



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE
BAURU PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS DE PROJETOS EM
FIBRA DE CARBONO COM VALORES DE PROPRIEDADES
OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE**

Cláudia Luisa Mendes

Bauru, 2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

**ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS DE PROJETOS EM
FIBRA DE CARBONO COM VALORES DE PROPRIEDADES
OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE**

Autor: **Cláudia Luisa Mendes**

Orientador: **Prof. Dr. César Renato Foschini**

Coorientador: **Prof. Dr. Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves**

Curso: **Mestrado em Engenharia Mecânica**

Área de concentração: **Processos de Fabricação**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia – UNESP campus Bauru, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Bauru, 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Mendes, Cláudia Luisa.

Análise em elementos finitos de projetos em fibra de carbono com valores de propriedades obtidas experimentalmente / Cláudia Luisa Mendes, 2018
74 f.

Orientador: César Renato Foschini

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2018

1. Fibra de carbono. 2. Compósitos. 3. Laminados. 4. Elementos finitos. 5. Critério de Falha. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE CLÁUDIA LUISA MENDES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 22 dias do mês de janeiro do ano de 2018, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. CARLOS ALBERTO SOUFEN do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof^o Dr. AVELINO ALVES FILHO do(a) Núcleo de Cálculos Especiais / NCE, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de CLÁUDIA LUISA MENDES, intitulada **ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS DE PROJETOS EM FIBRA DE CARBONO COM VALORES DE PROPRIEDADES OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES



Prof. Dr. CARLOS ALBERTO SOUFEN



Prof^o Dr. AVELINO ALVES FILHO

À memória de Anézia Alves da Silveira (Branca).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que sempre me protege e me dá forças.

Agradeço ao Prof. Dr. César Renato Foschini e ao Prof. Dr. Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves pelo companheirismo e acompanhamento desse trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Carlos Alberto Soufen, pela dedicação, paciência, confiança, orientação e todo suporte oferecido para a realização desse trabalho, pois sem ele não seria possível.

Agradeço ao Prof. Dr. Avelino Alves Filho, Diretor Geral da empresa NCE, pela oportunidade em receber todo conhecimento que por ele foi transmitido, o que me moldou profissionalmente e me dá experiência para sempre crescer. Aproveito para agradecer por fazer parte do Núcleo de Cálculos Especiais, que não somente é o local de trabalho, mas também um local onde fiz grandes amigos, que me ajudam e incentivam constantemente.

Agradeço ao técnico Dr. Hamilton de Mello, ao colega de pesquisa Dr. Marcelo Capella de Campos pela dedicação e ajuda.

Agradeço à Prof. Dra. Dayse Iara dos Santos por todo suporte na obtenção e interpretação dos resultados da análise térmica da resina.

Agradeço a todos os meus amigos que estiveram presentes no andamento deste trabalho e que me deram forças para finalizá-lo.

Agradeço especialmente à minha família. Ao meu pai Donizete, que sempre me apoiou e acreditou em meu potencial e ao lado de minha madrastra Sandra sempre me deram todo o suporte para me tornar quem eu sou. Aos meus irmãos, que sempre estiveram ao meu lado. Ao meu marido Guilherme, que sempre esteve presente e compartilhou comigo tanto momentos bons quanto ruins, me apoiando e amparando, sem nunca me deixar desistir dos meus objetivos. Por fim, agradeço e dedico este trabalho à minha mãe Branca, que nos deixou no meio deste trabalho, mas sempre esteve presente me fortalecendo para nunca desistir por maior que fosse a dificuldade, que descanse em paz.

Agradeço também a todos que por ventura não foram mencionados, mas que de forma direta ou indireta colaboraram com este trabalho.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento,
mais evidente fica nossa ignorância.”

John F. Kennedy.

RESUMO

A exigência dos requisitos de desempenho em estruturas aeroespaciais, navais e automobilísticas vem proporcionando o desenvolvimento de novos materiais, bem como de novas técnicas de fabricação. Normalmente, elevados valores de resistência e rigidez específicas aliados ao baixo peso específico são procurados em projetos estruturais, obtendo-se soluções por meio da utilização de materiais compósitos, particularmente polímeros termo fixos dotados de reforços fibrosos. O entendimento do que é um material composto é necessário, pois trata-se da combinação de no mínimo dois materiais com fase heterogênea, que separados possuem propriedades e características distintas e sua combinação é desejada para a confecção de um material único, com a conformidade das propriedades de ambos os materiais, tornando atrativa sua aplicação. Para otimizar a confecção do laminado em cada projeto, é imprescindível a utilização do modelo em elementos finitos para a obtenção da faixa de tensões, pelo método do critério de falha, sofrida pela amostra e assim obter-se a melhor propriedade mecânica para o seu uso. O presente trabalho tem por objetivo elaborar um estudo comparativo entre os resultados obtidos experimentalmente e os obtidos virtualmente, para validar o uso do software de elementos finitos na execução de um projeto utilizando como material principal o compósito estrutural de fibra de carbono com resina epóxi. Para isso, foram realizados ensaios para obter as propriedades mecânicas, e a melhor temperatura de cura da resina SQ 2004. Posteriormente foram feitos laminados de fibra de carbono com esta resina e extraído suas propriedades mecânicas. Por fim, utilizou-se as propriedades obtidas como entrada do software de elementos finitos e comparou-se o resultado através de três critérios de falha: Hill, Hoffman e Tsai-Wu. Como resultado, constatou-se que o critério de falha de Tsai-Wu é o mais indicado para o cálculo da integridade estrutural de um componente de compósito que utiliza fibra de carbono.

Palavras-Chave: Fibra de carbono, compósitos, laminados, elementos finitos, critério de falha.

ABSTRACT

The demand of requirements in performance of aerospace, naval and automotive structures has been providing the development of new materials as well as new manufacturing techniques. High values of specific strength and stiffness combined with low specific gravity are usually sought in blade designs for wind generators and other components of these systems, obtaining solutions using composite materials, particularly thermoset polymers endowed with fibrous reinforcements. The understanding of what is a composite material is necessary because it is a combination of at least two materials with heterogeneous phase, which have different properties and characteristics and their combination is desired for the manufacture of a single material with conformity of the properties of both materials, making its application attractive. To optimize the preparation of the laminate in each project, it is essential to use the finite element model to obtain the stress range, by the failure criterion method, and to obtain the best mechanical property for its use. The present work has the objective of elaborating a comparative study between the results obtained experimentally and those obtained virtually to validate the use of finite element software in the execution of a project using the structural material of carbon fiber with epoxy resin as its main material. For this, tests were carried out to obtain the mechanical properties and the best curing temperature of the SQ 2004 resin. Later, carbon fiber laminates were made with this resin and extracted its mechanical properties. Finally, the obtained properties were used as inputs to the finite element software and the result was compared through three failure criteria: Hill, Hoffman and Tsai-Wu. It is concluded that the Tsai-Wu failure criterion is the most suitable for calculating the structural integrity of a composite component using carbon fiber.

Keywords: Carbon fiber, composites, laminates, finite elements, failure criterion.

NOMENCLATURA

C_p	Corpo de prova
E	Módulo de elasticidade
E_1	Módulo de elasticidade na direção do urdume
E_2	Módulo de elasticidade na direção da trama
E_x	Módulo de elasticidade na direção principal
E_y	Módulo de elasticidade na direção transversal
G	Módulo de cisalhamento
G_{12}	Módulo de cisalhamento no plano 1 – 2
G_{xy}	Módulo de cisalhamento no plano xy
ρ	Densidade
ν	Coefficiente de Poisson
ν_{12}	Coefficiente de Poisson principal no plano 1 – 2
ν_{21}	Coefficiente de Poisson transversal no plano 1 – 2
ν_{xy}	Coefficiente de Poisson transversal no plano xy
ε	Deformação
ε_1	Deformação no sentido longitudinal do laminado
ε_2	Deformação no sentido transversal do laminado
ε_x	Deformação normal no sentido principal geométrico do laminado
ε_y	Deformação normal no sentido transversal geométrico do laminado
ε_z	Deformação normal no sentido da espessura
σ	Tensão
σ_1	Tensão normal no sentido longitudinal ou principal das fibras
σ_2	Tensão normal no sentido transversal das fibras
σ_3	Tensão normal no sentido da espessura
σ_t	Tensão de tração
σ_f	Tensão de flexão
σ_c	Tensão de compressão
σ_x ou σ_{xx}	Tensão normal na direção principal geométrica do laminado
σ_y ou σ_{yy}	Tensão normal na direção transversal geométrica do laminado

τ_{xy} ou σ_{xy}	Tensão de cisalhamento no plano geométrico xy do laminado
τ_{xz} ou σ_{xz}	Tensão de cisalhamento no plano geométrico xz do laminado
τ_{12} ou τ_6	Tensão de cisalhamento no plano 1 – 2
τ_{13} ou τ_5	Tensão de cisalhamento no plano 1 – 3
τ_{23} ou τ_4	Tensão de cisalhamento no plano 2 – 3
γ_{xy} ou γ_{yx}	Rotação no plano geométrico xy do laminado
Q_{11} a Q_{66}	Elementos da matriz de rigidez relacionados às propriedades do compósito
{k}	Vetor flexão da superfície de referência
i e j	Índices de direção
X	Resistência à ruptura no sentido principal do laminado
Y	Resistência à ruptura no sentido transversal do laminado
Z	Resistência à ruptura no sentido da espessura do laminado
V_T	Volume total dos compósitos
V_F	Volume de fibra
V_M	Volume de matriz
V_V	Volume de vazios
V_F	Fração volumétrica de fibra
V_M	Fração volumétrica de matriz
V_V	Fração volumétrica de vazios
X_t	Tensão de tração na direção do urdume
X_c	Tensão de compressão na direção do urdume
Y_t	Tensão de tração na direção da trama
Y_c	Tensão de compressão na direção da trama
S	Tensão de cisalhamento
F_{12}	Termo de interação de Tsai-Wu
F, G, H, N	Constantes dos critérios de falha de Hill, Tsai-Wu e Hoffman, relacionados às propriedades de resistência do compósito no estado plano de tensões

L, M	Constantes dos critérios de falha de Hill, Tsai-Wu e Hoffman, relacionados às propriedades de resistência do compósito em relação à espessura, para o estado triaxial de tensões
F_i, F_{ij}, F_{ijk}	Tensores de força do critério de falha de Tsai-Wu nas direções do laminado em relação às fibras, sendo 1 principal, 2 transversal e 3 espessura ($F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{23}, F_{44}, F_{55}, F_{66}$)
MEF	Método dos elementos finitos
θ	ângulo entre a direção das fibras e o sentido principal geométrico do laminado
[S]	Matriz de flexibilidade do compósito
[Q]	Matriz de rigidez do compósito
{N}	Vetor esforço normal
{M}	Vetor momento fletor
Σ	Somatório
A_{ij} ou [A]	Matriz de rigidez extensional
B_{ij} ou [B]	Matriz de rigidez de acoplamento entre flexão e extensão
D_{ij} ou [D]	Matriz de flexão
EPT	Estado plano de tensões
\hat{k}	Curvatura virtual de elemento finito na flexão
\widehat{V}_{yz}	Rotação virtual do elemento finito no plano yz
\widehat{V}_{xz}	Rotação virtual do elemento finito no plano xz
\hat{w}	Deslocamento virtual em relação à espessura do elemento finito
q	Carga aplicada no elemento finito
{ }	Notação vetorial
[]	Notação matricial
MPa	Mega Pascal
N/mm ²	Newton por milímetro ao quadrado
N	Newton
mm	Milímetro
°	grau
g/cm ³	Grama por centímetro cúbico

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 Classificação dos materiais compósitos sintéticos e naturais.....	7
Figura 3. 2 Estrutura química de uma resina epóxi diglicidil éter do bisfenol – A (DGEBA). (ELLIS, 1993)	7
Figura 3. 3 Molécula de resina DGEBA. (ELLIS, 1993)	8
Figura 3. 4 Arranjo das fibras nas principais formas; (A) Tecido Tipo Plano 1 x 1, (B) Tecido Tipo Cetim 8HS, (C) Tecido Tipo Diagonal 2 x 2.	12
Figura 3. 5 Direções principais 1 (Urdume) e 2 (Trama) de uma lamina de compósito.....	14
Figura 3. 6 Tipos de falha nos compósitos poliméricos: a) intralaminar, b) interlaminar e c) translaminar (Marinucci, 2011).....	17
Figura 3. 7 Modos de falha nos compósitos poliméricos (Marinucci, 2011). ...	17
Figura 4. 1 Equipamento de análises térmica modelo STA 409 marca NETZSCH.	30
Figura 4. 2 Tecido de fibra de carbono contado.	31
Figura 4. 3 Laminação utilizando-se espátula de silicone para espalhar a resina sobre o tecido.....	32
Figura 4. 4 Processo de prensagem. (A) Início da prensagem, (B) Pressão e temperatura ajustada para o processo.....	33
Figura 4. 5 (A) Máquina de corte por jato d’água (B) Processo de corte dos laminados.....	34
Figura 4. 6 (A) Máquina de corte por serra fita (B) Processo de corte dos laminados.....	34
Figura 4. 7 Microscópio óptico de platina invertida Carl Zeiss.....	35
Figura 4. 8 Desenho dos corpos de prova a) Tração; b) Compressão.	36
Figura 4. 9 Definição da composição do número de lâminas e disposição das fibras no laminado com 11 camadas a 0°.	37
Figura 4. 10 Definição da composição do número de lâminas e disposição das fibras no laminado com 4 camadas 0°.	37
Figura 4. 11 Elaborando a malha do corpo para análise pelo MEF a) Cp de compressão com 1 mm de lado; b) Cp de tração com 6 mm de lado.	38

Figura 4. 12 Carregamento longitudinal do laminado no sentido do eixo principal a) Compressão; b) Tração.	38
Figura 5. 1 Análise térmica da matriz SQ 2004.	40
Figura 5. 2 Ensaio de tração do compósito.....	40
Figura 5. 3 Curva média do ensaio de tração no sentido do urdume.	42
Figura 5. 4 Curva média do ensaio de tração no sentido da trama.	42
Figura 5. 5 Ensaio de flexão do compósito.	43
Figura 5. 6 Ensaio de compressão do compósito.	44
Figura 5. 7 Microscopia óptica, com aumento de 50x. (A) Amostra da placa para ensaio de tração, (B) Amostra da placa para ensaio de flexão.	46
Figura 5. 8 Resultado critério de falha de Hill.	49
Figura 5. 9 Resultado critério de falha de Hoffman.....	49
Figura 5. 10 Resultado critério de falha de Tsai-Wu.....	49
Figura 5. 11 Deslocamento do laminado em simulação da compressão.....	50
Figura 5. 12 Resultado critério de falha de Tsai-Wu.....	51
Figura 5. 13 Resultado critério de falha de Hill.	51
Figura 5. 14 Resultado critério de falha de Hoffman.....	52
Figura 5. 15 Deslocamento do laminado em simulação da tração.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 Aminas utilizadas como agentes de cura comercial (PIRES, 2006).	9
Tabela 3. 2 Vantagens, desvantagens e algumas aplicações para resinas (PIRES, 2006).	10
Tabela 5. 1 Valores obtidos nos ensaios de tração, no sentido do urdume e da trama.	41
Tabela 5. 2 Valores obtidos nos ensaios de flexão, no sentido do urdume e da trama.	43
Tabela 5. 3 Valores obtidos nos ensaios de compressão, no sentido do urdume e da trama.	44
Tabela 5. 4 Cálculo da porcentagem de vazios pela Regra da Mistura.	45
Tabela 5. 5 Cálculo da porcentagem de vazios pelo método da microscopia óptica.	46
Tabela 5. 6 Dados de entrada do material.	47

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS.....	4
3.	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	5
3.1.	MATERIAIS COMPÓSITOS	6
3.1.1	Matriz polimérica	7
3.1.2	Material de reforço	10
3.1.3	Laminação	12
3.2.	CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	13
3.3.	MICROSCOPIA	16
3.4.	FORMULAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	20
3.4.1.	Estudo do MEF Aplicado à Compósitos.....	22
3.5.	CRITÉRIOS DE FALHA	24
3.5.1	Critério de Falha de Hill.....	24
3.5.2	Critério de Falha de Hoffman	26
3.5.3	Critério de Falha de Tsai-Wu	27
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1.	MATERIAIS UTILIZADOS.....	30
4.1.1.	Matriz Polimérica	30
4.1.2.	Tecido de Fibra de Carbono do Tipo Diagonal – Twill Weave	31
4.2.	LAMINAÇÃO.....	31
4.3.	CORTE POR JATO D'ÁGUA	33
4.4.	CORTE POR SERRA FITA.....	34
4.5.	ENSAIOS MECÂNICOS	35
4.6.	MICROSCOPIA	35
4.7.	ANÁLISE VIRTUAL.....	36
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ.....	39
5.2.	ENSAIOS MECÂNICOS	40
5.2.1.	Ensaio de Tração.....	40
5.2.2.	Ensaio de Flexão	43
5.2.3.	Ensaio de Compressão.....	44
5.3.	MICROSCOPIA	45
5.4.	ANÁLISE VIRTUAL.....	46
5.4.1	Simulação em Compressão	47
5.4.2	Simulação em Tração	50
5.5.	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	53
6.	CONCLUSÕES	54
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
8.	REFERÊNCIAS.....	57

1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos são desenvolvidos para atenderem determinadas solicitações de projetos. Depois de décadas de uso restritos em determinados setores, como na área militar, materiais compósitos estruturais, também chamados de avançados tem ampliado a sua aplicação em diferentes setores da indústria moderna, gerando um crescimento de 5% ao ano (REZENDE, BOTELHO, 2000).

Estruturas com alto desempenho e baixo peso são utilizadas em indústrias navais, construção civil, energias alternativas, entre outras. Os materiais compósitos em tecidos são caracterizados pela tenacidade à fratura. Esses materiais, além de possuírem alta resistência mecânica, permitem que o produto tenha melhor estabilidade dimensional, e em determinados casos, maior tenacidade com a incorporação de cargas. Entender o comportamento de propagação de falhas em tecidos compósitos é buscar investigar determinado padrão de periodicidade que poderia ser produzido pela configuração do tecido e também do laminado a ser utilizado em cada projeto (TITA et al, 2002).

Existem na literatura várias definições do que seja um material compósito. Para este trabalho a definição adequada seria: compósitos são materiais formados por uma matriz e um reforço com excelente afinidade química entre si, processados sinteticamente para atingir excelentes propriedades mecânicas com a menor massa possível (MENDONÇA, 2005).

As matrizes para compósitos poliméricos podem ser de materiais termoplásticos e termorrígidos, incluindo-se nesta classe os materiais elastômeros. As matrizes termorrígidas oferecem algumas vantagens que impulsionam o seu uso em compósitos, tais como: ser estáveis termicamente; não fundirem ou amolecem; e obter excelente aplicabilidade (MALLICK & NEWMAN, 1990).

A utilização de resinas do tipo epóxi nesse trabalho se justifica devida à sua aplicação abundante no mercado. É um material de grande importância industrial, devido sua boa resistência a temperaturas e sua alta resistência a produtos químicos e umidades (CAMPOS, 2013).

Um ponto a ser observado é o grau de impregnação entre tecidos de fibra de carbono e a matriz polimérica. A percepção sobre os efeitos de adesão da superfície da fibra de carbono reforçada com resina epóxi está relacionada com os tipos de fraturas (CAMPOS, 2013).

A fabricação e testes mecânicos de estruturas sanduíche, incluindo um novo núcleo de materiais conhecido como rede de materiais de fibra sanduíche demonstraram possuir baixa resistência estrutural como provado pelos testes estáticos (compressão, flexão), porém com relação a resultados de amortecimentos se tornam bem atraentes pois podem ser utilizados onde a resistência estrutural não é solicitada ou seja é de importância secundária como por exemplo, em painéis internos de um helicóptero, onde servirá de isolamento acústico (MENDONÇA, 2005).

E quando se trata de materiais contínuos reforçados com fibras compostas (e estruturas feitas de tais materiais) muitas vezes têm direções preferenciais facilmente identificáveis associados com orientações de fibra ou planos de simetria (DANIEL et al, 2008).

A anisotropia que é peculiar a esses materiais, torna possível desenvolver um projeto otimizado que concilie as características geométricas e funcionais necessárias para um componente estrutural com as propriedades mecânicas, visando à obtenção da confiabilidade desejada. No entanto, esses materiais estão sujeitos a sofrerem danos à medida que forem sendo utilizados, apresentando uma elevada complexidade dos modos de falha, tais como: arrancamento das fibras da matriz, formação de pontes da fibra na matriz, ou seja, descolamento de partes das fibras na matriz, fratura das fibras e falhas da matriz (PARDINI & LEVY, 2006).

O entendimento dos modos de falhas está ancorado principalmente aos esforços mecânicos que são submetidos os laminados, tanto da fibra de vidro quanto da fibra de carbono. Esta compreensão possibilita melhora na confecção destes laminados, a relação de cura da matriz, construirá uma compreensão das características mecânicas. Porém, o uso de um software para calcular projetos prevendo essas falhas ainda é muito escasso (CHEONG, 2005).

Dentro deste contexto este trabalho tem como objetivo apresentar a avaliação e validação de três critérios de falhas contidos no aplicativo computacional FEMAP

NX Nastran e comparar com os valores obtidos em ensaios de compressão e tração em compósitos de fibra de carbono com resina epóxi, para que seja possível o uso desse software no auxílio do cálculo de estruturas e para obter um projeto otimizado sem que haja falhas, o que evita o uso desnecessário de materiais em excesso. Os dados experimentais foram avaliados e comparados com os dados obtidos por cálculos numéricos pelo método dos elementos finitos por meio do FEMAP NX Nastran.

O presente trabalho está estruturado em seções. A primeira seção está abordando uma breve introdução do que será discutido, sendo sucedido pelos objetivos do trabalho e a abordagem teórica necessária para o entendimento geral. Por conseguinte, apresenta os materiais e a metodologia utilizada, dando ênfase à correlação do material utilizado nos ensaios experimentais e no processo de simulação virtual. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos pelos ensaios experimentais e pela análise virtual, e feito a comparação dos resultados com o objetivo de validar os valores apresentado pelo software computacional FEMAP NX Nastran e indicar o critério de falha que se destaca. Então são apresentadas as conclusões obtidas pelo trabalho seguida das propostas de trabalhos futuros. Por fim, segue a referência bibliográfica utilizada nesta dissertação.

2. OBJETIVOS

No presente trabalho, estuda-se o comportamento mecânico de um compósito de resina epóxi, SQ2004, com reforço de tecido de fibra de carbono em trama diagonal com o objetivo de avaliar e validar três critérios de falhas contidos no aplicativo computacional FEMAP NX Nastran. Para essa validação, serão comparados os resultados teóricos com os obtidos experimentalmente para os ensaios de compressão e tração. A caracterização por microscopia óptica e a contabilização de vazios presentes nos corpos de provas, é objetivo complementar.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Conquistas tecnológicas atuais, principalmente com aplicações nas áreas como aeronáutica, aeroespacial, naval, automobilística, construção civil, petroquímica, artigos esportivos e bioengenharia, somente se tornaram viáveis após a descoberta dos compósitos estruturais. Esses materiais são desenvolvidos para atenderem determinadas solicitações de projetos, pois os compósitos obtidos a partir de reforços contínuos apresentam um excelente desempenho estrutural, e quando comparado com ligas metálicas estruturais, são bem mais leves (PARDINI & LEVY, 2006).

Os materiais compósitos são muito conhecidos por apresentarem altos índices de resistência e rigidez por unidade de peso, mesmo sendo submetidos a esforços combinados como tração, compressão, flexão e torção. Esses materiais também possuem elevado amortecimento estrutural, ausência de corrosão em alguns ambientes agressivos aos metais e, em muitos casos, boa tenacidade a fratura. (Hull, 1996).

Os compósitos mais utilizados a níveis comerciais obtidos a partir de matrizes polimérica são de reforços com fibra de carbono, fibra de vidro-E e fibras de aramida. Pois são fibras que possuem alta rigidez e resistência. Já a matriz polimérica, embora apresente baixa massa específica, são bem menos resistentes e rígidas que as fibras. Por conta disso, as propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos são significativamente influenciadas pela orientação das fibras em relação às solicitações mecânicas, assim como pelas frações volumétricas de seus constituintes. (GIBSON, 1994).

Devido a influência da direção das fibras de reforço, é notório que os compósitos, como relação aos materiais estruturais isotrópicos tradicionais (materiais metálicos), apresentam um grau de complexibilidade significativamente maior. Os materiais metálicos possuem suas propriedades bem definidas e previsíveis quando se utiliza processos clássicos de fabricação já consolidados tecnologicamente. Por outro lado, os materiais compósitos têm suas propriedades influenciadas por fatores e variáveis, o que lhe dá a liberdade de se ajustar estruturalmente com suas

propriedades mecânicas se adequando à necessidade de um requisito específico de projeto. Dessa forma, o compósito pode ser efetivamente projetado simultaneamente ao componente estrutural, desde que conhecido para ser manipulado o modelamento matemático do compósito utilizado, pois suas propriedades serão únicas e devem atender aos requisitos específicos exigidos pelo projeto leves (PARDINI & LEVY, 2006).

3.1. MATERIAIS COMPÓSITOS

O significado do substantivo compósito em materiais indica a formação por no mínimo de dois ou mais tipos de materiais componentes com possíveis fases distintas. Amplamente podem ser divididos em naturais, como madeira, ossos e tecidos musculares; e em sintéticos, que são os utilizados para esse trabalho. Ambos os tipos são notoriamente divididos por uma fase descontínua ou filamentar (reforço) e outra contínua ou aglutinante (matriz). Portanto uma das possíveis definições do que é um material compósito seria a do material que apresenta dois ou mais materiais quimicamente diferentes, sendo na escala macroscópica bem nítida essa divisão. Esta composição de materiais possibilita quase sempre em propriedades com características intermediárias ou melhores do que se analisadas separadamente. (WIEBECK, 2005)

Deve-se ter em conta que tais propriedades estão diretamente vinculadas às propriedades dos elementos constituintes destes materiais, como as propriedades e a qualidades das fibras, da matriz, da concentração volumétrica, a interface de adesão fibra e matriz, posicionamento das camadas e conseqüentemente sua orientação (GIBSON, 1994).

Os compósitos, de uma forma geral, podem constituir-se de fibras ou partículas, como é proposto esquematicamente no diagrama mostrado pela Figura 3.1. Caso o reforço seja na forma de fibras, pode ser formado por feixes paralelos entre si, o que naturalmente é orientado pela direção longitudinal das fibras, sendo possível a manipulação dessas direções. O compósito obtido por reforços multidirecionais tem como ponto de partida as preformas têxteis e podem se ajustar na obtenção de estruturas maciças de grande e variados volumes (GIBSON, 1994).

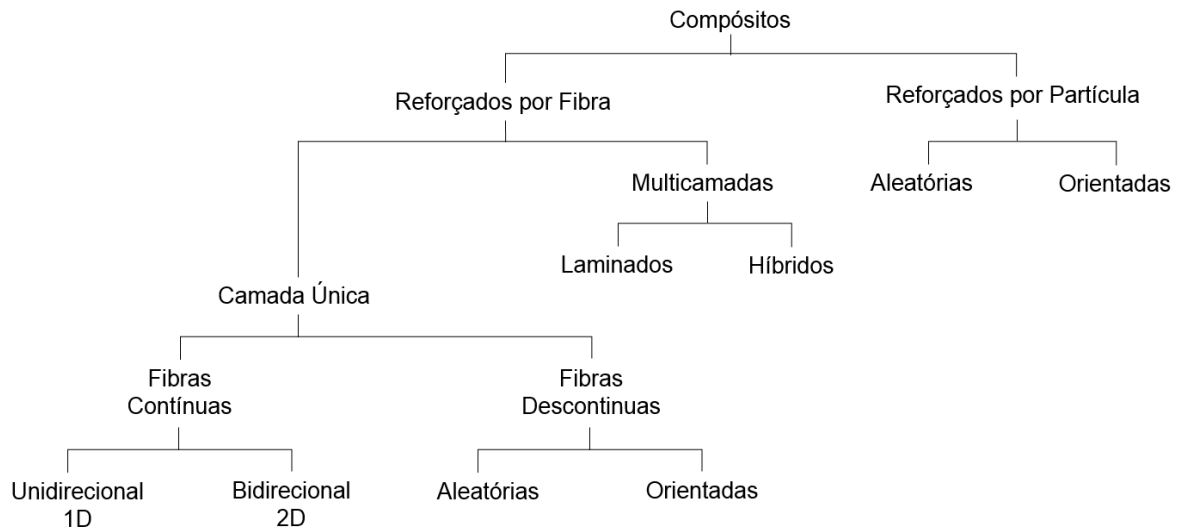


Figura 3. 1 Classificação dos materiais compósitos sintéticos e naturais.

3.1.1 Matriz polimérica

As resinas epóxi são termorrígidos de alto desempenho que contem pelo menos dois grupos epóxi terminais, conhecidos também por grupos epoxirano ou etoxilina, por molécula. A morfologia da palavra epóxi tem origem grega, significa: [epi] – fora de; e [oxi] – oxigênio (Lee,1967). Os agentes de epoxidação mais comuns são os ácidos peracético e perfórmico e os óleos vegetais epoxidados. A epícloridrina (1-cloro-2, 3 - epóxi - propano) é o agente universal portador do grupo epóxi que reagirá com espécies químicas que tem hidrogênios ativos. O bisfenol A [2,2 - bis (4'-hidroxifenil) propano] é a espécie química mais comum que contém esses hidrogênios ativos. A primeira resina epóxi com características similares às das atuais, foi sintetizada na Alemanha em 1933 por Schlack a partir da reação de epícloridrina com bisfenol A, mostrada na Figura 3.2 (ELLIS, 1993).

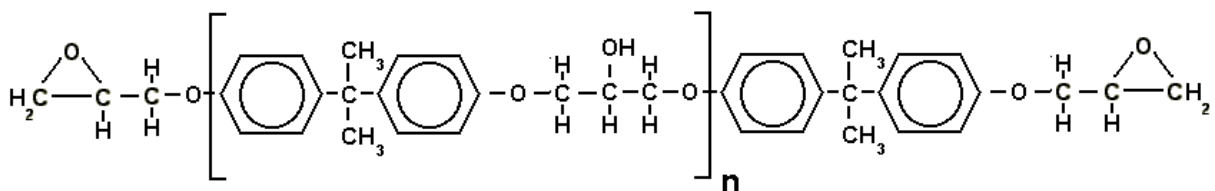


Figura 3. 2 Estrutura química de uma resina epóxi diglicidil éter do bisfenol – A (DGEBA). (ELLIS, 1993)

A Figura 3.3 mostra a fórmula estrutural do DGEBA e sua unidade de repetição (n). Estes compostos possuem um ponto de amolecimento entre 154 – 157°C.

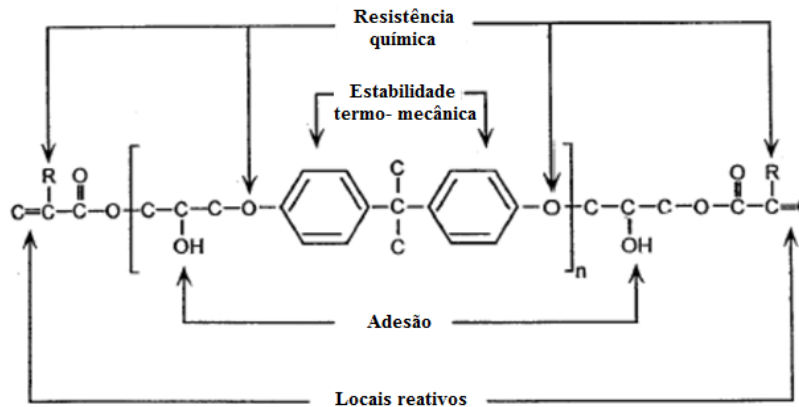


Figura 3. 3 Molécula de resina DGEBA. (ELLIS, 1993)

A variação do valor de n interfere no estado físico da resina, de líquida à sólida, onde a viscosidade aumenta conforme o aumento de n . Se $0 < n \leq 1$, a resina será líquida, porém no caso de $n > 1$ será semi-sólida ou sólida. Outro dado importante é classificar a resina através da taxa molar dos reagentes (peso molecular da resina dividido pelo nº de anéis epoxídicos), para efeito de cálculo estequiométrico de proporção entre a resina e o agente de cura. A taxa de referência molar dos reagentes para resinas no estado líquido pode chegar até 229, para resinas semi - sólidas varia entre 230 a 459 e finalmente para resinas em estado sólido a taxa está acima de 460, podendo chegar a 5000 (MANO, 1991).

A grande capacidade de adesão da resina epóxi, marca de forma permanente suas características, pois, podem aderir a um grande número de materiais, juntamente com sua baixa contração. A viscosidade da resina epoxídica é um dos parâmetros fundamentais, sendo que a temperatura define as condições de processamento. Algumas resinas do grupo epóxi podem apresentar alta viscosidade à temperatura ambiente, como exemplo a resina epóxi-novolaca (REPN), que quando curadas a alta temperatura desenvolvem um melhor desempenho (MANO, 1991).

Estas resinas são usadas como impregnação, revestimento de superfícies, matrizes para compósitos, adesivos entre outros. Neste estudo a aplicação está relacionada à impregnação dos tecidos de fibra de carbono. As resinas do grupo epóxi podem ser curadas com diversos agentes de cura ou como também são conhecidos como endurecedores. Os principais endurecedores que podemos destacar são as aminas alifáticas, as aminas ciclo alifáticas e aminas aromáticas, existem outros,

porém, estes são os mais comuns. Dentro deste grupo de reagentes o grupo das aminas alifáticas são altamente reativas e têm tempo de gel relativamente curto à temperatura ambiente (< 60 min), são líquidas e voláteis à temperatura ambiente possuem um baixo custo e de fácil mistura. Na Tabela 3.1 alguns tipos de reagentes comumente encontradas comercialmente (PIRES, 2006).

Seguidamente a esta tabela, tem a tabela 3.2 que é comparativa e aponta vantagens ou desvantagens e algumas possíveis aplicações para a resina.

Tabela 3. 1 Aminas utilizadas como agentes de cura comercial (PIRES, 2006).

Estrutura	Nome
Alifáticas	
	diethilenotriamina (DETA)
	triethylenotetramina (TETA)
	poli(oxipropileno) diamina
Ciclo alifáticas	
	isoforonodiamina (IPDA)
	1,2-diaminociclohexano (DAC)
	N, aminoetilpiperazina (AEP)
Aromáticas	
	4,4'-diaminodifenilmetano (DDM)
	4,4' diaminodifenilsulfono (DDS)
	m-fenilenodiamina

Tabela 3. 2 Vantagens, desvantagens e algumas aplicações para resinas (PIRES, 2006).

Tipo de amina	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Aminas alifáticas	Baixa viscosidade cura à temperatura ambiente, incolor.	Vida útil pequena, moderadamente tóxica, alta absorção de umidade.	Adesivos, pequenos vazamentos, encapsulante elétrico, uso na engenharia civil.
Aminas aromáticas	Bom desempenho às temperaturas elevadas, boa resistência térmica, longa vida útil, baixa absorção de umidade	Incompatibilidade com resinas epóxi, longos ciclos de curas a altas temperaturas, tóxicas.	Compósitos de alto desempenho e revestimentos, adesivos, filamentos espiralados, encapsulante elétrico
Catalítico	Resistência a altas temperaturas, vida útil muito longa.	Longos ciclos de cura a altas temperaturas, quebradiços.	Revestimentos em pó, adesivos, encapsulante elétrico.

A estequiometria da mistura epóxi/endurecedor é fundamental na definição das propriedades a serem obtidas do sistema curado. Como ressalvo é importante garantir que não haja nenhum grupo epóxi ou agente de cura não reagido após completado o processo de cura, assim garante-se a obtenção das melhores propriedades mecânicas.

A relação epóxi/endurecedor afeta, após a cura, a transição vítrea, o módulo de elasticidade e a resistência mecânica. A resistência a tração de epóxi curados variam de 40 a 90Mpa, enquanto o módulo de elasticidade varia de 2,5 a 6,0 GPa, com a deformação de ruptura variando na faixa de 1 a 6%. A resistência à compressão é de 100 a 220Mpa (BAUER, 1989).

3.1.2 Material de reforço

Os reforços para compósitos podem se apresentar na forma de fibra contínuas, picadas e na forma de partículas. Com base no objetivo do trabalho em avaliar compósitos estruturais, esses reforços se encontram na forma de fibras ou filamentos. As fibras comerciais são basicamente produzidas por três processos: fiação por fusão, fiação a úmido e fiação a seco. Entretanto, as fibras não possuem características estruturais se não forem aglutinadas por uma matriz (PARDINI & LEVY, 2006).

Na tecelagem industrial há dois tipos de fios que constroem o tecido, um denominado de urdume, que é o fio base ou fios de teia para tecelagem e outro denominado de trama, que são os fios que entrelaçam o urdume, permitindo assim a construção de tecidos, possibilitando resistências diferentes nestas duas direções (ALBERS, 1965).

O tecido em virtude da gama tecnológica agregada possui valor diferenciado comparado com as mantas, porém oferecem características mecânicas melhores com relação à resistência e a rigidez juntamente com maior estabilidade dimensional. A relação entre a massa do tecido por unidade de área, define a gramatura, que é expressa em g/m^2 (BUHLER,1948).

Podemos separar os tecidos em três grupos: tecido tipo plano, tipo cetim e tipo diagonal. O tecido tipo plano padrão, ou plain, consiste de cabos interlaçados do urdume e da trama que se dispõem em um padrão, onde cabos da trama entrelaçam acima e abaixo dos cabos do urdume, conforme mostra a Figura 3.4 (A). O tecido tipo cetim, ou harness satin (HS) como são conhecidos, consiste nas camadas assimétricas, isto é, os entrelaçamentos são realizados no intervalo de três cabos acima, no mínimo, e um cabo abaixo, até somarem onze cabos acima e um abaixo, como mostra a Figura 3.4 (B). O tecido diagonal, ou twill, são facilmente identificáveis pelas linhas diagonais, os cabos nesse tipo de tecido são usualmente bem empacotados e espaçados na largura exata do mesmo, o que mantém firmes em sua posição como mostra a Figura 3.4 (C) (BUHLER,1948). O tecido em fibra de carbono do tipo diagonal 2 x 2, ou twill weave 2 x 2, de $200g/m^2$ é o que será utilizado nesse trabalho.

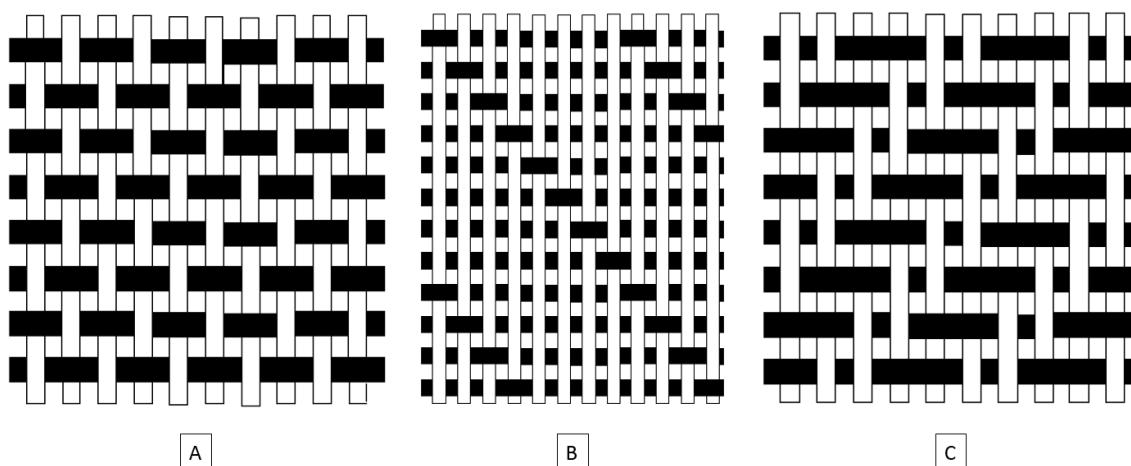


Figura 3. 4 Arranjo das fibras nas principais formas; (A) Tecido Tipo Plano 1 x 1, (B) Tecido Tipo Cetim 8HS, (C) Tecido Tipo Diagonal 2 x 2.

3.1.3 Laminação

A laminação é o processo de fabricação pelo qual, sucessivas camadas de reforço devidamente impregnadas com a matriz polimérica são dispostas sobre uma superfície de um molde que tem a forma negativa da peça a ser fabricada. Os materiais compósitos são conformados de acordo com as especificações de projeto, seguindo normas e padrões pré-estabelecidos. De modo geral, os métodos dos processos podem ser manuais e automatizados e a moldagem pode ser efetuada em molde aberto ou molde fechado. O processo de fabricação corresponde a 50 – 60% do custo total de um compósito, e por esse motivo é bastante estudado, para que seja possível reduzir o custo final do produto (PARDINI & LEVY, 2006).

Pode-se classificar o processamento de compósitos basicamente de duas maneiras: pelo tipo de matriz a ser utilizada (poliméricas, cerâmicas ou metálicas), ou pelo tipo de processo utilizado para a obtenção do compósito (fase líquida, fase gasosa ou fase de partícula sólida). A escolha do processo depende da manufatura da produção do compósito, isto é, considerar o tamanho e geometria do componente a ser fabricado, a microestrutura desejada, o desempenho e a avaliação mercadológica. O que determinará a diferença será a qualidade do material. Nesse trabalho será utilizado a matriz polimérica (PARDINI & LEVY, 2006).

Os processos que se utilizam de moldes abertos geram um acabamento liso e uniforme em apenas uma das superfícies, utilizando apenas um molde, porém nos processos em que empregam moldes fechados, o acabamento liso será em ambas as faces, sendo necessário um par de moldes denominados de macho e fêmea. Pode-se citar como exemplos alguns métodos que utilizam laminação de moldes abertos a moldagem manual (hand lay-up), a moldagem por aspersão (spray up), a bobinagem contínua (filament winding) e a moldagem a vácuo (vacuum bag). Dentre os processos mais utilizados em moldes fechados, pode-se destacar a moldagem por transferência de resina (resin transfer moulding - RTM), moldagem por compressão e a moldagem em autoclave/hidroclave (BANNISTER, 2001). Neste trabalho utiliza-se a técnica de moldagem manual (hand lay-up).

Essa técnica foi escolhida porque é a mais simples, com menores custos e de fácil execução. Este processo permite fácil assimilação da forma de processamento, mesmo com essa vantagem a necessidade do conhecimento técnico é importante para garantir a qualidade solicitada pelo projeto. Antes de iniciar o processo de laminação, é aconselhável a aplicação de uma camada de matriz sobre o gel coat ou sobre o véu, pois assim teremos uma boa umidificação, pois isso ajudará na melhor acomodação do reforço no molde, principalmente em regiões com curvatura, facilitando a operação de roletagem para a retirada do ar aprisionado entre as camadas. A sobreposição de camadas e resina é feito de forma alternada, matriz-tecido-matriz e segue um padrão de orientação de acordo com o tipo de trama do tecido. A quantidade de camadas, os tipos de reforços, a orientação e as sequências de formação das camadas devem seguir um roteiro de laminação (MARINUCCI, 2011).

Uma desvantagem do método é que ao utilizar-se apenas ele com cura da resina em temperatura ambiente ou em estufa, não se obtém um compósito estrutural. Para torna-lo estrutural foi optado pela cura em uma prensa térmica, que se assemelha com moldagem em autoclave, o que permite o controle da quantidade de resina no laminado e mantém a temperatura adequada para a cura da resina (BELINGARDI e PAOLINO, 2008).

3.2. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

As propriedades elásticas dos materiais são características mecânicas essenciais para a análise de tensões e o projeto de componentes estruturais utilizados em diversos ramos da engenharia. Se tratando de estruturas de compósitos, em particular de compósitos poliméricos, que apresentam comportamento elástico e linear até atingirem a tensão de falha, o conhecimento das propriedades elásticas é fundamental (PARDINI & LEVY, 2006).

As propriedades dos compósitos estão fortemente vinculadas às propriedades da matriz e das fibras, pois, desse modo o estudo das características não só do compósito, mas das fibras e da matriz são fundamentais para ajudar a compor um produto de qualidade e que seja interessante para o mercado (MENDONÇA, 2005).

Dentro da gama de ensaios mecânicos, o ensaio de tração é um dos mais comuns, sendo utilizado para caracterização mecânica de materiais e possibilita a determinação de propriedades tais como resistência, módulo de elasticidade, deformação longitudinal e transversal, e coeficiente de Poisson (CALLISTER, 2002). Em virtude das características anisotrópicas dos compósitos, é necessário que o ensaio de tração seja realizado na direção longitudinal e transversal do tecido, ou seja, na direção da trama e do urdume, conforme mostra a Figura 3.6.

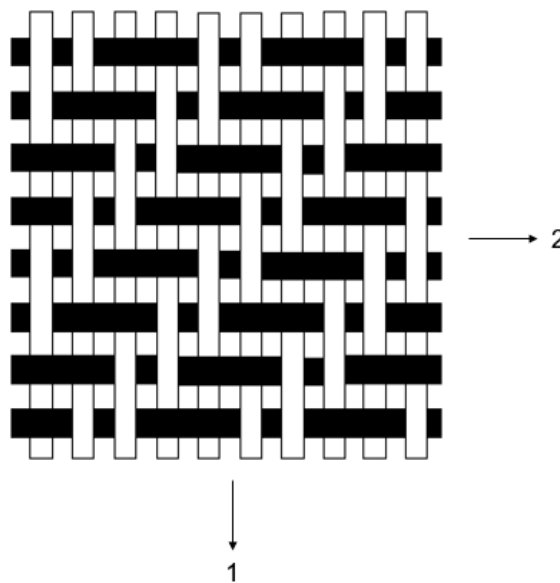


Figura 3. 5 Direções principais 1 (Urdume) e 2 (Trama) de uma lamina de compósito.

O ensaio de tração nas fibras obedece a normas técnicas específicas. O conhecimento sobre as características mecânicas das fibras ajuda na compreensão e na formatação de materiais compósitos. No ensaio realizado, a fração volumétrica será distribuída em toda extensão da fibra evitando assim falta ou excessos localizados. Estas frações ficam em torno de 40% a 60%, que são recomendadas pela norma ASTM D 2243. Um importante detalhe durante a execução é evitar o escorregamento do corpo de provas em relação às garras da máquina de tração, pois caso contrário os dados obtidos não serão realísticos.

A técnica de homogeneização é de grande importância, pois através dela é possível calcular as propriedades elásticas de um compósito uma vez que se saiba as propriedades elásticas de seus constituintes e suas frações volumétricas. A temperatura de cura é outro fator que influencia nas qualidades mecânicas da matriz.

Em uma lamina de compósitos, o volume (v) total do material (v_T) divide-se em 3 parcelas, ou seja: (i) o volume de fibras (v_F); (ii) o volume de matriz (v_M); e (iii) o volume de vazios (v_V). O volume de vazios corresponde ao volume de bolhas de ar e de gases que emanam da resina durante o processo de cura, ele contribui diretamente nas propriedades mecânicas do laminado final, isto é, quanto maior a quantidade de vazios, pior será a qualidade final do compósito. Matematicamente pode-se escrever a equação 3.1 (CHAWLA, 1987).

$$v_T = v_F + v_M + v_V \quad (3.1)$$

Com isso é possível definir as frações volumétricas (V) de fibras (V_F), de matriz (V_M), e de vazios (V_V), respectivamente são dadas pela equação 3.2.

(3.2)

$$V_F = \frac{v_F}{v_T}; V_M = \frac{v_M}{v_T}; V_V = \frac{v_V}{v_T}$$

Sendo que combinando as equações (3.1) e (3.2), obtém-se a equação 3.3.

$$V_F + V_M + V_V = 1 \text{ ou } 100\% \quad (3.3)$$

Em compósitos estruturais de boa qualidade, a fração volumétrica de vazios (V_V) tem que ser necessariamente baixa. Idealmente, deve ser inferior a 1%. Dentro do processamento dos materiais compósitos um procedimento que contribuirá para diminuir a quantidade de vazios é a utilização do processamento com uma autoclave, pois este recurso influencia no grau de impregnação entre a fibra do tecido com a resina (CHAWLA, 1987).

Um modo muito utilizado para a determinação da quantidade de vazios em compósitos é pela regra da mistura, que consiste na medição, antes da laminação, do volume de resina a ser utilizada e da determinação do volume de fibra utilizada. Com a diferença entre o volume do laminado final e a quantidade em volume utilizado de matriz e reforço, se obtém o volume de vazios e com isso se calcula sua porcentagem (CHAWLA, 1987).

Para determinar as propriedades mecânicas são feitos corpos de provas obedecendo à norma técnica. Dentro da gama de ensaios existentes, os ensaios de tração, flexão e compressão são os mais importantes, pois é através deles que se extraem as informações necessária para caracterizar o material e dimensionar um projeto. Quando os corpos de prova são submetidos ao ensaio, as fibras que recebem o carregamento no sentido longitudinal alcançam melhores resultados se comparados com as fibras em sentido transversal.

No caso de determinação dos coeficientes Poisson para laminados com configurações de cross ply (0/90°) sugere-se a utilização de um extensômetro bidirecional ou um strain gages, onde este dispositivo interpreta as deformações ϵ_1 e ϵ_2 do compósito durante o ensaio, permitindo obter, por relação entre elas, o coeficiente de Poisson.

3.3. MICROSCOPIA

Dentro deste estudo destacamos a técnica de microscopia óptica (MO), pois é utilizada amplamente na análise microestrutural de compósitos, possibilitando identificar vários tipos de falhas que ocorrem com o material como trincas e analisar as condições de processamento, que desempenham de forma direta as propriedades mecânicas na sua aplicação. Surge como recurso dentro da caracterização, em virtude do fácil manuseio, sem a necessidade de preparação complexa da amostra.

Um exemplo da caracterização é o estudo da superfície das amostras que podem apresentar, como micro trincas, determinação de origem de uma falha ou dos modos de fratura de um compósito. Os materiais compósitos poliméricos são construídos pela combinação de um material polimérico, a matriz, e elemento de reforço. Quando se trata de matrizes termofixas, ambas são amorfas, ou seja, não apresentam a formação de uma estrutura cristalina, como ocorre em alguns polímeros semicristalinos. Esses fatores aliados à anisotropia e os métodos de processamento justifica a análise microestrutural. Dentro dessa perspectiva, as falhas se apresentam sob uma grande diversidade, nas quais estão vinculadas as direções da aplicação da carga no material e a orientação das fibras nas camadas. Existem três modos de falhas que podem ocorrer nos compósitos poliméricos, são eles: interlaminar, intralaminar e translaminar, que estão apresentadas na Figura 3.7 (MARINUCCI, 2011).

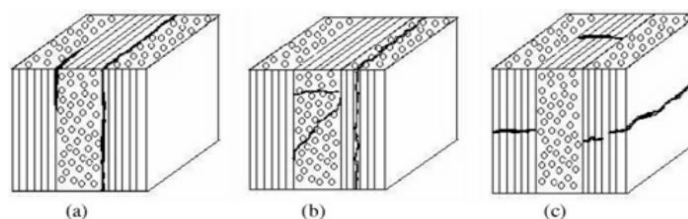


Figura 3. 6 Tipos de falha nos compósitos poliméricos: a) intralaminar, b) interlaminar e c) translaminar (MARINUCCI, 2011).

Como dito anteriormente as falhas podem ser divididas em três modos. Falhas intralaminares são aquelas localizadas internamente às camadas, enquanto que falhas interlaminares ocorrem em planos paralelos aos das camadas e seus mecanismos de falhas e aparências tendem a serem denominados por fratura da matriz e separação da fibra da matriz, causando uma das falhas mais presentes nos compósitos, a delaminação. Falhas translaminares são orientadas transversalmente ao plano do laminado e quando ocorridas por tração exibem uma topografia desigual, tornando a análise fractográfica bastante complicada. Neste caso, o aspecto dominante é a presença de fibras quebradas. A falha para os tipos interlaminar e translaminar ocorrerem segundo três modos: modo I, modo II e modo III. Entretanto, atenção deve ser dada à orientação do reforço na camada, pois, para uma mesma condição de tensão, ocorrem trincas interlaminares ou translaminares no material. A Figura 3.8, ilustra estas duas situações, ao mesmo tempo em que mostra os três modos de fratura para trincas interlaminares e trincas translaminares.

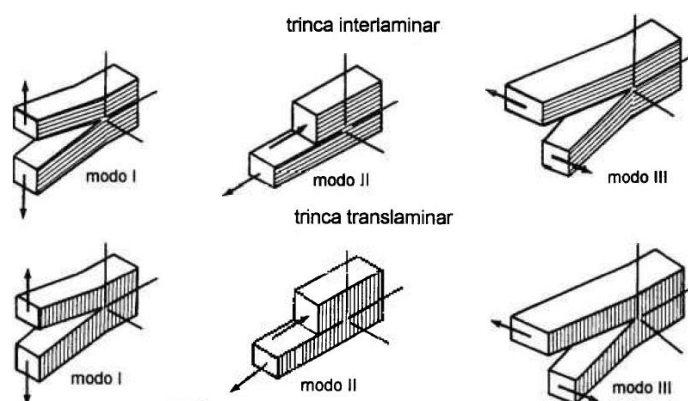


Figura 3. 7 Modos de falha nos compósitos poliméricos (MARINUCCI, 2011).

A classificação do tipo de falha é útil no sentido de conduzir à escolha do melhor método analítico para cada fratura ocorrida, pois falhas interlaminares, que têm como

exemplo mais característico a delaminação, são melhores analisadas por microscopia óptica, tendo como um dos objetivos a observação da direção do crescimento da trinca, enquanto que nas falhas translaminares produzem a ruptura da fibra.

Com a evolução da tecnologia, os compósitos poliméricos têm sido escolhidos para aplicações antes reservadas aos metais. No entanto, vantagens como resistência mecânica, rigidez e baixo peso específico ficarão comprometidas quando se emprega na formação do material fibras e resinas que apresentam pouca ductilidade, levando o mesmo a apresentar baixa tenacidade à fratura, que poderia ser definida simplesmente como a resistência que o material deve exibir à propagação de trincas. Este comportamento torna-o sensível à presença de trincas e entalhes, podendo conduzir à fratura frágil, implicando, deste modo, que durante a utilização do material pouca ou quase nenhuma deformação plástica poderia ocorrer. Portanto, uma combinação de propriedades deve existir para que haja um aumento da tenacidade, quando necessário, garantindo ao mesmo tempo que a resistência seja mantida em níveis exigidos pela aplicação que dará ao compósito.

Também se destaca que as vantagens apresentadas, como elevada relação resistência mecânica-peso específico e módulo de elasticidade-peso específico, além da própria facilidade de o material poder ser desenvolvido de acordo com a aplicação final, resultam em estruturas e propriedades muito dependentes da correta seleção das matérias-primas; da análise estrutural, que deve levar em consideração aspectos tais como carga, condições de uso e exposição às condições do meio ambiente; do processo, especificamente com relação à orientação, sequência de posicionamento das camadas (*stacking sequence*) e polimerização da matriz. Devido ao material compósito apresentar tais particularidades, além da própria anisotropia que o caracteriza, o estudo de falha e fratura torna-se mais complexo comparado aos metais, sendo esta atividade conduzida há pouco mais de duas décadas, tornando esta área de intenso progresso e inovações onde os procedimentos empregados sofrem mudanças à medida que as experiências e o aprendizado aumentam em decorrência da maior utilização do material (MARINUCCI, 2011).

A identificação e análise de partículas requerem certa prática e habilidade por parte do microscopista. A técnica é mais usada para partículas maiores de 1 microm e as análises dependem da combinação entre o desconhecimento dos dados e o que

se sabe sobre as partículas. O microscópio apresenta dois sistemas de lentes convergentes; a objetiva e a ocular. A objetiva é um conjunto de lentes que apresenta pequena distância focal e que fornece uma imagem real e aumentada do objeto que é observado. A ocular, também formada por lentes convergentes, funciona como uma lupa, que nos dá uma imagem virtual e aumentada da imagem real que se formou pela objetiva.

A objetiva e a ocular são dispostas nas extremidades de um cilindro oco, constituindo a coluna do microscópio e que possui a capacidade de se aproximar ou afastar da amostra para que se tenha a focalização perfeita. Isto é realizado por intermédio de uma cremalheira que se acha associado a uma roda dentada. A potência do microscópio é resultado do produto da ampliação linear da objetiva pela potência da ocular; seu valor será elevado quando as distâncias focais da objetiva e da ocular forem pequenas.

O poder separador, ou distância mínima distinguível entre dois pontos é limitado pela difração da luz. Assim, se o feixe de luz incidente teve uma abertura angular grande e utilizarmos lentes de inversão, o poder separador será melhorado, pois se elimina difração das bordas da lente.

Uma das preocupações quanto à preparação de amostras está relacionado com o cuidado para que a preparação não modifique a estrutura original e nem deixe artefatos, marcas da microtomia, lixamento ou mesmo o polimento, que confundirão na observação. A escolha do método a ser empregue está diretamente relacionada a vários fatores, como a forma da amostra (filme, fibra, pó, peça moldada ou extrudada, peça fraturada e etc.), a sua rigidez e o método de observação.

As observações por reflexão de superfícies naturais (por exemplo, filmes ou moldadas) ou fraturadas não necessitam praticamente de preparação, mas são beneficiadas se as superfícies forem revestidas com uma fina camada nanométrica de metal (alumínio ou ouro) para aumentar a refletividade, que é naturalmente baixa nos polímeros. O cuidado no recobrimento deve ser redobrado, de acordo com a intenção da observação, podendo mascarar a imagem. Em muitos casos é melhor tentar observar o material sem nenhum recobrimento, posteriormente se a observação

não alcançou o resultado desejado à técnica do recobrimento poderá ser utilizada (MARINUCCI, 2011).

O equipamento utilizado para polir os polímeros é igual ao utilizado para polir metais, a velocidade de rotação será menor para não aquecer o material e evitar assim seu deterioramento. O polimento é realizado por etapas, com lixas de água ou pasta de polimento, com granulometria decrescente. No caso dos termoplásticos reforçados com fibras, o polimento completo será alcançado com uma sequência de lixas deste tipo 320 (46 μm), 500 (30 μm), 1000 (18 μm), 2400 (10 μm) e 4000 (5 μm). No caso de um acabamento final, utiliza-se pasta de diamante, óxido de cério ou de alumina com granulometria de 3 μm , 2 μm e 0,25 μm .

3.4. FORMULAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Segundo Alves Filho, A. (2000), para a solução analítica de problemas de engenharia, lança-se mão das técnicas clássicas para a resolução de problemas embasadas no estudo das equações diferenciais, que descrevem o equilíbrio da estrutura. Por exemplo, as soluções analíticas para análises de barras e vigas (Teoria de Vigas) podem ser encontradas em livros de Resistência dos Materiais (TIMONSHENKO, 1981) detalhadamente, enquanto que se pode encontrar na Teoria Geral de Placas e Cascas (TIMONSHENKO; KRIEGER, 1970) soluções desenvolvidas para diversas condições de fixação e carregamento em 2D. Da mesma forma tem-se para o estudo dos sólidos deformáveis, de acordo com a Teoria da Elasticidade (TIMONSHENKO; GOODIER, 1951).

A questão central que motiva o estudo sobre o método dos elementos finitos (MEF) está no fato de que os métodos analíticos clássicos permitem o cálculo dos deslocamentos, deformações e tensões em uma estrutura de forma exata em seus infinitos pontos, porém estas soluções são conhecidas apenas para alguns casos, que fogem das aplicações práticas do dia a dia, ou seja, a maioria das estruturas de importância prática é muito complexa para ser analisada pelas técnicas clássicas. Para estruturas de forma arbitrária, a solução analítica frequentemente torna-se impossível e o problema requer grandes e excessivas simplificações, resultando em cálculos pouco acurados (ALVES FILHO, 2000). Com base nisso, o MEF fornece um

caminho alternativo para o cálculo de deslocamentos, deformações e tensões de qualquer estrutura, independentemente de sua forma e condição de contorno, a partir da discretização do domínio da estrutura em elementos de dimensões finitas (elementos finitos). A estrutura, componente mecânico ou, de forma geral, o corpo contínuo é subdividido em um número finito de partes (os elementos) que são conectados entre si por intermédio de pontos discretos, chamados de nós. A configuração deformada da estrutura é determinada pelos deslocamentos dos nós, qualquer que seja a forma da estrutura e o tipo de carregamento. Desta forma, os parâmetros que descrevem o comportamento do sistema são os deslocamentos nodais. A partir desses deslocamentos, é possível determinar os esforços internos, deformações e tensões, avaliando-se a resistência da estrutura objeto de análise.

Para isso, o método se assenta em algumas leis fundamentais que fornecem subsídios para a obtenção das relações matemáticas que representam de forma discreta o conjunto. Um componente estrutural em equilíbrio deve satisfazer três “leis” ou relações fundamentais, a saber:

- a) *Equilíbrio de Forças*: Considerando a condição de equilíbrio da estrutura, pode-se aplicar as equações de equilíbrio a cada um dos elementos finitos isolados e, da mesma forma, se o elemento está em equilíbrio, parte dele também estará.
- b) *Compatibilidade de Deslocamentos*: sejam dois elementos finitos conectados em um mesmo nó na condição indeformada da estrutura. Eles devem se manter conectados no mesmo nó na condição deformada, isso devido à condição de compatibilidade de deslocamentos, caso contrário, a estrutura estaria “abrindo-se” ou “interpenetrando-se” nesse ponto. Dessa forma, impõe-se a condição de compatibilidade de deslocamentos para todos os nós do modelo, incluindo-se os pontos internos de todos os elementos.
- c) *Lei de Comportamento do Material*: Os elementos se deformam ao serem solicitados. Os esforços externos são transmitidos pelos elementos por esforços internos. A lei de comportamento do material rege a relação entre os esforços internos e as deformações. Em grande parte das aplicações

práticas, quando o nível de esforços não é muito elevado, as forças internas crescem proporcionalmente às deformações. Esta relação linear constitui a conhecida Lei de Hooke.

3.4.1. Estudo do MEF Aplicado à Compósitos

As propriedades elásticas dos materiais isotrópicos são definidas a partir de duas constantes independentes e não variam com a direção da solitação mecânica, as quais são E e ν . Entretanto, segundo (JONES, 1994) as propriedades elásticas dos materiais compósitos de lâminas ortotrópicas devem ser determinadas pelas constantes elásticas $E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}$ e ν_{21} , que são válidas apenas no sistema de coordenadas principal do material, ou seja, no plano 1-2, sendo que estas constantes elásticas são normalmente diferentes.

Para os materiais ortotrópicos a relação entre as deformações e tensões no plano 1-2, ou seja, para o sistema (2-D) de coordenadas principais nas direções 1 e 2 é:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [S] \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

A matriz [S] é conhecida como a matriz de flexibilidade, e a relação matricial inversa que fornece as tensões referentes às direções 1 e 2 em função das deformações, é obtida pela equação:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [Q] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

A matriz [Q], conhecida como matriz de rigidez é a matriz inversa da matriz [S] válidas no sistema de coordenadas (1, 2). Onde os componentes Q_{ij} da matriz Q são:

$$Q_{11} = \frac{E_1^2}{E_1 - \nu_{12}^2 E_2}, \quad Q_{12} = \frac{E_1^2 \nu_{21}}{E_1 - \nu_{12}^2 E_2}, \quad Q_{22} = \frac{E_2^2}{E_1 - \nu_{12}^2 E_2}, \quad \text{e} \quad Q_{66} = G_{12} \quad (3.6)$$

Sendo E_1 e E_2 os módulos de elasticidade nas direções principais, ou seja, direção do urdume e direção da trama, respectivamente, ν_{12} e ν_{21} os coeficientes de Poisson quando o esforço normal ocorre na direção das fibras e perpendicular às fibras, respectivamente e G_{12} o módulo de cisalhamento no plano 1-2. Esses valores podem ser determinados experimentalmente (JONES, 1994).

Em geral a maneira de se saber se o material é ortotrópico, isotrópico ou anisotrópico é pela realização de ensaios, aplicando-se cargas e medindo-a em várias direções. Em algumas situações um simples exame visual é suficiente para caracterizar uma lâmina ortotrópica.

Em um material ortotrópico, sob a ação de tensões normais só apresentam deformações normais, pois à disposição das fibras estão direcionadas paralelamente aos esforços tensores, sendo que as mesmas não apresentam a distorção angular como as lâminas anisotrópicas. As lâminas ortotrópicas apresentam em relação aos esforços de cisalhamento no plano (x, y) uma distorção angular, entretanto esta distorção não altera as dimensões iniciais da lâmina como num material anisotrópico.

Segundo (MADENCI, GUVEN, 2006), o método mais direto para a formulação em elementos finitos no estado elástico se aplica o princípio da mínima energia potencial e se iguala ao princípio dos trabalhos virtuais que pode ser utilizado para qualquer comportamento material. Para o cálculo estático linear, ignorando as parcelas dinâmicas e de flambagem, a expressão toma a forma:

$$\int_{\Omega} \begin{Bmatrix} \varepsilon^o \\ \hat{k} \end{Bmatrix}^t \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^o \\ k \end{Bmatrix} d\Omega + \int_{\Omega} \begin{Bmatrix} \widehat{\gamma}_{yz} \\ \widehat{\gamma}_{xz} \end{Bmatrix}^t \begin{bmatrix} E_{44} & E_{45} \\ E_{45} & E_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} d\Omega - \int_{\Omega} \widehat{w} q d\Omega = 0 \quad (3.7)$$

O princípio dos trabalhos virtuais busca a solução dos termos $\varepsilon U(\Omega)$ em qualquer ponto $(x, y) \in \Omega$ de forma que a equação (3.7) seja satisfeita para qualquer conjunto de peso $\varepsilon V(\Omega)$. Onde Ω é o domínio da placa, $q(x, y)$ é a carga transversal distribuída por unidade de área, e $U(\Omega)$ e $V(\Omega)$ são espaços vetoriais lineares usados para as funções teste de peso.

O MEF pode ser aplicado em diversas áreas, sendo que as análises realizadas por meio dele podem ser executadas por aplicativos computacionais de elementos finitos, como o FEMAP NX Nastran que é utilizado neste trabalho, considerando que

este aplicativo computacional é uma importante ferramenta de trabalho para resolução de problemas envolvendo as mais diversas áreas da engenharia, inclusive na questão estrutural propicia a análise de falhas de compósitos pelo método dos elementos finitos.

3.5. CRITÉRIOS DE FALHA

A falha de um componente ou sistema está relacionada com a perda da funcionalidade, podendo ser interlaminar, intralaminar e translaminar, e é observada na microestrutura do compósito. Para cada modo de falha é necessário definir maneiras de quantificar a ocorrência desta falha, definindo-se assim os critérios de falha. Através da avaliação desses critérios conclui-se sobre a ocorrência ou não da falha em análise. Podem existir mais de um critério de falha para cada modo de falha, pois há diversas formas para se avaliar um modo de falha.

No caso da análise da resistência mecânica, os critérios de falha são definidos em função de variáveis que quantificam a resistência dos materiais empregados e as solicitações aplicadas sobre o componente. A avaliação ocorre frequentemente pela comparação de algumas dessas variáveis. Por exemplo, numa falha por colapso plástico pode-se definir como critério de falha a comparação entre a tensão gerada pelo carregamento numa peça e a tensão admitida pelo material utilizado para fabricação da peça.

Os critérios de falha mais aplicados em matérias compostos laminados para resistência mecânica são: Teoria de Hill, Teoria de Hoffman e Teoria de Tsai-Wu. Essas teorias consideram interação longitudinais/transversais e tensão/deformação para prever o envelope de falha. Embora as teorias de falha podem ser úteis para verificar os índices de falha e decidir se a falha ocorre no laminado, é importante compreender a distribuição de tensão no modelo, tensões interlaminar e seus efeitos sobre a delaminação (TITA et al, 2002).

3.5.1 Critério de Falha de Hill

Hill (1948), considerou que o critério de Von Mises, proposto para o início de escoamento em metais isotrópicos, poderia ser modificado e propôs o seguinte critério:

$$(G + H)\sigma_1^2 + (F + H)\sigma_2^2 + (F + G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 - 2H\sigma_1\sigma_3 - 2H\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (3.8)$$

A igualdade a 1 indica o limiar de falha, enquanto valores menores que 1 indicam que o material está em segurança sob aquele estado de tensões, nas direções principais do material. As seis constantes, F, G, H, L, M e N, são propriedades do material relacionadas à sua resistência e devem ser obtidas experimentalmente.

Para o estado plano de tensões (EPT), podemos considerar $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{13} = 0$, sendo que a equação (3.8) assume a forma:

$$(G + H)\sigma_1^2 + (F + H)\sigma_2^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (3.9)$$

Deve-se lembrar que as equações (3.8) ou (3.9) aplicam-se no âmbito do comportamento elástico-linear. Sabendo-se que os parâmetros F, G, H, e N são propriedades do material, busca-se um relacionamento com o conjunto padrão de propriedades diretamente obtidas dos experimentos, isto é, com os valores de resistência coplanar da lâmina, X_t ; X_c ; Y_t ; Y_c e S, esse correlacionamento é feito da seguinte maneira: Primeiro aplica-se sobre um corpo-de-prova um estado de tensões onde apenas τ_{12} não é nulo. A equação (3.9) reduz-se a:

$$2N = \frac{1}{S^2} \quad (3.10)$$

De forma análoga, se apenas σ_1 agir sobre o corpo:

$$G + H = \frac{1}{X^2} \quad (3.11)$$

Se apenas σ_2 agir sobre o corpo:

$$F + H = \frac{1}{Y^2} \quad (3.12)$$

Os valores para F, G e H são obtidos resolvendo as equações (3.11) e (3.12), a qual resulta:

$$2H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} \quad (3.13)$$

Portanto o critério de Hill pode ser escrito como:

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{Y^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (3.14)$$

Uma limitação desse critério aparece por não acusar falha em um estado hidrostático de tensões (Gosse, 2001).

3.5.2 Critério de Falha de Hoffman

Em relação ao critério de Hill, é feita a inclusão de termos lineares de diferenças entre resistências de tração e compressão. Assim, o critério de Hoffman tem sido bastante utilizado tanto em problemas de plasticidade de metais quanto em falha frágil de compósitos fibrosos, e sua expressão é colocada da seguinte forma:

$$(G + H)\sigma_1^2 + (F + H)\sigma_2^2 + (F + G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 - 2H\sigma_1\sigma_3 - 2H\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{12}^2 + c_1\sigma_1 + c_2\sigma_2 + c_3\sigma_3 = 1 \quad (3.15)$$

A relação entre as constantes das equações acima e os valores obtidos em ensaios se faz utilizando os mesmos procedimentos descritos no critério de Hill, isto é, aplica-se na equação (3.15) um estado de tensões onde apenas uma componente de tensão é não nula e determina-se uma equação. Repetindo o processo para cada componente de tensão, em tração e compressão, obtendo nove equações conforme as representações a seguir:

$$\begin{aligned} 2H &= \frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} + \frac{1}{Z_t Z_c} & N &= \frac{1}{2S^2} & c_1 &= \frac{X_c - X_t}{X_c X_t} \\ 2F &= \frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} + \frac{1}{Z_t Z_c} & L &= \frac{1}{2S_2^2} & c_2 &= \frac{Y_c - Y_t}{Y_c Y_t} \\ 2G &= \frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} + \frac{1}{Z_t Z_c} & M &= \frac{1}{2S_1^2} & c_3 &= \frac{Z_c - Z_t}{Z_c Z_t} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Onde S, S₁ e S₂ são as resistências ao cisalhamento nos planos 1-2, 1-3 e 2-3 respectivamente. Para o caso de uma lâmina ortotrópica sob EPT ($\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{13} = 0$), a expressão do critério toma a forma (Hart-Smith, 2001):

$$\left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}\right)\sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}\right)\sigma_2 + \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X_t X_c} = 1 \quad (3.17)$$

3.5.3 Critério de Falha de Tsai-Wu

Um procedimento simples proposto por Tsai e Wu (1971), foi o de aumentar o número de termos na equação do critério de falha de Hill com vista de melhorar a aproximação aos dados experimentais obtidos para os vários materiais. De forma geral, a teoria pode ser apresentada da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^6 F_i \sigma_i + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 F_{ij} \sigma_i \sigma_j + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 F_{ijk} \sigma_i \sigma_j \sigma_k + \dots = 1 \quad (3.18)$$

Onde $\sigma_4 = \tau_{23}$, $\sigma_5 = \tau_{13}$, $\sigma_6 = \tau_{12}$. Os coeficientes F_i , F_{ij} e F_{ijk} são estruturas rearranjadas de tensores de 2ª, 4ª e 9ª ordem, respectivamente, isto é, F_i forma um vetor de 6 componentes, F_{ij} uma matriz de ordem 6x6, etc. Uma vantagem deste critério é que existe liberdade para a utilização de tantos termos quanto 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 a sua determinação, comumente a equação (3.18) restringe-se apenas aos termos de 2º grau. Caso isto não seja feito, a quantidade e a complexidade dos ensaios necessários para a determinação das constantes tornariam inviável o método. Assim a equação (3.18) reduz-se a:

$$\sum_{i=1}^6 F_i \sigma_i + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (3.19)$$

O arranjo F_{ij} deve ser simétrico, uma vez que a contribuição das solicitações $\sigma_i \sigma_j$ deve ser idêntica à contribuição de $\sigma_j \sigma_i$ no dado material. Isto resulta em $F_{ij} = F_{ji}$, e o arranjo possui apenas 21 termos independentes. Então, a equação (3.19) compreende 27 constantes de material a serem experimentalmente determinadas. Restringindo-se ao EPT, $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{13} = 0$ tem-se:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \tau_{12} + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \tau_{12}^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + F_{16} \sigma_1 \tau_{12} + F_{26} \sigma_2 \tau_{12} = 1$$

(3.20)

Os termos envolvendo F_{12} , F_{16} e F_{26} surgem nessa formulação representando as interações entre componentes de tensões normais distintas e também as interações entre componentes de tensões normais e cisalhantes.

Considere o fato de que a resistência ao cisalhamento independe do sinal da tensão cisalhante quando aplicada no sistema principal de coordenadas. Aplique então dois estados de tensão, que consistem em todas as componentes nulas exceto $\tau_{12} = +S$ e $\tau_{12} = -S$. A equação (3.20) então produz duas equações sendo $F_6 S + F_{66} S^2 = 1$ e $-F_6 S + F_{66} S^2 = 1$.

Somando e subtraindo estas equações obtém-se que $F_{66} = \frac{1}{S^2}$ e $F_6 = 0$. O procedimento pode ser repetido; agora, aplicando $\tau_{12} = \pm S$ e $\sigma_1 = \sigma$ e demais tensões nulas, que resulta em $F_{16} = 0$. Da mesma forma, aplicando $\tau_{12} = \pm S$ e $\sigma_2 = \sigma$ obtém-se $F_{26} = 0$. Em resumo:

$$F_{16} = F_{26} = F_6 = 0 \quad (3.21)$$

O processo continua aplicando a lâmina um estado de tensões em que a única componente não nula de tensão é $\sigma_1 = X_t$, o que resulta em:

$$F_1 X_t + F_{11} X_t^2 = 1 \quad (3.22)$$

E se a única componente não nula for $\sigma_2 = -X_c$, tem-se:

$$-F_1 X_c + F_{11} X_c^2 = 1 \quad (3.23)$$

Resolvendo o sistema algébrico formado pelas equações (3.22) e (3.23), tem-se mais duas constantes:

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \quad \text{e} \quad F_{11} = \frac{1}{X_t X_c} \quad (3.24)$$

Analogamente, aplicando isoladamente $\sigma_2 = Y_t$ e $\sigma_2 = -Y_t$, obtém-se as constantes:

$$F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \quad \text{e} \quad F_{22} = \frac{1}{Y_t Y_c} \quad (3.25)$$

Em vista da dificuldade de obtenção experimental de F_{12} e da relativa indiferença do critério quanto ao valor exato deste fator, Tsai, S. W., Hahn, H. T. (1980), utilizam os dados experimentais já existentes e propuseram uma forma direta e aproximada para esse valor, dada por:

$$F_{12} \cong -\frac{1}{2} \sqrt{F_{11} F_{22}} \quad \text{ou} \quad F_{12} \cong -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_t X_c Y_t Y_c}} \quad (3.26)$$

A forma final para o critério para EPT é obtida substituindo (3.21) em (3.20), resultando:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + F_{66} \tau_{12}^2 = 1 \quad (3.27)$$

Onde:

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}, \quad F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}, \quad F_{11} = +\frac{1}{X_t X_c}, \quad F_{22} = +\frac{1}{Y_t Y_c}, \quad F_{66} = +\frac{1}{S^2}$$

Esta expressão indica que o estado de tensões se encontra num ponto crítico, no limiar da falha da lâmina. Entretanto, se o estado de tensões é tal que o resultado do lado direito é menor que 1, tem-se a situação de segurança.

Uma observação importante que vale lembrar é que a teoria de Hofman e Tsai-Wu são equivalentes, exceto ao coeficiente F_{12} que é substituído por $-1/2 \times F_{11}$. E para camadas unidirecionais com grandes diferenças de resistência nas direções principais pode-se considerar o coeficiente $F_{12} = 0$ o que deixa ambos critérios com resultados muito próximos (MCNAUGHT, 2009).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATERIAIS UTILIZADOS

4.1.1. Matriz Polimérica

Para compor a matriz, utilizou-se uma resina do grupo Bisfenol A denominada SQ 2004, fornecida pela empresa REDELEASE. A proporção de mistura de resina com agente de polimerização é de 100:50 em peso. A temperatura de cura esteve em torno de 60°C por 8 horas ininterruptas. Confeccionou-se corpos de provas para caracterização por análise térmica de termogravimetria (TG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC), onde através da TG, pode-se observar a perda de massa em relação à variação de temperatura e no caso da técnica de calorimetria exploratória diferencial (DSC), tendo como característica a transferência de calor para amostra e como resultado a demonstração de pontos de inflexão tanto para eventos endotérmicos, quanto exotérmicos.

As análises foram realizadas no laboratório multiusuários da Faculdade de Ciências da Unesp de Bauru. O equipamento utilizado é o modelo STA 409 marca NETZSCH. A massa inicial para todas as amostras foi de 8,90 mg, o cadinho utilizado para as três amostras foi de platina. O gás de purga aplicado na caracterização, utilizou-se de N₂ com uma vazão de 40 ml por minuto e uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto. O setup foi determinado para 800°C. A figura 4.1 mostra o equipamento utilizado.



Figura 4. 1 Equipamento de análises térmica modelo STA 409 marca NETZSCH.

4.1.2. Tecido de Fibra de Carbono do Tipo Diagonal – Twill Weave

O tecido utilizado foi o de fibra de carbono diagonal 2 x 2 (twill weave 2x2), de 200 g/m². O tecido possuía a dimensão de 1,30 m x 10,0 m, totalizando 13,0 m². O tecido foi dividido em áreas menores com dimensões de 360 mm x 360 mm para facilitar o corte do tecido. Seguido de colocação de fita adesiva crepada, que foi utilizada para facilitar o corte e evitar o desarrumar da trama, mantendo as fibras íntegras em suas posições. A figura 4.2 mostra uma foto do tecido de fibra de carbono após o processo.



Figura 4. 2 Tecido de fibra de carbono contado.

4.2. LAMINAÇÃO

O processo de laminação manual (hand lay-up) seguiu determinados métodos para buscar uma padronização dos laminados, pois caso contrário, seria inviável realizar comparações. No primeiro momento, confeccionou-se 4 camadas de tecido de fibra de carbono, como uma de dimensão 360 mm x 360 mm x 1,0 mm e um peso de 50 g de resina por camada. Para as extrações dos corpos de prova de compressão, confeccionou-se 11 camadas de tecido de fibra de carbono, como uma de dimensão 130 mm x 160 mm x 1,0 mm e um peso de 8 g de resina por camada. Feito a confecção das camadas de tecido de fibra de carbono, preparou-se duas placas de alumínio com papel alumínio para cada laminado, que mantém a sua integridade até a temperatura de 250°C, junto com tecido feltro e tecido de cetin, em ambas as placas.

Ao término desta fase de preparação, a ação se voltou para as resinas, onde a correta ordem de combinação entre resina e catalisador são necessários. Foi utilizado a proporção de 100:50, ou seja, 200 g de resina e 100 g de catalisador de acordo com

especificações indicativas do produto, totalizando uma mistura de 300 g, onde com uma seringa de injeção de 20 ml, aplicou-se as 50 ml por camada em um dos laminados e 8 ml por camada no outro, alcançando assim 200 ml e 88 ml, respectivamente, no total de cada laminado. A Figura 4.3, apresenta o tecido embebido de resina para o processo de laminação manual (hand lay up).

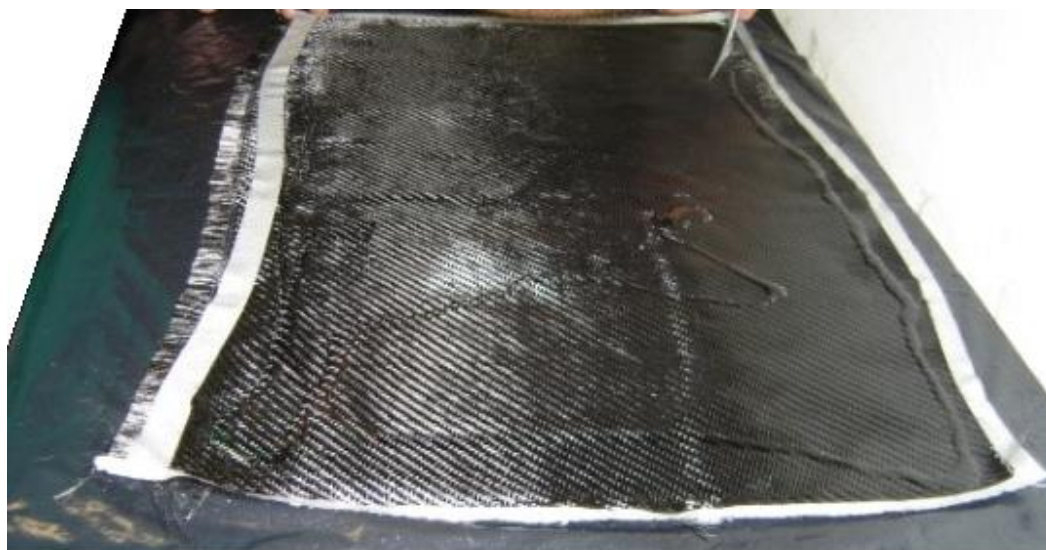


Figura 4. 3 Laminação utilizando-se espátula de silicone para espalhar a resina sobre o tecido.

Posterior a laminação, as placas foram colocadas em uma prensa hidráulica onde buscou-se manter uma temperatura de 100°C constante e uma pressão de 30 bar durante 6 horas. Esta temperatura ajuda a “desarmar” o inibidor de cura, facilitando assim o processo e diminuindo o tempo final de cura. A Figura 4.4, mostra o laminado dentro da prensa.



A



B

Figura 4. 4 Processo de prensagem. (A) Início da prensagem, (B) Pressão e temperatura ajustada para o processo.

Após o tempo de 6 horas de prensagem o material teve cura total, seguiu-se então para o processo de extração dos corpos de prova por jato d'água.

4.3. CORTE POR JATO D'ÁGUA

O processo de extração por jato água CNC seguiu os parâmetros para a confecção dos corpos de provas dados pelas normas ASTM D3039 e ASTM D7264. A máquina que foi utilizada é da marca FLOW, modelo mach 2 utilizou-se bico com tubo de mistura STANDART para PASER ECL 04/04 (TMS – 40-40-C) com 0,15 mm de diâmetro. A velocidade de corte na fibra de carbono foi de 2723 mm/mim. A altura do jato acima da placa foi dimensionada em 9 mm e a pressão do jato condicionou-se em 40 Ksi (276 MPa), a Figura 4.5 mostra o equipamento e o processo de corte dos laminados. Nesta placa o equipamento chegou a utilizar 50% de sua capacidade com relação à pressão de corte.



A



B

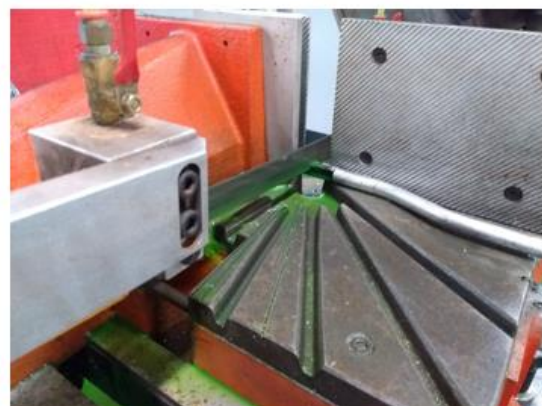
Figura 4. 5 (A) Máquina de corte por jato d'água (B) Processo de corte dos laminados.

4.4. CORTE POR SERRA FITA

O processo de extração por serra fita seguiu os parâmetros para a confecção dos corpos de provas para a norma ASTM D695. A máquina que foi utilizada é da marca AMBOSS, modelo AMB-350. Utilizou-se uma lamina com dimensões de 27 mmx 0,9 mm x 2925 mm com lubrificação constante para o corte. A velocidade de corte na fibra de carbono foi de 32 m/mim, a Figura 4.6 mostra o equipamento e o processo de corte dos laminados.



A



B

Figura 4. 6 (A) Máquina de corte por serra fita (B) Processo de corte dos laminados.

4.5. ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios de tração, flexão e compressão foram realizados no Laboratório de ensaios mecânicos da Faculdade de Engenharia de Bauru - Unesp. O equipamento utilizado foi uma máquina de ensaios universais da marca EMIC. Para ensaios de tração a célula de carga aplicada foi a de 20 toneladas, com velocidade de avanço de 1 mm/min, segundo a norma ASTM D3039. Para o ensaio de compressão a célula de carga aplicada foi a de 20 toneladas, com velocidade de avanço de 1,27 mm/min, segundo a norma ASTM D695. Para os ensaios de flexão a célula de carga aplicada foi a de 20 toneladas, com velocidade de avanço de 0,1 mm/min, segundo a norma ASTM 7264.

4.6. MICROSCOPIA

A caracterização por microscopia foi realizada através de microscopia óptica, com o intuito de caracterizar o grau de impregnação da matriz no reforço. O microscópio utilizado é da marca Carl Zeiss, modelo Axio Vert.A1 MAT, de platina invertida e equipamento de aquisição de imagens. A Figura 4.7 mostra o microscópio.



Figura 4. 7 Microscópio óptico de platina invertida Carl Zeiss.

A preparação da amostra, foi com o corte de um microtom e lixamentos, com lixas de gramatura 320, 420, 600 e 1200. Posteriormente polimento com alumina em suspensão de 0,3 μm . Limpeza com água corrente e secagem com ar seco.

4.7. ANÁLISE VIRTUAL

Para a realização da análise virtual utilizou-se o software FEMAP NX Nastran versão 11.1.2. Como base de entrada, para as propriedades do material, utilizou-se os resultados obtidos dos ensaios mecânicos. O procedimento para validação da análise de falhas do material sob carregamento de tração longitudinal e de compressão foi realizado inicialmente por ensaios experimentais, onde se obteve dados relativos às constantes de engenharia e às tensões de resistência do material no estado plano, sendo que com base nestes dados foram obtidas as simulações numéricas com o objetivo de validar o processo e a utilização do software para a elaboração de projetos otimizados com laminados. Como critério de falha, utilizou-se três das opções fornecidas pelo software, a teoria de Hill, a teoria de Hoffman e teoria de Tsai-Wu.

Inicialmente para se realizar uma análise utilizando o método dos elementos finitos deve-se através de um pré-processador, criar as dimensões geométricas do corpo em análise. Para isso, foram preparadas as geometrias idênticas às utilizadas nos ensaios de tração e compressão e aplicadas as cargas que deram origem a falha. A Figura 4.8 mostra o dimensionamento das geometrias utilizadas.

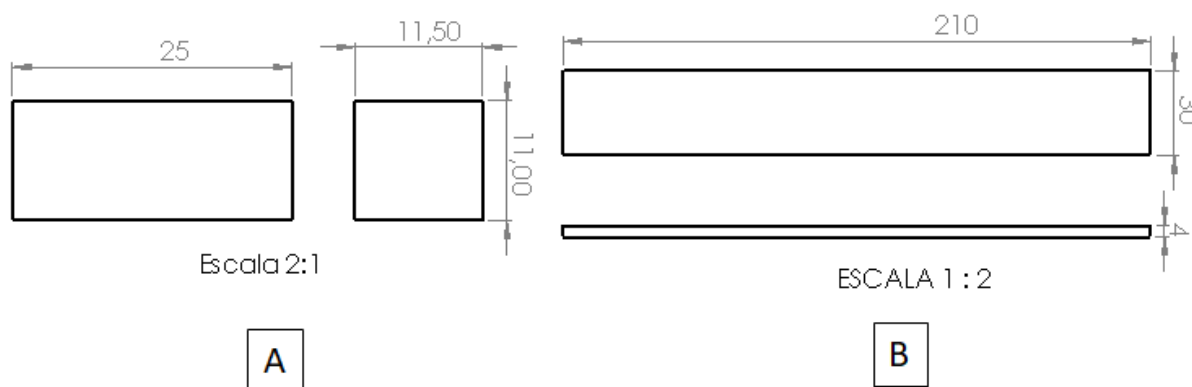


Figura 4. 8 Desenho dos corpos de prova a) Tração; b) Compressão.

Logo após a construção geométrica do corpo, é feita ainda no pré-processador, a escolha do tipo de elemento finito em conformidade com o material em análise, sendo que para este trabalho define-se o elemento linear ortotrópico.

Para identificar o material utilizado, implementa-se as constantes de engenharia fornecidas pelos ensaios experimentais. Define-se a seguir que o objeto a

ser estudado é composto de 11 lâminas para o corpo de prova de compressão e 4 laminas para o corpo de prova de tração, sendo 1 mm de espessura cada, totalizando, respectivamente, 11 mm e 4 mm de espessura do laminado, bem como se define também as direções das fibras de carbono em cada lâmina, conforme a disposição [0°], sendo que a representação geométrica das lâminas dispostas pelo laminado em estudo é demonstrada nas Figuras 4.9 e 4.10.

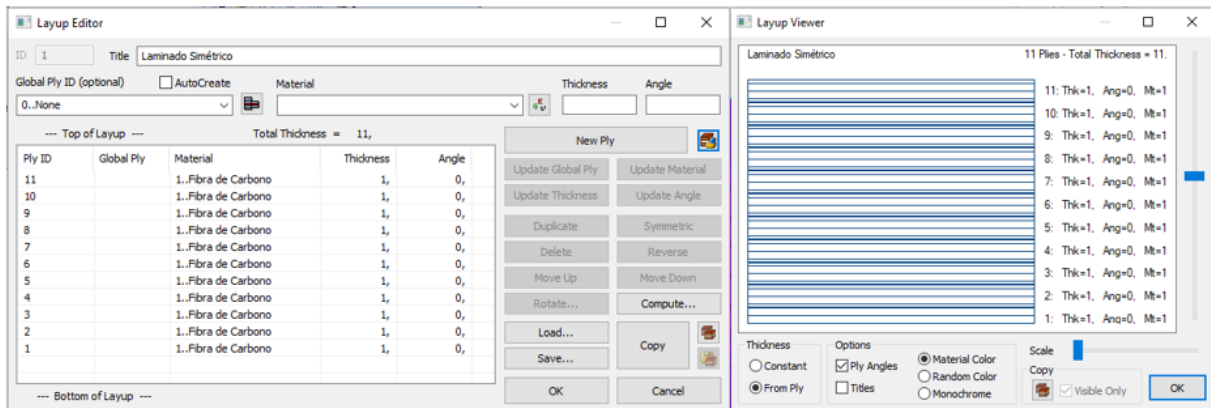


Figura 4. 9 Definição da composição do número de lâminas e disposição das fibras no laminado com 11 camadas a 0°.

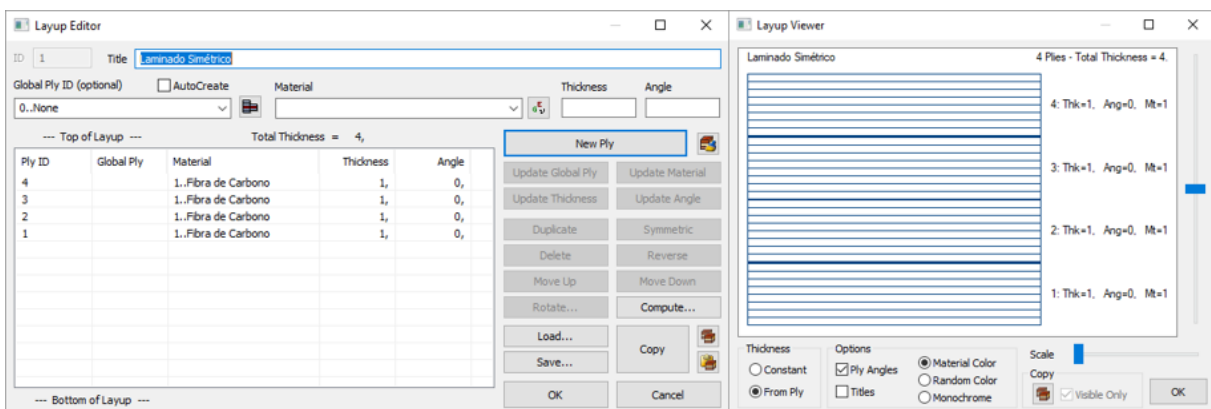


Figura 4. 10 Definição da composição do número de lâminas e disposição das fibras no laminado com 4 camadas 0°.

Na análise bidimensional, ou seja, análise do estado plano de tensões - EPT, afim de que o programa obtenha a matriz de rigidez do laminado mais próxima da realidade, pelo emprego do método dos elementos finitos, faz-se necessário discretizar a área do material em estudo, sendo que neste caso foi elaborada uma

malha quadrada com 1 mm de lado para o corpo de prova de compressão e com 6 mm de lado para o corpo de prova de tração conforme mostrado na Figura 4.11.

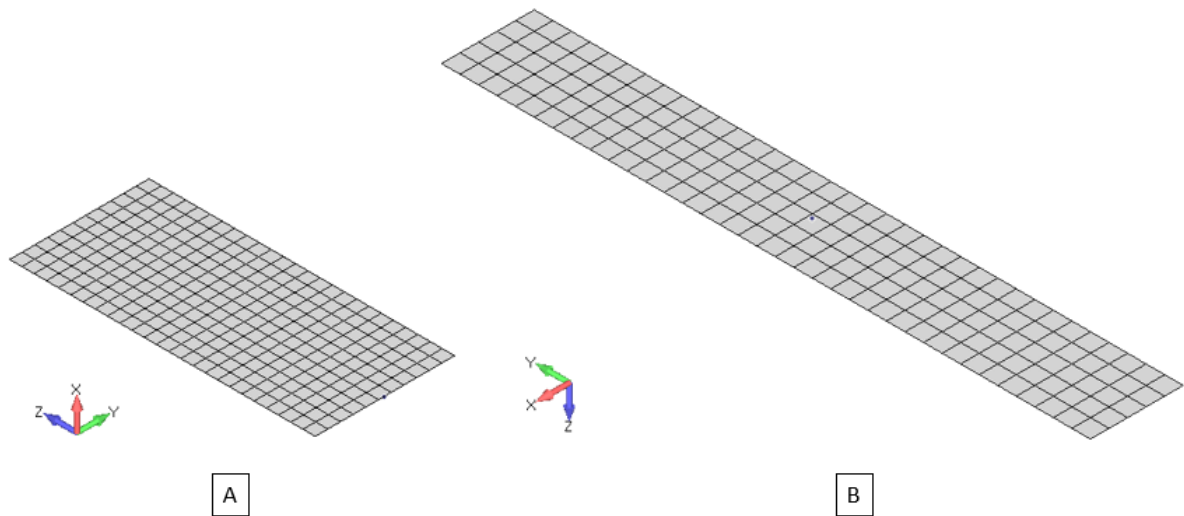


Figura 4. 11 Elaborando a malha do corpo para análise pelo MEF a) Cp de compressão com 1 mm de lado; b) Cp de tração com 6 mm de lado.

Ainda no pré-processador implementa-se no programa as tensões de resistência do material, obtidas experimentalmente, para posterior análise do critério de falha pelos métodos propostos. Define-se ainda as restrições de movimento do corpo, que corresponde às bases para o ensaio de compressão e às garras para o ensaio de tração, bem como, aplica-se a carga longitudinal representando o carregamento ocorrido no corpo para cada caso, conforme demonstrado na Figura 4.12, afim de que se possa obter a solução e os resultados da simulação.

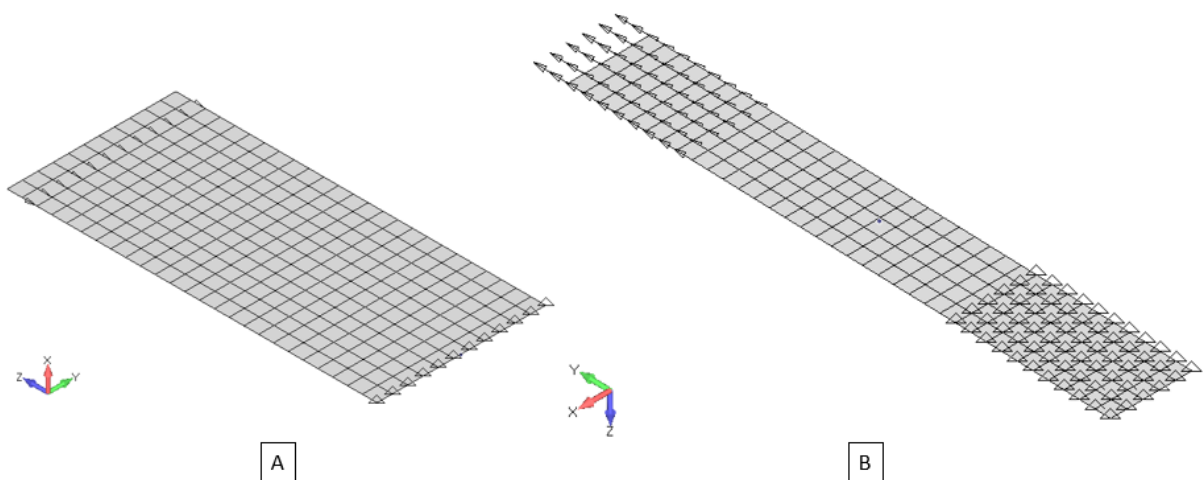


Figura 4. 12 Carregamento longitudinal do laminado no sentido do eixo principal a) Compressão; b) Tração.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como mostrado nas seções anteriores, materiais compósitos possuem flexibilidade para atender das mais simples às mais sofisticadas aplicações por poder se adequar aos requisitos necessários de solicitações do projeto. No entanto, por possuírem essa qualidade, torna-se imprescindível a necessidade do conhecimento do material a ser utilizado, pois ele deve atender aos requisitos do projeto em execução. Para isso a determinação das propriedades mecânicas é um fator determinante para o cálculo estrutural. Portanto, antes de qualquer aplicação estrutural deve-se conhecer as características mecânicas do compósito a ser utilizado.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ

A matriz SQ 2004, é do grupo Bisfenol A, apresenta o início de perda de massa em torno do 85°C. A transição vítrea (T_g) acontece aproximadamente a 55°C, dentro da fase cristalina do material, o ponto de recristalização (T_c) está próximo dos 274°C e o ponto de fusão cristalina (T_m) em aproximados 275°C. Essa matriz polimérica, possui seu primeiro ponto exotérmico acima dos 50°C e seu primeiro ponto endotérmico inferior a 100°C, próximo a 95°C. A Figura 4.1 mostra a posição de T_g e o T_m da matriz.

A resina SQ 2004, é uma matriz polimérica disponível no mercado e com custo acessível. Porém, deve ser aplicada em materiais que não necessitem de um gradiente térmico acima de 100°C. Com relação a viscosidade, essa matriz por ter boa diluição possui uma melhor impregnação tanto por infusão quanto pelo método Hand lay up.

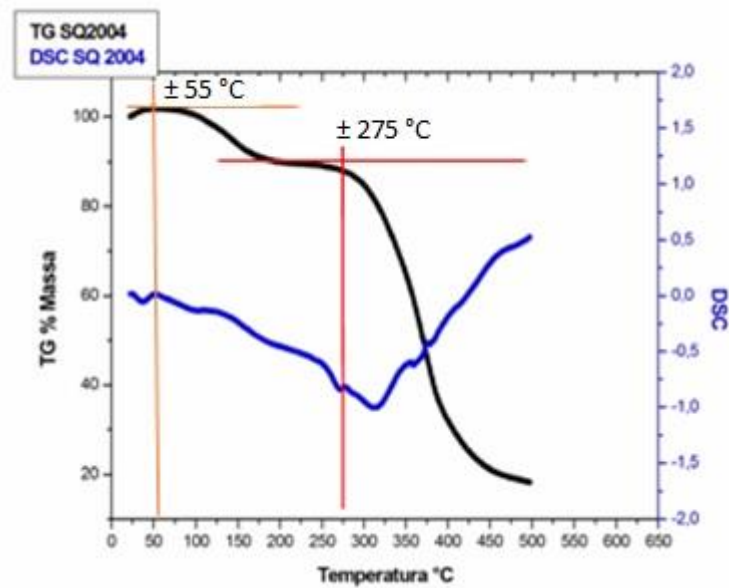


Figura 5. 1 Análise térmica da matriz SQ 2004.

5.2. ENSAIOS MECÂNICOS

5.2.1. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados respeitando a norma ASTM D3039. A Figura 5.2 mostra um corpo de prova do compósito sendo ensaiado.



Figura 5. 2 Ensaio de tração do compósito.

A tabela 5.1 mostra os resultados obtidos nos ensaios de tração para o laminado estudado.

Tabela 5. 1 Valores obtidos nos ensaios de tração, no sentido do urdume e da trama.

Nº do corpo de prova	σ_t - Urdume [MPa] - (X_t)	σ_t - Trama [MPa] - (Y_t)
Cp1	398,712	340,072
Cp2	356,546	349,878
Cp3	339,778	341,739
Cp4	399,693	338,993
Cp5	417,736	340,072
Média	382,493	342,151
Desvio Padrão	32,783	4,430

Como esperado, os valores de tensão na direção do urdume são maiores do que na direção da trama.

A densidade do laminado, que foram extraídos os corpos de prova de tração, obtiveram o valor de $\rho = 1,30 \text{ g/cm}^3$.

A Figura 5.2 e 5.3 apresenta o diagrama médio de tensão x deformação do ensaio de tração obtido na máquina universal, nos corpos de prova retirados no sentido do urdume e da trama, respectivamente.

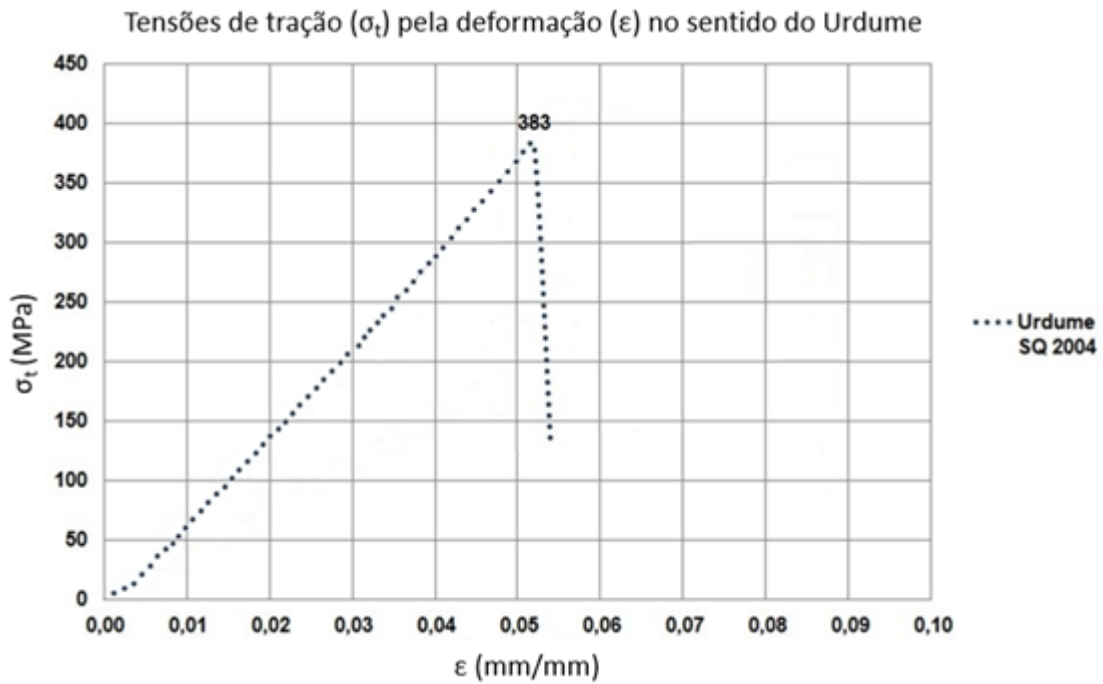


Figura 5. 3 Curva média do ensaio de tração no sentido do urdume.

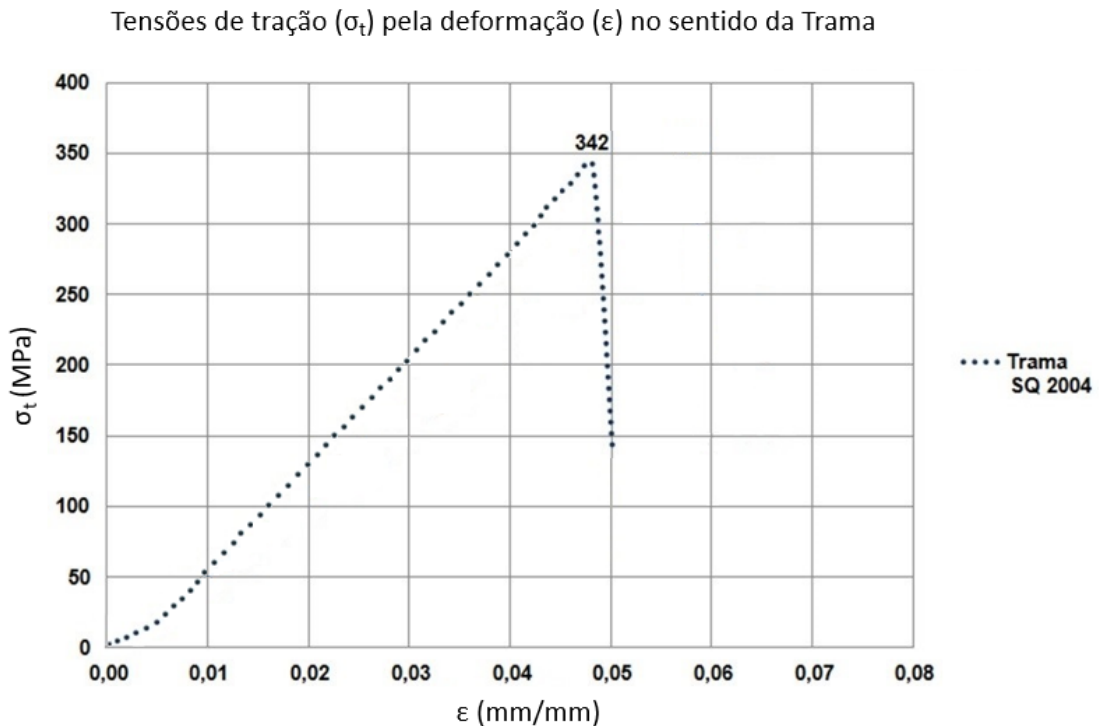


Figura 5. 4 Curva média do ensaio de tração no sentido da trama.

Com os diagramas médios das Figuras 5.3 e 5.4 foi calculado o módulo de elasticidade, pela lei de Hooke, dos compósitos nos dois sentidos, sendo $E_1 = 750,00 \text{ kgf/mm}^2$ (direção do urdume) e $E_2 = 726,87 \text{ kgf/mm}^2$ (direção da trama).

Também foi definido pelo ensaio de tração a tensão exercida pela cola, no caso da resina SQ2004, quando laminada uma placa na outra após a cura total dos laminados. O valor encontrado foi de 0,5 kgf/mm².

5.2.2. Ensaio de Flexão

Os ensaios de flexão foram realizados respeitando a norma ASTM 7264 para ensaios de flexão em materiais compósitos poliméricos. A Figura 5.5 mostra um corpo de prova do compósito sendo ensaiado.



Figura 5. 5 Ensaio de flexão do compósito.

A tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de flexão.

Tabela 5. 2 Valores obtidos nos ensaios de flexão, no sentido do urdume e da trama.

Nº do corpo de prova	σ_f - Urdume [MPa] - (X_f)	σ_f - Trama [MPa] - (Y_f)
Cp1	592,700	457,200
Cp2	555,450	457,200
Cp3	616,400	504,650
Cp4	616,400	511,400
Cp5	616,400	524,950
Média	599,470	491,080
Desvio Padrão	26,662	31,780

A densidade do laminado, que foram extraídos os corpos de prova de flexão, obtiveram o valor de $\rho = 1,30 \text{ g/cm}^3$. Como esperado por terem sido utilizadas as mesmas condições de fabricação.

5.2.3. Ensaio de Compressão

Os ensaios de compressão foram realizados respeitando a norma ASTM D695. A Figura 5.6 mostra um corpo de prova do compósito sendo ensaiado.

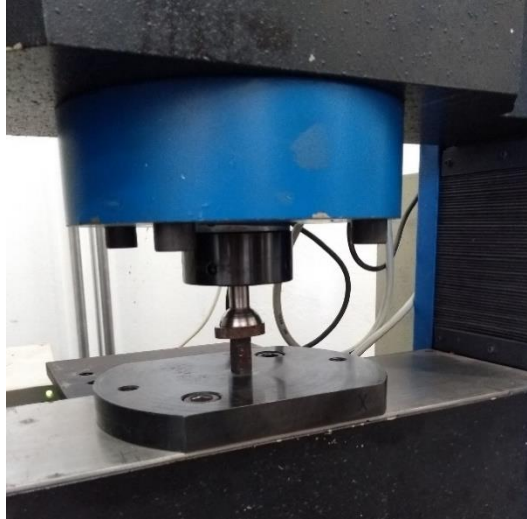


Figura 5. 6 Ensaio de compressão do compósito.

A tabela 5.3 mostra os resultados obtidos nos ensaios de compressão para o laminado estudado.

Tabela 5. 3 Valores obtidos nos ensaios de compressão, no sentido do urdume e da trama.

Nº do corpo de prova	σ_c - Urdume [MPa] - (X_c)	σ_c - Trama [MPa] - (Y_c)
Cp1	299,887	249,520
Cp2	319,206	253,200
Cp3	300,770	250,360
Cp4	245,850	238,140
Cp5	245,360	238,045
Média	282,215	245,853
Desvio Padrão	34,300	7,214

Como esperado, os valores de tensão na direção do urdume são maiores do que na direção da trama. A densidade do laminado, que foram extraídos os corpos de prova de compressão, obtiveram o valor de $\rho = 1,30 \text{ g/cm}^3$.

5.3. MICROSCOPIA

Foi realizada a caracterização por microscopia óptica para detectar a existências de vazios, que surgem na execução da laminação. Em seguida, foi realizada a contagem de vazios através da densidade composta pela regra das misturas e também pelo método de contagem por microscopia óptica desenvolvido para esse trabalho com o objetivo de aplica-lo às indústrias pela sua facilidade na execução.

A tabela 5.3 mostra os resultados, em porcentagem, da quantidade de reforço, matriz e vazios presentes nos laminados pela regra da mistura.

Tabela 5. 4 Cálculo da porcentagem de vazios pela Regra da Mistura.

Placas de Compósitos	Reforço (%)	Matriz (%)	Vazios (%)
Para ensaio de Tração	60,66	38,20	1,14
Para ensaio de Flexão	60,68	36,90	2,22

O método da contabilização de vazios pela microscopia óptica desenvolvido para este trabalho se compreende na retirada de uma amostra do compósito a ser utilizado e através de alguns pontos observado por microscopia óptica, se determina de modo visual, a quantidade, pela área, de vazios presentes na amostra ao longo da lateral e da largura da amostra no plano da espessura, ou seja, no plano de empilhamento do laminado. Estatisticamente se determina o valor aproximado do volume de vazios observados, esse procedimento pode ser realizado pelo software de visualização do microscópio óptico, no qual a cada foto ele identifica a porcentagem da área da foto que contém vazios. Para esse procedimento atingir valores próximo da realidade é necessário utilizar pelo menos 20 fotos ao longo da altura e 20 fotos ao longo da largura sempre no plano da espessura. A Figura 5.7 apresenta exemplos de fotos obtidas pela microscopia óptica.

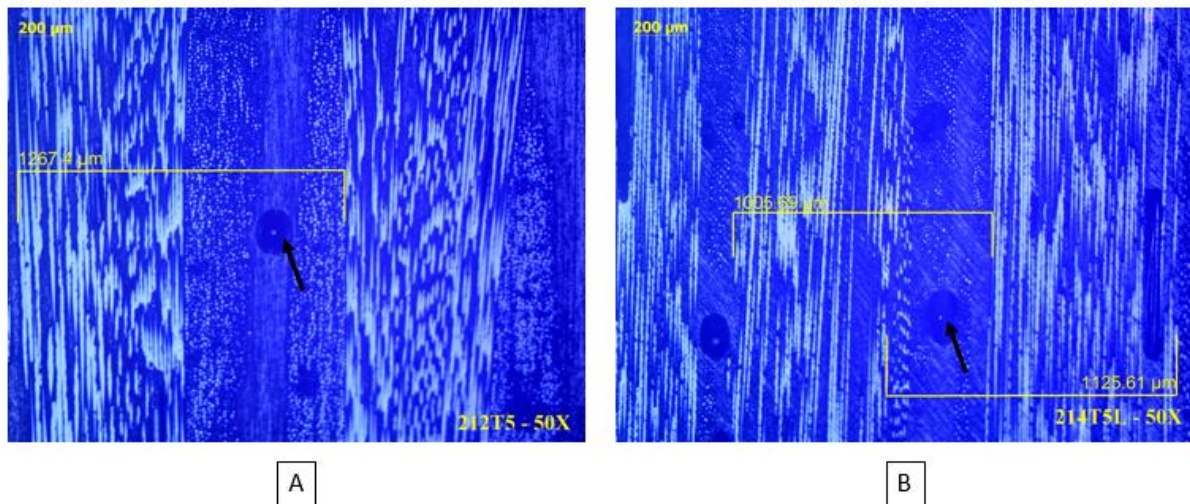


Figura 5. 7 Microscopia óptica, com aumento de 50x. (A) Amostra da placa para ensaio de tração, (B) Amostra da placa para ensaio de flexão.

Na figura 5.7 mostra o tamanho de cada lamina presente no laminado como resultado médio o valor utilizado para cada lamina é de 1,0mm. As setas indicam os vazios presentes nas amostras.

A tabela 5.5 mostra os resultados de vazios obtido pela contagem por microscopia óptica.

Tabela 5. 5 Cálculo da porcentagem de vazios pelo método da microscopia óptica.

Placas de Compósitos	Reforço (%)	Matriz (%)	Vazios (%)
Para ensaio de Tração	60,60	37,87	1,53
Para ensaio de Flexão	60,83	36,58	2,59

Comparando ambos resultados se observa que o método da microscopia óptica é satisfatório, pois vemos que a diferença dos resultados obtidos é extremamente baixa, o que permite que o método seja utilizado já que o procedimento de microscopia óptica, normalmente, é aplicado nas indústrias para validação da qualidade do material.

5.4. ANÁLISE VIRTUAL

Com o conhecimento das características mecânicas do material a ser utilizado pode-se calcular as dimensões do projeto de forma otimizada. Para a análise virtual

ser validada foram comparados os resultados experimentais obtidos no ensaio de tração e compressão com os obtidos virtualmente.

Para criar o material no software é necessário entrar com os dados de suas propriedades, neste caso os dados obtidos experimentalmente. A tabela 5.6 apresenta os dados de entrada utilizados para o material compósito que, como citado anteriormente, é um material ortotrópico.

Tabela 5. 6 Dados de entrada do material.

Propriedade	Unidade	Resultados
E_1	Kgf/mm ²	750,00
$E_2 = E_3$	Kgf/mm ²	726,87
$G_{12} = G_{13}$	Kgf/mm ²	258
G_{23}	Kgf/mm ²	200
$\nu_{12} = \nu_{13}$	-	0,27
X_t	Kgf/mm ²	39,00
X_c	Kgf/mm ²	28,78
Y_t	Kgf/mm ²	34,89
Y_c	Kgf/mm ²	25,07
S	Kgf/mm ²	6,2
Densidade	Kgf.s ² /mm ⁴	1,3E-10

Considerando as informações fornecidas pelo aplicativo computacional acoplado ao equipamento EMIC, obteve-se os valores das cargas para a ruptura em ambos ensaios e extraídos o carregamento médio de 3609 kgf para o ensaio de compressão e o carregamento médio de 4680 kgf para o ensaio de tração os quais foram utilizados para alimentar a simulação.

5.4.1 Simulação em Compressão

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, para o ensaio de compressão no sentido do urdume constatou-se que a falha ocorreu a partir de uma carga de 3490 kgf, sendo que de acordo com os ensaios experimentais o valor médio obtido foi de 3609 kgf.

Para compressão constata-se que os critérios de falha apresentaram diferentes resultados, porém para esta simulação, o critério de Hill e Tsai-Wu apresentam-se com índices de falha bem próximos sendo 1,002 e 1,004, respectivamente, indicando a validade da análise em relação aos mesmos, já o critério de Hoffman apresentou valor de falha de 1,012, o que impossibilita o seu uso para otimização, já que com uma carga menor ele já indica a falha. As Figuras de 5.8 a 5.10 mostram os resultados das análises.

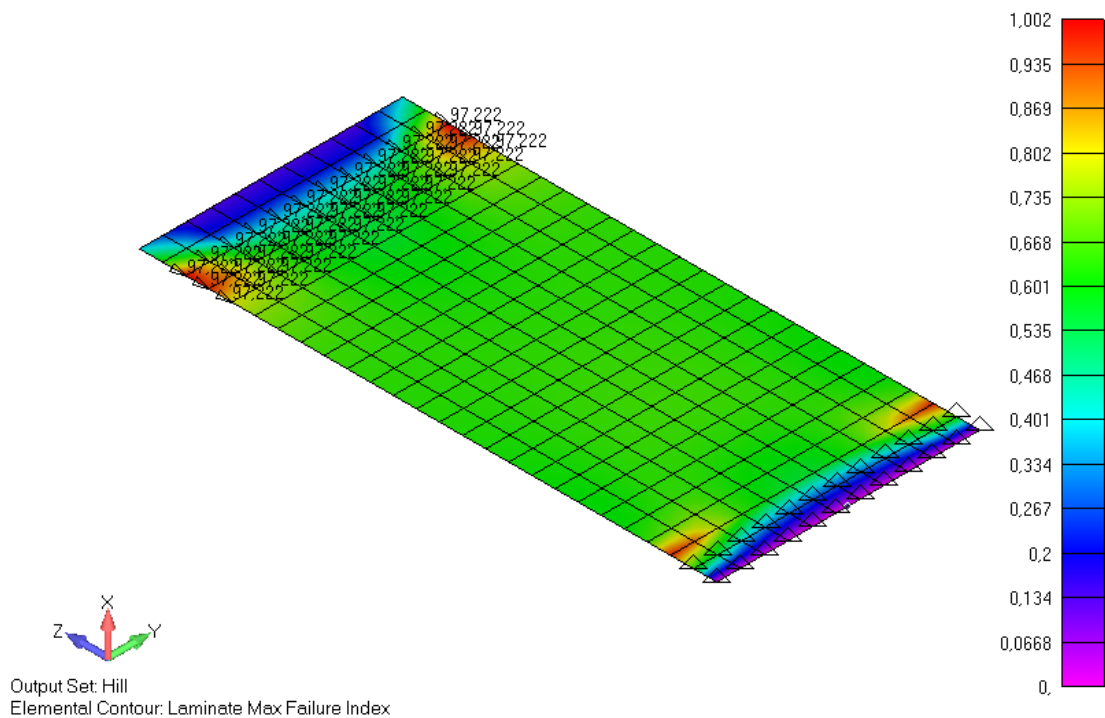


Figura 5. 8 Resultado critério de falha de Hill.

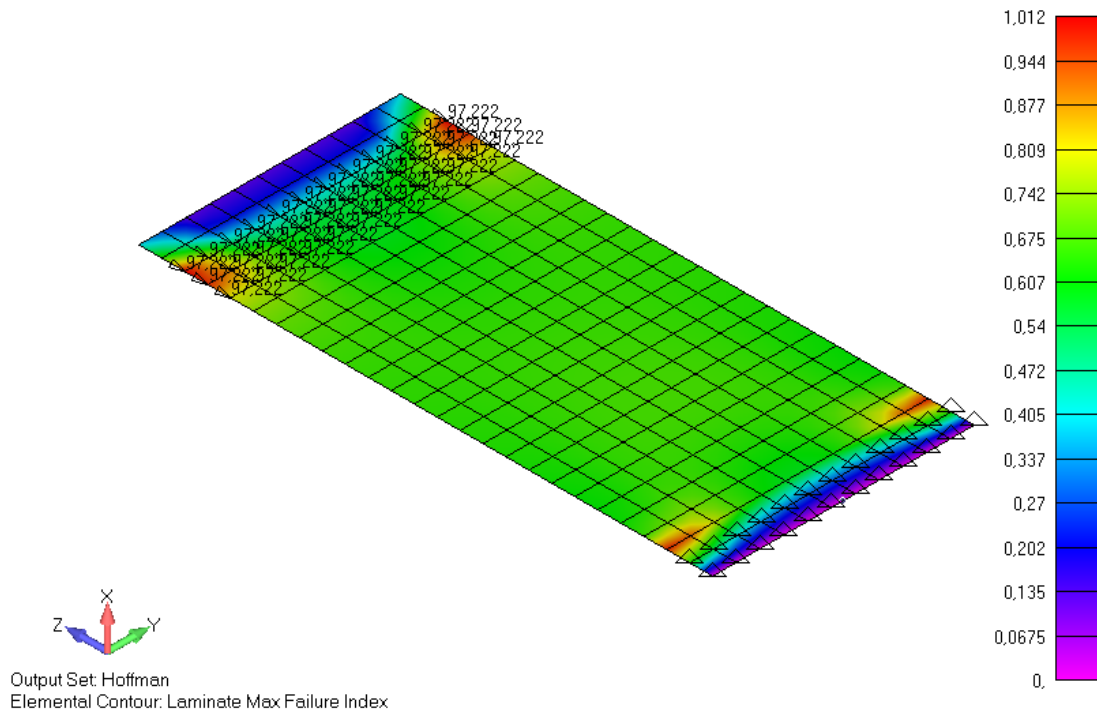


Figura 5. 9 Resultado critério de falha de Hoffman.

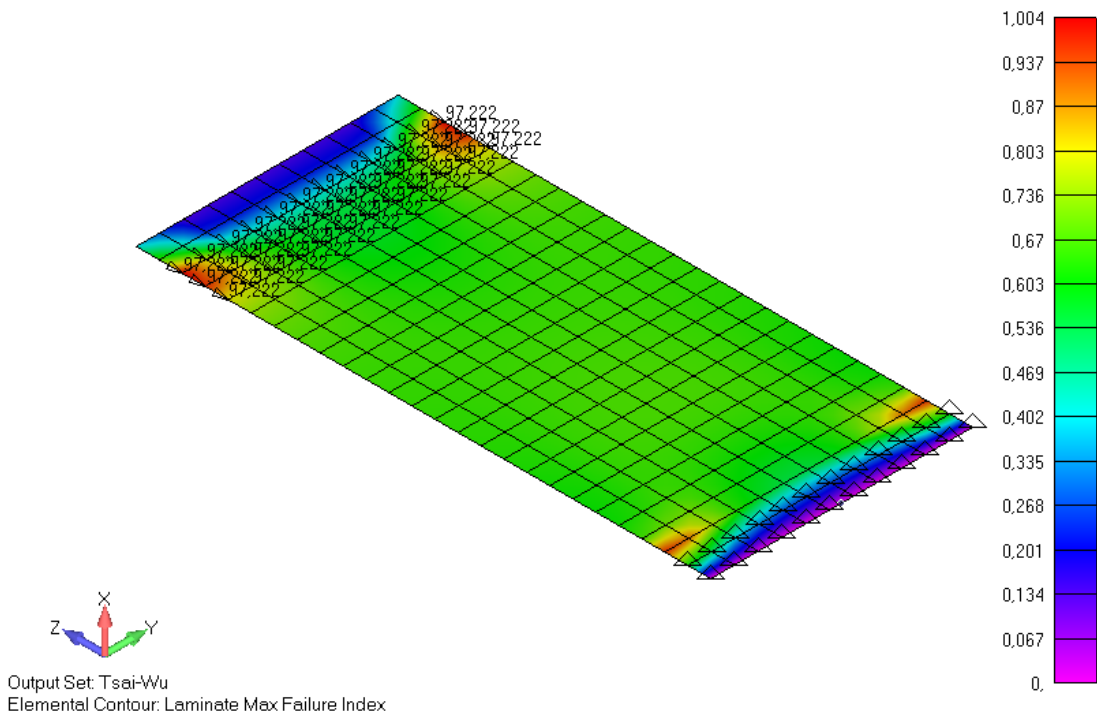


Figura 5. 10 Resultado critério de falha de Tsai-Wu.

Considerando o deslocamento do laminado, submetido à simulação em compressão, no sentido principal, ou seja, eixo z longitudinal do laminado, verifica-se

que o mesmo apresenta um deslocamento máximo de 0,898 mm negativo por ser compressão, o valor experimental médio foi de 1,02 mm. A Figura 5.11 apresenta o resultado do deslocamento apresentado pelo software.

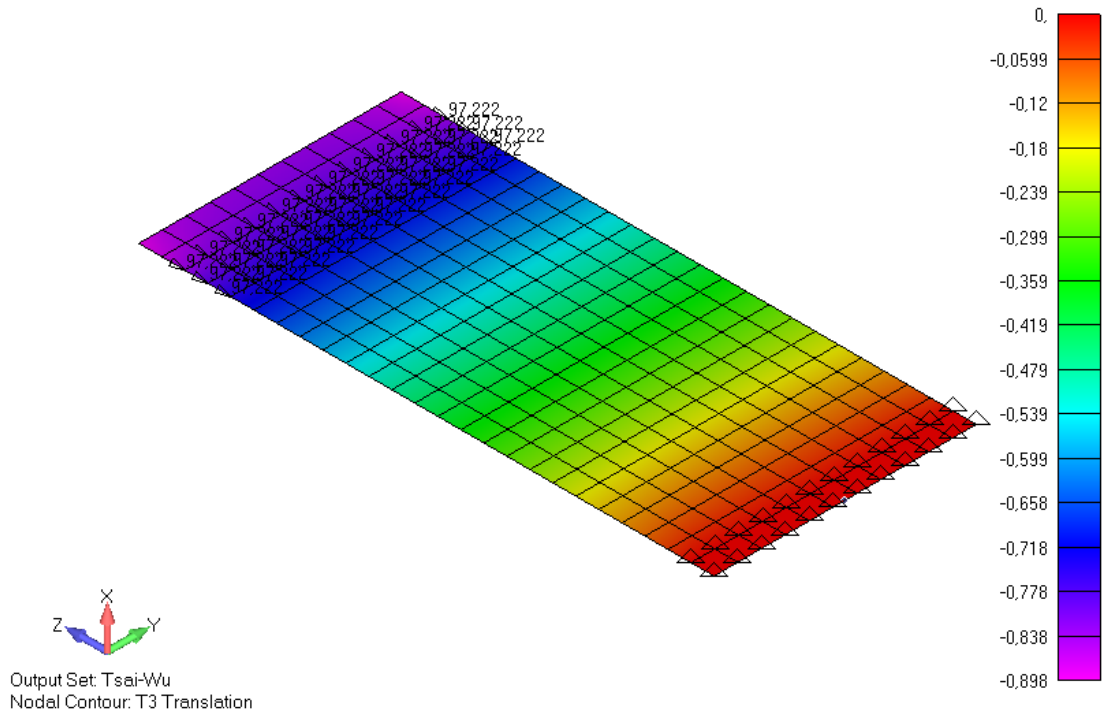


Figura 5. 11 Deslocamento do laminado em simulação da compressão.

5.4.2 Simulação em Tração

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, para o ensaio de tração no sentido do urdume constatou-se que a falha ocorreu a partir de uma carga de 4450 kgf, sendo que de acordo com os ensaios experimentais o valor médio obtido foi de 4680 kgf. Para tração o critério de falha de Tsai-Wu é o mais próximo da realidade, seguido do critério de falha de Hoffman e posteriormente o critério de falha de Hill, entretanto os três critérios de previsão inicial de falha se apresentam de forma adequada à análise, porém, como apontado anteriormente, o critério de Tsai-Wu é o mais adequado para análises de otimização. As Figuras de 5.12 a 5.14 mostram os resultados das análises.

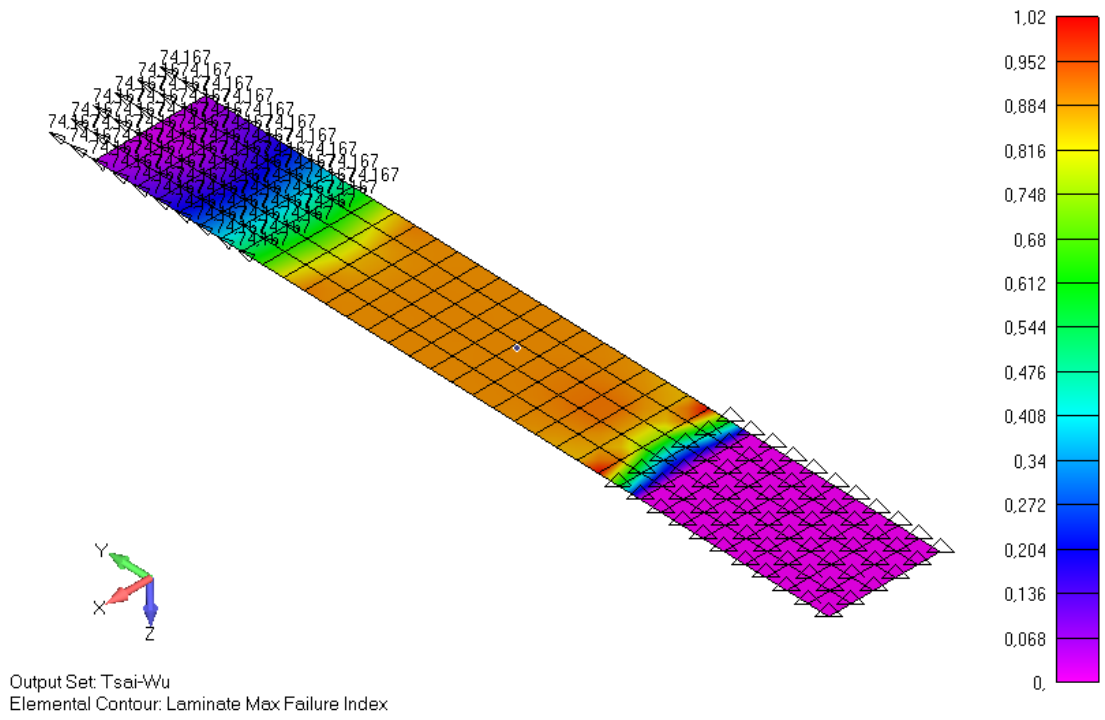


Figura 5. 12 Resultado critério de falha de Tsai-Wu.

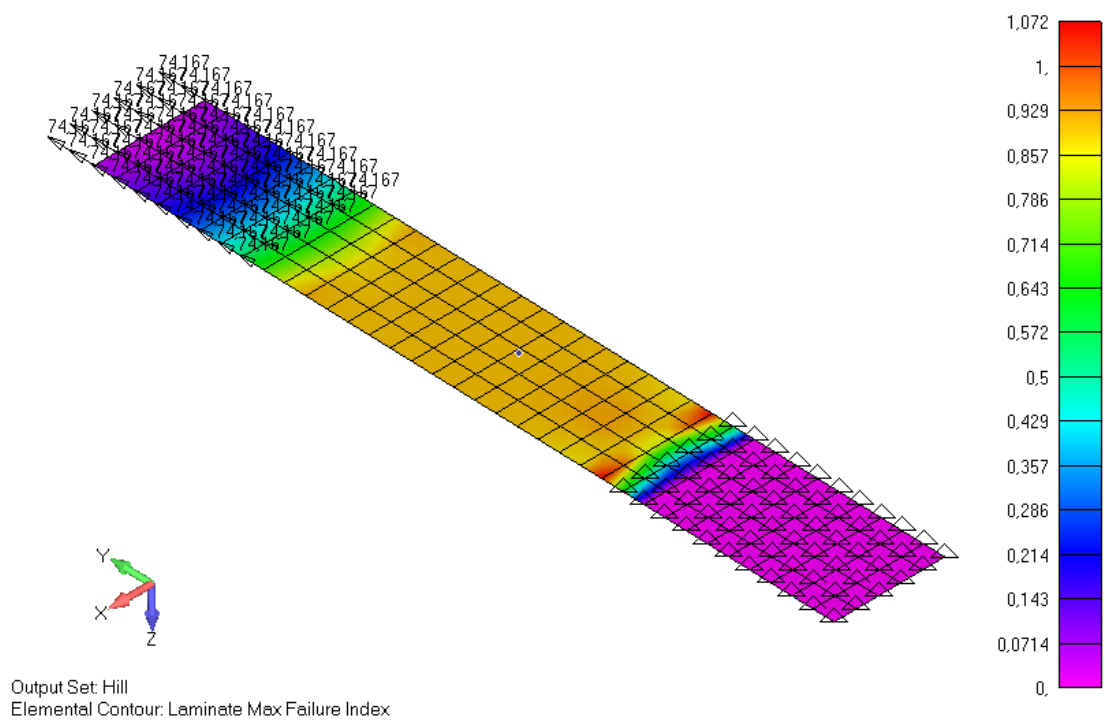
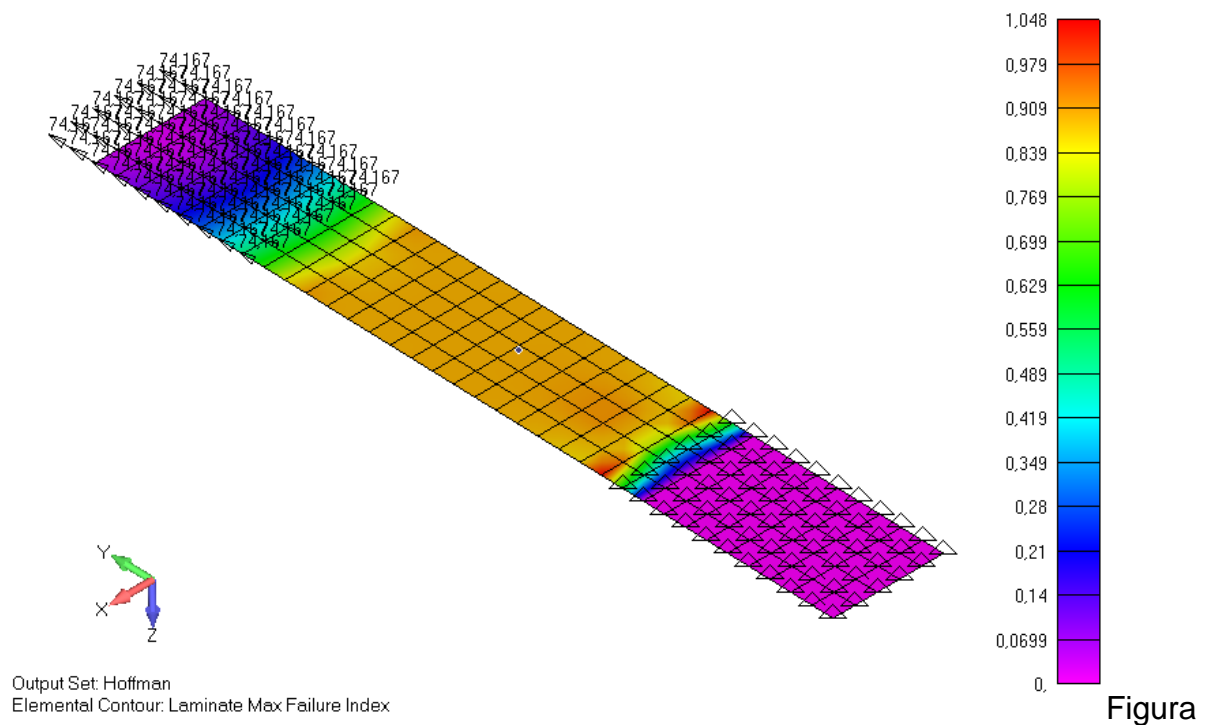


Figura 5. 13 Resultado critério de falha de Hill.



5. 14 Resultado critério de falha de Hoffman.

Considerando o deslocamento do laminado, submetido à simulação em tração, no sentido principal, ou seja, eixo y longitudinal do laminado, verifica-se que o mesmo apresenta um deslocamento máximo de 6,123 mm, como demonstrado na Figura 5.15.

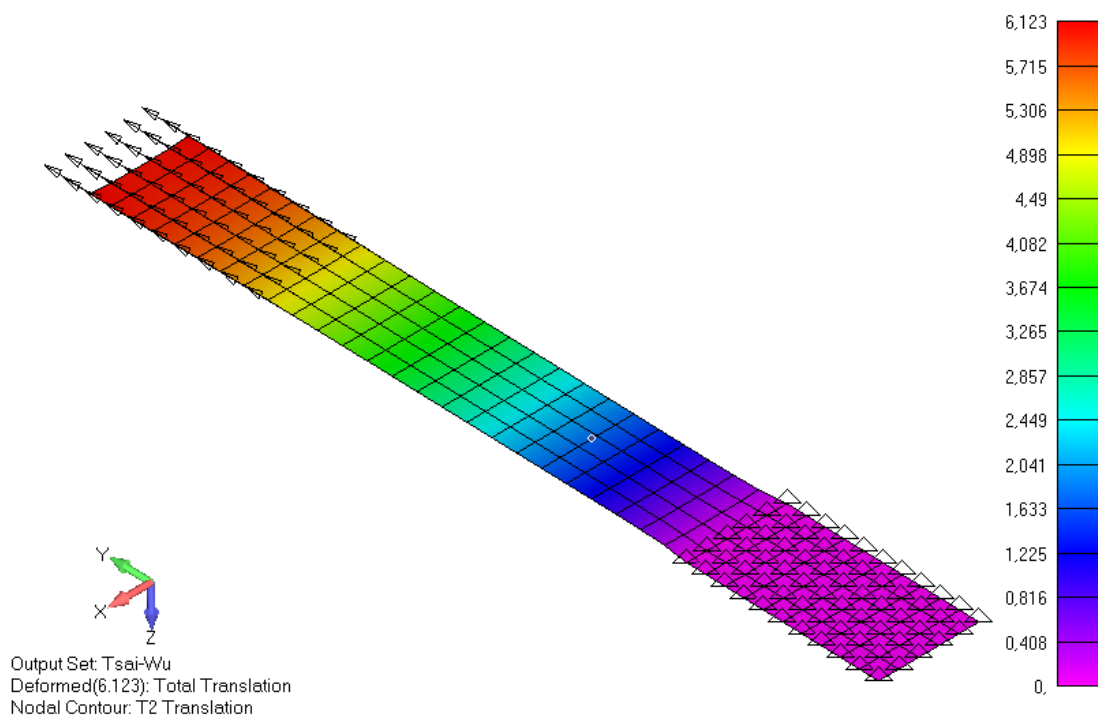


Figura 5. 15 Deslocamento do laminado em simulação da tração.

Com a alteração testada, a teoria de Tsai-Wu apresenta resultados mais conservadores, porém muito próximo da teoria de Hoffman, diferença de 2%, o que mostra que ambas teorias se aproximam quando as tensões de tração e compressão do material se igualam.

No entanto, quando se trabalha com materiais compósitos a necessidade de se conhecer as propriedades do material é extremamente necessária para o dimensionamento da estrutura. Para a utilização de elementos finitos, o uso do critério de Tsai-Wu é o mais indicado, pois com ele é possível determinar de forma otimizada o dimensionamento da estrutura sem que haja necessidade do uso de grandes fatores de segurança, uma vez que se conheça as propriedades do compósito a ser utilizado.

5.5. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Com relação ao critério de previsão inicial de falhas de Hill que é base do critério polinomial de Tsai-Wu e de Hoffman, observa-se que, para a simulação em compressão, obteve resultados bem próximos aos reais, igualando-se dimensionalmente ao critério de falha de Tsai-Wu, como esperado, pois, sua teoria se adequa melhor à essa análise. No entanto, para a simulação em tração, esse critério é o pior quando comparado com os outros, o que desfavorece seu uso para análises de otimização.

Já o critério de falha de Hoffman, indica que para ambos os casos analisados o material falha, entretanto os índices de falha estão acima dos índices apresentados pelos critérios de Tsai-Wu, em ambos os casos e acima do critério de Hill na análise em compressão. Como o critério de Hill, o critério de Hoffman não é indicado para análises de otimizações.

Com isso, conclui-se que o critério de falha de Tsai-Wu, como já apresentado em algumas literaturas devido ao seu termo de interação, é o mais indicado para prever a falha inicial de um compósito de fibra de carbono com resina epóxi, tornando esse critério o mais adequado quando se deseja alcançar o cálculo otimizado de uma estrutura.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho traz algumas contribuições significativas, sendo elas:

- A metodologia para obtenção das propriedades mecânicas do material compósito estrutural que será utilizado, considerando sua microestrutura;
- A metodologia de aplicação para alimentação das propriedades mecânicas do material ao software de elementos finitos;
- E por fim, a indicação do melhor critério de falha para se obter a otimização de uma estrutura que utiliza o material compósito de fibra de carbono com resina epóxi.

Da microscopia chegou-se nas seguintes conclusões:

- O laminado apresentou baixos níveis de vazios, o que possibilitou em propriedades mecânicas satisfatórias, ou seja, valores entre 2,22% e 1,14%, o que estão muito próximos de 1% que é o ideal para compósitos estruturais.
- O processo de contabilização de vazios desenvolvido para esse trabalho teve sucesso apresentando erro de cerca de 6%.

Das comparações dos critérios de falha:

- Todas as teorias apresentaram mesmos valores de deformação;
- O critério de falha de Hoffman apresentou valores mais conservadores em ambas análises. Dessa forma, embora o critério seja considerado válido, dificulta a possibilidade de otimização da estrutura;
- O critério de falha de Hill apresentou valores iguais ao critério de falha de Tsai-Wu na análise em compressão, ambos mais próximos aos valores reais, no entanto para análise em tração obteve o pior resultado, o que não invalida seu uso, no entanto, desfavorece na utilização de otimização;
- O critério de falha de Tsai-Wu é o que apresentou melhores resultados em ambas análises, pois foi o que mais se aproximou dos resultados

obtidos experimentalmente, tornando assim o mais adequado para análise de otimização utilizando compósitos de fibra de carbono com resina epóxi;

- Por fim, conclui-se que emprego da simulação numérica no FEMAP NX Nastran é válido, pois apresenta resultados numéricos aproximados aos obtidos a partir dos resultados experimentais. Desta forma, o projetista pode avaliar as respostas dos compósitos estruturais com garantia e segurança no que diz respeito à previsão inicial de falha.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS DE PROJETOS EM FIBRA DE VIDRO COM VALORES DE PROPRIEDADES OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE;
- ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS DE PROJETOS EM FIBRA DE CARBONO COM MATERIAL DE NÚCLEO COM VALORES DE PROPRIEDADES OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE;
- ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MATERIAIS COMPÓSITOS QUANDO SUBMETIDOS A ENSAIOS DE IMPACTO;
- COMPARAÇÃO DE PROCESSOS DE CORTE PARA MATERIAIS COMPÓSITOS.

8. REFERÊNCIAS

ALBERS, A. *On weaving*. Middletown, CT: Wesleyan University Pres. 1965.

ALVES FILHO, A. - *Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE*. São Paulo: Érica, 2000.

BANNISTER, M. *Challenges for composites into the next millenium – A reinforcement perspective*, Composites, Part A, v. 32, p. 901-910. 2001.

BAUER, R.S.; CORLEY, S. Epoxy resins. In: LEE, S. M (Ed.) *Reference Book for Composites Technology*. Lancaster: Technomic, 1989.v. 1, p.17-48.

BELINGARDI, G.; PAOLINO, D. S. *Repeated impact response of hand lay-up and vacuum infusion thick glass reinforced laminates*. Intenational Journal of Impact Engineering 25 (2008) 609-619.

BUHLER, K. Basic textile technique. *CTBA Review*. n. 63, p. 2297 – Jan, 1948.

CALLISTER JR. W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*, 5ª ed., Rio de Janeiro, RJ, LTC, 590pg, 2002;

CAMPOS, M.C. *Influência da Matriz Polimérica e dos Métodos de Extração de Corpos de Prova em Compósitos de Fibra de Carbono*. Bauru-SP. Dissertação. Universidade Estadual Paulista – UNESP. 2013.

CHAWLA, K. K. *Composite materials: Science and engeneering*, Springer-Verlag. London, UK. 292p. 1987.

CHEONG Ng, Y. *Deriving Lamina Properties from Laminate Properties using Classical Lamination Theory and Failure Criteria*. Journal of Composite Materials Vol. 39 no. 1295, 2005.

DANIEL, I. M.; LUO, J. J.; SCHUBEL, P. M. Three-Dimensional Characterization of Textile Composites. Elsevier ScienceDirect Composites: Part B vol. 39 p. 13-19, 2008.

ELLIS, B. Introduction to the chemistry, synthesis, manufacture and characterization of epoxy resins. In: ELLIS, B. (Ed.) *Chemistry and technology of epoxy resins*. Blackie Academic, 1993. p 1-35.

GIBSON, R. F. *Principles of composite materials mechanics*. McGraw Hill, New York. 425p. 1994.

GOSSE, J.; CHRISTENSEN, S. "Strain Invariant Failure Criteria for Polymers in Composite Materials," 42nd AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, Seattle, WA, pp. 1-11, 2001.

HART-SMITH, L. "Mechanistic Failure Criteria for Carbon and Glass Fibers Embedded in Polymers in Polymer Matrices," 42nd AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, Seattle, WA, pp. 1-11, 2001.

HULL, D.; CLYNE, T.W. *An introduction to composite materials*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996. 326p.

LEE, H.; NEVILE, K. *Handbook of epoxy resins*. New York: McGraw Hill, 1968.

MALLICK, P. K.; NEWMAN, S. *Composite materials technology: process and properties*. Munich: Hanser Publishers, 1990. 400p

MANO, E. B.; *Polímeros como material de Engenharia*. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1991. 218 p.

MARINESCU, I.; TONSHOFF, HK; INASAKI, I. *Tribology of abrasive machining process*. Norwich: William Andrew Inc, 2004.

MARINUCCI, G. *Materiais compósitos poliméricos*, Ed. Artliber, 2011.

MCNAUGHT, S. "Implementation of the Strain Invariant Failure Theory for Failure of Composite Materials," Thesis, October 2009.

MENDONÇA, P. T. R. *Materiais Compostos & Estruturas-Sanduiche-Projeto e Análise*. 1ª edição. São Paulo: Editora Manole Ltda, 2005.

PARDINI, L.C.; LEVY, F.N. *Compósitos Estruturais – Ciência e Tecnologia*. 1ª edição. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2006. 313 p.

PIRES,G. *Materiais nanoestruturados do sistema epoxídico DGEBA/dietilenotriamina modificado com um éster de silsesquioxano: propriedades mecânicas e térmicas.* página 28. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência dos Materiais. Ilha Solteira – SP Fevereiro de 2006

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O. *Uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial.* *Polímeros. Ciência e Tecnologia*, vol 10, nº 2, 2000.

ROZLI. Z. *Surface Fracture Analysis of Glass Fibre Reinforced Epoxy Composites Treated with Different Type of Coupling.* *Agent.European Journal of Scientific Research* vol. 29 nº1 pg.55-65, 2009.

TITA, V.; CARVALHO, J.; SANTOS, N. C. *Estudo Do Comportamento Mecânico De Materiais Compósitos Utilizando O Método Dos Elementos Finitos.* II Congresso Nacional De Engenharia Mecânica. João Pessoa/PB, 2002.

WIEBECK.H, HARADA, J; *plásticos de engenharia.* Ed. Artliber pg 198, 2005.

WANG,J. "A machinability study of polymer matrix composites using abrasive waterjet cutting technology." *Journal of Materials Processing Technology.* [Brisbane, Austrália]. 1999, pp. 30-35.