projeto e pressão máxima de 6,86 MPa imposta à tubulação). Esses dados foram gravados e importados para tratamento no *software* MatLab. Considera-se que os dados a seguir são representativos, pois eles incorporam o caso mais crítico de carregamento a que foi submetida a tubulação testada, considerando a relação das variáveis espessura de reparo e pressão de teste.

A Figura 4.3.1 traz resultados obtidos na aquisição de dados do ensaio mencionado, após a aplicação do procedimento de pré-processamento e filtragem do sinal, com filtro passa banda entre 25 kHz e 100 kHz e com atenuação de 60db da intensidade dos sinais fora da banda, além de *Stepness* de 0.99 como uma tentativa de minimizar o efeito do ruído.

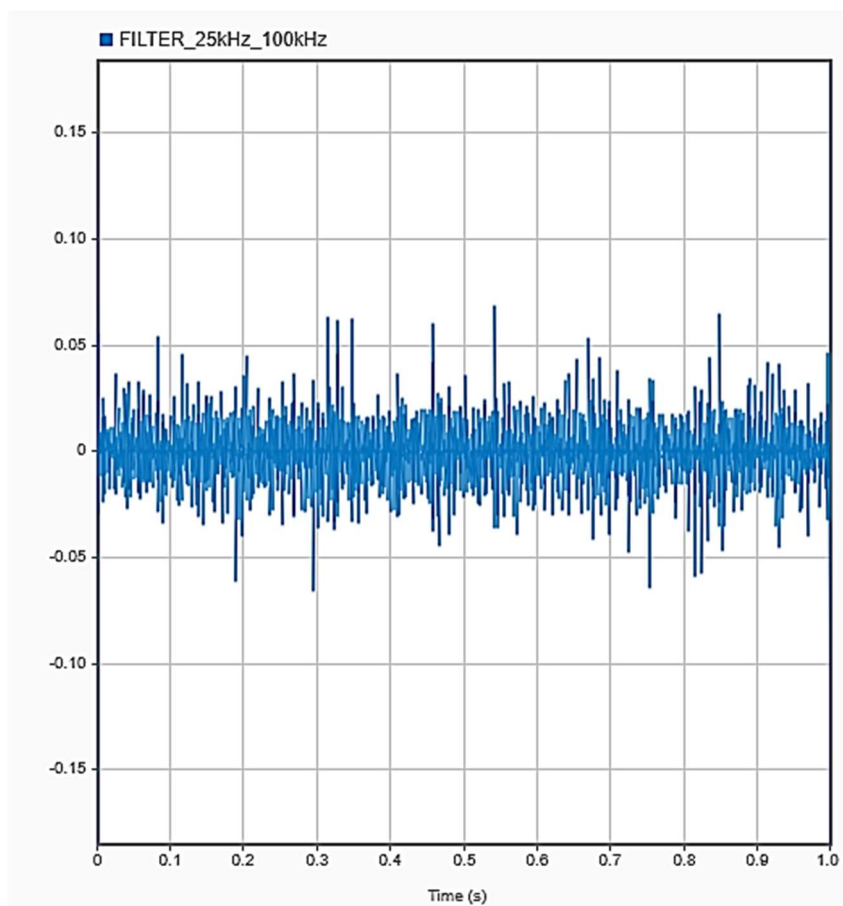


Figura 4.3.1 - Sinal obtido após aplicação de filtro carregamento da tubulação até a pressão de 6,86 MPa, após a remoção de 25% da sua espessura e limitaram-se à análise do sensor piezelétrico I [Autor, 2022].

A partir dos sinais adquiridos e tratados, foi realizada a varredura completa da faixa temporal. Para tanto, foram utilizadas janelas de largura igual a 0,005s, a partir das quais se buscou identificar padrões de sinais de emissões acústicas.

A Figura 4.3.2 demonstra um trecho do sinal da Figura 4.3.1 onde foi identificado um possível padrão de sinal de emissão acústica, bastante similar ao padrão da Figura

3.7.1.3. Esse trecho do sinal passou a ser investigado a fim de atestar se de fato tal padrão adveio de alguma propagação de trincas no reparo e no substrato metálico.

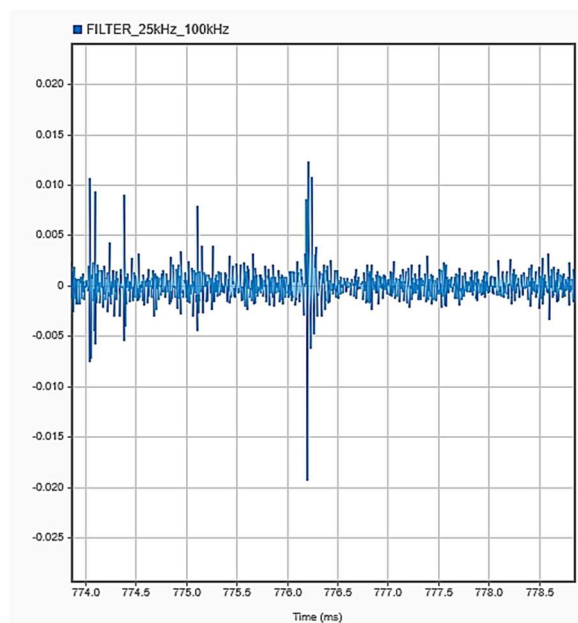


Figura 4.3.2 - Trecho do sinal onde foi identificado um possível padrão de sinal de emissão acústica [Autor, 2022].

Para a realização de uma verificação mais detalhada, houve a sobreposição do sinal filtrado da figura 4.3.2, com outro, de mesma origem, porém, considerando a passagem de frequências entre 5 kHz e 25 kHz (Figura 4.3.3).

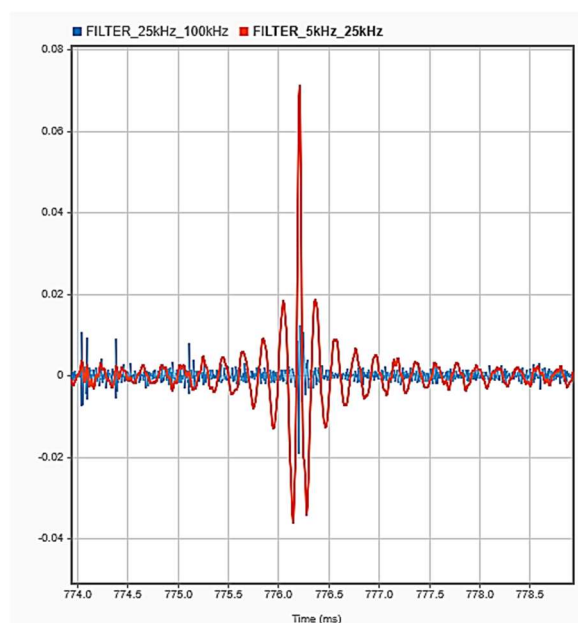


Figura 4.3.3 - Sobreposição do sinal filtrado, considerando o filtro passa banda entre 25 kHz e 100 kHz e entre 5 kHz e 25 kHz [Autor, 2022].

Ao se realizar uma análise do mesmo sinal sobreposto da Figura 4.3.3, considerando uma janela de 0,15 s, conforme Figura 4.3.4, nota-se um padrão de picos que se repetem com uma periodicidade bem estabelecida com frequência de 122 Hz. Essa resposta possibilitou descartar o evento como sendo proveniente de emissões acústicas para este caso adotado como exemplo.

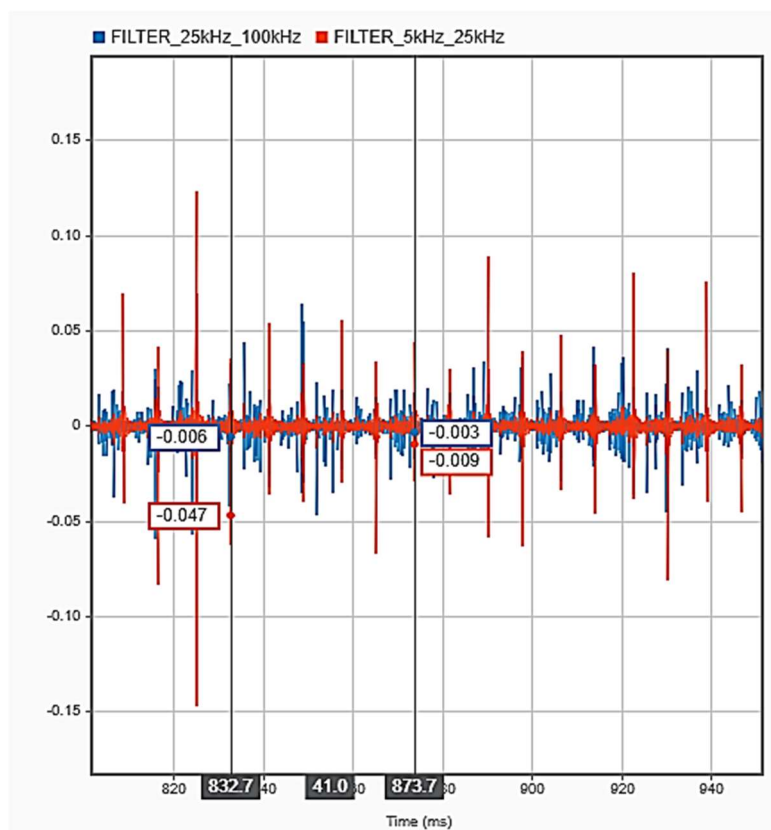


Figura 4.3.4 - Sobreposição do sinal filtrado, considerando uma janela de 0,15 s [Autor, 2022].

Ainda com relação aos picos de 122 Hz, infere-se que possam ter como origem o ruído causado pelo cabeamento do sistema de aquisição de emissões acústicas, tendo em vista que os cabos utilizados não foram do tipo blindados com aplicação específica para esse fim. Além disso, os picos apresentam valor de frequência que é submúltiplo da frequência de amostragem do sistema de aquisição de dados preparado para a presente pesquisa.

Outra possibilidade é de que o ruído se deva à interferência elétrica (já que a frequência deste ruído é de aproximadamente duas vezes a frequência da rede elétrica) ou até mesmo oriundo de um motor elétrico de alguma máquina em operação em local

próximo no momento do teste. Não é demais lembrar que os ensaios foram realizados no campo e não em bancada de teste em laboratório, assim não foi impossível garantir o isolamento por completo da tubulação quanto às interferências do meio.

De modo análogo ao exemplo aqui abordado, todos os demais dados adquiridos foram analisados sob o mesmo procedimento descrito, sendo que não foi identificado padrão de sinal que pudesse ser enquadrado como dado oriundo de emissões acústicas advindas da tubulação durante a execução dos testes. Para uma análise mais detalhada e melhor visualização dos gráficos das figuras 4.3.1 a 4.3.4, no Apêndice I foram incluídos todos os trechos de sinal onde foi identificada a possibilidade de captura de evento de emissão acústica durante a realização do teste de pressurização da tubulação a 6,86 MPa, na Etapa III - Segundo Ciclo de Testes: Reparo com espessura igual a 75% do projeto. Os demais ensaios monitorados apresentaram padrão de sinal e resultado de análise similares, sem nenhuma resposta digna de maior aprofundamento. Como não foram identificados sinais oriundos de eventos de propagação de defeitos, as imagens não foram incluídas no mencionado apêndice, por entender que não agregam além das imagens do ensaio de teste hidrostático acima citado.

Como não houve falha catastrófica do reparo, apenas trincas menores podem, durante esse processo, terem emitido sinais de emissão acústica. Todavia, esses sinais se de fato ocorreram, não foram identificados. Isso de forma alguma invalida a aplicabilidade do ensaio de emissões acústicas para qualificação de reparos construídos com materiais compósitos. Porém, fica claro que as condições para a realização deste tipo de ensaio demandam equipamentos específicos e um controle rígido quanto às fontes de ruído externas.

#### **4.4 Avaliação dos Ensaio Complementares**

Além dos ensaios de avaliação de emissões acústicas, foi considerada pertinente a realização de ensaios que pudessem identificar ocorrência de eventos de propagação de trincas de superfície na face externa no reparo compósito, bem como verificar o comportamento do defeito inserido no substrato metálico. Desta forma, foram realizados testes complementares a fim de confirmar a estabilidade do espécime em termos de nucleação e/ou propagação de trincas e fissuras, conforme apontado pela análise da mecânica da fratura.

A Figura 4.3.5 demonstra o reparo após o desbaste realizado durante a Etapa III dos ensaios de pressurização da tubulação. Nota-se que nenhuma grande imperfeição, trinca ou poro é percebida na superfície. Contudo, ao realizar a aplicação do corante e o revelador, podem ser verificados alguns poros na superfície do reparo compósito, correspondentes aos pontos mais escuros na superfície do reparo, na Figura 4.3.6, referente ao ensaio realizado imediatamente após a execução do último teste de pressurização.

O aspecto dos poros apresentados deve-se, em grande medida, pela presença de ar durante a aplicação das camadas sucessivas do tecido de fibra de vidro em conjunto com a matriz formada pelo epóxi reforçada com carga metálica. Muitas vezes, para que se evite o aparecimento de bolhas e vazios após o processo de cura, a aplicação do material compósito é feita sob vácuo, algo muitas vezes inexecutável em aplicações de campo. Verificou-se, durante o ensaio de líquidos penetrantes, que os poros identificados foram superficiais, já que não houve vazamento da tubulação durante o mencionado ensaio. Ressalta-se que a tubulação estava cheia de água remanescente do teste hidrostático realizado previamente.



Figura 4.3.5 – Aspecto do reparo pós falha [Autor, 2022].



Figura 4.3.6 - Aspecto do reparo pós ensaio de líquidos penetrantes [Autor, 2022].

Outro ponto importante a ser abordado é que não se identificou nenhuma trinca na superfície externa do reparo, apesar de a tubulação ter sido submetida a uma pressão superior à máxima pressão admissível para o conjunto tubo/flange/junta, de acordo com a norma N-76. Isso, portanto, demonstra a boa capacidade do conjunto matriz e reforço em suportar as cargas para as condições previstas de aplicação.

Com relação ao ensaio de boroscopia, a Figura 4.3.7 demonstra a inserção da sonda e o terminal de visualização das imagens capturadas no ensaio. Já a Figura 4.3.8 traz uma das imagens capturadas pelo boroscópio, demonstrando o aspecto interno da

tubulação, com detalhe para a trinca inserida no substrato metálico e sobre a qual foi adicionado o reparo de material compósito.

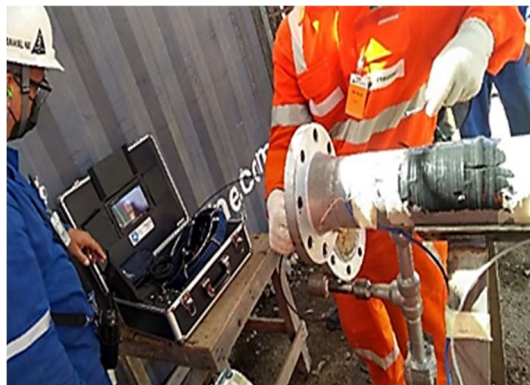


Figura 4.3.7 - Inserção da sonda para realização de ensaio de visualização boroscópica [Autor, 2022].



Figura 4.3.8 - Aspecto da trinca na face interna do substrato metálico [Autor, 2022].

Pela imagem obtida no ensaio, confirmou-se a premissa de não propagação da trinca no substrato metálico, conforme apontado pelo cálculo de mecânica da fratura, descrito no item 3.4. Esta observação é bastante relevante pois de outra forma, inviabilizaria a aprovação do reparo para as condições projetadas, já que a propagação da trinca poderia se estender para uma região sem cobertura de material compósito.

Tendo por base os resultados obtidos a partir dos ensaios propostos, considera-se que foram obtidos elementos que possibilitaram responder, mesmo que de forma parcial os questionamentos implícitos no objetivo geral e nos objetivos específicos estabelecidos, o que possibilita tecer as conclusões para a presente pesquisa, tal como apresentado no capítulo a seguir.

## CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo principal estudar o comportamento de um reparo construído com material compósito de fibras de vidro e resina polimérica para a aplicação em tubulações de aço pressurizadas internamente. Ainda, dentro do objetivo geral, também foram estabelecidos como objetivos específicos estudar os principais tipos de materiais compósitos, suas características, mecanismos de falhas e suas possíveis aplicações na construção de reparos para tubulações metálicas, o ensaio de uma tubulação reparada, a fim de observar a resistência deste reparo em serviço e avaliar os critérios de dimensionamento e qualificação de reparo com material compósito com vistas ao seu uso na indústria de óleo e gás.

Além disso, propôs-se a avaliação do fenômeno de emissões acústicas na investigação da integridade de reparos produzidos com material compósito.

Na busca de cumprir com os objetivos estabelecidos para este estudo, propôs-se uma metodologia que levou em consideração o projeto e a fabricação de uma estrutura para ensaio, observado as normas mais reconhecidas para o projeto e fabricação de tubulações. Realizou-se o dimensionamento de um reparo, comparando as particularidades das duas principais normas de dimensionamento de reparos produzidos em material compósito, tratando das diferenças entre essas normas.

Ainda, realizaram-se testes de pressão, a fim de verificar a efetividade do reparo produzido e realizado ensaios não destrutíveis visando atestar a qualidade do reparo instalado. Por fim, foram analisados os sinais adquiridos nos ensaios de emissões acústicas, obtidos durante a realização dos testes hidrostáticos, com objetivo de identificar a ocorrência da propagação de defeitos nas fases iniciais deste fenômeno. Diante destas etapas, as principais conclusões obtidas através da aplicação da metodologia proposta na presente pesquisa foram as seguintes:

- a) Existe espaço para uma maior difusão quanto à aplicação industrial de reparos compósitos em tubulações metálicas pressurizadas. Todavia ainda existem importantes lacunas a serem melhor preenchidas, principalmente no sentido de qualificação de mão de obra para o projeto e aplicação deste tipo de solução. Também é importante mencionar a necessidade de qualificação de profissionais de inspeção com foco em materiais compósitos para fazer frente à essa difusão na área de óleo e gás.



- b) Existe a necessidade de uma melhor padronização e aderência às normas pelos fabricantes de insumos utilizados na construção de compósitos reforçados com fibras. Verifica-se que embora existam normas de referência para a padronização das fibras e resinas, vários fabricantes não disponibilizam as especificações técnicas dos seus produtos, o que dificulta prever o comportamento dos compósitos projetados quando em serviço, a não ser que sejam construídos corpos de provas para testes de desempenho antecipadamente.
- c) As normas de projetos de reparos com materiais compósitos fornecem resultados satisfatórios, porém não são de uso prático. Este fato faz com que em muitos casos onde há a ocorrência de pequenos vazamentos ou corrosões acentuadas, que necessitem de reparos emergenciais e que poderiam receber o reparo a partir da aplicação de material compósito, acabem por receber reparos convencionais através de corte e soldagem metálica, estes últimos, mais demorados e, portanto, mais custosos, além de, em muitas situações, mais perigosos, nos casos onde há dificuldade para completa descontaminação da tubulação a ser reparada.
- d) Um estudo prévio de mecânica da fratura é essencial para verificar a possibilidade de reparo com material compósito, sob pena de ocorrência de eventuais propagações de trincas sob o reparo instalado, possibilitando novos vazamentos e até mesmo falhas catastróficas do substrato metálico.
- e) A análise de dados de emissões acústicas fornece dados ricos quanto a eventuais propagações de micro trincas ou defeitos maiores em camadas não acessíveis à inspeção visual. Todavia, como os sinais de emissões acústicas ocorrem em frequências bastante altas e com baixíssimas amplitudes, para que essa ferramenta possa trazer ganhos em casos práticos, deve ser realizada em local com máximo isolamento ao acesso de pessoas e máquinas e com o uso de *hardware* de alta precisão.

Os altos custos envolvidos nas paradas não programadas causadas por processos corrosivos em tubulações justificam o investimento na pesquisa desta rota tecnológica.

Todavia, pela alta periculosidade envolvida nos processos produtivos de hidrocarbonetos, para que os reparos compósitos sejam encarados pelo setor como uma

tecnologia segura e perene, há de se implantar programas de qualificação de mão de obra para esse fim.

Neste sentido é necessário capacitar o corpo de engenheiros de manutenção para o projeto de reparos em materiais compósitos, o que envolve o conhecimento profundo das normas de projetos disponíveis e a da modelagem de laminados em softwares de análise de elementos finitos, o que hoje em dia não é comum dentro do setor.

Cabe ressaltar que uma das principais vantagens dos reparos compósitos é prover uma solução emergencial de reparo, em casos de pequenos vazamentos ou casos de iminente falha, que possam ser tratados neste caso, sem a parada das plantas de processo.

Os resultados gerais da pesquisa demonstraram que não há barreira tecnológica para adotar-se a solução de reparo compósito para tubulações metálicas na indústria de óleo e gás. As barreiras a serem transpostas, neste caso, são a sensibilização dos fornecedores de insumos sobre a necessidade do melhor controle e informações claras sobre as especificações técnicas dos insumos fornecidos, a simplificação das normas de projeto de reparo compósito e, em particular nas instalações brasileiras, a qualificação de mão de obra para o projeto, instalação e inspeção de materiais compósitos.

## **6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Recomenda-se, no intuito de avançar no desenvolvimento de soluções, como sugestões para trabalhos futuros:

- a. Realização de testes de longa duração, a fim de verificar a degradação do meio e a fluência em reparos de materiais compósitos.
- b. Realização de testes comparativos utilizando fibras e resinas de diferentes fabricantes, com o intuito de verificar as diferenças nas propriedades finais dos compósitos, demonstrando a importância de uma padronização das especificações e certificações.
- c. Desenvolvimento de cursos e implantação de cadastro de profissionais qualificados para a realização de reparos em tubulações através da adição de materiais compósitos.
- d. Utilização de fabricação aditiva, com o uso de impressoras 3D para o desenvolvimento de reparos de materiais compósitos em geometrias complexas.

## REFERÊNCIAS

- ABDELLAH, Mohammed Y. **Stress Distribution and Fracture Toughness of Underground - Reinforced Plastic Pipe Composite**. 2021.
- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma Técnica NBR 15239 - Tratamento de Superfícies de Aço com Ferramentas Manuais e Mecânicas**. 1ª edição, 2005.
- AGARWAL, Bhagwan D. (2006). **ANALYSIS AND PERFORMANCE OF FIBER COMPOSITES**. 3a. edição. John Wiley & Sons.
- ALEXANDER, Christopher Richard. **DEVELOPMENT OF A COMPOSITE REPAIR SYSTEM FOR REINFORCING OFFSHORE RISERS**. 2007.
- ASME PCC-2:2015 - **Repair of pressure equipment and piping**.
- AYAZ, Y. **Repair of small damages in steel pipes with composite patches**. 2016.
- BARRON, Taylor Austin. **EXPERIMENTATION OF COMPOSITE REPAIR TECHNIQUES FOR PIPELINES USING FINITE ELEMENT ANALYSIS WITH RESPECT TO ASME PCC-2, ISO 24817, AND PARAMETRIC MODELS**. 2016.
- BNDES. **Mercado de Refino de Petróleo no Brasil**. Rio de Janeiro, v. 24, n. 48, p. 7-44, set. 2018.
- BUDHE, S. *et al.* **Composite repair system for corroded metallic pipelines: an overview of recent developments and modelling**. Journal of Marine Science and Technology Vol 25, (2020) pp. 1308–1323.
- BUFFONI, Salete Souza de Oliveira. **RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE**.
- CALLISTER, W. (1999). **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução** Editora LTC, 5ª edição.
- CARPINTERI A., LACIDOGNA G., NICCOLINI G., PUZZI S. **Critical defect size distributions in concrete structures detected by the acoustic emission technique**. Meccanica 2008b; 43: 349–63. 2008.
- CHEMICAL SAFETY AND HAZARD INVESTIGATION BOARD. **Title 40 - Protection of Environment Chapter Vi**. 2010.
- DANIEL, Isaac M. (2006). **ENGINEERING MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS**. Oxford University Press, 2ª edição.
- DUMITRESCU, Andrei. **Corrosion Repair of Pipelines Using Modern Composite Materials Systems: A Numerical Performance Evaluation**. 2020.
- ENVIRONNEWS NIGÉRIA. **Spill: Group clamours replacement of outdated pipelines, closure of abandoned wells**. 2022.

- FILIPPIN, Carlo Giuseppe *et al.* **Emissão acústica: conceitos e aplicações.** 2017.
- GARCIA, Luis Paulo; MORILLA, Jose Carlos. **Aplicação de materiais compósitos em reparos de tubulações de óleo e gás.** 2012.
- GENTIL, Vicente. **Corrosão.** 6a. edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2011.
- GOH, Guo Dong. **Recent Progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite.** 2019.
- Human Rights Watch. Defending Human Rights Worldwide. **They Killed Us from the Inside - An Investigation into the August 4 Beirut Blast.** 2020.
- ISO/TS 24817:2006 - **Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Composite repairs for pipework - Qualification and design, installation, testing and inspection.** 2006.
- ISO-8501 - **Preparação de substrato de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares** – Avaliação visual de limpeza de superfície, atendendo o Grau St 3 de acabamento. 2007.
- JIANG, Xiaoxia *et al.* **Modelling failure pressure of pipeline composite repair design using finite element analysis incorporating putty's contribution.** 2019.
- KOCH, Gerhardus *et. al.* **International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study.** 2016.
- LIM, K. S., Azraai, S. N. A., Yahaya, N., and Noor, N. M. **Comparison of Mechanical Properties of Epoxy Grouts for Pipeline Repair.** Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Volume 11, no. 12, (2015), pp. 1430–1434.
- MAGGI, Anna C. Wagner. **Aplicação da Técnica da Emissão Acústica em Análise de Dano em Estruturas Reforçadas com Fibras.** 2018.
- MIAO, Y.; Chen, H.; Cui, G.; Qi, Y. **Preparation of new conductive organic coating for the fiber reinforced polymer composite oil pipe.** Surf. Coat. Technol. 2021, 412, 127017.
- PETERSEN, Helga Norgaard. **Investigation of sizing - from glass fibre surface to composite interface.** 2017.
- PETROBRAS. **Demonstrações Financeiras, 2020.** Disponível em: <<https://www.investidorpetrobras.com.br/resultados-e-comunicados/central-de-resultados/>>. Acesso em: 10 nov. 2022.
- PETROBRAS. **Norma Petrobras N-2688-** Teste de pressão em serviço de vasos de pressão e caldeiras. Rio de Janeiro, Petrobras, 2014.
- PETROBRAS. **Norma Petrobras N-76 -** Materiais de tubulação para instalações de refino e transporte. Rio de Janeiro, Petrobras, 2004.

ROSA, Edson da. **Análise de Resistência Mecânica (Mecânica da Fratura e Fadiga) Grupo de Análise e Projeto Mecânico**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina 2002.

SAEEDIFAR, Milad; ZAROUCHAS, Dimitrios. **Damage characterization of laminated composites using acoustic emission: A review**. 2020.

SHABIBI, Sulaiman Al *et al.* **Corrosão de ligas de Mg EV31A, WE43B e ZE41A em soluções contendo cloreto e sulfato saturadas com hidróxido de magnésio**. 2020.

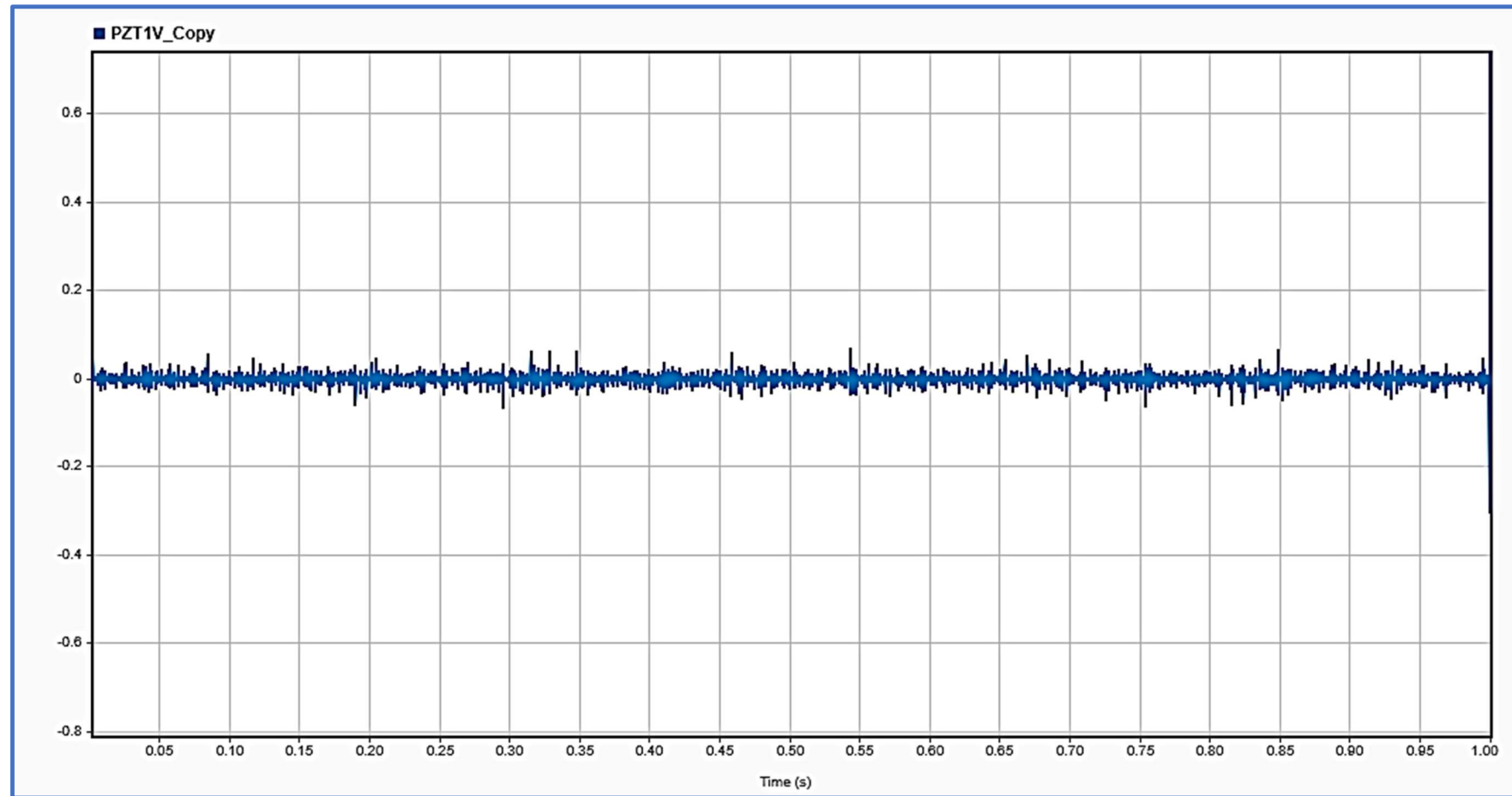
SHEKHTERA. **Assessment of temper embrittlement in an ex-service 1Cr-1Mo-0.25V power generating rotor by Charpy V-Notch testing, K<sub>Ic</sub> fracture toughness and small punch test**, Int. J. Press. Vessel. Piping, Aust., vol. 79, pp. 611–615, 2002.

TELLES, P.C. Silva. **Tubulações Industriais – Cálculo**. 9a. edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1999.

UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica. **PETRÓLEO - do latim Petra(pedra) e Oleum(óleo)**. Disponível em: <<https://www.fem.unicamp.br/index.php/pt-br/o-que-e-petroleo-dep>>. Acesso em: 09 out. 2022.

**APÊNDICE A****SINAIS OBTIDOS DURANTE OS ENSAIOS DE EMISSÕES ACÚSTICAS**

**Data da coleta:** 25/11/2021 - **Horário:** 15 h e 27 min  
**Sensor / Posição:** Sensor piezométrico I - **Taxa de Amostragem:** 250 kHz  
**Filtro Aplicado ao Sinal:** Filtro passa banda de 25 kHz à 100 kHz  
**Etapa III - Segundo Ciclo:** Teste do reparo com espessura igual a 75% do projeto  
**Pressão Interna da Tubulação:** 6,86 MPa.



**Figura I.1 - Aspecto geral do sinal filtrado compreendido entre o tempo 0 s e 1 s**

Análise dos trechos do sinal, com potencial origem em emissões acústicas devido a propagações de defeitos no reparo ou no substrato metálico

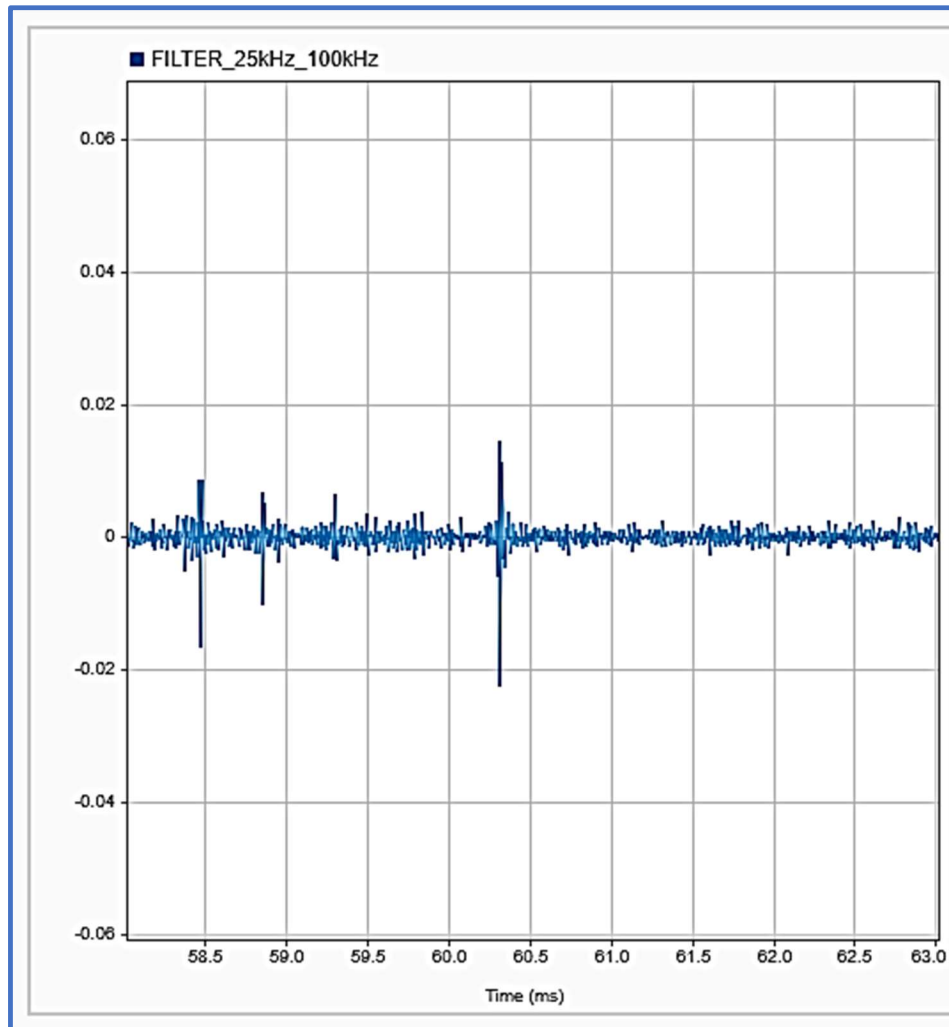


Figura I.2 - Trecho 1: Sinal submetido ao filtro passa banda entre 25 e 100 kHz apresentando sinal compatível com emissão acústica próxima de 60,3 ms (visão em janela de 5 ms).

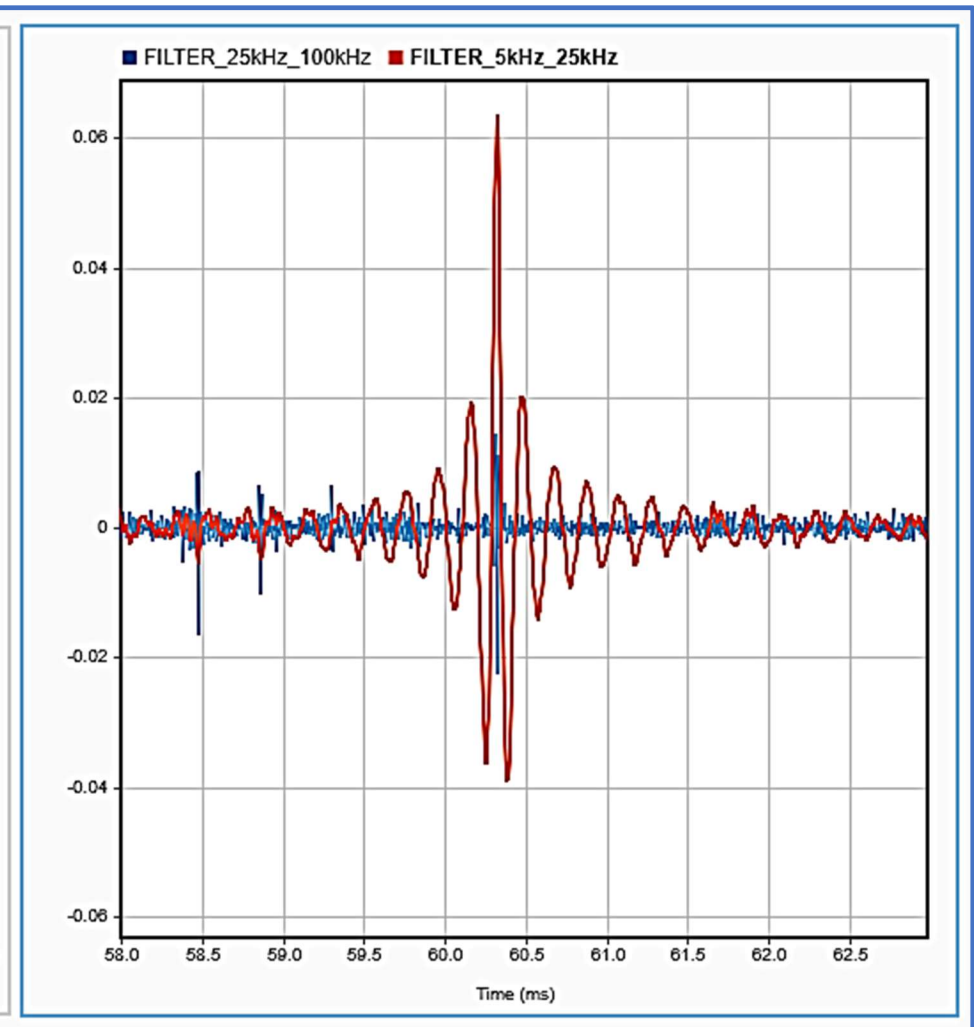


Figura I.3 - Trecho 1: Sinal quando submetido à superposição com filtro banda entre 5 e 25 kHz.



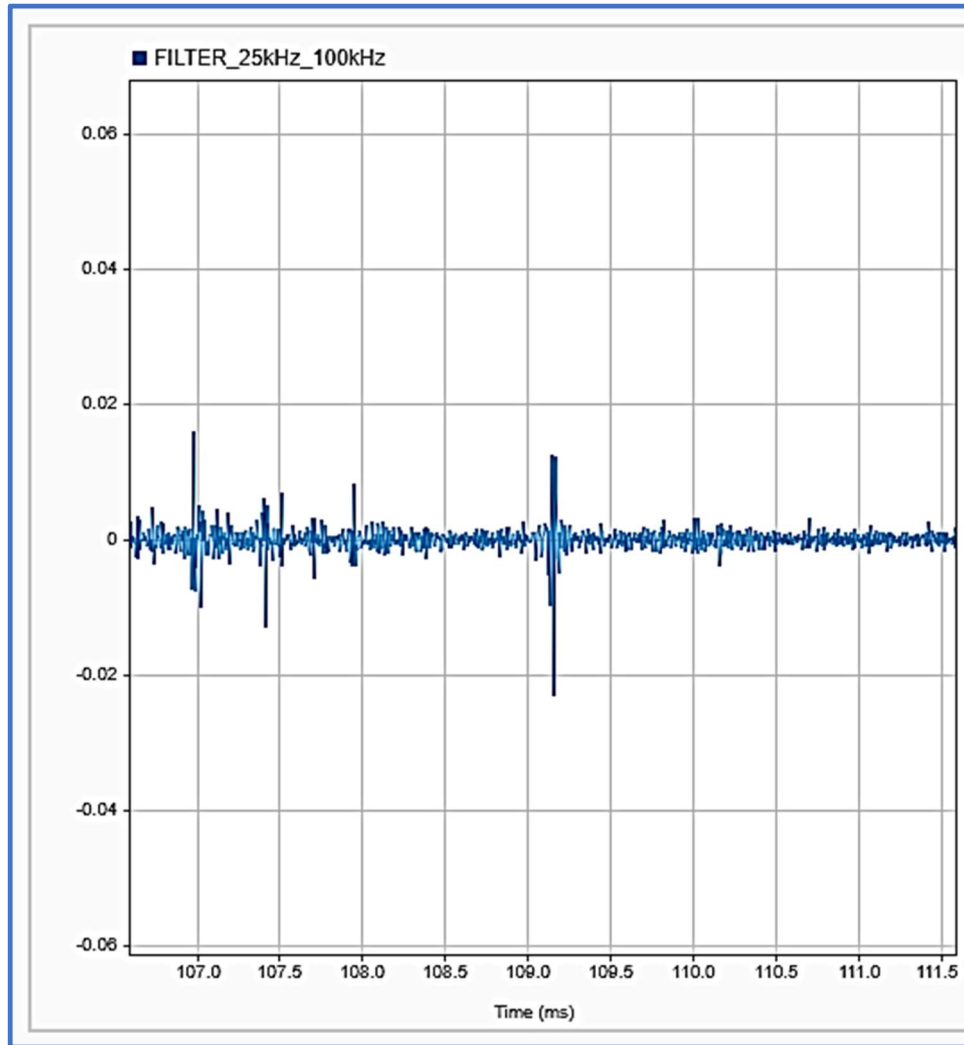


Figura I.4 - Trecho 2: Sinal submetido ao filtro passa banda entre 25 e 100 kHz apresentando sinal compatível com emissão acústica próxima de 109,2 ms (visão em janela de 5 ms).

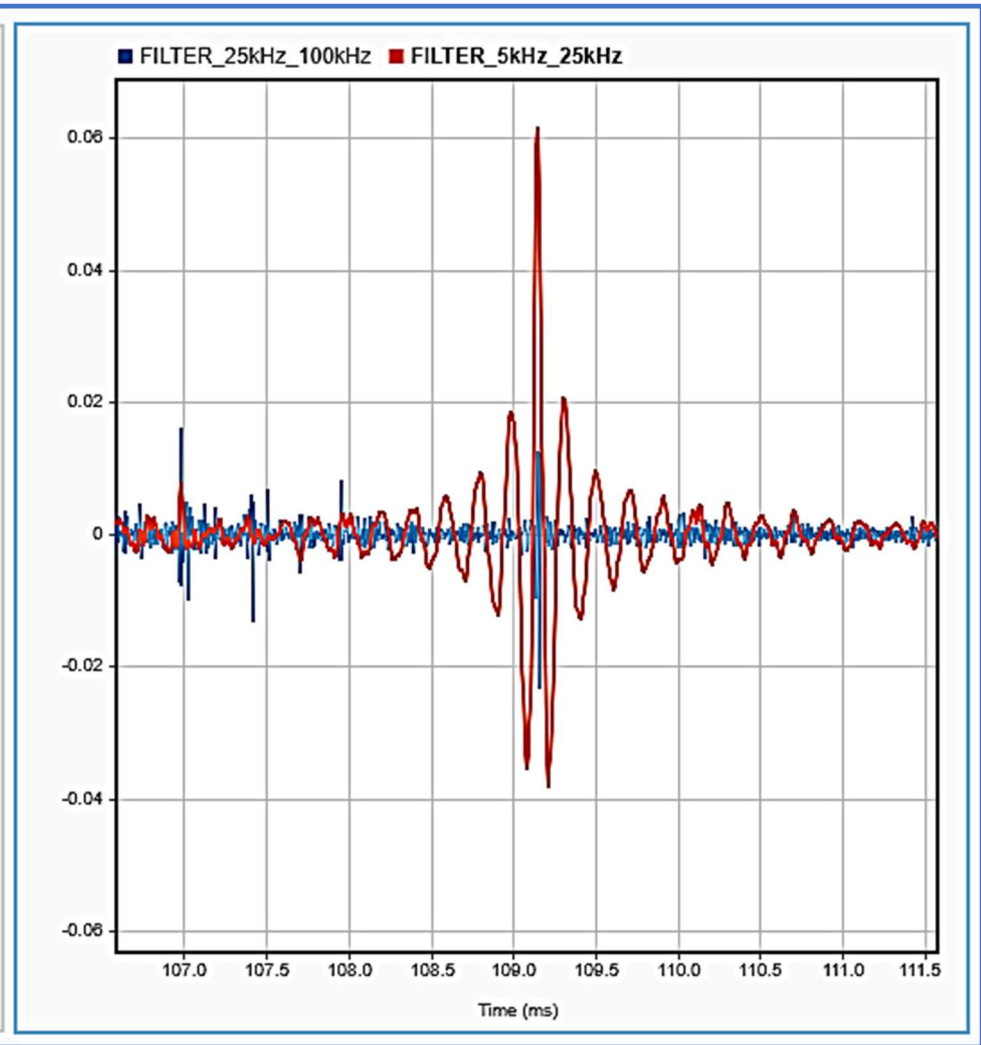


Figura I.5 - Trecho 2: Sinal quando submetido à superposição com filtro banda entre 5 e 25 kHz.

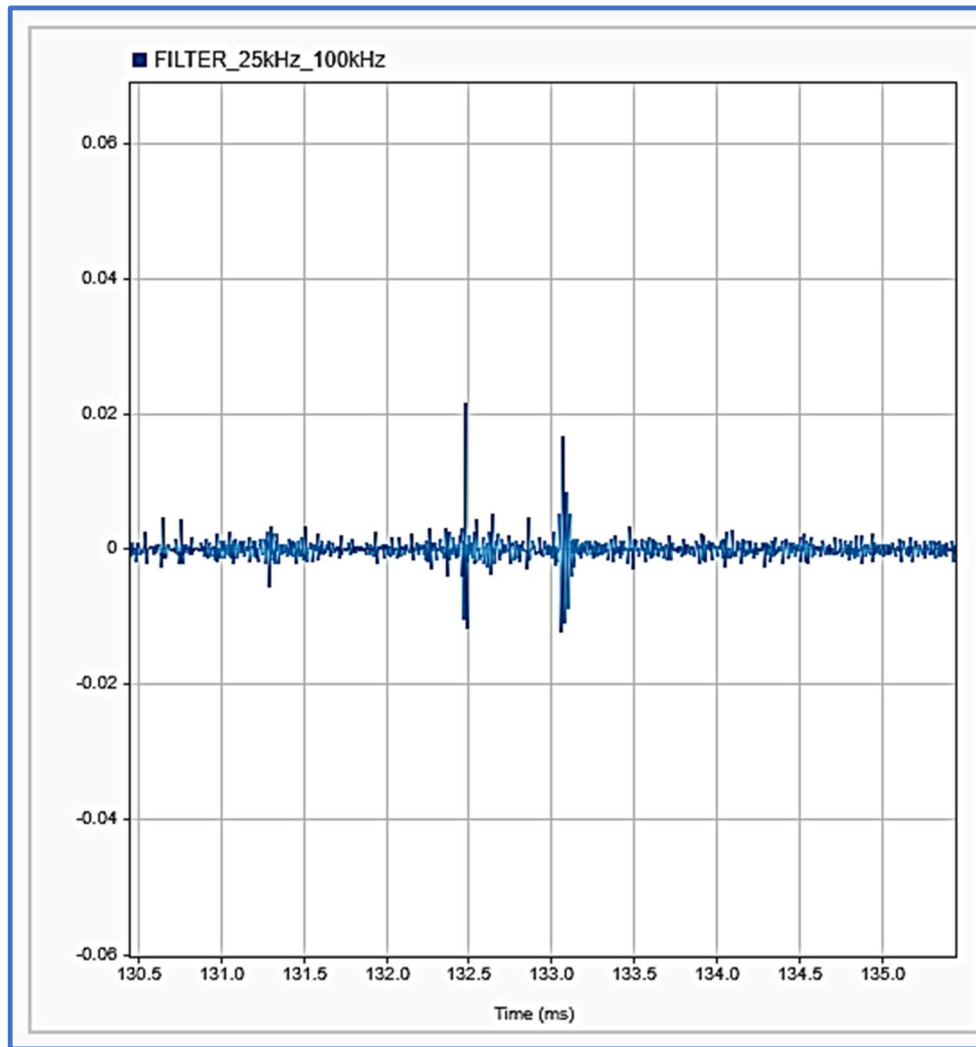


Figura I.6 - Trecho 3: Sinal submetido ao filtro passa banda entre 25 e 100 kHz apresentando sinal compatível com emissão acústica próxima de 133,1 ms (visão em janela de 5 ms).

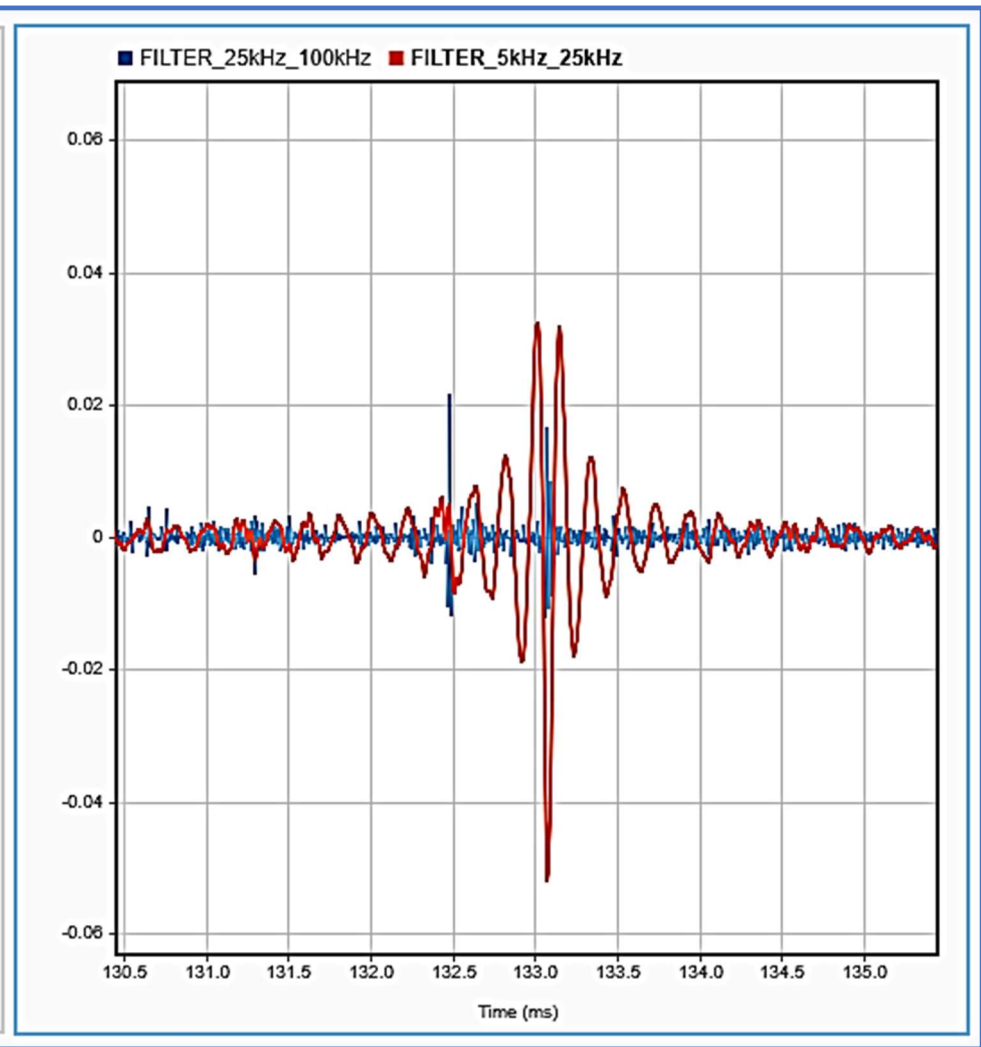


Figura I.7 - Trecho 3: Sinal quando submetido à superposição com filtro banda entre 5 e 25 kHz.

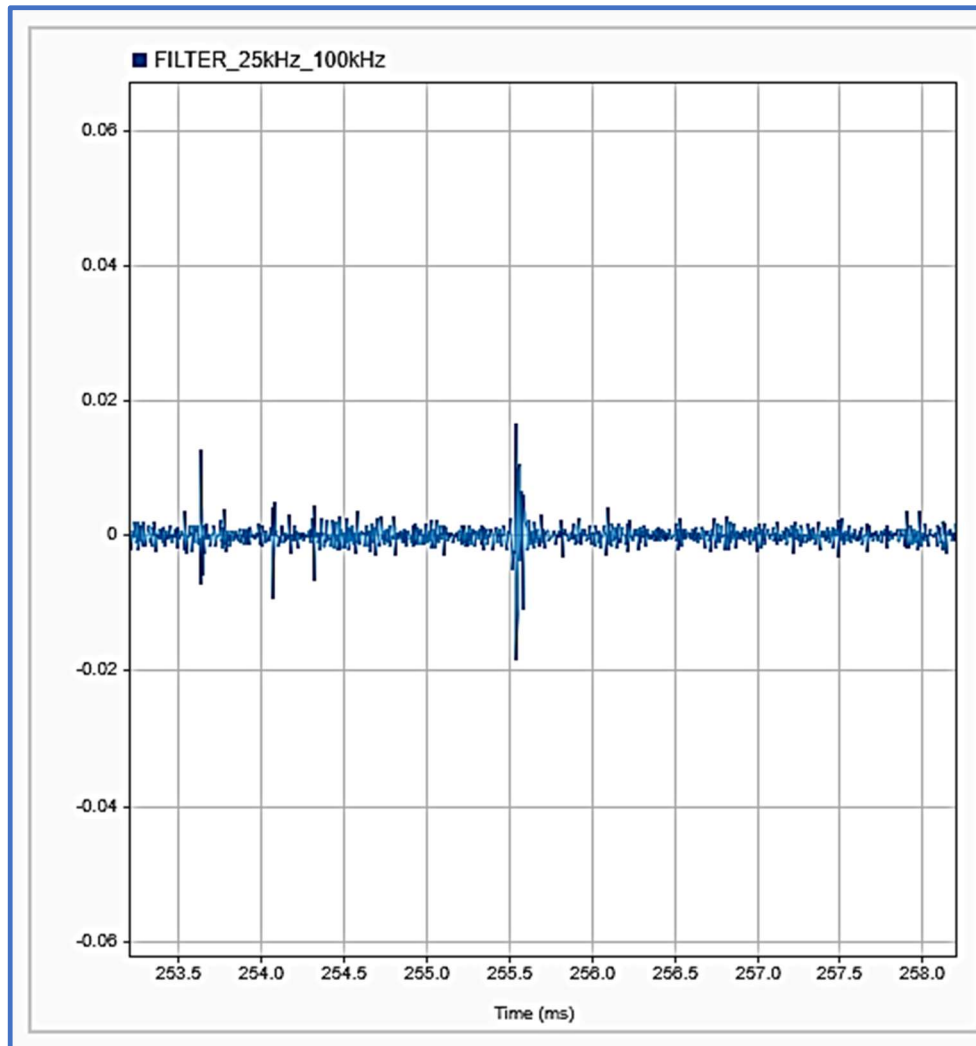


Figura I.8 - Trecho 4: Sinal submetido ao filtro passa banda entre 25 e 100 kHz apresentando sinal compatível com emissão acústica próxima de 255,5 ms (visão em janela de 5 ms).

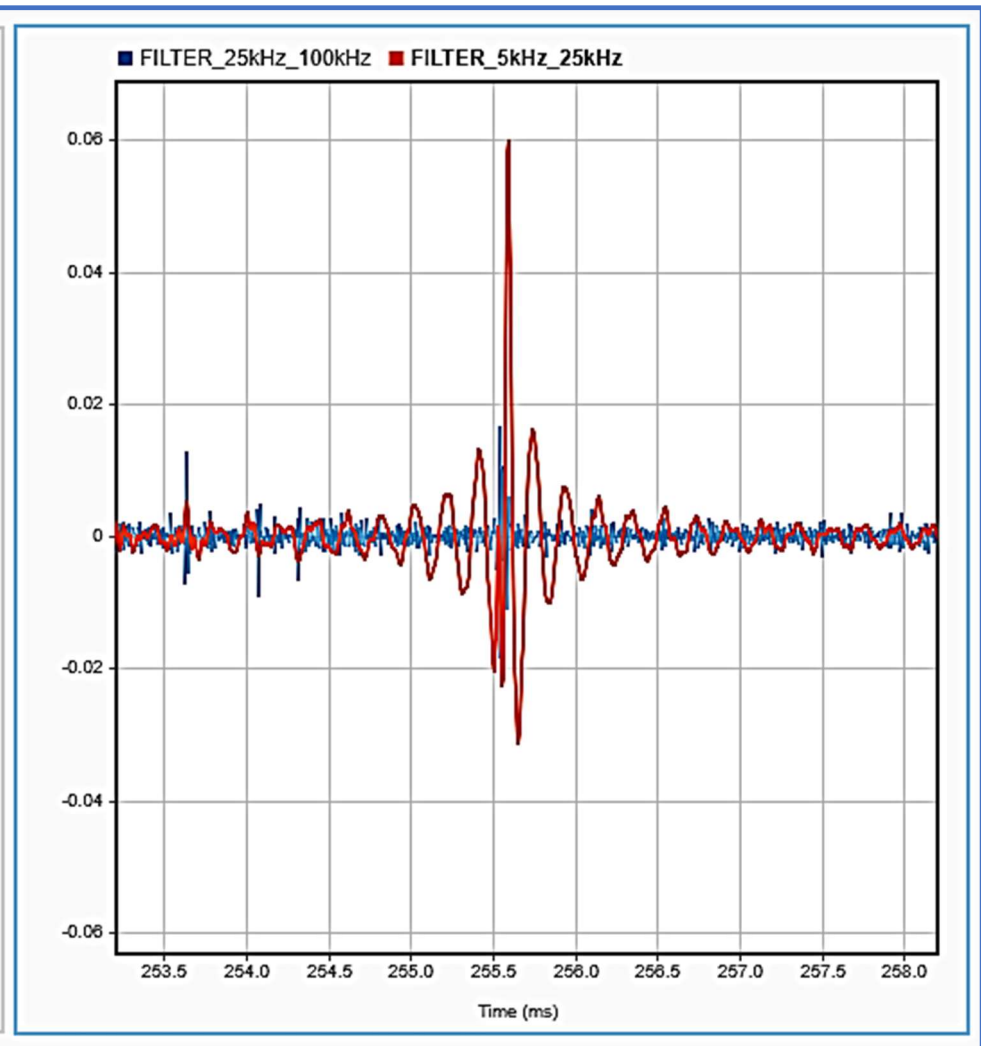


Figura I.9 - Trecho 4: Sinal quando submetido à superposição com filtro banda entre 5 e 25 kHz.

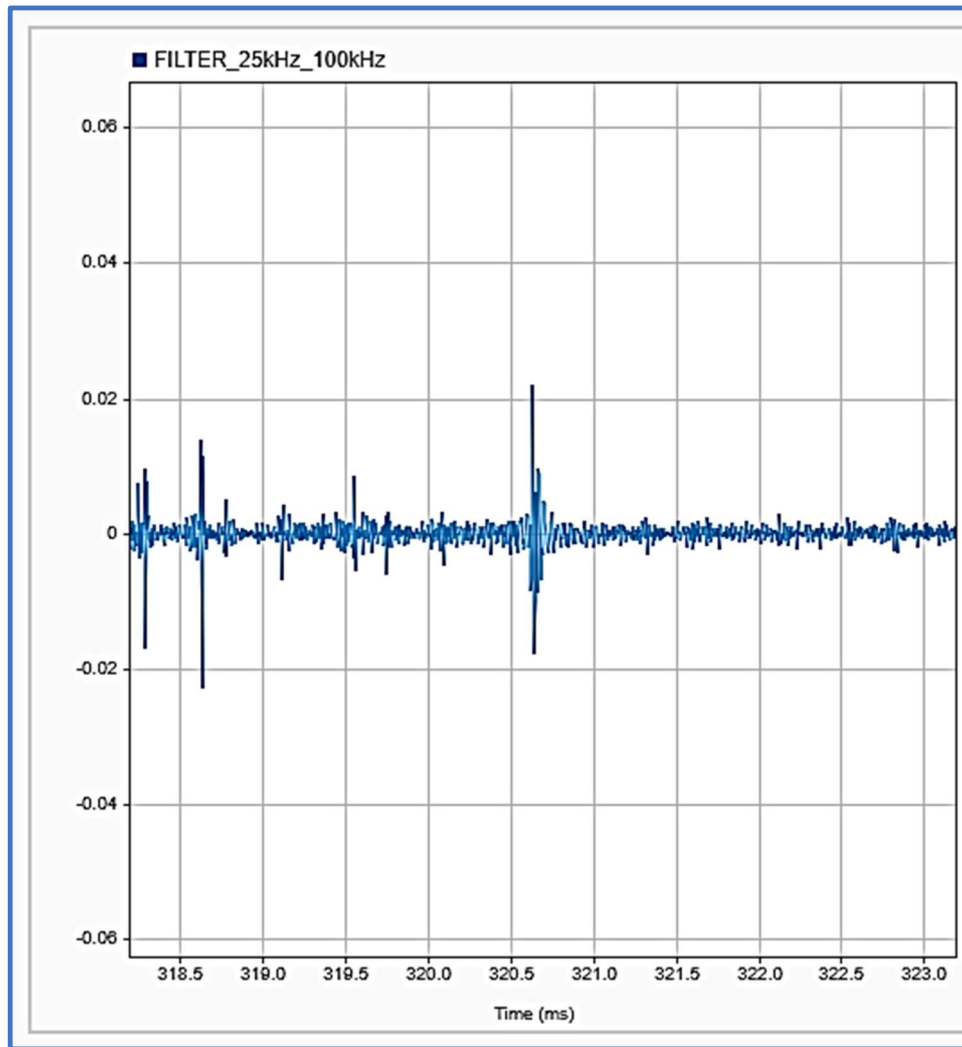


Figura I.10 - Trecho 5: Sinal submetido ao filtro passa banda entre 25 e 100 kHz apresentando sinal compatível com emissão acústica próxima de 320,6 ms (visão em janela de 5 ms).

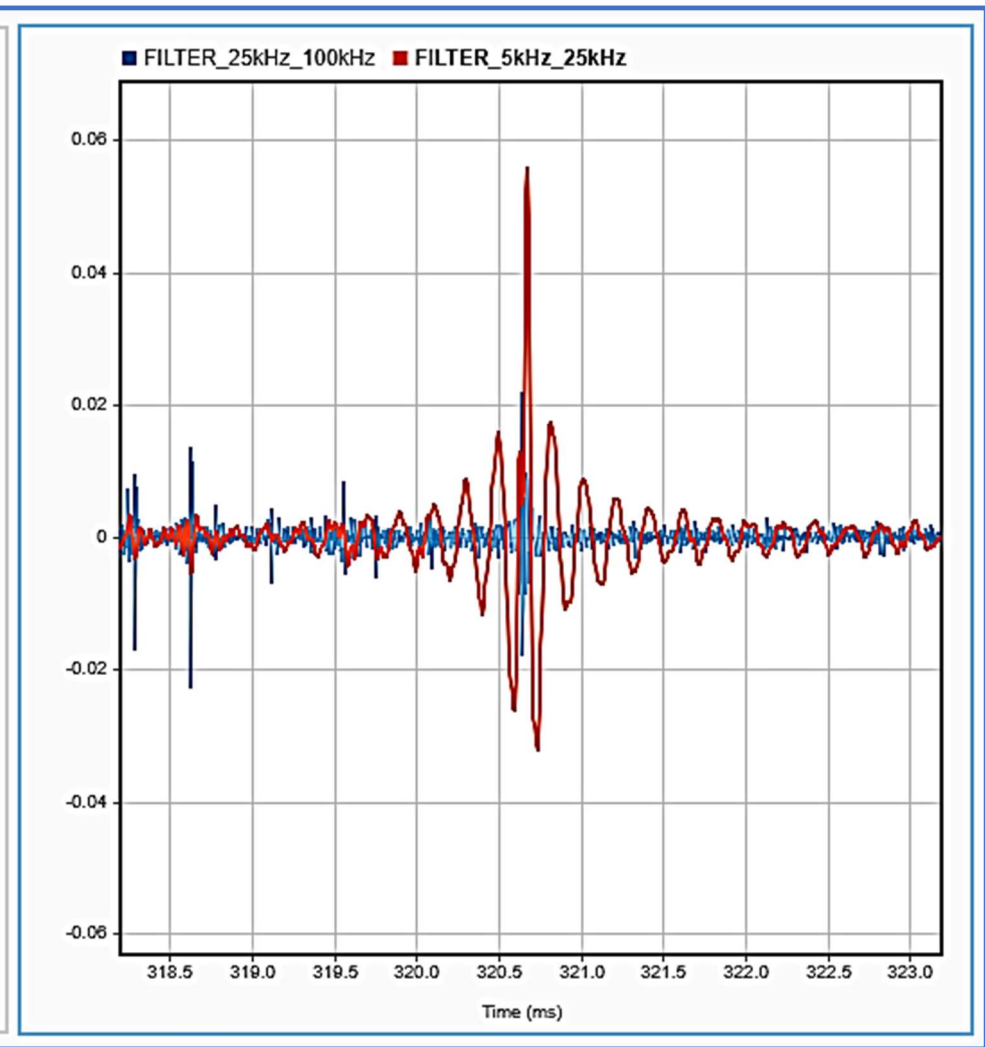


Figura I.11 - Trecho 5: Sinal quando submetido à superposição com filtro banda entre 5 e 25 kHz.

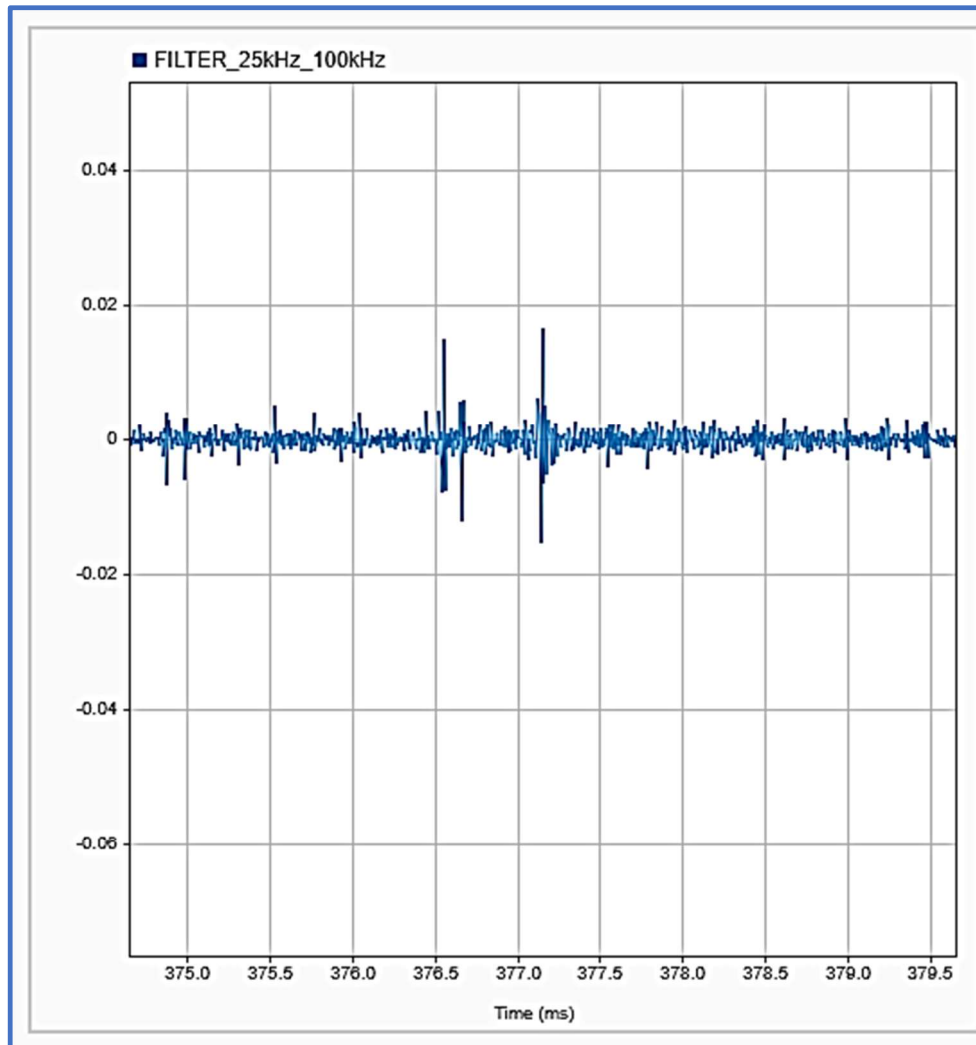


Figura I.12 - Trecho 6: Sinal submetido ao filtro passa banda entre 25 e 100 kHz apresentando sinal compatível com emissão acústica próxima de 377,2 ms (visão em janela de 5 ms).

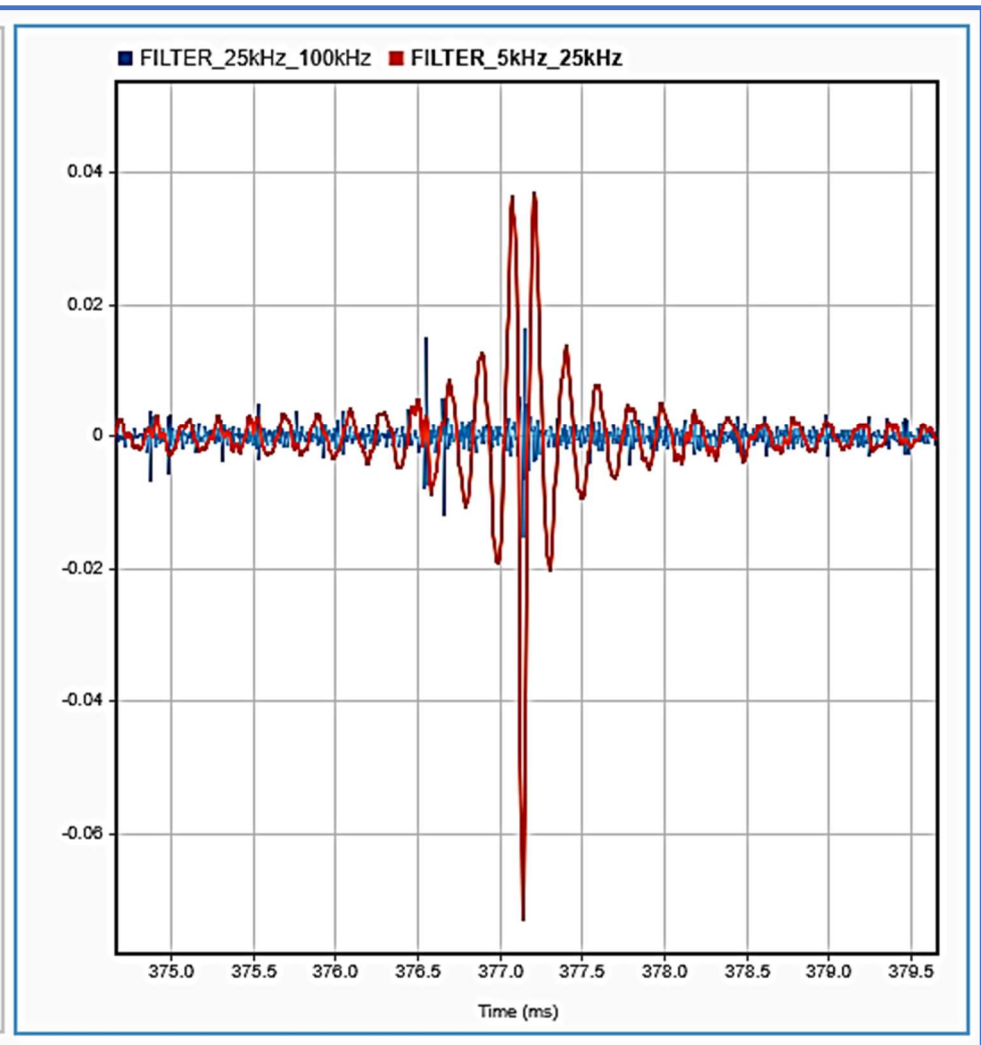


Figura I.13 - Trecho 6: Sinal quando submetido à superposição com filtro banda entre 5 e 25 kHz.

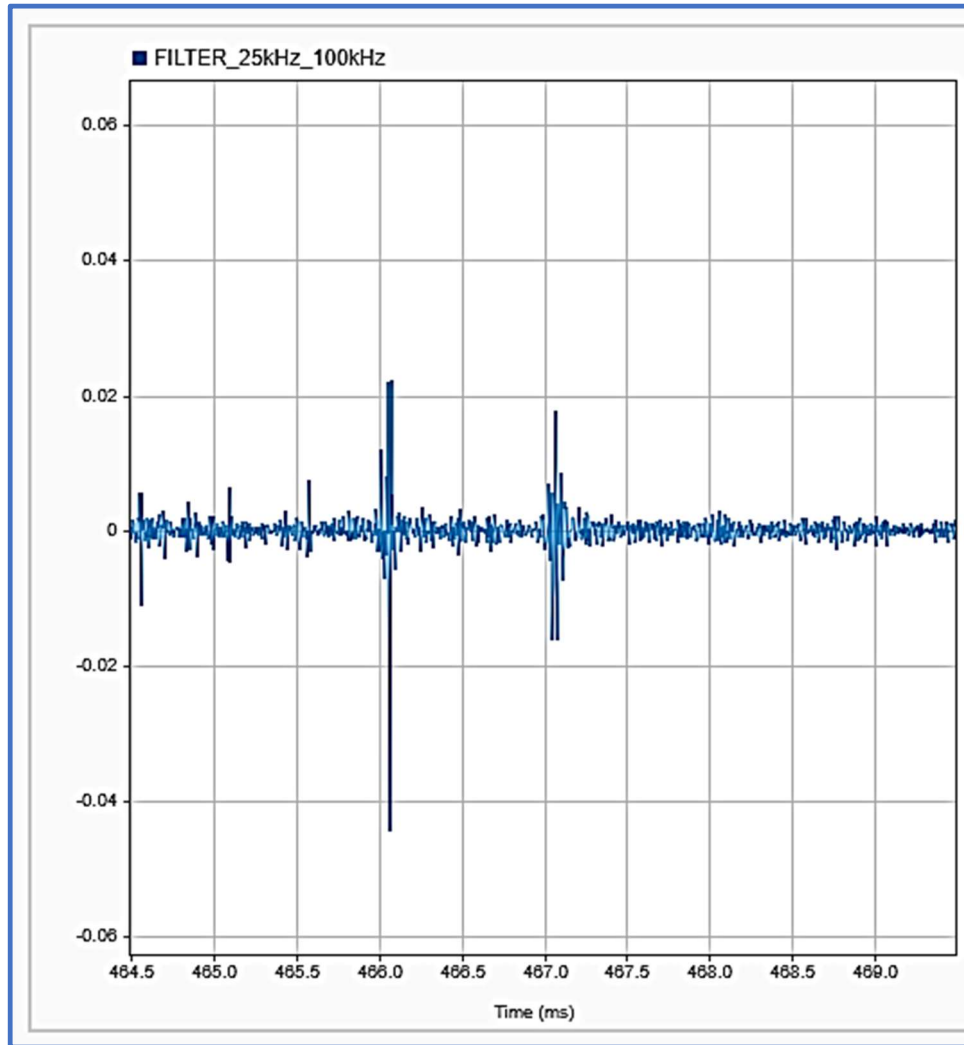


Figura I.14 - Trecho 7: Sinal submetido ao filtro passa banda entre 25 e 100 kHz apresentando sinal compatível com emissão acústica próxima de 457,1 ms (visão em janela de 5 ms).

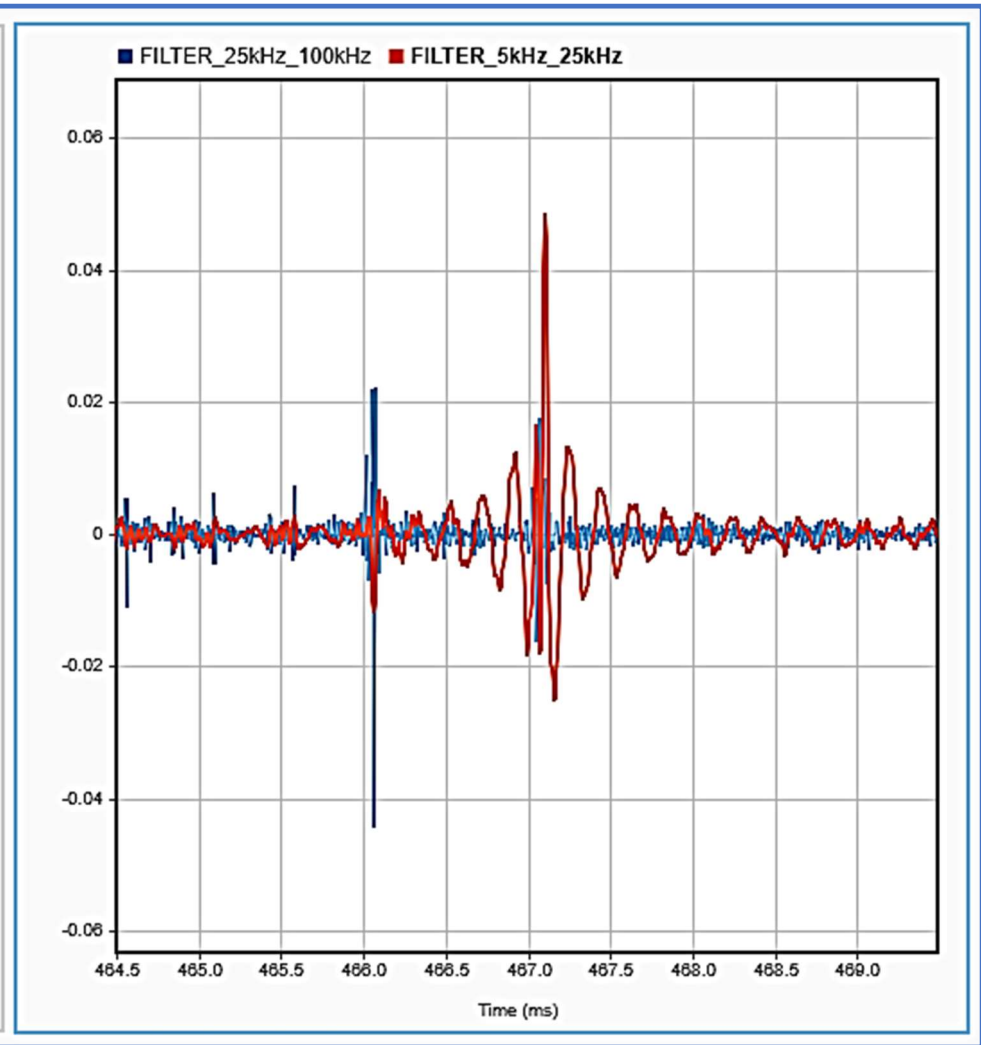


Figura I.15 - Trecho 7: Sinal quando submetido à superposição com filtro banda entre 5 e 25 kHz.

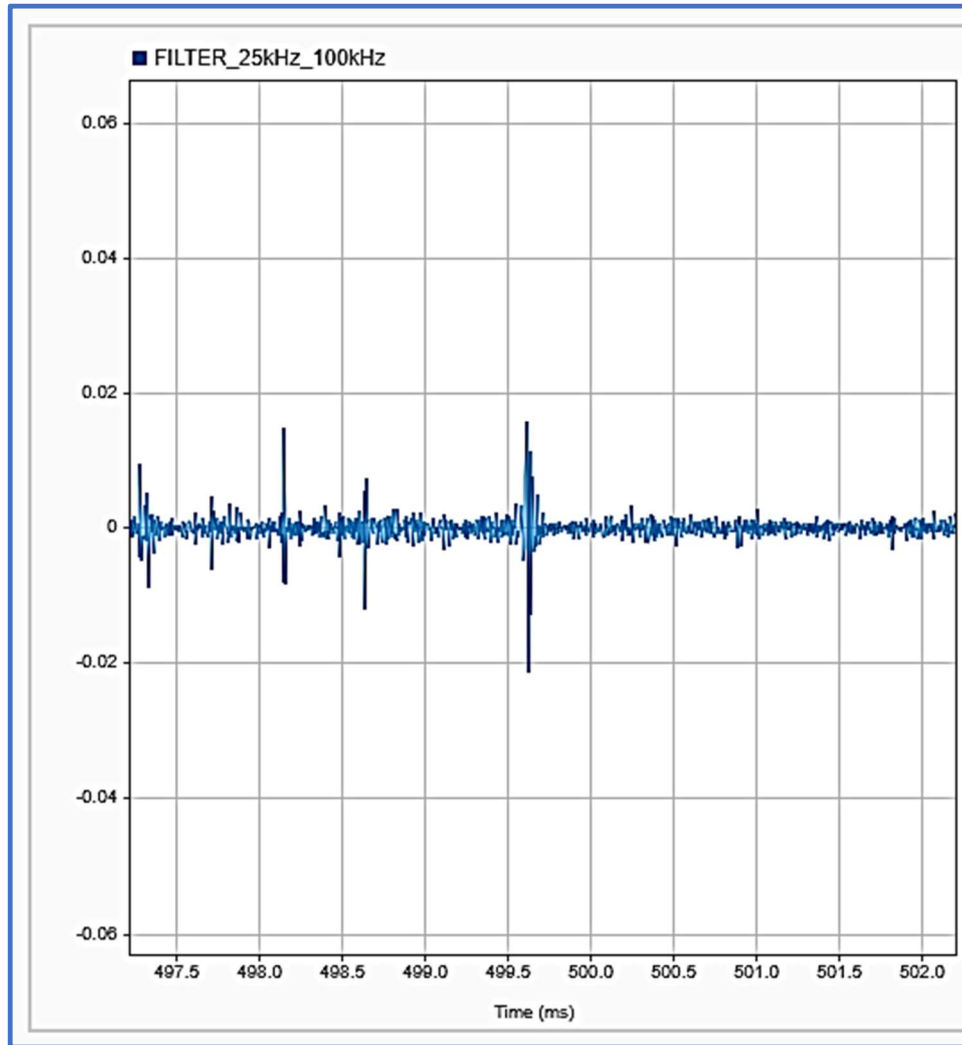


Figura I.16 - Trecho 8: Sinal submetido ao filtro passa banda entre 25 e 100 kHz apresentando sinal compatível com emissão acústica próxima de 499,6 ms (visão em janela de 5 ms).

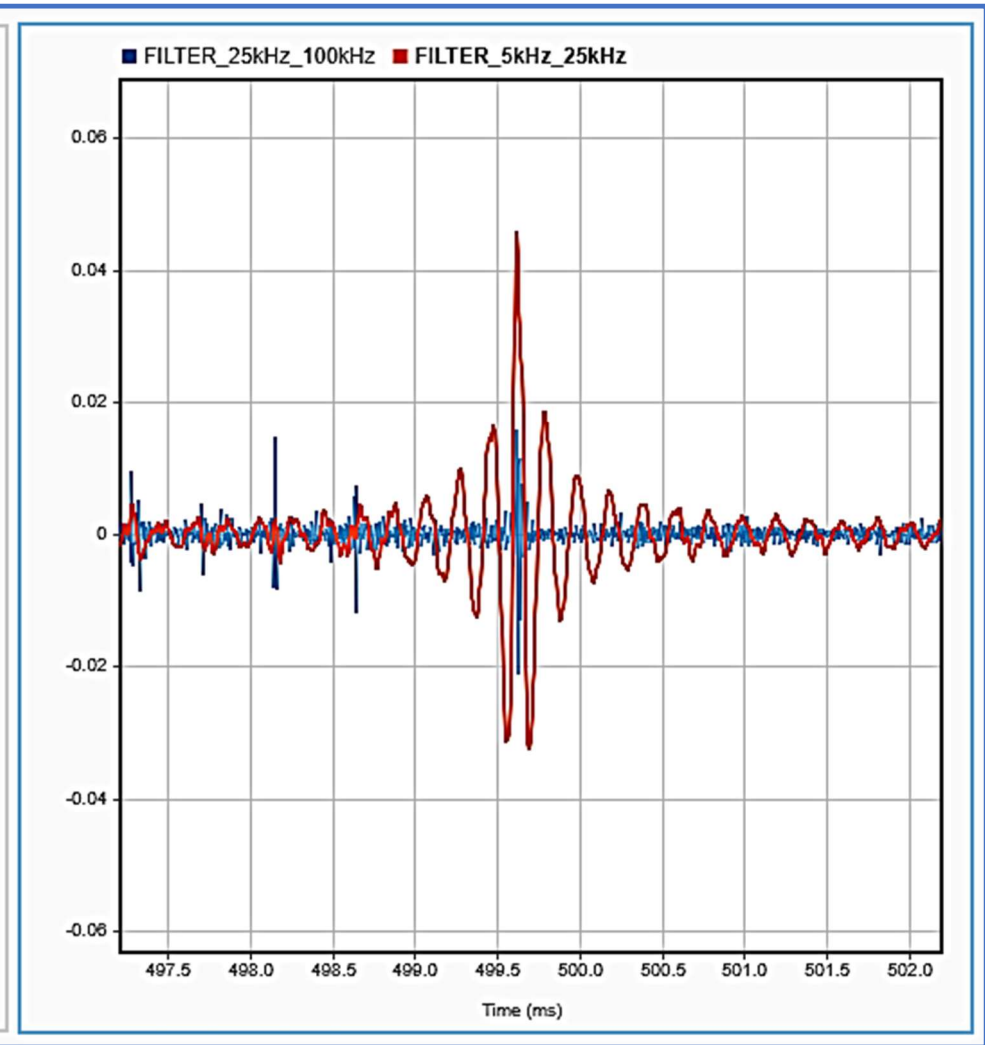


Figura I.17 - Trecho 8: Sinal quando submetido à superposição com filtro banda entre 5 e 25 kHz.

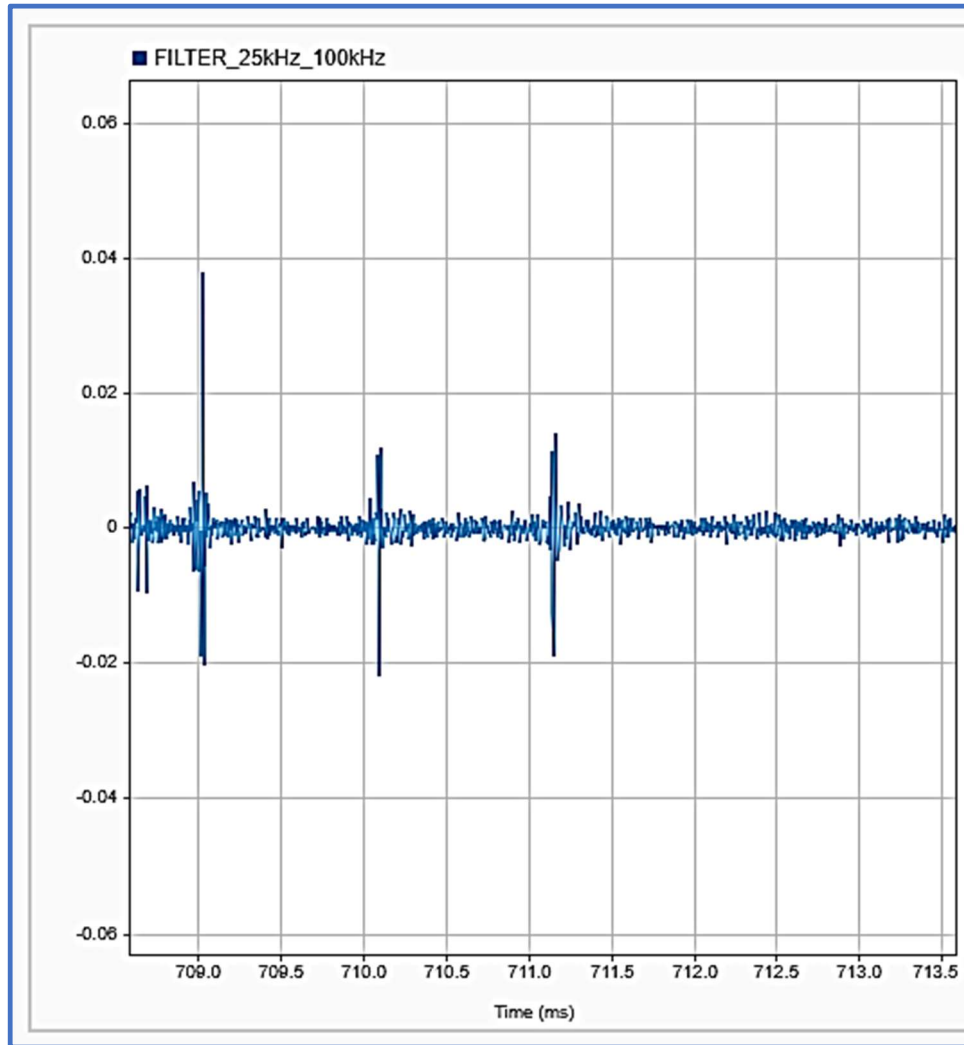


Figura I.18 - Trecho 9: Sinal submetido ao filtro passa banda entre 25 e 100 kHz apresentando sinal compatível com emissão acústica próxima de 711,2 ms (visão em janela de 5 ms).

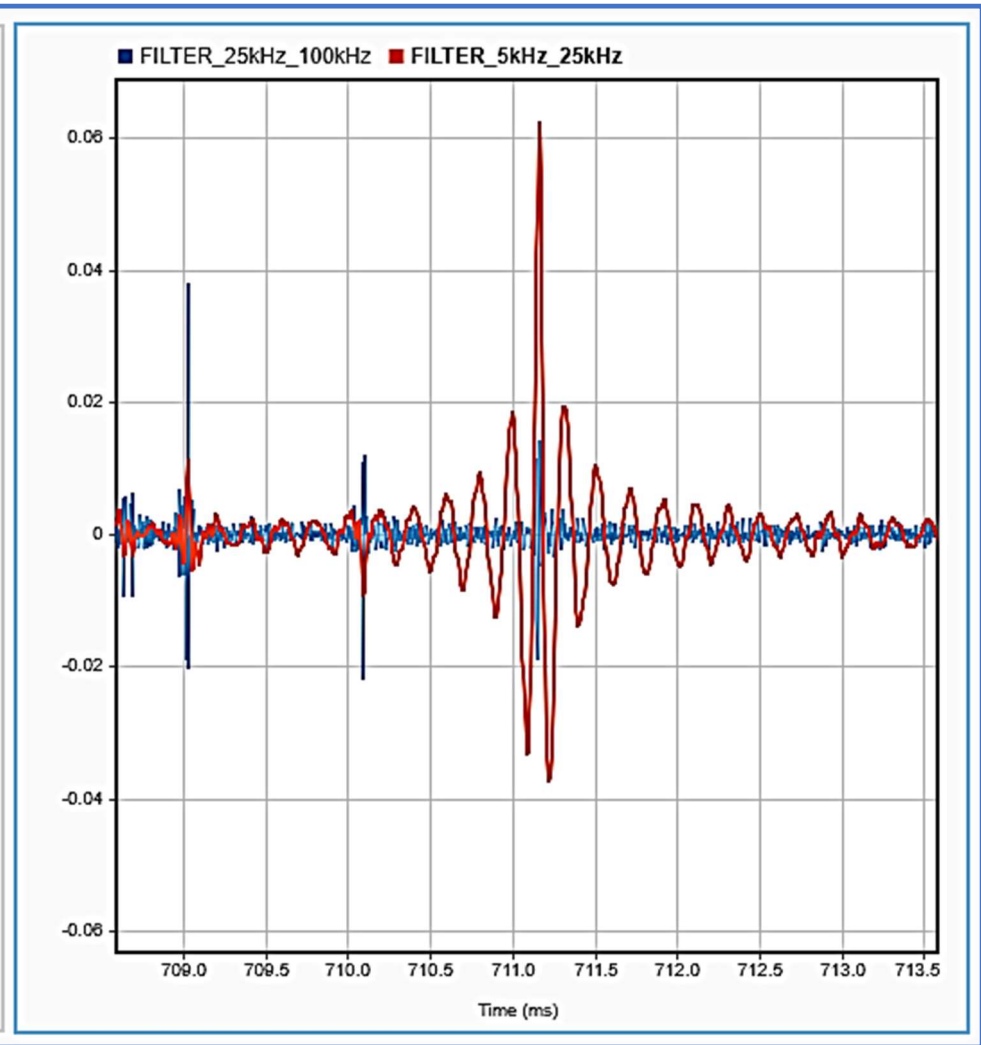


Figura I.19 - Trecho 9: Sinal quando submetido à superposição com filtro banda entre 5 e 25 kHz.



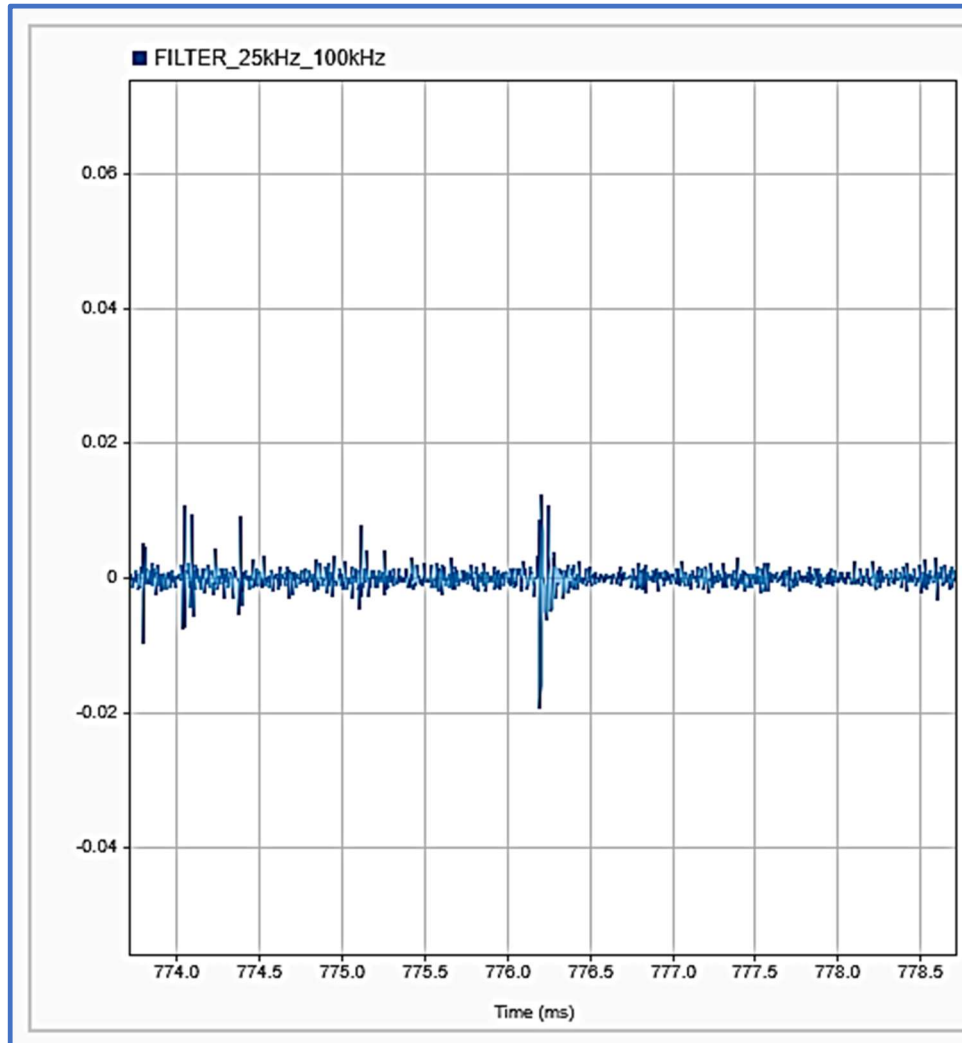


Figura I.20 - Trecho 10: Sinal submetido ao filtro passa banda entre 25 e 100 kHz apresentando sinal compatível com emissão acústica próxima de 778,2 ms (visão em janela de 5 ms).

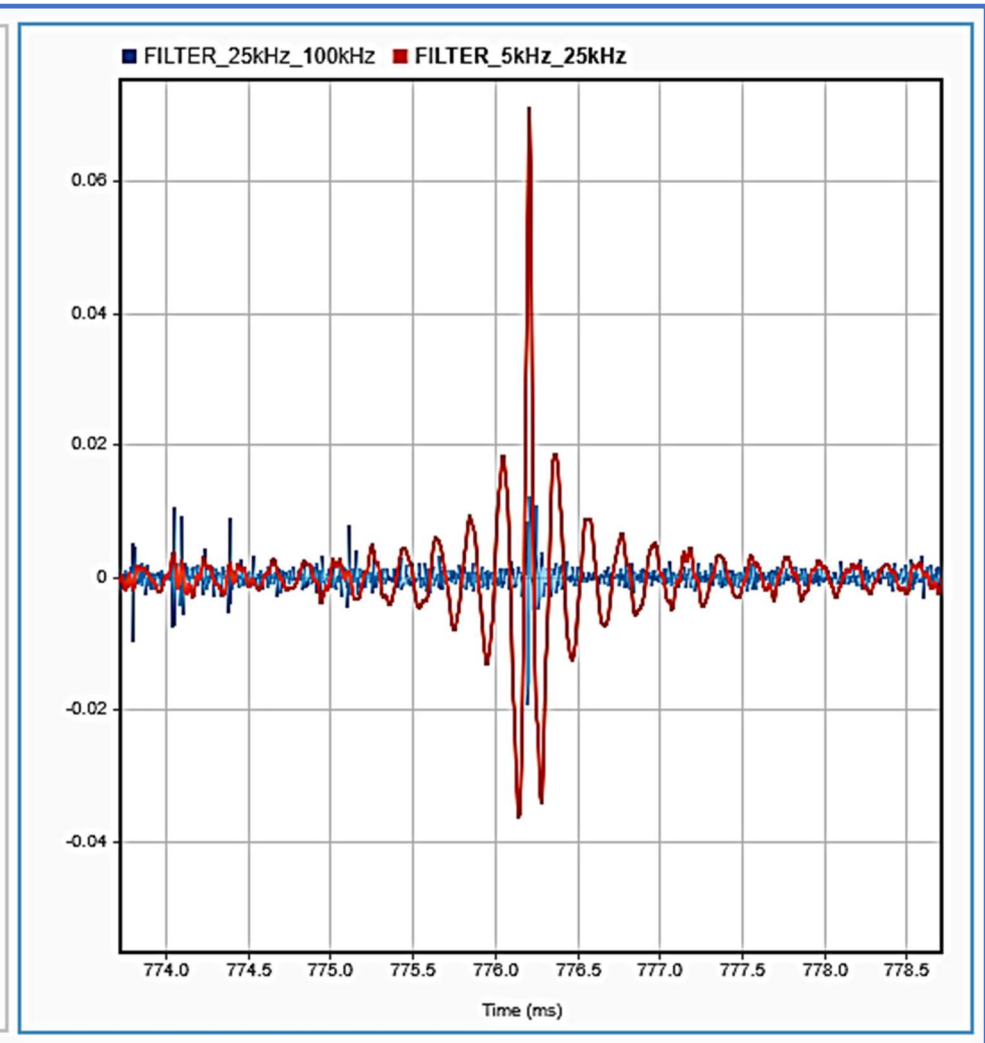


Figura I.21 - Trecho 10: Sinal quando submetido à superposição com filtro banda entre 5 e 25 kHz.

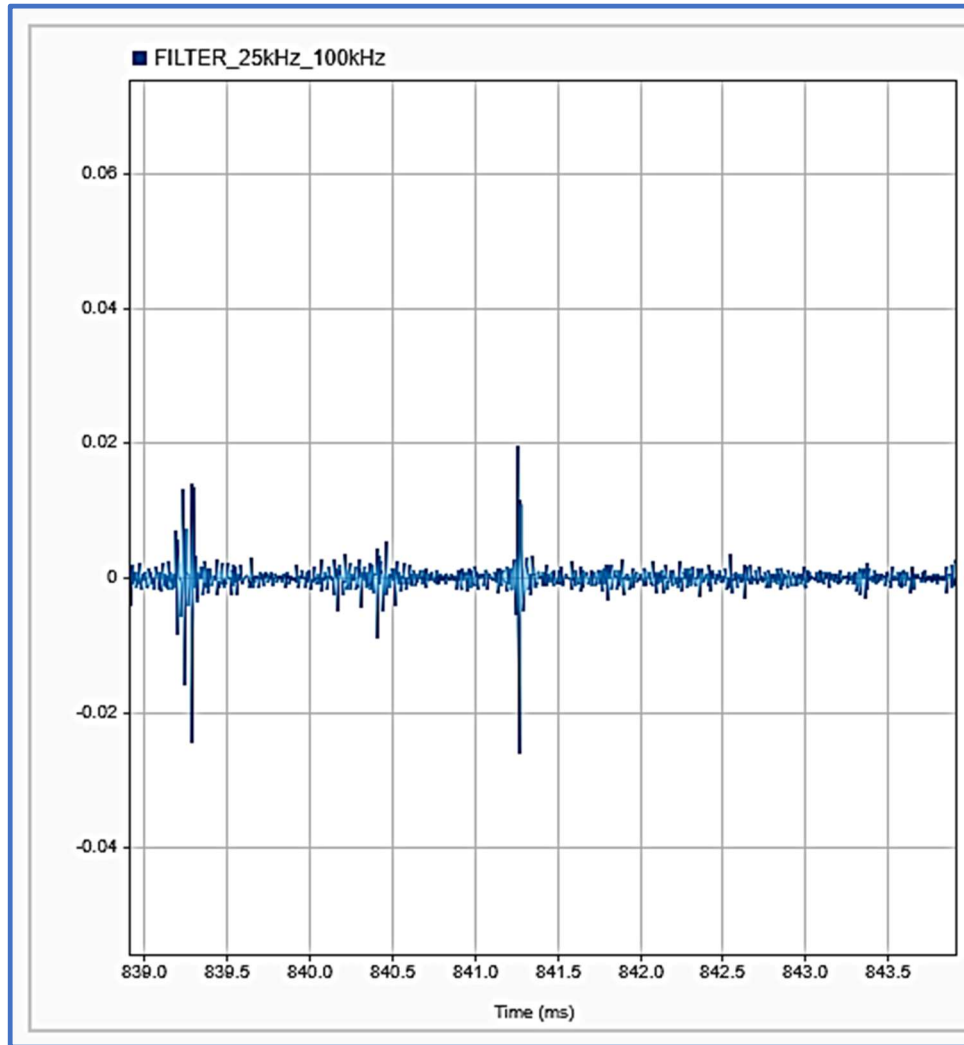


Figura I.20 - Trecho 10: Sinal submetido ao filtro passa banda entre 25 e 100 kHz apresentando sinal compatível com emissão acústica próxima de 841,4 ms (visão em janela de 5 ms).

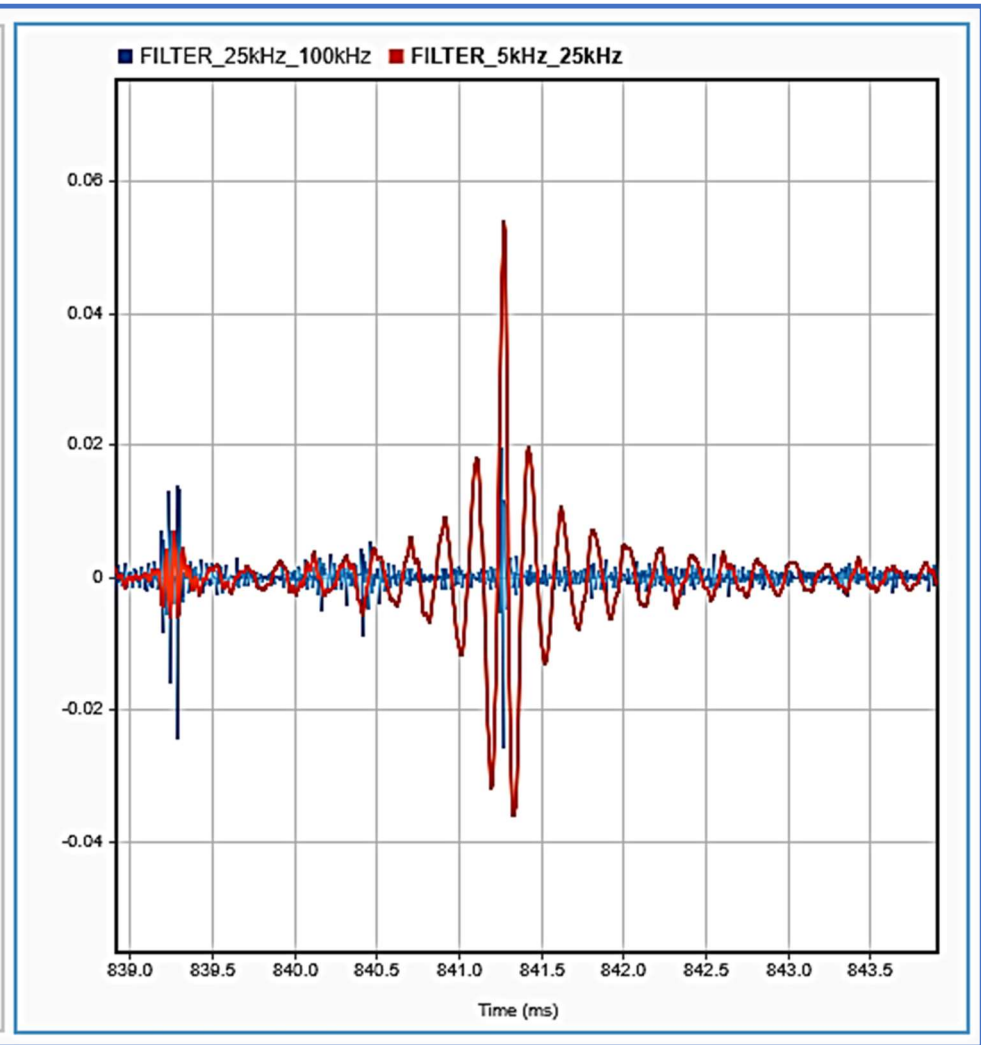


Figura I.21 - Trecho 10: Sinal quando submetido à superposição com filtro banda entre 5 e 25 kHz.

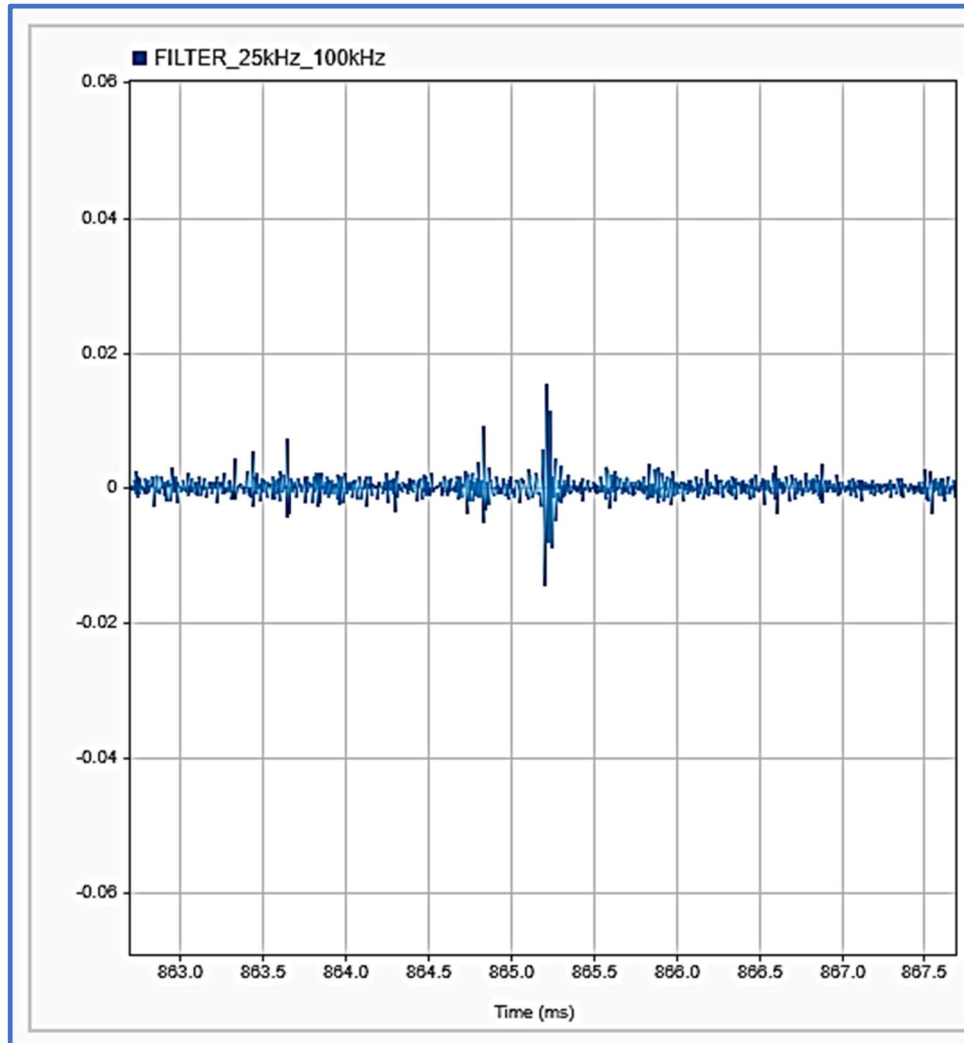


Figura I.24 - Trecho 12: Sinal submetido ao filtro passa banda entre 25 e 100 kHz apresentando sinal compatível com emissão acústica próxima de 855,2 ms (visão em janela de 5 ms).

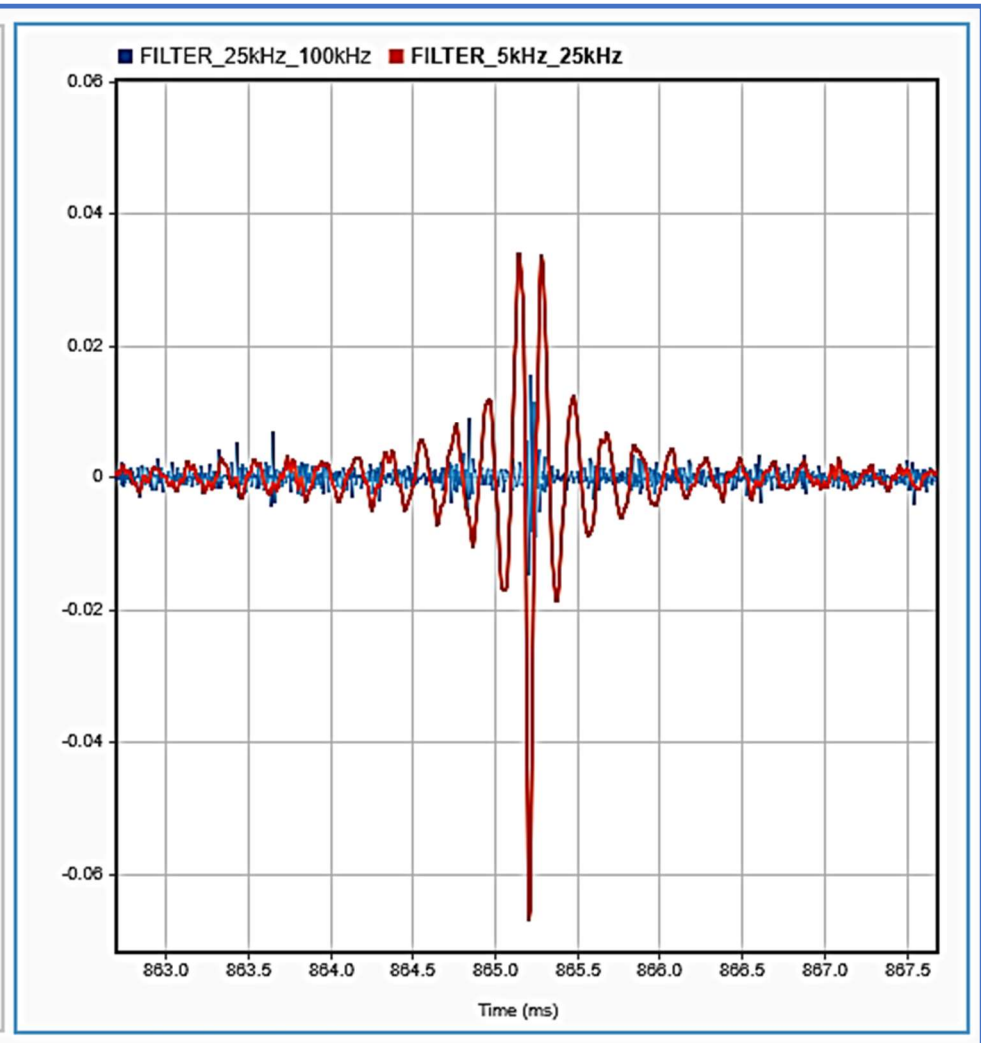


Figura I.25 - Trecho 12: Sinal quando submetido à superposição com filtro banda entre 5 e 25 kHz.

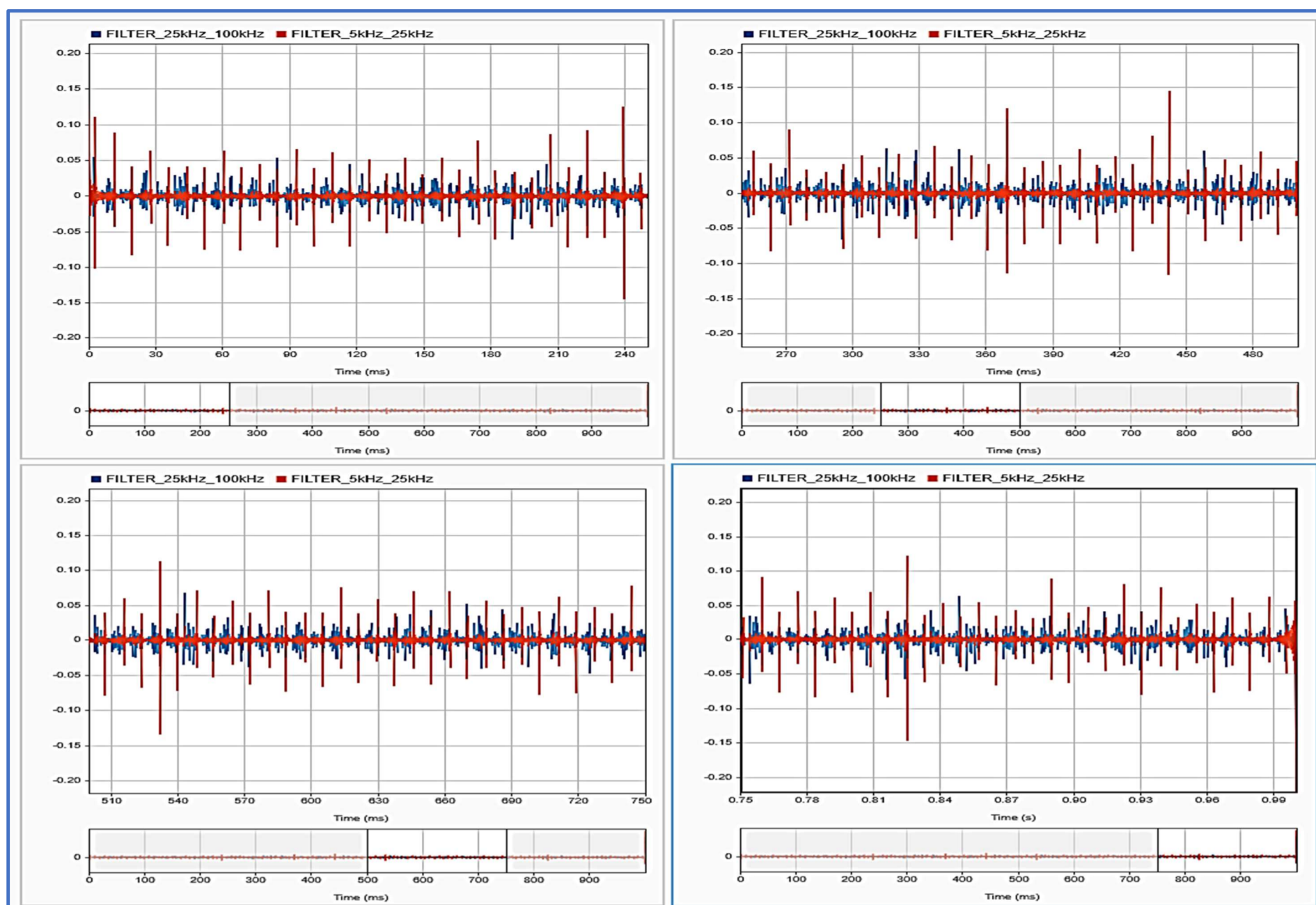


Figura I.26 - Sinal adquirido entre o tempo 0 s e 1 s, em intervalos de 0,25 s, quando submetido à superposição dos filtros banda entre 5 e 25 kHz e entre 25 e 100 kHz.

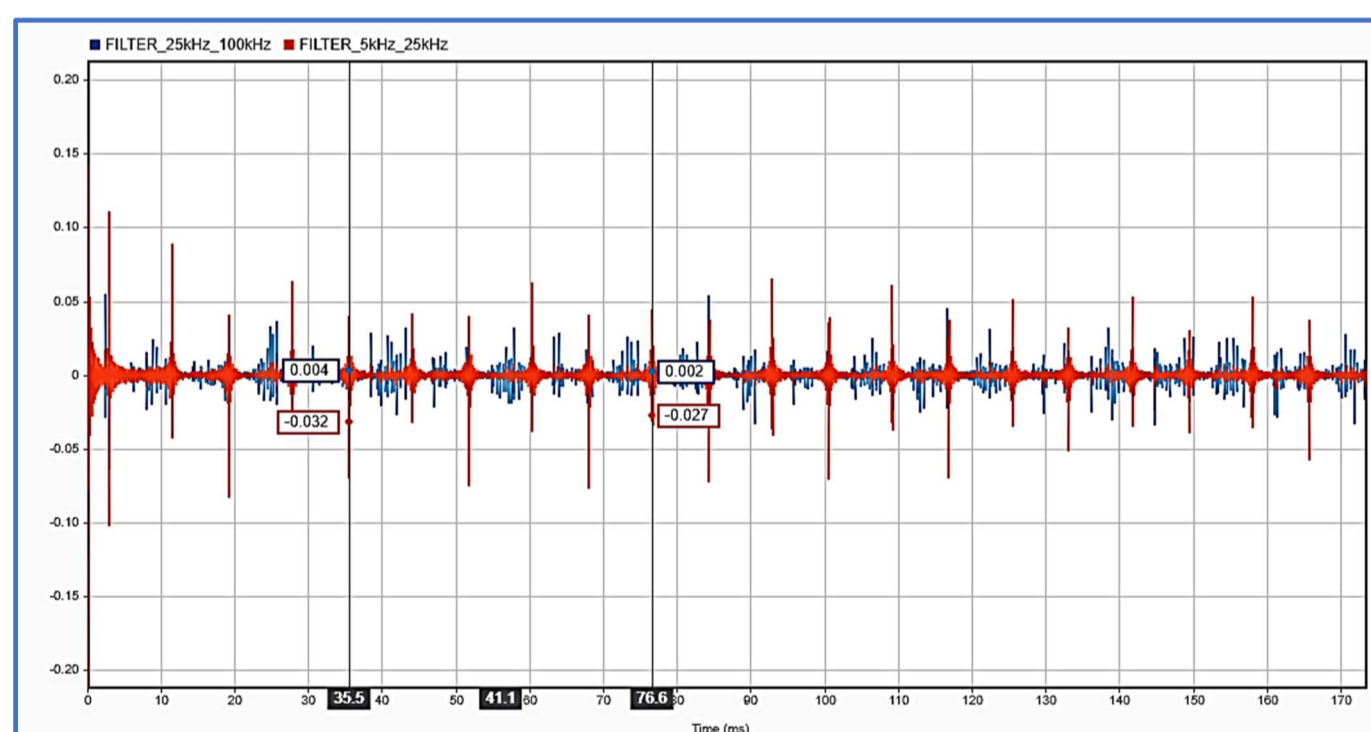


Figura I.27 - Sinal adquirido entre o tempo 0 s e 0,17 s, evidenciando a ocorrência de sinal periódico com frequência próxima à 122 Hz, quando aplicado o filtro passa banda de 5 kHz à 25 kHz.

#### Conclusão da análise:

Pode ser notado nas figuras I.26 e I.27 a existência de picos (em vermelho) que se repetem com frequência aproximada de 122 Hz e que coincidem com os trechos do sinal, para os quais foi verificado potencial existência de emissão acústica na propagação de defeitos. A ocorrência de sinais periódicos coincidentes com os potenciais eventos, descaracterizam estes trechos de sinal, quando à ocorrência de propagação de defeitos, tanto no reparo quanto no substrato metálico. Supõe-se que esses picos sejam oriundos de ruído inerente ao próprio sistema de aquisição de dados, interferência elétrica ou até mesmo ruído do ambiente, tendo em vista que os ensaios foram realizados no ambiente industrial.