



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Instituto Politécnico

Ney Robson Ferreira Rohem

**Desenvolvimento de sistema de reparo para dutos e tubulações industriais
utilizando materiais compósitos de matriz polimérica**

**Nova Friburgo
2010**

Ney Robson Ferreira Rohem

**Desenvolvimento de sistema de reparo para dutos e tubulações industriais
utilizando materiais compostos de matriz polimérica**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.



Orientador: Prof. Eduardo Sampaio

**Nova Friburgo
2010**

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/E

R737

Rohem, Ney Robson Ferreira.

Desenvolvimento de sistema de reparo para dutos e tubulações industriais utilizando materiais compósitos de matriz polimérica / Ney Robson Ferreira Rohem. – 2010.

131 f.: il.

Orientador: Eduardo Martins Sampaio.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Tubulações – Manutenção e reparos – Teses.
2. Estruturas hidráulicas – Manutenção e reparos - Teses.
3. Compósitos poliméricos – Propriedades mecânicas - Teses.
4. Materiais compostos – Testes - Teses.

I. Sampaio, Eduardo Martins. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. III. Título.

CDU 621.643

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

Assinatura

Data

Ney Robson Ferreira Rohem

**Desenvolvimento de sistema de reparo para dutos e tubulações industriais
utilizando materiais compósitos de matriz polimérica**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovado em 01 de Junho de 2010

Banca examinadora:

Prof. Eduardo Martins Sampaio, D.Sc (Orientador).
Instituto Politécnico/Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Marco Antônio Santos Pinheiro, PhD.
Instituto Politécnico/Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Heraldo Silva da Costa Mattos, D.Sc.
Universidade Federal Fluminense

Luiz Cláudio de Marco Meniconi, D.Sc.
Cenpes/Petrobras

**Nova Friburgo
2010**

DEDICATÓRIA

*A Deus.
Aos meus pais, Silvane e Neison,
Aos meus irmãos, Mahely e Misael
pelo amor, confiança, respeito e carinho*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida. Por me conceder a oportunidade de observar a natureza através da ciência. Por ter me guiado ao longo dessa trajetória colocando em meu caminho pessoas espetaculares que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração desse trabalho.

A minha mãe, Silvane, por estar sempre ao meu lado dando apoio e carinho.

Ao meu orientador Eduardo Martins Sampaio pelo apoio, incentivo, dedicação e confiança. Por me tratar não apenas como um aluno, mas como um filho.

A toda equipe do Laboratório de Adesão e Aderência pelo companheirismo e auxílio no desenvolvimento de minhas tarefas.

Ao técnico Anselmo Luiz Duarte que sempre esteve ao meu lado desde o início do projeto.

Ao Fábio Barcia e à empresa POLINOVA, pelo desenvolvimento e fornecimento das resinas utilizadas.

Ao técnico Ricardo Hudson, responsável pela máquina de ensaios mecânicos, pela atenção, dedicação e auxílio na realização de todos os ensaios.

À Professora Mirabel Cerqueira Rezende responsável por me fornecer os conhecimentos práticos iniciais necessários ao desenvolvimento do sistema de reparo.

Ao Professor Marco Antonio Santos Pinheiro pela confiança e amizade.

Ao Professor Norberto Cella pela atenção e apoio dedicados junto à secretaria de Pós-Graduação.

À CAPES pelo apoio financeiro, através da bolsa concedida.

À coordenação de PGCTM por todo o apoio.

A todos os amigos discentes do programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais: Marcelo Badini, Talita Guzzo, Newton Alves, Mário Anselmo, Iuri Porto, Marcello Pojucan, Alex Calcagno e Gustavo Burlein. Pelo carinho e atenção.

Aos funcionários da secretaria da unidade do IPRJ, pela solicitude nos serviços prestados.

*“É melhor tentar e falhar,
que preocupar-se e ver a vida passar;
é melhor tentar, ainda que em vão,
que sentar-se fazendo nada até o final.
Eu prefiro na chuva caminhar,
que em dias tristes em casa me esconder.
Prefiro ser feliz, embora louco,
que em conformidade viver ...”*
Martin Luther King

RESUMO

ROHEM, Ney Robson Ferreira. Desenvolvimento de sistema de reparo de dutos e tubulações industriais utilizando materiais compósitos de matriz polimérica. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2010.

O emprego de materiais compósitos de matriz polimérica como reparo e reforço em estruturas nas indústrias do petróleo tem se tornado uma prática industrial comum. O uso destes reforços compreende desde o recobrimento de superfícies com defeitos, passantes ou não, até o reforço estrutural. Na última década, muitos estudos foram feitos para o desenvolvimento de uma metodologia alternativa para reforço e reparo de dutos com materiais compósitos. Recentemente, em 2006, o sistema ISO de normas técnicas apresentou a primeira especificação técnica de "Reparo em Compósitos para dutos das indústrias de Petróleo, Petroquímica e de Gás Natural – Qualificação, projeto, instalação, testes e inspeção" – ISO/PDTS 24817. O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de reparo, utilizando materiais compósitos de matriz polimérica para o reparo e reforço estrutural de dutos e tubulações industriais, em conformidade com a Norma ISO 24817:2006. Foram desenvolvidos procedimentos para a confecção de corpos de prova destinados a ensaios mecânicos, e para aplicação do sistema de reparo. O sistema de reparo é destinado a defeitos tais como perda de espessura, amassamentos e danos transpassantes. Foi construída, em paralelo, toda a infraestrutura para a montagem de um laboratório destinado ao estudo de materiais compósitos, no Laboratório de Adesão e Aderência. São apresentados resultados de parte dos ensaios mecânicos necessários, comparação dos resultados obtidos com modelos teóricos e testes hidrostáticos.

Palavras-chave: ISO 24817; Materiais compósitos; Reparo de dutos; Ensaio mecânicos.

ABSTRACT

The use of polymer matrix composites to repair and strengthen structures in the oil industry has become a common industry practice. The use of these reinforcements extends from covering surfaces with defects, through wall or not, to structural reinforcement. In the last decade, many studies have been done to develop an alternative approach to the strengthening and repairing of pipelines with composite materials. Recently, in 2006, the ISO system of technical standards presented the document technical support "Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Composite repairs for pipework – Qualification, design, installation, testing and inspection" – ISO/PDTS 24817. This study aims to develop a repair system using polymer matrix composite materials for repair and reinforcement of piping and pipelines in accordance with ISO 24817:2006. Procedures were developed for the confection of test specimens for mechanical testing, and application of the repair. The system is intended to repair defects such as thickness loss, gouges, and damage through wall or not. In parallel, an entire infrastructure was built for the conception of a laboratory for the study of composite materials at the Laboratory of Adhesion and Adherence. Here are presented the results of the required mechanical tests, the comparison results with theoretical models, and the hydrostatic testing.

Keywords: ISO 24817, Composite materials, Pipeline repair, Mechanical testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Falhas em dutos.....	21
Figura 2.1: Danos em dutos	24
Figura 2.2: Frequência de vazamentos em dutos.....	25
Figura 2.3: Falhas mecânicas em dutos.....	25
Figura 2.4: Braçadeira com pino centralizador.....	27
Figura 2.5: Braçadeira aparafusada.....	28
Figura 2.6: Troca de trecho de tubulação.....	29
Figura 2.7: Cilindro de parede fina, sujeito à pressão interna P	31
Figura 2.8: Representação esquemática do material compósito.....	32
Figura 2.9: Interface fibra matriz.....	33
Figura 2.10: Diferenças na resistência à flexão de acordo com a mudança no sentido das fibras no laminado.....	34
Figura 2.11: Tensões e deformações.....	36
Figura 2.12: Elemento representativo da lâmina.....	37
Figura 2.13: Carregamento longitudinal.....	38
Figura 2.14: Carregamento transversal.....	39
Figura 2.15: Deformação devido ao carregamento longitudinal.....	41
Figura 2.16: Carregamento cisalhante.....	42
Figura 2.17: Comportamento das fibras sem a existência da matriz.....	47
Figura 2.18: Espalhamento de uma gota.....	50
Figura 2.19: Gota em uma superfície sólida.....	51
Figura 2.20: a) sem molhabilidade, b) molhabilidade parcial, c) boa molhabilidade.....	51
Figura 3.1: Fluxograma defeito do Tipo A.....	60

Figura 3.2: Fluxograma defeito do Tipo B.....	61
Figura 3.3: Fluxograma comprimento axial do laminado de reparo.....	64
Figura 4.1: Representação esquemática do corpo de prova (fibras unidirecionais).....	71
Figura 4.2: Dispositivo de Iosipescu.....	73
Figura 4.3: Geometria do corpo de prova.....	73
Figura 4.4: Local do teste Hidrostático.....	74
Figura 4.5: Representação esquemática dos flanges.....	75
Figura 4.6: Tubo Flangeado.....	75
Figura 5.1: Laboratório de materiais compósitos.....	77
Figura 5.2: Equipamentos do Laboratório de Materiais Compósitos.....	78
Figura 5.3: Compressor de parafuso e equipamento de jateamento.....	79
Figura 5.4: Varredura com rugosímetro tridimensional.....	80
Figura 5.5: Tecido pré-impregnado.....	82
Figura 5.6: <i>HotBonder</i>	83
Figura 5.7: Preparo da placa para confecção dos cps de tração.....	84
Figura 5.8: Corpos de prova de tração (pré-preg).....	84
Figura 5.9: Preparo do corpo de prova para teste hidrostático (pré-preg).....	85
Figura 5.10: Corpo de prova com tecido pré-impregnado.....	86
Figura 5.11: Teste de digestão ácida.....	87
Figura 5.12: Tecidos utilizados na laminação manual.....	89
Figura 5.13: Corpos de prova para ensaio em DMA.....	90
Figura 5.14: Rugas provocadas pela aplicação de vácuo.....	91
Figura 5.15: Corpos de prova para ensaio de tração.....	92
Figura 5.16: Confecção de cp utilizando o processo de laminação manual.....	93
Figura 5.17: Aspecto final do cp feito a partir do processo de laminação manual.....	93

Figura 6.1: Corpo de prova ensaiado.....	94
Figura 6.2: Ensaio de tração pré-preg.....	95
Figura 6.3: Falha ocorrida no teste hidrostático (vista 1).....	97
Figura 6.4: Falha ocorrida no teste hidrostático (vista 2).....	98
Figura 6.5: Ensaio térmico em DMA.....	100
Figura 6.6: Ensaio de tração cp's de laminação manual.....	101
Figura 6.7: Ensaio de tração na direção 1 (circunferencial).....	102
Figura 6.8: Ensaio de tração na direção 2 (axial).....	103
Figura 6.9: Falha por delaminação.....	106
Figura 6.10: Vista detalhada da falha por delaminação.....	107
Figura 6.11: Análise da falha.....	108
Figura 6.12: Análise da falha após teste hidrostático.....	109
Figura 6.13: Interface substrato/laminado de reparo.....	110
Figura 6.12: Simulação no TRIFLEX.....	112
Figura A.1: Fluxograma defeito do Tipo A.....	121
Figura A.2: Fluxograma defeito do tipo B.....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Reparos temporários.....	28
Tabela 2.2: Reparos permanentes.....	29
Tabela 2.3: Propriedades das fibras.....	47
Tabela 2.4: Propriedades de matrizes.....	48
Tabela 3.1: Classes de reparo.....	56
Tabela 3.2: Documentos e dados exigidos.....	57
Tabela 3.3: Exigências dos testes de qualificação.....	58
Tabela 3.4: Limite superior da temperatura de aplicação do laminado de reparo.....	65
Tabela 3.5: Limites admissíveis de defeitos.....	66
Tabela 3.6: Valor de t de <i>Student</i> para nível de significância bilateral de 0,025.....	68
Tabela 4.1: Dimensões dos corpos de prova.....	71
Tabela 6.1: Resultados do ensaio de tração do pré-preg.....	95
Tabela 6.2: Propriedades do tecido pré-impregnado (<i>Texiglass</i>).....	96
Tabela 6.3: Percentual de fibra e resina do laminado.....	96
Tabela 6.4: Comparação entre Módulo teórico e empírico.....	96
Tabela 6.5: Testes hidrostáticos pré-preg.....	98
Tabela 6.6: Ensaio de tração na direção 1 (circunferencial).....	102
Tabela 6.7: Ensaio de tração na direção 2 (axial).....	103
Tabela 6.8: Propriedades dos materiais utilizados para a laminação manual.....	104
Tabela 6.9: Percentual de fibras da placa de laminação manual.....	104
Tabela 6.10: Comparação entre Módulos teóricos e empíricos.....	104
Tabela 6.11: Percentual de fibras dos cp's destinados ao teste hidrostático.....	105
Tabela 6.12: Comparação de Módulos de Young (Placa e tubo).....	105
Tabela 6.13: Teste hidrostático.....	107
Tabela A.6: Fator de correção de temperatura, f_{T1}	124

Tabela A.7: Fator de correção de temperatura para danos transpassantes (Tipo B), f_{T2}	125
Tabela A.8: Deformações admissíveis para o laminado de reparo em função da vida útil.....	126
Tabela A.9: Fator de serviço, f_{perf} , para dados baseados no teste de desempenho do sistema de reparo	127

LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{c;f;m}$	– Área do compósito, fibra e matriz, respectivamente
$E_{f;m}$	– Módulo de Young da fibra e da matriz
E_1, E_2	– Módulo de Young do laminado nas direções 1 e 2
$F_{c;f;m}$	– Força no compósito, fibra e matriz respectivamente
f	– Fibra
G_{12}	– Módulo de elasticidade transversal do compósito
$G_{f;m;12}$	– Módulo de cisalhamento da fibra; matriz e do laminado
h	– Espessura da lâmina de compósito
L	– Comprimento axial do laminado de reparo
m	– Matriz
M	– Momento aplicado
P	– Pressão interna
r	– Raio do substrato
t	– Espessura do substrato
$t_{c;f;m}$	– Espessura do compósito, fibra e matriz, respectivamente
t_{design}	– Espessura de projeto do laminado de reparo
T_m	– Máxima temperatura de operação do laminado de reparo
T_g	– Temperatura de transição vítrea
$V_{f;m}$	– Fração volumétrica da fibra e da matriz
$\nu_{f;m;12}$	– Coeficiente de Poisson da fibra, matriz e do laminado

$\sigma_{c;f;m}$	– Tensão atuante no compósito, fibra e matriz, respectivamente
σ_1, σ_2	– Tensões normais principais
$\varepsilon_{c;f;m}$	– Deformação específica do compósito, da fibra e da matriz, respectivamente
$\delta_{c;f;m}$	– Deslocamento do compósito, da fibra e da matriz, respectivamente
$\gamma_{c;f;m}$	– Deformação devido ao cisalhamento do compósito, fibra e matriz, respectivamente
τ	– Tensão de cisalhamento
$\alpha_{f;m;1;2}$	– Coeficiente de expansão térmica da fibra, matriz e compósito nas direções 1 e 2
$\gamma_{SL;LV;SV}$	– Tensão superficial sólido-líquido, líquido-vapor e sólido-vapor
ΔT	– Variação de temperatura

LISTA DE ABREVIATURAS

AEA	– Associação privada da Agência Britânica de Energia Nuclear
AFRP	– Compósito reforçado por fibras de aramida em matriz de poliéster
ASTM	– American Society for Testing and Materials
CONCAWE	– Conservation of Clean Air And Water in Europe
CFRP	– Compósito reforçado por fibra de carbono em matriz de poliéster
DMA	– Dynamic Mechanical Analysis
FEUP	– Faculdade de Engenharia do Porto
GRP	– compósito reforçado por fibras de vidro em matriz de poliéster
HDT	– Temperatura de distorção térmica
IEA	– International Energy Agency
ISO	– International Standard Organization
<i>MAWP</i>	– Máxima pressão de trabalho
SMYS	– Specified Minimum Yield Strength
TDW	– T. D. Williamson, Inc.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	20
1.1 – Objetivo.....	22
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 – Tubulações.....	23
2.2 – Danos em dutos.....	24
2.3 – Localização de defeitos.....	26
2.4 – Critérios para a execução de reparos em dutos.....	26
2.4.1 – <u>Tipos de reparos admissíveis.....</u>	27
2.4.1.1 – Reparos de contingência.....	27
2.4.1.2 – Reparos temporários.....	28
2.4.1.3 – Reparos permanentes.....	29
2.5 – Análise de tensões em dutos.....	30
2.6 – Compósitos.....	31
2.6.1 – <u>Teoria do laminado.....</u>	33
2.6.2 – <u>Equação constitutiva.....</u>	34
2.6.3 – <u>Propriedades mecânicas do laminado.....</u>	37
2.6.3.1 – Avaliação do módulo de elasticidade.....	37
2.6.3.1.1 – Módulo de Young longitudinal.....	38
2.6.3.1.2 – Módulo de Young transversal.....	39
2.6.3.2 – Coeficiente de Poisson principal.....	41
2.6.3.3 – Módulo de cisalhamento planar.....	42
2.6.3.4 – Coeficiente de expansão térmica.....	43
2.6.3.4.1 – Coeficiente de expansão térmica longitudinal (α_1).....	44
2.6.3.4.2 – Coeficiente de expansão térmica transversal (α_2).....	45
2.6.4 – <u>Fibras.....</u>	46
2.6.5 – <u>Matriz.....</u>	47

2.7 – Adesão.....	48
2.7.1 – <u>Teorias de adesão.....</u>	49
2.7.2 – <u>Energia de superfície e tensão superficial.....</u>	50
2.7.3 – <u>Molhabilidade.....</u>	50
2.7.4 – <u>Ângulo de contato.....</u>	51
2.8 – Preparo de superfície.....	52
2.9 – Cenário atual de reparo com materiais compósitos.....	53
3 – ISO 24817:2006.....	54
3.1 – Visão geral.....	54
3.2 – Situações nas quais é recomendado o reparo com materiais compósitos.....	54
3.3 – Análise de risco.....	55
3.4 – Classes de reparo.....	56
3.5 – Vida útil do sistema de reparo.....	56
3.6 – Dados requeridos para a aplicação do sistema de reparo.....	57
3.6.1 – <u>Dados da qualificação do sistema de reparo.....</u>	57
3.7 – Metodologia de projeto.....	59
3.7.1 – <u>Defeito Tipo A.....</u>	59
3.7.2 – <u>Defeito Tipo B.....</u>	60
3.7.3 – <u>Extensão axial do reparo.....</u>	62
3.8 – Compatibilidade ambiental e temperatura de projeto.....	65
3.9 – Defeitos admissíveis.....	65
3.10 – Medida de γ_{LCL} para cálculo de defeitos transpassantes.....	66
3.11 – Programa computacional.....	69
4 – ENSAIOS MECÂNICOS E QUÍMICOS.....	70
4.1 – Ensaio de tração (Módulo de Young (E) e Coeficiente de Poisson (ν)).....	70
4.2 – Ensaio de cisalhamento (Módulo de cisalhamento (G)).....	72
4.3 – Teste hidrostático (Pressão de falha).....	73

4.4 – Digestão ácida (percentual de fibras).....	76
5 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	77
5.1 – Laboratório de Materiais Compósitos.....	77
5.2 – Seleção de materiais e preparo dos corpos de prova.....	79
5.3 – Preparo de superfície.....	79
5.3.1 – <u>Jateamento</u>	79
5.3.2 – <u>Primer</u>	81
5.4 – Desenvolvimento do laminado de reparo.....	81
5.4.1 – <u>Tecido pré-impregnado</u>	81
5.4.1.1 – Confecção dos corpos de prova para ensaio de tração.....	83
5.4.1.2 – Confecção dos corpos de prova para teste hidrostático.....	85
5.4.1.3 – Determinação percentual de fibra e resina.....	86
5.4.2 – <u>Laminação manual</u>	88
5.4.2.1 – Seleção do tecido <i>in-situ</i>	88
5.4.2.2 – Resina de laminação.....	89
5.4.2.3 – Processo de laminação manual com vácuo.....	90
5.4.2.4 – Processo de laminação manual sem vácuo.....	91
5.4.2.4.1 – Corpos de prova para ensaio de tração.....	91
5.4.2.4.2 – Corpos de prova para ensaios hidrostáticos.....	92
6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	94
6.1 – Tecido pré-impregnado.....	94
6.1.1 – <u>Ensaio de tração</u>	94
6.1.2 – <u>Teste hidrostático</u>	97
6.2 – Laminação manual sem vácuo.....	99
6.2.1 – <u>Ensaio térmicos</u>	99
6.2.2 – <u>Ensaio mecânicos</u>	100
6.2.2.1 – Ensaio de tração.....	100

6.2.2.2 – Ensaio hidrostáticos (determinação de γ_{LCL}).....	106
6.3 – Exemplo de cálculo de espessura.....	109
6.3.1 – Exemplo 1.....	109
6.3.2 – Exemplo 2.....	113
7 – CONCLUSÕES.....	116
8 – SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	117
REFERÊNCIAS.....	118
ANEXO A – EQUAÇÕES ISO 24817:2006.....	120

1 INTRODUÇÃO

Segundo a “*International Energy Agency*” (IEA), a demanda global de óleo em 2030, em um cenário de referência, deverá alcançar 116 milhões de barris/dia, partindo de um patamar de 84 milhões de barris por dia em 2005, com crescimento da ordem de 1,5% ao ano. Por sua vez, a demanda de gás natural quase que dobrará no mesmo período, atingindo 4,6 trilhões de m³/dia. Calcula-se que, entre 2005 e 2030, os investimentos nos segmentos de exploração, produção, refino e transporte de petróleo e derivados atingirão a fantástica soma de US\$ 4,3 trilhões. Em gás natural, não é menos expressivo o montante estimado de investimentos, que deverá alcançar US\$ 3,9 trilhões.

No Brasil, o Plano de Negócios da Petrobras prevê investimentos de US\$ 87,1 bilhões no horizonte 2007 a 2011, sendo 86% para projetos no Brasil, gerando a colocação de cerca de US\$ 50 bilhões no mercado fornecedor nacional. Outras sete companhias privadas que descobriram petróleo e estão desenvolvendo projetos – *Devon, Hydro, Shell, Chevron, El Paso, Anadarko e Maersk* – anunciaram investimentos da ordem de US\$ 8 bilhões até 2010. No total, os investimentos previstos para o setor óleo e gás do Brasil devem chegar a US\$ 100 bilhões até 2011.

O Brasil possui milhares de quilômetros de tubulações industriais e uma malha dutoviária ativa de aproximadamente 22.000km, e uma previsão de crescimento de 7.900km até 2013, com investimentos da ordem de R\$ 8 bilhões (Revista TN Petróleo, 2009). Para garantir o fornecimento e atender à crescente demanda não é suficiente apenas a expansão da malha dutoviária. Devem ser adotados métodos eficientes de inspeção e reparo de dutos e tubulações industriais. Métodos esses que devem garantir o perfeito funcionamento do sistema, evitando que ocorram falhas catastróficas, como as apresentadas na Figura 1.1.



Figura 1.1: Falhas em dutos (Fonte: Internet)

Na aplicação de reparos convencionais, tais como troca de seção da tubulação danificada com conectores nas junções, bem como, no reparo utilizando luvas soldadas, a metodologia de reparo, na maioria das vezes, requer interrupção do fluxo de produtos. A interrupção de um processo industrial pode ser morosa e acarretar prejuízos às plantas industriais. A aplicação de reparos convencionais em tubulação metálica na maioria das instalações industriais apresenta, muitas vezes, dificuldades a serem contornadas, que são, dentre outras, a falta de espaço operacional conveniente, a limitação em relação ao diâmetro e à extensão do dano na tubulação, e ainda, no caso da tubulação localizar-se no campo, pode haver ausência de instalação elétrica para soldas. Para resolver estes problemas, surge como solução a metodologia de reparos com materiais compósitos de matriz polimérica.

A utilização de materiais compósitos de matriz polimérica como reparo estrutural em plantas industriais tem se tornado comum. As vantagens da aplicação de materiais compósitos para reparar seções danificadas ou mesmo como reforço estrutural são inúmeras. A adesão desse tipo de material é feita por colagem, dispensando o uso de soldas, preservando as características do substrato, e o custo também é menor, tendo em vista que os equipamentos necessários para promover a união por adesão são, geralmente, menos sofisticados que os normalmente empregados nos processos usuais de junção de materiais. Esse tipo de material é projetado para ser resistente ao ambiente no qual será implantado, reduzindo os custos de manutenção e

prolongando a vida útil da seção reparada. Outra grande vantagem está no fato de serem reparos que possam ter vida útil de até 20 anos (desde que estejam em conformidade com a ISO 24817:2006) que podem ser aplicados com a linha em operação, desde que não haja vazamentos.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um sistema de reparo utilizando materiais compósitos de matriz polimérica em conformidade com a Norma ISO 24817:2006. Para tanto, foi construída no Laboratório de Adesão e Aderência toda a infraestrutura necessária ao estudo de materiais compósitos. Também foram desenvolvidos procedimentos e metodologias para confecção de corpos de prova e para a aplicação do sistema de reparo.

O sistema de reparo desenvolvido se enquadra na Classe 3 da ISO 24817, ou seja, poderá ser aplicado em instalações que operam com pressões superiores a 20bar e limites de temperatura conforme estabelecidos pela Norma.

Novos materiais foram desenvolvidos especialmente para a aplicação em dutos e tubulações industriais.

São apresentados resultados de parte dos ensaios mecânicos, térmicos e testes hidrostáticos necessários à qualificação do sistema de reparo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tubulações

O emprego de tubos pelo homem provavelmente antecede a história escrita. Vestígios ou redes completas de tubulações foram descobertas nas ruínas da Babilônia e da China Antiga. Os primeiros relatos de tubos metálicos datam de antes da era cristã, e o chumbo foi utilizado na construção da rede de água das termas da Roma Antiga. O ferro foi introduzido como material de tubulações por volta do século XV, na Europa Central. E, finalmente, em 1825 foi desenvolvido o primeiro tubo de aço, destinado a resistir às pressões cada vez maiores das linhas de vapor.

Tubos (ou dutos) são condutos fechados, destinados principalmente ao transporte de fluidos. Todos os tubos são de seção circular, apresentando-se como cilindros ocos. A grande maioria dos tubos funciona como condutos forçados, isto é, sem superfície livre, com o fluido tomando toda a área da seção transversal.

Chama-se de “tubulação” um conjunto de tubos e de seus diversos acessórios.

A necessidade da existência das tubulações decorre principalmente do fato de o ponto de geração ou de armazenagem dos fluidos estar geralmente distante do seu ponto de utilização.

Usam-se tubulações para o transporte de todos os materiais capazes de escoar, isto é, todos os fluidos conhecidos, líquidos ou gasosos, assim como materiais pastosos e fluidos com sólidos em suspensão, em toda a faixa de variação de pressão e temperaturas usuais na indústria: desde o vácuo absoluto até cerca de 1.000MPa ($\cong 100\text{kgf/mm}^2$), e desde próximo do zero absoluto até às temperaturas dos metais em fusão.

A importância das tubulações na indústria é enorme; todas as indústrias têm redes de tubulações, de maior ou menor importância, e quase todas as redes são essenciais ao funcionamento da indústria. A importância é ainda maior nas chamadas indústrias de processo (indústrias em que materiais fluidos sofrem transformações físicas e/ou químicas, ou as que se dedicam à armazenagem, manuseio ou distribuição de fluidos), nas quais as tubulações são os elementos físicos de ligação entre os equipamentos (vasos de pressão, reatores, tanques, bombas, trocadores de calor etc.), por onde circulam os fluidos de processo e de utilidades. Nessas indústrias o valor das tubulações representa, em média, 20 a 25% do custo total da instalação

industrial, a montagem das tubulações atinge, em média, 45 a 50% do custo total da montagem de todos os equipamentos, e o projeto das tubulações vale, em média, 20% do custo total do projeto da indústria. (TELLES, 2001).

Os fatores que diferenciam um duto de uma tubulação industrial são a localização e as Normas utilizadas no projeto. Dutos são linhas consideradas “*off-site*” (fora da planta de processo) e tubulações industriais são linhas consideradas “*on-site*” (dentro da planta de processo).

2.2 Danos em dutos

O grupo de gerenciamento de oleodutos da “*Conservation of Clean Air and Water in Europe*” (CONCAWE), organização europeia que congrega diversas companhias petrolíferas, elaborou um relatório com estudos estatísticos sobre acidentes em linhas de oleodutos ocorridos entre 1971 e 2000 (CONCAWE, 2002). O referido relatório, relacionado com informações de vinte e um países da Europa Ocidental, em dutos com extensão superior a 2km, excluindo sistemas submarinos, registrou 379 casos de acidentes neste período, com volume de vazamento superior a 1m³ em cada ocorrência.

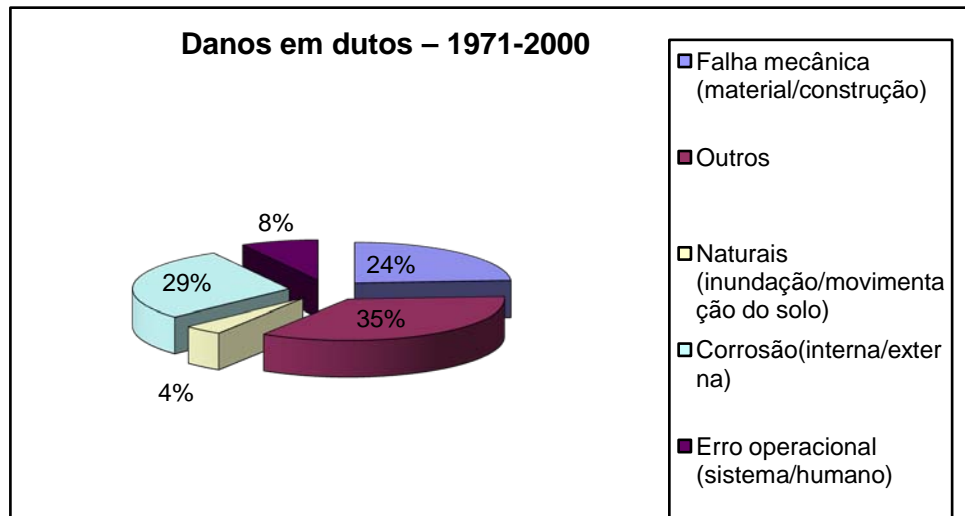


Figura 2.1: Danos em dutos (CONCAWE, 2002)

Dentre as principais causas de danos, conforme apurado pela CONCAWE (2002) em diversas linhas de dutos (Figura 1.1), destacam-se: a corrosão (29%); falhas mecânicas (24%),

como defeitos de fabricação, falhas de projeto; erros operacionais (8%); ações naturais, tal como movimento do solo (4%); e outros (35%).

O gráfico a seguir demonstra o número de vazamentos anuais por 1.000km de duto no decorrer de 30 anos.

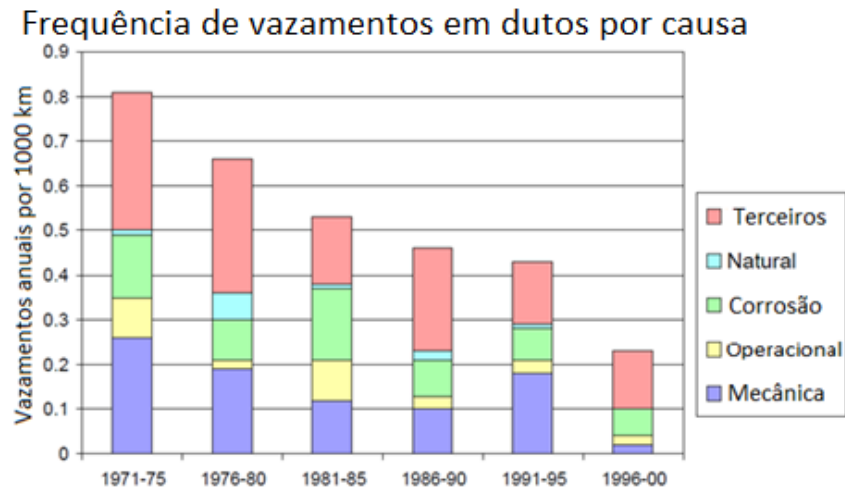


Figura 2.2: Frequência de vazamentos em dutos (CONCAWE, 2002)

Na sequência temos, de maneira mais detalhada, as causas de falhas mecânicas.

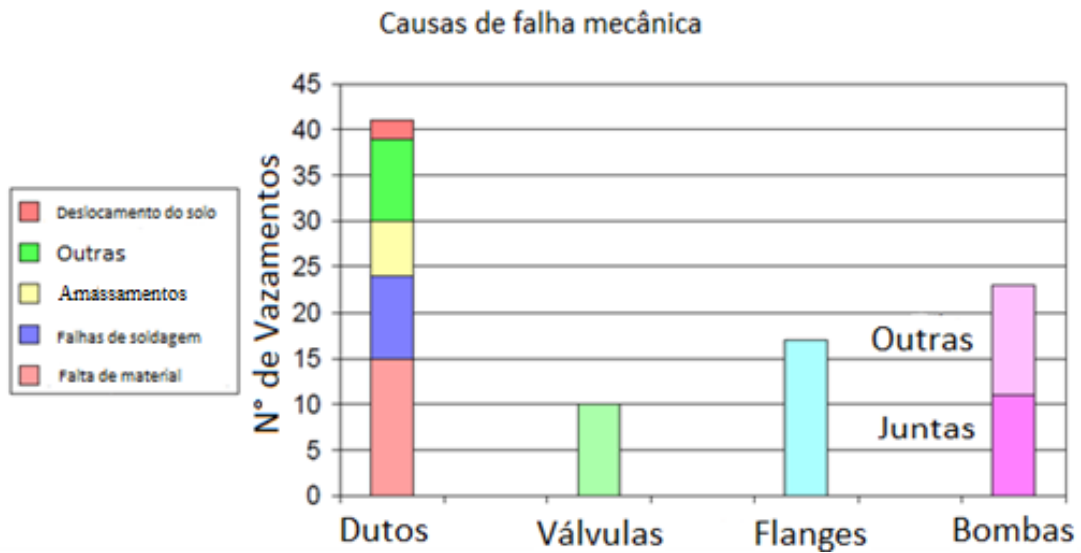


Figura 2.3: Falhas mecânicas em dutos (CONCAWE, 2002)

2.3 Localização de defeitos

Atualmente muitas técnicas são utilizadas para a localização de defeitos em dutos e tubulações industriais, das quais podemos destacar inspeção visual, uso de partículas magnéticas e líquidos penetrantes, ultra-som, radiografia, termografia e shearografia. Após a análise dos relatórios de inspeção é verificada a necessidade ou não de se realizar o reparo. Os reparos devem ser executados de acordo com as Normas vigentes.

2.4 Critérios para execução de reparos em dutos

De acordo com a Norma PETROBRAS N-2737 os seguintes danos devem ser removidos ou reparados:

- a) Qualquer dano com vazamento;
- b) Sulcos e cavas, quando apresentam profundidade maior que:
 - 12,5 % da espessura nominal da parede, para oleodutos;
 - 10 % da espessura nominal da parede, para gasodutos;
- c) Mossas que afetam os cordões de solda; mossas contendo ranhuras, sulcos ou cavas; mossas com profundidade $> 6\text{mm}$ em dutos com diâmetro $\leq 4''$ ou com profundidade $> 6\%$ do diâmetro nominal do duto, para diâmetro nominal $> 4''$;
- d) Mordeduras com as seguintes dimensões:
 - Profundidade $> 0,8\text{mm}$ ou $> 12,5\%$ da espessura nominal (o que for menor);
 - Profundidade $> 0,4\text{mm}$ ou entre 6% e $12,5\%$ da espessura nominal (o que for menor) e com comprimento $>$ que 50mm em 300mm contínuos de solda ou $1/6$ do comprimento total da solda (o que for menor);
- e) Qualquer tipo de trinca;
- f) Toda solda não aceita pelos “critérios de aceitação – testes não-destrutivos” da Norma API STD 1104 ou pela especificação de fabricação do tubo;
- g) Áreas corroídas cujas dimensões resultem em tensões acima de valores admissíveis de acordo com os critérios da Norma PETROBRAS N-2098;

h) Áreas corroídas atravessando soldas;

i) Dutos tensionados com tensão longitudinal devido à pressão interna, cargas de sustentação e outras forças externas, > 54% da tensão mínima de escoamento especificada do material do tubo (SMYS).

2.4.1 Tipos de reparos admissíveis

Há três tipos de reparo: reparos de contingência; reparos temporários e reparos permanentes.

2.4.1.1 Reparos de contingência

São reparos emergenciais, ações destinadas a reduzir os impactos ao meio ambiente e pessoas. Servem para conter vazamentos e permitir a intervenção no duto com o objetivo de viabilizar a execução de reparos temporários ou permanentes.

Como exemplos de reparos de contingência têm-se:

- Braçadeira com grampos;
- Braçadeiras com pino centralizador;
- Braçadeiras mecânicas aparafusadas.

Na Figura 2.4 é apresentado um dispositivo de reparo de contingência, braçadeira com pino centralizador.



Figura 2.4: Braçadeira com pino centralizador (TDW)

2.4.1.2 Reparos Temporários

Os reparos temporários servem para reforçar regiões que apresentem danos, garantindo a segurança e a continuidade operacional do duto, quando a execução do reparo definitivo for inviável. O reparo temporário deve ser substituído por um reparo permanente num prazo analisado caso a caso, considerando a progressão do dano, não devendo ser superior a 2 anos. A Tabela 2.1 apresenta os principais tipos de reparos temporários e respectivas aplicações.

Tipos de reparos	Aplicações
Braçadeira mecânica aparafusada sem solda	Sulcos, cavas, mossas e áreas corroídas ou esmerilhadas
Depósito com solda	Áreas com corrosão interna e em geometrias complexas
Luva de material compósito	Área com corrosão interna ou com mossas
Bacalhau	Defeitos localizados somente em tubos com tensão de escoamento > 42.000 psi e diâmetro nominal > 12"
Luva inteiriça sem solda	Interligação de "tie-in" sem soldagem

Tabela 2.1: Reparos temporários

Na Figura 2.5 é apresentado um dispositivo de reparo temporário, braçadeira aparafusada.



Figura 2.5: Braçadeira aparafusada (TDW)

Segundo a N-2737 o material compósito se enquadra na categoria de reparo temporário, porém, de acordo com as condições de projeto da ISO 24817:2006, a vida útil mínima do reparo deve ser de dois anos, o que o classifica como um reparo permanente.

2.4.1.3 Reparos permanentes

Os reparos permanentes servem para recompor integralmente a resistência mecânica do duto. A Tabela 1.2 apresenta os principais tipos de reparos permanentes e respectivas aplicações.

Tipos de Reparos	Aplicação
Esmerilhamento	Sulcos, cavas e trincas superficiais
Depósito com solda	Áreas corroídas externamente ou esmerilhadas
Bacalhau	Defeitos localizados somente em tubos com tensão de escoamento > 42.000psi e diâmetro nominal > 12"
Braçadeira com pino centralizador e soldada	Furos
Braçadeira mecânica aparafusada e soldada	Sulcos, cavas, mossas e áreas corroídas ou esmerilhadas
Luva inteira e soldada	Interligação de "tie-in"
Luva de material compósito	Áreas corroídas externamente com perda de espessura < 70%
Dupla-calha	Todos os defeitos
Trepanação do defeito	Pequenos defeitos com extensão enquadrada na capacidade da máquina de trepanar, limitada a 1 diâmetro nominal do duto
Troca de trecho (niple)	Todos os defeitos
Escavação de seção do duto	Duto com tensão longitudinal superior a 54% do SMYS

Tabela 2.2: Reparos permanentes

Vale ressaltar que de acordo com a ISO 24817:2006 materiais compósitos podem ser aplicados até mesmo em danos transpassantes. Na Figura 2.6 é apresentado um tipo de reparo permanente com troca de trecho da tubulação. Dada a complexidade da operação é possível imaginar o tempo despendido numa operação como essa.

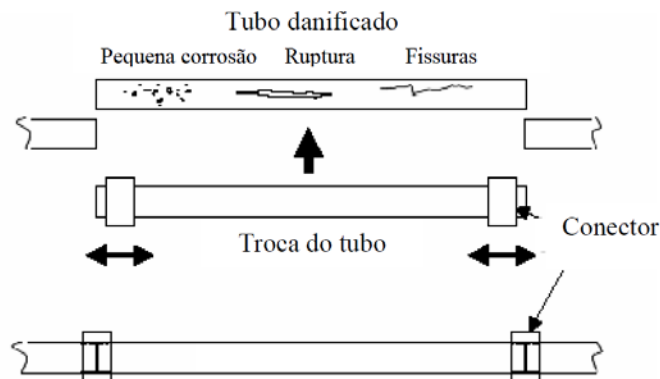


Figura 2.6: Troca de trecho de tubulação

2.5 Análise de tensões em dutos

Dutos destinados ao transporte de fluidos geralmente são considerados de parede fina, ou seja, a espessura de parede é menor que 1/10 do diâmetro externo do duto. Uma solução suficientemente precisa para a análise de tensões é obtida através das equações de equilíbrio axial e equilíbrio circunferencial.

Equilíbrio axial. A força atuante em cada extremidade fechada do cilindro devido à pressão interna p é dada pelo produto da pressão pela área em que esta atua (Figura 2.7 (a) e (b)). Logo, a força axial será $p\pi r^2$, onde r é o raio interno do cilindro. O equilíbrio axial é devido à ação da força axial e da tensão axial σ_{xx} no substrato. A pressão radial não causa nenhuma força resultante. A área da seção transversal do substrato é aproximadamente $2\pi r t$, onde t é a espessura. Portanto, a força interna será $2\pi r t \sigma_{xx}$ e no equilíbrio esta força deve ser igual à força causada pela pressão interna. A Equação 1.1 permite calcular a tensão axial no cilindro.

$$2\pi r t \sigma_{xx} = \pi r^2 p \quad \text{ou} \quad \sigma_{xx} = \frac{pr}{2t} \quad (2.1)$$

Equilíbrio circunferencial. A Figura 2.7 (c) representa o equilíbrio de metade do cilindro de comprimento unitário cortado por um plano perpendicular ao eixo longitudinal. A pressão interna deve estar em equilíbrio com a tensão circunferencial σ_{yy} , o que no elemento $d\theta$ representado dá uma componente vertical da força devida à pressão. Portanto, a força vertical total, devida à pressão, é

$$\int_0^{\pi} pr \sin \theta d\theta = 2pr \quad (2.2)$$

Repare que através desta equação, a força vertical pode também ser obtida considerando a pressão que atua em todo o diâmetro do cilindro ($2r$). Este fato demonstra que a força axial independe da força nas extremidades do cilindro.

A força interna necessária para o equilíbrio pode ser obtida a partir da tensão σ_{yy} que exerce nas duas extremidades da casca cilíndrica de área $2t \cdot 1$. Deste modo, a força interna é $\sigma_{yy} \cdot 2 \cdot t \cdot 1$. Para existir equilíbrio, $2\sigma_{yy}t = 2rp$, onde

$$\sigma_{yy} = \frac{pr}{t} \quad (2.3)$$

Comparando as Equações (2.1) e (2.3), vê-se que a tensão circunferencial é o dobro da tensão axial. A Figura 2.7 (d) representa um pequeno elemento indicando as tensões axiais e circunferenciais.

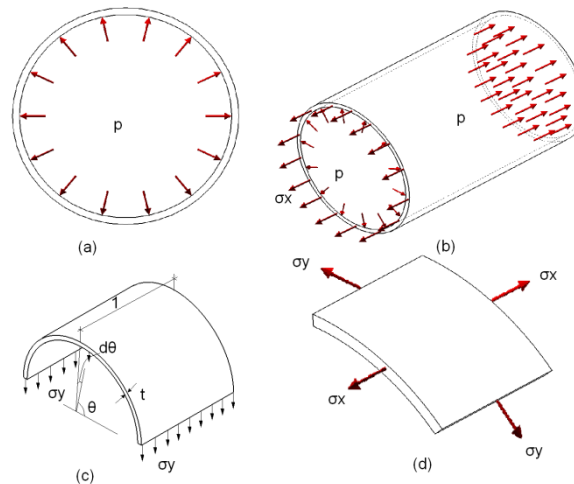


Figura 2.7: Cilindro de parede fina, sujeito à pressão interna p (análise de tensões)

2.6 Compósitos

Muito dos bens fabricados atualmente demandam o emprego de materiais com combinações incomuns de propriedades, que não podem ser atendidas por ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos convencionais. As combinações e as faixas das propriedades estão sendo ampliadas com o desenvolvimento de compósitos. Por se tratar de um material projetado, propriedades especiais são obtidas e a sua aplicação na indústria, especialmente nos segmentos aeroespacial, automotivo e de engenharia, é crescente.

Os materiais compósitos ou conjugados são combinações de dois ou mais materiais com propriedades físicas e mecânicas bastante distintas. A maioria destes materiais consiste de um elemento de reforço envolvido por uma matriz, constituída de resina colante, com o objetivo de obter características específicas e propriedades desejadas. Geralmente, os componentes não se dissolvem um no outro e podem ser identificados, fisicamente, por uma interface entre os mesmos, bem definida.

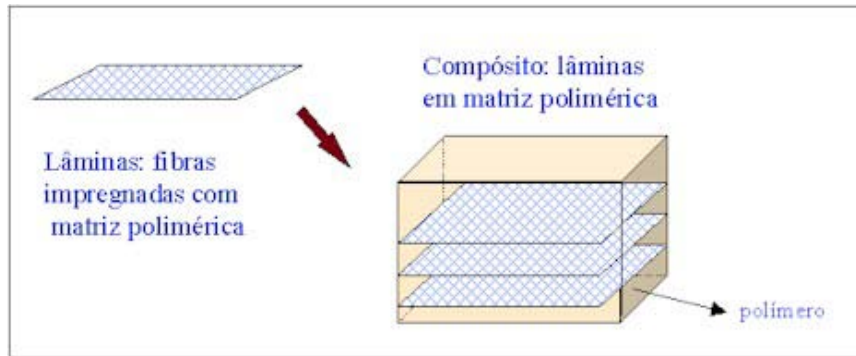


Figura 2.8: Representação esquemática do material compósito

Os materiais compósitos podem ser de vários tipos e os mais comuns são os fibrosos (fibras envolvidas por uma matriz) e os particulados (partículas envolvidas por uma matriz). Existe muitos tipos de elementos de reforços, bem como de matrizes usadas industrialmente.

O material compósito apresenta propriedades mecânicas distintas de cada um de seus componentes. Na produção de compósitos tem-se a vantagem de acertar as quantidades de cada componente a fim de obter propriedades mecânicas o mais próximo possível do desejado pelo projeto. Quando comparados ao aço, os compósitos apresentam menor resistência, contudo têm a vantagem de ser um material muito leve. Numa relação peso/resistência, um material compósito apresentar melhores resultados.

A principal diferença entre um composto e um compósito está na relação entre suas fases constituintes. Diferentemente dos aços, que são materiais compostos mas não compósitos, por serem constituídos por fases com propriedades muito próximas (por exemplo, módulo de elasticidade), não sendo nenhuma de suas fases perceptíveis visualmente. Um material compósito é constituído por dois ou mais materiais de propriedades físicas e mecânicas bem distintas, sendo identificadas as fases de cada constituinte e suas proporções volumétricas geralmente são da mesma ordem de grandeza.

A classificação de um material como compósito é frequentemente baseada em casos onde ocorrem significantes mudanças nas propriedades como resultado da combinação dos diferentes constituintes. Essas mudanças nas propriedades serão mais óbvias quando uma das fases estiver na forma fibrosa com fração volumétrica maior que 10%, e a propriedade de um dos constituintes for muito superior a do outro.

Tratando-se de compósito reforçado por fibras, um fato que deve ser levado em consideração é a interação na interface fibra matriz. Para que haja a transferência de carga entre a fibra e a matriz é necessário que a matriz tenha boa molhabilidade e uma afinidade química com a fibra. A fibra, por sua vez, deve ter um tamanho mínimo que garanta que a tensão cisalhante atuante na interface fibra matriz seja maior que a tensão normal aplicada ao laminado.

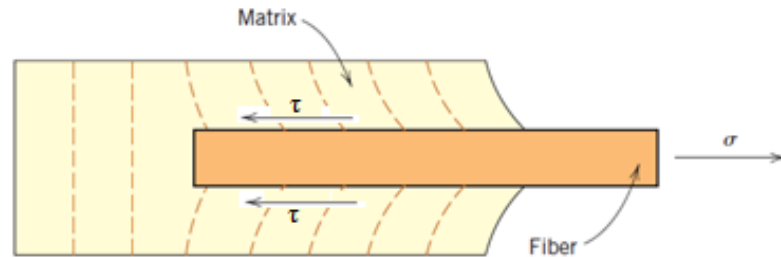
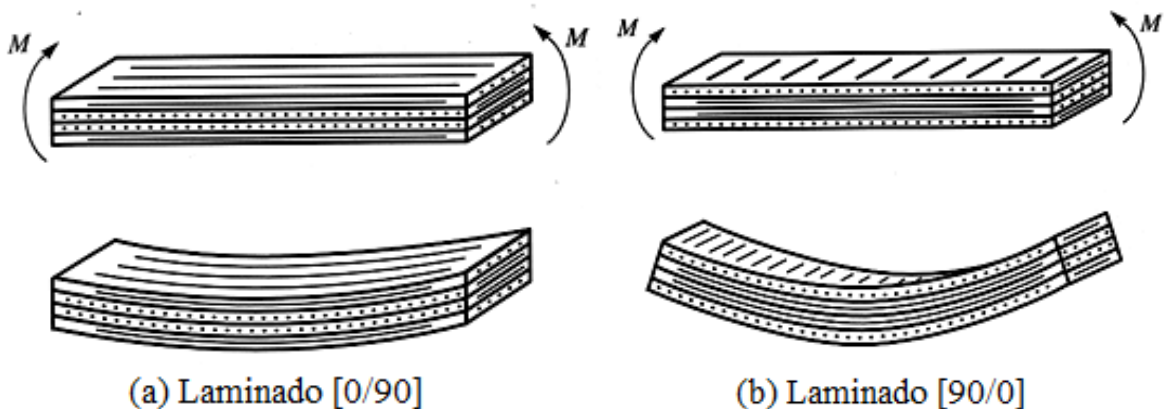


Figura 2.9: Interface fibra matriz

2.6.1 Teoria do laminado

Compósitos reforçados por fibras geralmente são feitos a partir do empilhamento de múltiplas placas, dando origem ao laminado. As placas podem variar de uma para a outra (tipo de fibra, orientação da fibra, matriz) proporcionando propriedades distintas ao laminado. Um laminado pode possuir o mesmo número de camadas e propriedades completamente diferentes. O exemplo a seguir demonstra esse fato, quando submetidos ao mesmo momento fletor, o primeiro laminado irá deformar muito menos que o segundo.



(a) Laminado [0/90]

(b) Laminado [90/0]

Figura 2.10: Diferenças na resistência à flexão de acordo com a mudança no sentido das fibras no laminado

As fibras orientadas a 0° são mais resistentes ao momento fletor, no laminado (a) elas se encontram nas camadas mais externas, resultando em uma maior resistência à flexão. Se os laminados acima fossem submetidos a um esforço planar, as deformações resultantes seriam idênticas.

2.6.2 Equação Constitutiva

O objetivo principal das teorias relativas ao comportamento dos materiais deformáveis consiste em estabelecer as relações entre as tensões e as deformações geradas num corpo quando lhe é aplicada um dado sistema de força. Estas relações são chamadas de relações constitutivas do material. Para os o caso mais geral dos materiais elásticos, a equação constitutiva terá a seguinte forma:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1111} & a_{1122} & a_{1133} & 2a_{1123} & 2a_{1113} & 2a_{1112} \\ a_{2211} & a_{2222} & a_{2233} & 2a_{2223} & 2a_{2213} & 2a_{2212} \\ a_{3311} & a_{3322} & a_{3333} & 2a_{3323} & 2a_{3313} & 2a_{3312} \\ 2a_{2311} & 2a_{2322} & 2a_{2333} & 4a_{2323} & 4a_{2313} & 4a_{2312} \\ 2a_{1311} & 2a_{1322} & 2a_{1333} & 4a_{1323} & 4a_{1313} & 4a_{1312} \\ 2a_{1211} & 2a_{1222} & 2a_{1233} & 4a_{1223} & 4a_{1213} & 4a_{1212} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

Sendo que as constantes a_{ijkl} são chamadas de coeficientes elásticos do material. Para o caso dos materiais elásticos lineares homogêneos e isotrópicos (por exemplo, o aço) precisamos apenas de duas constantes elásticas (módulo de Young E e coeficiente de Poisson ν) para definir todos os coeficientes. No caso dos materiais laminados, vamos precisar de cinco constantes elásticas para definir todos os coeficientes elásticos (KAW). São elas

E_1 – Módulo de Young na direção longitudinal às fibras – direção 1

E_2 – Módulo de Young na direção transversal às fibras – direção 2

ν_{12} – Poisson 12 – Relação entre as deformações nas direções 1 e 2 para uma tensão na direção 1

ν_{23} – Poisson 23 – relação entre as deformações nas direções 2 e 3 para uma tensão na direção 2

G_{12} – Módulo de cisalhamento no plano 12 para uma tensão τ_{12}

E a relação constitutiva elástica linear para: materiais compósitos laminados, ortotrópicos e com isotropia transversal, terá a seguinte forma:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1111} & a_{1122} & a_{1122} & 0 & 0 & 0 \\ a_{1122} & a_{2222} & a_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ a_{1122} & a_{2233} & a_{2222} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(a_{2222} - a_{2233}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4a_{1212} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4a_{1212} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

Sendo os coeficientes elásticos a_{ijkl} :

$$a_{1111} = \frac{1}{E_1} \quad (2.6)$$

$$a_{2222} = \frac{1}{E_2} \quad (2.7)$$

$$a_{1122} = \frac{-\nu_{12}}{E_1} \quad (2.8)$$

$$a_{1212} = \frac{1}{G_{12}} \quad (2.9)$$

$$a_{2233} = \frac{-\nu_{23}}{E_2} = \frac{-\nu_{32}}{E_3} \quad (2.10)$$

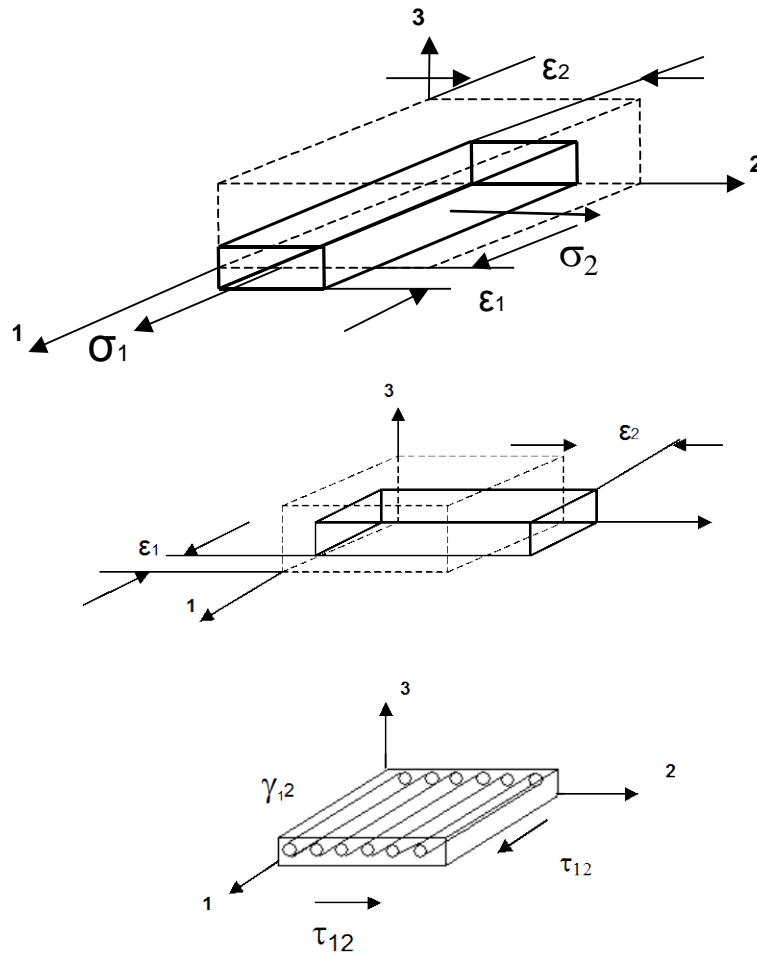


Figura 2.11: Tensões e deformações

A determinação experimental das constantes elásticas não é simples. Assim, através do estudo da interação entre a fibra e a matriz são propostos modelos que calculam as constantes elásticas (módulo de Young, módulo de cisalhamento e Poisson). Um modelo bastante usado é o da regra das misturas.

2.6.3 Propriedades mecânicas do laminado

O levantamento dos valores das propriedades mecânicas da lâmina, a partir do conhecimento das propriedades dos seus constituintes, matriz e fibra, da proporção em que são agregados e a direção dada ao reforço, é o propósito básico da micromecânica da lâmina (KAW, 1997).

A seguir são apresentadas algumas equações, conhecidas como regra das misturas, que posteriormente serão utilizadas para a comparação dos resultados empíricos do presente trabalho com o modelo teórico.

2.6.3.1 Avaliação do módulo de elasticidade

A partir do elemento representativo demonstrado na Figura 2.12 é possível determinar teoricamente, de maneira aproximada, os Módulos do material compósito.

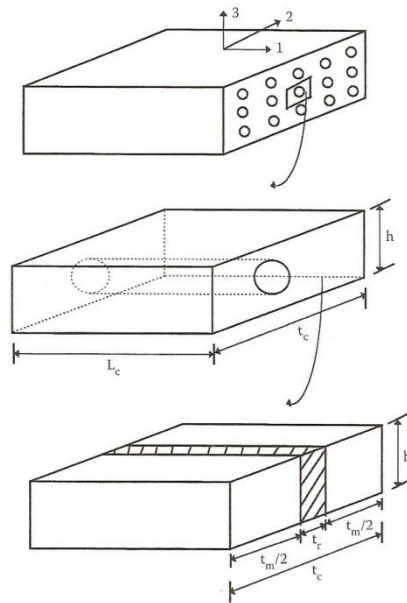


Figura 2.12: Elemento representativo da lâmina (KAW, 1997)

A área do compósito é dada por:

$$A_c = t_c \quad (2.11a)$$

A área da fibra é dada por:

$$A_f = t_f h \quad (2.11b)$$

E, por fim, a área da matriz é dada por:

$$A_m = t_m h \quad (2.11c)$$

Com base nessas áreas é possível determinar a fração volumétrica de fibra:

$$V_f = \frac{A_f}{A_c} = \frac{t_f}{t_c} \quad (2.12a)$$

E da matriz:

$$V_m = \frac{A_m}{A_c} = \frac{t_m}{t_c} = 1 - V_f \quad (2.12b)$$

2.6.3.1.1 Módulo de Young longitudinal

O módulo de Young longitudinal é determinado aplicando-se uma tensão na direção longitudinal (direção 1) do elemento representativo.

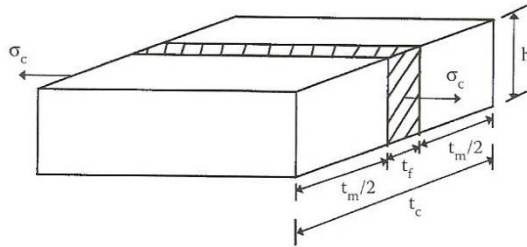


Figura 2.13: Carregamento longitudinal (KAW, 1997)

A carga atuante no sistema é definida como,

$$F_c = F_m + F_f \quad (2.13)$$

Essa carga pode ser expressa

$$F_c = \sigma_c A_c \quad (2.14a)$$

$$F_f = \sigma_f A_f \quad (2.14b)$$

$$F_m = \sigma_m A_m \quad (2.14c)$$

Assumindo que a fibra, a matriz e o compósito obedecem à lei de Hooke e a fibra e a matriz são isotrópicas, determina-se a relação tensão-deformação para cada componente e para o compósito que é

$$\sigma_c = E_1 \varepsilon_c \quad (2.15a)$$

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \quad (2.15b)$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m \quad (2.15c)$$

Substituindo a Equação (2.14) e a Equação (2.15) na Equação (2.13)

$$E_1 \varepsilon_c A_c = E_f \varepsilon_f A_f + E_m \varepsilon_m A_m \quad (2.16)$$

Considerando uma perfeita ligação na interface fibra-matriz, é considerado o estado de isodeformação, ou seja, as deformações da fibra, matriz e do compósito são iguais.

$$E_1 = E_f \frac{A_f}{A_c} + E_m \frac{A_m}{A_c} \quad (2.17)$$

Utilizando a Equação (2.12), para definição de fração volumétrica,

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.18)$$

A Equação (2.18) determina o Módulo de Young longitudinal. É chamada de regra das misturas.

2.6.3.1.2 Módulo de Young transversal

O Módulo de Young transversal é determinado aplicando-se uma tensão na direção transversal (direção 2) do elemento representativo.

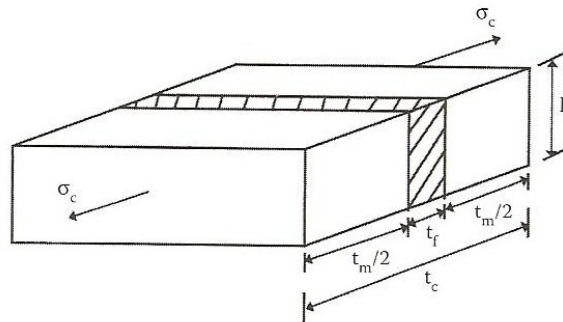


Figura 2.14: Carregamento transversal (KAW, 1997)

A tensão atuante na fibra é igual a da matriz, que por sua vez é igual a do compósito. Este estado é chamado de isotensão.

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m \quad (2.19)$$

A deformação transversal do compósito será em função da deformação da fibra e da matriz,

$$\delta_c = \delta_f + \delta_m \quad (2.20)$$

Pela definição de deformação

$$\delta_c = t_c \varepsilon_c \quad (2.21a)$$

$$\delta_f = t_f \varepsilon_f \quad (2.21b)$$

$$\delta_m = t_m \varepsilon_m \quad (2.21c)$$

Utilizando a lei de Hooke

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_2} \quad (2.22a)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (2.22b)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} \quad (2.22c)$$

Substituindo a Equação (2.21) e a Equação (2.22) na Equação (2.20) e utilizando a Equação (2.19)

$$\frac{1}{E_2} = \frac{1}{E_f} \frac{t_f}{t_c} + \frac{1}{E_m} \frac{t_m}{t_c} \quad (2.23)$$

Utilizando o conceito de fração volumétrica chega-se à Equação que determina o módulo de Young transversal.

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (2.24)$$

O resultado obtido à partir da Equação 2.24, não acompanha os resultados obtidos empiricamente. Halphin e Tsai desenvolveram uma equação que descreve que aproxima os resultados teóricos dos resultados empíricos. O modelo de Halphin-Tsai é demonstrado a seguir:

$$\frac{E_2}{E_m} = \frac{1+\xi\eta V_f}{1-\eta V_f} \quad (2.25)$$

Onde,

$$\eta = \frac{(E_f/E_m)-1}{(E_f/E_m)+\xi} \quad (2.26)$$

O termo ξ é chamado de fator de reforço. Para fibras com geometria circular, $\xi = 2$. Para fibras com seção transversal retangular onde a representa a largura e b representa a altura, $\xi = 2(a/b)$.

2.6.3.2 Coeficiente de Poisson principal

O coeficiente de Poisson principal é definido como sendo a relação entre a deformação na direção transversal e longitudinal. A Figura 2.14 representa o comportamento de um laminado quando o mesmo é submetido a um carregamento longitudinal

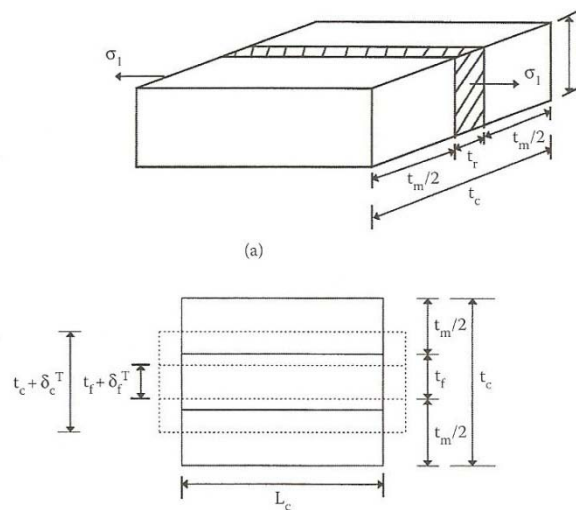


Figura 2.15: deformação devido ao carregamento longitudinal (KAW, 1997)

O deslocamento do compósito no sentido transversal é dado por:

$$\delta_c^T = \delta_f^T + \delta_m^T \quad (2.27)$$

Utilizando o conceito de deformação

$$\epsilon_c^T = \frac{\delta_c^T}{t_c} \quad (2.28a)$$

$$\epsilon_f^T = \frac{\delta_f^T}{t_f} \quad (2.28b)$$

$$\epsilon_m^T = \frac{\delta_m^T}{t_m} \quad (2.28c)$$

Substituindo a Equação (2.28) na Equação (2.27)

$$t_c \epsilon_c^T = t_f \epsilon_f^T + t_m \epsilon_m^T \quad (2.29)$$

Os coeficientes de Poisson do compósito da fibra e da matriz são, respectivamente

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_c^T}{\varepsilon_c^L} \quad (2.30a)$$

$$\nu_f = -\frac{\varepsilon_f^T}{\varepsilon_f^L} \quad (2.30b)$$

$$\nu_m = -\frac{\varepsilon_m^T}{\varepsilon_m^L} \quad (2.30c)$$

Substituindo na Equação (2.29)

$$-t_c \nu_{12} \varepsilon_c^L = -t_f \nu_f \varepsilon_f^L - t_m \nu_m \varepsilon_m^L \quad (2.31)$$

Considerando o estado de isodeformação na direção longitudinal

$$t_c \nu_{12} = t_f \nu_f + t_m \nu_m$$

$$\nu_{12} = \nu_f \frac{t_f}{t_c} + \nu_m \frac{t_m}{t_c} \quad (2.32)$$

Fazendo uso do conceito de fração volumétrica chegamos à Equação (2.33) que determina o coeficiente de Poisson principal de um laminado de compósito

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (2.33)$$

2.6.3.3 Módulo de cisalhamento planar

Aplicando um carregamento de cisalhamento puro na lâmina de compósito.

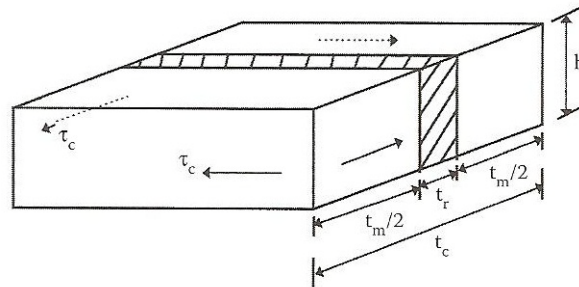


Figura 2.16: Carregamento cisalhante (KAW, 1997)

O deslocamento, em cisalhamento, do compósito, fibra e matriz é como segue

$$\delta_c = \delta_f + \delta_m \quad (2.34)$$

Pela definição de deformação

$$\delta_c = t_c \gamma_c \quad (2.35a)$$

$$\delta_f = t_f \gamma_f \quad (2.35b)$$

$$\delta_m = t_m \gamma_m \quad (2.35c)$$

Utilizando a lei de Hooke

$$\gamma_c = \frac{\tau_c}{G_{12}} \quad (2.36a)$$

$$\gamma_f = \frac{\tau_f}{G_f} \quad (2.36b)$$

$$\gamma_m = \frac{\tau_m}{G_m} \quad (2.36c)$$

Utilizando a Equação (2.34) e a Equação (2.36)

$$\frac{\tau_c}{G_{12}} t_c = \frac{\tau_f}{G_f} t_f + \frac{\tau_m}{G_m} t_m \quad (2.37)$$

Considerando o estado de isotensão

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_f} \frac{t_f}{t_c} + \frac{1}{G_m} \frac{t_m}{t_c} \quad (2.38)$$

Utilizando o conceito de fração volumétrica chega-se à Equação (2.39) que determina o módulo de Young transversal.

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad (2.39)$$

2.6.3.4 Coeficiente de expansão térmica

Quando um corpo é submetido a um gradiente de temperatura, o mesmo sofre uma deformação proporcional à variação de temperatura aplicada. Para materiais anisotrópicos, que é o caso de uma lâmina de compósito unidirecional, a deformação na direção 1 e 2 são diferentes. Isso se deve ao fato de serem diferentes tanto os coeficientes de expansão térmica do elemento de reforço e da matriz, como suas disposições nas direções 1 e 2.

2.6.3.4.1 Coeficiente de expansão térmica longitudinal (α_l)

Considerando-se a expansão de uma lâmina unidirecional na direção longitudinal devido a uma variação de temperatura ΔT . Quando a temperatura ΔT é aplicada, a carga na direção 1, F_1 , é igual a zero.

$$F_1 = \sigma_1 A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m = 0 \quad (2.40)$$

$$\sigma_f A_f + \sigma_m A_m = 0 \quad (2.41)$$

Como a carga aplicada na direção 1 é zero, tensões são causadas na fibra e na matriz devido à expansão térmica diferente entre a fibra e a matriz. Essas tensões são

$$\sigma_f = E_f (\varepsilon_f - \alpha_f \Delta T) \quad (2.42a)$$

e

$$\sigma_m = E_m (\varepsilon_m - \alpha_m \Delta T) \quad (2.42b)$$

Substituindo a Equação (2.42) na Equação (2.41) e assumindo o estado de isodeformação

$$\varepsilon_f = \frac{\alpha_f E_f V_f + \alpha_m E_m V_m}{E_f V_f + E_m V_m} \Delta T \quad (2.43)$$

Para uma expansão livre do compósito na direção 1, a deformação é dada por

$$\varepsilon_1 = \alpha_1 \Delta T \quad (2.44)$$

Como as deformações da fibra e do compósito são equivalentes, temos

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_f E_f V_f + \alpha_m E_m V_m}{E_f V_f + E_m V_m} \Delta T \quad (2.45)$$

Utilizando a definição do módulo de elasticidade na direção 1

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_f E_f V_f + \alpha_m E_m V_m}{E_1} \Delta T \quad (2.46)$$

Que pode ser reescrito da seguinte maneira

$$\alpha_1 = \left(\frac{\alpha_f E_f}{E_1} \right) V_f + \left(\frac{\alpha_m E_m}{E_1} \right) V_m \quad (2.47)$$

2.6.3.4.2 Coeficiente de expansão térmica transversal (α_2)

Dada uma variação de temperatura, ΔT , e considerando que as deformações da fibra e da matriz na direção 1 são iguais,

$$\varepsilon_m = \varepsilon_f = \varepsilon_1 \quad (2.48)$$

Agora, a tensão na fibra na direção longitudinal será,

$$(\sigma_f)_1 = E_f (\varepsilon_f)_1 = E_f \varepsilon_1 = E_f (\alpha_1 - \alpha_f) \Delta T \quad (2.49)$$

E a tensão na matriz na direção longitudinal será,

$$(\sigma_m)_1 = E_m (\varepsilon_m)_1 = E_m \varepsilon_1 = -E_m (\alpha_1 - \alpha_m) \Delta T \quad (2.50)$$

As deformações da fibra e da matriz na direção transversal (direção 2) são obtidas utilizando a lei de Hooke:

$$(\varepsilon_f)_2 = \alpha_f \Delta T - \frac{\nu_f (\sigma_f)_1}{E_f} \quad (2.51)$$

$$(\varepsilon_m)_2 = \alpha_m \Delta T - \frac{\nu_m (\sigma_m)_1}{E_m} \quad (2.52)$$

A deformação transversal do compósito é dada pela regra das misturas

$$\varepsilon_2 = (\varepsilon_f)_2 V_f + (\varepsilon_m)_2 V_m \quad (2.53)$$

Substituindo,

$$\varepsilon_2 = \left[\alpha_f \Delta T - \frac{\nu_f E_f (\alpha_1 - \alpha_f) \Delta T}{E_f} \right] V_f + \left[\alpha_m \Delta T - \frac{\nu_m E_m (\alpha_m - \alpha_1) \Delta T}{E_m} \right] V_m \quad (2.54)$$

Sendo que

$$\varepsilon_2 = \alpha_2 \Delta T \quad (2.55)$$

Logo,

$$\alpha_2 = [\alpha_f - \nu_f(\alpha_1 - \alpha_f)]V_f + [\alpha_m - \nu_m(\alpha_1 - \alpha_m)]V_m \quad (2.56)$$

Substituindo

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (2.57)$$

Reescrevendo a Equação (2.56) temos,

$$\alpha_2 = (1 + \nu_f)\alpha_f V_f + (1 + \nu_m)\alpha_m V_m - \alpha_1 \nu_{12} \quad (2.58)$$

2.6.4 Fibras

Grande parte dos compósitos estruturais é constituída por fibras. Isso se deve ao fato da elevada resistência dessa classe de material. Por apresentarem um diâmetro muito pequeno a probabilidade de haver um defeito é muito menor na fibra do que no material bruto. Quanto menor o diâmetro da fibra maior será sua resistência. Os tipos mais comuns de fibra são: de vidro, de aramida (kevlar[®]), de carbono etc. Podem ser ditas unidirecionais, quando orientadas numa mesma direção, bidirecional, quando as fibras são orientadas em duas direções distintas (Tecido), e fibras orientadas aleatoriamente (Manta). Há ainda tecidos híbridos compostos por diferentes tipos de fibra e tecidos multidirecionais, com fibras orientadas em várias direções do plano ortogonal.

Para a seleção de uma fibra é necessário levar em consideração diversos fatores, tais como: propriedades mecânicas, densidade, resistência química, preço e outros.

A Tabela 2.3 apresenta propriedades mecânicas de algumas fibras.

Propriedades	Unidades	Carbono	Vidro	Aramida
Módulo de Young Axial	GPa	230	85	124
Módulo de Young Transversal	GPa	22	85	8
Coefficiente de Poisson	-----	0,30	0,20	0,36
Módulo de Cisalhamento	GPa	22	35	3
Coef. Expansão Térmica Axial	$\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	-1,3	5	-5,0
Coef. Expansão Térmica Transv.	$\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	7,0	5	4,1
Resistência à Tração Axial	MPa	2067	1550	1379
Resistência à Tração Transv.	MPa	77	1550	7
Resistência ao Cisalhamento	MPa	36	35	21
Densidade específica	-----	1,8	2,5	1,4

Tabela 2.3: Propriedades das fibras (KAW, 1997)

2.6.5 Matriz

A matriz tem como função dar forma ao material, sendo o elemento de liga entre as fibras. Atuam como meio, através do qual uma tensão aplicada externamente é transmitida e distribuída para as fibras. Protege as fibras contra danos superficiais. Separa as fibras e por ser mais dúctil, previne a propagação de trincas frágeis de uma fibra para outra.

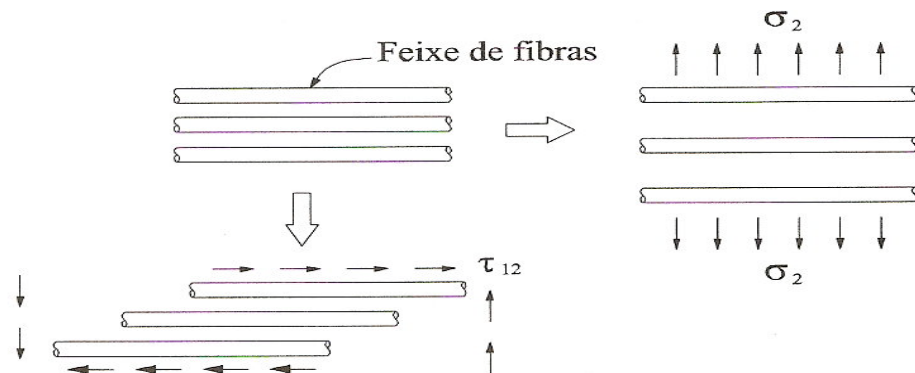


Figura 2.17: Comportamento das fibras sem a existência da matriz

A matriz pode ser metálica, cerâmica ou polimérica. Dentre as poliméricas podemos destacar as do tipo epóxi, poliéster e éster-vinílicas. Assim como as fibras, para a seleção do tipo de matriz deve se considerar fatores como: propriedades mecânicas, densidade, resistência química e preço. Outro fator importante quando se trata de matrizes poliméricas é o ambiente

onde será aplicado. Deve-se dar grande atenção à temperatura de trabalho e à exposição ao ultravioleta.

A Tabela 2.4 apresenta as propriedades mecânicas de algumas matrizes.

Propriedades	Unidades	Epóxi	Alumínio	Poliamida
Módulo de Young Axial	GPa	3,4	71	3,5
Módulo de Young Transversal	GPa	3,4	71	3,5
Coefficiente de Poisson	-----	0,30	0,30	0,35
Módulo de Cisalhamento	GPa	1,3	27	1,3
Coef. Expansão Térmica	$\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	63	23	90
Coef. Absorção de Umidade	-----	0,33	0	0,33
Resistência à Tração Axial	MPa	72	276	54
Resistência à Tração Transv.	MPa	72	276	54
Resistência ao Cisalhamento	MPa	34	138	54
Densidade específica	-----	1,2	2,7	1,2

Tabela 2.4: Propriedades de matrizes (KAW, 1997)

2.7 Adesão

O termo adesão é utilizado para se referir a atração entre substâncias sendo, portanto, uma manifestação de forças atrativas entre átomos e/ou superfícies. A natureza da adesão depende dos seguintes fatores:

- Presença de grupos funcionais superficiais produzidos por algum tipo de tratamento superficial;
- Orientação, arranjo atômico, cristalinidade e propriedades químicas dos materiais.
- Constituição química dos elementos;
- Difusividade dos elementos de cada constituinte.

As moléculas na superfície de um líquido ou de um sólido são influenciadas por forças moleculares desbalanceadas e, portanto, possuem energia adicional em contraste com as

moléculas no interior do líquido ou do sólido. Essa energia pode ser definida como a energia livre interfacial. Importantes aplicações tecnológicas dos materiais requerem que os mesmos sejam aderentes a outras substâncias e têm influência preponderante em muitas aplicações práticas, como por exemplo, fiação de polímeros, adesão, estabilidade de dispersões e molhamento de sólidos por líquidos (LEVY, 2006).

Para medir a modificação ocorrida em materiais, alguns parâmetros são utilizados na caracterização, como por exemplo, o ângulo de contato, a força de adesão e estimativas de energia livre de superfície. Segundo PARDINI (2006) há duas abordagens para o estudo: uma, do ponto de vista estrutural e morfológico; e a outra, do ponto de vista essencialmente mecânico.

Devido ao fato de o presente trabalho utilizar ligações por meio de colagem, é de vital importância o conhecimento de todos os mecanismos de adesão que possam melhorar a qualidade do reparo.

2.7.1 Teorias de adesão

Existem modelos que tentam descrever o mecanismo de adesão considerando-se a microestrutura dos materiais envolvidos nesse processo. São eles:

Interdifusão – a ligação entre duas superfícies pode ser formada por interdifusão de átomos ou moléculas que ocorrem na interface; neste caso, a adesão será dependente do entrelaçamento molecular, do número de moléculas envolvidas e da resistência da ligação molecular;

Atração eletrostática – atração provocada pela diferença entre as cargas dos constituintes na interface. A resistência da ligação dependerá da densidade da carga;

Ligação química – uma ligação é formada entre um grupamento químico na superfície do substrato e um grupo químico compatível no adesivo. A resistência dependerá do número e do tipo de ligações;

Adesão mecânica – também conhecida como aderência. A ligação mecânica envolve ancoramento mecânico na interface. A resistência normalmente não é de grande magnitude quando submetida a esforços de tensão transversal, a menos que haja grande número de reentrâncias. Portanto, a resistência da interface é dependente do grau de rugosidade da superfície

do substrato. Segundo SAMPAIO (1998), a rugosidade em escala relativamente macroscópica, aliada às microrrugosidades, são responsáveis por promover uma boa aderência em estruturas coladas. Recentemente, particularmente com técnicas de avaliação mais sofisticadas, a atenção está sendo focada para rugosidades em menor escala, ao nível de micrômetros.

2.7.2 Energia de superfície e tensão superficial

Energia de superfície e tensão superficial são os nomes dados à energia necessária para criar novas superfícies, em se tratando de substâncias sólidas e líquidas, respectivamente. Estas grandezas são originadas das forças intermoleculares de coesão e de adesão e resultam da maneira como as moléculas da superfície do líquido são atraídas pelas moléculas em seu interior e pelas moléculas da(s) substância(s) ao seu redor. Como estas energias variam com os meios circundantes, pode-se chamá-las genericamente de energia interfacial (WOLF, 2006).

2.7.3 Molhabilidade

A molhabilidade está relacionada à extensão na qual o contato é possível em nível molecular (S. AHADIAN et AL, 2008).

Este termo é usado para descrever o quanto o líquido se espalha pela parte sólida.

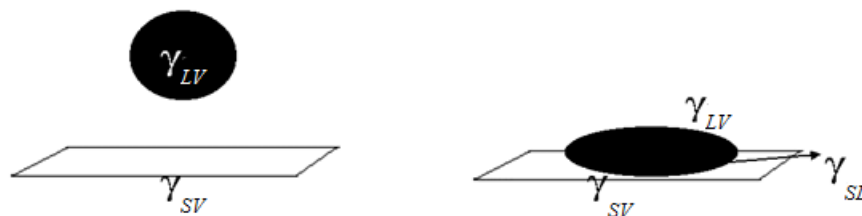


Figura 2.18: Espalhamento de uma gota (S. AHADIAN, 2008)

A gota se espalha numa superfície sólida somente se isso resultar em uma redução da energia livre do sistema. Para haver o molhamento espontâneo da superfície a seguinte relação deve ser obedecida:

$$\gamma_{SL} + \gamma_{LV} < \gamma_{SV} \quad (2.59)$$

Onde: “S” denota sólido e “V” vapor

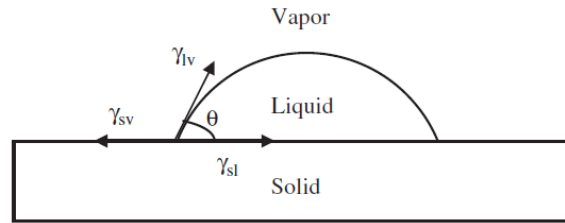


Figura 2.19: Gota em uma superfície sólida (SAMPAIO, 1998)

2.7.4 Ângulo de contato

Quando um líquido é sobreposto em uma superfície sólida, podem ocorrer dois fenômenos: o líquido se espalha na superfície ou tende a formar uma gota esférica. O ângulo formado entre o líquido e o sólido, considerando estas duas situações opostas, vai indicar o grau de interação entre os dois materiais e a magnitude desse ângulo vai depender do tipo de líquido e do tipo de substrato sólido.

SAMPAIO et al.(2006) concluíram que o tipo de superfície do substrato sólido também pode influenciar no ângulo de contato. Quanto menor o ângulo de contato, melhor a molhabilidade da superfície. Um dos princípios da molhabilidade é baseado no fato de que um material de menor energia superficial se espalha em uma superfície de maior energia superficial. Devido a esse fato, tratamentos de superfície, como por exemplo, o jateamento, aumenta a energia superficial, melhorando assim a molhabilidade.

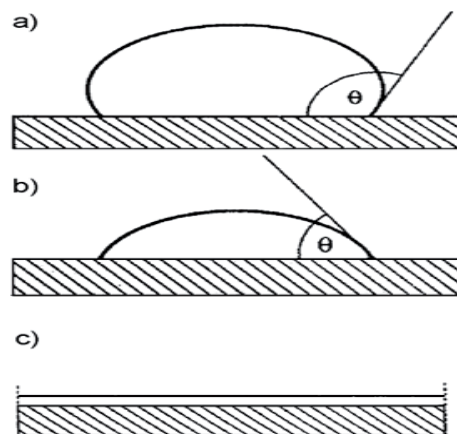


Figura 2.20: a) sem molhabilidade, b) molhabilidade parcial, c) boa molhabilidade (SAMPAIO 1998)

2.8 Preparo de superfície

Deve-se dar grande atenção à preparação da superfície onde será aplicado o reparo. A má preparação da superfície aumenta significativamente as chances de ocorrer delaminação do laminado de reparo.

Vale ressaltar que o Laboratório de Adesão e Aderência adquiriu, com o projeto de qualificação de adesivos em juntas coladas, acurácia em relação ao tratamento de superfícies e análise de resultados do comportamento mecânico de juntas coladas, em função do tratamento de superfície utilizado. Em parceria com a empresa Petrobras foi desenvolvido um procedimento que resultou na criação da RT TMEC n° 003/08 (“Qualificação de Adesivos para Reparo Estrutural”).

O Laboratório de Adesão e Aderência elaborou um procedimento para preparo de superfícies, o qual é seguido em todos os trabalhos realizados no laboratório para substratos metálicos.

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.

SAMPAIO et al.(2006) concluíram que para adesivos tipo massa, de alta viscosidade, observa-se de forma clara que o incremento dos parâmetros rugosidade (R_t) no substrato é acompanhado de um aumento na aderência, sendo o ancoramento mecânico o principal fator de resistência mecânica das juntas. Já para adesivos de baixa viscosidade, tipo resina líquida, a máxima aderência é atingida com níveis de rugosidade bem inferiores ao adesivo de alta viscosidade, ou seja, tudo indica que os mecanismos de adesão influenciam mais fortemente na resistência mecânica do que o ancoramento mecânico.

Para se estimar a eficiência do processo de adesão, e conseqüentemente a eficiência da aderência, utiliza-se normalmente o conceito de molhabilidade, ou seja, capacidade do adesivo líquido de molhar o substrato.

A rugosidade responsável pelo mecanismo de aderência (adesão mecânica) pode ser produzida, dentre outros processos, por tratamentos superficiais como a irradiação com laser, o

jateamento com granalha de aço, jateamento com “*sponge-jet*” ou o lixamento manual, que promovem a macrorrugosidade e/ou por tratamento químico com soluções ácidas, que promovem a microrrugosidade. Estudos feitos por SAMPAIO (1998) revelam que a utilização destes dois tipos de tratamentos em conjunto promovem um controle maior da rugosidade, associado a uma melhora nas propriedades de aderência do sistema.

Recentemente o Laboratório de Adesão e Aderência tem estudado, com sucesso, tratamentos químicos com substâncias organometálicas.

LIMAVERDE et al. (2008) demonstraram que a combinação do tratamento mecânico para promoção da rugosidade (aderência) e da sinalização (substância organometálica), promovem um aumento significativo na resistência mecânica ao cisalhamento nas juntas coladas com adesivos à base de epóxi.

2.9 Cenário atual de reparos com materiais compósitos

PERRUT (2009) avaliou três sistemas de reparo utilizando materiais compósitos destinados ao reparo de danos transpassantes. O critério utilizado para a qualificação foi o da taxa de liberação de energia (γ_{LCL}), em conformidade com o Anexo D da Norma ISO 24817:2006. Foram realizados testes similares aos desenvolvidos no presente trabalho onde foi possível constatar particularidades de cada sistema. Como exemplos, materiais que possuíam maior percentual de fibras e, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas, nos testes hidrostáticos obtiveram um resultado inferior aos obtidos em materiais com menor percentual de fibras.

Outro fato que pode ser avaliado em PERRUT (2009) é que reparos do mesmo fornecedor, com a mesma configuração e aplicados de maneira similar, apresentaram grande dispersão dos resultados obtidos durante os testes hidrostáticos.

3 ISO 24817:2006

3.1 Visão geral

Em 15 de setembro de 2006 foi publicada a Norma ISO/PDTS 24817 (Reparos de compósitos para dutos de indústrias de petróleo, petroquímicas e de gás natural – Qualificação, projeto, instalação, teste e inspeção), um compêndio destinado à qualificação de sistemas de reparos com materiais compósitos capazes de restaurar a integridade estrutural de dutos danificados ou reforçar dutos não danificados, para carregamento adicional.

A Norma ISO/PDTS 24817 basicamente se resume no cálculo de duas variáveis t_{design} e L , espessura do laminado de reparo e comprimento axial do reparo respectivamente. A Norma fornece as equações necessárias para o cálculo da espessura e comprimento do laminado para os mais diversos casos de defeitos, desde seções retas de tubulações até componentes do sistema de dutos, vasos de pressão etc.

Apresenta ainda condições opcionais de projeto, tais como: impacto, carregamento cíclico, reparos vivos (substrato em operação), desempenho em incêndio, proteção catódica, condutividade elétrica e carregamento externo.

Os materiais compósitos que constituem o laminado de reparo considerados nesse documento são os reforços típicos de aramida (AFRP), de vidro (GRP), de carbono (CFRP), reforçados em matriz de poliéster, éster vinil, epóxi ou de poliuretanos.

3.2 Situações nas quais é recomendado o reparo com materiais compósitos

A ISO/PDTS 24817 fornece recomendações e exigências para qualificação, projeto, instalação, teste e inspeção, para aplicação externa de reparos de compósitos em dutos danificados ou corroídos. É direcionada ao reparo de danos comumente encontrados em dutos de óleo, gás e utilidades. Esses procedimentos também são aplicáveis ao reparo de encanamentos, tanques de armazenamento e vasos de pressão, com considerações apropriadas. A seguir são demonstradas as situações nas quais o sistema de reparo com materiais compósitos é recomendado:

- Corrosão externa, com defeito transpassante ou não. Neste caso a aplicação do reparo geralmente impede que a deterioração do material continue;
- Danos externos como sulcos, entalhes e corrosão;
- Corrosão interna, com dano transpassante ou não. Neste caso a corrosão e/ou erosão podem continuar após a aplicação do reparo;
- Fortalecimento estrutural em áreas localizadas.

3.3 Análise de risco

Uma análise de risco deve ser concluída pelo proprietário antes da aplicação do sistema de reparo. Para esclarecimento, a análise de risco é a estratégia ou ação corretiva para avaliar bem os riscos associados à aplicação do método de reparo.

O objetivo da análise de risco é estabelecer o tipo de reparo e, conseqüentemente, os detalhes do método de projeto. Isto determinará a margem ou fator de segurança a ser utilizado no projeto. A análise de risco deve ser constituída por:

- Avaliação da natureza e localização dos defeitos;
- Projeto e condições de operação do substrato e os índices de pressão, temperatura e tamanho;
- Tempo de vida do reparo;
- Geometria do substrato a ser reparado;
- Perigos associados ao sistema de operação;
- Disponibilidade de pessoal com habilidades necessárias;
- Facilidade de execução das operações de preparação de superfície;
- Desempenho sob as principais situações de incidentes, incluindo impacto, abrasão, fogo, explosão, colisão e carregamento ambiental;
- Medidas operacionais incluindo (se relevante) licenças, teste do gás, proteção contra fogo e exigências que assegurem a segurança na vizinhança da área de reparo;
- Inspeccionabilidade (visual e não destrutiva);
- Materiais do sistema de reparo.

3.4 Classes de reparo

O sistema de reparo é alocado em três Classes, conforme demonstrado na Tabela 2.1:

Classe de reparo	Serviço típico.	Pressão de projeto	Temperatura de projeto
Classe 1	Sistemas de baixo risco, drenos, sistemas de refrigeração, água do mar (serviço), diesel e outras linhas de hidrocarbonetos.	< 1MPa (10bar)	< 40°C
Classe 2	Água para combate a incêndio, sistemas de inundação.	< 2MPa (20bar)	< 100°C
Classe 3	Água e hidrocarbonetos produzidos, fluidos inflamáveis, sistemas de gás. Também cobre condições de operação mais críticas do aqui descritas.	Limite superior qualificado	Limite superior qualificado

Tabela 3.1: Classes de reparo

3.5 Vida útil do sistema de reparo

A vida útil (em anos) do sistema de reparo pode ser limitada pelas condições de operação e tipos de defeitos. A vida útil mínima do reparo é de 2 anos. Vidas úteis longas (até 20 anos) são designadas àquelas situações para restabelecer a vida útil do projeto original da tubulação ou para estender a vida do projeto por um tempo especificado. Uma vez expirada a vida útil do reparo, o proprietário removerá ou revalidará o sistema de reparo.

3.6 Dados requeridos para aplicação do sistema de reparo

Os seguintes dados serão fornecidos para cada aplicação do sistema de reparo: dados do projeto original do equipamento, histórico operacional e de manutenção fornecidos pelo proprietário e dados da qualificação do material fornecido pelo fornecedor do sistema de reparo. A disponibilidade de dados relevantes será caracterizada como parte da análise de risco.

3.6.1 Dados da qualificação do sistema de reparo

A documentação e os dados de qualificação relacionados aos sistemas de reparo serão fornecidos pelos fornecedores do reparo conforme mostrado na Tabela 3.2. Vale ressaltar que o sistema de reparos proposto por esse trabalho é destinado à Classe 3, que abrange todas as classes. Os detalhes dos dados de qualificação devem ser informados pelo fornecedor do sistema de reparos.

Documentos exigidos	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Documentação e dados do material	X	X	X
Capacidade do projeto		X	X
Documentação da preparação da superfície	X	X	X
Dados do teste em curto prazo	X	X	X
Dados do teste em longo prazo		X	X

Tabela 3.2: Documentos e dados exigidos

Documentação e dados do material: Inclui a indicação das resinas e os reforços usados e todos os padrões que forem fornecidos. Dados básicos da compatibilidade do material com o ambiente de funcionamento também devem estar disponíveis. Assegurar-se-á que toda a interação química entre a resina (e agentes de cura associados) e a tubulação não causará uma degradação adicional da tubulação. Também será dada atenção aos laminados CFRP e o potencial de corrosão bi-metálico (galvânico) da tubulação.

Capacidade do projeto: Fornecedores que oferecem reparos Classe 2 e 3 apresentarão cálculos com os dados do projeto.

Preparo da superfície: A durabilidade do reparo sob carga aplicada é determinada em grande extensão pela qualidade da preparação da superfície usada. Detalhes do procedimento de preparação da superfície serão conhecidos.

Dados de teste em curto prazo: Estes incluirão as propriedades do laminado de reparo e a força de ligação adesiva entre o laminado de reparo e o substrato.

Dados de teste em longo prazo: Estes incluirão a força de ligação adesiva entre o laminado de reparo e a tubulação e, opcionalmente, a tensão final do laminado de reparo. O prazo é definido como maior ou igual a 1.000 horas.

A Tabela 3.3 lista os dados requeridos de acordo com as exigências da Classe 3.

	Propriedade do material	Método de teste
Propriedades mecânicas	Módulo de Young	ISO 527 (ou ASTM D3039)
	Coefficiente de Poisson	ISO 527 (ou ASTM D3039)
	Módulo de Cisalhamento	ASTM D5379
	Coefficiente de expansão térmica	ISO 11359 (ou ASTM D696)
	Temperatura de transição vítrea e de distorção térmica da resina	ISO 11357-2 (ou ISO 75, ASTM D6604, ASTM E1640, ASTM E831).
	Dureza Barcol	BS EN 59 ou ISSO 868 (ou ASTM D2583)
Força de adesão	Cisalhamento	BS EN 1465 (ou ASTM D3165)
Dados de desempenho	Força em longo prazo (opcional)	Anexo E
	Taxa de liberação de energia (opcional)	Anexo D
	Teste em curto prazo da sobrevivência da tubulação (opcional)	Anexo C

Tabela 3.3: Exigências dos testes de qualificação

3.7 Metodologia de projeto

Há dois tipos de defeitos: Tipo A e Tipo B.

3.7.1 Defeito Tipo A

Defeito do substrato não transpassante e que não é esperado que atravesse a parede durante a vida útil do sistema do reparo, requerendo o reforço estrutural somente.

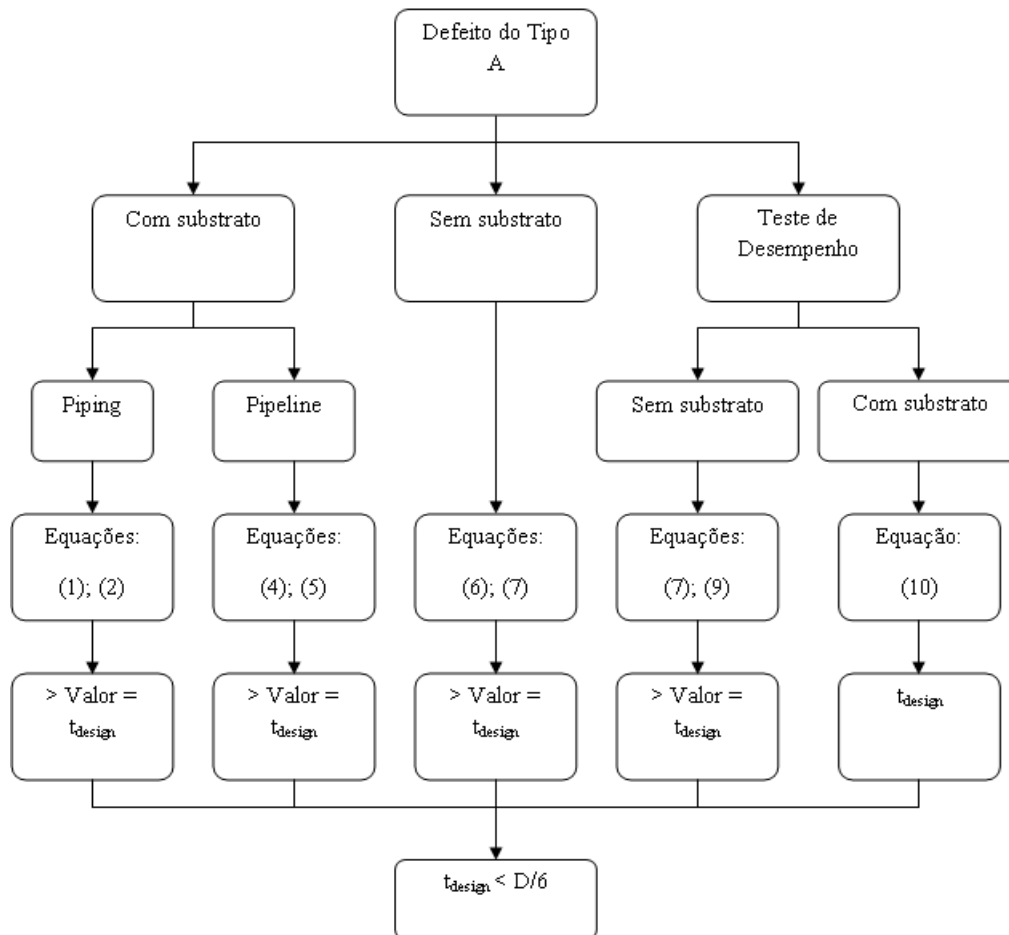
Os defeitos do Tipo A são subdivididos em três categorias: com substrato; sem substrato; teste de desempenho.

Com substrato – A espessura do laminado de reparo é calculada considerando a contribuição mecânica do substrato, ou seja, o substrato ainda é capaz de suportar parte dos carregamentos aplicados no duto.

Sem substrato – A espessura do laminado é calculada para suportar todo carregamento aplicado no duto, ou seja, o substrato não é considerado nos cálculos.

Teste de desempenho – Esse teste de projeto é apropriado se os dados baseados no teste de desempenho estiverem disponíveis. A Seção 4.2.6 do presente trabalho demonstra de forma resumida como devem ser realizados os testes de desempenho. O Anexo E da Norma ISO/PDTS 24817 fornece três métodos para determinação da pressão (ou deformação) de falha em longo prazo do laminado de reparo.

O fluxograma para o projeto de reparo para defeitos do Tipo A é demonstrado na Figura 3.1:



Onde: t_{design} = espessura do laminado de reparo

D = diâmetro externo do substrato

Obs.: As Equações são apresentadas no Anexo A

Figura 3.1: Fluxograma defeito do Tipo A

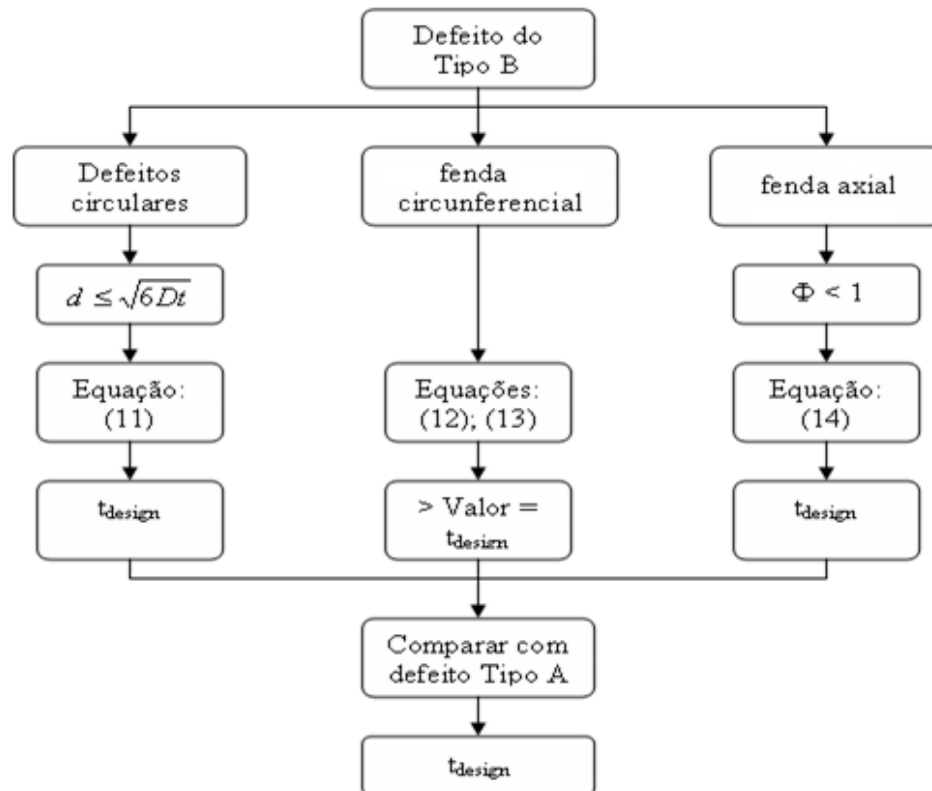
3.7.2 Defeito Tipo B

O substrato requer selagem e reforço estrutural para defeitos transpassantes (vazamentos). Para substratos com corrosão interna ativa, o laminado de reparo será projetado na suposição de que um defeito transpassante ocorrerá se a espessura de parede restante no fim da vida do serviço for inferior a 1mm.

Os defeitos do Tipo B são subdivididos em três categorias: defeitos circulares ou aproximadamente circulares; trinca ou fenda circunferencial; trinca ou fenda axial.

Para defeitos não circulares é selecionado um diâmetro que contenha todo o defeito.

O projeto de reparo para defeitos do Tipo B é demonstrado na Figura 3.2:



Onde: t_{design} = espessura do laminado de reparo

d = diâmetro do defeito

D = diâmetro externo do substrato

t = espessura do substrato

Φ = ângulo subentendido axialmente pela trinca (radianos)

Obs.: 1 – As equações são apresentadas no Anexo A.

2 – O valor de t_{design} obtido é comparado com as equações para defeitos do Tipo A, o maior valor obtido será usado no projeto.

Figura 3.2: Fluxograma defeito do Tipo B

3.7.3 Extensão axial do reparo

A espessura de projeto do laminado de reparo se estenderá além da região danificada por 50 mm ou L_{over} (mm), o que for maior, onde L_{over} é dado por:

$$\text{Para defeitos tipo fenda: } L_{over} = 2\sqrt{Dt} \quad (3.1)$$

$$\text{Para defeitos circulares: } L_{over} = 4d \quad \text{onde } d < 0,5\sqrt{Dt} \quad (3.2)$$

Onde: d = diâmetro do defeito (mm)

D = diâmetro externo do substrato (mm)

t = espessura do substrato (mm)

Se a condição da Equação (3.2) não for satisfeita então a Equação (3.1) será usada.

O comprimento axial total do reparo, L , é dado por:

$$L = 2L_{over} + L_{defect} + 2L_{taper} \quad (3.3)$$

Onde: L_{over} = extensão axial da espessura de projeto do reparo (mm)

L_{defect} = comprimento axial do defeito (mm)

L_{taper} = comprimento axial do adocamento (mm)

As extremidades do reparo devem ser suaves. A redução gradual de espessura nas bordas do laminado sob carga axial reduz as tensões fora do plano.

Para certificar-se que a extensão axial do reparo, L_{over} , seja suficiente para assegurar que a carga aplicada possa ser transferida do substrato ao reparo, a Equação (3.4) deve ser satisfeita:

$$L_{over} > \frac{E_a \varepsilon_a t_{min,a}}{\tau} \quad (3.4)$$

Onde: E_a = módulo axial do laminado de reparo (MPa)

ε_a = deformação axial do laminado de reparo (mm/mm)

$t_{min,a}$ = espessura mínima do laminado de reparo para as cargas axiais atuantes

τ = tensão de cisalhamento (MPa) (interface substrato/laminado de reparo)

Nos casos em que a geometria da seção a ser reparada for tal que não seja possível conseguir a extensão axial requerida do reparo, incluindo o comprimento de adoçamento, será considerado como um caso especial de projeto e a análise deve ser concluída antes da aplicação do reparo.

Para a extensão axial limitada (menor que 50mm) a espessura de projeto do reparo, t_{design} , determinada será multiplicada por um fator de aumento de espessura de reparo, $f_{th,overlay}$, definido como:

$$f_{th,overlay} = \left(\frac{L_{over}}{L_{available}} \right)^{2/3} \quad \text{onde} \quad t_{design} = f_{th,overlay} t_{design,original} \quad (3.5)$$

Uma análise detalhada das tensões na camada adesiva que demonstre que as cargas axiais podem ser transmitidas entre o reparo e o substrato será demonstrada. A extensão mínima do comprimento disponível na superfície a ser aplicado o reparo é definida como qualquer um dos itens abaixo:

$L_{available}$ (área disponível (extensão axial) não danificada do substrato) será pelo menos 25mm, ou

$f_{th,overlay}$ será menor que 2,5.

Quando há uma extensão axial limitada no substrato não será possível aplicar adoçamento nas bordas do laminado de reparo. Para este caso a transição entre o laminado de reparo e a restrição do substrato, flange, por exemplo, deve ser o mais suave possível para minimizar as concentrações de tensões. Entretanto, onde possível, o laminado sempre deve ter o comprimento de adoçamento, particularmente quando há cargas axiais atuantes, a fim de minimizar as tensões nas bordas do laminado de reparo.

A extensão axial total do reparo para extensão reduzida será consequentemente:

Para um lado com extensão reduzida: $L = L_{over} + L_{defect} + L_{taper} + L_{available}$

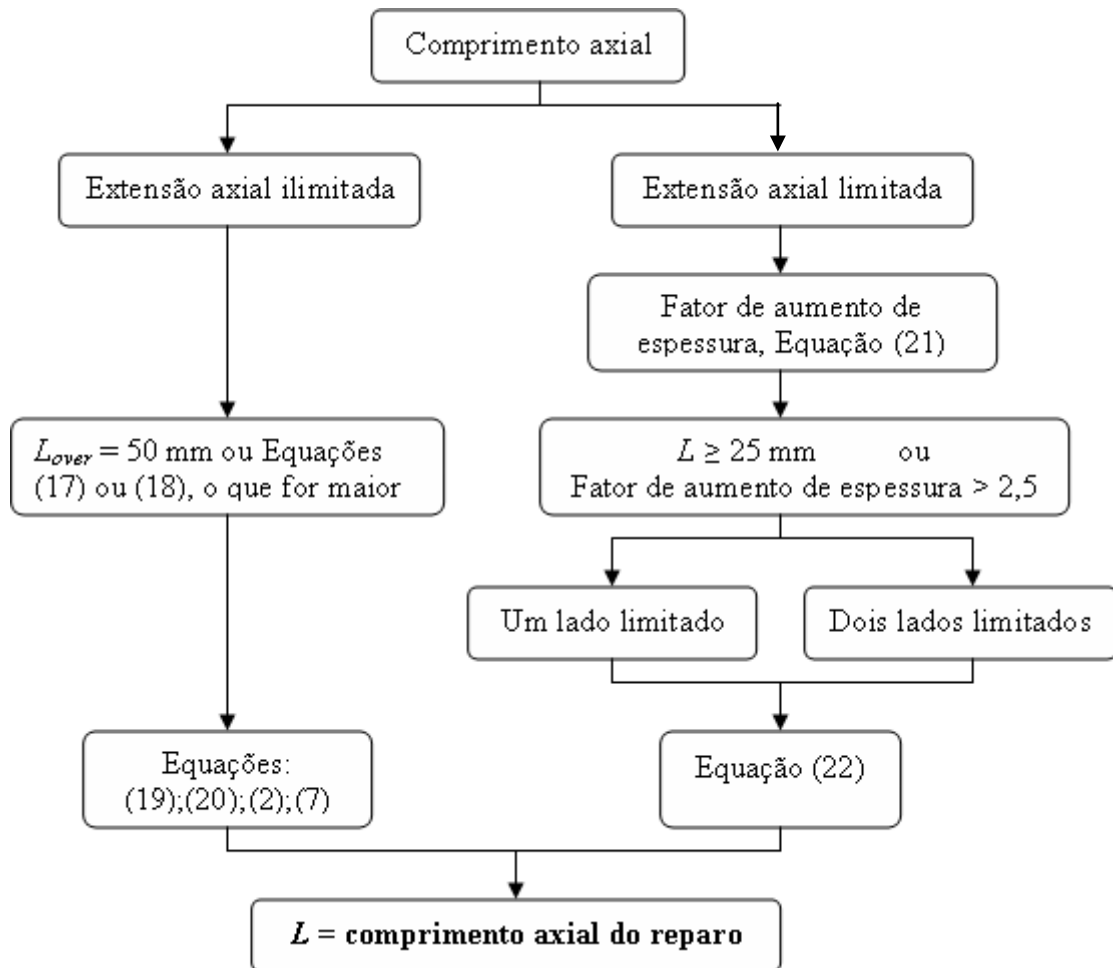
Para dois lados com extensão reduzida: $L = L_{defect} + L_{available,1} + L_{available,2}$ (3.6)

Onde: $L_{available,1}$ = extensão disponível à direita do defeito

$L_{available,2}$ = extensão disponível à esquerda do defeito

O maior dos dois valores de $f_{th,overlay}$ é utilizado para determinar a espessura de projeto do reparo, Equação (3.5).

O fluxograma do cálculo da extensão axial é demonstrado na Figura 3.3:



Obs.: Os índices das equações são os mesmos utilizados na ISO/PDTS 24817

Figura 3.3: Fluxograma comprimento axial do laminado de reparo

3.8 Compatibilidade ambiental e temperatura de projeto

Deve-se verificar a compatibilidade do sistema de reparo com o meio onde será aplicado, ambientes aquosos ou de hidrocarbonetos, também se deve dar importância à degradação por raios ultravioletas, onde necessário.

A temperatura de utilização do laminado de reparo deve estar de acordo com a Tabela 3.4. A máxima temperatura do substrato e do meio ambiente deve ser conhecida, e o reparo será projetado para suportar a maior dessas temperaturas:

	Defeito Tipo B	Defeito Tipo A
	T_m	T_m
T_g	$T_g - 30\text{ °C}$	$T_g - 20\text{ °C}$
HDT	$HDT - 20\text{ °C}$	$HDT - 15\text{ °C}$

Tabela 3.4: Limite superior da temperatura de aplicação do laminado de reparo

Onde: T_m = máxima temperatura na qual o laminado pode ser utilizado

T_g = temperatura de transição vítrea do laminado de reparo

HDT = temperatura de distorção térmica do laminado de reparo

Vale ressaltar que para projetos que atuem em temperaturas inferiores a 40°C nenhum critério de aceitação ligado a T_g ou HDT é necessário.

A temperatura máxima de trabalho T_m é baseada na temperatura de transição vítrea do laminado, obtida nos testes de qualificação.

3.9 Defeitos admissíveis

Os defeitos relacionados às camadas do laminado e da resina provavelmente ocorrem durante a instalação, ao invés de serem consequências da deterioração do serviço. Como consequência, o controle do processo e o monitoramento do material do reparo que está sendo aplicado são os meios para se assegurar uma boa qualidade do reparo.

Os tipos de defeitos, bem como seus limites admissíveis são apresentados na Tabela 3.5.

Seção do Reparo	Defeito	Limites Admissíveis
Substrato antes da aplicação do reparo	Verificar se o material do substrato é aquele para o qual o reparo foi projetado	
	Mudança na geometria	Área do reparo não deve possuir mudanças bruscas de geometria.
	Preparação de superfície	De acordo com a especificação do sistema de reparo Extensão axial será de acordo com o projeto
	Temperatura superficial	De acordo com o projeto do reparo
	Sobre o defeito	Dimensão não excederá aquela para a qual o reparo foi projetado Defeito será do tipo ao qual o reparo foi designado
	Localização do reparo	Extensão axial e posicionamento serão de acordo com o projeto
Interface	Delaminação	Nenhuma até o fim da vida útil do reparo
Camada rica em resina	Trincas	Nenhuma (verificar camadas adesivas)
	Material estranho, bolhas e cavidades	Máximo de 10mm de largura e 2,5mm de altura
	Dobras (amassados)	Não mudará a espessura além de 2,5mm
	Buracos	Nenhum mais profundo que a camada rica em resina
	Coloração da Resina	Uniforme
	Pontos secos	Nenhum
Laminado de Reparo	Orientação da Fibra	Como especificado no projeto
	Fibra não impregnada/seca	Nenhuma
	Fios/fibras expostas	Nenhuma
	Material estranho	Nenhum
	Extensão axial e posicionamento do reparo	Como especificado no projeto Não se estenderá além da superfície preparada.

Tabela 3.5: Limites admissíveis de defeitos

3.10 Medida de γ_{LCL} para cálculo de defeitos transpassantes

Essa propriedade é necessária para o cálculo da espessura de reparo para dutos com danos transpassantes (vazamentos). Os resultados desses testes são apresentados no Capítulo 6.

Para o cálculo do valor da taxa de liberação de energia são necessários seções de tubos metálicos com diâmetro mínimo de 100mm e espessura mínima de parede de 3mm.

Devem ser realizados um mínimo de 9 testes abrangendo 3 tamanhos de furos, 10, 15 e 25mm (3 cps com cada tamanho de furo). O teste deverá ser feito na temperatura do teste de qualificação. Essa temperatura será definida como a máxima temperatura de operação do sistema de reparo, respeitando os limites estabelecidos pela Tabela 3.4.

As falhas devem ocorrer sob a forma de delaminação do laminado de reparo no substrato seguida de vazamento na borda do laminado de reparo. Todos os pontos da falha devem se relacionar ao mecanismo da falha por delaminação.

O valor de γ_{LCL} (J/m^2) será calculado pela equação.

$$\gamma_i = \left(\frac{P_i}{A(d_i)} \right)^2 \quad (3.7)$$

n = número de ensaios realizados ($A(d_i), P_i$)

P_i = pressão (MPa) observada na falha i , onde $i = 1, n$

$A(d_i)$ = função do tamanho do defeito e propriedades do laminado de reparo observadas i , onde $i = 1, n$

$A(d_i)$ é definido como;

$$A(d_i) = \sqrt{\left\{ \frac{0,001}{\frac{(1-\nu^2)}{E_{ac}} \left\{ \frac{3}{512 t_i^3} d_i^4 + \frac{1}{\pi} d_i \right\} + \frac{3}{64 G t_i} d_i^2} \right\}} \quad (3.8)$$

Onde : E_{ac} = módulo de elasticidade combinado do laminado de reparo (MPa)

G = módulo de cisalhamento do laminado de reparo (MPa)

ν = coeficiente de Poisson do laminado de reparo

d_i = diâmetro do defeito (mm)

t_i = espessura do laminado de reparo (mm)

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

$$\gamma_{mean} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n A(d_i) P_i}{\sum_{i=1}^n A(d_i)^2} \right)^2 \quad (3.9)$$

A taxa de liberação de energia com limite inferior de confiança de 95%, γ_{LCL} , é calculada por;

$$\gamma_{LCL} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n A(d_i)P_i}{\sum_{i=1}^n A(d_i)^2} - t_v \sigma \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n A(d_i)^2}} \right]^2 \quad (3.10)$$

Onde, σ é a variação de pressão medida e é dada por;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - A(d_i)\sqrt{\gamma_{mean}})^2}{(n-2)}} \quad (3.11)$$

E onde t_v é o valor de t de Student e está baseado em um nível de significância bilateral de 0,025, isto é, limite de confiança inferior de 95%. Os valores de t_v são dados em função do número de ensaios, n, na Tabela 3.6.

n Número de variáveis	n - 2 Graus de liberdade	t de Student (0.025)
7	5	2,841
8	6	2,752
9	7	2,685
10	8	2,634
11	9	2,593
12	10	2,560
13	11	2,533
14	12	2,510
15	13	2,490
16	14	2,473
17	15	2,458
18	16	2,445

Tabela 3.6: Valor de t de Student para nível de significância bilateral de 0,025

O valor de γ_{LCL} calculado pela Equação (3.10) será usado para o cálculo da espessura do reparo para danos transpassantes.

3.11 Programa computacional

A ISO 24817:2006 é uma norma que possui certa complexidade. Tendo em vista esse fator, está sendo desenvolvido um software com intuito de facilitar e agilizar os trabalhos do projetista do reparo.

Tendo como base as informações da folha de dados do reparo e da especificação do laminado de reparo, o programa computacional será capaz de determinar o tipo de reparo necessário (Tipo A ou Tipo B), verificar se a extensão axial disponível no substrato é suficiente para o reparo ser feito, analisar se o problema se trata de uma fenda axial, circumferencial ou um defeito circular, e realizar todos os cálculos necessários especificamente para o caso em questão.

Primeiramente, o programa validará os dados de entrada, de acordo com limites pré-estabelecidos. Feita a validação, as características do defeito serão avaliadas e as decisões sobre as equações a serem utilizadas para calcular a espessura do reparo serão tomadas. Com a espessura calculada, o programa conseguirá calcular o comprimento axial do reparo correspondente. Dependendo da extensão axial disponível do substrato, o programa calculará um fator de correção e o aplicará sobre a espessura calculada, deixando-a de acordo com a norma. Em seguida, o número de voltas será calculado a partir da espessura do laminado reparo.

Como resposta, o programa fornece o número de voltas e comprimento axial mínimo necessário ao reparo.

O software foi desenvolvido utilizando a linguagem Java, aplicando os conceitos de programação orientada ao objeto e modelagem UML. Atualmente está em fase de testes, já conseguindo calcular o número de voltas necessário para o reparo de defeitos não-transpassante (Tipo A) e o comprimento axial do reparo relativo a estes defeitos.

4 ENSAIOS MECÂNICOS E QUÍMICOS

Para a qualificação de sistemas de reparos para defeitos do Tipo B (danos transpassantes) que se enquadrem na Classe 3 é exigido, de acordo com a Tabela 3.3, uma série de ensaios mecânicos. Neste capítulo são apresentados os principais ensaios a serem realizados, bem como as propriedades desejadas em cada ensaio. Também são citadas as respectivas Normas de referência.

Também é citado um teste químico que tem como objetivo determinar a fração volumétrica de fibras do laminado de reparo.

4.1 Ensaio de tração (Módulo de Young (E) e Coeficiente de Poisson (ν))

A Norma ASTM D 3039:2006 (Método padrão do teste para propriedades mecânicas de materiais compósitos de matriz polimérica) fornece as exigências necessárias para a realização dos testes destinados à determinação do Módulo de Young e do Coeficiente de Poisson.

Esta Norma é projetada para produzir dados das propriedades mecânicas para especificações de materiais, pesquisa e desenvolvimento, garantia de qualidade, projeto e análise estrutural.

Fatores que influenciam a resposta de tensão e, conseqüentemente, devem ser relatados, incluem o seguinte:

- Material
- Métodos de preparação
- Ordem das camadas e sequência de empilhamento
- Preparação do corpo de prova
- Condicionamento do corpo de prova
- Ambiente de teste
- Alinhamento do corpo de prova durante o ensaio
- Velocidade de teste
- Percentual volumétrico do reforço.

As propriedades obtidas a partir desta Norma incluem o seguinte:

- Tensão de ruptura
- Deformação de ruptura
- Módulo de Young
- Coeficiente de Poisson
- Deformação de transição.

A Tabela 4.1 fornece dados sobre a geometria do corpo de prova, que é demonstrado na Figura 4.1. Essas dimensões são apenas uma sugestão, podendo ser diferentes.

Orientação das fibras	Largura [mm]	Comp. total [mm]	Espessura [mm]	Comp. do tab [mm]	Espes. do tab [mm]	Ângulo [°]
0° unidirecional	15	250	1.0	56	1.5	7 a 90
90° unidirecional	25	175	2.0	25	1.5	90
Balanceado e simétrico	25	250	2.5	Tecido abrasivo	-----	-----
Aleatória – descontínua	25	250	2.5	Tecido abrasivo	-----	-----

Tabela 4.1: Dimensões dos corpos de prova

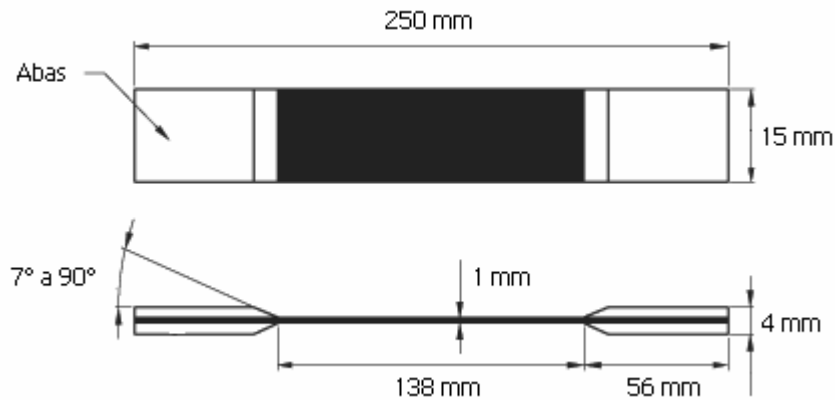


Figura 4.1: Representação esquemática do corpo de prova (fibras unidirecionais)

4.2 Ensaio de cisalhamento (Módulo de cisalhamento (G))

A Norma ASTM D5379 (Método padrão para teste das propriedades de cisalhamento de materiais compósitos pelo método de entalhe em V) fornece as exigências necessárias para a realização dos testes destinados à determinação do módulo de cisalhamento.

Este método do teste é projetado para produzir dados das propriedades de cisalhamento para especificações de materiais, pesquisa e desenvolvimento, garantia de qualidade, projeto e análise estrutural. As propriedades *in-plane* ou de cisalhamento interlaminar podem ser avaliadas, dependendo da orientação do sistema de coordenadas do material relativo à linha central do carregamento.

Os fatores que influenciam a resposta de cisalhamento e, conseqüentemente, devem ser relatados incluem o seguinte:

- Material
- Métodos da preparação
- Número de camadas e sequência de empilhamento
- Orientação do reforço
- Condicionamento
- Ambiente do teste
- Alinhamento do corpo de prova durante o ensaio
- Velocidade do teste
- Percentual volumétrico do reforço

As propriedades obtidas através desta Norma incluem o seguinte:

- Resposta de tensão/deformação cisalhante
- Tensão de ruptura
- Deformação de ruptura
- Módulo de cisalhamento
- Deformação de transição

Para a realização deste ensaio faz-se necessário à utilização de um dispositivo conhecido como dispositivo de Iosipescu, regulamentado pela norma ASTM D 5379, demonstrado na Figura 4.2.

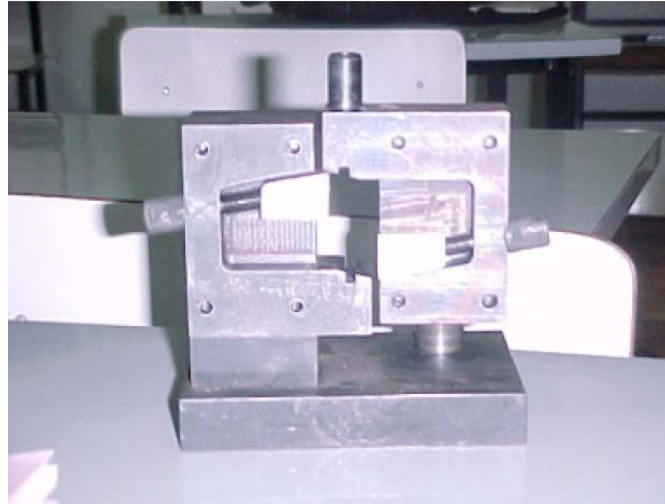


Figura 4.2: Dispositivo de Iosipescu

A geometria e o formato do corpo de prova são demonstrados na Figura 4.3.

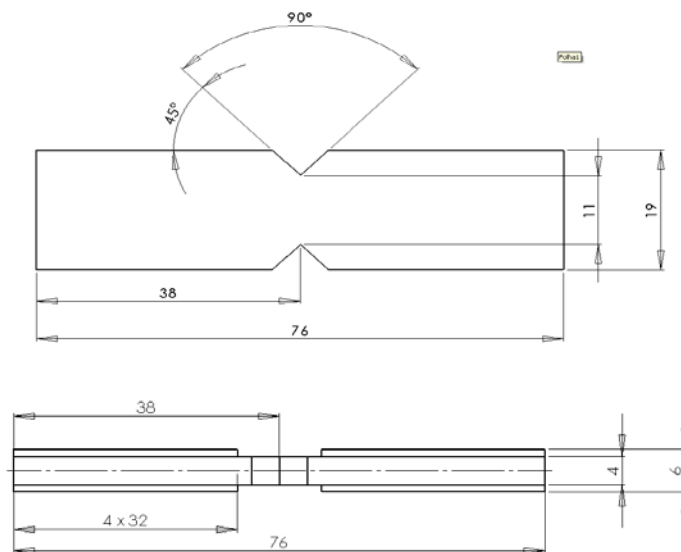


Figura 4.3: Geometria do corpo de prova

4.3 Teste hidrostático (Pressão de falha)

O Anexo D da ISO 24817:2006 exige, para o reparo de danos transpassantes, o cálculo da taxa de liberação de energia γ_{LCL} . Para a obtenção dessa propriedade são necessários nove tubos: três com furos de 10mm, três com furos de 15mm e três com furos de 25mm. Não é especificada

a espessura de reparo a ser utilizada nos testes, porém o projetista deve estipular uma espessura tal que a falha ocorra antes que a pressão de ruptura do tubo seja atingida.

Mais detalhes a respeito do teste foram apresentados na Seção 3.10.

Depois de aplicado o laminado de reparo e realizado o processo de cura, os tubos reparados são submetidos ao teste hidrostático.

A rampa de incremento de pressão é conforme definido na Norma ASTM D 1599:05, 1bar por segundo. A pressão é adicionada ao sistema até o momento da falha do corpo de prova (vazamento). A pressão de falha é registrada para, posteriormente, ser utilizada no cálculo da taxa de liberação de energia.

A falha deve ocorrer sob a forma de delaminação na interface laminado de reparo/substrato, caso não ocorra esse tipo de falha o cp deve ser descartado e um novo teste realizado.

Para garantir a segurança durante a realização dos testes hidrostáticos, um *bunker*, dotado de paredes de concreto e uma porta reforçada de aço carbono, foi construído nas dependências do Laboratório de Adesão e Aderência.

Para a pressurização foi utilizada uma bomba de teste hidrostático, com acionamento pneumático, com capacidade de teste de 700bar.



Figura 4.4: Local do teste Hidrostático

Foi confeccionado um conjunto de flanges ligados por hastes para realizar o fechamento dos tubos para que o teste hidrostático pudesse ser realizado.

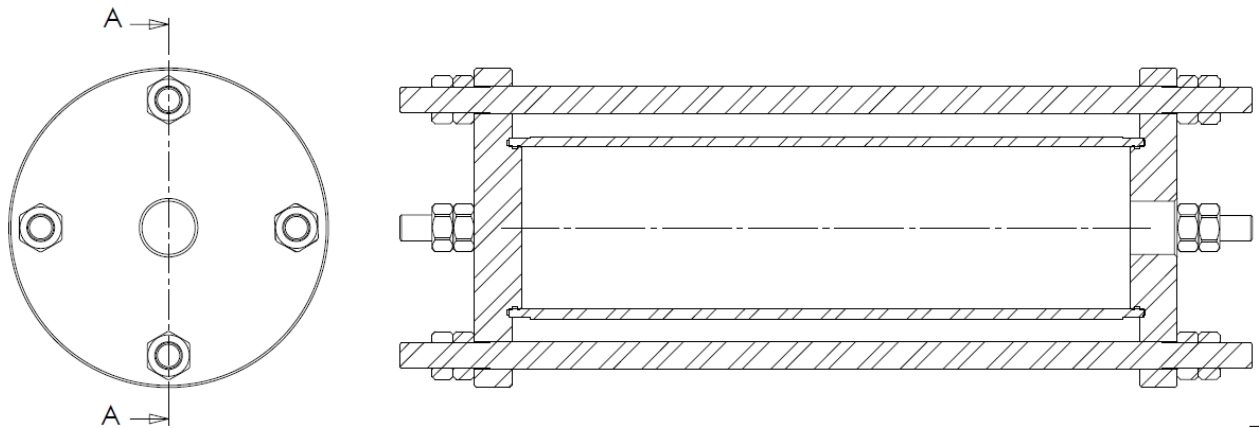


Figura 4.5: Representação esquemática dos flanges



Figura 4.6: Tubo flangeado

4.4 Digestão ácida (percentual de fibras)

Para a determinação do percentual volumétrico de fibra e resina do laminado foi utilizado o procedimento B descrito na Norma ASTM D 3171:2006 (Método de Teste para a Determinação de Constituintes de Materiais Compósitos).

Trata-se de um teste de digestão ácida. As etapas do teste são demonstradas a seguir:

- Uma pequena amostra do laminado, de aproximadamente 0,3g, é pesada em uma balança analítica;
- A amostra é colocada em um banho aquecido contendo 20ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) durante três horas;
- Com a mistura ainda quente são adicionados cerca de 10ml de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) com concentração de 30% à solução, até que a mesma fique transparente;
- A solução é filtrada em um cadinho poroso com a ajuda de uma bomba de vácuo. Nesse processo as fibras também são lavadas com acetona e água destilada para que todo o vestígio de ácido seja retirado;
- As fibras são secas em uma estufa durante 1 hora a $100^\circ C$;
- Após resfriadas as fibras são pesadas em uma balança analítica.

Esse processo produz como resultado o percentual em peso de fibras, utilizando a densidade dos constituintes do compósito é possível chegar ao percentual volumétrico de cada constituinte.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi iniciado a partir de uma análise da ISO 24817:2006. Como resultado dessa análise chegou-se à conclusão de que seria necessário montar um laboratório destinado ao trabalho com materiais compósitos. Tal infraestrutura era inexistente no Instituto Politécnico (IPRJ-UERJ), então foi feito um levantamento de todos os equipamentos, bem como da área necessária à implantação do laboratório.

5.1 Laboratório de Materiais Compósitos

O Laboratório de Materiais Compósitos foi montado junto ao laboratório de Adesão e Aderência (LAA-UERJ), e atualmente é um local apto à confecção de corpos de prova de material compósito em conformidade com as Normas vigentes.



Figura 5.1: Laboratório de materiais compósitos

Toda obra civil e aquisição de equipamentos foram custeados com recursos provenientes dos projetos desenvolvidos pelo Laboratório de Adesão e Aderência.

Os principais equipamentos do laboratório de materiais compósitos são listados a seguir e apresentados na Figura 5.2.

- Sistema de climatização
- Estufa
- Freezer (-18°C)
- Gerador
- Bomba de vácuo
- Máquina de corte



Figura 5.2: Equipamentos do Laboratório de Materiais Compósitos

Foram criados procedimentos e metodologias para a confecção dos corpos de prova em conformidade com o exigido pela Norma ISO 24817:2006.

5.2 Seleção de materiais e preparo dos corpos de prova

Para a seleção de materiais foram levados em consideração alguns fatores: facilidade de aquisição no mercado interno, propriedades mecânicas, manuseio, preço e logística de transporte.

Todo o desenvolvimento do sistema de reparo foi focado na Classe 3 de reparos conforme definido na Tabela 3.1. O desenvolvimento da metodologia de aplicação do sistema de reparo, bem como a seleção de materiais, foi baseado no fato de o reparo aplicado em campo tenha a mesma qualidade e desempenho do reparo aplicado no laboratório.

5.3 Preparo de superfície

5.3.1 Jateamento

Para o preparo de superfície foi utilizado um equipamento de jateamento portátil. Esse equipamento foi utilizado com o objetivo de se reproduzir em campo os resultados obtidos em laboratório. Na Figura 5.3 são apresentados o compressor de parafuso, movido à gasolina com vazão de ar de 80 PCM e o equipamento de jateamento.



Figura 5.3: Compressor de parafuso e equipamento de jateamento

Foi utilizada granalha de aço com granulometria G40 que, utilizando o equipamento acima citado, atinge o padrão de rugosidade, R_t , recomendado pela Petrobras para a colagem de adesivos tipo massa. No caso é recomendado um R_{tmin} de $88\mu\text{m}$. De acordo com a avaliação da rugosidade o tratamento utilizado atingiu um R_t de $96\mu\text{m}$.

A Figura 5.4 apresenta uma varredura feita no rugosímetro tridimensional Talyscan Taylor Robson em um cp de aço carbono. Esse processo é utilizado para verificação do padrão de rugosidade da superfície.

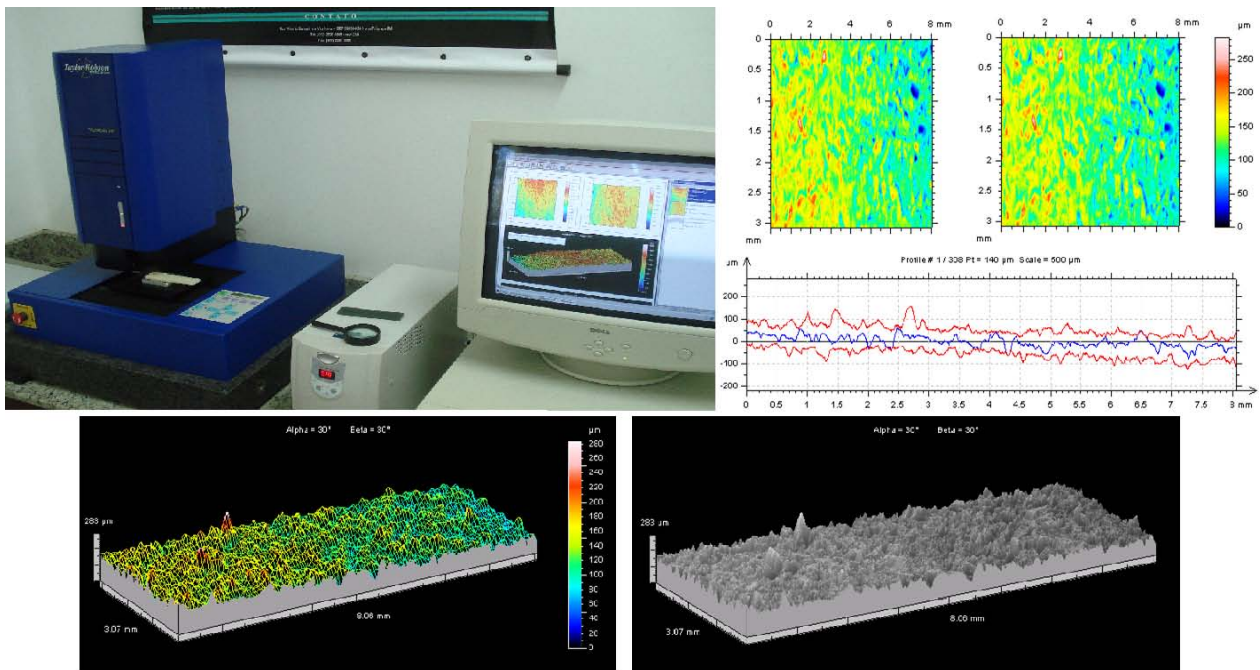


Figura 5.4: Varredura com rugosímetro tridimensional

Após jateada, a superfície é limpa com acetona, em seguida é aplicado um promotor de adesão à base de silano. Esse promotor tem por finalidade criar ligações químicas na interface substrato/sistema de reparo. Estudos feitos pelo LAA demonstram que há um ganho significativo na resistência ao cisalhamento em juntas coladas que sofreram tratamento com substâncias organometálicas, LIMAVERDE (2008).

5.3.2 *Primer*

Foi desenvolvido pela empresa Polinova, em parceria com o LAA, um adesivo para atuar como *primer* na interface substrato laminado de reparo. Esse adesivo possui alta viscosidade o que permite sua aplicação na superfície com utilização de espátulas sem que o mesmo venha a escorrer.

Tem duas funções:

- Nivelar a superfície, que muitas das vezes pode ter sofrido amassamentos ou perda acentuada da espessura.
- Melhorar a adesão na interface substrato/laminado de reparo, garantindo a transferência de carga do substrato para o laminado de reparo.

5.4 Desenvolvimento do laminado de reparo

5.4.1 Tecido pré-impregnado

Inicialmente optou-se por trabalhar com tecidos pré-impregnados unidirecionais de fibra de vidro e resina epóxi. A escolha de um tecido unidirecional foi baseada no modo de fratura de dutos. Em quase 100% dos casos, as fraturas ocorrem na direção circunferencial do duto, logo, utilizando esse tipo de tecido estaríamos com toda a resistência do laminado voltada para a direção de maior esforço. Porém, em uma análise mais detalhada da ISO 24817:2006 verificou-se a necessidade de calcular a espessura do reparo baseada nas propriedades circunferenciais e axiais do laminado, utilizando como espessura de projeto a maior espessura obtida. Esse modelo é baseado nas tensões atuantes no duto, e como visto na Seção 2.5, a tensão circunferencial é duas vezes maior que a axial, logo uma configuração ideal para o tecido seria de 2:1, ou seja, aproximadamente 66% das fibras no sentido circunferencial e 34% no sentido axial.

O tecido pré-impregnado tem como vantagens:

- Excelente resistência mecânica;
- Facilidade de aplicação;

- Melhor controle da proporção fibra/resina;
- Resina já vem catalisada da origem (cura ativada por temperatura), fato que pode eliminar um grave problema que é um erro na proporção de mistura da resina.

O pré-preg apresenta como desvantagens:

- Armazenamento, tendo em vista que o mesmo deve ser armazenado à temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Prazo de validade garantido pelo fornecedor de apenas 1 ano;
- Inexistência, no mercado interno, de um laminado na configuração desejada (2:1);
- Falta de informação a respeito da resina utilizada pelo fornecedor;
- Alto custo.

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizado o tecido *WRU 304* da empresa *Texiglass*. Trata-se de um tecido pré-impregnado, unidirecional, com gramatura de 300g/m^2 e largura de 300mm . A resina epóxi utilizada apresenta uma T_g de 130°C .



Figura 5.5: Tecido pré-impregnado

Para a cura do laminado foi utilizado o sistema de bolsa de vácuo e um equipamento chamado “*HotBonder*”. Esse equipamento faz o controle da rampa de temperatura e do vácuo aplicado ao sistema, emitindo um relatório de toda a operação.

O tempo de cura foi de duas horas com temperatura de 150°C . Foi programada uma rampa de aquecimento de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$.



Figura 5.6: HotBonder.

5.4.1.1 Confeção dos corpos de prova para ensaio de tração

A placa para confecção dos cp's de tração foi obtida a partir do empilhamento de 10 camadas do tecido pré-impregnado orientadas a 0° . Na Figura 5.7 é demonstrado o processo utilizado: inicialmente temos o empilhamento das camadas de pré-preg; o segundo passo é a aplicação de uma camada de Armalon. Trata-se de um tecido antiaderente que apresenta uma determinada porosidade, possibilitando que o excesso de resina seja retirado do tecido pré-impregnado, seguido pela aplicação de algumas camadas de tecido absorvedor, responsável por absorver o excesso de resina existente no tecido pré-impregnado; finalmente temos o processo de cura, o qual foi realizado com auxílio de uma manta térmica e utilização de bolsa de vácuo.



Figura 5.7: Preparo da placa para confecção dos cp's de tração

Após a colagem dos “*tabs*” os corpos de prova foram cortados nas dimensões recomendadas pela Norma.

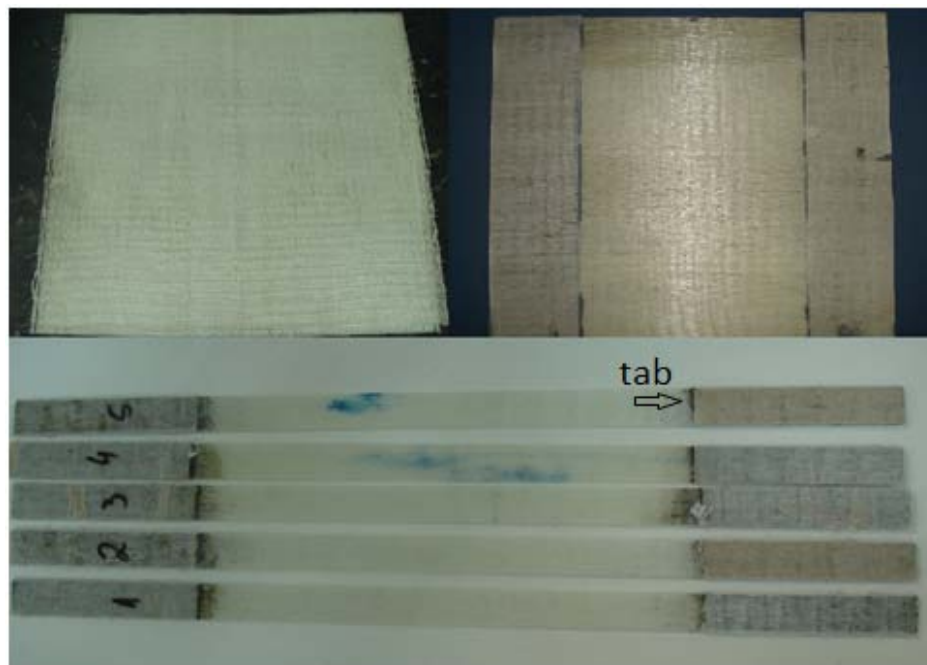


Figura 5.8: Corpos de prova de tração (pré-preg)

5.4.1.2 Confeccção dos corpos de prova para teste hidrostático

Os corpos de prova destinados ao teste hidrostático foram confeccionados conforme exigido pela ISO 24817:2006.

Foram utilizadas seções de um tubo de aço carbono API 5L X60 Sch 40 com diâmetro nominal de 6" e comprimento axial de 600mm, contendo um furo de 10mm de diâmetro.

A Norma não especifica a espessura e o comprimento axial do reparo a ser aplicado.

Foram aplicadas 15 voltas do tecido pré-impregnado com 300mm de largura, proporcionando uma espessura, depois de realizada a cura, de aproximadamente 3mm.

A Figura 5.9 demonstra a seqüência em que foi preparado o corpo de prova.



Figura 5.9: Preparo do corpo de prova para teste hidrostático (pré-preg)

Cada passo é explicado mais detalhadamente a seguir:

- Temos um tubo de 6" de diâmetro nominal, com um furo de 10mm de diâmetro, jateado onde já foi feita a aplicação do promotor de adesão e do primer;
- É iniciada a aplicação do tecido pré-impregnado, após curada cada camada possui 0,2mm de espessura. Foram aplicadas 15 camadas, totalizando um reparo de 3mm de espessura;
- Aplicação do Armalon;

- d) É aplicado o tecido absorvedor que tem por função absorver o excesso de resina que passa através do Armalon;
- e) Instalação dos termopares, responsáveis por monitorar a temperatura, a manta térmica e foi preparada a bolsa de vácuo. O vácuo foi feito através de uma bomba que funciona por Venturi;
- f) Temos o equipamento “HotBonder” que controlou todo o processo de cura.

O aspecto final do corpo de prova é demonstrado na Figura 5.10:



Figura 5.10: Corpo de prova com tecido pré-impregnado

5.4.1.3 Determinação percentual de fibra e resina

Uma pequena amostra da placa utilizada para os cps de tração foi utilizada para a realização do teste de digestão ácida.

Para a determinação do percentual em peso de fibra e resina do laminado feito com o tecido pré-impregnado foi utilizado o procedimento descrito na Seção 4.4. A Figura 5.11 demonstra o passo a passo do processo de digestão ácida.

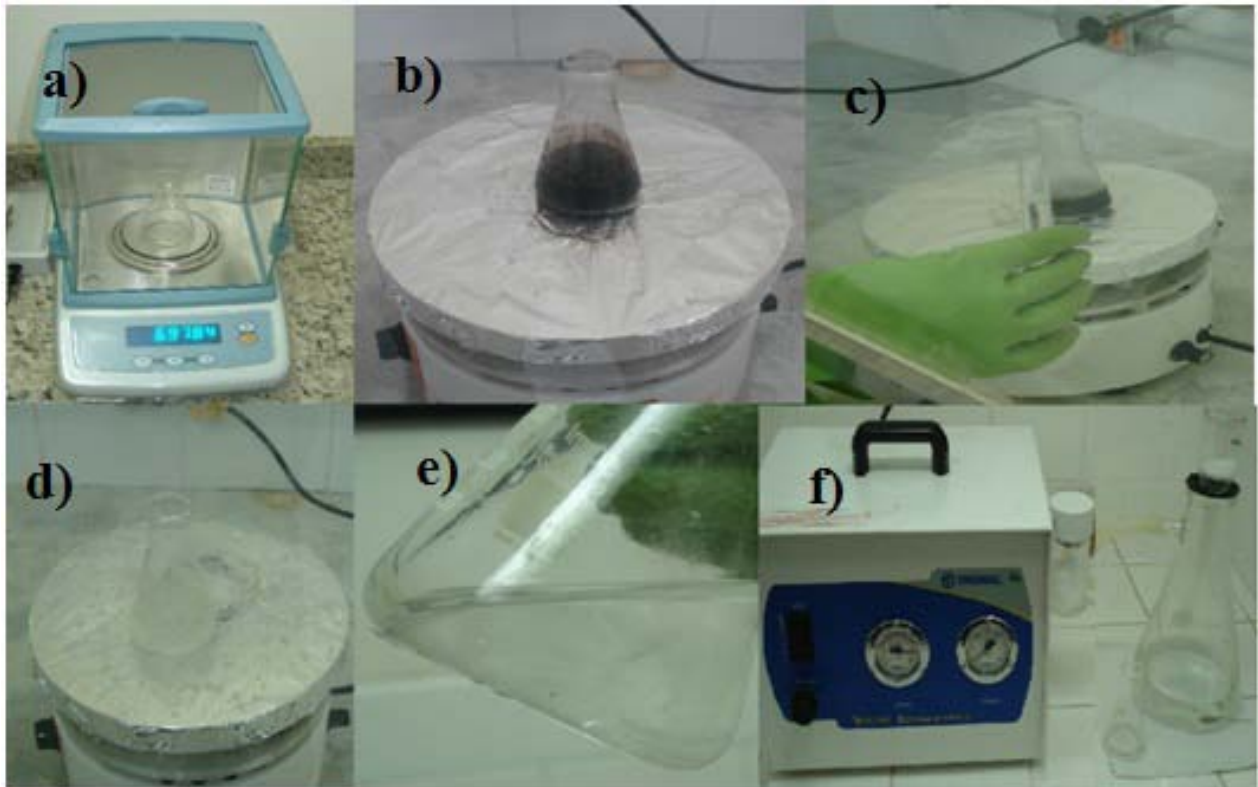


Figura 5.11: Teste de digestão ácida

Cada passo é explicado detalhadamente a seguir:

- a) Pesagem da amostra em balança analítica;
- b) A amostra é colocada em um banho aquecido de ácido sulfúrico;
- c) Peróxido de hidrogênio é adicionado à mistura ainda quente;
- d) Após ser adicionada quantidade suficiente de peróxido, a mistura fica transparente;
- e) Solução contendo as fibras;
- f) Filtragem das fibras com auxílio de uma bomba de vácuo.

Durante o processo de filtragem as fibras são lavadas com acetona para que todo o vestígio de ácido seja retirado. Após a filtragem, as fibras são secas em uma estufa a 100°C durante 1 hora e, terminado esse processo, as fibras são pesadas na balança analítica. Comparando a massa obtida com a massa inicial da amostra, é possível determinar o percentual em peso de fibras do laminado.

5.4.2 Laminação manual

Como alternativa à utilização do tecido pré-impregnado optou-se por se trabalhar com o processo de laminação manual, embora exija um maior controle no processo de aplicação esse material apresenta um custo significativamente menor que o tecido pré-impregnado. Outra vantagem desse processo foi a possibilidade de se desenvolver uma resina de laminação com características voltadas para a aplicação de reparo em dutos.

5.4.2.1 Seleção do tecido *in-situ*

Inicialmente, a busca no mercado foi concentrada em um tecido bidirecional que apresentasse as seguintes características: baixa gramatura, o que resulta em uma maior facilidade para impregnação da resina; trama de aproximadamente 2:1, o tecido deve apresentar aproximadamente 66% de suas fibras orientadas no seu sentido longitudinal (sentido circunferencial do duto) e 34% no sentido transversal (sentido axial do duto), a escolha dessa configuração é baseada nas tensões atuantes em um cilindro de parede fina, a tensão circunferencial é duas vezes maior que a tensão axial (Seção 2.5). Tal tecido não se encontra disponível no mercado, podendo ser feito sob encomenda, porém o lote inicial produzido é muito grande e possui um alto custo, inviabilizando a pesquisa. Como alternativa foram selecionados dois tecidos com configurações diferentes, já disponíveis para venda no mercado.

Assim escolhemos os seguintes tecidos:

- Um tecido com fibras orientadas a 0° no seu sentido longitudinal, gramatura de 434g/m^2 e uma largura de 400mm.
- Um tecido com fibras orientadas a 90° com o sentido longitudinal, gramatura de 261g/m^2 e largura de 400mm.

Baseado nas gramaturas dos tecidos chegou-se a um laminado que apresenta aproximadamente 62% de suas fibras no sentido longitudinal (sentido circunferencial do duto) e 38% das fibras no sentido transversal (sentido axial do duto), que é uma configuração bem próxima à desejada inicialmente.



Figura 5.12: Tecidos utilizados na laminação manual

5.4.2.2 Resina de laminação

Para a seleção da resina foram levados em consideração fatores como: molhabilidade da fibra, viscosidade, tempo de cura e acima de tudo temperatura de transição vítrea. Todas as resinas são compostas por dois componentes e a cura é realizada à temperatura ambiente.

A Empresa Polinova desenvolveu nove sistemas de resina. Corpos de prova foram laminados utilizando a mesma configuração e quantidade de camadas de tecido de fibra de vidro. Três sistemas foram descartados, um apresentava uma viscosidade muito alta, um apresentava uma viscosidade muito baixa e o último teve uma cura muito demorada. O tempo de cura estabelecido foi de 2 horas.

Utilizando os laminados confeccionados com as seis composições restantes, foram confeccionados corpos de prova para ensaios térmicos em DMA. Antes de realizar o teste as amostras sofreram pós-cura, uma hora submetidas à temperatura de 130°C. Segundo APICELLA (1982), a pós-cura em polímeros produz um aumento na temperatura de transição vítrea, T_g . A temperatura e o tempo de pós-cura foram determinados pelo fornecedor da resina.

Os corpos de prova destinados ao ensaio térmico são demonstrados na Figura 5.13.

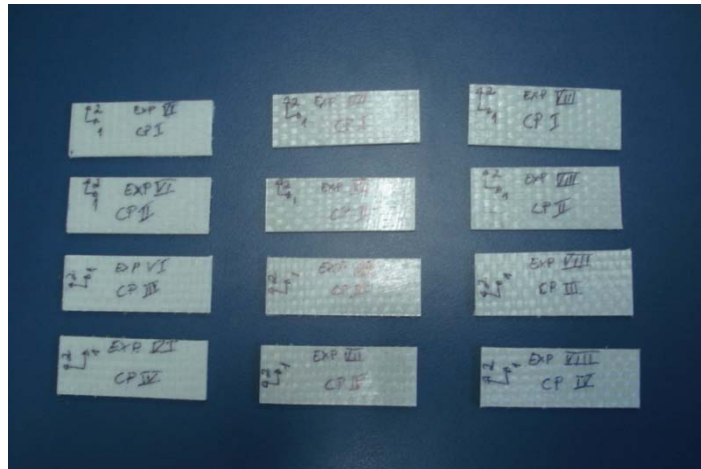


Figura 5.13: Corpos de prova para ensaio em DMA

5.4.2.3 Processo de laminação manual com vácuo

É sabido que melhores propriedades mecânicas são obtidas em compósitos com alto teor de fibra. O método mais eficiente para que se obtenha essa condição é a aplicação de vácuo durante o processo de cura do laminado.

Esse procedimento foi realizado com sucesso durante a confecção dos corpos de prova de tração, que apresentaram um percentual em volume de fibra de aproximadamente 68%, um percentual excelente, em se tratando de um processo de laminação manual.

Porém a aplicação de vácuo nos corpos de prova utilizados no teste hidrostático não obteve o mesmo sucesso, por se tratar de uma circunferência, e não de uma superfície plana. Como no caso da placa para cps de tração. Surgiram rugas ao longo do reparo, conforme demonstrado na Figura 5.14. O tubo onde foi aplicado o sistema de reparo para teste possui um furo, o que levou ao surgimento de um segundo problema. O vácuo criou caminhos ao longo da espessura do laminado, o que facilitou o vazamento durante o teste hidrostático.



Figura 5.14: Rugas provocadas pela aplicação de vácuo

Tendo em vista esses problemas optou-se por utilizar simplesmente o processo de laminação manual.

5.4.2.4 Processo de laminação manual sem vácuo

5.4.2.4.1 Corpos de prova para ensaio de tração

Uma placa com exatamente a mesma configuração do laminado aplicado nos tubos de aço carbono foi laminada para a obtenção dos corpos de prova para o ensaio de tração.

Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com a norma ASTM D 3039:2006. De acordo com essa Norma para corpos de prova com configuração bidirecional não há necessidade de colagem dos “*tabs*”.

Antes de cortar os corpos de prova nas dimensões especificadas a placa passou por um processo de pós-cura de uma hora em uma estufa a 130°C.

Após o corte dos cps, os mesmos foram condicionados no laboratório por um tempo superior a 24 horas, à temperatura de 23°C e umidade relativa do ar de 50%.

A Figura 5.15 apresenta a placa utilizada para a confecção dos cp's, seguida do processo de corte e, finalmente, os cps prontos para a realização do ensaio.



Figura 5.15: Corpos de prova para ensaio de tração

Uma amostra de aproximadamente 0,3 gramas foi retirada da placa para a realização do teste de digestão ácida.

5.4.2.4.2 Corpos de prova para ensaios hidrostáticos

Os corpos de prova foram confeccionados conforme recomendações da Norma ISO 24817:2006.

As dimensões dos cps são as mesmas dos corpos de prova utilizados para o tecido pré-impregnado. A diferença está apenas na largura dos tecidos. O comprimento axial do reparo feito a partir do processo de laminação manual é de 400mm (largura mínima disponível no mercado).

Foram confeccionados 6 corpos de prova, 3 com furos de 25mm e 3 com furos de 10mm. O laminado de reparo aplicado consiste de 9 camadas, o que confere ao reparo uma espessura de aproximadamente 3mm. O processo de laminação manual é demonstrado na Figura 5.16, o processo é praticamente o mesmo adotado no pré-preg, diferindo no fato da aplicação da resina de laminação entre as camadas.

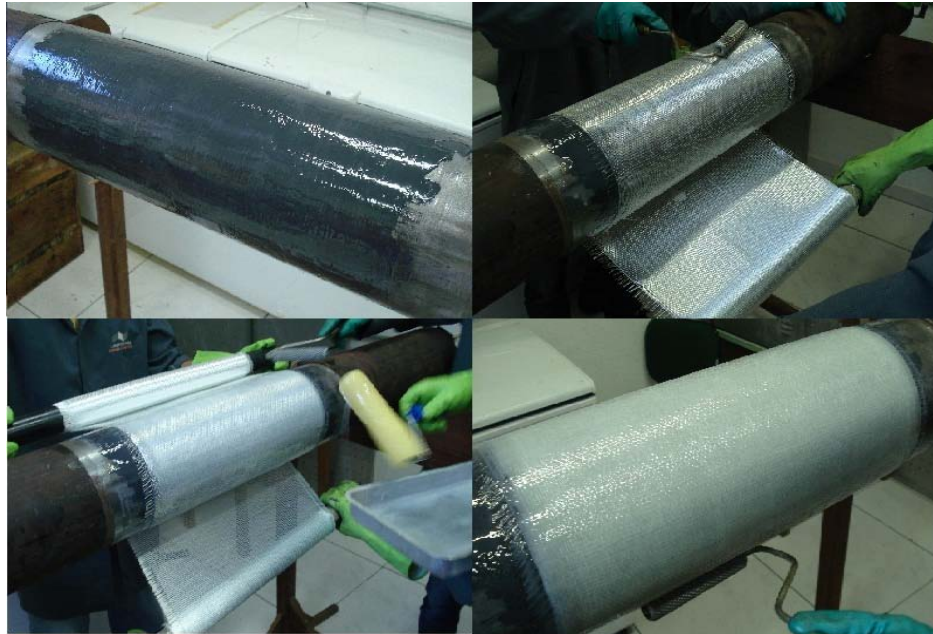


Figura 5.16: Confeção de cp utilizando o processo de laminação manual

Após a cura do laminado o corpo de prova foi submetido ao processo de pós-cura similar ao dos corpos de prova de tração. Uma hora a 130°C em uma estufa.



Figura 5.17: Aspecto final do cp feito à partir do processo de laminação manual

Amostras foram retiradas de um tubo ensaiado para a realização do teste de digestão ácida.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Tecido pré-impregnado

6.1.1 Ensaio de tração

Os corpos de prova foram ensaiados na máquina de ensaios universal SHIMADZU AGI 100 kN, as condições de teste foram conforme previsto na Norma ASTM D3039, temperatura ambiente de $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de $50\% \pm 10\%$. A velocidade adotada no teste foi de 2mm/min.

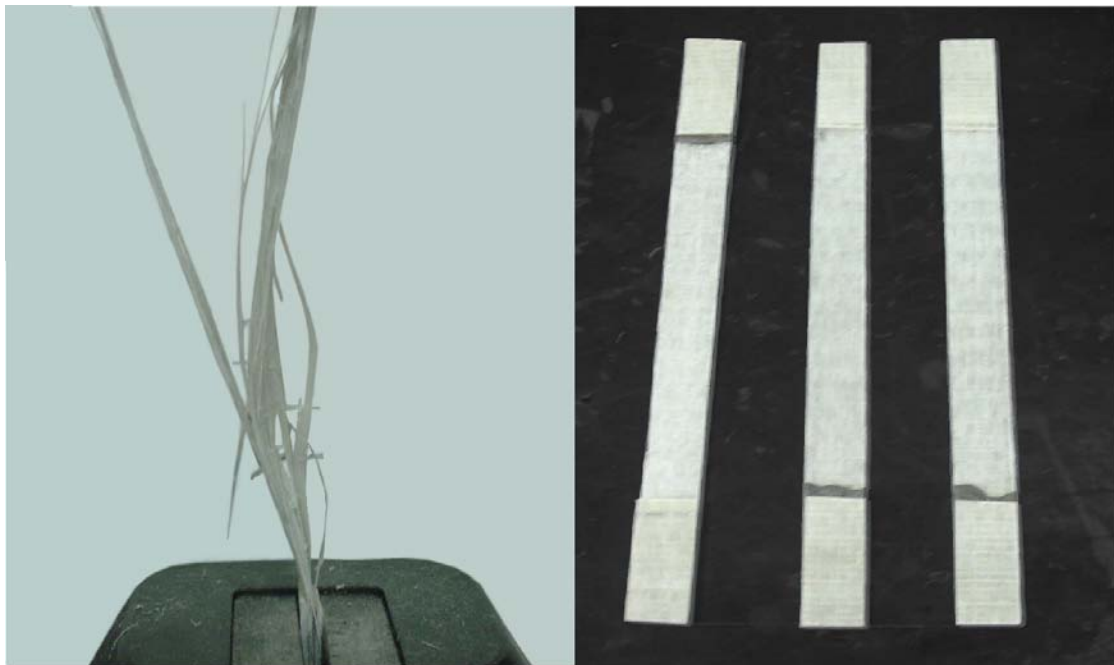


Figura 6.1: Corpo de prova ensaiado

A propriedade principal a ser obtida pelo ensaio de tração é o Módulo de Young. Para que essa propriedade fosse apurada com exatidão, foi utilizado um extensômetro SHIMADZU modelo SG50-50.

Inicialmente os corpos de prova não foram carregados até a tensão de ruptura, para a preservação da integridade do extensômetro. Tendo em vista que a propriedade desejada é o módulo de Young, basta obter-se a inclinação da reta. A deformação na ruptura pode ser calculada de maneira aproximada, considerando a lei de Hooke, projetando as retas da Figura até a tensão média de ruptura dos cps.

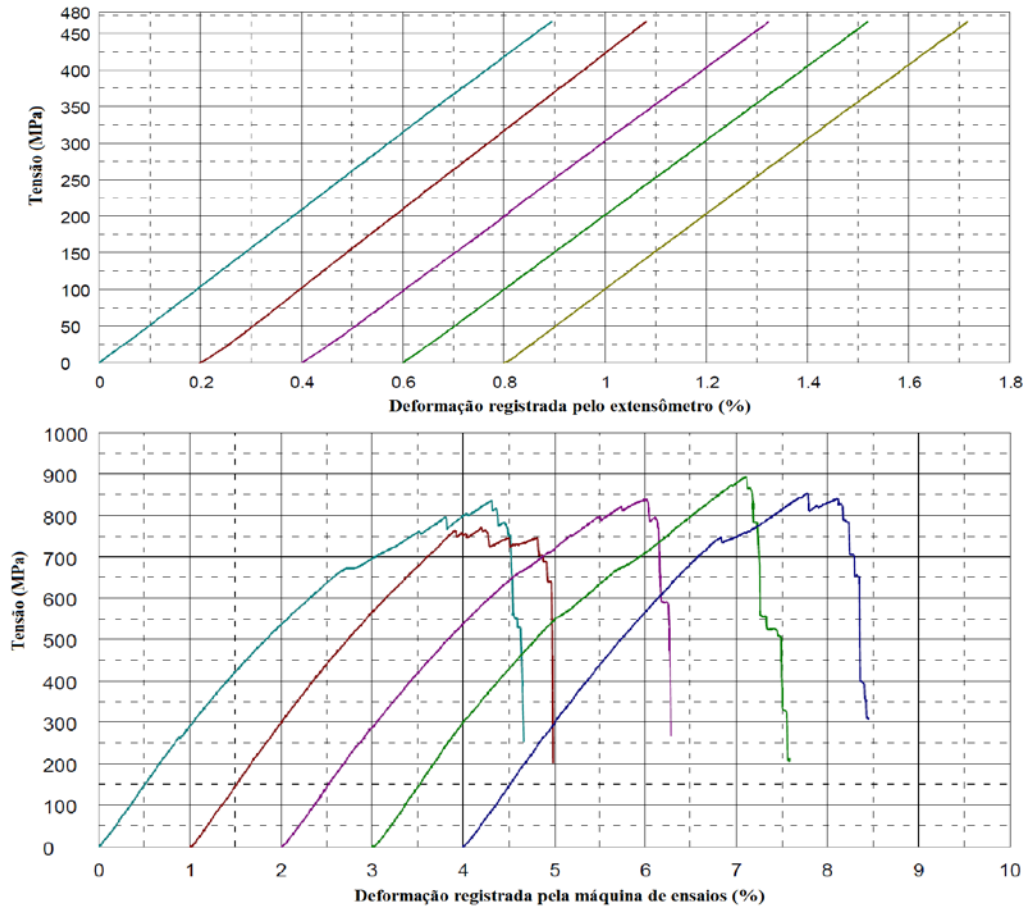


Figura 6.2: Ensaio de tração pré-preg

Corpo de prova	Espessura [mm]	Largura [mm]	Gauge Length [mm]	Tensão Máxima [MPa]	Módulo de Young [GPa]
1	2	15	50	837.13	52.58
2	2	15	50	771.20	53.48
3	2	15	50	841.04	51.09
4	2	15	50	894.97	50.94
5	2	15	50	855.63	51.13
Média				839.99	51.84
Desvio Padrão				44.75	1.13

Tabela 6.1: Resultados do ensaio de tração do pré-preg

Fazendo a projeção e considerando uma tensão de ruptura de aproximadamente 840MPa teremos uma deformação na ruptura em torno de 1,6%.

Utilizando as propriedades dos materiais constituintes do tecido pré-impregnado fornecidos pelo fabricante e fazendo uso dos resultados obtidos no teste de digestão ácida é possível determinar a fração volumétrica de fibras do laminado.

Material	Densidade [g/cm ³]	Módulo de Young [GPa]
Fibra de vidro	2.55	72
Resina epóxi	0.998	3.5

Tabela 6.2: Propriedades do tecido pré-impregnado (Texiglass)

O teste de digestão ácida fornece o percentual em peso de fibras. Fazendo uso da densidade da fibra e da resina chega-se ao percentual em volume conforme demonstrado na Tabela 6.3.

Determinação percentual volumétrico de fibras		
Peso inicial da amostra[g]:	1.935	
Peso após digestão[g]:	Fibra	Resina
	1.6735	0.2615
Percentual em peso[%]:	Fibra	Resina
	86.5	13.5
Percentual volumétrico[%]:	Fibra	Resina
	71.5	28.5

Tabela 6.3: Percentual de fibra e resina do laminado

Tendo posse da fração volumétrica de fibra e utilizando a Equação (2.18), é possível determinar de forma teórica o Módulo de Young na direção 1, E_1 .

Cálculo:

$$E_1 = 72 \cdot 0,715 + 3,5 \cdot 0,285 = 52,48 \text{ MPa}$$

O resultado obtido teoricamente pode ser comparado com a média dos valores obtidos nos ensaios mecânicos.

Percentual volumétrico de fibras [%]		Módulo de Young teórico [GPa]	Módulo de Young empírico [GPa]	Diferença entre Módulos [%]
Circunferencial	71.5	52.48	51.84	1.22

Tabela 6.4: Comparação entre Módulo teórico e empírico

É possível notar que o valor praticamente se iguala aos valores obtidos empiricamente, o que corrobora a eficácia na produção dos corpos de prova.

6.1.2 Teste hidrostático

O primeiro ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica Teórica e Aplicada da Universidade Federal Fluminense.

O teste foi realizado à temperatura ambiente e a pressão de falha foi de 210bar.

O modo de falha foi não conforme com o exigido pela ISO 24817. Ocorreu vazamento através da espessura do laminado (formação de pequenas gotas de água, destacadas em vermelho nas Figuras 6.3 e 6.4), diferente do modo de falha requerido pela Norma, que deve ser uma falha por delaminação. Esse mesmo tipo de falha ocorreu em outros dois cps ensaiados no Laboratório de Adesão e Aderência.

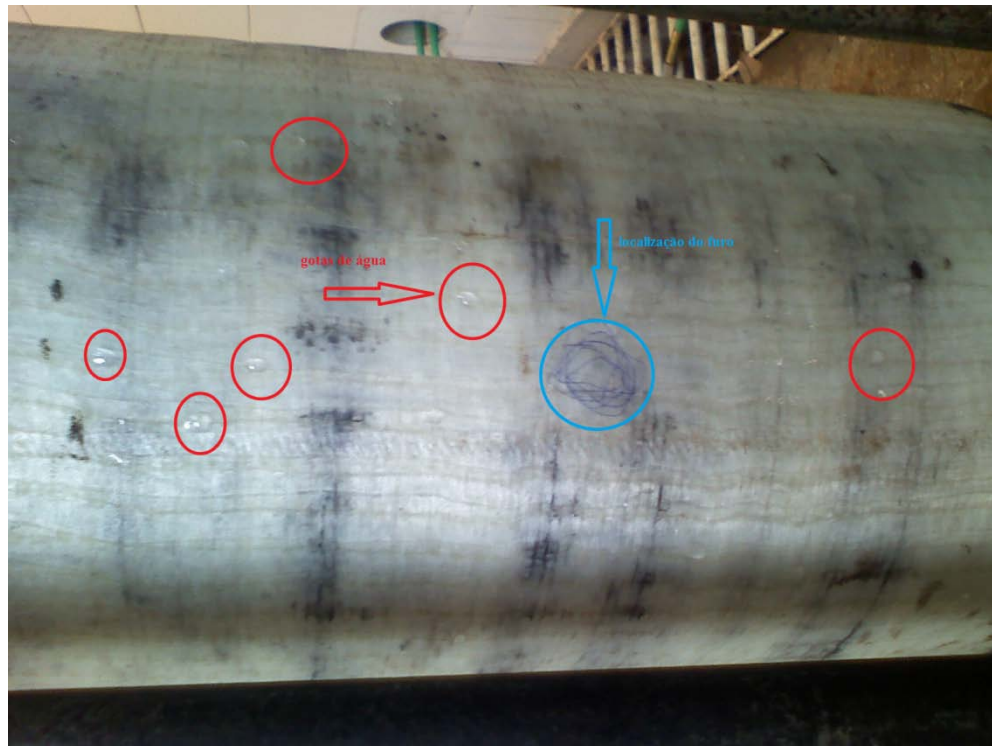


Figura 6.3: Falha ocorrida no teste hidrostático (vista 1)

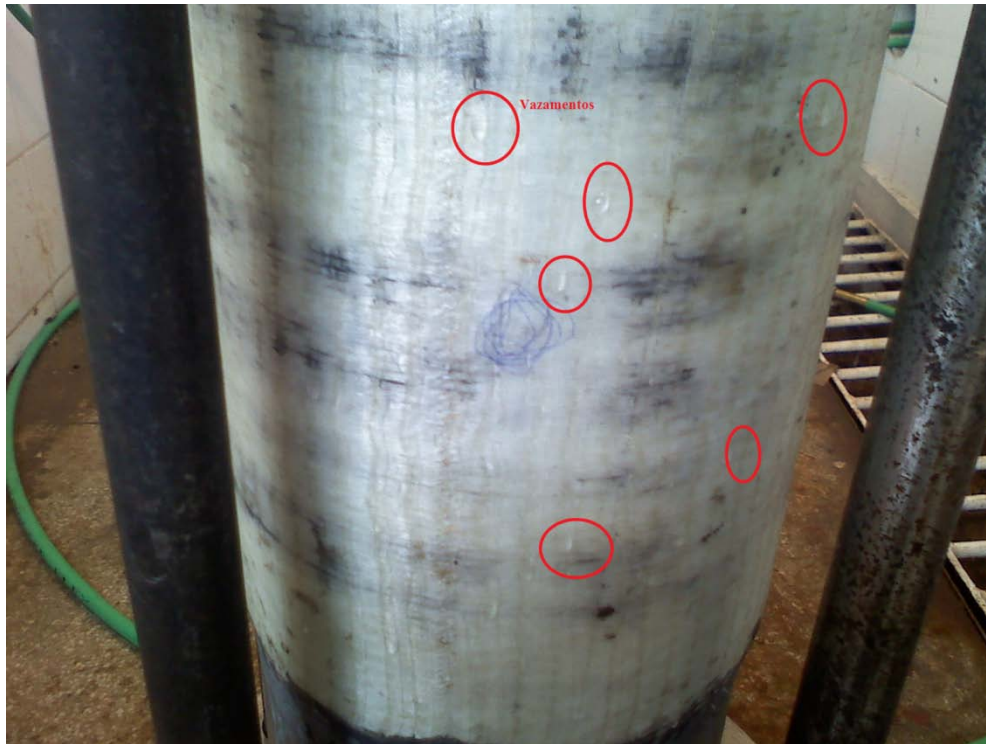


Figura 6.4: Falha ocorrida no teste hidrostático (vista 2)

Posteriormente, após a aquisição de uma bomba de teste hidrostático, mais dois testes foram realizados no Laboratório de Adesão e Aderência.

Teste Hidrostático		
Local do ensaio	Tamanho do furo	Pressão de Falha
LMTA	10mm	210bar
LAA	10mm	180bar
LAA	10mm	200bar

Tabela 6.5: Testes hidrostáticos pré-preg

Todos os testes foram realizados à temperatura ambiente.

Embora tenha sido alcançada uma pressão de falha relativamente alta e um pequeno desvio padrão na pressão de falha, um bom acabamento, boa qualidade da ligação na interface, as falhas não ocorreram conforme é exigido pela Norma.

O tipo de falha aliado a outros problemas, como os listados abaixo, motivaram o abandono dos estudos feitos com esse tipo de material.

- Falta de informação a respeito da resina utilizada na impregnação feita pelo fabricante;
- Dificuldade de aquisição, no mercado interno, de um tecido na configuração desejada;
- Preço. No período compreendido entre maio de 2008 e junho de 2009 o tecido pré-impregnado utilizado sofreu um aumento de aproximadamente 400%.

Como alternativa passou-se a trabalhar com o processo de laminação manual.

6.2 Laminação manual sem vácuo

6.2.1 Ensaio térmico

De acordo com a Seção 5.4.2.2 do presente trabalho foram confeccionados corpos de prova para realização de ensaios térmicos.

Os ensaios térmicos em DMA foram realizados no Instituto de Macromoléculas da UFRJ.

O sistema que apresentou a maior temperatura de transição vítrea ($T_g = 134,7 \text{ }^\circ\text{C}$) foi selecionado para a confecção dos corpos de prova destinados à realização dos ensaios mecânicos e testes hidrostáticos.

De acordo com a Tabela 3.4, a T_g obtida possibilita ao laminado uma temperatura máxima de trabalho, para danos transpassantes, de 104°C . Essa temperatura foi utilizada para a realização dos testes hidrostáticos.

O resultado do ensaio térmico do sistema que apresentou o melhor resultado, e consequentemente foi selecionado, é demonstrado na Figura 6.5.

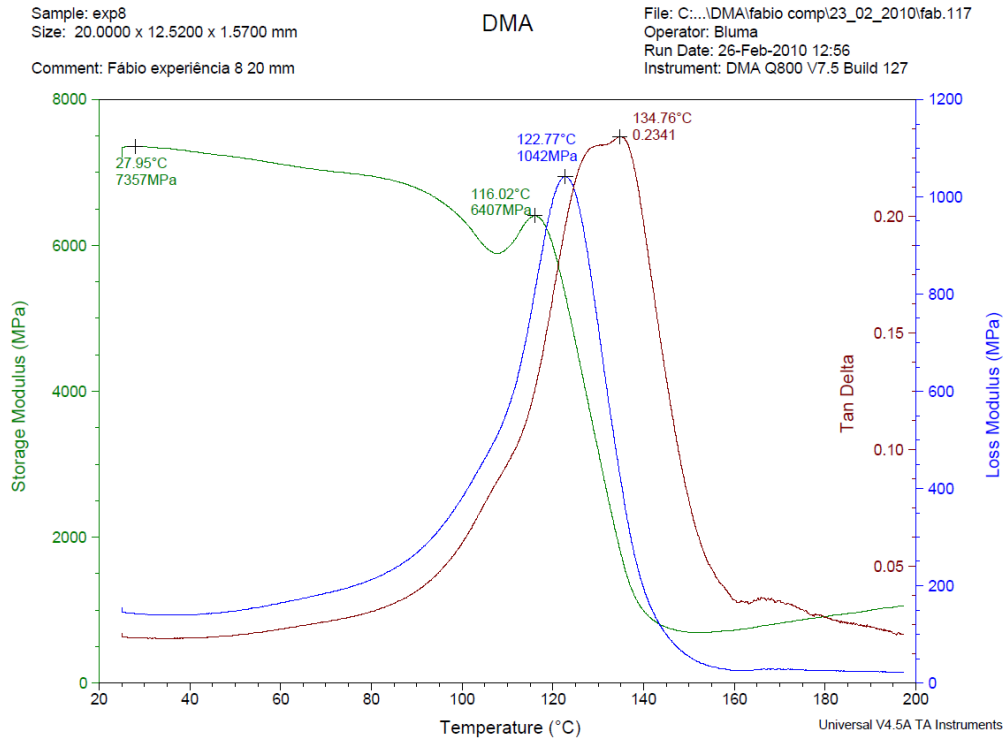


Figura 6.5: Ensaio térmico em DMA

6.2.2 Ensaio mecânicos

Nossos testes foram focados na determinação da taxa de liberação de energia (γ_{LCL}), conforme previsto no Anexo D da Norma ISO 24817:2006. Tal propriedade é necessária ao dimensionamento de reparos para dutos com danos transpassantes. Também serve como parâmetro para avaliar a qualidade da ligação na interface laminado de reparo/substrato.

6.2.2.1 Ensaio de tração

Foram cortados corpos de prova na direção 1 e na direção 2, representando o sentido circunferencial e axial do duto, respectivamente. Os cps foram ensaiados utilizando-se extensômetro para a determinação do módulo de Young, similar ao procedimento utilizado para o pré-impregnado.



Figura 6.6: Ensaio de tração cps de laminação manual

Embora a Norma ASTM D3039 não julgue necessário a utilização dos *tabs* para corpos de prova que possuam configuração bidimensional é possível notar que praticamente todos os cps romperam na garra. Esse tipo de falha provoca uma falha precoce no cp, causando imprecisão na determinação da tensão máxima de ruptura do material, porém essa propriedade não é necessária para o dimensionamento do reparo, visto que a ISO 24817:2006 não utiliza em seus cálculos a tensão de ruptura. Portanto não afeta o resultado esperado no ensaio.

Os gráficos demonstrados na Figura 6.7 apresentam duas inclinações. A primeira inclinação é referente à medida de deformação realizada pelo extensômetro. Porém, para a preservação desse instrumento é recomendável a retirada do mesmo quando a tensão atinge cerca de 60% da tensão de ruptura. A segunda inclinação se refere à deformação nominal registrada pela máquina. É possível notar o tamanho do erro associado na medição do Módulo de Young, se não fosse utilizado o extensômetro.

A Figura 6.7 apresenta os gráficos dos ensaios destinados à determinação de E_I

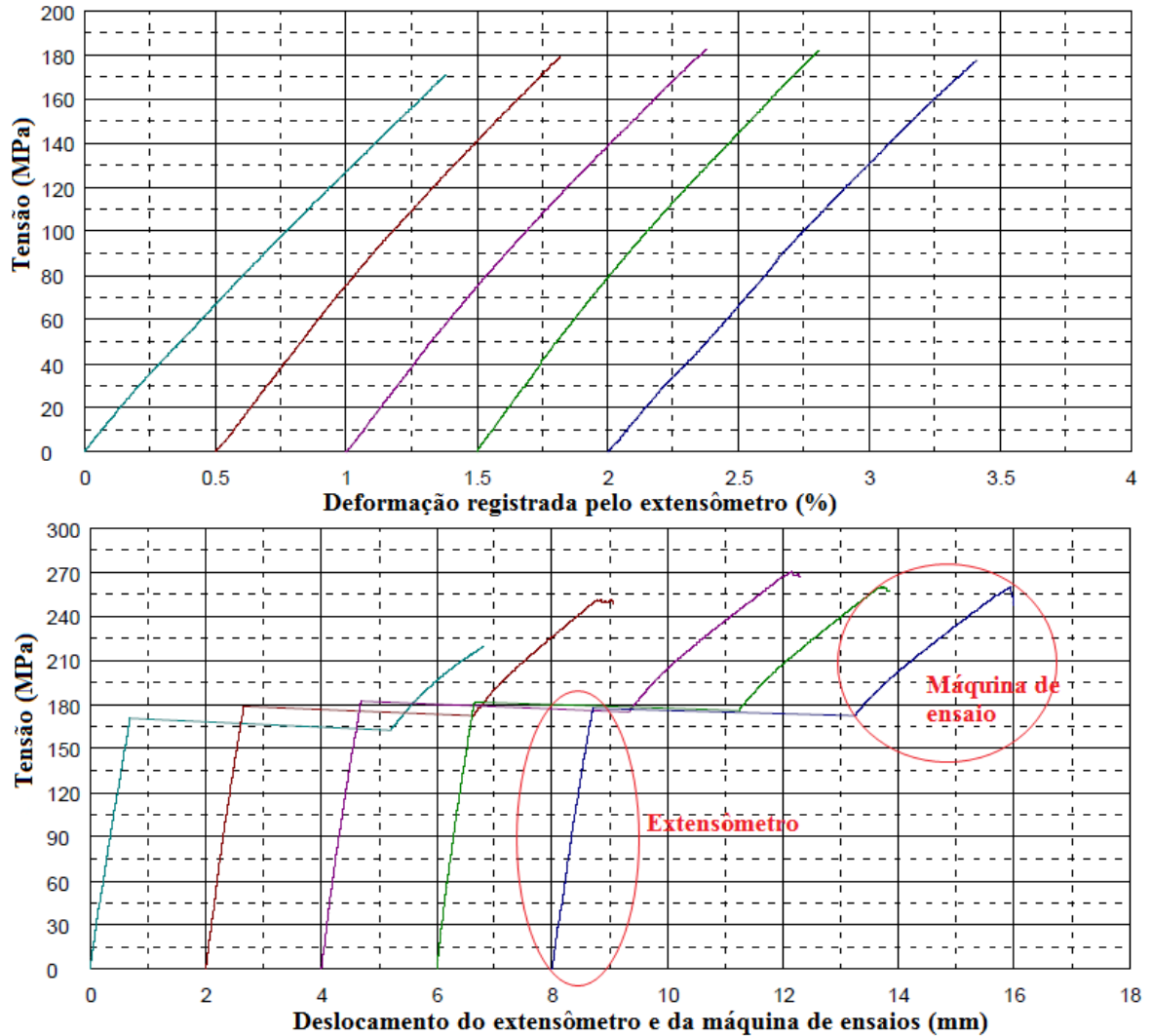


Figura 6.7: Ensaio de tração na direção 1 (circunferencial)

Corpo de prova	Espessura [mm]	Largura [mm]	Gauge Length [mm]	Tensão Máxima [Mpa]	Módulo de Young [Gpa]
1	4.6	24.8	50	219.33	12.09
2	4.6	23.7	50	251.44	13.58
3	4.7	22.5	50	270.81	13.25
4	4.6	23.6	50	260.19	13.83
5	4.7	23.6	50	260.19	12.90
Média				252.39	13.13
Desvio Padrão				19.72	0.68

Tabela 6.6: Ensaio de tração na direção 1 (circunferencial)

A Figura 6.8 apresenta os gráficos dos ensaios destinados à determinação de E_2

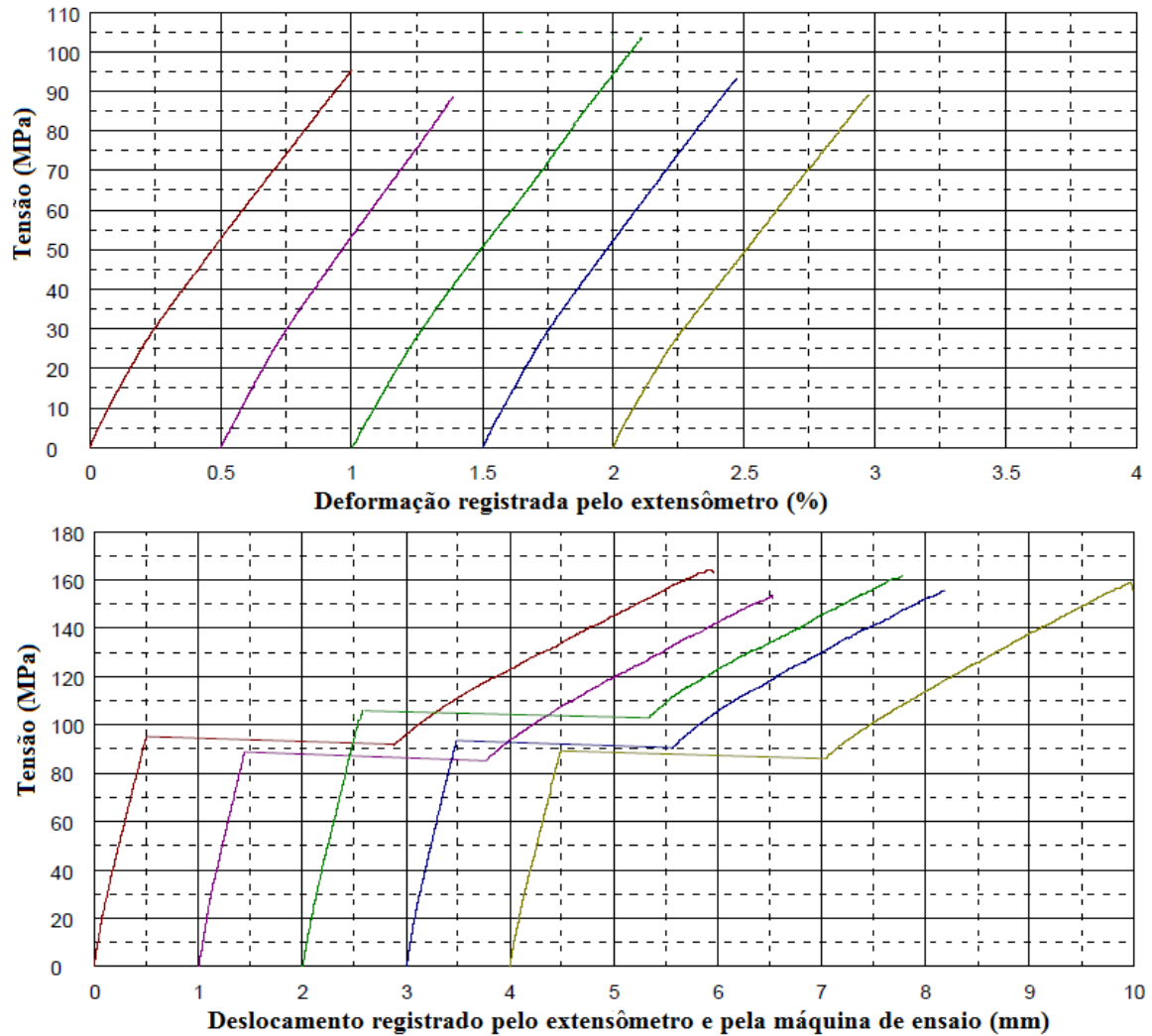


Figura 6.8: Ensaio de tração na direção 2 (axial)

Corpo de prova	Espessura [mm]	Largura [mm]	Gauge Length [mm]	Tensão Máxima [Mpa]	Módulo de Young [Gpa]
1	5	23.1	50	164.51	8.80
2	5	22.6	50	153.61	9.23
3	5	23.6	50	161.94	8.83
4	5	21.6	50	155.89	8.98
5	4.9	23	50	159.21	8.46
Média				159.03	8.86
Desvio Padrão				4.41	0.28

Tabela 6.7: Ensaio de tração na direção 2 (axial)

A Tabela 6.8 apresenta as propriedades dos materiais utilizados no processo de laminação manual. Os dados sobre a fibra foram informados pelo fornecedor. Quanto à resina, a densidade foi medida com um densímetro e o Módulo de Young foi retirado da referência bibliográfica (Tabela 2.4).

Material	Densidade [g/cm ³]	Módulo de Young [Gpa]
Fibra de vidro	2.55	72
Resina epóxi	1.18	3.5

Tabela 6.8: Propriedades dos materiais utilizados para a laminação manual

Foi realizado um teste de digestão ácida para determinar o percentual de fibras da placa de onde foram retirados os cps de tração.

Determinação percentual volumétrico de fibras		
Peso inicial da amostra[g]:	0.3154	
Peso após digestão[g]:	Fibra	Resina
	0.1259	0.1895
Percentual em peso[%]:	Fibra	Resina
	39.92	60.08
Percentual volumétrico[%]:	Fibra	Resina
	23.51	76.49

Tabela 6.9: Percentual de fibras da placa de laminação manual

De posse da fração volumétrica das fibras é possível obter-se, teoricamente, o Módulo de Young do material utilizando a Equação 2.18. Por se tratar de uma configuração bidimensional, uma hipótese foi considerada, somente as fibras orientadas na direção longitudinal à direção de aplicação do carregamento são consideradas como reforço, e as fibras no sentido transversal são consideradas como matriz.

Baseado na gramatura do tecido, o laminado possui 62,45% das fibras na direção circunferencial e 37,55% das fibras na direção axial.

Percentual volumétrico de fibras [%]		Módulo de Young teórico [GPa]	Módulo de Young empírico [Gpa]	Diferença entre Módulos [%]
Circunferencial	14.68	13.56	13.13	3.17
Axial	8.83	9.55	8.86	7.23

Tabela 6.10: Comparação entre Módulos teóricos e empíricos

É possível notar que a diferença entre os resultados teóricos e empíricos é mínima, o que corrobora a eficiência no processo fabricação dos corpos de prova, fato esse que ocorreu de maneira idêntica nos corpos de prova feitos a partir do pré-preg.

Outro fato que foi notado foi a impossibilidade de reproduzir em uma placa plana o resultado atingido na aplicação do laminado no duto. Ao se analisar os corpos de prova confeccionados para o teste hidrostático, notou-se que todos os cps apresentavam uma espessura de reparo de aproximadamente 3mm. Já a placa plana, destinada aos cps de tração, foi confeccionada com o mesmo número de camadas que os tubos, porém apresentou espessuras entre 4,7 e 5mm.

De posse desses valores foi feita uma digestão ácida com uma amostra retirada do laminado de um tubo.

Determinação percentual volumétrico de fibras		
Peso inicial da amostra[g]:	0.3426	
Peso após digestão[g]:	Fibra	Resina
	0.2148	0.1278
Percentual em peso[%]:	Fibra	Resina
	62.7	27.3
Percentual volumétrico[%]:	Fibra	Resina
	43.75	56.25

Tabela 6.11: Percentual de fibras dos cps destinados ao teste hidrostático

É possível notar que a fração volumétrica de fibras é quase duas vezes maior que o da placa, o que nos possibilita projetar as propriedades mecânicas do laminado aplicado na tubulação.

Os Módulos de Elasticidade baseados no percentual de fibras obtido no corpo de prova utilizado no teste hidrostático podem ser calculados teoricamente utilizando a Equação 2.18.

A Tabela 6.12 apresenta o resultado do cálculo e a comparação com os Módulos obtidos na placa dos cps de tração.

Sentido	Módulo de Young teórico – Placa [GPa]	Módulo de Young Teórico – amostra do tubo [Gpa]	Diferença entre Módulos [%]
Circunferencial	13.56	22.21	63.79
Axial	9.55	14.75	54.45

Tabela 6.12: Comparação de Módulos de Young (placa e tubo)

Uma nova metodologia para o preparo das placas (que reproduza a mesma condição do reparo aplicado no tubo) já está sendo estudada. Se as propriedades obtidas no laboratório forem utilizadas para o dimensionamento do reparo, este terá um maior coeficiente de segurança, visto que as propriedades mecânicas do reparo são melhores que as propriedades da placa de tração.

6.2.2.2 Ensaios hidrostáticos (determinação de γ_{LCL})

Os testes hidrostáticos foram realizados com água aquecida conforme definido na Tabela 3.4, temperatura de transição vítrea menos 30°C, correspondendo a uma temperatura de teste de 104°C.

Inicialmente a água foi aquecida a 60°C com a válvula da bomba de teste aberta, mantendo a pressão atmosférica. Após 60°C foi mantida uma pressão de aproximadamente 10bar para evitar a formação de vapor. Atingida a temperatura de 104°C, iniciou-se o teste hidrostático. A rampa de incremento de pressão foi conforme previsto na Norma ASTM 1599, aproximadamente 1bar por segundo.

Todos os cps apresentaram o modelo de falha exigido pela ISO 24817, falha por delaminação.



Figura 6.9: Falha por delaminação

A Figura 6.10 apresenta de maneira mais detalhada o local da falha.



Figura 6.10: Vista detalhada da falha por delaminação

As falhas ocorreram com pressões abaixo do esperado e com uma considerável dispersão.

Teste Hidrostático		
Tamanho de furo [mm]	Espessura do laminado [mm]	Pressão de ruptura [bar]
10	3	60
10	3	40
10	3	45
25	3	25
25	3	30
25	3	15

Tabela 6.13: Teste hidrostático

Após uma análise detalhada da falha, foi possível constatar que as falhas não ocorreram na interface do substrato e sim na interface compreendida entre o laminado de reparo e o primer. Corante vermelho foi adicionado à água de teste para que o caminho percorrido pela mesma através do laminado fosse destacado. Durante a análise da falha, outros defeitos foram encontrados. Foram encontrados vazios que podem ter sido provocados pela baixa viscosidade da resina de laminação, porém esses defeitos estão dentro dos limites admissíveis pela ISO 24817:2006.



Figura 6.11: Análise da falha

A falha pode ter sido falha de adesão provocada por uma má afinidade química entre os materiais, ou algum problema durante o processo de fabricação dos corpos de prova. Novos estudos já estão sendo realizados na tentativa de resolver esse problema.

A delaminação na interface *primer*/laminado está sendo investigada. Inicialmente dois caminhos estão sendo tomados:

- Tempo entre a aplicação do *primer* e início da laminação. Por recomendação do fabricante dos materiais utilizados, a laminação só será iniciada após o primer ter atingido o ponto de gel.
- Será criada uma nova formulação para o *primer*, que tenha uma melhor interação química com a resina utilizada no processo de laminação.

Para minimizar a quantidade de bolhas e poros foi adicionada carga à resina de laminação com intuito de aumentar sua viscosidade.

Devido ao fato dos problemas constatados durante os testes hidrostáticos, os experimentos foram interrompidos, visto que os problemas podem ocasionar a substituição da resina de laminação, o que, de acordo com ISO 24817:2006, obriga a repetição de todos os ensaios mecânicos.

A propriedade γ_{LCL} não foi determinada devido ao fato de não ter sido realizado o ensaio de cisalhamento. Esse ensaio foi deixado para o final do trabalho pelo fato de ser um ensaio a ser contratado fora do Instituto Politécnico. Portanto, optou-se por se ter todos os resultados dos ensaios mecânicos e hidrostáticos realizados na instituição válidos, para só então realizar o ensaio de cisalhamento.

Na tentativa de melhorar a adesão na interface substrato/laminado de reparo, uma nova metodologia foi adotada para a confecção do corpo de prova destinado aos ensaios hidrostáticos. Foram adicionadas cargas à resina de laminação com o intuito de aumentar sua viscosidade. A resina de laminação também foi utilizada como *primer*.

Após a aplicação da primeira camada, esperou-se que a resina atingisse o ponto de gel, em seguida foram aplicadas as camadas do laminado de reparo.

O teste hidrostático foi realizado a temperatura de 100°C.

A pressão de falha foi de 40bar.

As Figuras 6.12 e 6.13 apresentam a análise da falha:

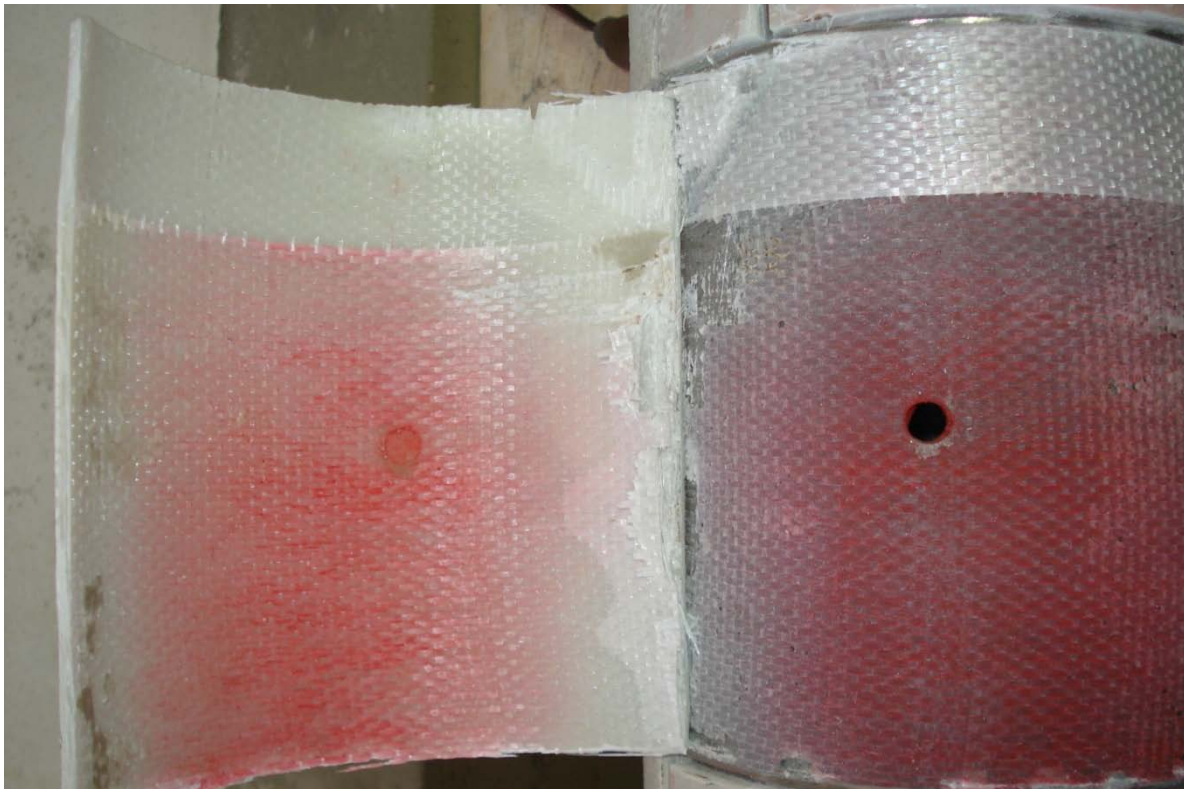


Figura 6.12: Análise da falha após teste hidrostático

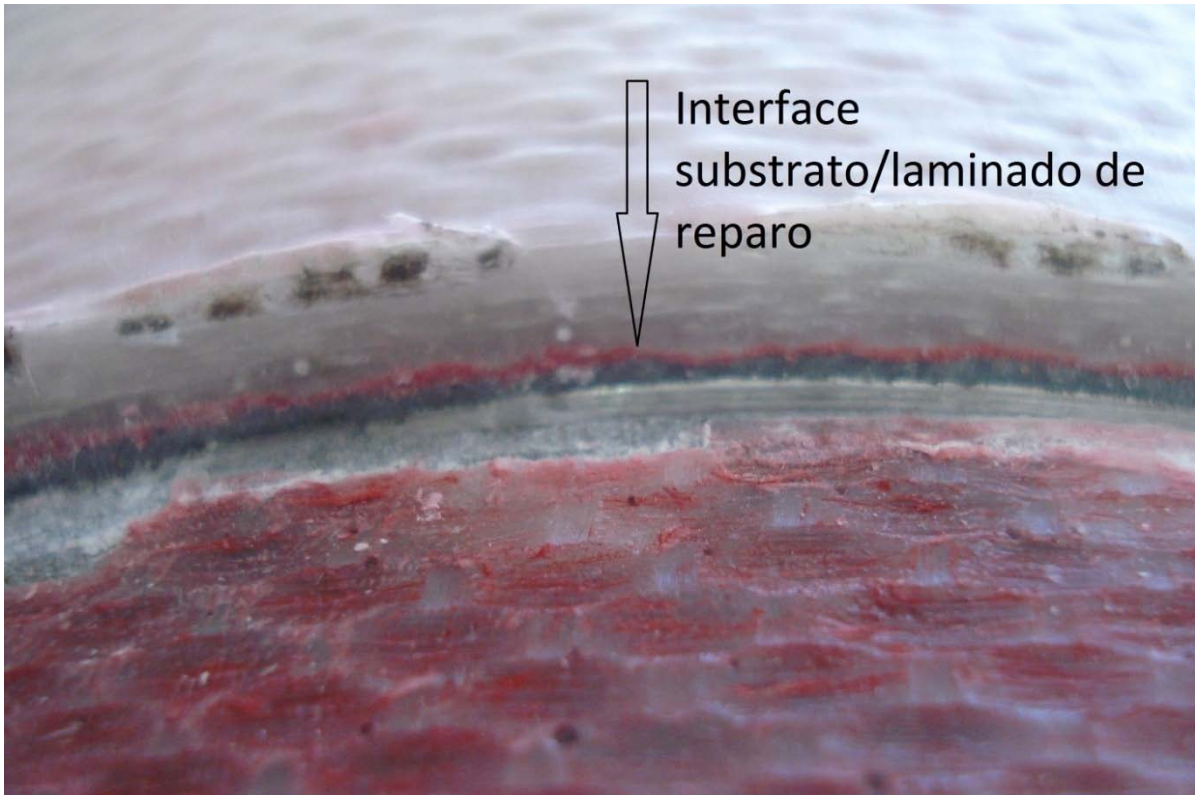


Figura 6.13: Interface substrato/laminado de reparo

Corante vermelho foi adicionado à água de teste. Analisando a figura 6.13 fica claro que o vazamento ocorreu imediatamente abaixo da primeira camada do laminado de reparo.

6.3 Exemplo de cálculo de espessura

6.3.1 Exemplo 1

Como exemplo de cálculo foi considerado a seguinte situação:

- *Uma tubulação de 12" de diâmetro possui corrosão externa intensa.*
- *Não há vazamentos e não é esperado que aconteça até o fim da vida útil do reparo.*
- *O proprietário não possui os dados relativos ao material de construção da tubulação.*
- *A temperatura de trabalho varia entre 10 e 70°C.*
- *A pressão máxima de trabalho é de 40bar.*

A necessidade é de um reforço estrutural que possua vida útil de 10 anos.

Para a realização do cálculo faz-se necessário o conhecimento das cargas atuantes na tubulação. Um trecho de tubulação com as condições de operação acima citadas foi simulado em um programa chamado TRIFLEX, destinado à análise de flexibilidade em tubulações, o trecho analisado é apresentado em destaque na Figura 6.12. As cargas obtidas da análise de flexibilidade foram as seguintes:

- *Momento torçor (M_{to}) = 1.252.800 Nmm*
- *Momento axial (M_{ax}) = 1105800 Nmm*
- *Carga cisalhante (F_{sh}) = 2704,5 N*
- *Carga axial(F_{ax}) = 14266,8 N*

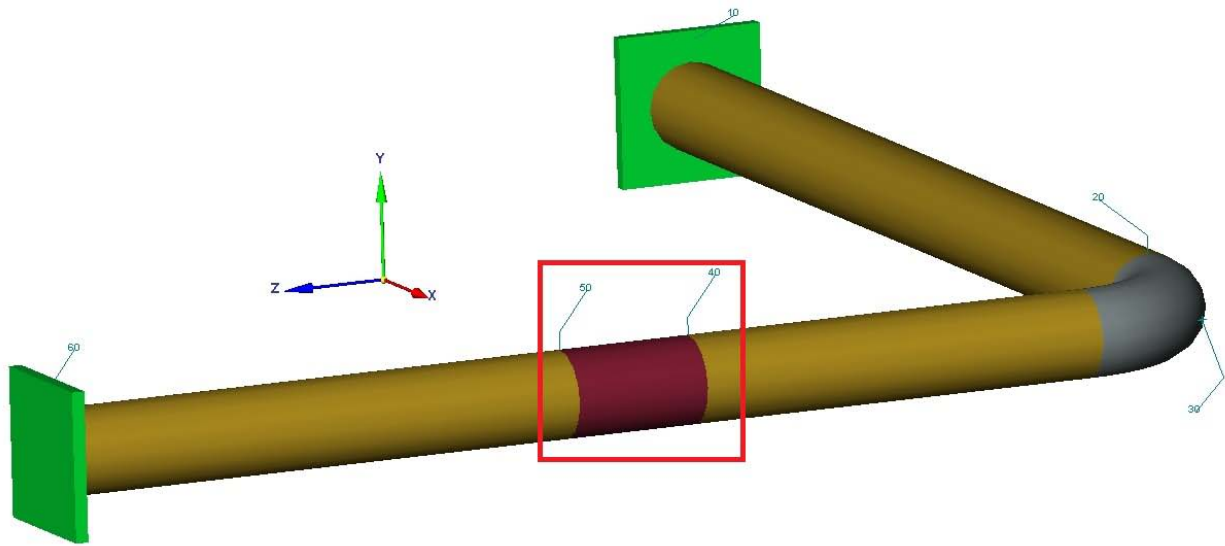


Figura 6.12: Simulação no TRIFLEX

Solução:

Como o proprietário desconhece os dados da tubulação e trata-se de um dano não-transpassante podemos utilizar a metodologia para defeitos do Tipo A para o caso em que se desconsideram as contribuições mecânicas, o que implica que o laminado de reparo, sozinho, é capaz de resistir às condições de operação. A pressão de trabalho é de 40bar, logo, conforme Tabela 3.1, trata-se de um reparo Classe 3.

As propriedades do sistema de reparo feito à partir do processo de laminação manual, desenvolvido no presente trabalho, foram utilizadas para o dimensionamento do reparo.

Algumas propriedades necessárias ao laminado não foram obtidas empiricamente, porém podem ser obtidas teoricamente utilizando as frações volumétricas de fibra e resina.

O coeficiente de Poisson pode ser obtido a partir da Equação 2.33:

$$\nu_{12} = 0,27$$

Os coeficientes de expansão térmica podem ser obtidos a partir da Equação 2.47:

$$\alpha_c = 11,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\alpha_a = 16,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

De acordo com a Tabela 6.12 os Módulos de Young do laminado de reparo são:

$$E_c = 22,21 \text{ GPa}$$

$$E_a = 14,75 \text{ GPa}$$

A temperatura máxima de operação é conforme definido para os testes hidrostáticos.

$$T_m = 104 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tendo posse dos dados do laminado é possível calcular a espessura do reparo. Para tanto, serão utilizadas as Equações (A.6) e (A.7) (Anexo A). A espessura do reparo será o maior valor obtido através dessas duas equações.

$$t_{\min, c} = \frac{1}{\varepsilon_c} \left(\frac{P_{eq} D}{2} \frac{1}{E_c} - \frac{F_{eq}}{\pi D} \frac{\nu}{E_c} \right)$$

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

Ainda não temos todos os valores necessários ao cálculo. Em primeiro lugar vamos utilizar a Equação (A.3) (Anexo A) para o cálculo da carga e da pressão equivalente, vale ressaltar que no problema é considerada a atuação da pressão interna, e as cargas e momentos obtidos na análise do TRIFLEX.

$$P_{eq} = P \left[1 + \frac{16}{(\pi D^2 P)^2} \left(F_{sh} + \frac{2}{D} M_{to} \right)^2 \right]$$

$$F_{eq} = \frac{\pi}{4} P D^2 + \sqrt{F_{ax}^2 + 4F_{sh}^2} + \frac{4}{D} \sqrt{M_{ax}^2 + M_{to}^2}$$

$$P_{eq} = 4,004 \text{ MPa}$$

$$F_{eq} = 365,364 \text{ kN}$$

Na sequência, utilizando a Equação (A.8) (Anexo A) é possível calcular as deformações admissíveis para o laminado de reparo.

$$\varepsilon_c = f_{T1} \varepsilon_{c0} - |\Delta T (\alpha_s - \alpha_c)|$$

$$\varepsilon_a = f_{T1} \varepsilon_{a0} - |\Delta T (\alpha_s - \alpha_a)|$$

O fator de correção de temperatura é determinado de acordo com a Tabela (A.6) (Anexo A). A temperatura de projeto, T_d , é igual a 70°C , equivalente a $T_m - 35^\circ\text{C}$. Por interpolação é possível determinar o fator de correção.

Temperature ($^\circ\text{C}$)	Temperature Factor, f_{T1}
$T_d = T_m$	0,70
$T_d = T_m - 20$	0,75
$T_d = T_m - 40$	0,85
$T_d = T_m - 50$	0,90
$T_d = T_m - 60$	1,00

$$f_{T1} = 0,80$$

As deformações permissíveis em função da vida útil do sistema de reparo podem ser obtidas a partir da Tabela (A.8) (Anexo A).

Allowable strain	Class 1			Class 2			Class 3		
	2	10	20	2	10	20	2	10	20
Repair lifetime (years)	2	10	20	2	10	20	2	10	20
For $E_a > 0.5 E_c$									
- ϵ_{c0}	0,40%	0,32%	0,25%	0,35%	0,30%	0,25%	0,30%	0,27%	0,25%
- ϵ_{a0}	0,40%	0,32%	0,25%	0,35%	0,30%	0,25%	0,30%	0,27%	0,25%
For $E_a < 0.5 E_c$									
- ϵ_{c0}	0,40%	0,32%	0,25%	0,35%	0,30%	0,25%	0,30%	0,27%	0,25%
- ϵ_{a0}	0,25%	0,16%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%

$$\epsilon_{c0} = 0,0027$$

$$\epsilon_{a0} = 0,0027$$

Calculando as deformações, temos:

$$\epsilon_c = 0,00214$$

$$\epsilon_a = 0,00189$$

Tendo posse de todos os valores necessários é possível calcular as espessuras de reparo:

$$t_{min,c} = 11,59 \text{ mm}$$

$$t_{min,a} = 8,67 \text{ mm}$$

Deve ser escolhido o maior dos dois valores acima. A espessura do laminado de reparo deve ser expressa em função do número de voltas. A espessura do laminado é de 0,6mm, portanto para a execução do reparo serão necessárias **20 voltas** do laminado de reparo.

6.3.2 Exemplo 2

Para o exemplo 2 foi considerada uma situação idêntica à anterior, porém o proprietário conhecia os dados do substrato.

- *Material: API 5 L X60*
- *Limite de escoamento(s): 414MPa*
- *Espessura de parede remanescente (t_s): 1,1mm*

Solução:

Nesse caso podemos considerar a contribuição mecânica do substrato para realizar o dimensionamento do sistema de reparo. Fazendo uso da Equação A.5 e das propriedades determinadas no Exemplo 6.2 é possível determinar a espessura do laminado e, conseqüentemente, o número de voltas do laminado.

$$t_{min} = \frac{1}{\epsilon_c E_c} \left(\frac{P_{eq} D}{2} - s t_s \right)$$

$$t_{min} = 4,06 \text{ mm}$$

A espessura mínima conforme definida pela Norma é de 5mm. Utilizando a espessura mínima exigida e transformando em nº de voltas, chegamos à conclusão de que serão necessárias **7 voltas** do laminado de reparo.

7 CONCLUSÕES

- O desenvolvimento do presente trabalho tornou o Laboratório de Adesão e Aderência, LAA-UERJ, apto ao desenvolvimento e qualificação de materiais compósitos, utilizados não só na cadeia de petróleo, mas em todos os setores da indústria. Isso se deve ao fato de ter sido montada uma infraestrutura completa, com todos os equipamentos adquiridos para uma primeira etapa;
- Uma nova linha de pesquisa, voltada ao estudo de materiais compósitos, foi implantada no Instituto a partir do desenvolvimento deste trabalho;
- Os resultados obtidos empiricamente são equivalentes aos resultados obtidos a partir de modelos teóricos, o que demonstra a qualidade e a eficiência dos procedimentos criados para a confecção dos corpos de prova;
- Com base nos resultados obtidos, o sistema atual de laminação manual desenvolvido está apto ao reforço estrutural, visto que os testes de qualificação exigidos pela ISO 24817:2006 foram realizados;
- A partir da experiência adquirida, novos materiais já estão sendo testados com intuito de se criar um laminado apto não só ao reforço estrutural mas também apto ao reparo de danos transpassantes.

8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolvimento de um laminado apto ao reparo de danos transpassantes.
- Estudo de metodologias e técnicas de inspeção do sistema de reparo.
- Avaliação da resistência em longo prazo de reparos em danos transpassantes.
- Criação de uma metodologia para que os corpos de prova destinados ao ensaio de tração apresentem um percentual de fibras similar ao do reparo aplicado no tubo.
- Criação de cursos de qualificação de aplicadores e supervisores. Conforme exigido pela Norma ISO 24817:2006 para reparos Classe 3.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, Bhagwan D. *Analysis and performance of fiber composites*. 3rd ed. New York: Wiley, 2006.
- AHADIAN, S.; Mohseni, M.; Moradian, S. Ranking proposed models for attaining surface free energy of powders using contact angle measurements. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, v. 29, Issue 4, p. 458-469, June 2009.
- APICELLA A. et al. Water sorption and mechanical properties of a glass-reinforced polyester resin. *Composites*, v. 82, p. 406-410, 1982.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D 3039:00*: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. [Philadelphia], 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D 5379:05*: Standard test method for shear properties of composite materials by the v-notched beam method. [Philadelphia], 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D 1599:99*: Standard test method for resistance to short-time hydraulic pressure of plastic pipe, tubing, and fittings. [Philadelphia], 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E 1640-04*: Standard test method for assignment of the glass transition temperature by dynamic mechanical analysis. [Philadelphia], 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D 3171:06*: Standard test methods for constituent of composite materials. [Philadelphia], 2006.
- BITTENCOURT, C. B. *Procedimento de ensaio para avaliar propriedades ao cisalhamento de materiais compósitos – método da viga com entalhe em V*. 2001. 14 f. Monografia (Conclusão de Curso de Engenharia) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 2001.
- CALLISTER JR., W. D. *Materials science and engineering: an introduction*. 7th ed. New York: Wiley, 2007.
- CORREIA, J. R.; BRANCO, F. FERREIRA, J. Utilização de perfis pultrudidos de fibra de vidro (GFRP) na construção. *Construção FEUP*, 2004. Disponível em: < www.fe.up.pt/si/conteudos_service.conteudos_cont?pct_id=30024... >.
- D. LYONS (Consultant). Western European cross-country oil pipelines 30-year performance statistics. CONCAWE Oil Pipelines Management Group (OPMG), 2002.

FALUHELYI, Peter. *Análise de tensões em tubulações com e sem reparo compósito, submetidas a pressões hidrostáticas internas*. 2006. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. *ISO/DTS 24817-06: Petroleum, petrochemical and natural gas industries – composite repairs for pipework – qualification and design, installation, testing and inspection*. [Genéve], 2006.

JASKE, C. E.; HART, B. O.; BRUCE, W. A. Updated pipeline repair manual, revision 6. Houston, TX: Technical Toolboxes, 2006. 196p. (Final Report Project n.R2269-01R. Prepared for Pipeline Research Council International Inc. by CC Technologies Inc. under contract PR-186-0324)

KAW, Autar K. *Mechanics of composite materials*. 2nd. ed. [Boca Raton]: CRC Press, 1997.

LIMAVERDE, Aricelso Maia et. al. Estudo da influência de diferentes tratamentos superficiais na resistência mecânica de juntas de aço carbono coladas com adesivo epóxi. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS, 18., 2008, Porto de Galinhas. [Anais...]. Porto de Galinhas, 2008.

PARDINI, L. C. ; LEVY, F. *Compósitos estruturais: ciência e tecnologia*. São Paulo: Edgard Blucher, 2006

PERRUT, V. A. *Análise de reparo de tubos com defeito transpassante por meio de materiais compósitos*. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

PERRUT, V. A.; MENICONI, L. C. DE M. Qualificação de adesivos para reparo estrutural. CENPES, 2008. 18p.(RT TMEC; n. 003/08)

PETROBRAS N 2737-05. Manutenção de oleoduto e gasoduto terrestre. 2005.

PETROBRAS ST 703090-02. *Especificação técnica para reparos em material compósito para tubulações e dutos*. 2002.

REVISTA BRASILEIRA DE TECNOLOGIA E NEGÓCIOS DE PETRÓLEO, GÁS, PETROQUÍMICA E BIOCMBUSTÍVEIS, nº 67, 2009. [Arquivo pessoal]. Disponível em: <www.tnppetroleo.com.br>.

ROHEM, N. R. F. Estudo para desenvolvimento... compósitos do IPRJ. 2008. 81 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2008.

SILVA, A. H. M. F. T. *Proposta de um critério de resistência para juntas metálicas coladas*. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.

SAMPAIO, E. M. *Um modelo de danos para juntas coladas*. 1998. Tese (Doutorado) COPPE-UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

SAMPAIO, Eduardo Martins et. al. Aderência de juntas metálicas de cisalhamento coladas com adesivos epoxídicos de baixa e alta viscosidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. [*Anais...*]. Foz do Iguaçu, 2006.

TELLES, P. C. S. *Tubulações industriais: materiais, projeto e montagem*. 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

VILANI, E. C.; BIFULCO, A. C.; BAYER, R. F. Reabilitação de duto amassado com luva de material compósito. In: RIO PIPELINE CONFERENCE AND EXPOSITION 2007. 10p.

WOLF, F. G. Formation and dynamics of the liquid-vapor interface simulated by the Lattice-Boltzmann method. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, n. 2, p. 167 - 175, 2006.

ANEXO A**EQUAÇÕES NORMA ISO/PDTS 24817:2006**

(os índices das equações e das tabelas são os mesmos utilizados na ISO/PDTS 24817)

A.1 DEFEITO DO TIPO A

Para defeito Tipo A, a seguinte metodologia deve ser adotada:

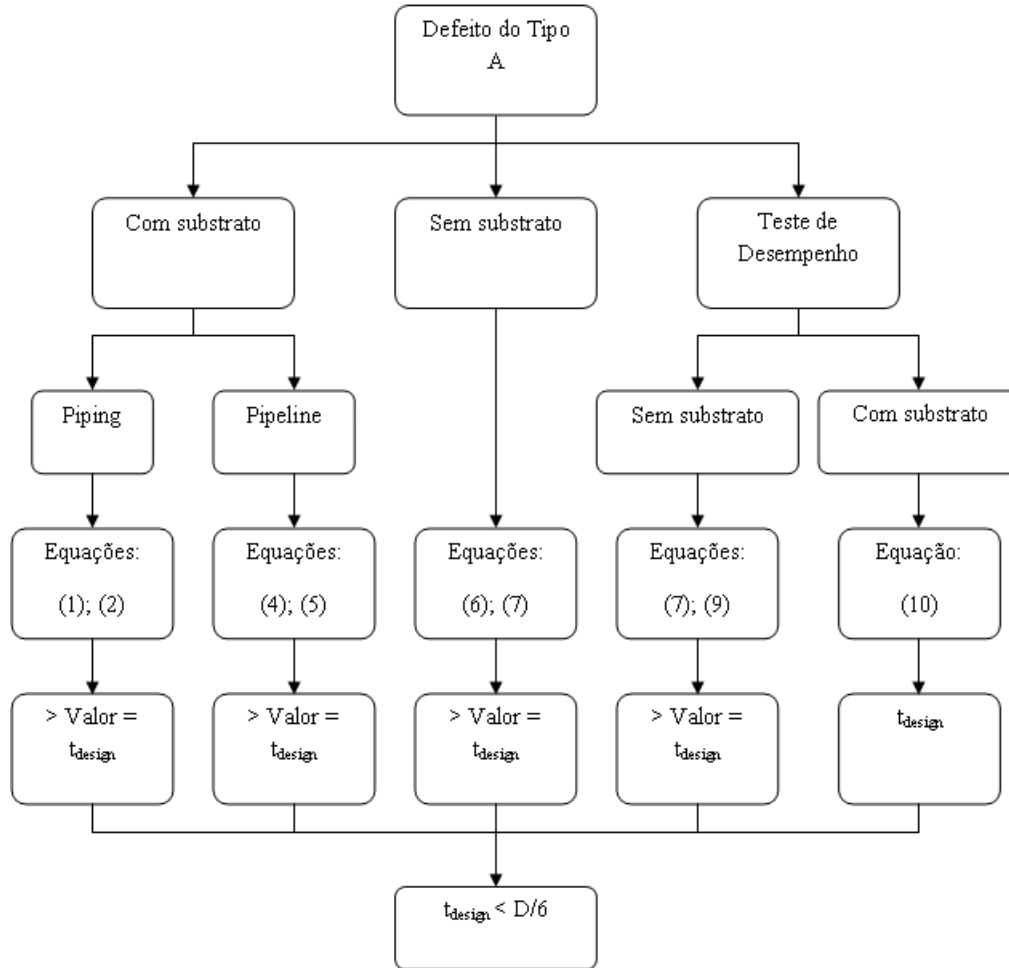


Figura A.1: Fluxograma defeito do Tipo A

As equações e tabelas utilizadas para o cálculo são demonstradas na sequência.

Equações (A.1) e (A.2) são utilizadas para determinar a espessura mínima do laminado de reparo para defeitos do Tipo A considerando o substrato (*piping*), no sentido circunferencial (o cálculo é baseado nas propriedades circunferenciais do laminado de reparo) e axial (o cálculo é baseado nas propriedades axiais do laminado de reparo) respectivamente, o maior valor será a espessura de projeto.

$$t_{\min,c} = \frac{D}{2s} \cdot \left(\frac{E_s}{E_c} \right) \cdot (P_{eq} - P_s) \quad (\text{A.1})$$

$$t_{\min,a} = \frac{D}{2s} \cdot \left(\frac{E_s}{E_a} \right) \cdot \left(\frac{2F_{eq}}{\pi D^2} - P_s \right) \quad (\text{A.2})$$

Onde: E_a = módulo axial do laminado de reparo (Mpa)

E_c = módulo circunferencial do laminado de reparo (MPa)

E_s = módulo do substrato (Mpa)

D = diâmetro externo (mm)

F_{eq} = carga axial equivalente (N) (ver Equação (3))

S = tensão admissível do material do substrato (MPa)

P_{eq} = pressão interna equivalente (MPa) (ver Equação (A.3))

P_s = MAWP (MPa) (pressão máxima de trabalho)

P_{eq} e F_{eq} são definidos por:

$$P_{eq} = P \left[1 + \frac{16}{(\pi D^2 P)^2} \left(F_{sh} + \frac{2}{D} M_{to} \right)^2 \right] \quad (\text{A.3})$$

$$F_{eq} = \frac{\pi}{4} P D^2 + \sqrt{F_{ax}^2 + 4F_{sh}^2} + \frac{4}{D} \sqrt{M_{ax}^2 + M_{to}^2}$$

Onde: P = Pressão interna de projeto (MPa)

F_{sh} = carga cisalhante aplicada (N)

M_{to} = momento de torção aplicada (Nmm)

F_{ax} = carga axial aplicada (N)

M_{ax} = momento axial aplicado (Nmm)

As cargas citadas na Equação (A.3) devem ser fornecidas pelo proprietário da tubulação. Essas cargas são determinadas durante o projeto básico das tubulações, em um processo conhecido como análise de flexibilidade.

Onde a finalidade do reparo é fortalecer uma seção não danificada para carregamento adicional ou outras cargas axiais. O valor de F_{eq} será avaliado pelo aumento total das cargas axiais e o valor de P_s será o original MAWP.

Equações (A.4) ou (A.5) são utilizadas para determinar a espessura mínima do laminado de reparo para defeitos do Tipo A considerando o substrato (pipeline), no sentido circunferencial.

$$\varepsilon_c = \frac{P_{eq} D}{2E_c t_{\min}} - s \frac{t_s}{E_c t_{\min}} - \frac{P_{live} D}{2(E_c t_{\min} + E_s t_s)} \quad (\text{A.4})$$

Onde: P_{live} = pressão interna durante a aplicação do reparo (MPa)

ε_c = deformação circunferencial permissível do laminado de reparo (mm/mm)

t_s = espessura mínima de parede restante no substrato (mm)

Se o reparo for aplicado na pressão interna zero, isto é, $P_{live} = 0$, a Equação (A.4) pode ser rearranjada para:

$$t_{\min} = \frac{1}{\varepsilon_c E_c} \left(\frac{P_{eq} D}{2} - s t_s \right) \quad (\text{A.5})$$

Equações (A.6) e (A.7) são utilizadas para determinar a espessura mínima do laminado de reparo para defeitos do Tipo A sem considerar o substrato, no sentido circunferencial e axial respectivamente, o maior valor será a espessura de projeto.

$$t_{\min,c} = \frac{1}{\varepsilon_c} \left(\frac{P_{eq} D}{2} \frac{1}{E_c} - \frac{F_{eq}}{\pi D} \frac{\nu}{E_c} \right) \quad (\text{A.6})$$

$$t_{\min,a} = \frac{1}{\varepsilon_a} \left(\frac{F_{eq}}{\pi D} \frac{1}{E_a} - \frac{P_{eq} D}{2} \frac{\nu}{E_c} \right) \quad (\text{A.7})$$

Onde: E_a = módulo axial do laminado de reparo (MPa)

E_c = módulo circunferencial do laminado de reparo (MPa)

D = diâmetro externo do tubo de teste (mm)

F_{eq} = carga axial equivalente (N) (ver Equação (3))

P_{eq} = pressão interna equivalente (MPa) (ver Equação (A.3))

ν = coeficiente de Poisson do laminado de reparo

ε_a = deformação axial admissível para o laminado de reparo (mm/mm)

ε_c = deformação circunferencial admissível para o laminado de reparo (mm/mm)

$$\begin{aligned}\varepsilon_c &= f_{T1} \varepsilon_{c0} - |\Delta T (\alpha_s - \alpha_c)| \\ \varepsilon_a &= f_{T1} \varepsilon_{a0} - |\Delta T (\alpha_s - \alpha_a)|\end{aligned}\quad (\text{A.8})$$

Onde: ε_{a0} = deformação axial admissível do laminado de reparo (sem efeitos de temperatura, Tabela A.8) (mm/mm)

ε_{c0} = deformação circunferencial admissível do laminado de reparo (sem efeitos de temperatura, Tabela 8) (mm/mm)

f_{T1} = fator de classificação de temperatura, Tabela A.6

α_a = coeficiente de expansão térmica do laminado de reparo, sentido axial (mm/mm°C)

α_c = coeficiente de expansão térmica do laminado de reparo, sentido circunferencial (mm/mm°C)

α_s = coeficiente de expansão térmica do substrato (mm/mm°C)

ΔT = variação de temperatura (temperatura de projeto – temperatura de instalação) (°C)

Temperatura (°C)	Fator de temperatura, f_{T1}
$T_d = T_m$	0,70
$T_d = T_m - 20$	0,75
$T_d = T_m - 40$	0,85
$T_d = T_m - 50$	0,90
$T_d = T_m - 60$	1,00

Tabela A.6: Fator de correção de temperatura, f_{T1} .

Onde: T_d = temperatura de projeto (°C)

T_m = temperatura máxima de utilização do laminado de reparo, Tabela 3.4 (°C)

Fatores para temperaturas intermediárias são obtidos por interpolação.

Para permitir temperaturas de projeto mais elevadas em reparos de danos transpassantes, a Tabela A.7 define o fator de desempenho, f_{T2} , que será aplicado nas Equações (A.11), (A.12), (A.13).

Temperatura (°C)	Fator de temperatura, f_{T2}
$T_d - (T_{test} - T_{amb}) = T_m$	0,70
$T_d - (T_{test} - T_{amb}) = T_m - 20$	0,75
$T_d - (T_{test} - T_{amb}) = T_m - 40$	0,85
$T_d - (T_{test} - T_{amb}) = T_m - 50$	0,90
$T_d - (T_{test} - T_{amb}) = T_m - 60$	1,00

Tabela A.7: Fator de correção de temperatura para danos transpassantes (Tipo B), f_{T2} .

Onde: T_{amb} = temperatura do ambiente de teste (°C)

T_{test} = temperatura do teste de qualificação (°C)

Para a tabela ser apropriada o mesmo regime de pós-cura, qualificação, preparação e aplicação da amostra devem ser aplicadas em serviço.

Deformação admissível	Classe 1			Classe 2			Classe 3		
	2	10	20	2	10	20	2	10	20
Vida útil do reparo (anos)	2	10	20	2	10	20	2	10	20
Para $E_a > 0.5 E_c$									
- ϵ_{c0}	0,40%	0,32%	0,25%	0,35%	0,30%	0,25%	0,30%	0,27%	0,25%
- ϵ_{a0}	0,40%	0,32%	0,25%	0,35%	0,30%	0,25%	0,30%	0,27%	0,25%
Para $E_a < 0.5 E_c$									
- ϵ_{c0}	0,40%	0,32%	0,25%	0,35%	0,30%	0,25%	0,30%	0,27%	0,25%
- ϵ_{a0}	0,25%	0,16%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%

Tabela A.8: Deformações admissíveis para o laminado de reparo em função da vida útil do reparo

A Tabela 8 é usada da seguinte maneira. Por exemplo, para uma vida útil de projeto de reparo Classe 2 de 8 anos com ($E_a < 0.5 E_c$), então a deformação admissível pode ser extrapolada ou analisada para uma vida mais elevada, ou seja, 10 anos, implicando em deformações circunferenciais e axiais de 0.3% e 0.1%, respectivamente.

Os valores da Tabela A.8 incluem um fator de segurança equivalente a 0.67

Equações (A.7) e (A.9) são utilizadas para determinar a espessura mínima do laminado de reparo para defeitos do Tipo A, com os dados obtidos no teste de desempenho desconsiderando o substrato, o maior valor será a espessura de projeto.

$$t_{\min} = \frac{1}{s_{lt}} \left(\frac{P_{eq} D}{2} - \frac{\nu F_{eq}}{\pi D} \right) \quad (\text{A.9})$$

Onde : D = diâmetro externo do tubo de teste (mm)

F_{eq} = carga axial equivalente (N) (ver Equação (A.3))

s = tensão permissível do material do substrato (MPa)

P_{eq} = pressão interna equivalente (MPa) (ver Equação (A.3))

s_{lt} = tensão em longo prazo (Anexo E – ISO 24817:2206) (MPa)

ν = coeficiente de Poisson do laminado de reparo

Equação (A.10) será utilizada para determinar a espessura mínima do laminado de reparo para defeitos do Tipo A considerando o substrato.

$$t_{design} = \left(\frac{P_{eq} D}{2} - s t_s \right) \left(\frac{1}{f_{perf} s_{lt}} \right) \quad (\text{A.10})$$

Onde: D = diâmetro externo do tubo de teste (mm)

F_{eq} = carga axial equivalente (N) (ver Equação (A.3))

s = tensão admissível do material do substrato (MPa)

P_{eq} = pressão interna equivalente (MPa) (ver Equação (A.3))

t_s = espessura mínima da parede do substrato (mm)

s_{lt} = tensão em longo prazo (Anexo E – ISO 24817:2006) (MPa)

f_{perf} = fator de serviço, Tabela A.9.

Fator de serviço (f_{perf})	Classe 1			Classe 2			Classe 3		
Vida útil do reparo (anos)	2	10	20	2	10	20	2	10	20
Dados do teste 1000 horas	0,83	0,65	0,5	0,67	0,58	0,5	0,6	0,55	0,5
Dados da vida do projeto	1	0,83	0,67	0,83	0,75	0,67	0,75	0,71	0,67

Tabela A.9: fator de serviço, f_{perf} , para dados baseados no teste de desempenho do sistema de reparo

A.2 DEFEITO DO TIPO B (DANO TRANSPASSANTE)

Para defeitos do Tipo B, A seguinte metodologia deve ser adotada:

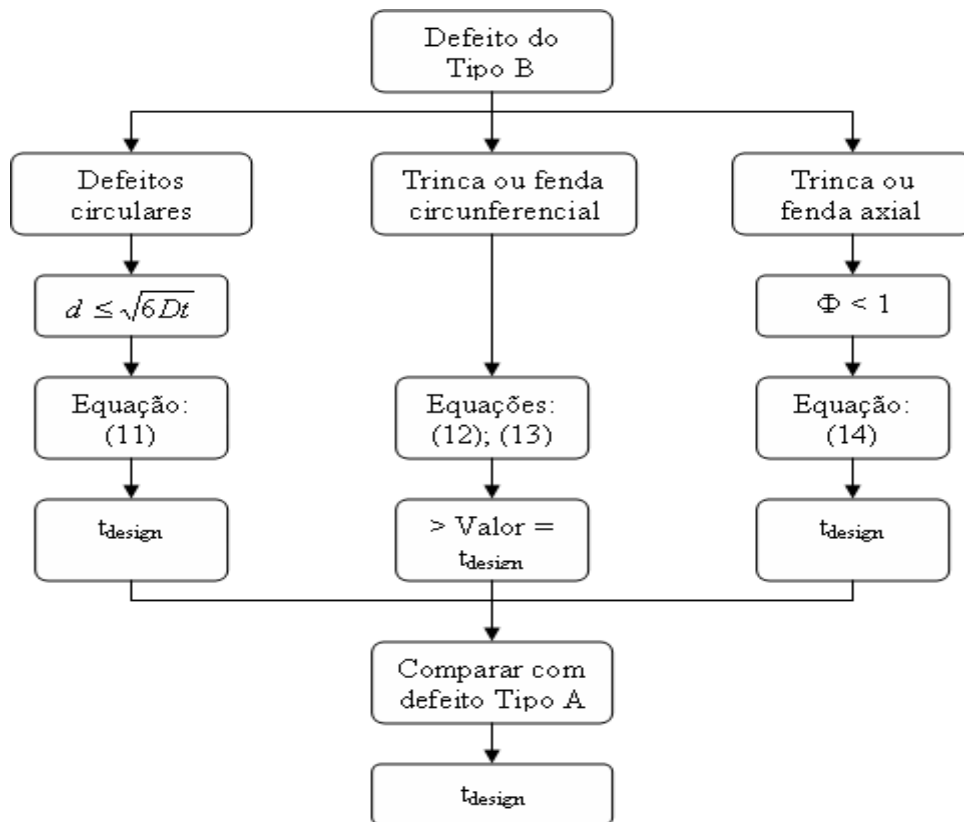


Figura A.2: Fluxograma defeito do tipo B

As equações utilizadas nos cálculos são demonstradas na sequência.

Equação (A.11) será utilizada para determinar a espessura mínima do laminado de reparo para defeito do Tipo B. Defeito circunferencial ou próximo disto. Esse valor será comparado com os valores obtidos pelas Equações da metodologia de defeito do Tipo A, o maior valor será a espessura de projeto do laminado de reparo.

$$P = f_{T2} f_{leak} \sqrt{\frac{0,001 \gamma_{LCL}}{\frac{(1-\nu^2)}{E_{ac}} \left\{ \frac{3}{512 t_{min}^3} d^4 + \frac{1}{\pi} d \right\} + \frac{3}{64 G t_{min}} d^2}}}$$
(A.11)

Onde: E_{ac} = módulo de elasticidade combinado $\sqrt{E_a E_c}$ (MPa)

G = módulo de cisalhamento do laminado de reparo (MPa)

P = pressão interna de projeto (MPa)

ν = coeficiente de Poisson do laminado de reparo (ver definição no Anexo

B)

γ_{LCL} = taxa de liberação de energia com limite de confiança inferior a 95%
(Anexo D)(J/m²)

d = diâmetro do defeito (mm)

t_{min} = espessura do laminado de reparo (mm)

f_{T2} = fator de classificação de temperatura, Tabela A.7

f_{leak} = fator de classificação de serviço, Equação (A.15)

A Equação (A.11) é válida para tamanhos de defeito $d \leq \sqrt{6Dt}$

Onde: D = diâmetro externo do substrato (mm)

t = espessura de parede do substrato (mm)

Para defeitos não circulares que têm uma relação de aspecto < 5 a Equação (A.11) será usada, onde o valor de d (diâmetro efetivo do defeito) é selecionado tal que contenha o defeito.

Equações (A.12) e (A.13) são utilizadas para determinar a espessura mínima do laminado de reparo para defeitos do Tipo B. Fenda ou trinca circunferencial. Esses valores serão comparados com os valores obtidos pelas Equações da metodologia de defeito do Tipo A, o maior valor será a espessura de projeto do laminado de reparo.

$$P = f_{T2} f_{leak} \sqrt{\frac{0,001 \gamma_{LCL}}{\frac{(1-\nu^2)}{E_{ac}} \left\{ \frac{1}{24 t_{\min}^3} W^4 + \frac{\pi}{4} W \right\} + \frac{3}{16 G t_{\min}} \frac{\left(\frac{4}{5} + \frac{\nu}{2}\right)}{(1+\nu)} W^2}}}$$
(A.12)

$$P = \frac{f_{T2} f_{leak}}{D} \sqrt{0,008 E_{ac} t_{\min} \gamma_{LCL}}$$
(A.13)

Onde: W = comprimento axial da fenda (mm)

Equação (A.14) será utilizada para determinar a espessura mínima do laminado de reparo para defeitos do Tipo B. Fenda ou trinca axial. Onde $W = \phi D / 2$ (mm). Esse valor será comparado com os valores obtidos pelas Equações da metodologia de defeito do Tipo A, o maior valor será a espessura de projeto do laminado de reparo.

$$P = f_{T2} f_{leak} \sqrt{\frac{0,001 \gamma_{LCL}}{\frac{(1-\nu^2)}{E_{ac}} \left[\frac{\pi D}{8} \phi + \frac{D^4}{384 t_{\min}^3} \phi^4 + \frac{D^4}{11520 t_{\min}^3} \left(\frac{E}{4G} + 2 \right) \phi^6 \right]}}$$
(A.14)

Onde o limite de aplicabilidade da Equação (A.14) é dado por $\phi < 1$ onde ϕ é o ângulo subtendido axialmente pela fenda (radianos).

O valor do fator de serviço, f_{leak} , é ajustado a:

Classe 1	Classe 2	Classe 3
$f_{leak} = 0,83 * 10^{-0,02088(t_{lifetime} - 1)}$	$f_{leak} = 0,75 * 10^{-0,01856(t_{lifetime} - 1)}$	$f_{leak} = 0,666 * 10^{-0,01584(t_{lifetime} - 1)}$

(A.15)

Onde: $t_{lifetime}$ = vida útil de projeto (anos)

Quando os dados do teste de desempenho em longo prazo estão disponíveis de acordo com o Anexo E (ISO 24817:2006), o fator de serviço, f_{leak} , será calculado usando:

Classe 1	Classe 2	Classe 3
$f_{leak} = 0.83 * D_f$	$f_{leak} = 0.75 * D_f$	$f_{leak} = 0.666 * D_f$

(A.16)

Onde: D_f = fator de degradação