CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ANÁLISE NUMÉRICA-EXPERIMENTAL DE JUNTAS COLADAS METAL-COMPÓSITO

Bruno da Silva Paulo Lobão

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientador: Silvio Romero de Barros

Coorientador: Carlos E. Reuther de Siqueira

Rio de Janeiro
Dezembro, 2015

ANÁLISE NUMÉRICA-EXPERIMENTAL DE JUNTAS COLADAS METAL-COMPÓSITO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Bruno da Silva Paulo Lobão

Aprovada por:

_____

Prof. Silvio Romero de Barros, D.Sc. (Orientador)

_____

Carlos Eduardo Reuther de Siqueira, D.Sc. (Coorientador)

_____

Prof. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, D.Sc.

_____

Prof. Eduardo Martins Sampaio, D.Sc.

Rio de Janeiro

Dezembro, 2015

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

L796 Lobão, Bruno da Silva Paulo
Análise numérica-experimental de juntas coladas metal-compósito / Bruno da Silva Paulo Lobão.—2015.
xiv, 51f. + apêndices : il.color. , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2015.
Bibliografia : f. 50-51
Orientador : Silvio Romero de Barros
Coorientador : Carlos E. Reuther de Siqueira

1. Engenharia mecânica. 2. Juntas (Engenharia). 3. Flexão (Engenharia civil) – Ensaios e provas. 4. Materiais compostos. 5. Análise numérica. I. Barros, Silvio Romero de (Orient.). II. Siqueira, Carlos E. Reuther de (Coorient.). III. Título.

CDD 621.825

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha esposa,

Thamilis dos Santos Ferreira Lobão.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me permitido mais uma vitória nesta vida.

À minha mãe, Eliane Vieira da Silva Paulo, por todos os ensinamentos e dedicação em minha formação.

À minha esposa, Thamilis dos Santos Ferreira Lobão, que sempre esteve ao meu lado me incentivando a cursar o mestrado.

Ao meu pai, Jesualdo Pereira Lobão Filho, pelos conselhos e apoio durante esta jornada.

Ao meu orientador, Professor Silvio Romero de Barros, pela confiança, incentivo e todos os conhecimentos adquiridos ao longo desse trabalho.

Ao consultor e coorientador, Carlos Reuther, pelos ensinamentos e todo apoio prestado ao longo deste trabalho.

Ao Professor Luiz Felipe, pelo apoio na realização dos ensaios.

Ao laboratório de Adesão e Aderência da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) no campus de Nova Friburgo, pela confecção dos corpos de provas.

Aos amigos Francisco Andson Marques e Márcio Arouche, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

À Petrobras, por acreditar no meu potencial.

RESUMO

ANÁLISE NÚMERICA-EXPERIMENTAL DE JUNTAS COLADAS METAL-COMPÓSITO

Bruno da Silva Paulo Lobão

Orientador:

Silvio Romero de Barros

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Na indústria do petróleo, os materiais compósitos já possuem ampla utilização como material base para tubulações e estruturas de grades de piso, guarda corpos e sistema de bandejamento elétrico. Além disso, os materiais compósitos estão sendo utilizados como reparo de tubulações, vasos e costados de navio. Estes reparos estão sendo aplicados utilizando-se técnicas de colagem, que apresentam como vantagens não haver aporte térmico na região reparada e a possibilidade de execução do reparo no local (*insitu*) da instalação sem a necessidade de docagem. A nova proposta se baseia na aplicação de camadas de material compósito com adesivo epóxi (laminação) até que se atinja a espessura necessária para que a estrutura reparada se torne confiável novamente. Este trabalho tem como objetivo apresentar a análise numérica computacional, através do software comercial, do comportamento mecânico do compósito e também comparar os resultados com os dados experimentais dos ensaios realizados nas juntas coladas entre o aço e o compósito de fibra de carbono. A análise de fadiga também será avaliada experimentalmente.

Palavras-Chave:

Materiais compósitos; Ensaio Mecânico; Flexão; Juntas Coladas.

Rio de Janeiro

Dezembro, 2015

ABSTRACT

NUMERICAL-EXPERIMENTAL ANALYSIS OF BONDED JOINTS METAL-COMPOSITE

Bruno da Silva Paulo Lobão

Advisor:

Silvio Romero de Barros.

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Mechanical Engineering and Technolgy of Materials.

In the oil industry, composite materials have already used as base of material for pipes and floor grilles structures, guardrails and electric trays system, and nowadays, they are using to repair pipes, vessels and ship hulls. These repairs have been applied using adhesion techniques, these techniques don't increase the temperature in the repaired area and there is a possibility to do the repair in place (insitu). The new proposal has based on the layering of the composite material with epoxy adhesive until it reaches the required thickness for the repaired structure becomes a fixed reliably again. This work aims to present the computational numerical analysis through the ANSYS software, the mechanical behavior of the composite and compare this analysis with the experimental results of tests carried out on steel joints and composite carbon fiber, besides the repair life in number of fatigue cycles.

Keywords:

Composites materials; Mechanic Test; Flexion; Bonded Joints.

Rio de Janeiro

2015, December

Sumário

Capítulo I - Introdução 1

I.1 Motivação 1

I.2 Objetivo, contexto e contribuição 2

I.3 Organização do texto 2

Capítulo II - Revisão bibliográfica 3

II.1 Compósitos 3

II.1.1 Fase matriz 5

II.1.2 Fase reforço 5

II.1.3 Compósitos fibrosos 6

II.1.4 Compósitos laminados 9

II.2 Modelagem 10

II.2.1 Modelo de zona coesiva 11

II.2.2 Elementos de contato 11

II.3 Análise do comportamento de materiais compósitos 12

II.4 Juntas coladas 15

II.4.1 Teoria Mecânica 17

II.4.2 Teoria da adsorção 17

II.4.3 Teoria da Difusão 18

II.4.4 Teoria eletrostática 18

II.4.5 Preparação da superfície 18

Capítulo III - Análise Experimental 20

III.1 Preparação dos corpos de prova 20

III.1.1 Compósito laminado 20

III.1.2 Junta metal/compósito 20

III.2 Ensaios Estáticos 23

III.2.1 Ensaio de flexão no compósito laminado 24

III.2.2 Ensaio de flexão na junta metal/compósito 26

III.3 Ensaios Dinâmicos 29

Capítulo IV - Análise Numérica 32

IV.1 Modelagem 32

IV.2 Determinação das constantes elásticas 33

IV.3 Simulação do ensaio de flexão do compósito laminado 35

IV.4 Simulação do ensaio de flexão da junta metal/compósito 45

Capítulo V - Conclusão 48

Sugestões para trabalhos futuros 49

Referências bibliográficas 50

Apêndice A 52

Apêndice B 55

Apêndice C 63

Lista de figuras

Figura II.1: Distribuição de materiais do Boeing 787. Fonte: (ANGÉLICO, 2009) 3
Figura II.2: Conceito de reparo de compósito para fissuras e perda de espessura por corrosão. Fonte (MARQUES, 2015). 4
Figura II.3: Classificação de materiais compósitos. Fonte: Adaptado de (MARQUES, 2015) 6
Figura II.4: Curvas tensão-deformação. Fonte: (CALLIESTER & RETHWISCH, 2010) 9
Figura II.5: Construção de um compósito laminado multidirecional. Fonte: (CALLIESTER & RETHWISCH, 2010) 9
Figura II.6: Tipos de falha: Fratura intralaminar (A); Fratura interlaminar (B); Fratura Translaminar (C). Fonte: (ALMEIDA, 2010). 10
Figura II.7: Modelo bilinear para CZM. Fonte: Adaptado de (Alfano & Crisfield, 2001) 12
Figura II.8: Disciplinas envolvidas na ciência da adesão. Fonte Adaptado de (DA SILVA, MAGALHÃES & MOURA, 2007) 16
Figura II.9: Esquema de adesão por adsorção. Fonte: (MARQUES, 2015). 18
Figura III.1: Jateamento da superfície da chapa de aço 21
Figura III.2: Chapa de aço após a aplicação da resina. 21
Figura III.3: Aplicação de reparo de compósito no casco de um FPSO. Fonte: (MENICONI, 2014) 22
Figura III.4: Processo de fabricação do reparo (A); reparo de compósito (B) 22
Figura III.5: Esquema do corpo de prova utilizado nos ensaios. Fonte: (MARQUES, 2015). 23
Figura III.6: Máquina Instron utilizada nos ensaios 23
Figura III.7: Ensaios de flexão – span 100 mm 25
Figura III.8: Corpo de prova de span 100 mm sendo ensaiado 25
Figura III.9: Ensaios de flexão – corpos de prova de 240 mm 26
Figura III.10: Corpo de prova de span 150 mm sendo ensaiado 26
Figura III.11: Desenho esquemático com o span utilizado nos ensaios (MARQUES, 2015). 27
Figura III.12: Ensaio estático Chapa X Junta com filete 27
Figura III.13: Ensaio estático junta com filete (CFRP_I) X junta sem filete (CFRP_II) 28
Figura III.14: Corpos de provas após os ensaios estáticos 29
Figura III.15: Modos de ruptura. Fonte: (MARQUES, 2015) 29
Figura III.16: Número de ciclos para cada faixa de tensão 31
Figura IV.1: Compósito laminado modelado no Ansys 33
Figura IV.2: Simulação de flexão no Ansys 33
Figura IV.3: Avaliação das constantes elásticas 34
Figura IV.4: Determinação das constantes elásticas 35
Figura IV.5: Análise da deformação – ensaio de flexão S100W10 36

Figura IV.6: Análise comparativa – ensaio de flexão S100W10 36
Figura IV.7: Análise da deformação – ensaio de flexão S100W25 37
Figura IV.8: Análise comparativa – ensaio de flexão S100W25 37
Figura IV.9: Análise da deformação – ensaio de flexão S150W25 38
Figura IV.10: Análise comparativa – ensaio de flexão S150W25 38
Figura IV.11: Análise da deformação – ensaio de flexão S200W25 39
Figura IV.12: Análise comparativa – ensaio de flexão S200W25 39
Figura IV.13: Análise de falha – S100W10 – ponto 1 41
Figura IV.14: Análise de falha – S100W10 – ponto 4 41
Figura IV.15: Análise de falha – S100W25 – ponto 1 42
Figura IV.16: Análise de falha – S100W25 – ponto 4 42
Figura IV.17: Análise de falha – S150W25 – ponto 1 43
Figura IV.18: Análise de falha – S150W25 – ponto 4 43
Figura IV.19: Análise de falha – S200W25 – ponto 1 44
Figura IV.20: Análise de falha – S200W25 – ponto 3 44
Figura IV.21: Malha – junta metal/compósito 45
Figura IV.22: Simulação da junta metal/compósito 46
Figura IV.23: Análise comparativa da junta metal/compósito 46
Figura A.1: Ensaio de flexão S100W10 53
Figura A.2: Ensaio de flexão S100W25 53
Figura A.3: Ensaio de flexão S150W25 54
Figura A.4: Ensaio de flexão S200W25 54
Figura B.1: Ponto 1 do corpo de prova S100W10 55
Figura B.2: Ponto 2 do corpo de prova S100W10 56
Figura B.3: Ponto 3 do corpo de prova S100W10 56
Figura B.4: Ponto 4 do corpo de prova S100W10 57
Figura B.5: Ponto 1 do corpo de prova S100W25 57
Figura B.6: Ponto 2 do corpo de prova S100W25 58
Figura B.7: Ponto 3 do corpo de prova S100W25 58
Figura B.8: Ponto 4 do corpo de prova S100W25 59
Figura B.9: Ponto 1 do corpo de prova S150W25 59
Figura B.10: Ponto 2 do corpo de prova S150W25 60
Figura B.11: Ponto 3 do corpo de prova S150W25 60
Figura B.12: Ponto 4 do corpo de prova S150W25 61
Figura B.13: Ponto 1 do corpo de prova S200W25 61
Figura B.14: Ponto 2 do corpo de prova S200W25 62
Figura B.15: Ponto 3 do corpo de prova S200W25 62

Figura C.1: Análise de falha - S100W10 - ponto 2 64
Figura C.2: Análise de falha - S100W10 - ponto 3 64
Figura C.3: Análise de falha - S100W25 - ponto 2 65
Figura C.4: Análise de falha - S100W25 - ponto 3 65
Figura C.5: Análise de falha - S150W25 - ponto 2 66
Figura C.6: Análise de falha - S150W25 - ponto 3 66
Figura C.7: Análise de falha – S200W25 - ponto 2 67

Lista de tabelas

Tabela II.1 : Quadro comparativo de propriedades mecânicas. Adaptado de (MARQUES,2015). 7

Tabela II.2 : Eficiência de compósitos reforçados com fibra. Fonte: (MARQUES, 2015). 8

Tabela II.3 : Teoria da adesão. Fonte: Adaptado de (EBNESAJJAD, 2008). 17

Tabela II.4 : Tratamento de superfície. Fonte: (MARQUES, 2015). 19

Tabela III.1 : Corpos de prova dos ensaios de flexão. 20

Tabela III.1 : Corpos de prova dos ensaios de flexão. 24

Tabela III.2 : Valores da carga para ensaio dinâmico. 30

Tabela III.3 : Numero de ciclos obtidos para cada faixa de carga. 30

Tabela IV.1 : Constantes elásticas iniciais. 32

Tabela IV.2 : Constantes elásticas determinadas para a fibra utilizada. 34

Tabela IV.3 : Pontos analisados na análise de falha. 40

Tabela IV.4 : Propriedades adotadas para o modelo bilinear do CZM. 45

Tabela A.1: Legenda e dimensões dos corpos de prova ensaiados. 52

Tabela B.1: Pontos e deslocamentos adotados 55

Tabela C.1: Pontos e deslocamentos adotados 63

Capítulo I - Introdução

I.1 Motivação

Nas plataformas de petróleo e em plantas de processo de refinarias, alguns reparos em tubulações, tanques, vasos de pressão, torres de destilação e estruturas são necessários durante a vida operacional destas instalações devido ao surgimento de trincas e danos causados por corrosão proveniente do ambiente e processo agressivo em que estas instalações estão submetidas.

A busca pelo aumento da eficiência passa pela preservação dos equipamentos e das instalações, além do desenvolvimento da utilização de técnicas e materiais alternativos em relação aos materiais convencionais onde é necessário um longo tempo de execução e em muitos casos a realização de uma parada parcial ou até total da produção de petróleo.

Tradicionalmente, as trincas e danos gerados pela corrosão são reparados através de corte e substituição da região danificada. Esta técnica demanda a utilização de processos de soldagem que dependendo da localização da intervenção, por motivo de segurança, deve ser evitada considerando os riscos inerentes ao aporte térmico gerado, ou então tal técnica pode provocar a interrupção das operações até a conclusão do reparo. A interrupção da produção em muitos casos é algo extremamente caro. (MARQUES, 2015).

Dentre os materiais alternativos comentados, os materiais compósitos vêm sendo utilizado para reparo de estruturas e equipamentos, além de servir como material base para tubulações e estruturas de grades de piso, guarda corpos e sistema de bandejamento elétrico.

A utilização de compósitos em reparos de dutos, de tubulações metálicas, de costados e tanques de embarcações apresenta a vantagem de poder ser realizada com os sistemas em operação, uma vez que não há a necessidade de a interrupção do fluxo de produtos nos dutos ou esvaziamento de tanques.

Os compósitos são aplicados através do emprego da técnica de adesão, sendo esta capaz de substituir ou complementar métodos tradicionais de união. Tal técnica utilizam adesivos capazes de suportar as temperaturas de operação, além de possuir resistência mecânica suficiente para resistir aos esforços aplicados.

Compósitos de fibra de carbono reforçados e adesivos vêm sendo aplicado na indústria aeronáutica com excelentes resultados. A indústria automotiva utiliza os compósitos reforçados nos veículos com o objetivo de se obter uma estrutura mais leve.

Na indústria do petróleo, a utilização de reparos de compósitos vem apresentando cada vez mais aceitação como uma alternativa ao reparo convencional, uma vez que não há

necessidade de interromper a produção, pela praticidade na aplicação, por ganhos em relação a segurança e por redução das tensões residuais.

Para o emprego de reparos colados, é necessário que se avalie a interface entre adesivo e substrato para se garantir que a junta será capaz de resistir às condições de operação do equipamento ou estrutura.

I.2 Objetivo, contexto e contribuição

O objetivo desse trabalho é avaliar o comportamento mecânico de flexão entre a placa de aço carbono e o compósito de matriz epóxi com reforço de fibra de carbono e realizar a análise comparativa entre a análise experimental e numérica, com a utilização de um programa comercial ANSYS.

Os materiais escolhidos para os corpos de provas são compostos de aço carbono e fibra de carbono com resina epóxi. O aço A36 foi usado para simular a chaparia do costado do navio a ser reparado.

Na ausência de uma norma especifica para a utilização desse tipo de reparo foi utilizado as Práticas Recomendadas da Det Norske Veritas (DNV, 2012) para realização dos ensaios: DNV-RP-C301 – Práticas recomendadas para projeto, fabricação, operação e qualificação de reparos colados.

A expectativa com o desenvolvimento deste trabalho é mostrar que o emprego de materiais compósitos e das técnicas de colagem na indústria do petróleo é uma alternativa viável para reparos.

I.3 Organização do texto

O texto deste trabalho está divido da seguinte forma:

O Capítulo 1 apresenta a contextualização sobre o assunto que será abordado, além de apresentar as motivações e a forma como a dissertação foi organizada.

No Capítulo 2 é apresentada a disciplina de colagem e suas tecnologias, a teoria da adesão, conceitos sobre materiais compósitos e sobre critérios de falhas destes materiais, além de descrever sobre a análise numérica com a utilização do programa computacional comercial ANSYS.

O Capitulo 3 aborda a preparação dos corpos de prova e a análise experimental desenvolvida nos mesmos, enquanto que no Capítulo 4 é realizada a análise numérica e o comparativo com os resultados apresentados no Capítulo 3.

No capítulo 5 é apresentada a conclusão deste trabalho e recomendações para trabalhos posteriores.

Capítulo II - Revisão bibliográfica

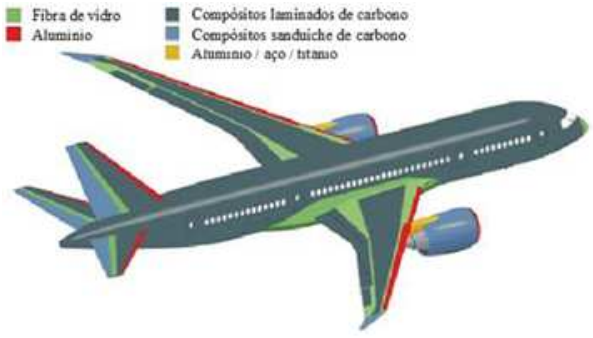
Este capítulo tem por objetivo apresentar os principais aspectos teóricos sobre materiais compósitos, sendo abordado inicialmente às características dos compósitos e seus constituinte e posteriormente a modelagem e análise de tensões de materiais compósitos.

II.1 Compósitos

Os materiais compósitos vêm ganhando espaço nos mais diferentes segmentos da indústria, a sua utilização tem como o objetivo combinar a necessidade de materiais de baixa densidade com elevada resistência estrutural. Apesar dos estudos sobre estes materiais serem recentes, a utilização destes pode ser considerada antiga. A utilização de pelo de cavalo e palha para a fabricação de tijolos reporta de mais de 5000 anos atrás (MARQUES, 2015).

A indústria aeronáutica tem se apresentado como uma das precursoras no desenvolvimento de materiais compósitos aliados as técnicas de colagem considerando a necessidade de se projetar componentes que possibilitem a redução do peso das aeronaves. A aplicação de compósitos possui um alto custo de fabricação, entretanto apresenta ganhos significativos, tal como o aumento de carga transportada.

Como forma de ilustrar o uso de compósitos na indústria aeronáutica, a Figura II.1 apresenta o Boeing 787, onde se pode perceber a aplicação de compósitos associada a técnicas de colagem.



Materiais (por peso)	
Compósitos	50%
Alumínio	20%
Titânio	15%
Aço	10%
Outros	5 %

Figura II.1: Distribuição de materiais do Boeing 787. Fonte: (ANGÉLICO, 2009)

Na indústria naval e petrolífera os compósitos são aplicados em larga escala em tubulações, estruturas e bandejamento elétrico, atualmente estão sendo desenvolvidos estudos para aplicação de compósitos como reparo de cascos de navios, tubulações e vasos de pressão metálicos com perda de espessura.

A aplicação dos reparos consiste na colagem de camadas de compósitos sobre a região da ocorrência do dano, como trincas ou perda de espessura por corrosão conforme ilustrado na Figura II.2.

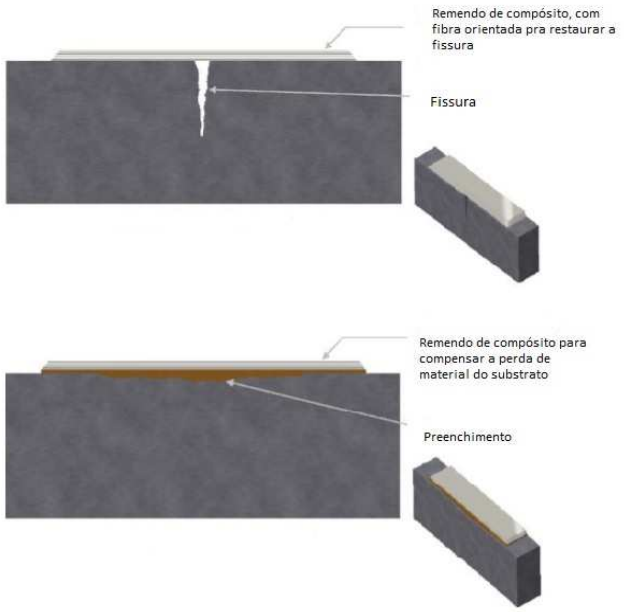


Figura II.2: Conceito de reparo de compósito para fissuras e perda de espessura por corrosão. Fonte (MARQUES, 2015).

Os reparos com compósitos são uma tecnologia relativamente nova e ainda não se pode assegurar o desempenho baseado em estudos cuja duração é muito mais curta que o pretendido para a vida em serviço. Deste modo, aproximações são usadas normalmente em muitos campos da engenharia para transpor esse problema, mas de qualquer forma extrapolações nessas condições de teste para longa vida em serviço com níveis de segurança assegurados introduzem uma grande fonte de incerteza (MARQUES, 2015).

Sendo assim, a solução prática para reparo colados em casco de navios foi limitar os reparos a casos não críticos. Os casos não críticos são aqueles que mesmo com reparo falhando não colocaria em risco a estrutura como um todo.

De uma forma mais generalista pode se dizer que compósitos são todos os materiais com mais de uma fase que preservam características de ambas buscando a melhor combinação entre as diferentes propriedades de cada fase (CALLISTER & RETHWISCH, 2010).

A maioria dos compósitos possuem apenas duas fases, sendo uma chamada de matriz, que é continua e que envolve a outra fase, denominada de carga, reforço ou dispersa. Cada uma das fases possuem características próprias, entretanto quando combinados em um material compósito apresentam propriedades diferentes de que cada uma das fases apresentam separadamente.

II.1.1 Fase matriz

A matriz tem por objetivo dar forma estável ao compósito, garantindo a coesão do material como um todo, além de prevenir as fibras de possíveis reações com o meio ambiente. A fase matriz de compósitos reforçados com fibras pode ser metálica, polimérica ou cerâmica. Os polímeros e metais são mais usados porque a matriz precisa ter ductilidade. No caso dos cerâmicos, a adição de fibras tem a função de aumentar a tenacidade do material.

Os compósitos de matriz polimérica apresentam o melhor desempenho e são os mais utilizados, devido à facilidade de processamento e a baixa densidade dos polímeros. O compósito utilizado neste trabalho é de matriz polimérica.

Quando comparados aos metais, os compósitos poliméricos são resistentes ao ataque químico, são não-magnéticos, não-condutores, apresentam uma excepcional relação resistência/peso e permitem a eliminação de elementos de fixação. As aplicações estruturais com polímeros são projetadas para uma temperatura máxima de trabalho inferior a temperatura de transição vítrea do material, que para a maioria das matrizes poliméricas é abaixo de 200°C. A versatilidade que os compósitos poliméricos oferecem permite a fabricação de uma grande quantidade de produtos (MARINUCCI, 2011).

As duas principais categorias de matrizes poliméricas são as termoplásticas e termofixas. As matrizes termoplásticas são geradas a partir da mudança de fase, material chega até à fusão sem que ocorram modificações expressivas em suas propriedades. Este processo é totalmente reversível, ou seja, este pode ser amolecido, fundido e reaproveitado repetidas vezes.

Enquanto as termofixas são consequência de reações químicas irreversíveis. Este processo se faz sob a forma de mistura de dois ou três componentes: resina, acelerador e catalisador. Depois de misturados na proporção adequada, ocorre a constituição da estrutura rígida, descrevendo o processo de “cura”. Uma das principais vantagens das matrizes termofixas está relacionada à maior facilidade de impregnação do reforço, pois antes da cura apresentam viscosidade muito inferior às dos termoplásticos. As resinas mais utilizadas em aplicações estruturais são os epóxidos, as bismaleimidas e as poliimidas (MARINUCCI, 2011).

Nas matrizes termorfixas a temperatura de transição vítrea é controlada pelo grau de reticulação da estrutura, possuindo alterações muito menos acentuadas que os termoplásticos. Estes polímeros não apresentam fusão, degradando-se de forma irreversível a altas temperaturas (MARINUCCI, 2011).

II.1.2 Fase reforço

A fase reforço ou carga normalmente é composta por carbono, vidro ou aramida e tem por objetivo garantir a resistência mecânica esperada no compósito. A inclusão destes reforços

também tem por objetivo melhorar as propriedades físicas, térmicas e características de processamento.

Quanto ao tipo de reforço, os materiais compósitos podem ser classificados conforme a Figura II.3.

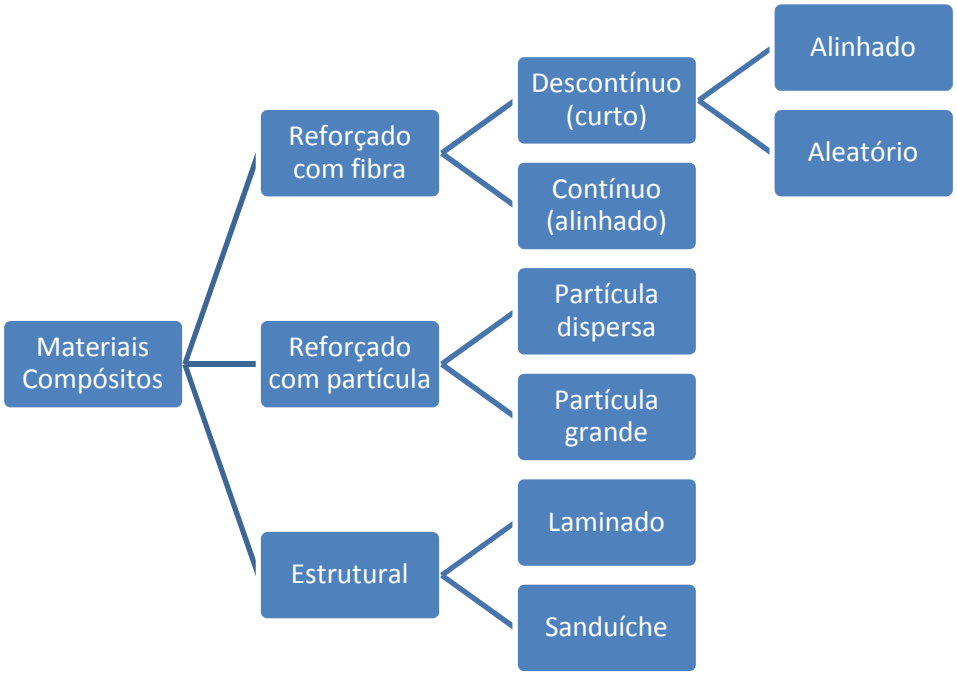


Figura II.3: Classificação de materiais compósitos. Fonte: Adaptado de (MARQUES, 2015)

Apesar das diferenças, um fator de grande destaque é o fato que o quão mais aleatório for à distribuição do reforço mais próximo do isotrópico é o comportamento do compósito (MOURA, 2009). Em contrapartida, a tendência à anisotropia é uma característica marcante das fibras alinhadas.

A fibra de carbono, utilizada neste trabalho, é um compósito filamentoso, obtido a partir de vários tipos de materiais compostos de carbono através da decomposição térmica sem oxigenação, também conhecida como pirólise, contendo pequenas quantidades de materiais inseridos em sua estrutura, como resinas, por exemplo.

II.1.3 Compósitos fibrosos

Os compósitos reforçados com fibras são os mais importantes para aplicações em estruturas mecânicas, pois possuem alta resistência e alta rigidez em relação ao peso. Esses materiais são classificados de acordo com o comprimento das fibras.

A utilização de fibras em matrizes poliméricas permite o ganho da resistência proveniente dos materiais cerâmicos evitando o risco de uma fratura frágil. As fibras conduzem a uma fratura progressiva, não repentina (ASHBY & JONES, 1998).

Dentre os compósitos fibrosos mais aplicados nas indústrias petrolífera, naval e aeronáutica, destacam-se os com fibra de vidro (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*), com fibra de carbono (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*) e com fibras de aramida.

Os compósitos reforçados com fibra possuem densidade muito inferior e resistência próxima, e às vezes superior, se comparado a ligas metálicas. Na tabela II.1 são apresentadas as propriedades das fibras, polímeros e de metais.

Tabela II.1 : Quadro comparativo de propriedades mecânicas. Adaptado de (MARQUES,2015).

Material	Densidade ρ (g/cm^3)	Modulo de Elastic. E (GPa)	Resistência σ(MPa)
Fibras			
Carbono	1,95	390	2200
Vidro	2,56	76	1400 – 2500
Kevlar	1,45	125	2760
Matrizes			
Epóxi	1,2 – 1,4	2,1 – 5,5	40 – 85
Poliéster	1,1 – 1,4	1,3 – 4,5	45 – 85
Compósitos			
CFRP em Epóxi	1,5	189	1050
GFRP em Poliéster	2,0	48	1240
Metais			
Aço	7,8	207	1000
Liga de alumínio	2,8	71	500

A resistência mecânica, além de outras propriedades, dos compósitos reforçados por fibras variam de acordo com o comprimento, orientação e concentração das fibras.

As características mecânicas do compósito dependem do grau que a carga aplicada é transmitida para as fibras pela matriz, e a magnitude da ligação interfacial matriz-fibra é importante para a transferência de carga (CALLISTER & RETHWISCH, 2010).

Durante a aplicação de uma tensão a ligação fibra-matriz termina na extremidade da fibra, produzindo uma deformação na matriz. Então para um fortalecimento ou endurecimento do compósito é necessário ter o conhecimento do tamanho critico da fibra. Para o cálculo do tamanho crítico, o diâmetro da fibra, a tensão de ruptura da fibra e a tensão de escoamento da matriz são considerados (MARQUES, 2015).

As fibras com comprimento maior que quinze vezes o comprimento crítico ($l > 15l_c$) são chamadas de contínuas. As fibras descontínuas ou curtas são as fibras menores que o estabelecido para as fibras continuas (CALLISTER & RETHWISCH, 2010).

Para as fibras descontinuas com comprimento menor que o crítico, a matriz se deforma no entorno da fibra, não transmitindo tensão. Sendo assim, são compósitos particulados.

De um modo geral, para se obter um ganho significante na resistência do compósito as fibras devem ser contínuas.

A distribuição e orientação de uma fibra em relação à outra é um fator muito importante para a caracterização da resistência e de outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras. Em relação à orientação dois modelos são possíveis: As fibras alinhadas paralelamente em uma única direção ou totalmente aleatória. As fibras contínuas são normalmente alinhadas enquanto as descontínuas podem ser alinhadas ou aleatórias (MARQUES, 2015).

Os compósitos com fibras alinhadas são considerados anisotrópicos, ou seja, o comportamento tensão-deformação dependerá da direção onde a carga é aplicada em relação à orientação das fibras. Os compósitos reforçados com fibras contínuas, dependendo da orientação da carga, são os que têm o maior nível de eficiência. A eficiência é máxima quando a carga é aplicada no sentido longitudinal da fibra e nula no sentido perpendicular. A tabela II.2 apresenta algumas situações.

Tabela II.2 : Eficiência de compósitos reforçados com fibra. Fonte: (MARQUES, 2015).

Orientação da Fibra	Direção da tensão	Eficiência do reforço
Todas as fibras paralelas	Paralela às fibras	1
	Perpendicular às fibras	0
Fibras distribuídas uniforme e aleatoriamente em uma superfície plana	Qualquer direção no plano	3/8
Fibras distribuídas uniforme e aleatoriamente em três dimensões no espaço	Qualquer direção	1/5

As reações mecânicas desse tipo de compósito dependem, além da orientação das fibras, do comportamento tensão-deformação e das proporções de cada fase, matriz e fibras. Como mostrado na figura II.4, a curva tensão deformação do compósito é uma combinação das duas fases. A figura II.4 (a) mostra as curvas de uma fibra frágil e de uma matriz dúctil e figura II.4 (b) mostra a curva tensão-deformação do compósito com as curvas de cada fase sobreposta.

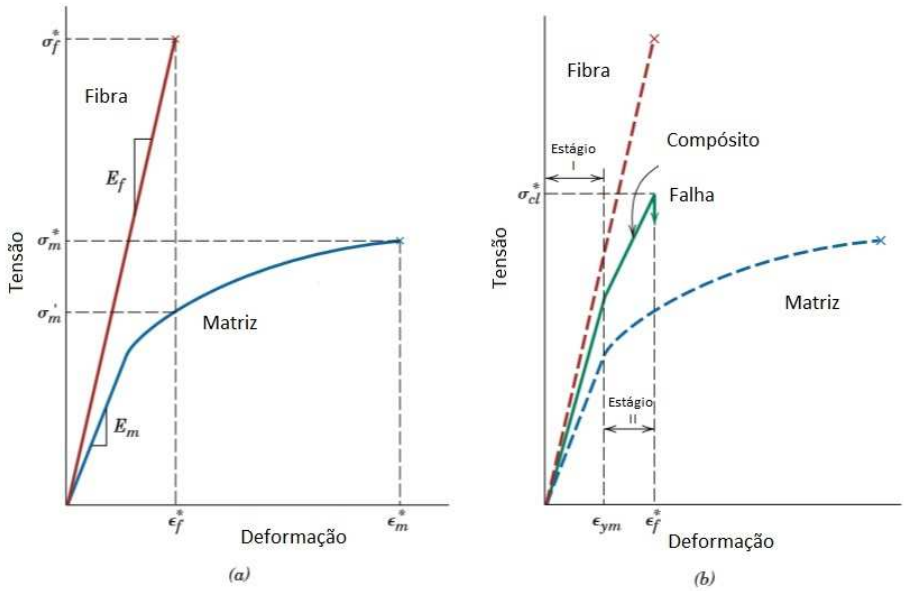


Figura II.4: Curvas tensão-deformação. Fonte: (CALLIESTER & RETHWISCH, 2010)

II.1.4 Compósitos laminados

Para os casos em que os compósitos serão submetidos às solicitações multidirecionais, é comum posicionar as camadas, uma sobre as outras, em orientações diferentes. Esse tipo de compósito é chamado de laminado multidirecional, como mostrado na figura II.5. As orientações mais adotadas das camadas são 0º/90º e +45º/-45º.

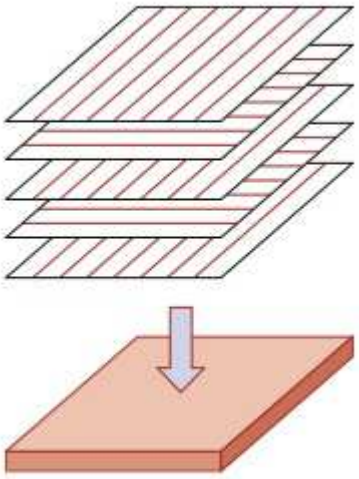


Figura II.5: Construção de um compósito laminado multidirecional. Fonte: (CALLIESTER & RETHWISCH, 2010)

Ao contrário do que ocorre em laminados unidirecionais em que ocorre uma fragilidade na direção perpendicular ao reforço, a versatilidade oriunda das variações na

orientação e na sequência de empilhamento tornam os laminados multidirecionais mais aplicáveis as necessidades de projeto.

Os compósitos laminados podem apresentar algumas falhas quando submetida a uma solicitação, conforme ilustrado na Figura II.6.

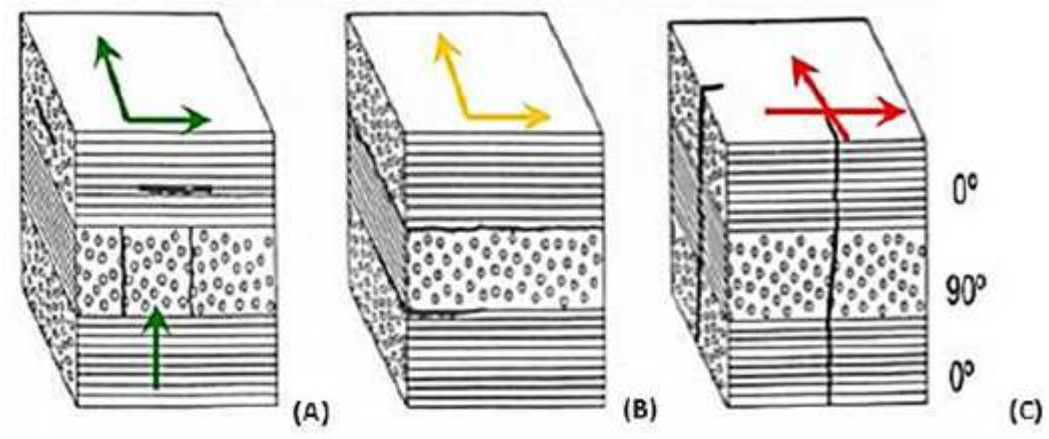


Figura II.6: Tipos de falha: Fratura intralaminar (A); Fratura interlaminar (B); Fratura Translaminar (C). Fonte: (ALMEIDA, 2010).

II.2 Modelagem

Uma das etapas de desenvolvimento de produtos na indústria envolve a identificação do comportamento do bem desenvolvido quando em uso para a aplicação para qual o mesmo foi desenvolvido. Sabe-se que nem sempre é possível realizar a avaliação do comportamento de peças no tamanho real que são projetadas, por este motivo há duas alternativas de solução, realização de ensaios em peças com tamanho reduzido e por meio de método analítico.

Algumas peças apresentam complexidade ou dificuldade de definição de condições de contorno, de tal forma que é necessário à utilização de recursos numéricos, através do uso de softwares de engenharia que utilizam métodos de elementos finitos para avaliação do comportamento mecânico das peças desenvolvidas.

O método de elementos finitos permite a obtenção de resultados próximos aos resultados obtidos em ensaios mecânicos realizados. A utilização deste método para projetos de estruturas coladas mostrou-se apropriada para avaliação dos campos de tensão na região das juntas, utilizadas em reparos de materiais compósitos.

Uma das principais ferramentas numéricas por análise de elementos finitos existentes no mercado de engenharia é o software ANSYS, sendo que neste trabalho foi utilizado o ANSYS ACP (ANSYS *Composite Pre and Post*).

O ANSYS ACP é a ferramenta para a definição de compósitos integrada ao ANSYS Workbench. Esta ferramenta possui todas as funções necessárias para a análise de

compósitos laminados, desde a concepção à produção final, além da análise de cada camada em separado.

O primeiro passo da simulação numérica é selecionar o material que será utilizado, caso o material a ser trabalhado não exista na biblioteca do ANSYS, é necessário conhecer o comportamento elástico do material para que sejam inseridas as informações das propriedades dos materiais. No presente trabalho, as informações necessárias são os módulos de elasticidade (E_1, E_2 e E_3), cisalhamento (G_{12}, G_{23} e G_{13}) e coeficiente de Poisson (ν_{12}, ν_{23} e ν_{13}).

II.2.1 Modelo de zona coesiva

Em materiais multifásicos, tal como compósitos laminados, a fratura ou delaminação ao longo de uma interface entre as fases desempenha um papel importante limitando a dureza e ductilidade destes materiais. Por este motivo, é fundamental o estudo da falha das interfaces (ANSYS, 2015).

A delaminação da interface pode ser modelada por métodos de mecânica da fratura tradicionais, tais como a liberação nodal, alternativamente também é possível introduzir diretamente o mecanismo da fratura através da relação entre esforços trativos e deslocamentos que por sua vez introduz a energia da fratura que quando crítica é responsável pela separação das interfaces (ANSYS, 2015).

Esta última técnica é denominada modelo de zona coesiva (CZM, *Cohesive Zone Model*). As superfícies de interface dos materiais são representadas por um conjunto especial de elementos de interface ou de elementos de contato, e um modelo CZM é utilizado para caracterizar o comportamento constitutivo da interface.

O modelo CZM consiste em uma relação constitutiva entre a força de tração atuante na interface e o deslocamento interfacial, sendo que as definições dos esforços de tração e do afastamento dependem do elemento e do modelo de material. No presente trabalho o CZM foi gerado a partir de elementos de contato.

II.2.2 Elementos de contato

Os elementos de contato apresentam 4 opções de modelagem do CZM no Ansys, sendo que na modelagem realizada neste trabalho foi utilizado o modelo bilinear proposto por (ALFANO & CRISFIELD, 2001).

Em modo I, o descolamento das interfaces é gerado pelo esforço normal aplicado as estas. O descolamento se inicia quando a tensão máxima de contato é atingida, ponto A na Figura II.7, sendo concluído no momento em que esta tensão é zerada, ponto C na Figura II.7. A partir deste momento, qualquer outro descolamento pode ocorrer independente do esforço normal que a interface seja submetida.

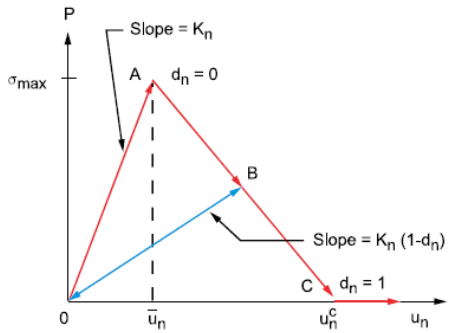


Figura II.7: Modelo bilinear para CZM. Fonte: Adaptado de (Alfano & Crisfield, 2001)

A área sob a curva OAC representa a energia gerada pelo descolamento ocorrido e é denominada como energia crítica de fratura. A inclinação da reta OA caracteriza o modo da fratura, dúctil ou frágil.

Uma vez iniciado o descolamento, considera-se que há um dano acumulado e por este motivo a tensão máxima para início do descolamento é reduzida, representada pelo ponto B na Figura II.7.

A tensão de início do descolamento pode ser obtida pela equação apresentada a seguir:

$$\sigma = K_n u_n (1 - d_n) \qquad (1)$$

Onde:

σ = tensão

K_n = rigidez

u_n = afastamento

d_n = parâmetro de descolamento

O parâmetro de descolamento é definido pela equação abaixo:

$$d_n = \left(\frac{u_n - \overline{u_n}}{u_n}\right)\left(\frac{u_n^c}{u_n^c - \overline{u_n}}\right) \qquad (2)$$

Onde:

$\overline{u_n}$ = afastamento na tensão máxima

u_n^c = afastamento no descolamento completo

II.3 Análise do comportamento de materiais compósitos

Os materiais compósitos possuem propriedades anisotrópicas, ou seja, suas propriedades variam de acordo com a direção, e por este motivo a determinação das tensões e deformações destes materiais se diferencia das soluções convencionais adotadas para

materiais com propriedades isotrópica, cujas propriedades são as mesmas em qualquer direção.

A rigidez de um material isotrópico é descrita por duas propriedades: o módulo de elasticidade (E), e o coeficiente de Poisson (υ), enquanto que um material anisotrópico são necessárias até 21 constantes.

Há materiais compósitos que possuem fibras unidirecionais, podendo assim ser considerado materiais ortotrópicos, pois a direção das fibras apresenta três planos de simetria, sendo um plano perpendicular à direção da fibra, os outros dois são planos ortogonais à direção da fibra.

As propriedades de um material ortotrópico são determinadas através do Módulo de Young (E), Coeficiente de Poison (υ) e Tensão de cisalhamento (G) nos três planos ortogonais existentes (x,y e z).

Em materiais compósitos cuja fibra unidirecional é longa e fina, pode ser considerado que as propriedades em duas direções ortogonais são iguais, portanto, as propriedades entre estes planos são isotrópicas. Deste modo, há redução do número de constantes para determinação das propriedades mecânicas do compósito.

Para o estudo da aplicação de compósitos em projeto de reparos, a análise de tensões, deformações e critérios de falhas deve adotar a abordagem do tipo meso-escala, considerando o sentido e a direção das fibras para a laminação de cada camada do compósito, uma vez que as propriedades do material empregado, assim como a espessura das camadas são informações relevantes para as avaliações do material.

Quando o foco do estudo envolver apenas as análises de deslocamentos, cargas de flambagem ou modos de vibração, deve ser adotado a abordagem do tipo macro-escala, onde o conjunto fibra-resina é considerado como uma casca homogênea, entretanto não é possível a obtenção da distribuição de tensões e deformações do material.

A delaminação é um dos modos típicos de falha para materiais compósitos, sendo a segregação entre camadas ocasionada pela tensão normal atuante na direção da espessura do compósito. Outro modo de falha destes materiais é o descolamento da interface de adesão entre um compósito e um metal, sendo este último modo possível somente para os casos em que o metal e o compósito forem modelados separadamente.

As teorias disponíveis para critérios de falha em materiais ortotrópicos se restringem ao caso biaxial de tensões, e algumas podem ser vistas como adaptações dos critérios de falhas usados em materiais isotrópicos, como é o caso da teoria da máxima tensão e da teoria da máxima deformação.

Estas teorias são consideradas mais sofisticadas e precisas, sendo possível indicar a falha em qualquer camada do compósito e os modos de falha que ocorrem por tração ou

compressão da fibra ou matriz. Os critérios típicos de falha de máxima tensão e máxima deformação são, respectivamente, os critérios de Tsai-Hill e Tsai-Wu.

O critério de falha de máxima tensão considera que a falha ocorre quando qualquer um dos componentes de tensão excede a resistência correspondente à direção do carregamento. O critério de falha de máxima deformação ocorre quando pelo menos uma das componentes de deformação excede a deformação admissível do material.

O critério de falha de Tsai-Hill considera as interações entre diferentes modos de falha. Este critério é baseado no critério de falha de von-Mises para metais. O critério de Tsai-Wu é uma ampliação do método anterior, entretanto considera dados experimentais para o compósito. De uma maneira geral o critério de Tsai-Wu pode ser escrito como mostrado na Equação 4:

$$\sum_{i=1}^{6} F_i\sigma_i + \sum_{i=1}^{6}\sum_{j=1}^{6} F_{ij}\sigma_i\sigma_j + \sum_{i=1}^{6}\sum_{j=1}^{6}\sum_{k=1}^{6} F_{ijk}\sigma_i\sigma_j\sigma_k + \cdots = 1 \quad (3)$$

Os coeficientes F_i, F_{ij} e F_{ijk} são estruturas rearranjadas de tensores de 2ª, 4ª e 9ª ordem, respectivamente. Uma vantagem deste método é que existe liberdade para a utilização de tantos termos quantos sejam necessários para a aproximação dos pontos experimentais de um material.

Entretanto, uma vez que cada constante está associada a um tipo distinto de ensaio mecânico para sua determinação, comumente a equação restringe-se apenas aos termos de 2a ordem. Caso isto não seja feito, a quantidade e a complexidade dos ensaios necessários para a determinação das constantes tornaria inviável o método. Assim a Equação 4 reduz-se a Equação 5:

$$\sum_{i=1}^{6} F_i\sigma_i + \sum_{i=1}^{6}\sum_{j=1}^{6} F_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1 \qquad (4)$$

Para o caso do estado plano de tensões tem-se a Equação 5:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\gamma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \qquad (5)$$

Onde:

$$F_{11} = \frac{1}{X_1^T X_1^C} \qquad F_1 = \frac{1}{X_1^T} - \frac{1}{X_1^C} \qquad (6)$$

$$F_{22} = \frac{1}{X_2^T X_2^C} \qquad F_2 = \frac{1}{X_2^T} - \frac{1}{X_2^C} \quad F_{66} = \frac{1}{S^2} \qquad (7)$$

Nas equações 7 e 8 X_n^T e X_n^C são as resistências a tração e compressão, respectivamente, na direção axial do compósito e S é a resistência ao cisalhamento do compósito. O presente trabalhou utilizou o critério de Tsai-Wu para realizar a análise de falha do compósito.

II.4 Juntas coladas

O emprego de juntas adesivas estruturais como alternativa as juntas tradicionais já ocorre desde o inicio do século XX, quando as aeronaves começaram a utilizar adesivos baseados em caseína, um material polimérico natural derivado do leite. Contudo, absorvendo água eles se tornavam fracos e exalavam cheiros desagradáveis (MARQUES, 2015).

A confiabilidade e a durabilidade dos adesivos começa a ganhar corpo com a introdução dos adesivos sintéticos poliméricos no inicio dos anos 40. A evolução química dos adesivos permitiu, por exemplo, a ligação de materiais metálicos e de madeira com sucesso. Esta foi a tecnologia utilizada pelos engenheiros no projeto da aeronave Comet como solução para a redução de peso da fuselagem metálica (DA SILVA, MAGALHÃES, & MOURA, 2007).

A tecnologia da adesão avançou muito e atualmente é utilizada como principal alternativa as juntas convencionais devido a reduzida concentração de tensões, pela transferência suave de carga em largas áreas de colagem, pela resistência superior a fadiga, pela excelente relação peso-resistência, pela aerodinâmica otimizada, pelos baixos custos no processo de fabricação, pela facilidade de manipulação, possibilidade de união entre diferentes tipos de materiais, entre outros (MARQUES, 2015).

Algumas das vantagens e desvantagens observadas em muitos aspectos para a utilização das técnicas de colagem, listados por (EBNESAJJAD, 2008), são:

Vantagens:

- Distribuição uniforme das tensões.
- Possibilidade de unir materiais de diferentes espessuras.
- Possibilidade de unir materiais dissimilares.
- Diminui ou previne a corrosão eletroquímica entre materiais dissimilares.
- Boa relação resistência/ peso.

Desvantagens:

- A colagem geralmente não permite inspeção visual da área colada.
- Necessidade de tratamento da superfície para obtenção de juntas duráveis.
- Necessidade de longos períodos de cura para algumas aplicações.

- Necessidade da utilização de ferramentas para manter a junta na posição, autoclaves, fornos.
- Serviços em altas temperaturas limitam a utilização da técnica.

A adesão demanda o conhecimento de prévio de varias outras disciplinas para que seja aplicada com sucesso. Deste modo, a adesão é uma técnica multidisciplinar. Na figura II.8 estão representadas as principais áreas envolvidas.

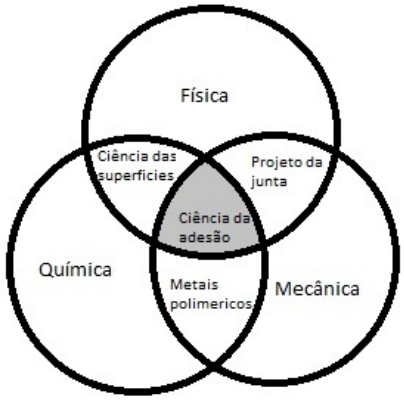


Figura II.8: Disciplinas envolvidas na ciência da adesão. Fonte Adaptado de (DA SILVA, MAGALHÃES & MOURA, 2007)

Um adesivo estrutural é um adesivo que resiste a forças substanciais e que é responsável pela resistência e rigidez da estrutura (da SILVA, MAGALHÃES, & MOURA, 2007).

As juntas coladas são compostas por substratos e adesivo. Os substratos são os materiais a serem ligado e podem ser metálico, cerâmico ou polimérico, não havendo necessidade de que sejam de mesmo material, enquanto o adesivo é um material polimérico aplicado para proporcionar a ligação entre os substratos.

O conceito das forças intermoleculares que se estabelecem entre as duas substâncias é chamado de adesão. Chama-se coesão quando as forças atuam em apenas uma substância. Estas forças são principalmente forças de Van der Waals (MARQUES, 2015).

Para o correto entendimento do fenômeno da adesão é necessário que as forças disponíveis e as relações entre superfícies sólidas e líquidas em conjunto sejam analisadas. A ligação de um adesivo a uma superfície é o somatório de todas as forças mecânicas, químicas e físicas envolvidas (DA SILVA, MAGALHÃES, & MOURA, 2007). A combinação de diferentes mecanismos é o mais provável responsável pela adesão em sistema adesivo e o papel de cada mecanismo pode variar de acordo com o sistema utilizado (EBNESAJJAD, 2008).

A escala de interação entre o substrato e o adesivo é um fator importante a ser observado no entendimento da teoria da adesão. A Tabela II.3 mostra a escala de interação para cada mecanismo.

Tabela II.3 : Teoria da adesão. Fonte: Adaptado de (EBNESAJJAD, 2008).

Tradicional	Recente	Escala de interação
Mecânica	Mecânica	Microscópica
Eletrostática	Eletrostática	Macroscópica
Difusão	Difusão	Molecular
Adsorção	Molhagem	Molecular
	Colagem química	Atômica
	Camada fraca	Molecular

Não existe uma teoria única que explique a adesão de forma completa e geral. A seguir são descritas as quatro teorias da adesão tradicionais: Mecânica, adsorção, difusão e eletrostática.

II.4.1 Teoria Mecânica

O adesivo deve ter as propriedades adequadas para adentrar as irregularidades da superfície do substrato num tempo razoável, assim como a superfície deverá ter o tratamento adequado, garantindo assim uma boa adesão devido a ancoragem do adesivo ao substrato.

A adesão também pode ocorrer em superfícies lisas, o que demonstra que o ancoramento mecânico não pode ser considerado como teoria geral para todos os casos de adesão (MARQUES, 2015).

O ancoramento mecânico pode ser melhorado através de tratamentos superficiais do substrato, proporcionando assim aumento de resistência e durabilidade da junta. O aumento e a limpeza da área de contato entre adesivo e o substrato, maior cinética de molhagem e aumento de mecanismos de dissipação de energia do adesivo também melhoram a adesão.

II.4.2 Teoria da adsorção

A teoria da adsorção considera que a adesão é gerada pelas forças de superfície. As ligações covalentes, interações ácido-base e pontes de hidrogênio proporcionam a adsorção química, enquanto que as forças de Van der Waals geram a adsorção física.

Independente do tipo de adsorção, a adesão se baseia na proximidade entre adesivo e substrato a ponto de possibilitar a interação entre as moléculas de cada um. A Figura II.9 ilustra como acontece a adesão por adsorção.

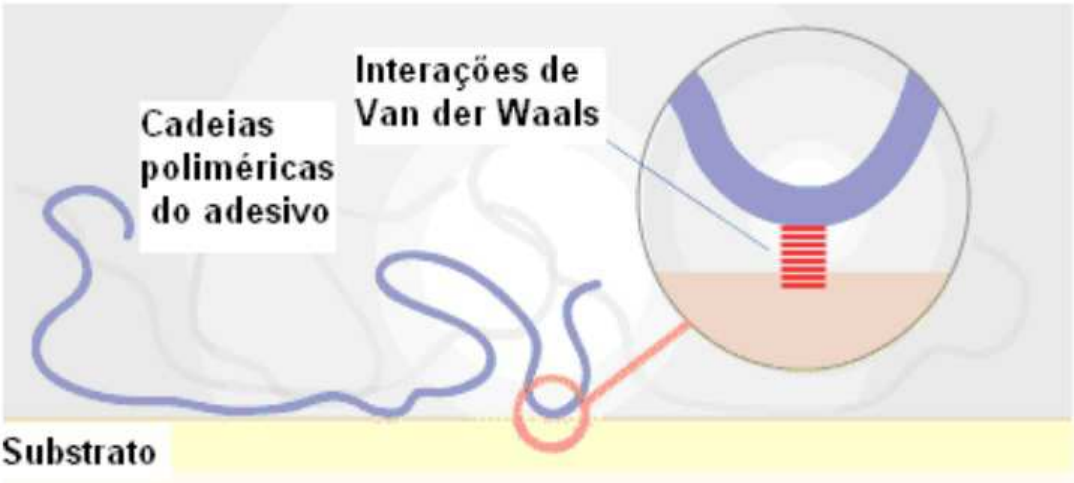


Figura II.9: Esquema de adesão por adsorção. Fonte: (MARQUES, 2015).

II.4.3 Teoria da Difusão

Quando o adesivo e o aderente são polímeros, é possível que a adesão ocorra pela interdifusão de uma cadeia de uma molécula do polímero da superfície do substrato com a estrutura da superfície do adesivo formando uma ponte através da interface. Este processo pode ser facilitado com a utilização de solventes ou soldagem.

Quando o substrato e o adesivo são do mesmo material o fenômeno é chamado de autoadesão, enquanto que nos casos em que os materiais são diferentes denomina-se por heteroadesão (MARQUES, 2015).

II.4.4 Teoria eletrostática

A adesão gerada pelo efeito eletrostático entre substrato e adesivo ocorre devido a transferência de elétrons através da interface, criando zonas com cargas negativas e positivas que se atraem. A teoria eletrostática é validada nos ensaios de arranchamento, uma vez que são notadas descargas elétricas nestes ensaios.

II.4.5 Preparação da superfície

Para que a adesão aconteça de forma satisfatória, é vital que a preparação das superfícies da junta seja bem executada. Esta preparação está diretamente relacionada a resistência e a durabilidade da junta (MARQUES, 2015).

A preparação da superfície tem como um dos objetivos proporcionar o contato direto entre o substrato e o adesivo, sem a intervenção de camadas de filmes de óxidos, tinta e inclusão de ar (ou outros gases) em vazios na região ligada, tais camadas são denominadas de camadas fracas.

Cada substrato possui procedimentos distintos para a preparação da superfície. A Tabela II.4 apresenta os principais métodos de tratamento de superfície.

Tabela II.4 : Tratamento de superfície. Fonte: (MARQUES, 2015).

Substrato	Método	Resultado
Metal	Desengraxar	Limpeza da superfície
Metal	Jateamento com granalha	Remoção da camada fraca e aumento de contato da superfície.
Metal	Ataque com ácidos	Remoção da camada fraca
Não metais	Descarga de Corona	Remoção da camada fraca
Não metais	Tratamento por chama	Remoção da camada fraca
Não metais	Ataque químico	Remoção da camada fraca

Os metais possuem uma alta energia de superfície e absorvem óleo e outros contaminantes que podem existir no ambiente. Por sua vez estes contaminantes gordurosos possuem fraca energia de superfície e podem trazer problemas de molhagem (MARQUES, 2015).

A limpeza e o jateamento são os principais métodos de preparação de superfície para substratos metálicos, sendo que uma das melhores formas de limpeza de superfície metálica é a utilização de desengordurante com solventes orgânicos. A limpeza da superfície do substrato deste trabalho foi realizada com acetona.

O jateamento com granalha de aço consiste em projetar partículas abrasivas sobre a superfície do substrato proporcionando o aumento da área de contato do adesivo através do tratamento da rugosidade no substrato metálico. A rugosidade das superfícies tratadas com esse procedimento aumenta a resistência e consequentemente melhor a adesão da junta.

Existe um tamanho de granalha para cada tipo de substrato, sendo que no jateamento aplicado neste trabalho foi utilizada a granalha G40.

Capítulo III - Análise Experimental

Neste capítulo serão apresentados os materiais, suas propriedades, além dos métodos de preparo dos corpos de prova e dos ensaios desenvolvidos. Os resultados obtidos nos ensaios estáticos também serão apresentados e comentados.

III.1 Preparação dos corpos de prova

A fabricação dos corpos de prova utilizados neste trabalho, compósito laminado e a junta metal/compósito, foi realizada em parceria com o laboratório de Adesão e Aderência da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), no campus de Nova Friburgo.

III.1.1 Compósito laminado

O material utilizado para fabricação do laminado foi fibra de carbono, sendo as lâminas de fibra de carbono foram empilhadas manualmente sendo aplicando entre camadas o adesivo Epóxi Pipefix de fabricação da Polinova S.A. O laminado fabricado possui cada um, 20 camadas de lâminas de fibra de carbono com orientações alternadas. O tempo de cura adotado foi de 24 horas.

Para a análise experimental dos compósitos laminados foram gerados corpos de prova com orientação ± 45º, conforme Tabela III.1.

Tabela III.1 : Corpos de prova dos ensaios de flexão.

Corpo de Prova - Compósitos Laminados	
Dimensões (mm)	**Nº de corpos de prova**
120,00 x 10,00 x 6,35	1
240,00 x 25,00 x 6,35	3

III.1.2 Junta metal/compósito

A fabricação da junta metal/compósito seguiu as orientações constantes na DNV-RP-301 (DNV, 2012), onde informa que o processo de manufatura do reparo, o tratamento das superfícies dos materiais, o processo de laminação, o adesivo, o modo de aplicação do adesivo, o tempo de cura do laminado e do adesivo devem ser o mesmo da aplicação real.

A primeira etapa na fabricação da junta foi a preparação da superfície do substrato metálico, sendo utilizado a chapa de aço carbono ASTM A36, com espessura de 6,35mm, para simular o casco do FPSO.

A preparação da superfície foi iniciada com a aplicação de acetona para que o substrato fosse limpo e desengordurado, posteriormente foi realizado o processo de jateamento com granalha de aço com objetivo de melhorar a rugosidade da superfície de aplicação da resina. A Figura III.1 ilustra o procedimento de jateamento com granalha do tipo G-40.



Figura III.1: Jateamento da superfície da chapa de aço

Após a preparação da superfície foi aplica a resina Epóxi NVT de fabricação da empresa Polinova S.A. para realizar a adesão da primeira camada de fibra de carbono ao substrato. A Figura III.2 apresenta o substrato após a aplicação da resina.



Figura III.2: Chapa de aço após a aplicação da resina.

O procedimento adotado para a aplicação das camadas de fibra de carbono foi semelhante ao descrito no realizado para geração do laminado descrito no item III.1.1, entretanto foram adotadas camadas com orientação de 0º/90º°, uma vez que o objetivo era

produzir corpos de prova similar ao reparo de compósito utilizado no reparo do casco do FPSO apresentado na Figura III.3.



Figura III.3: Aplicação de reparo de compósito no casco de um FPSO. Fonte: (MENICONI, 2014)

A Figura III.4A ilustra o processo de fabricação do reparo no laboratório e a Figura III.4B o reparo depois do processo concluído.



(A) (B)

Figura III.4: Processo de fabricação do reparo (A); reparo de compósito (B).

Após o período de cura da junta foram produzidos corpos de prova com largura de 25 mm. Em busca de representar as condições reais do reparo ilustrado na Figura III.3, foi realizado um corte a 90° em cada extremidade do laminado. A Figura III.5 apresenta o corpo de prova que serão adotados nos ensaios desenvolvidos no presente trabalho.



Figura III.5: Esquema do corpo de prova utilizado nos ensaios. Fonte: (MARQUES, 2015).

III.2 Ensaios Estáticos

Os ensaios apresentados a seguir foram desenvolvidos no Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), sendo os ensaios do compósito laminado desenvolvido no Laboratório de Compósitos e Adesivos, enquanto os ensaios da junta compósito/metal foram realizados no Laboratório de Materiais (LAMAT).



Figura III.6: Máquina Instron utilizada nos ensaios

Todos os ensaios foram desenvolvidos em ambiente com temperatura controlada de 25ºC.

III.2.1 Ensaio de flexão no compósito laminado

Os ensaios de flexão dos laminados foram realizados com o objetivo de testar os compósitos no mesmo formato e condição usado nos reparos e também para comparar os comportamentos a flexão que serão apresentados no item III.2.2.

O ensaio flexão em 3 pontos consiste em posicionar o corpo de prova de seção transversal retangular em dois apoios e aplicar um carregamento gradualmente crescente no ponto médio destes, através de uma superfície de contato.

Os ensaios desenvolvidos foram realizados com velocidade de ensaio de 2 mm/min (0,05 pol/min), sendo adotado duas dimensões de corpos de prova, conforme apresentado na Tabela III.1.

Tabela III.1 : Corpos de prova dos ensaios de flexão.

Corpo de Prova	Dimensões (mm)	Span (mm)
S100W10	120,00 x 10,00 x 6,35	100
S100W25	240,00 x 25,00 x 6,35	100
S150W25		150
S200W25		200

Inicialmente foram realizados os ensaios dos corpos de prova para o span de 100 mm, uma vez que estes corpos de prova possuem o mesmo comprimento do compósito que foi aplicado na junta ensaiada, sendo os resultados apresentados na Figura III.7. Em ambos os corpos de prova não houve rompimento completo das fibras, sendo observado início de falha na parte inferior do laminado, conforme ilustrado na Figura III.8.

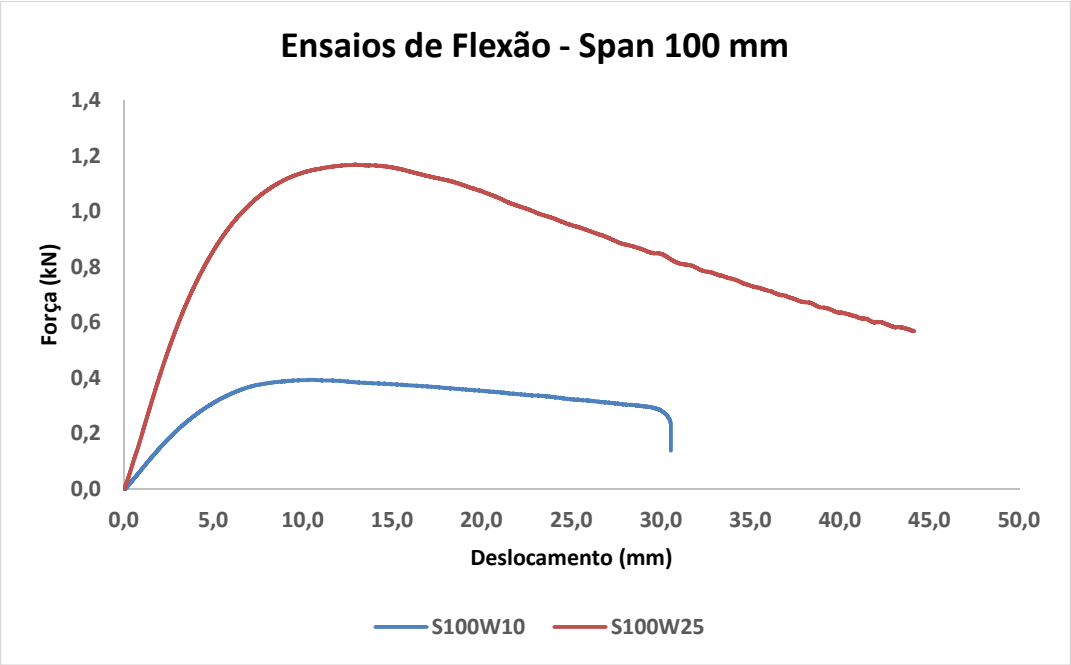


Figura III.7: Ensaios de flexão – span 100 mm

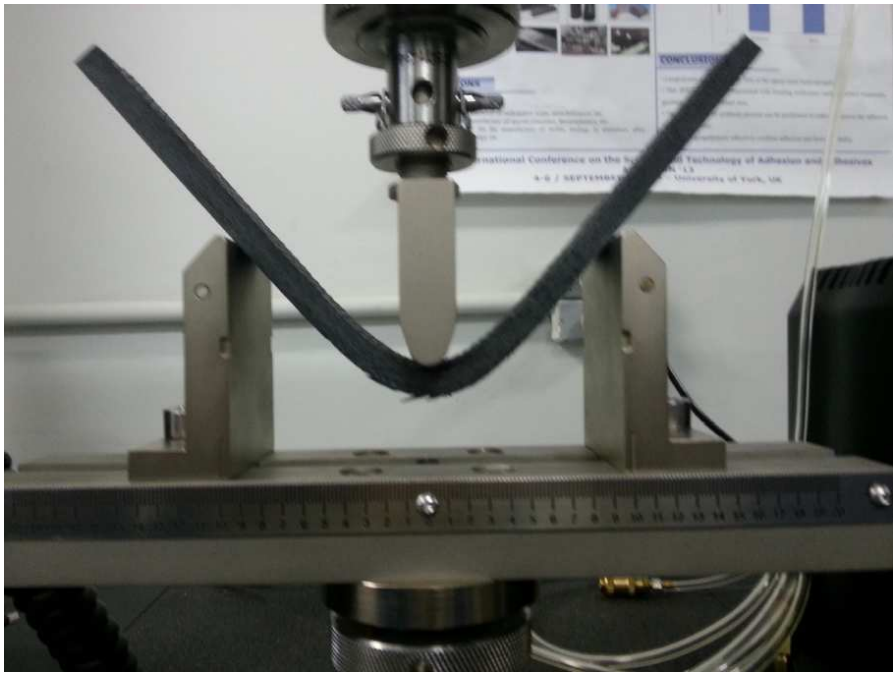


Figura III.8: Corpo de prova de span 100 mm sendo ensaiado

Os resultados para os corpos de prova de comprimento de 240 mm são apresentados pela Figura III.9. Em todos os ensaios, independente do span adotado, foi necessário interromper os ensaios, uma vez que os deslocamentos atingiram valores muito grandes alterando assim a configuração inicial do ensaio. A Figura III.10 ilustra o ensaio com o span de 150 mm.

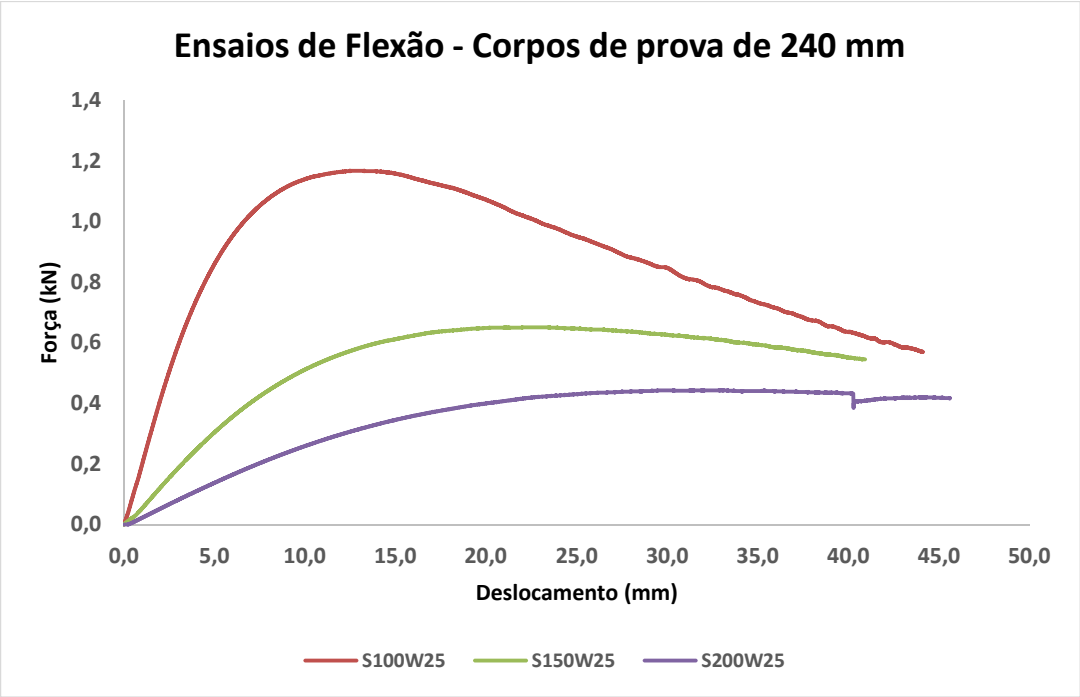


Figura III.9: Ensaios de flexão – corpos de prova de 240 mm

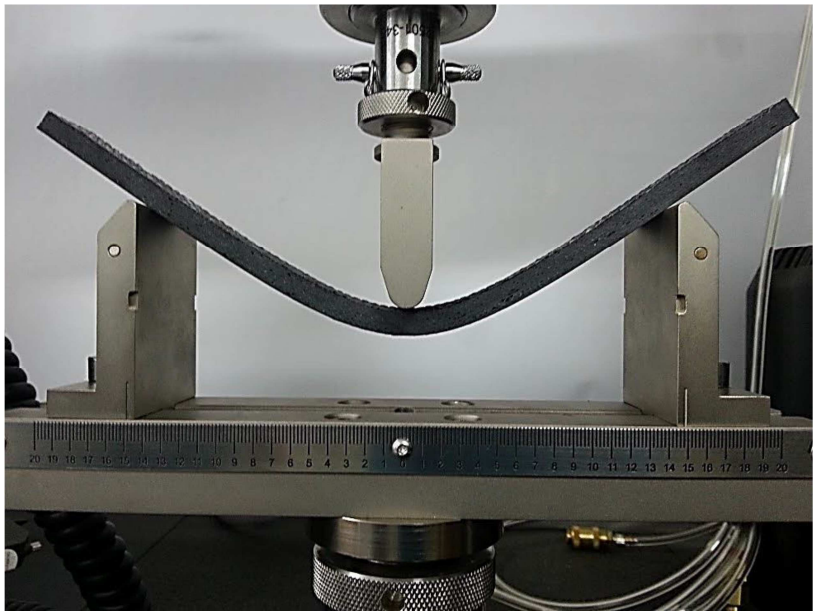


Figura III.10: Corpo de prova de span 150 mm sendo ensaiado

Os gráficos individuais de cada corpo de prova são apresentados no Apêndice A.

III.2.2 Ensaio de flexão na junta metal/compósito

O ensaio de flexão da junta metal/compósito adotou os mesmos procedimentos desenvolvidos no ensaio de flexão do compósito laminado e também foi realizado na condição

de 3 apoios. A Figura III.11 ilustra o desenho esquemático com o span utilizado nos ensaios desenvolvidos.



Figura III.11: Desenho esquemático com o span utilizado nos ensaios (MARQUES, 2015).

Com objetivo de avaliar o aumento da rigidez proporcionado pelo reparo de compósito na junta foi realizado ensaio de flexão da chapa de aço carbono ASTM A36. Sabendo que não haveria como identificar uma falha no ensaio, ou seja, o rompimento da chapa, foi adotado como falha o momento em que se obteve a estabilização de um patamar de carga.

Para a junta metal/compósito foi identificado como falha no ensaio o momento em que houve o descolamento do reparo de compósito da chapa de aço. A Figura III.12 ilustra a comparação de rigidez entre os ensaios da chapa de aço sozinha e da junta metal/compósito.

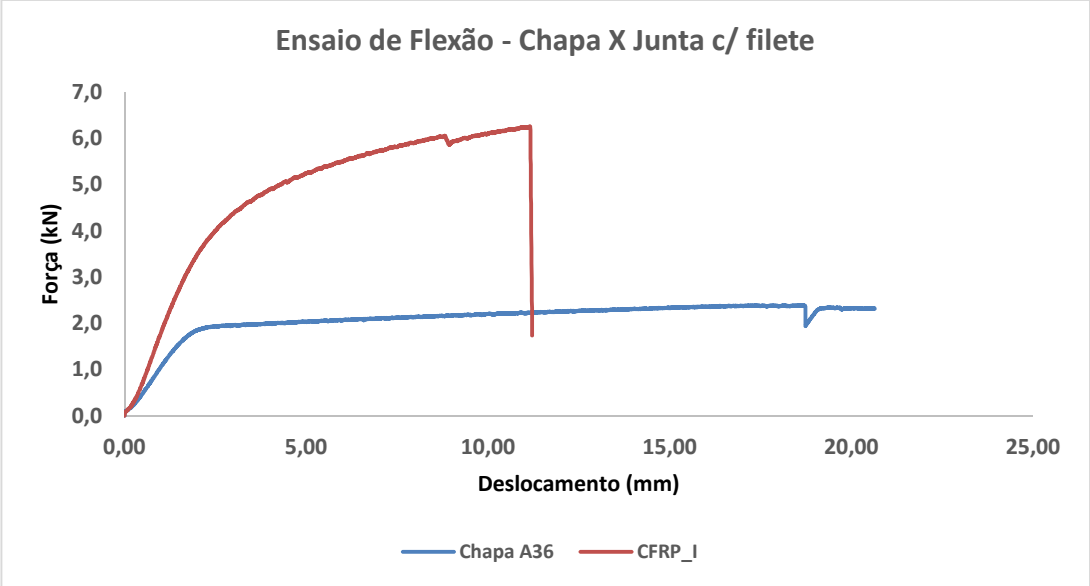


Figura III.12: Ensaio estático Chapa X Junta com filete

A junta metal/compósito alcançou níveis de tensão de aproximadamente 3 vezes os valores obtidos no ensaio da chapa, comprovam o incremento de rigidez proporcionado pelo reparo de compósito.

Assim como destacado no item III.1.2, foi necessário avaliar o impacto do filete no resultado dos ensaios desenvolvidos. Estes filetes foram oriundos do adesivo utilizado no processo de laminação da junta. Juntas com extremidades em ângulo reto tendem a concentrar as tensões na região entre o substrato que está sendo carregado e o adesivo adjacente. Já as juntas com filetes tendem a falhar na seção do filete (ADAMS, 2006).

Sendo assim, foram realizados ensaios comparativos entre juntas com corte logo no início do filete do adesivo e sem esse corte, caracterizando assim os modelos sem filete e com filete respectivamente. A Figura II.13 apresenta as curvas Carga [kN] X Deslocamento [mm] das juntas com filete (CP_CFRP_I) e sem filete lateral (CP_CFRP_II).

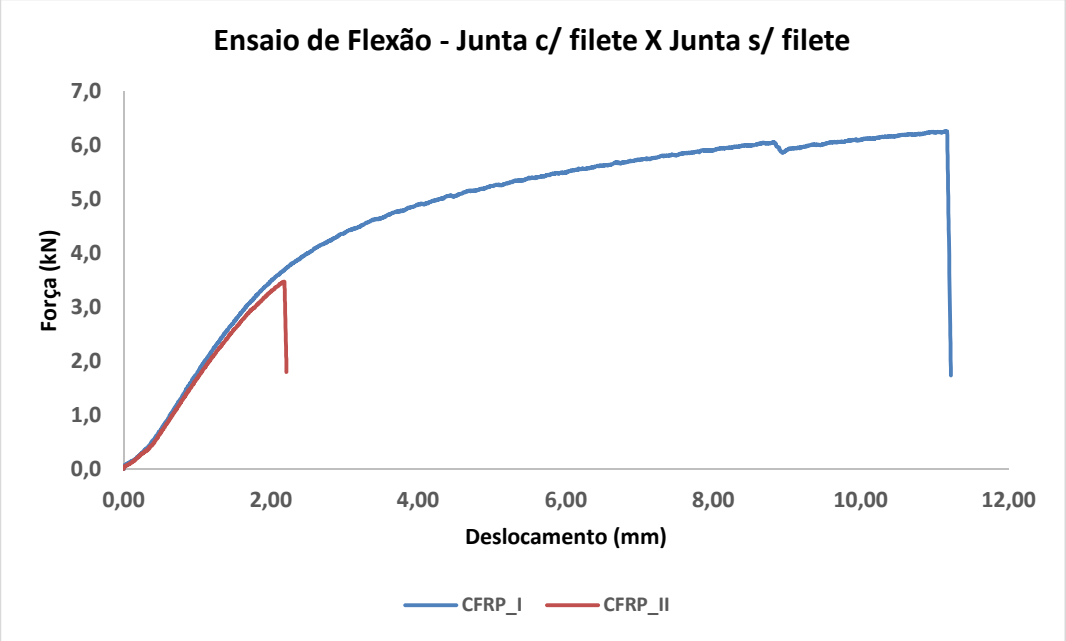


Figura III.13: Ensaio estático junta com filete (CFRP_I) X junta sem filete (CFRP_II)

A existência do filete, conforme esperado, proporcionou um aumento na carga de falha do corpo de prova. O incremento da carga de falha na junta com filete foi cerca de 80% em relação à junta sem filete ensaiada. Entende-se como carga de falha como a carga máxima obtida até o descolamento do compósito laminado da chapa de aço.

A Figura III.14 apresenta as juntas com e sem filete após os ensaios comentados, analisando as mesmas após o ensaio é possível observar que as falhas ocorreram de modo diferente. Na parte de cima está a junta ensaiada com filete e na parte de baixo a junta sem filete.



Figura III.14: Corpos de provas após os ensaios estáticos

Como o objetivo deste trabalho é observar a interação entre o compósito e o adesivo, o modelo da junta sem filete será adotado como a configuração a ser adotada para os trabalhos futuros, uma vez que as dimensões reais da superfície a ser reparada são muito maiores do que a dimensão da placa de aço adota para fabricação do corpo de prova ensaiado e o eventual filete formado nas extremidades da superfície do reparo não terá grande influência na aderência da interface na região central do reparo.

III.3 Ensaios Dinâmicos

Os ensaios dinâmicos têm como objetivo estimar o número de ciclos, para cada faixa percentual de carregamento, que a interface do adesivo resiste até acontecer o descolamento.

Os ensaios de fadiga foram realizados em flexão na condição três pontos em faixas percentuais da carga máxima obtida durante os ensaios estáticos, variando a cada 10% de 50% a 90%. Foi utilizada para os ensaios uma faixa de carga mantendo a razão de 0,1 entre a carga máxima e mínima (R=Min/Máx) (MENICONI, 2014).

Os esforços externos podem exercer sobre a junta, tensões normais (modo I) ou tensões cisalhantes (modo II). Como a direção da propagação da fenda está restringida pelos substratos na grande maioria dos casos a propagação se dá em modo misto (modo I + modo II).

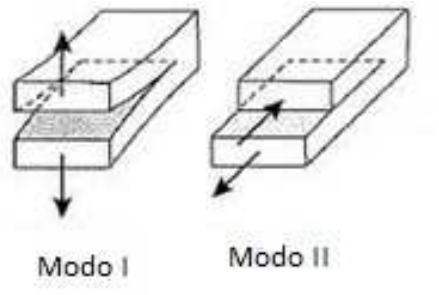


Figura III.15: Modos de ruptura. Fonte: (MARQUES, 2015)

Existem diversos ensaios para caracterizar o comportamento de juntas coladas em modo misto, porém não existe nenhum normatizado (DA SILVA, MAGALHÃES, & MOURA,

2007). O modelo empregado nesse estudo é o baseado no ensaio MMF (*Mixed Mode Flexure*). Contudo, os apoios foram posicionados de forma a preservar o compósito.

Assim como os ensaios estáticos, inicialmente foi adotado o corpo de prova com filete nos ensaios dinâmicos e pelas razões já apontadas anteriormente, os resultados foram inconclusivos, uma vez que os corpos de provas apresentaram vida infinita, ciclos acima de 10^6.

No modelo sem o filete a frequência escolhida para os testes foi de 20 Hz e foram considerados três ensaios (exceto nas extremidades, onde foram considerados apenas um) para cada faixa entre 50% e 90% da carga máxima obtida no ensaio estático (3,4 kN). Foi mantida a razão de 0,1 entre a carga máxima e mínima (Meniconi, 2014) conforme pode ser visto na Tabela III.2.

Tabela III.2 : Valores da carga para ensaio dinâmico.

%Carga	Max (kN)	Min (kN)	R (Min/Max)
50	1,75	0,175	0,1
60	2,10	0,210	0,1
70	2,45	0,245	0,1
80	2,80	0,280	0,1
90	3,15	0,315	0,1

Com as faixas de cargas definidas, os corpos de prova foram ensaiados até a falha. O número de ciclos obtido para cada faixa é apresentado na Tabela III.3.

Tabela III.3 : Numero de ciclos obtidos para cada faixa de carga.

	Número de ciclos para ruptura		
Carga	CP1	CP2	CP3
50%	330518	-	-
60%	93400	52160	62500
70%	8579	11301	7333
80%	1248	1543	2586
90%	7	-	-

Na faixa de 50% o ensaio foi interrompido no número de ciclos apresentado na tabela, considerando-se vida infinita para esta faixa. Na faixa de 90% a ruptura ocorreu rapidamente nos primeiros ciclos. Os dados apresentados na Tabela III.3 foram plotados no gráfico da Figura III.16.

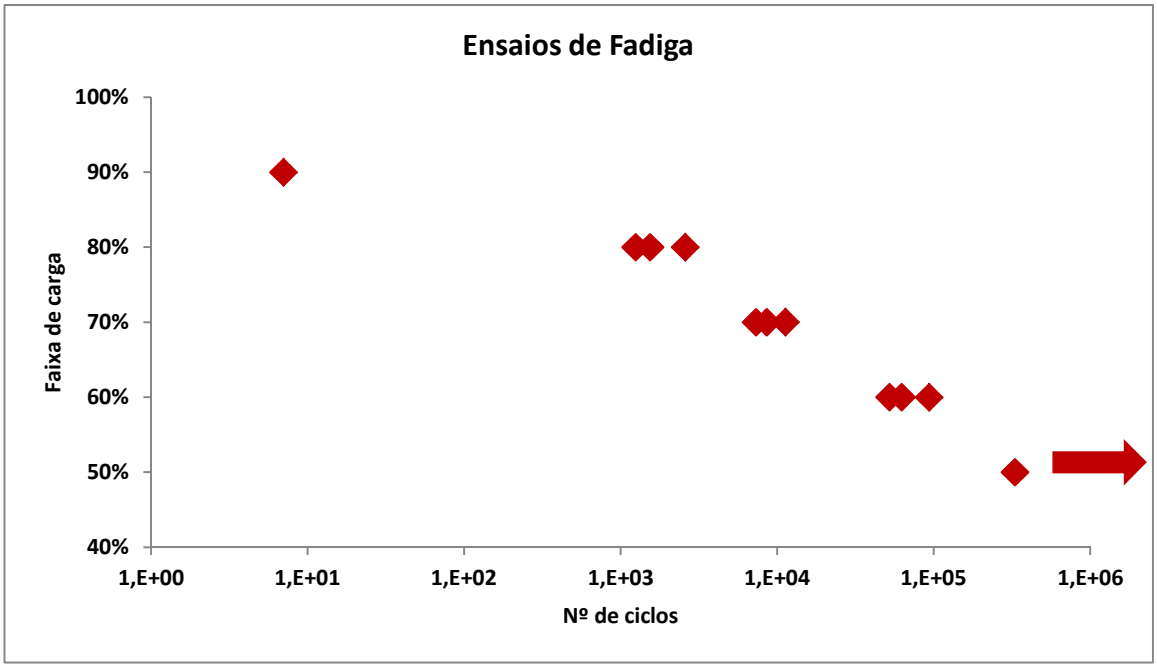


Figura III.16: Número de ciclos para cada faixa de tensão

Até próximo de 10^5 ciclos os corpos de prova falharam em quantidade de ciclos proporcionais a faixa percentual de tensão máxima, e acima disso os ensaios foram interrompidos porque atingiram um patamar que pode ser considerado como vida infinita.

Foram realizados mais ensaios nas faixas tensão intermediarias, as maiores dispersões foram descartadas até se chegar ao gráfico mostrado na Figura III.16.

Conforme a seção 8 das recomendações de boas práticas DNV-RP-C301, um reparo de compósito pode ser qualificado em função de sua vida a fadiga se este for capaz de resistir no mínimo 10.000 ciclos.

Com 90% da carga o descolamento acontece logo nos primeiros ciclos. Com 80% da carga máxima os reparos falharam em torno de 10^3 ciclos. Com 70% da carga máxima apenas um dos corpos de prova conseguiu ultrapassar os 10.000 ciclos, indicando que seria arriscado trabalhar nesse nível de esforço se quisermos respeitar as recomendações da DNV. Contudo para esforços em 60% da carga máxima todos os corpos de prova conseguiram suportar mais de 50.000 ciclos durante os ensaios, o que classifica o reparo para uso nesse nível de solicitações em cargas dinâmicas, segundo as recomendações da DNV.

Capítulo IV - Análise Numérica

Neste capítulo é realizada a análise da influência das constantes elásticas no resultado dos ensaios e também são apresentadas as análises numéricas, com o apoio do programa ANSYS, e comparativa em relação aos resultados obtidos nos ensaios experimentais do compósito e da junta metal/compósito.

IV.1 Modelagem

A modelagem, conforme apresentado no item II.2, se inicia com a seleção do material a ser simulado, entretanto como não dispúnhamos de todas as informações relativa as propriedades do material ensaiado no laboratório, foi adotado, inicialmente, como material para a simulação o compósito unidirecional epóxi/fibra de carbono com impregnação, uma vez que os valores pré-estabelecidos na biblioteca do ANSYS indicavam ser de um material similar a fibra de carbono ensaiada, conforme Tabela IV.1.

Tabela IV.1 : Constantes elásticas iniciais.

Constantes elásticas do material selecionado inicialmente para simulação	
Propriedade	**Valor**
Módulo de elasticidade na direção 1 (E_1)	123340 MPa
Módulo de elasticidade na direção 2 (E_2)	7780 MPa
Módulo de elasticidade na direção 3 (E_3)	7780 MPa
Coeficiente de Poisson no plano 12 (υ_{12})	0,27
Coeficiente de Poisson no plano 23 (υ_{23})	0,42
Coeficiente de Poisson no plano 13 (υ_{13})	0,27
Módulo de cisalhamento no plano 12 (G_{12})	5000 MPa
Módulo de cisalhamento no plano 23 (G_{23})	3080 MPa
Módulo de cisalhamento no plano 13 (G_{13})	5000 MPa

Após a seleção do material foi criada a geometria da camada das fibras de carbono para a realização do processo de laminação, onde foi determinada a espessura da camada de 0,3175 mm (razão entre a espessura do laminado ensaiado e o número de camadas), além do número de camadas empilhadas e a orientação das fibras de cada camada.

A Figura IV.1 apresenta o laminado gerado para que sejam definidas as condições de contorno e as cargas a serem trabalhadas, bem como a malha para que então haja o processamento do modelo.

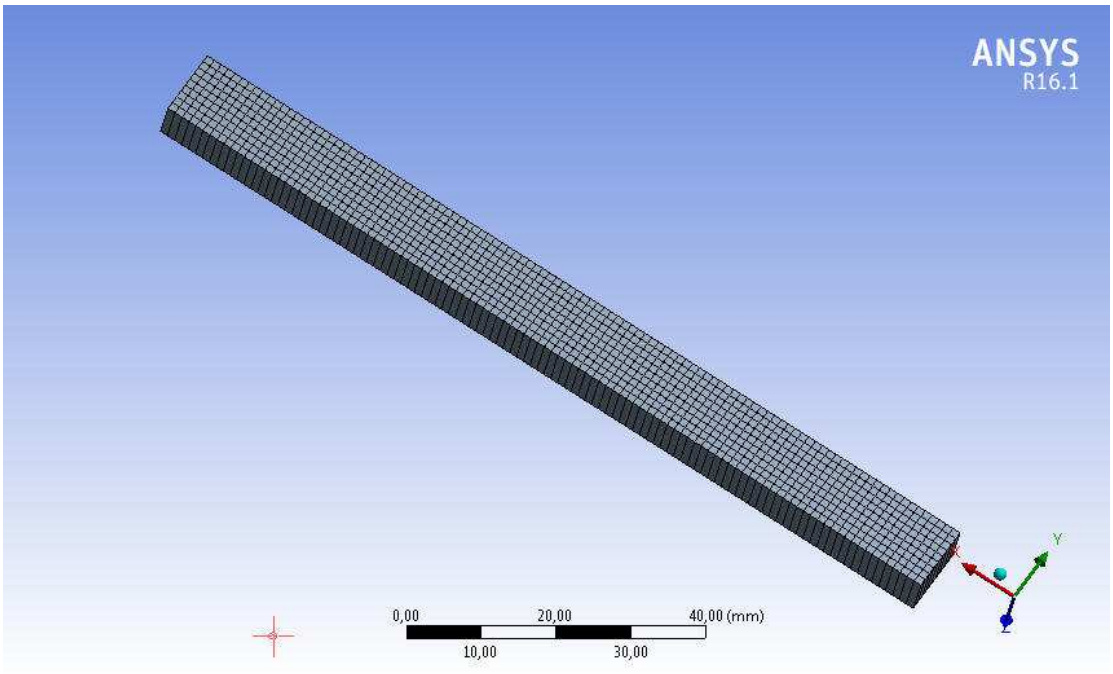


Figura IV.1: Compósito laminado modelado no Ansys

IV.2 Determinação das constantes elásticas

Após a modelagem do laminado foi feita a análise estrutural estática do ensaio de flexão, considerando que as condições de contorno e o carregamento aplicado representassem as condições reais do ensaio de flexão realizado no laboratório. A Figura IV.2 representa que será gerado um momento fletor, através da ação de uma força no ponto A.

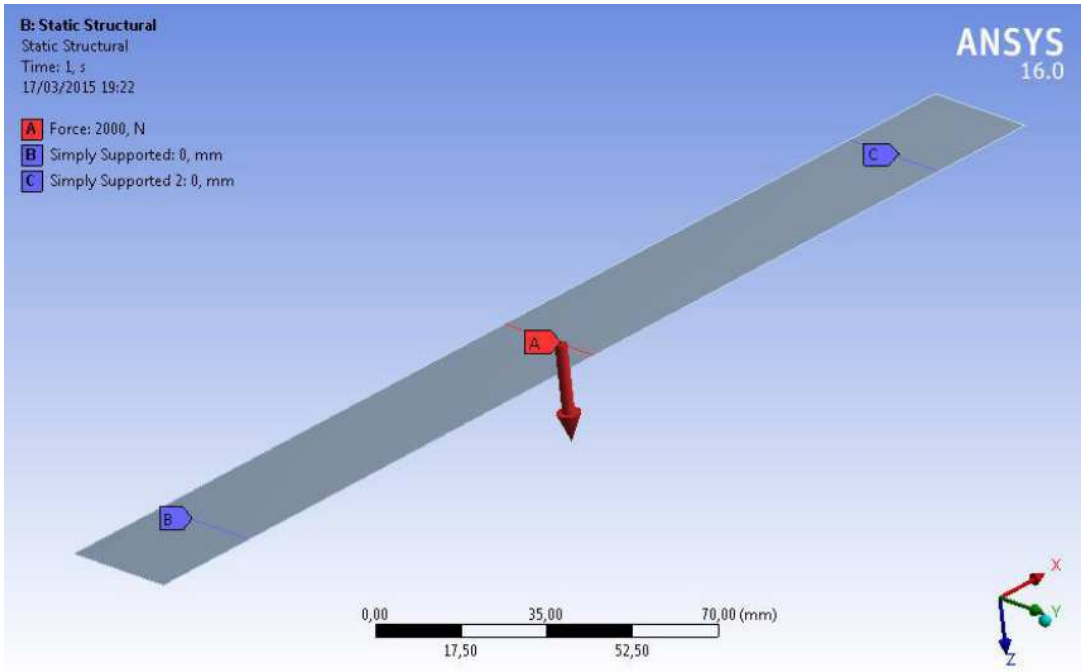


Figura IV.2: Simulação de flexão no Ansys

A simulação realizada proporcionou a comparação da análise numérica dos resultados em relação aos resultados obtidos na análise experimental. A análise comparativa, ilustrada pela Figura IV.3, demonstrou que as constantes elásticas selecionadas inicialmente não representavam, como se desejava, as propriedades do laminado utilizado no ensaios experimentais.

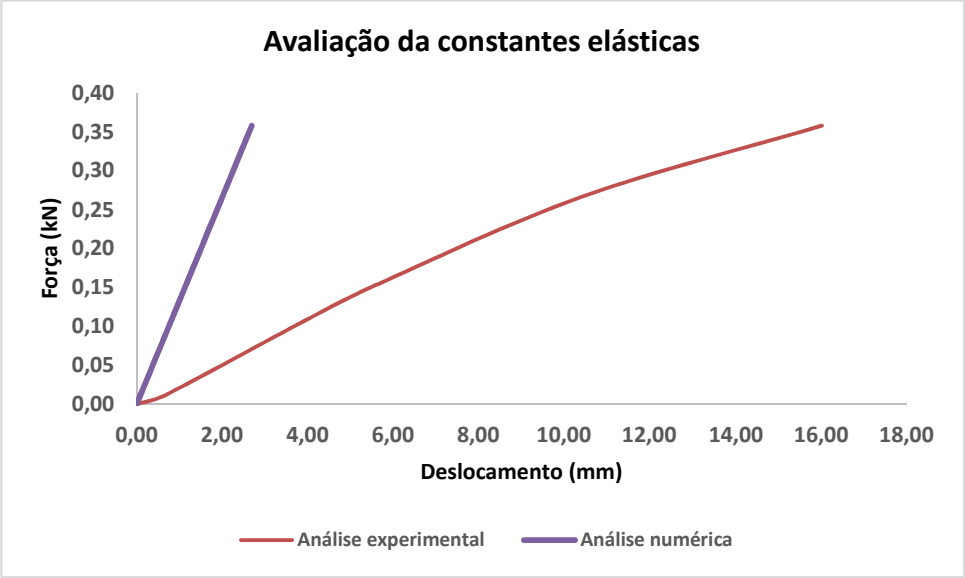


Figura IV.3: Avaliação das constantes elásticas

Devido a diferença de rigidez observada na Figura IV.3, foi necessária a busca de propriedades mais aproximadas as propriedades do laminado utilizado durante os ensaios no laboratórios. Deste modo, após algumas iterações foi possível estabelecer os valores aproximados das constantes elásticas, sendo os novos valores estabelecidos a partir do fator 0,1925 aplicado aos valores dos módulos de elasticidade e cisalhamento utilizados inicialmente. A Tabela IV.2 apresenta os valores das constantes elásticas adotadas na simulação do ANSYS.

Tabela IV.2 : Constantes elásticas determinadas para a fibra utilizada.

Constantes elásticas determinadas	
Propriedade	**Valor**
Módulo de elasticidade na direção 1 (E_1)	23742,95 MPa
Módulo de elasticidade na direção 2 (E_2)	1497,65 MPa
Módulo de elasticidade na direção 3 (E_3)	1497,65 MPa
Coeficiente de Poisson no plano 12 (υ_{12})	0,27
Coeficiente de Poisson no plano 23 (υ_{23})	0,42

Constantes elásticas determinadas	
Propriedade	**Valor**
Coeficiente de Poisson no plano 13 (υ_{13})	0,27
Módulo de cisalhamento no plano 12 (G_{12})	962,50 MPa
Módulo de cisalhamento no plano 23 (G_{23})	592,90 MPa
Módulo de cisalhamento no plano 13 (G_{13})	962,50 MPa

As novas propriedades apresentaram resultados satisfatórios, conforme ilustrado pela Figura VI.4, sendo assim, as constantes elásticas para a sequência da análise numérica no Ansys serão aquelas apresentadas na Tabela IV.2.

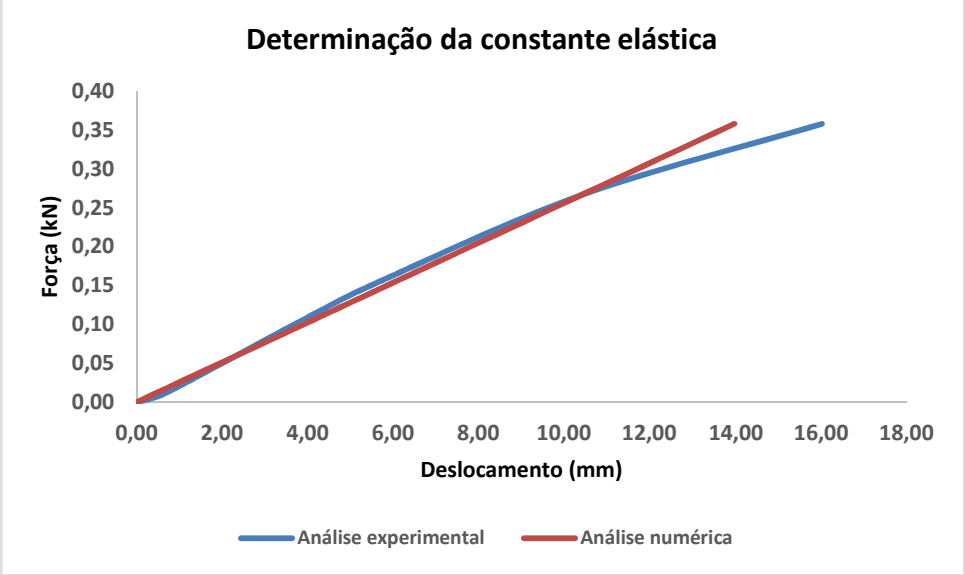


Figura IV.4: Determinação das constantes elásticas

IV.3 Simulação do ensaio de flexão do compósito laminado

Assim como a análise experimental realizada no laminado, foi desenvolvida a simulação de flexão do laminado no ANSYS com objetivo de conhecer o comportamento elástico do laminado de forma isolada da junta metal/compósito. Foram realizadas simulações para os corpos de prova apresentados na Tabela III.1.

Através da análise de deformação do corpo de prova S100W10, apresentada na Figura IV.5, foi possível plotar o gráfico Carga [kN] X Deslocamento [mm], ilustrado na Figura IV.6.

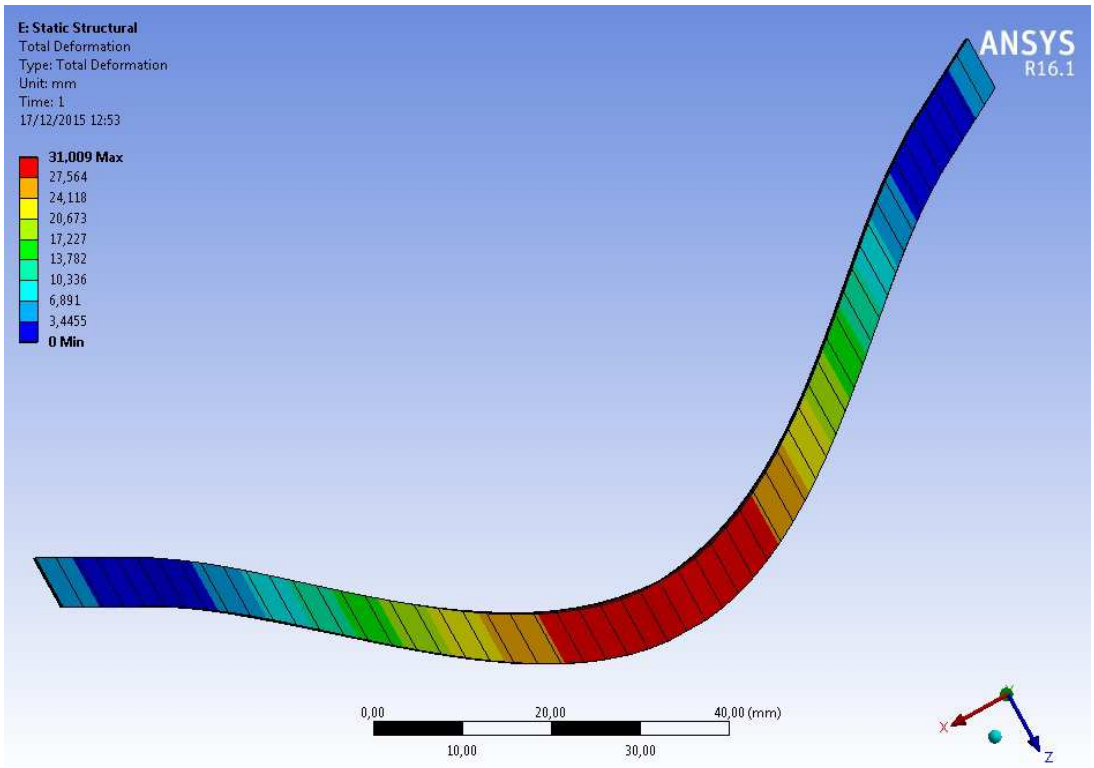


Figura IV.5: Análise da deformação – ensaio de flexão S100W10

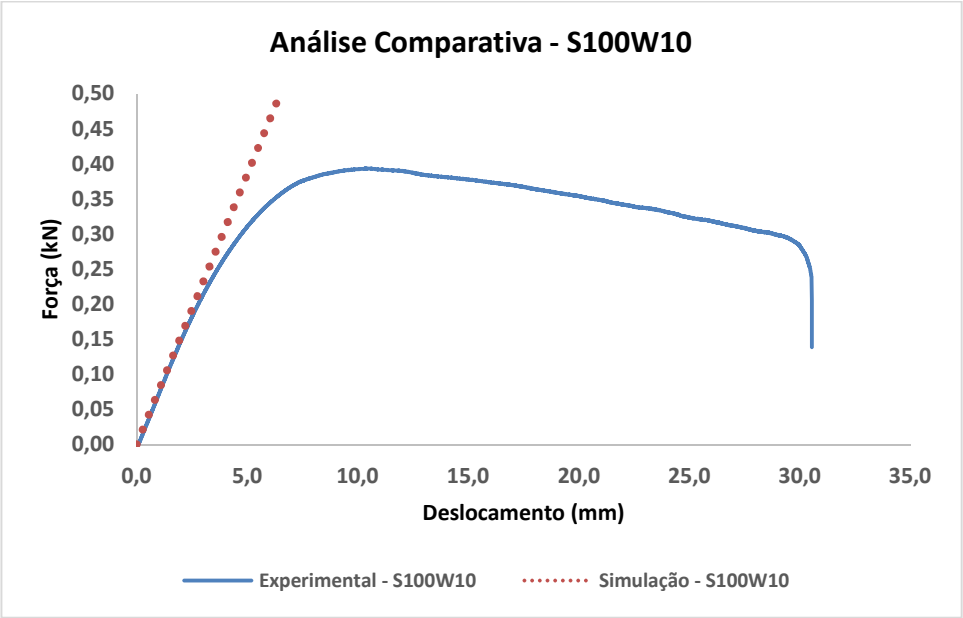


Figura IV.6: Análise comparativa – ensaio de flexão S100W10

Todo o procedimento de análise de deformação desenvolvido para o S100W10 também foi adotado para os corpos de prova de 240 mm de comprimento, sendo apresentado todas as análises e seus respectivos gráficos através das Figuras IV.7, IV.8, IV.9, IV.10, IV.11 E IV.12.

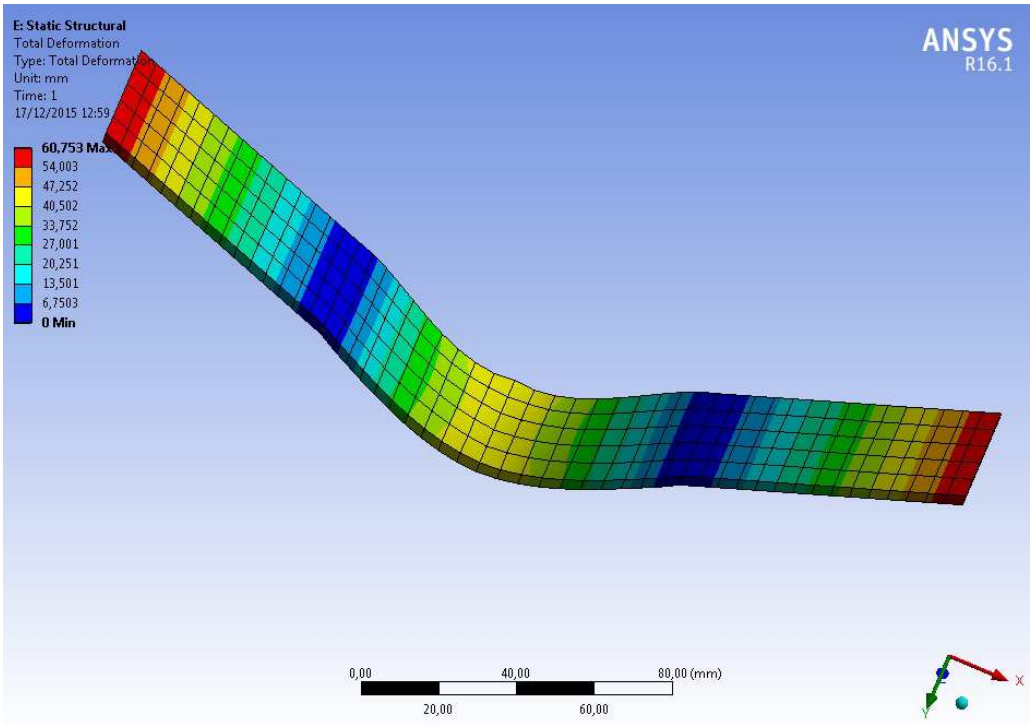


Figura IV.7: Análise da deformação – ensaio de flexão S100W25

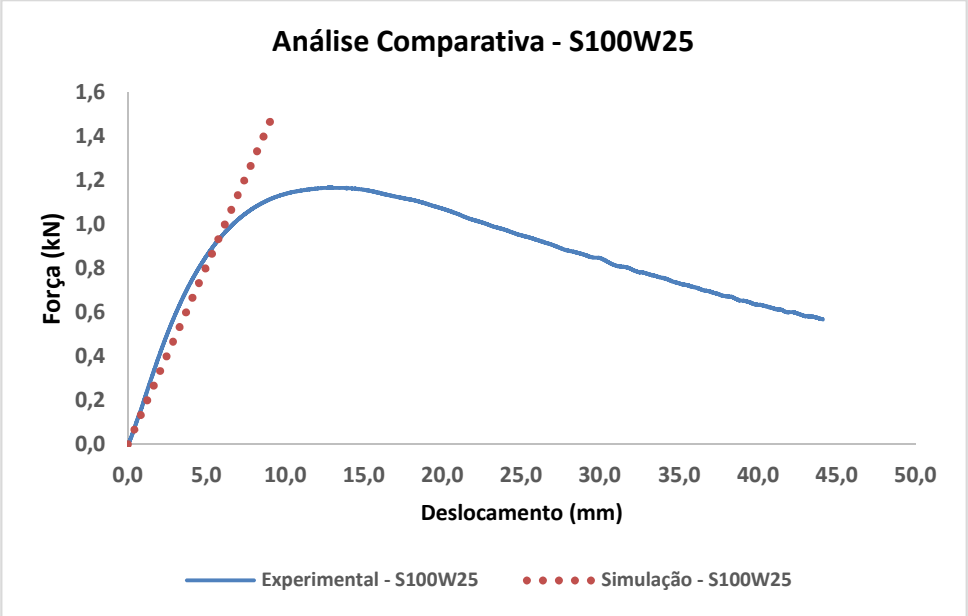


Figura IV.8: Análise comparativa – ensaio de flexão S100W25

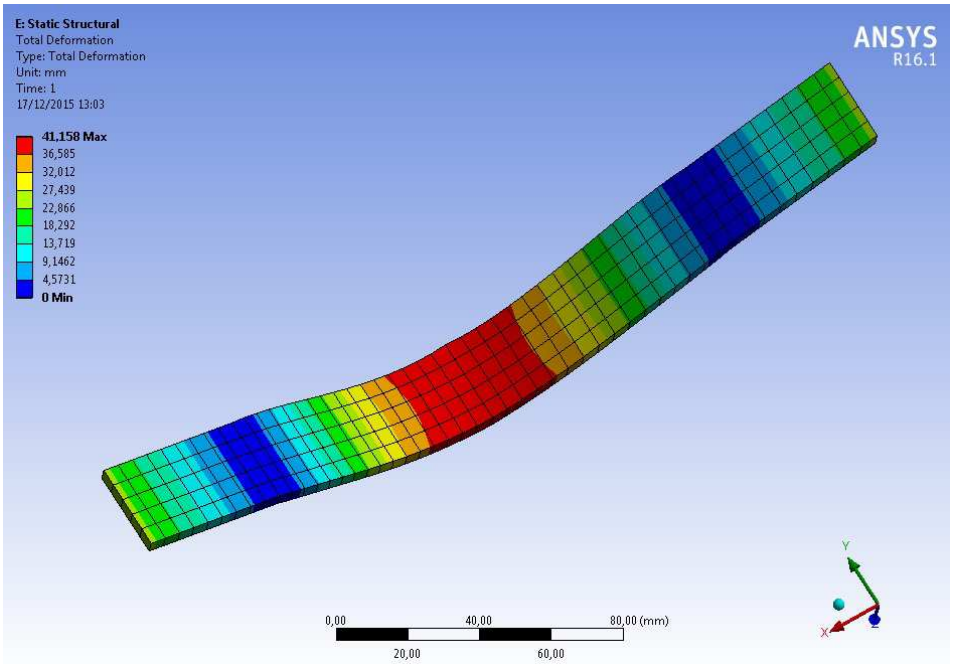


Figura IV.9: Análise da deformação – ensaio de flexão S150W25

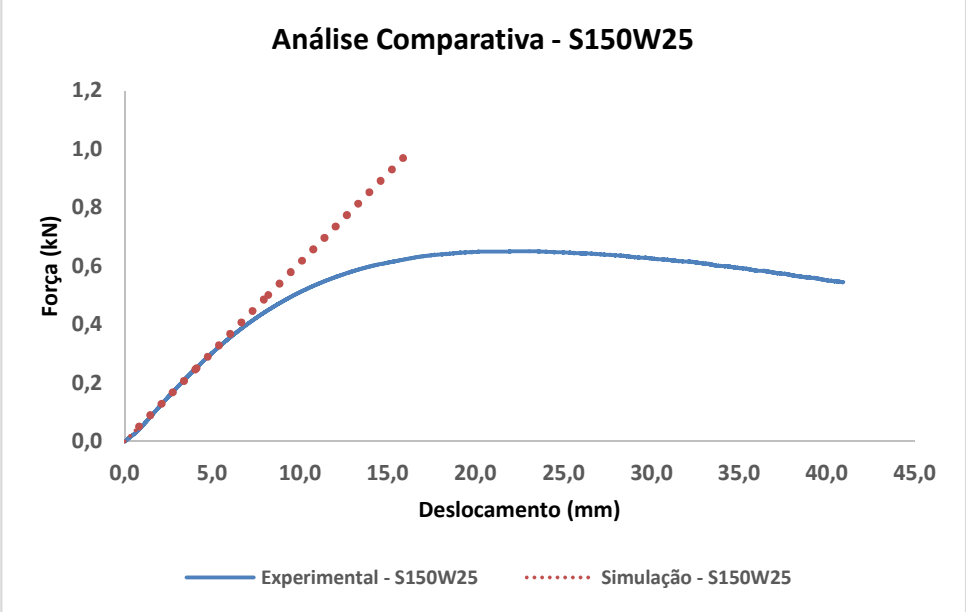


Figura IV.10: Análise comparativa – ensaio de flexão S150W25

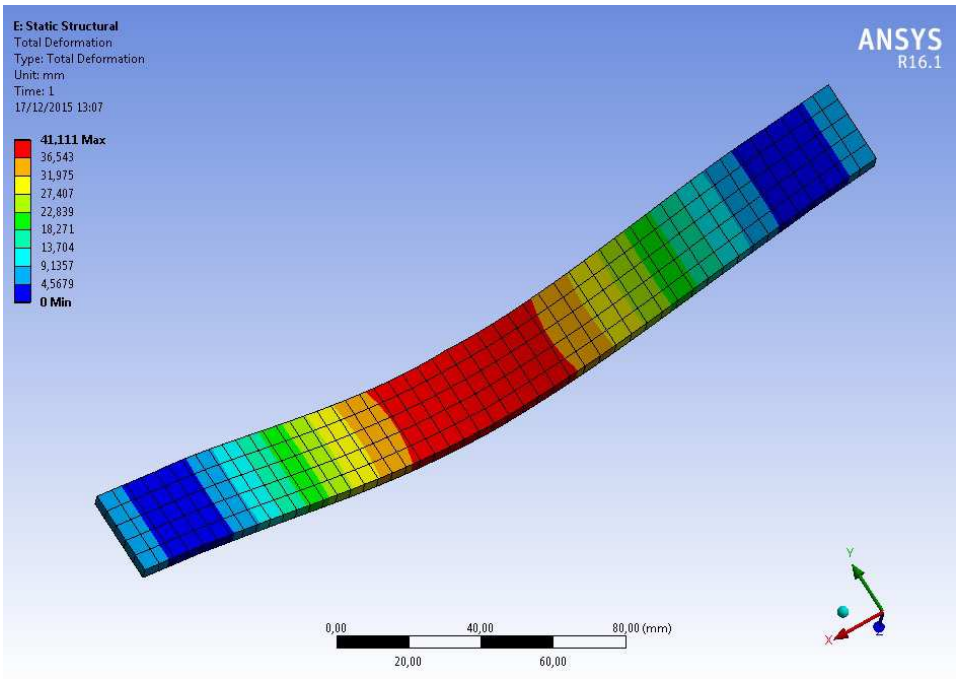


Figura IV.11: Análise da deformação – ensaio de flexão S200W25

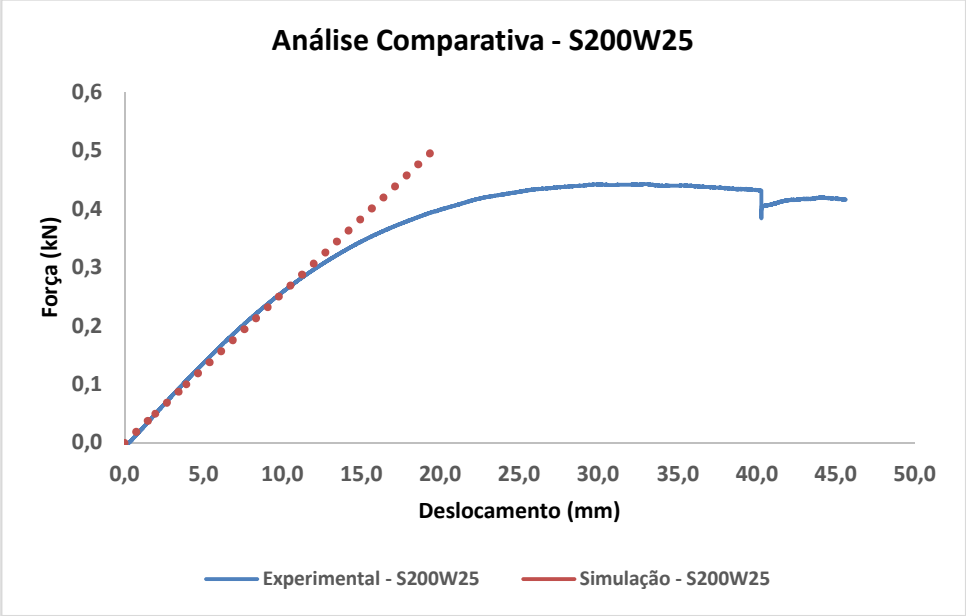


Figura IV.12: Análise comparativa – ensaio de flexão S200W25

Em todas as análises numéricas, a simulação no ANSYS apresentou o comportamento elástico do laminado próximo ao comportamento elástico obtido no laboratório durante a análise experimental para cada corpo de prova, confirmando assim a elevada ductilidade e a possibilidade da utilização do laminado como reparo estrutural.

Também foram avaliadas as possíveis falhas camada por camada, sendo adotado o método de Tsai-Wu como critério de falha. Deste modo, as camadas que apresentarem valores

superiores à condição apresentada na Equação 5, são diagnosticadas como camadas que apresentaram a ocorrência de falha.

As análises de falha camada a camada foram desenvolvidas no ponto de aplicação da carga e na extremidade do corpo de prova considerando deslocamentos encontrados nas análises experimentais. Estes pontos são ilustrados no Apêndice B.

Tabela IV.3 : Pontos analisados na análise de falha.

Corpo de Prova	Deslocamento Ponto 1 (mm)	Deslocamento Ponto 2 (mm)	Deslocamento Ponto 3 (mm)	Deslocamento Ponto 4 (mm)
S100W10	31	31	10	5
S100W25	44	44	10	4
S150W25	41	41	20	10
S200W25	41	41	20	-

Todos os pontos 1, 3 e 4 foram de análises desenvolvidas no centro do corpo de prova, onde foi aplicada a carga, enquanto que os pontos de número 2 consideraram a análise na extremidade do corpo de prova.

A análise de falha dos pontos 1 e 4 dos corpos de prova S100W10, S100W25 e S150W25 e dos pontos 1 e 3 para o corpo de prova S200W25 são apresentados pelo intervalo das Figuras IV.13 e IV.20. A análise dos demais pontos é apresentada no Apêndice C.

A análise de falha apresentada a seguir considerou o IRF de cada camada, sendo que IRF é um dos critérios de avaliação de falha do Ansys, sendo que este avalia a razão entre o carregamento imposto e o esforço máximo cujo material é capaz de suportar.

Quando o IRF é inferior à 1 é admitido que o material está segura, ou seja, não há risco de falhas devido ao carregamento aplicado, entretanto para os casos em que o fator for superior a 1, é entendido que há ocorrência de falha para o material estudado na solicitação imposta no estudo, sendo necessário reavaliar as condições de contorno da simulação para que seja possível obter resultados seguros e satisfatórios na análise numérica.

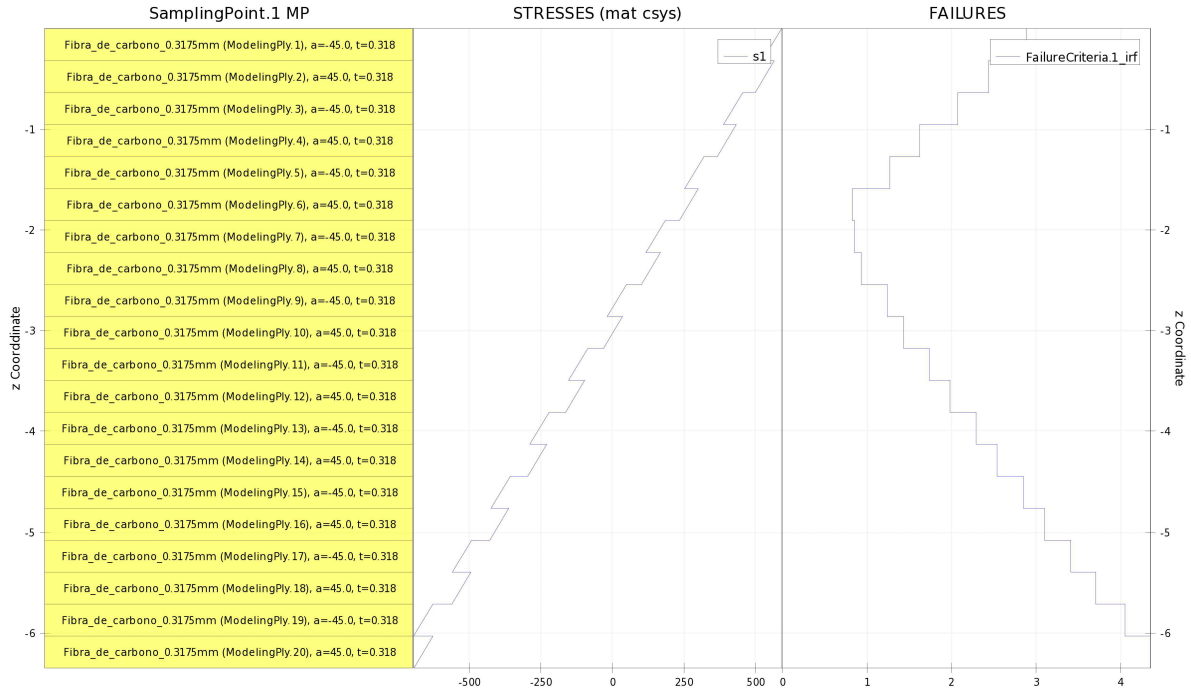


Figura IV.13: Análise de falha – S100W10 – ponto 1

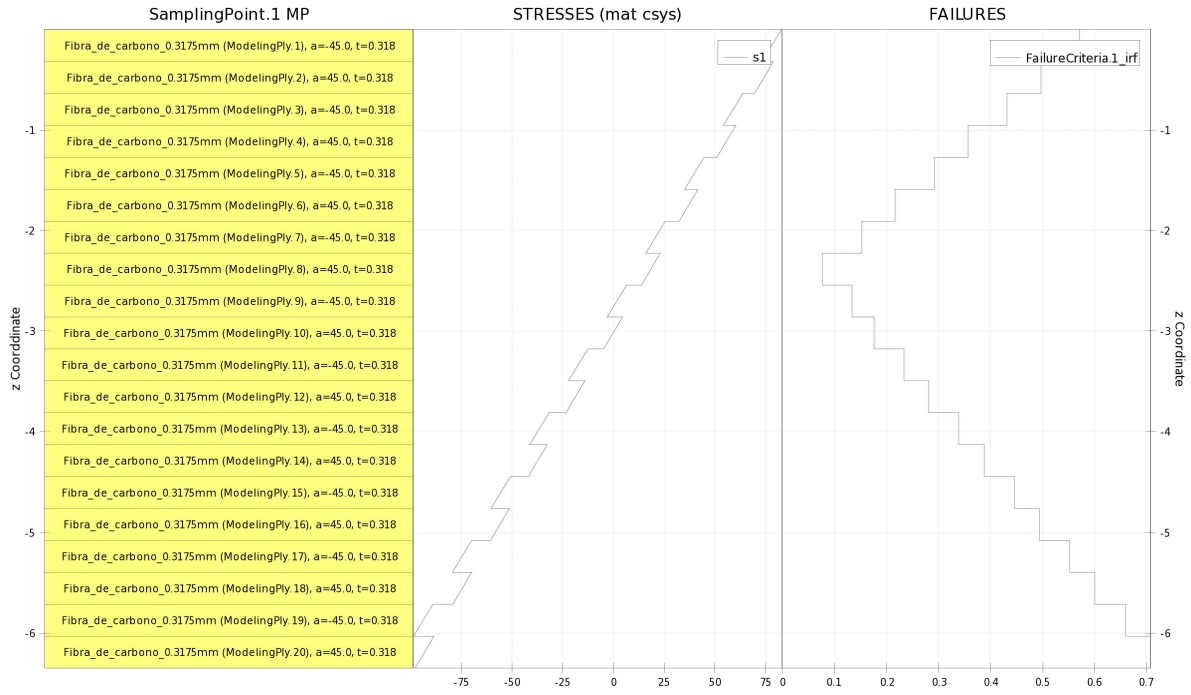


Figura IV.14: Análise de falha – S100W10 – ponto 4

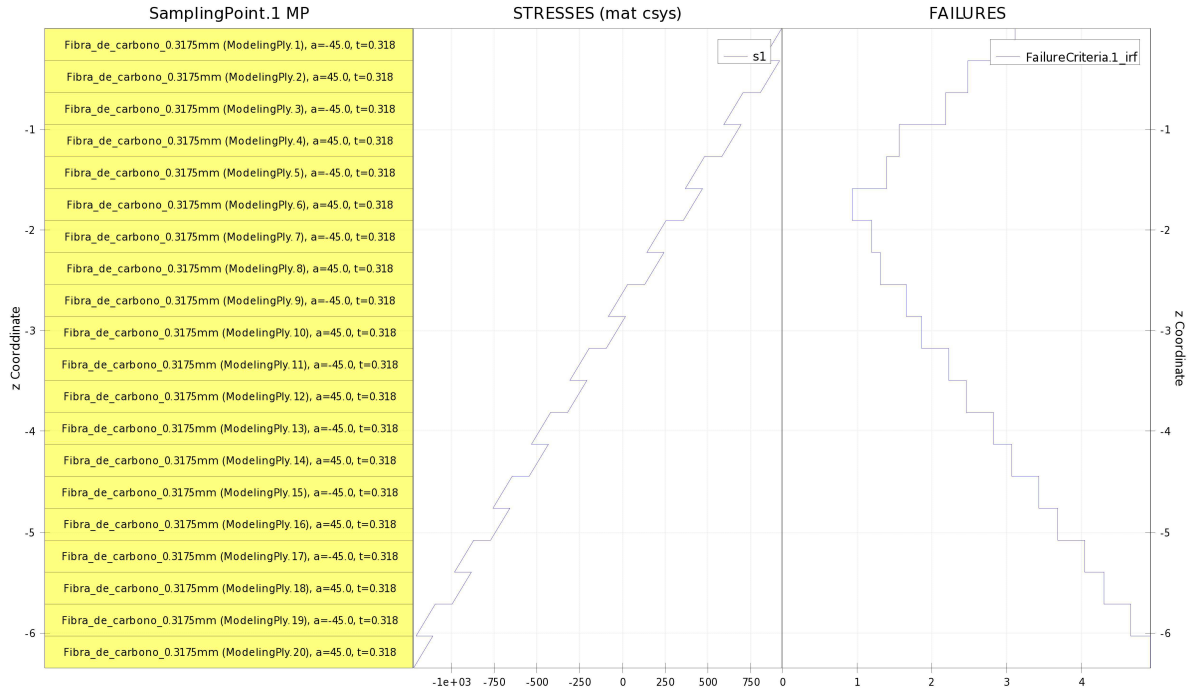


Figura IV.15: Análise de falha – S100W25 – ponto 1

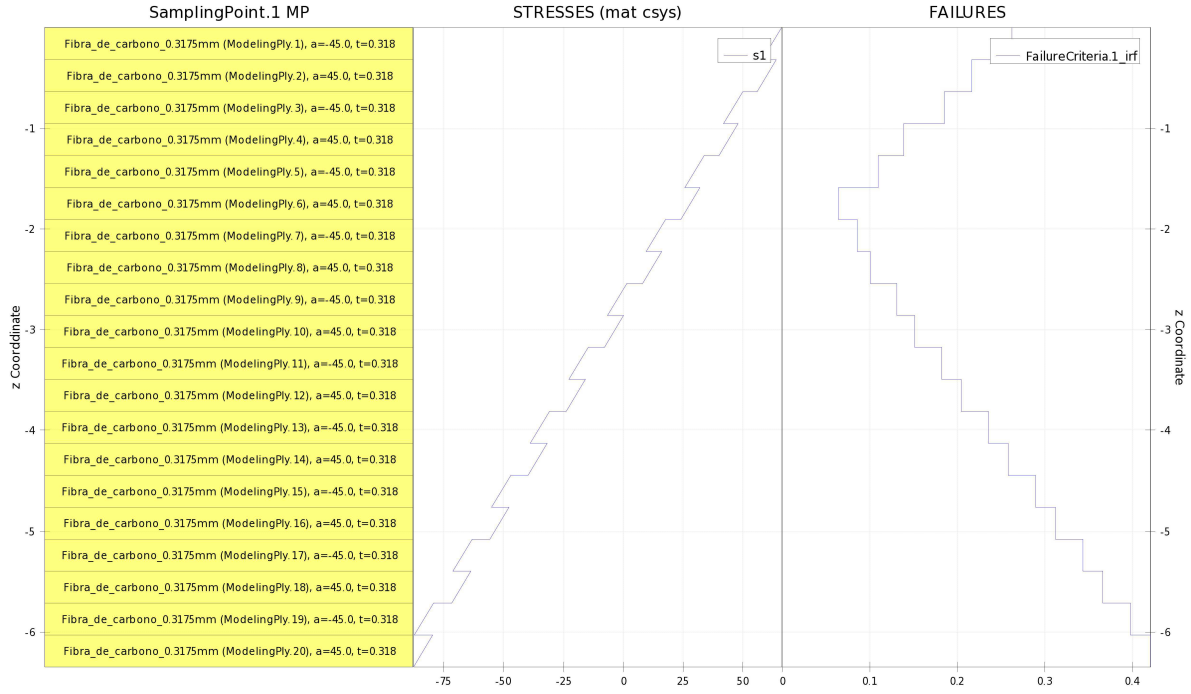


Figura IV.16: Análise de falha – S100W25 – ponto 4

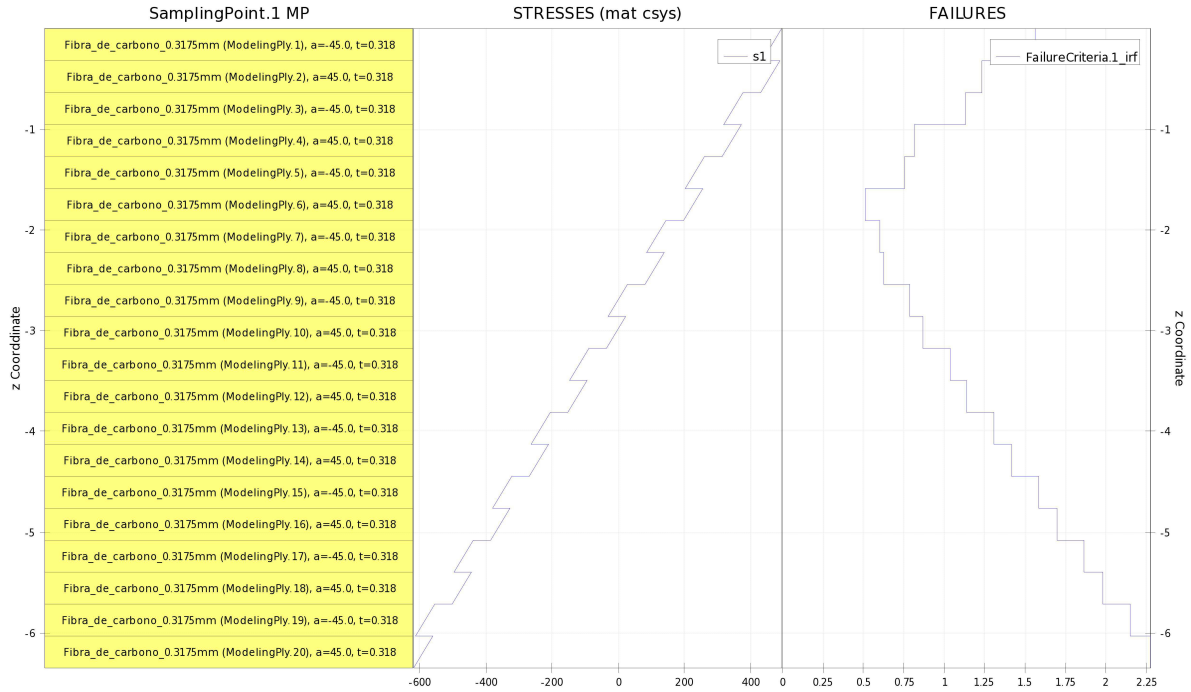


Figura IV.17: Análise de falha – S150W25 – ponto 1

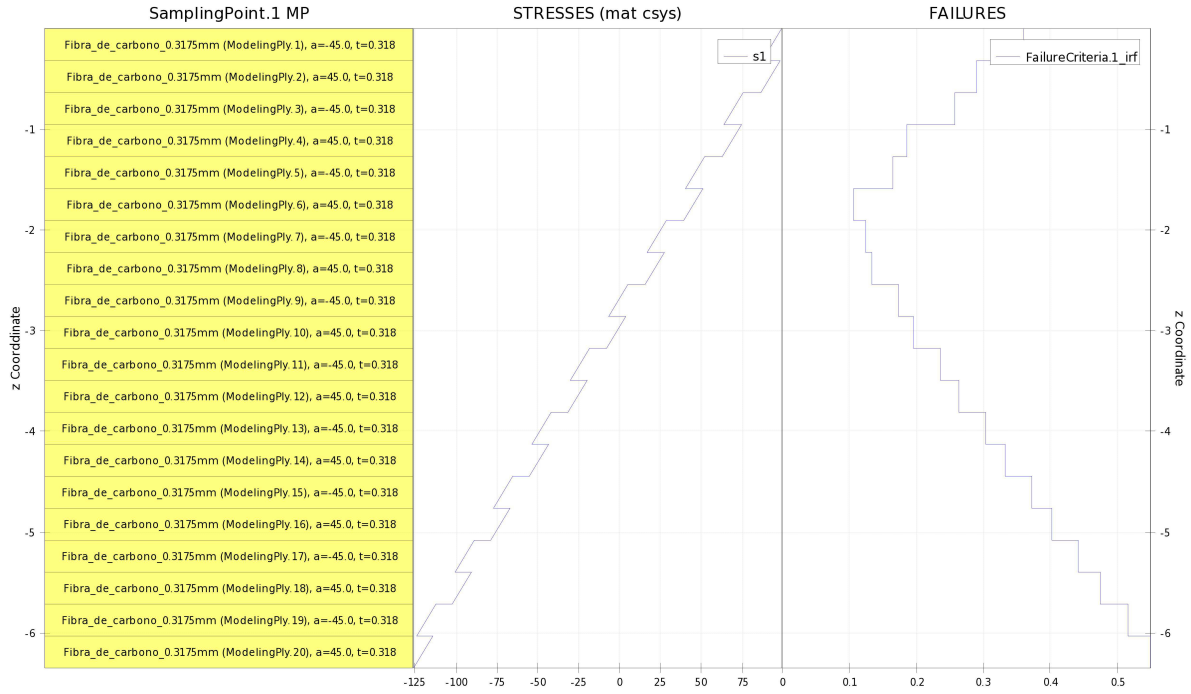


Figura IV.18: Análise de falha – S150W25 – ponto 4

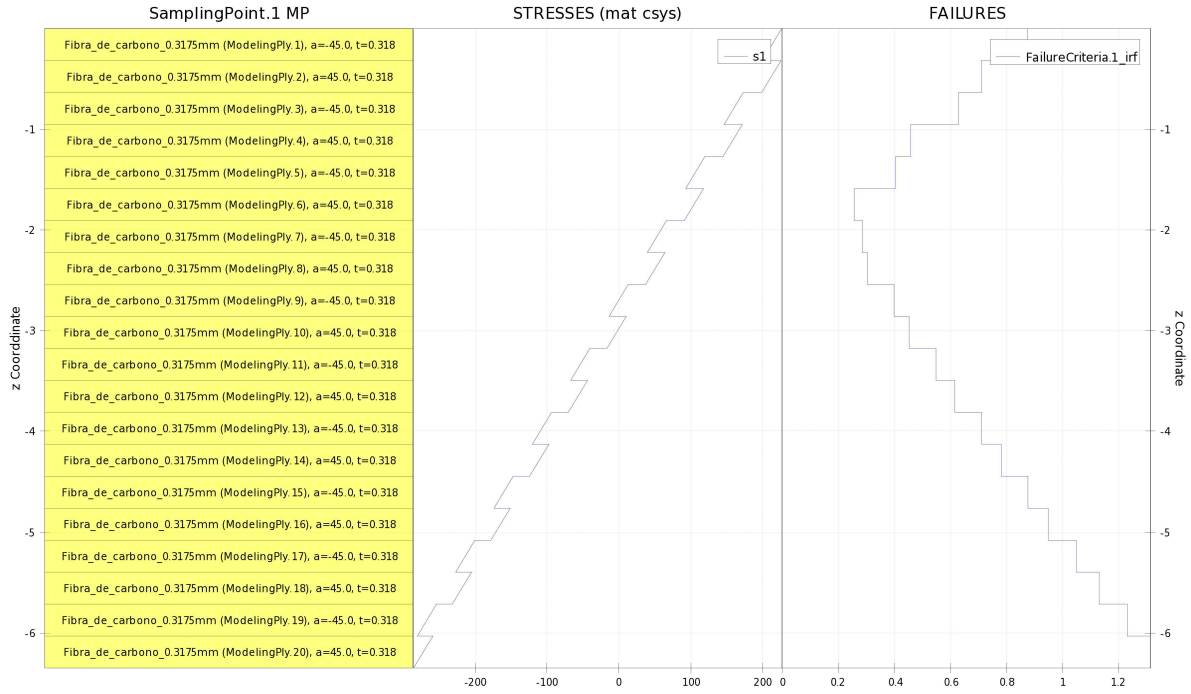


Figura IV.19: Análise de falha – S200W25 – ponto 1

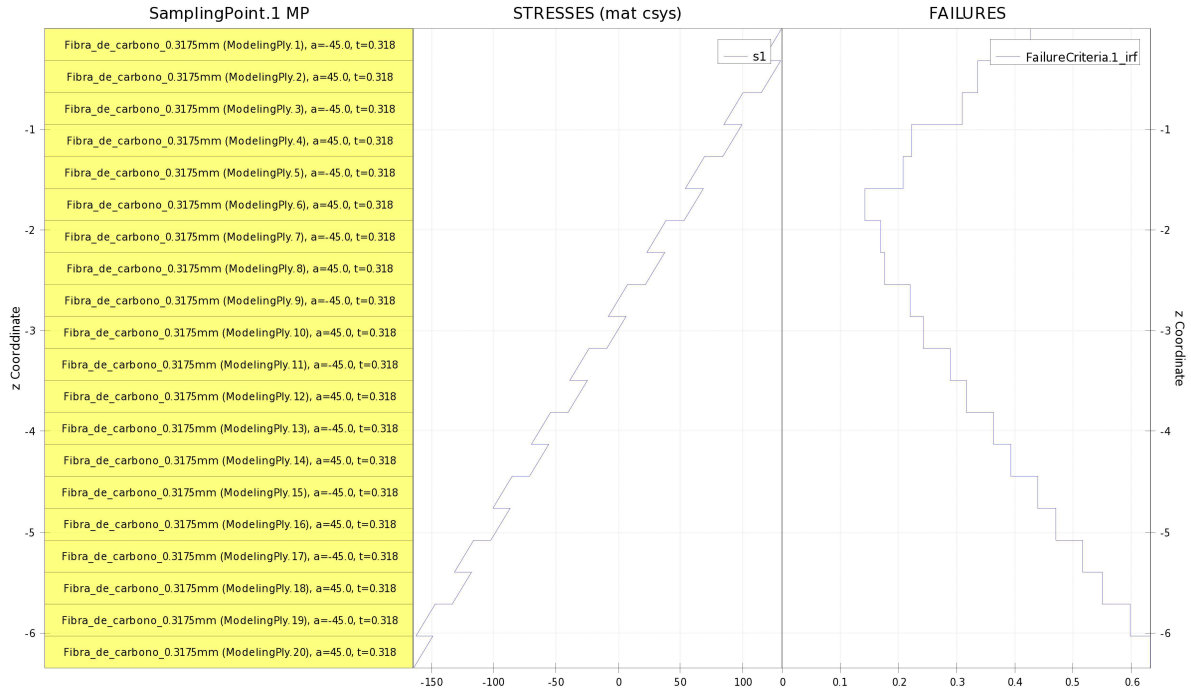


Figura IV.20: Análise de falha – S200W25 – ponto 3

Assim como observado na análise experimental não houve ocorrência de falha de todas as camadas no máximo deslocamento atingido, ou seja, não há falha catastrófica, entretanto a ocorrência de falha é concentrada no ponto de aplicação da carga, uma vez que analisando a extremidade do corpo de prova para a mesma condição de deslocamento os níveis de tensões são baixos e também o risco de falha é quase inexistente.

Cabe comentar que a análise numérica desenvolvida considerou apenas o comportamento plástico dos materiais ensaiados e por este motivo o máximo deslocamento apresentou resultados diferentes do ensaio experimental, uma vez que na análise experimental não foi possível observar falha de tantas camadas como a apresentada pelo análise numérica.

IV.4 Simulação do ensaio de flexão da junta metal/compósito

A junta metal/compósito foi modelada no ANSYS, conforme ilustrada pela Figura IV.21, sendo adotado como constante elástica para o compósito as mesmas constantes elásticas determinada no item IV.2.

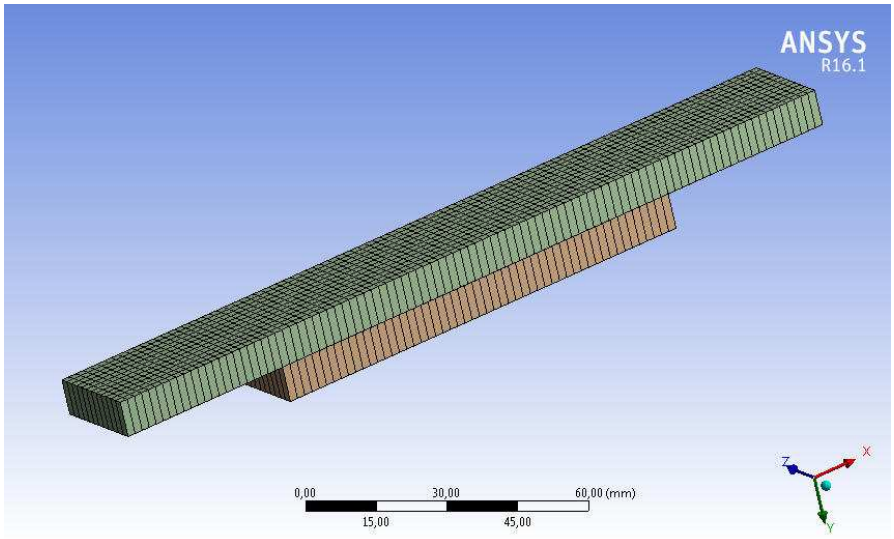


Figura IV.21: Malha – junta metal/compósito

Como objetivo deste trabalho é avaliar a adesão entre o metal e o compósito, o compósito é modelado como se fosse um sólido e é adotado um modelo bilinear, comentado no item II.2.2, para representar o elemento de contato para criação da CZM sendo utilizado as propriedades contidas na Tabela IV.4.

Tabela IV.4 : Propriedades adotadas para o modelo bilinear do CZM.

Propriedades CZM	
Propriedade	**Valor**
Tensão tangencial máxima	11 MPa
Deslocamento tangencial máximo	0,4 mm
Tensão normal máxima	10 MPa
Deslocamento normal máximo	0,1 mm
Razão	4

A análise de deformação da junta metal/compósito, apresentada pela Figura IV.22, ilustra o descolamento das extremidades do compósito, assim como a ocorrência nos ensaios desenvolvidos no laboratório. A análise comparativa entre os resultados da análise numérico-experimental é apresentada pela Figura IV.23.

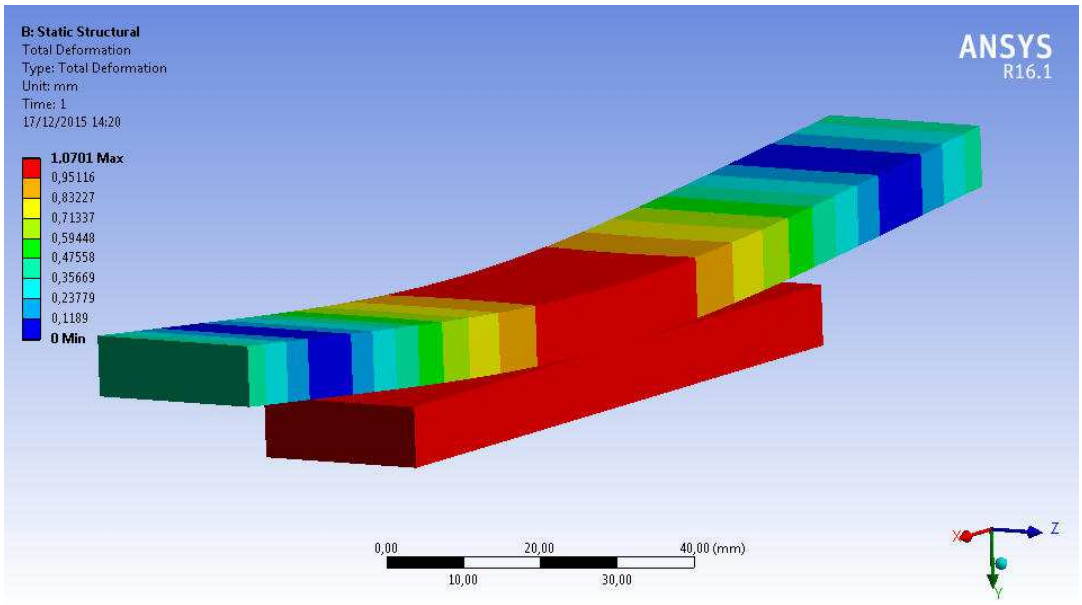


Figura IV.22: Simulação da junta metal/compósito

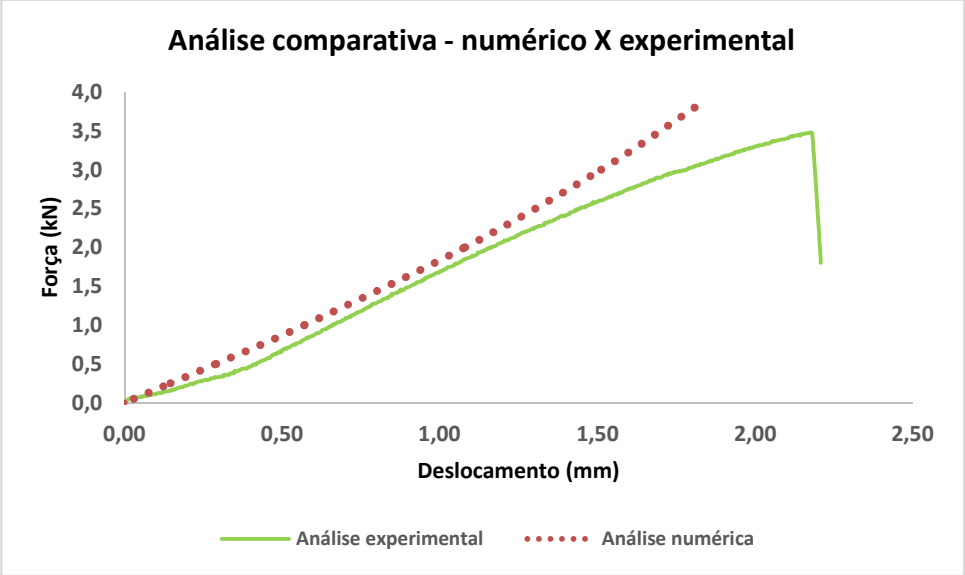


Figura IV.23: Análise comparativa da junta metal/compósito

O resultado da análise numérica apresentou similaridade à análise experimental para o comportamento plástico do corpo de prova, entretanto foi observado um ponto de inflexão da curva experimental em relação à análise numérica, fato gerado pela diferença de falha (descolamento do compósito do metal) entre as análises.

Na análise experimental o compósito é descolado integralmente do metal devido a carga aplicada, enquanto que para o mesmo esforço aplicado na análise numérica há o descolamento apenas das extremidades do compósito, sendo a região central do mesmo mantido colado na chapa de aço.

Tais resultados atestam o potencial de desenvolvimento do compósito laminado como material alternativo para reparo de estruturas com perda de espessura.

Capítulo V - Conclusão

Nesse trabalho foram realizadas análises experimentais em compósitos laminados com orientação ±45º e análises experimentais e numéricas em juntas utilizadas como corpos de prova para representarem reparos de compósitos (com orientação ±45º) em superfícies metálicas, sendo adotado ensaios de flexão em 3 pontos para os ensaios estáticos, enquanto que para os ensaios dinâmicos foram adotados testes de fadiga também na condição de 3 apoios.

A análise isolada do compósito laminado permitiu avaliar o comportamento do material de forma isolada e também o fato de não ocorrer uma falha catastrófica nestes materiais, apesar das deformações exageradas dos corpos de provas para a configuração adotada para os ensaios.

Os resultados obtidos nas análises experimentais permitiram conhecer a influência do filete de adesivo para determinadas extensões de juntas, e consequentemente para a vida dos reparos, sendo entendido que estes devem ser retirados quando forem utilizados corpos de prova com dimensões e geometria similares aos desenvolvidos neste trabalho.

A partir da carga máxima obtida no ensaio estático foi possível realizar os ensaios dinâmicos e assim identificar o número de ciclos de vida para cada faixa percentual em relação a carga máxima adotada. O número de ciclos de vida a fadiga foi calculado como um parâmetro para estimar a vida útil do reparo.

Foi identificado que para valores inferiores a 70% da carga de máxima os corpos de prova começaram a apresentar vida infinita, sendo assim, pode-se admitir que abaixo dessa faixa, segundo as referências da DNV que foram consideradas nesse trabalho, o reparo aplicado é qualificável para uso.

A simulação numérica usando o ANSYS ACP se mostrou adequada, uma vez que permitiu a obtenção de resultados similares aos ensaios experimentais, além de ser possível a reprodução de eventuais falhas encontradas nos ensaios. A utilização de elementos coesivos que também apresentou bons resultados na modelagem de adesivos usados na colagem de materiais compósitos em substratos metálicos.

Deste modo, com a realização de inspeções periódicas para avaliação da integridade do reparo é segura a utilização de materiais compósitos laminados como reparo estrutural.

Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos nesse estudo permitiram conhecer novas alternativas de reparos e não encerram o assunto e permite a continuidade do estudo de reparo de compósitos. Abaixo seguem algumas sugestões para trabalhos futuros que poderão contribuir para este campo de pesquisa:

- Realização de ensaios experimentais com a utilização de estensiômetros.
- Simulação numérica da vida a fadiga do reparo usando o método dos elementos finitos.
- Realização de ensaios com diferentes condições de colagem (superfície colada maiores, tratamentos superficiais, adesivos diferentes, etc.).

Referências bibliográficas

ADAMS, R. D. (2006, Outubro). Strength predictions for lap joints, especially with composite adherends. A review. **The Journal of Adhesion**, 30: 1-4, 219-242.

ALFANO, G. & CRISFIELD, M.A. (2001). Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 50: 1701-1736.

ALMEIDA, Euripedes Guilherme Paphael de. **Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados compósitos sólidos de matriz polimérica fortalecida com fibras de carbono.** 2010. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos Instituito de Física de São Carlos Instituto de Química de São Carlos, São Carlos, 2010.

ANGÉLICO, Ricardo Afonso. **Avaliação de modelos de falhas progressivas para estruturas em material compósito**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

ANSYS (2015). Manual do Ansys versão 16.1.

ASHBY, M., & JONES, D. (1998). **An introduction to microstructures, processing and design** (2ª edição ed., Vol. II). Oxford: Butterworth-Heinemann.

ASHCROFT, I.A., SHAW, S.J. (2002). Mode I fracture of epoxy bonded composite joints. 2. Fatigue loading. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 22: 151–167

CALLISTER, W. D., & RETHWISCH, D. G. (2010). **Materials Science and Engineering - An introduction** (8ª ed.). John Wiley & Sons .

CHOUPANI, N. (2008). Interfacial mixed-mode fracture characterization of adhesively bonded joints. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 28: 267–282

DA SILVA, L. F., MAGALHÃES, A., & MOURA, M. F. (2007). **Juntas adesivas estruturais**. Publindustria.

DNV. (2012). **Design, fabrication, operation and qualification of bonded repair of steek structures**. DNV.

DE BARROS, Silvio, et al. (2015). Use of cohesive zone models to design automotive bonded joints. **International Journal of Automotive Composites**, 1: 158-169.

EBNESAJJAD, S. (2008). **Adhesives technology handbook** (2ª edição ed.). Nova Iorque: Willian Andrew.

GHASEMENJAD, H. & ABOUTORABI, A. (2011). Cohesive zone modeling (CZM) in prediction of delamination failure in laminated composite structures. **Journal of Materials Science an Engineering**, 5: 61-64

ISHII, K., et al. (1999). Evaluation of the fatigue strength of adhesively bonded CFRP/metal single and single-step double-lap joints. **Composites Science and Technology**, 59: 1675-1683.

MARINUCCI, G. (2011). **Materiais Compósitos Poliméricos**, São Paulo, Artliber.

MARQUES, Francisco Adson. **Análise experimental de reparos de compósitos**. 2015. 41 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Cefet/RJ, Rio de Janeiro, 2015

MCGEORGE, D., ECHTERMEYER, A., LEONG, K., MELVE, B., ROBINSON, M., & FISCHER, K. (2009, Janeiro). Repair of floating offshore units bonded fibre composite materials. **Elsevier**, 1364-1380.

MENICONI, L. C. M.; LANA, L. D. M.; MORIKANA, S. R. K.: **Experimental Fatigue Evaluation of the Composite Repair of a Metallic Ship Hull**. 2nd Brazilian Conference on Composite Materials, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 15-18 September 2014.

MENICONI, L. (2014). Experimental fatigue and aging evaluation of the composite patch repair of a metallic ship hull. **Applied adhesion science**, 2-27.

MOURA, Marcelo F. S. F. de et al. (2009). **Materiais compósitos: Materiais, fabrico e comportamento mecânico.** (2ª. Ed). Publindústria.

SIQUEIRA, C. (2014, maio). **Analysis of Repairs in Metal-Composite**. ESSS Conference & Ansys users meeting. São Paulo.

VALOROSO, Nunzio & DE BARROS, Silvio. Adhesive joints computations using cohesive zones (2013). **Applied Adhesion Science**, 1: 8.

Apêndice A

Este apêndice tem por objetivo apresentar os gráficos Força [kN] x Deslocamento [mm] de todos os compósitos laminados ensaiados no laboratório do CEFET-RJ. A seguir é apresentada a tabela com a legenda e dimensões dos corpos de prova.

Tabela A.1: Legenda e dimensões dos corpos de prova ensaiados.

Corpo de Prova	Dimensões (mm)	Span (mm)
S100W10	120,00 x 10,00 x 6,35	100
S100W25	240,00 x 25,00 x 6,35	100
S150W25		150
S200W25		200

Gráficos com análise experimental dos corpos de prova

Corpo de prova – S100W10

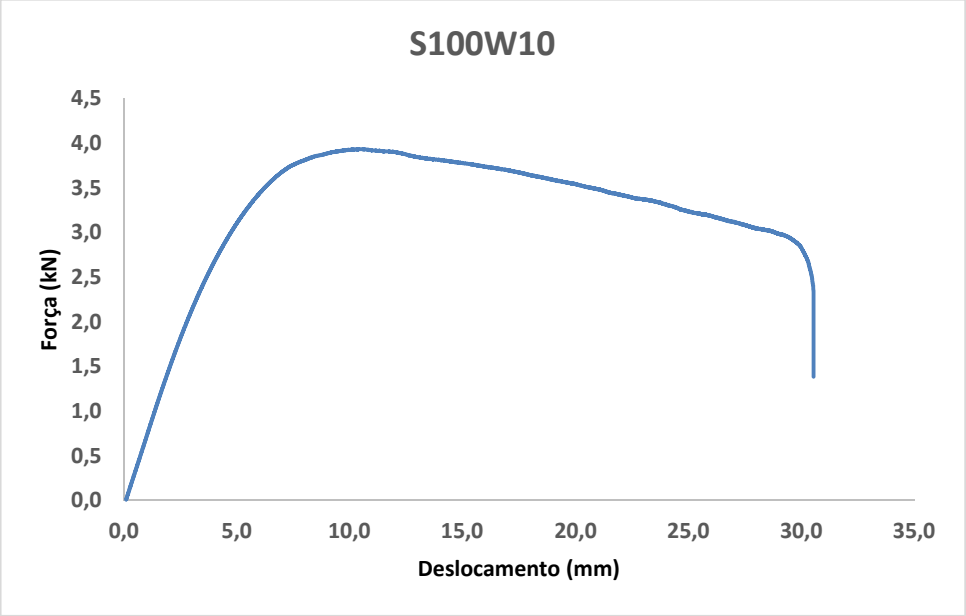


Figura A.1: Ensaio de flexão S100W10

Corpo de prova – S100W25

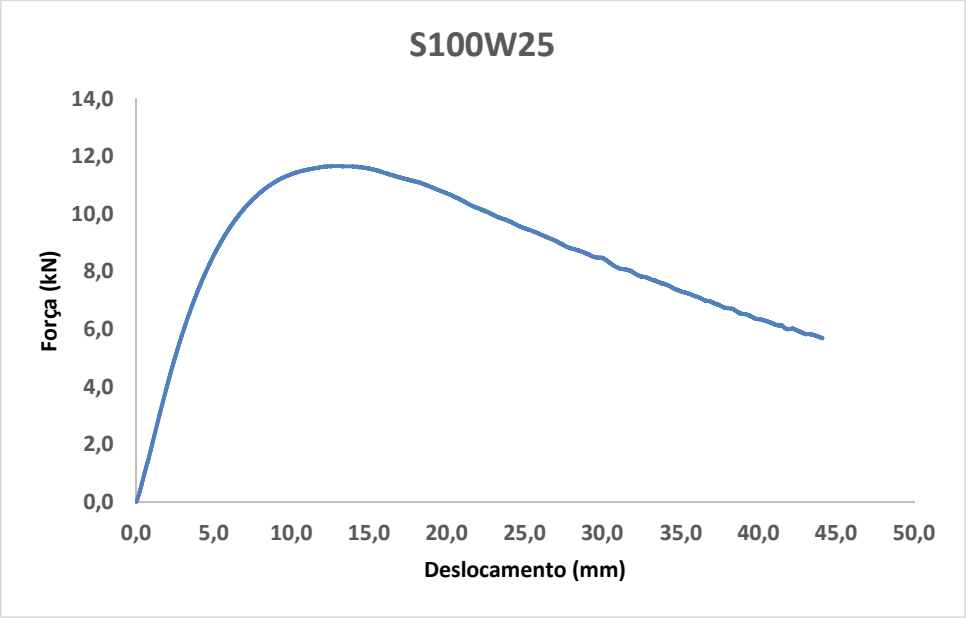


Figura A.2: Ensaio de flexão S100W25

Corpo de prova – S150W25

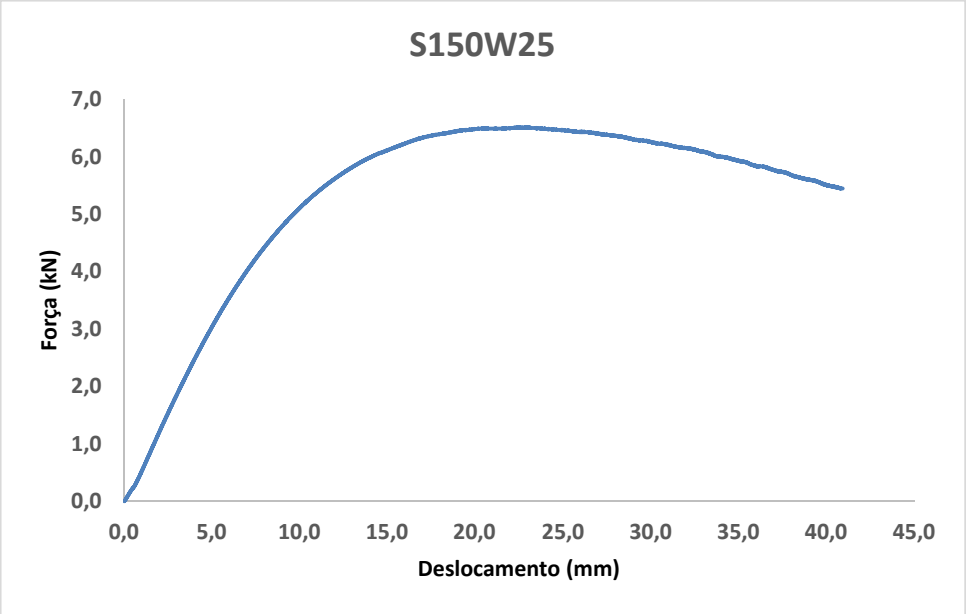


Figura A.3: Ensaio de flexão S150W25

Corpo de prova – S200W25

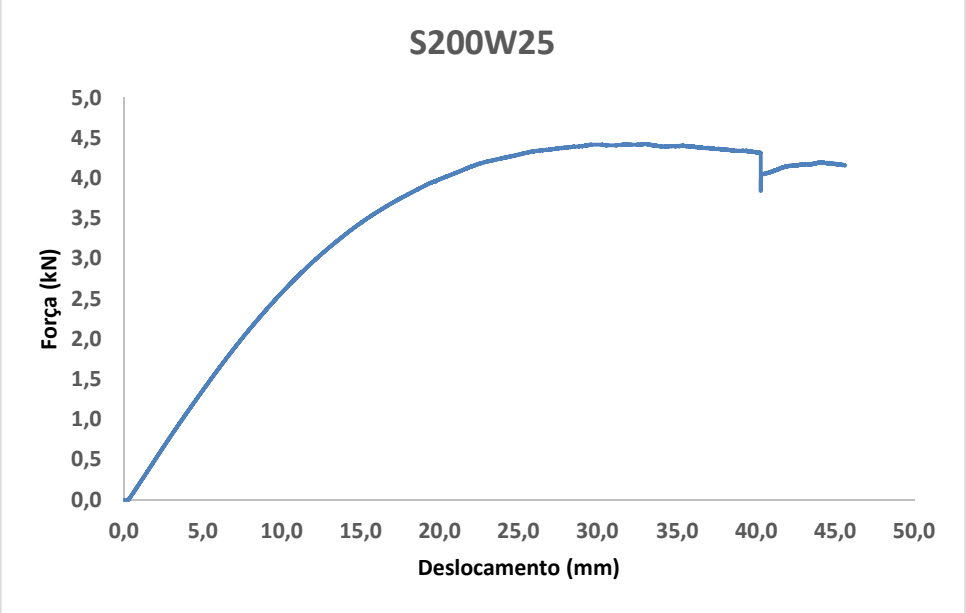


Figura A.4: Ensaio de flexão S200W25

Apêndice B

Este apêndice tem por objetivo apresentar os pontos adotados para o desenvolvimento da análise de falha camada a camada dos corpos de prova. A seguir é apresentada a tabela com a legenda dos corpos de prova e seus respectivos pontos e deslocamentos estudados.

Tabela B.1: Pontos e deslocamentos adotados

Corpo de Prova	Deslocamento Ponto 1 (mm)	Deslocamento Ponto 2 (mm)	Deslocamento Ponto 3 (mm)	Deslocamento Ponto 4 (mm)
S100W10	31	31	10	5
S100W25	44	44	10	4
S150W25	41	41	20	10
S200W25	41	41	20	-

Corpo de prova – S100W10 – ponto 1

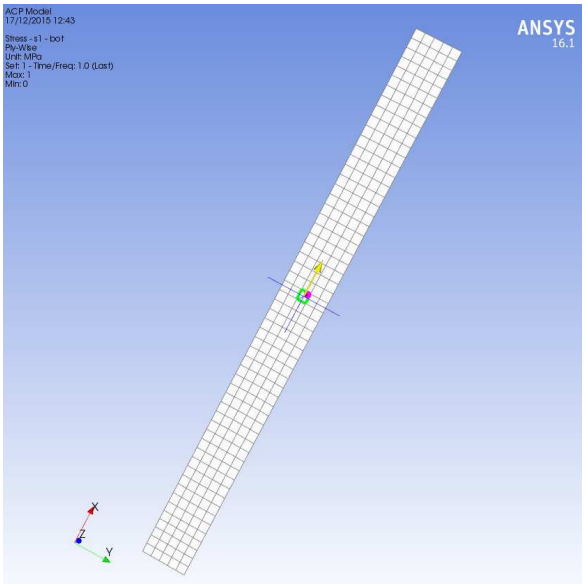


Figura B.1: Ponto 1 do corpo de prova S100W10

Corpo de prova – S100W10 – ponto 2

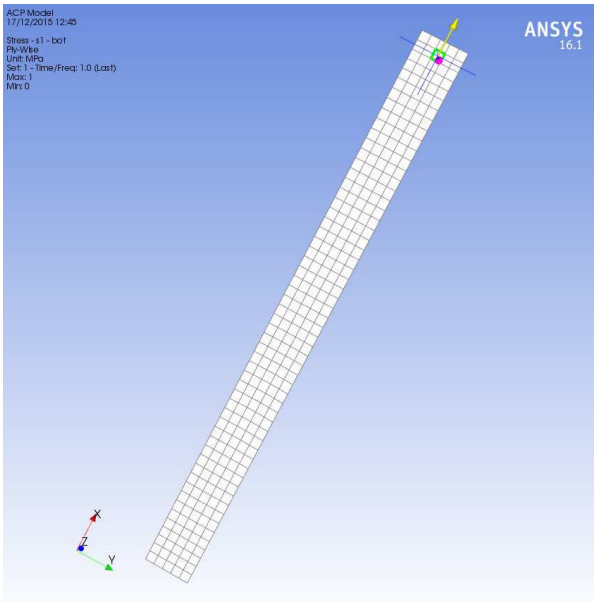


Figura B.2: Ponto 2 do corpo de prova S100W10

Corpo de prova – S100W10 – ponto 3

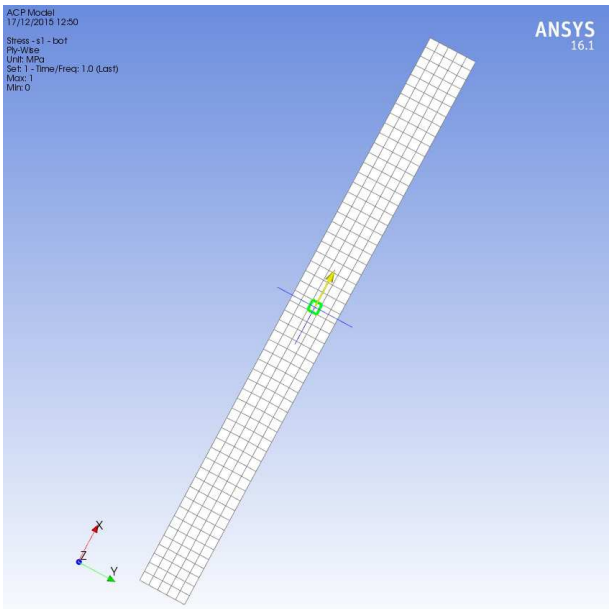


Figura B.3: Ponto 3 do corpo de prova S100W10

Corpo de prova – S100W10 – ponto 4

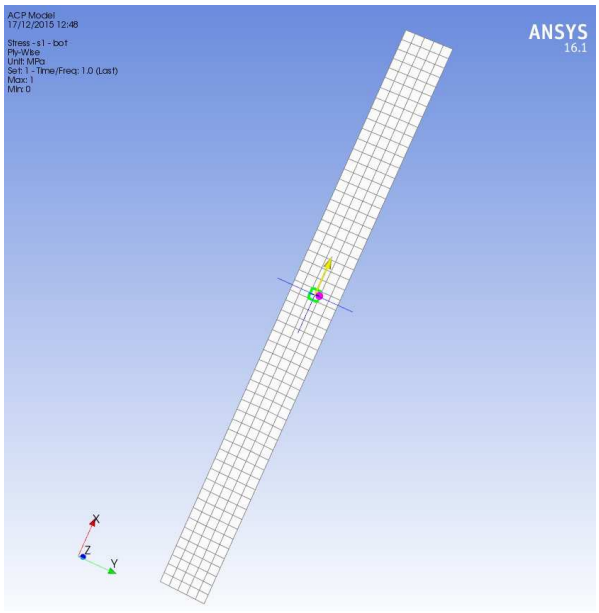


Figura B.4: Ponto 4 do corpo de prova S100W10

Corpo de prova – S100W25 – ponto 1

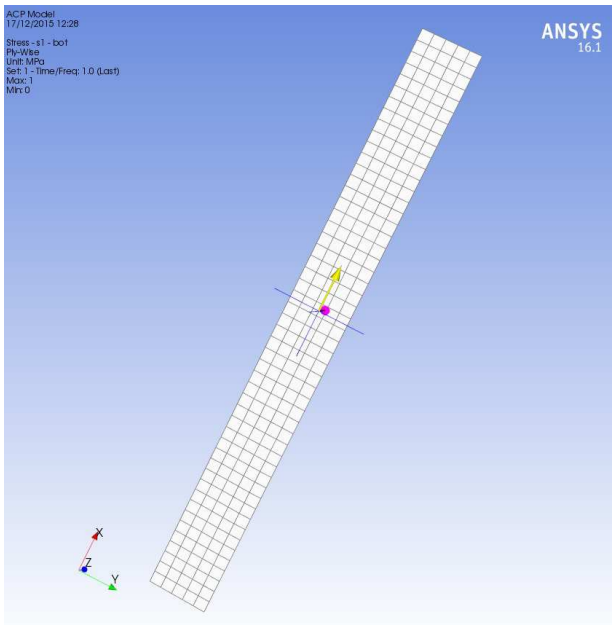


Figura B.5: Ponto 1 do corpo de prova S100W25

Corpo de prova – S100W25 – ponto 2

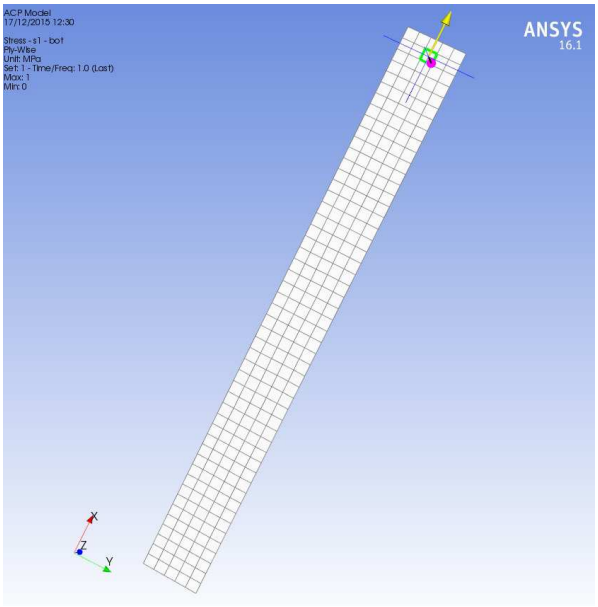


Figura B.6: Ponto 2 do corpo de prova S100W25

Corpo de prova – S100W25 – ponto 3

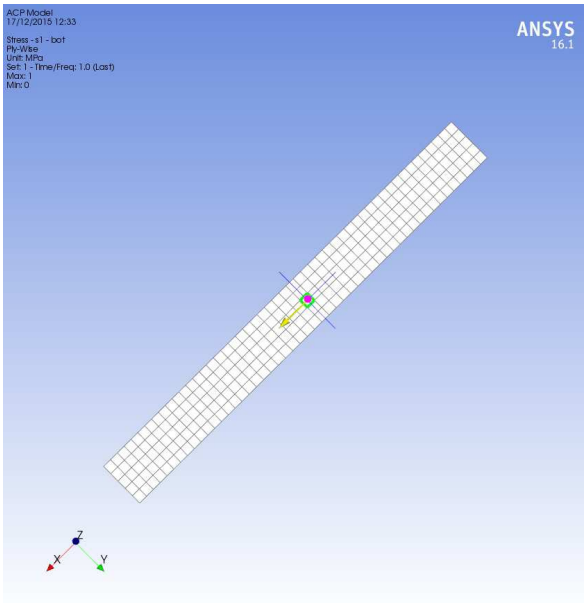


Figura B.7: Ponto 3 do corpo de prova S100W25

Corpo de prova – S100W25 – ponto 4

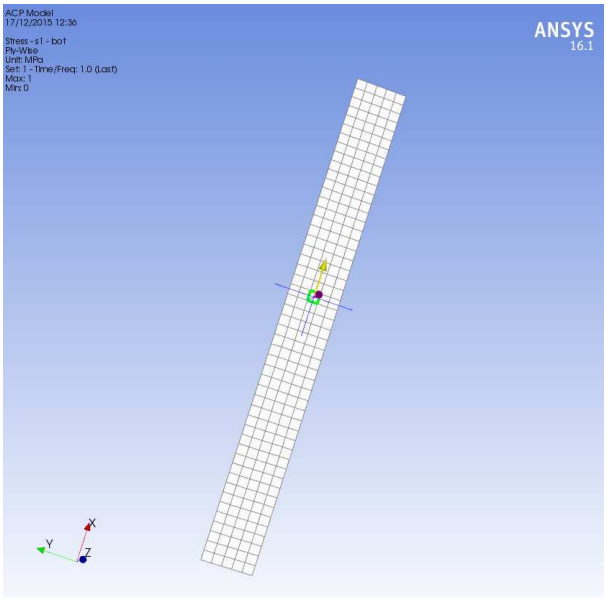


Figura B.8: Ponto 4 do corpo de prova S100W25

Corpo de prova – S150W25 – ponto 1

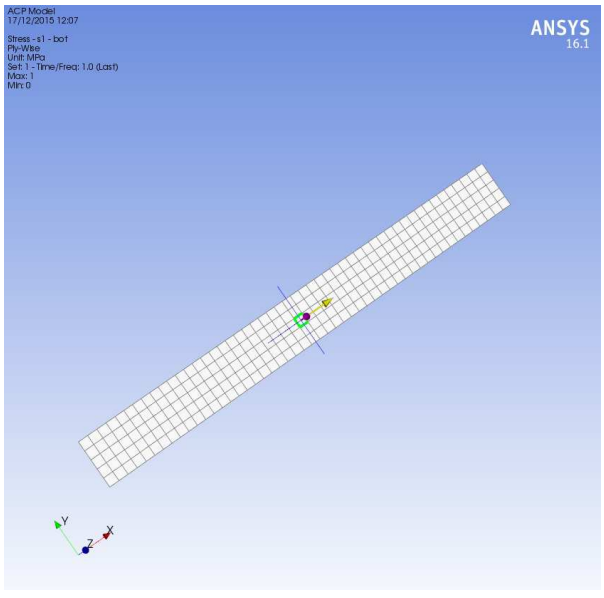


Figura B.9: Ponto 1 do corpo de prova S150W25

Corpo de prova – S150W25 – ponto 2

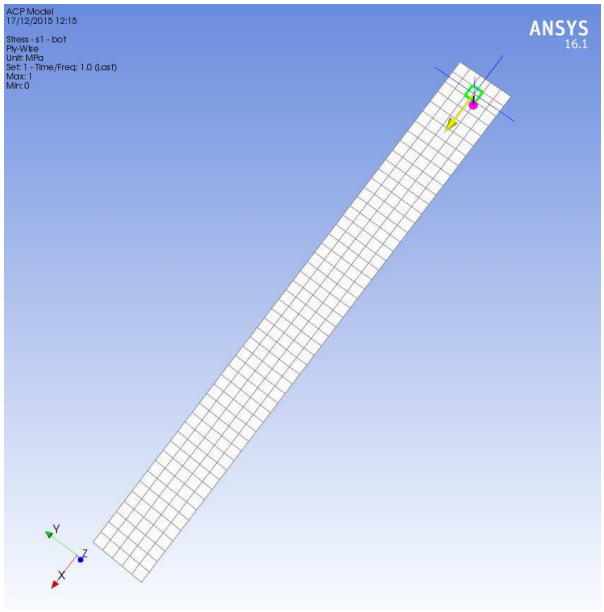


Figura B.10: Ponto 2 do corpo de prova S150W25

Corpo de prova – S150W25 – ponto 3

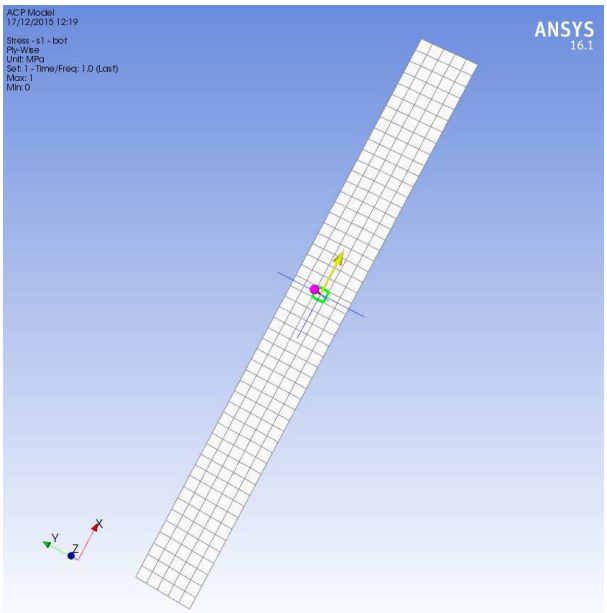


Figura B.11: Ponto 3 do corpo de prova S150W25

Corpo de prova – S150W25 – ponto 4

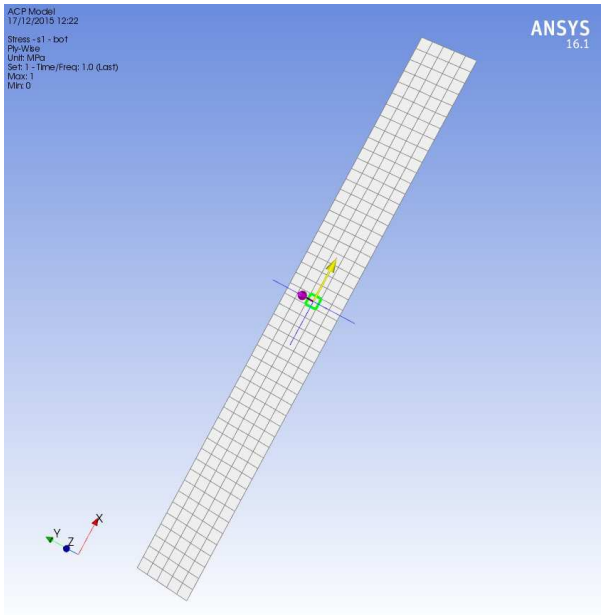


Figura B.12: Ponto 4 do corpo de prova S150W25

Corpo de prova – S200W25 – ponto 1

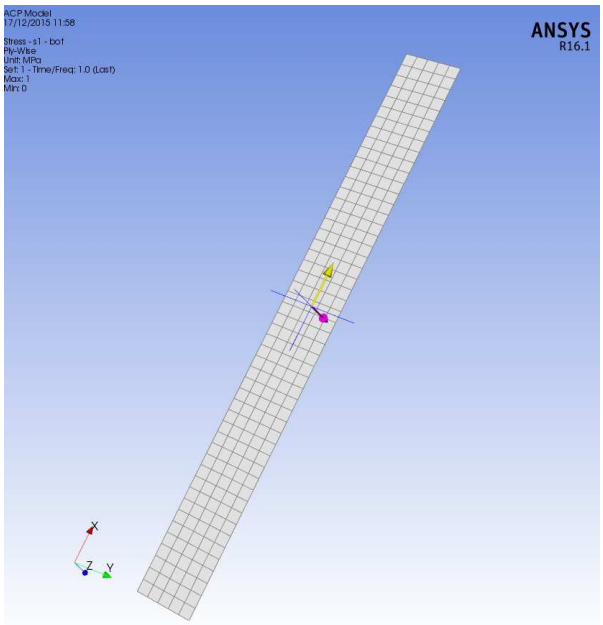


Figura B.13: Ponto 1 do corpo de prova S200W25

Corpo de prova – S200W25 – ponto 2

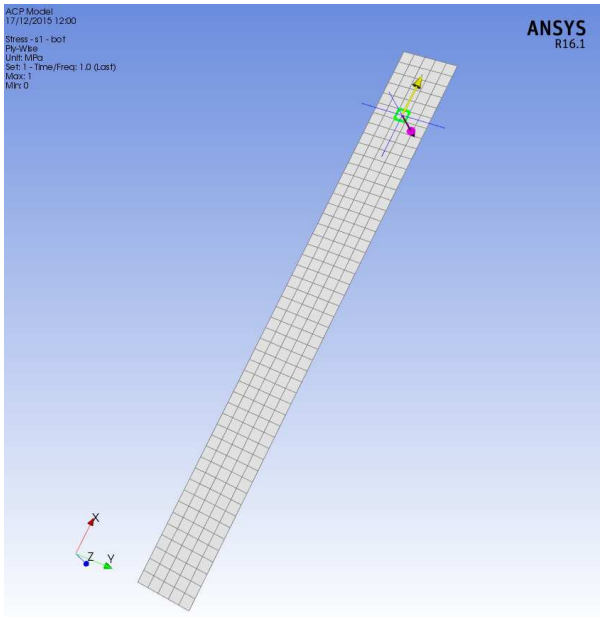


Figura B.14: Ponto 2 do corpo de prova S200W25

Corpo de prova – S200W25 – ponto 3

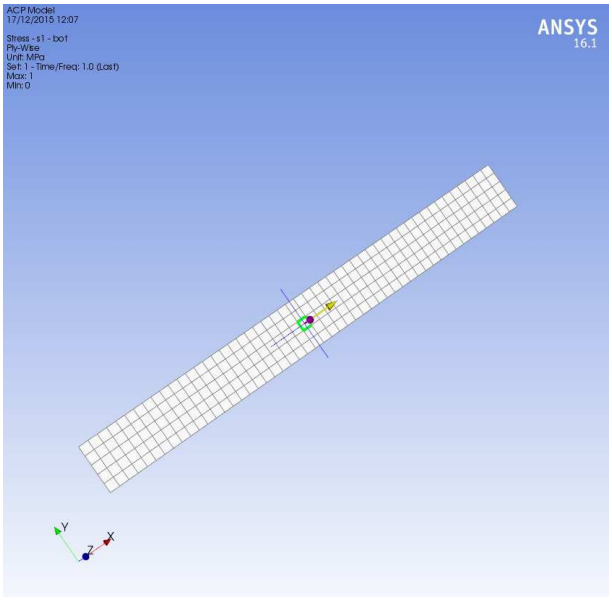


Figura B.15: Ponto 3 do corpo de prova S200W25

Apêndice C

Este apêndice tem por objetivo apresentar a análise de falha desenvolvida para os pontos 2 e 3 dos corpos de prova S100W10, S100W25 e S150W25 e do ponto 2 para o corpo de prova S200W25. A seguir é apresentada a tabela com a legenda dos corpos de prova e seus respectivos pontos e deslocamentos estudados.

Tabela C.1: Pontos e deslocamentos adotados.

Corpo de Prova	Deslocamento Ponto 1 (mm)	Deslocamento Ponto 2 (mm)	Deslocamento Ponto 3 (mm)	Deslocamento Ponto 4 (mm)
S100W10	31	31	10	5
S100W25	44	44	10	4
S150W25	41	41	20	10
S200W25	41	41	20	-

Para todos os pontos 2 analisados não foi identificado a ocorrência de falhas, uma vez que os níveis de tensão nas extremidades do corpo de prova são extremamente baixos, devido aos esforço localizado que é aplicado aos corpos de prova. Deste modo, pode-se concluir que a chance de ocorrência de falha na extremidade dos corpos de prova é mínima, independente do deslocamento imposto ao material.

Em todos os pontos 3 avaliados, com exceção do corpo de prova S200W25, foi identificada a ocorrência de falha, assim como no máximo descolamento. Estes pontos de deslocamento encontram se na região plástica dos corpos de prova na análise experimental.

Análise de falha – S100W10 – ponto 2

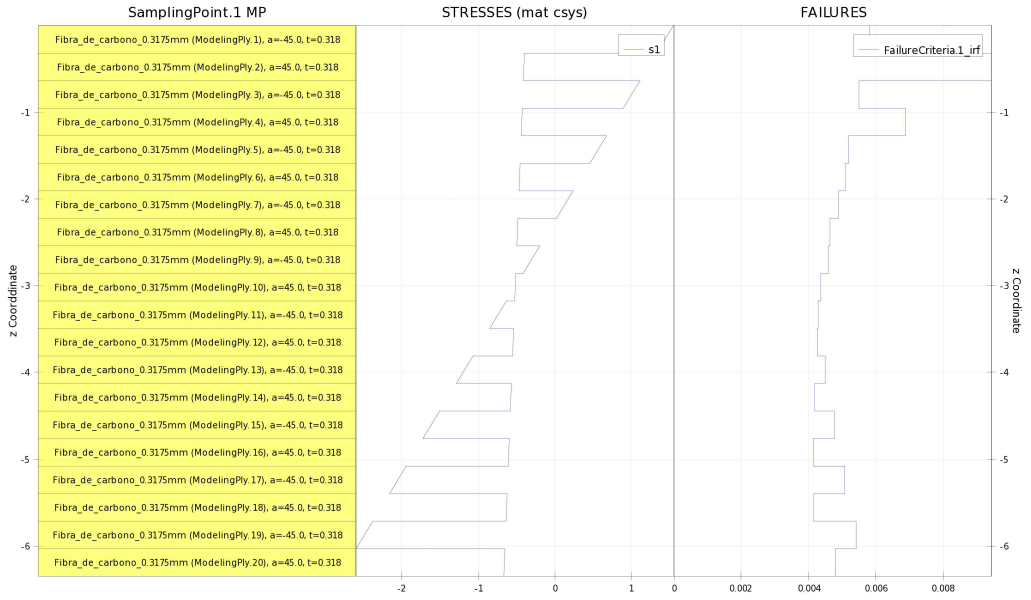


Figura C.1: Análise de falha - S100W10 - ponto 2

Análise de falha – S100W10 – ponto 3

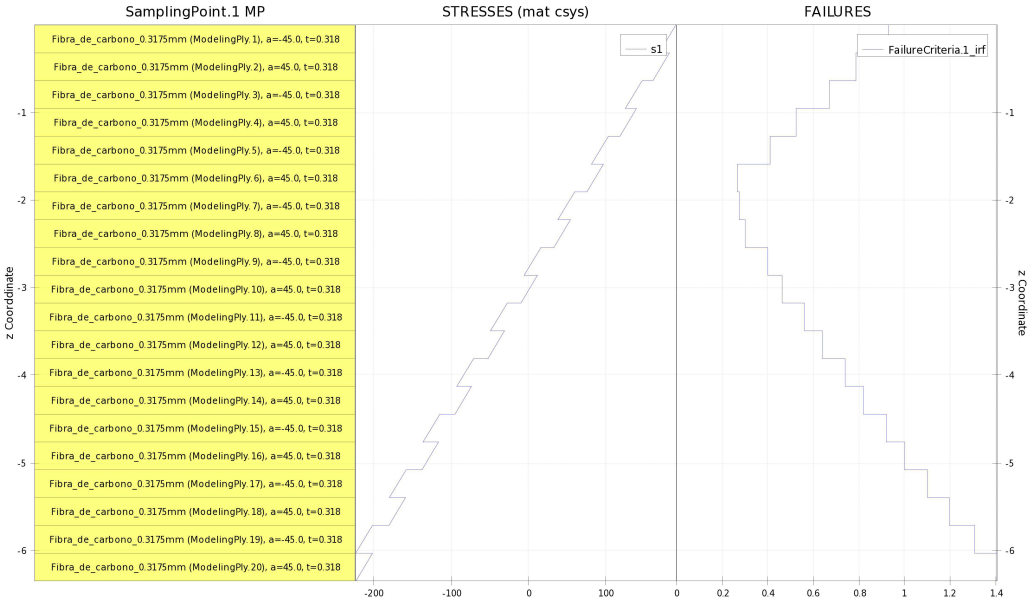


Figura C.2: Análise de falha - S100W10 - ponto 3

Análise de falha – S100W25 – ponto 2

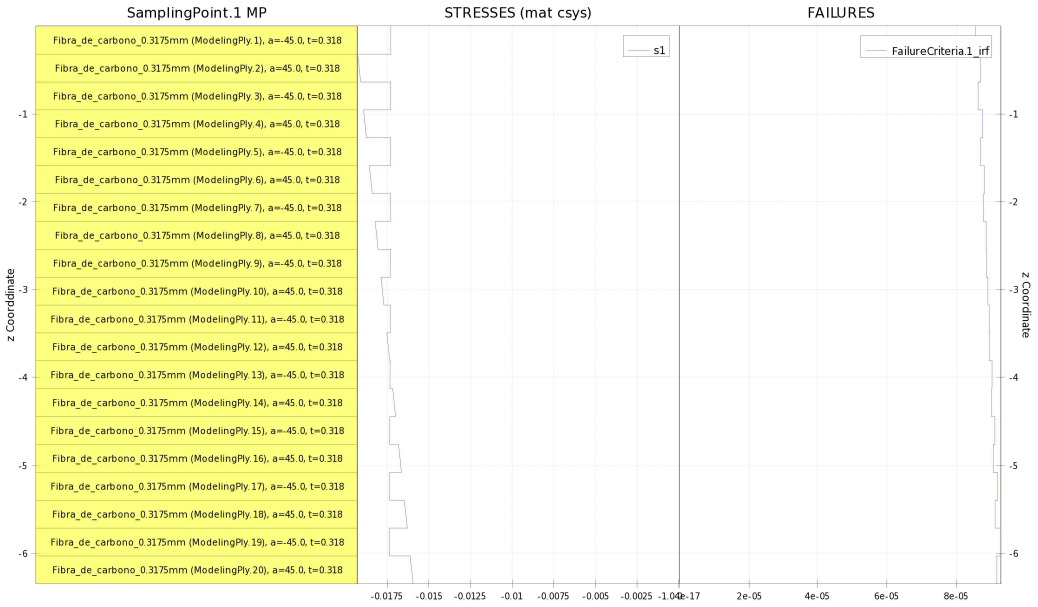


Figura C.3: Análise de falha - S100W25 - ponto 2

Análise de falha – S100W25 – ponto 3

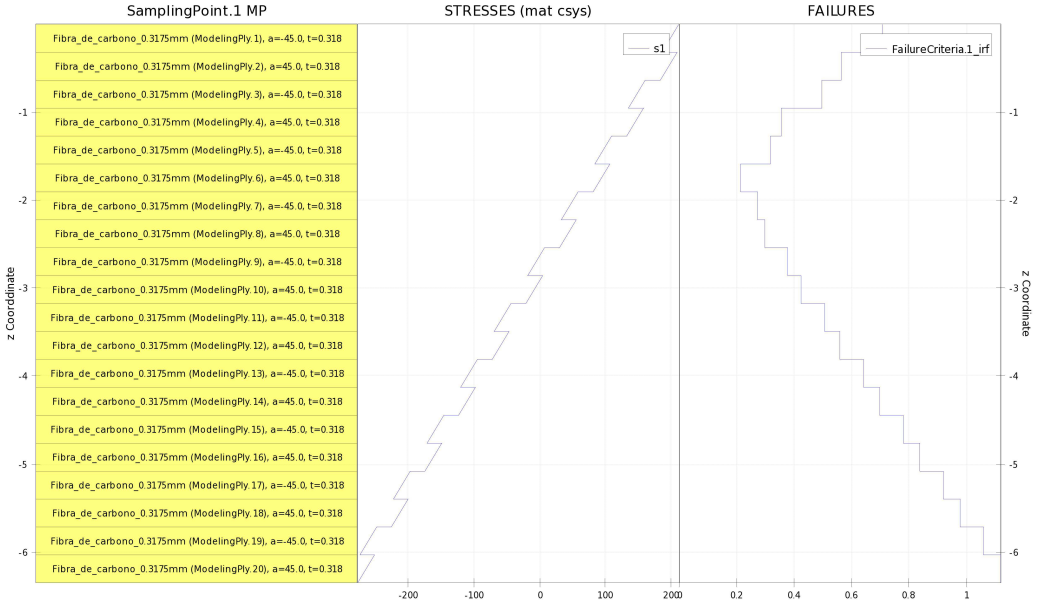


Figura C.4: Análise de falha - S100W25 - ponto 2

Análise de falha – S150W25 – ponto 2

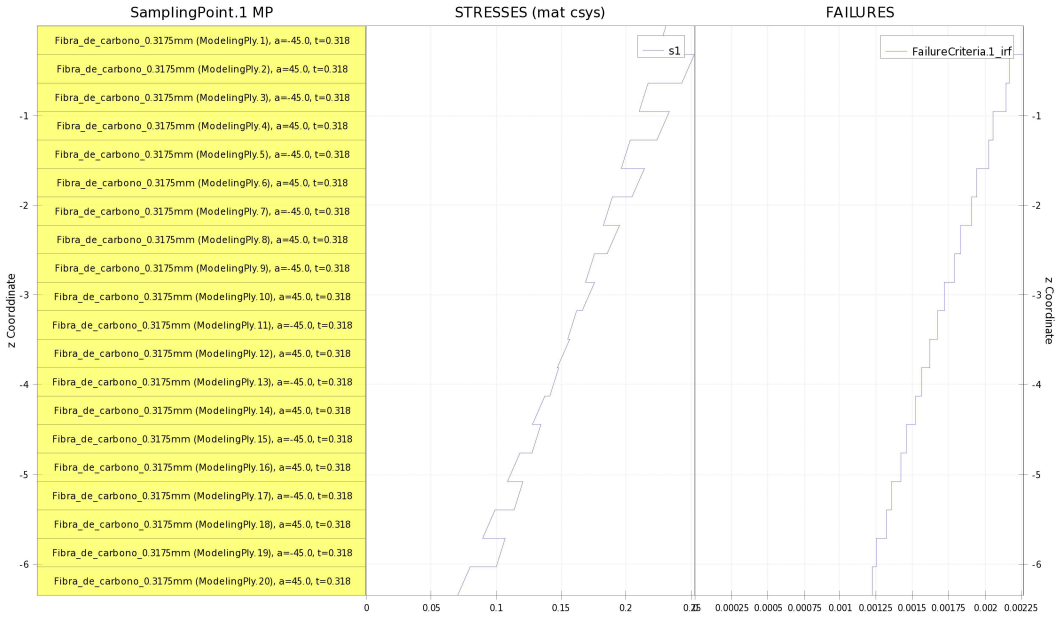


Figura C.5: Análise de falha - S150W25 - ponto 2

Análise de falha – S150W25 – ponto 3

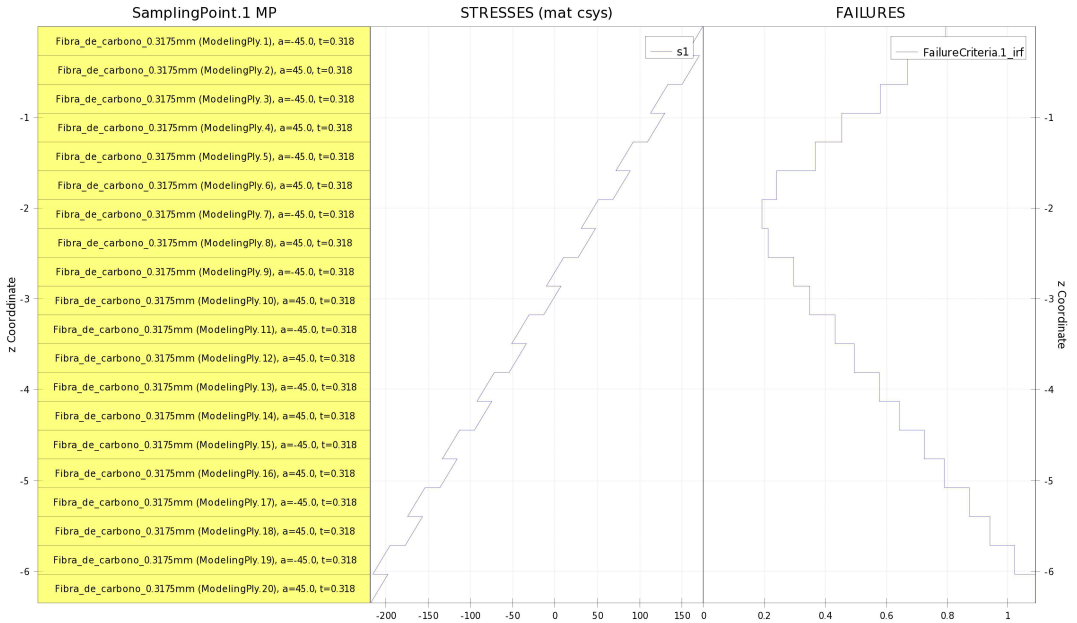


Figura C.6: Análise de falha - S150W25 - ponto 3

Análise de falha – S200W25 – ponto 2

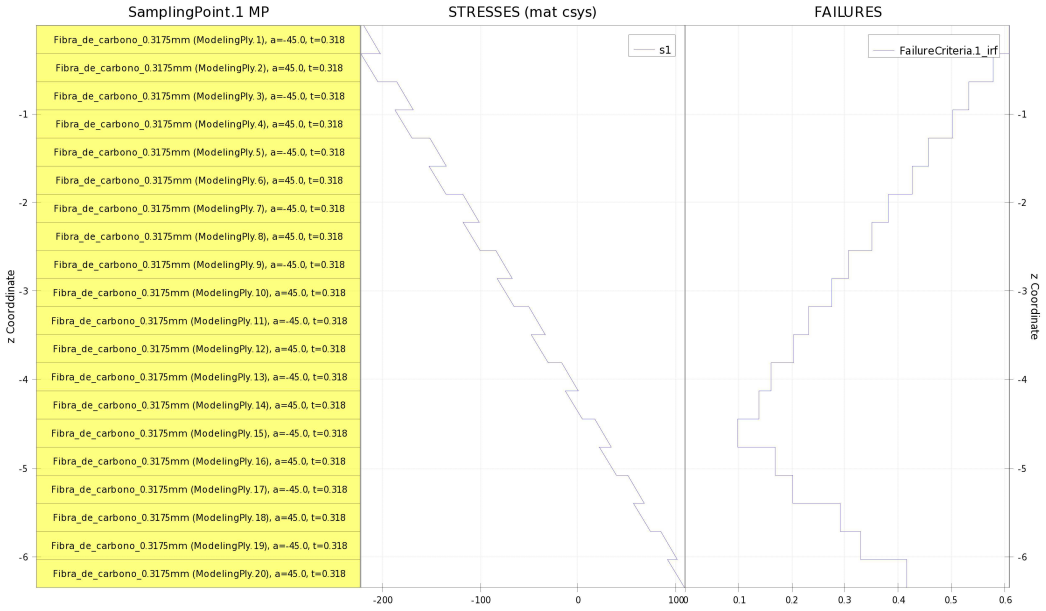


Figura C.7: Análise de falha - S200W25 - ponto 2