

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**EULER SAMUEL RODRIGUES DIAS**

**Resistência de laminados com furo aberto considerando  
incertezas nas propriedades admissíveis do material**

**BELO HORIZONTE**

**2015**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"RESISTÊNCIA DE LAMINADOS COM FURO CONSIDERANDO  
INCERTEZAS NAS PROPRIEDADES ADMISSÍVEIS DO MATERIAL"**

Euler Samuel Rodrigues Dias

Dissertação em versão final apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Belo Horizonte, 25 de setembro de 2015

D541r	<p>Dias, Euler Samuel Rodrigues. Resistência de laminados com furo considerando incertezas nas propriedades admissíveis do material [manuscrito] / Euler Samuel Rodrigues Dias. – 2015. xiii, 62 f., enc.: il.</p> <p>Orientador: Carlos Alberto Cimini Júnior.</p> <p>Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 61-62.</p> <p>1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Materiais laminados - Teses. 3. Efeito do entalhe (Resistência de materiais) - Teses. I. Cimini Júnior, Carlos Alberto. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p>CDU: 624(043)</p>
-------	---

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"RESISTÊNCIA DE LAMINADOS COM FURO CONSIDERANDO  
INCERTEZAS NAS PROPRIEDADES ADMISSÍVEIS DO  
MATERIAL"**

Euler Samuel Rodrigues Dias

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

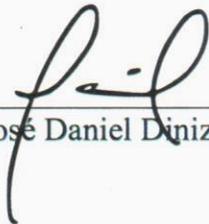
Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Carlos Alberto Cimini Júnior  
DEES - UFMG (Orientador)



Prof. Dr. Estevam Barbosa de Las Casas  
DEES - UFMG



Prof. Dr. José Daniel Diniz Melo  
UFRN

Belo Horizonte, 25 de setembro de 2015

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus por me dar capacidade, saúde e inteligência para desenvolver este trabalho.

Aos meus pais, Carlos e Nora, pelo apoio, cuidado e preocupação.

Ao meu orientador, Carlos Cimini, pela disposição e orientação sempre que necessário.

Aos amigos de caminhada no mestrado, em especial Bárbara Gallo e Sabrina Villela, que proporcionaram um ambiente além dos estudos.

À minha namorada pelo apoio e compreensão às minhas ausências.

Ao departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG pela excelente qualidade dos trabalhos.

Ao CNPq pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos para mestrado.

A todos aqueles que contribuíram para que esse trabalho fosse desenvolvido.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a todos que contribuíram para o desenvolvimento desta etapa, direta ou indiretamente, desde auxílio técnico até momentos de descontração.

Também dedico este trabalho a todos que desenvolvem atividades de pesquisa acadêmica e sabem dos desafios enfrentados durante essa etapa.

## RESUMO

Laminados NCF (non-crimp fabrics) são a união de camadas unidirecionais através de fios de costura. Estes ganharam visibilidade para aplicações estruturais devido a suas propriedades pós-impacto superiores, maior velocidade de produção e maior liberdade para orientações das fibras. Técnicas mais recentes permitiram fabricar laminas de espessura reduzida e com menor grau de ondulação dos feixes de fibras (tows), conferindo laminados mais resistentes e com menor espessura. Neste trabalho as propriedades mecânicas dos NCFs são discutidas, bem como o comportamento mecânico em casos de tração e compressão. A costura que mantém as lâminas estáveis é responsável por gerar regiões de concentração de tensão. Os métodos de fabricação influem significativamente nas propriedades finais dos NCFs, o que atenta para o desenvolvimento de processos com menor impacto sobre as propriedades da estrutura final.

Neste trabalho são analisados painéis de NCF com furo aberto, com três tamanhos de diâmetro, através do método dos elementos finitos. Foram empregadas rotinas de dano progressivo, através dos critérios de falha de máxima tensão admissível e Tsai-Wu, para determinação da falha última do laminado. Os resultados obtidos são comparados com os valores experimentais encontrados na literatura. Também é avaliada a sensibilidade destes critérios de falha em função do diâmetro do furo.

Como os valores das propriedades dos materiais possuem dispersão, também foi conduzida uma análise de influência dessas incertezas sobre a resistência final do laminado.

**Palavras-chave:** *Non-Crimp Fabrics*; laminas finas; furo-aberto; entalhe

## **ABSTRACT**

*Laminates NCF (non-crimp fabrics) are the union of unidirectional layers through stitching threads. Those laminates gained visibility for structural applications due to its superior post-impact properties, greater speed of production and greater freedom for the orientation of the fibers. Newest techniques made it possible to manufacture lamina of reduced thickness and with a lower degree of undulation of fiber tows, achieving better resistance and thinner laminates. In this work the mechanical properties of NCFs are discussed as well as the mechanical behavior in cases of traction and compression. The stitching thread that holds the lamina stable is responsible for generating tension concentration regions. The fabrication methods significantly affect the final properties of NCFs, which brings attention the development of processes with less impact on the properties of the final structure.*

*In this work, NCF panels with open holes of three distinct diameter sizes are analyzed through the finite element method. Progressive damage routines is applied, through the failure criteria of maximum allowable stress and Tsai-Wu, to determine the final failure of the laminate. The results obtained are compared with the experimental values found in literature. The sensitivity of these failure criteria according to the diameter of the hole was also evaluated.*

*As the material properties values possess dispersion, it was also conducted an analysis of influence of these uncertainties on the ultimate resistance of the laminate.*

**Keywords:** *Non-Crimp Fabrics; thin-ply; open-hole; fem; notch*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Esquema representativo da fabricação de NCFs (FORMAX, 2012).....	1
<b>Figura 2</b> - Notação utilizada para reconhecimento geométrico do laminado.....	4
<b>Figura 3</b> - Valor dos coeficientes da matriz de acoplamento, B, em função da quantidade de repetições no laminado.....	6
<b>Figura 4</b> - Valor dos coeficientes da matriz de rigidez flexural, D, em função da quantidade de repetições no laminado.....	7
<b>Figura 5</b> - Seção Transversal do NCF, indicando a heterogeneidade em meso-escala, com a resina e feixe de fibras (“fibretow”) (EDGREN, ASP e JOFFE, 2006).....	8
<b>Figura 6</b> - Esquema do processo de deformação de rotação e deslizamento dos tows (KONG, MOURITZ e PATON, 2004).....	9
<b>Figura 7</b> - Representação das trincas observadas nas camadas perpendiculares a direção do carregamento (EDGREN, MATTSON, et al., 2004).....	10
<b>Figura 8</b> - “Kink-band” em compostos NCF (JOFFE, MATTSON, et al., 2005).....	11
<b>Figura 9</b> - Falha prematura do composto NCF sob compressão devido a ondulação dos feixes (tows) (JOFFE, MATTSON, et al., 2005).....	11
<b>Figura 10</b> - Esquema de ondulação do feite (tow) no composto NCF (EDGREN, ASP e JOFFE, 2006).....	12
<b>Figura 11</b> - Aproximação linear para valores experimentais comparados com a predição através do critério de Slaughter simplificado (EDGREN, ASP e JOFFE, 2006).....	13
<b>Figura 12</b> - Esquema de regiões ricas em resinas em laminados NCF quase-isotrópicos (LIOTIER, ALAIN e CHRISTINE, 2010).....	14
<b>Figura 13</b> - Gráficos de probabilidade acumulada para (a) rigidez em tração e (b) resistência em tração das fibras secas (LEE, RUDOV-CLARK, et al., 2002).....	15
<b>Figura 14</b> - Região danificada do espécime entalhado submetido a tração logo antes da falha completa (ARTEIRO, CATALANOTTI, et al., 2013).....	17
<b>Figura 15</b> - Envelope com critério de falha de Tsai-Wu para a lâmina unidirecional C-Ply T700 NCF da Chromarat.....	21
<b>Figura 16</b> - Envelopes de falha de Tsai-Wu no espaço de deformação para várias orientações de lâmina ( TSAI e D. MELO, 2014).....	22
<b>Figura 17</b> - Envelope omni de deformação para o laminado constituído de laminas em várias orientações ( TSAI e D. MELO, 2014).....	22
<b>Figura 18</b> - Malha de elementos finitos para espécimen com furo aberto (FONG, CIMINI JR., et al.).....	28
<b>Figura 19</b> - Limites para possíveis envelopes de falha considerando todas as variações estatísticas, critério de falha de Tsai-Wu (FONG, CIMINI JR., et al.).....	28
<b>Figura 20</b> - Valor médio e os valores admissíveis das duas bases para cada condição de carregamento (FONG, CIMINI JR., et al.).....	29
<b>Figura 21</b> - Condições de contorno e modelo utilizado para simulação da placa com furo centrado....	33

<b>Figura 22</b> - Proporção entre carregamentos $\sigma_1$ e $\sigma_2$ .....	34
<b>Figura 23</b> - Esquema de carregamento bidirecionais do laminado com furo aberto .....	35
<b>Figura 24</b> - Fluxograma de dano progressivo implementado .....	37
<b>Figura 25</b> - Envelope de Falha – Tsai-Wu (FPF) .....	39
<b>Figura 26</b> - Envelope de Falha – Tsai-Wu (ULF) .....	40
<b>Figura 27</b> - Envelopes de falha FPF para propriedades médias, critério de máxima tensão admissível .....	44
<b>Figura 28</b> - Envelopes de falha FPF para propriedades no limite inferior, critério de máxima tensão admissível .....	44
<b>Figura 29</b> - Envelopes de falha FPF para propriedades no limite superior, critério de máxima tensão admissível .....	45
<b>Figura 30</b> - Envelopes de falha FPF para diâmetro $d=6,0$ mm, critério de máxima tensão admissível .....	45
<b>Figura 31</b> - Dispersão da resistência FPF em função do ângulo de carregamento, $d=3,0$ mm, critério de máxima tensão admissível .....	47
<b>Figura 32</b> - Dispersão da resistência FPF em função do ângulo de carregamento, $d=6,0$ mm, critério de máxima tensão admissível .....	47
<b>Figura 33</b> - Dispersão da resistência FPF em função do ângulo de carregamento, $d=10,0$ mm, critério de máxima tensão admissível .....	48
<b>Figura 34</b> - Envelopes de falha ULF para propriedades médias, critério de máxima tensão admissível .....	49
<b>Figura 35</b> - Envelopes de falha ULF para propriedades no limite inferior, critério de máxima tensão admissível .....	49
<b>Figura 36</b> - Envelopes de falha ULF para propriedades no limite superior, critério de máxima tensão admissível .....	50
<b>Figura 37</b> - Envelopes de falha ULF, $d=6,0$ mm, critério de máxima tensão admissível .....	51
<b>Figura 38</b> - Dispersão da resistência ULF em função do ângulo de carregamento, $d=3,0$ mm, critério de máxima tensão admissível .....	52
<b>Figura 39</b> - Dispersão da resistência ULF em função do ângulo de carregamento, $d=6,0$ mm, critério de máxima tensão admissível .....	52
<b>Figura 40</b> - Dispersão da resistência ULF em função do ângulo de carregamento, $d=10,0$ mm, critério de máxima tensão admissível .....	53
<b>Figura 41</b> - Resistência adicional em função do ângulo de carregamento, propriedades no limite inferior, critério de máxima tensão admissível .....	54
<b>Figura 42</b> - Resistência adicional em função do ângulo de carregamento, propriedades médias, critério de máxima tensão admissível .....	55
<b>Figura 43</b> - Resistência adicional em função do ângulo de carregamento, propriedades no limite superior, critério de máxima tensão admissível .....	55
<b>Figura 44</b> - Superposição dos envelopes de falha para critério de máxima tensão admissível, FPF e ULF, propriedades médias, $d=6,0$ mm .....	56

<b>Figura 45</b> - Evolução do dano e formação do caminho de fratura, carga unidirecional em X, $\mu$ , d1 ...	57
<b>Figura 46</b> - Corpo de prova fraturado em tração unidirecional (ARTEIRO, CATALANOTTI, et al., 2013) .....	57
<b>Figura 47</b> - Superposição entre envelopes de Tsai-Wu e Máxima Tensão Admissível .....	58

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Configurações de laminados utilizados para investigação da homogeneização do empilhamento.....	5
<b>Tabela 2</b> - Resistências obtidas para o Laminado 1 (ARTEIRO, CATALANOTTI, et al., 2013).....	25
<b>Tabela 3</b> - Resistências obtidas para o Laminado 2 (ARTEIRO, CATALANOTTI, et al., 2013).....	25
<b>Tabela 4</b> - Resistência obtidas para o Laminado 1 com furos abertos (ARTEIRO, CATALANOTTI, et al., 2013).....	26
<b>Tabela 5</b> - Resistência obtidas para o Laminado 2 com furos abertos (ARTEIRO, CATALANOTTI, et al., 2013).....	26
<b>Tabela 6</b> - Efeito do escalamento da espessura da lâmina: diâmetro do furo $d=3,175\text{mm}$ , lay-up: $[45_m/90_m/-45_m/0_m]_s$ (CHEN, TAY, et al., 2013).....	29
<b>Tabela 7</b> - Propriedades mecânicas da lâmina C-PLY™ T700/AR-2527.....	30
<b>Tabela 8</b> - Valores de resistência médio superior e inferior para as propriedades de interesse na lâmina.....	31
<b>Tabela 9</b> - Proporção de carregamento para os casos a serem analisados.....	34
<b>Tabela 10</b> - Penalização das propriedades através do critério de falha de Tsai-Wu.....	36
<b>Tabela 11</b> - Penalização das propriedades através do critério de falha por máxima tensão admissível.....	36
<b>Tabela 12</b> - Resistências para carregamento unidirecional – critério de Tsai-Wu.....	38
<b>Tabela 13</b> - Dispersão das resistências para falha da primeira lâmina.....	39
<b>Tabela 14</b> - Dispersão das resistências para falha última do laminado – critério de falha de Tsai-Wu.....	39
<b>Tabela 15</b> - Comparativo de resistências trativas unidirecionais para os valores médios das propriedades para tração unidirecional, critério de máxima tensão admissível.....	41
<b>Tabela 16</b> - Comparativo de resistências trativas unidirecionais para os valores mínimo e máximo para cobertura de 95% das propriedades da lâmina, critério de máxima tensão admissível.....	42
<b>Tabela 17</b> - Comparativo de resistências compressivas unidirecionais para os valores médios das propriedades para compressão unidirecional, critério de máxima tensão admissível.....	42
<b>Tabela 18</b> - Comparativo de resistências compressivas unidirecionais para cobertura de 95% das propriedades da lâmina, critério de máxima tensão admissível.....	43
<b>Tabela 19</b> - Dispersão das resistências FPF em relação ao conjunto de propriedades médias, critério de máxima tensão admissível.....	46
<b>Tabela 20</b> - Dispersão das resistências ULF em relação ao conjunto de propriedades médias, critério de máxima tensão admissível.....	51
<b>Tabela 21</b> - Resistência adicional em relação a resistência FPF, até a fratura do laminado para critério de máxima tensão admissível.....	54

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>FPF</b>	Falha de primeira lâmina ( <i>First Ply Failure</i> )
<b>ULF</b>	Falha Última do Laminado ( <i>Ultimate Laminate Failure</i> )
<b>CNPq</b>	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
<b>NCF</b>	<i>Non-Crimp Fabric</i>

## LISTA DE NOTAÇÕES

### MAIÚSCULO

$F_{1t}$	Resistência à tração da lâmina na direção da fibra, 1
$F_{1c}$	Resistência à compressão da lâmina na direção da fibra, 1
$F_{2t}$	Resistência à tração da lâmina na direção transversal à fibra, 1
$F_{2c}$	Resistência à compressão da lâmina na direção transversal à fibra, 1
$F_6$	Resistência ao cisalhamento da lâmina no plano 12
$A$	Matriz de rigidez normal
$B$	Matriz de acoplamento de esforços normais e flexurais
$D$	Matriz de rigidez flexural
$N$	Esforço normal
$M$	Momento
$E_1$	Rigidez na direção 1 da lâmina
$E_2$	Rigidez na direção 2 da lâmina
$E_{12}$	Rigidez ao cisalhamento no plano 12
$\nu_{12}$	Coefficiente de Poisson 12
$E_f$	Rigidez longitudinal da fibra
$X_f$	Resistência longitudinal da fibra
$\nu_f$	Fração volumétrica de fibra

### LETRAS GREGAS

$\epsilon_i$	Deformação na direção $i$
$\sigma_i$	Tensão na direção $i$
$\sigma_{c0}$	Resistência a compressão uniaxial da lamina, direcionada na direção de carregamento
$\sigma_{LT0}$	Resistência ao cisalhamento da lâmina
$\sigma_L$	Tensão compressiva aplicada na direção longitudinal
$\sigma_{LT}$	Tensão de cisalhamento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>3</b>
2.1	Comportamento mecânico de materiais compostos .....	3
2.2	Laminados simétricos vs assimétricos (Acoplamento de esforços) .....	3
2.3	Homogeneização do laminado .....	4
2.4	Utilização de laminas finas .....	5
2.5	NCF .....	7
2.5.1	Comportamento Mecânico do NCF .....	8
2.5.2.	Resistência .....	9
2.5.3.	Efeitos devido a costura .....	13
2.6	Laminados entalhados .....	16
2.7	Critérios de falha .....	18
2.7.1	Máxima tensão admissível .....	19
2.7.2	Critério de falha de Tsai-Wu .....	20
2.7.3	Tsai-Wu no espaço de deformação .....	21
2.8	Dano progressivo .....	23
2.9	Resultados Experimentais .....	24
2.9	Resultados Numéricos .....	26
2.9.1	Modelos avançados .....	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>30</b>
3.1	Material .....	30
3.2	Software utilizado .....	31
3.3	Definição da malha com furo .....	32
3.4	Carregamento .....	34
3.5	Dano progressivo .....	36
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>38</b>
4.1	Laminado sem entalhe .....	38
4.2	Laminados entalhados .....	41
4.2.1	Resistência FPF .....	43
4.2.2	Resistência ULF .....	48
4.2.3	Resistência adicional até ULF .....	53
4.2.4	Evolução da falha .....	56
4.3	Critério de falha de Tsai-Wu vs. Máxima tensão .....	57
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>58</b>

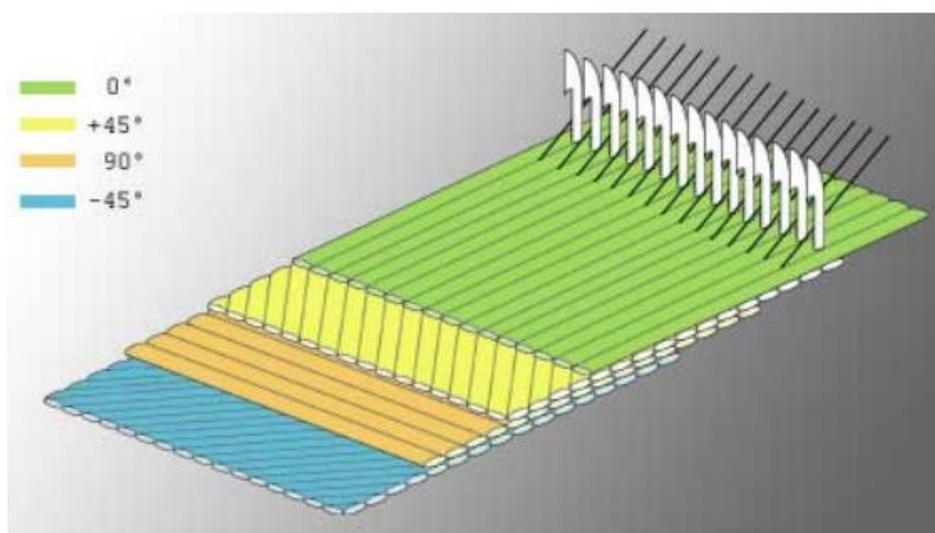
<b>6</b>	<b>SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>60</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>61</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O uso de materiais compostos de alto desempenho teve grande desenvolvimento devido à busca do setor aeronáutico em reduzir o peso das aeronaves. Por ser um material caro e apresentar processos de manufatura de custo também elevado, somente setores que apresentassem uma necessidade crítica bem específica faziam uso economicamente viável dos mesmos. A sua aplicação estendeu para a produção de cascos náuticos, equipamentos de processamento químicos, aplicações na infraestrutura civil e também em equipamentos esportivos de alto desempenho. Os polímeros reforçados por fibras são utilizados por oferecerem propriedades mecânicas, térmicas e físicas muito vantajosas, como baixo peso específico, elevada rigidez e resistência específicas, resistência a corrosão e estabilidade dimensional. Porém existem alguns fatores de grande importância, além do custo do material e de produção, que tornam proibitiva a sua aplicação em uma maior escala, como a reduzida resistência ao impacto e as propriedades mecânicas pós-impacto quando comparado com as ligas metálicas. O desempenho mecânico de um material composto está intimamente relacionado ao processo de fabricação, e deve ser levado em conta durante a fase de projeto e simulações computacionais.

Uma proposta para a redução dos custos de fabricação dos tecidos entrelaçados de materiais compostos é aplicação da tecnologia têxtil para a sua produção (Figura 1). Nessa classe estão os NCF (Non-Crimp Fabrics), o objeto de estudo deste trabalho e, que são laminados com um nível de ondulação das fibras muito menor que o encontrado nos tecidos clássicos de trama-urdidura.



**Figura 1** - Esquema representativo da fabricação de NCFs (Formax, 2012)

Os NCFs possuem uma estrutura na qual um ou mais sistemas de fibras são mantidos estabilizados juntos através de fios de costura. Cada camada consiste de fibras paralelas, e várias camadas em direções distintas podem ser empregadas para criar o NCF com as propriedades desejadas. Essas fibras geralmente são apresentadas em feixes (“tows”), comumente de geometria circular ou elíptica, e predominantemente de vidro ou carbono, sendo a última mais empregada em estruturas de maior confiabilidade. Esses feixes (“tows”) são compostos de várias quantidades de fibras, desde 6 mil, até 200 mil por feixe. A união das camadas unidirecionais através da espessura, em geral, é feita de fios de poliéster.

Os métodos de fabricação clássicos são muito caros e possuem uma eficiência produtiva relativamente pequena, o que restringe a aplicação de materiais compostos de alto desempenho, por exemplo, ao setor automotivo, visto que este exige uma alta cadência produtiva devido à elevada escala de produção de veículos comuns. Os NCFs surgem como bons candidatos a suprir essa demanda, pois aproveitam da tecnologia têxtil, que confere ao processo de fabricação uma elevada taxa de produção associada a flexibilidade de produzir laminados com as mais diversas orientações das fibras.

Nesse trabalho será explorada a aplicação da arquitetura NCF na simulação da resistência de placas laminadas reforçadas por fibras de carbono em matriz epóxi contendo furos como concentradores de tensão. Adicionalmente, os resultados numéricos serão utilizados para construir envelopes de falha que serão comparados com dados experimentais.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

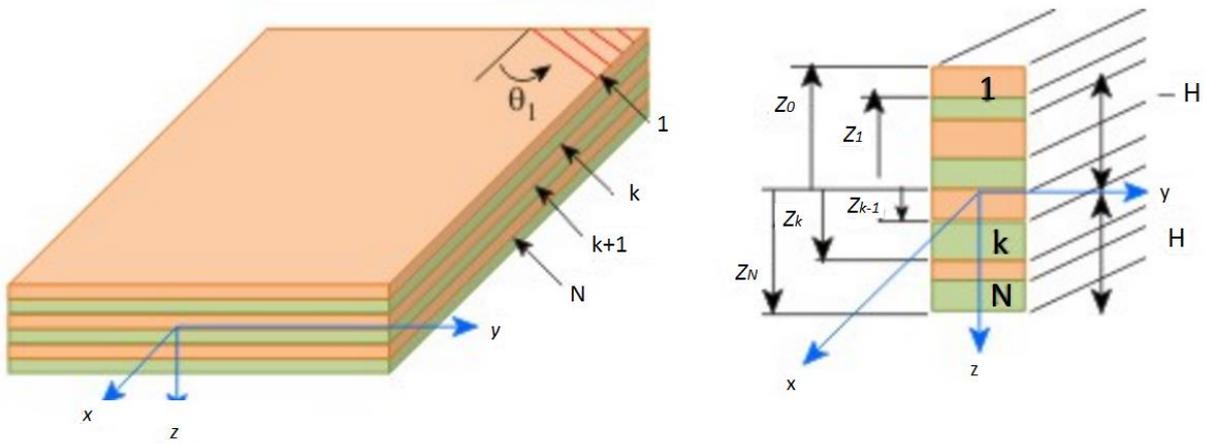
### **2.1 Comportamento mecânico de materiais compostos**

Os materiais compostos, por serem a junção mecânica de dois materiais de classes diferentes, comumente apresentam um comportamento mecânico anisotrópico. Compostos reforçados por fibras são divididos entre fibras contínuas e descontínuas, com ou sem orientação definida. A escolha pode ser feita tal que o laminado apresente um comportamento mecânico quase-isotrópico. Já para as lâminas com fibras contínuas orientadas em apenas uma direção, o material apresenta comportamento ortotrópico.

Geralmente as lâminas de fibras contínuas são fornecidas na forma de "tappers" ou tecidos bidirecionais de trama-urdidura, com disposição ortogonal das fibras. A partir do empilhamento simétrico das lâminas em variação uniforme de ângulos, um laminado quase-isotrópico pode ser obtido, pois é minimizado o fator de anisotropia do material no plano. Esses laminados quase isotrópicos apresentam frações iguais de lâminas para cada ângulo de orientação, e geralmente usam os seguintes conjuntos de ângulos:  $[0; \pm 30; \pm 60; 90]$  ou  $[0; \pm 45; 90]$ .

### **2.2 Laminados simétricos vs assimétricos (Acoplamento de esforços)**

Geralmente, laminados simétricos são preferíveis aos assimétricos por não acoplarem os esforços normais e momentos. Matematicamente isso é demonstrado através da anulação dos valores da matriz de acoplamento B (Eq.2). Apesar de vantajoso para prevenir esforços ou deformações indesejadas, isto é uma limitação ao projeto do laminado ou estrutura.



**Figura 2** - Notação utilizada para reconhecimento geométrico do laminado

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \\ M_x \\ M_y \\ M_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xs} & B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} \\ A_{xy} & A_{yy} & A_{ys} & B_{xy} & B_{yy} & B_{ys} \\ A_{xs} & A_{ys} & A_{ss} & B_{xs} & B_{ys} & B_{ss} \\ B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} & D_{xx} & D_{xy} & D_{xs} \\ B_{xy} & B_{yy} & B_{ys} & D_{xy} & D_{yy} & D_{ys} \\ B_{xs} & B_{ys} & B_{ss} & D_{xs} & D_{ys} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_s^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.1})$$

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.2})$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (z_k - z_{k-1}) \quad (\text{Eq.3})$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (\text{Eq.4})$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (\text{Eq.5})$$

Com,  $i, j=x, y, s$ .

### 2.3 Homogeneização do laminado

Considera-se um laminado quasi-isotrópico  $[0/\pm 45/90]$  com uma espessura inicial de lâmina 0,125 mm. Este é um laminado assimétrico e, portanto, tem acoplamento de esforços normais e de flexão. Posteriormente, dividimos a espessura da lâmina por uma quantidade “n”, e repetimos a sequência de empilhamento por “n” vezes. Um laminado com empilhamento será obtido  $[0/\pm 45/90]_n$ , tal que a espessura total do laminado permaneça inalterada. A medida que é aumentada quantidade de repetições,

o laminado é homogeneizado e se torna mais próximo de um laminado simétrico, de forma que o acoplamento de esforços se torna cada vez menor.

Para demonstrar esse efeito, será adotado o material composto AS4/3501-6 (Daniel & Ishai, 2006), com empilhamento de sub-laminados  $[0/\pm 45/90]$ .

**Tabela 1** - Configurações de laminados utilizados para investigação da homogeneização do empilhamento

<b>Laminado</b>	<b>Espessura da lâmina [mm]</b>	<b>Espessura total do laminado [mm]</b>
$[0/\pm 45/90]$	0,125	0,500
$[0/\pm 45/90]_2$	0,0625	0,500
$[0/\pm 45/90]_3$	0,04167	0,500
$[0/\pm 45/90]_4$	0,03125	0,500
$[0/\pm 45/90]_5$	0,025	0,500

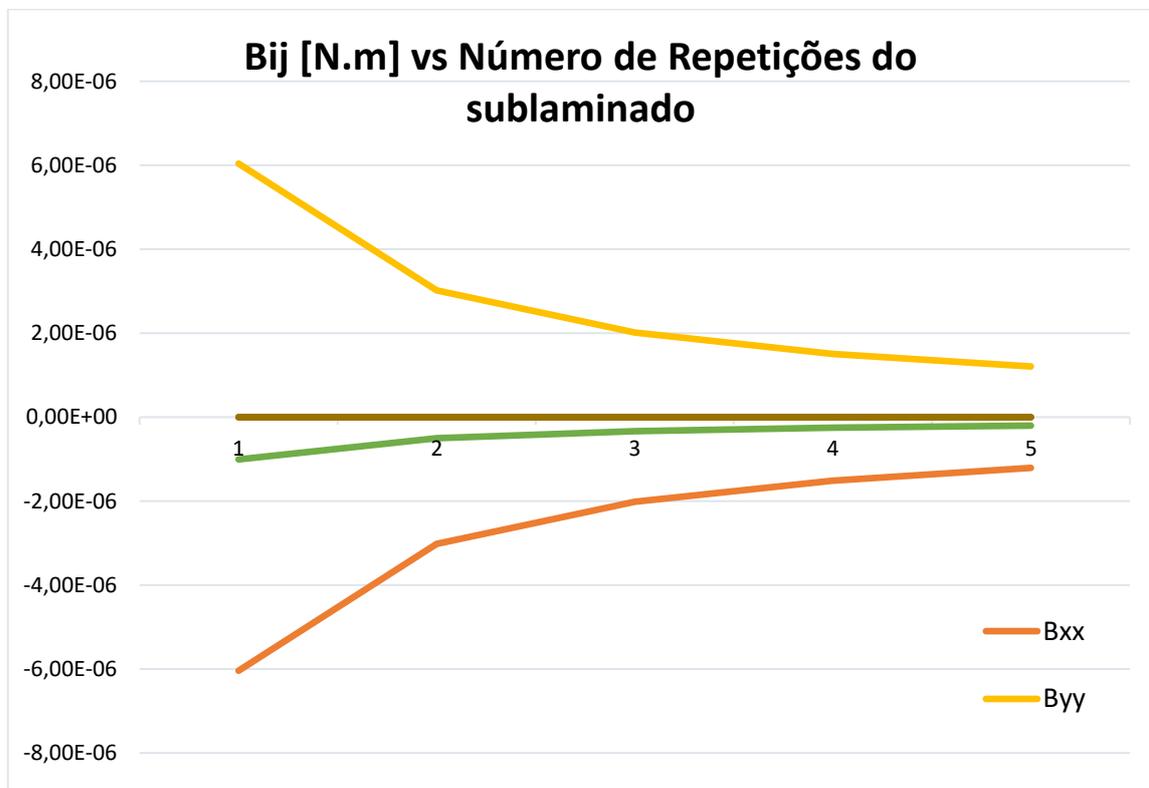
As Figuras 3 e 4 apresentam graficamente a variação dos coeficientes das matrizes de acoplamento, B e, rigidez flexural, D, da Equação 2. A matriz A não sofre efeito da variação da espessura das laminas. No caso da matriz D, de rigidez flexural, o efeito do aumento do número de repetições do sub-laminado, inicialmente, é uma diminuição em magnitude dos valores, para o laminado em questão. Também é observado (Figura 3 e 4), que quanto mais o laminado é homogeneizado, os coeficientes da matriz tendem a se estabilizarem em um valor (Daniel & Ishai, 2006).

A Figura 3, mostra que a medida que a quantidade de repetições do laminado aumenta, os coeficientes da matriz B, tendem a se anular, o que revela uma diminuição do acoplamento entre tensão normal e flexão.

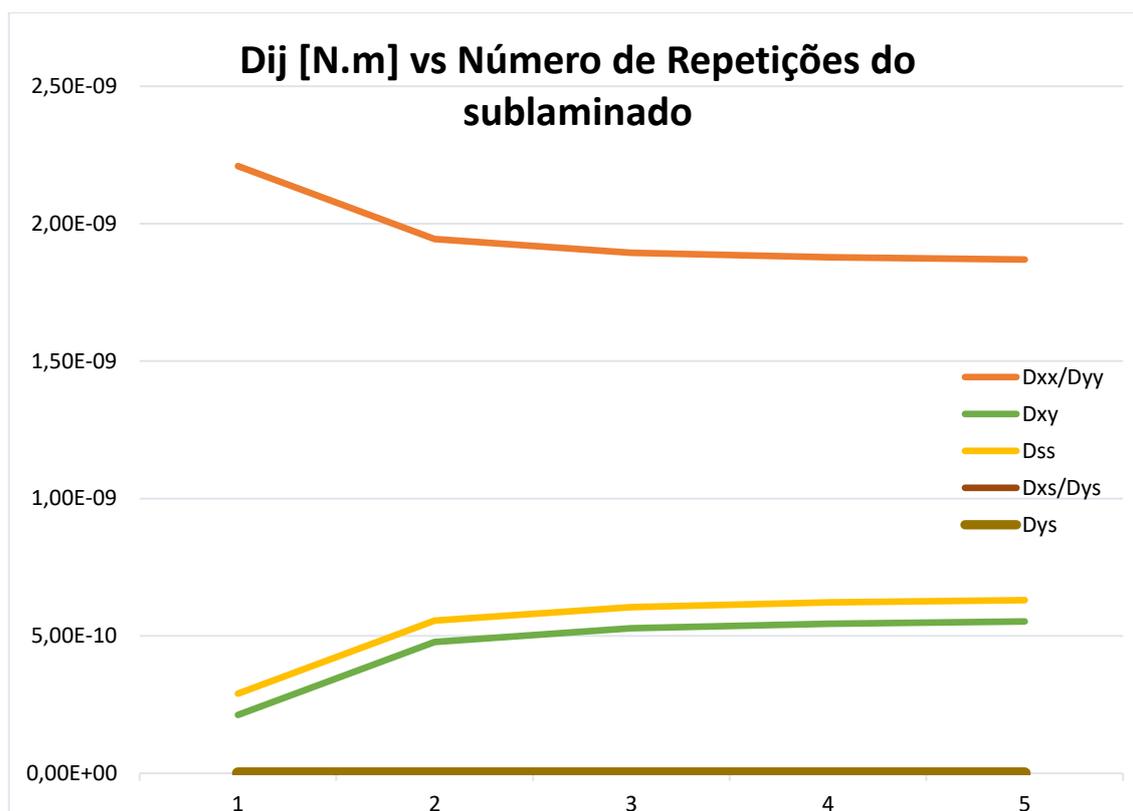
## 2.4 Utilização de laminas finas

A engenharia é feita de uma ponderação de fatores, muitas vezes conflitantes, para atingir determinado objetivo. Na busca da solução, algumas características são realçadas enquanto outras penalizadas. Ao utilizar lâminas com menor espessura a situação não é diferente.

Ao homogeneizar o laminado através da inserção de lâminas mais finas e com maior número de repetição da sequência de empilhamento base, uma trinca na lâmina pode ter seu crescimento interrompido na interface entre lâminas de diferente orientação, e como a espessura é menor, o dano total que aquela trinca pode promover ao laminado fica restrito (Joffe, et al., 2001). Por outro lado, confeccionar o laminado com muitas lâminas é mais dispendioso, e aumenta a probabilidade de flutuações na orientação das camadas durante a fabricação. Complementar a isso, a quantidade de interface é aumentada, o que é benéfico para retardar a propagação de trincas, em contrapartida aumenta a quantidade de interfaces e, conseqüente introdução de mais heterogeneidade na estrutura do laminado, como vazios ou bolsões de resina (Liotier, et al., 2010).



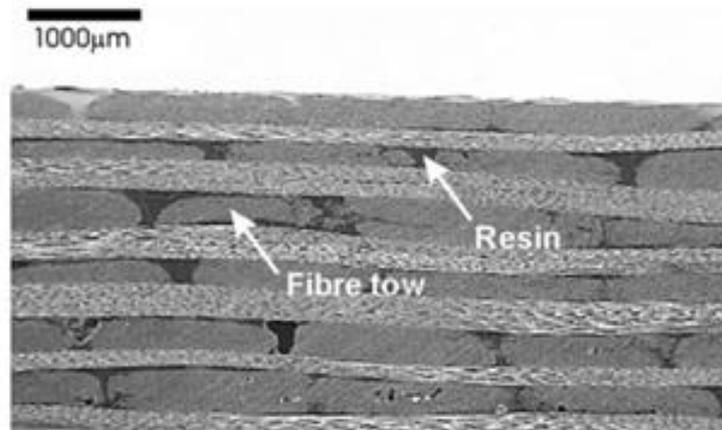
**Figura 3** - Valor dos coeficientes da matriz de acoplamento, B, em função da quantidade de repetições no laminado



**Figura 4** - Valor dos coeficientes da matriz de rigidez flexural,  $D$ , em função da quantidade de repetições no laminado

## 2.5 NCF

Materiais compostos NCFs são heterogêneos em três escalas (Edgren, et al., 2006). A micro-escala representa como as fibras são distribuídas na matriz polimérica dentro do feixe (*tow*). Na meso-escala os feixes (*tows*) são separados dos bolsões de resina (Figura 5), e o fio de costura se torna aparente. Por fim, na macro-escala a distinção se dá com as diferentes camadas de fibras unidirecionais, que são costuradas juntas em sub-laminados (*blankets*), e depois empilhadas para formar o laminado.



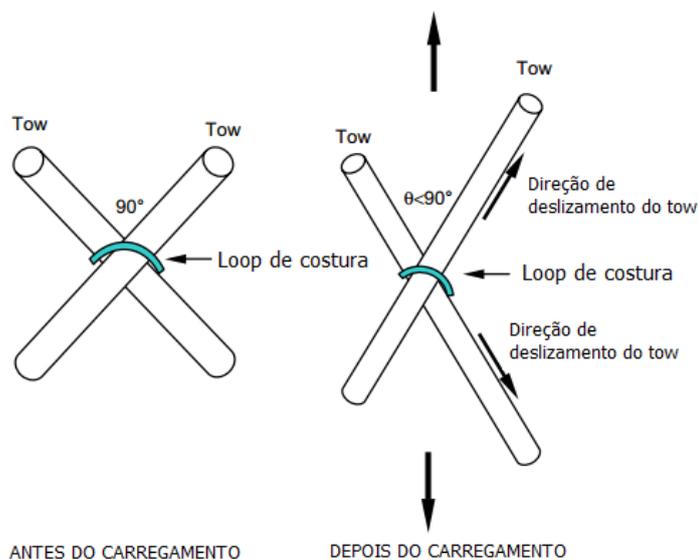
**Figura 5** - Seção Transversal do NCF, indicando a heterogeneidade em meso-escala, com a resina e feixe de fibras (“fibretow”) (Edgren, et al., 2006)

A análise de uma representação detalhada do NCF é acompanhada de algumas fortes desvantagens. Primeiramente, a análise é complicada e dispendiosa de tempo. Complementar a isso, não são baratas as ferramentas para análise do desempenho dos NCFs devido à grande quantidade de parâmetros que precisam ser obtidos experimentalmente. Adicionalmente, embora as propriedades constitutivas dos feixes (*tows*), matriz, e costura serem bem modeladas, as propriedades elásticas dos laminados são difíceis de serem determinadas com precisão. Isso ocorre porque as propriedades dos laminados são afetadas por variações estatísticas na meso-estrutura.

### 2.5.1 Comportamento Mecânico do NCF

Vários fatores são responsáveis por determinar a rigidez do composto NCF. O material, a sequência de empilhamento, a arquitetura de costura empregada e a tensão aplicada ao fio de costura (Kong, et al., 2004) são alguns dos parâmetros que influenciam na rigidez do laminado NCF.

A rigidez dos NCFs é inferior aos compostos unidirecionais correspondente devido a ondulação das fibras (Bibo, et al., 1997) Durante a aplicação de carga nas fibras, estas sofrem tanto deslocamento quanto rotação na direção do carregamento (Figura 6), o que lhes confere, nos estágios iniciais de carregamento, um menor módulo de elasticidade (Kong, et al., 2004).



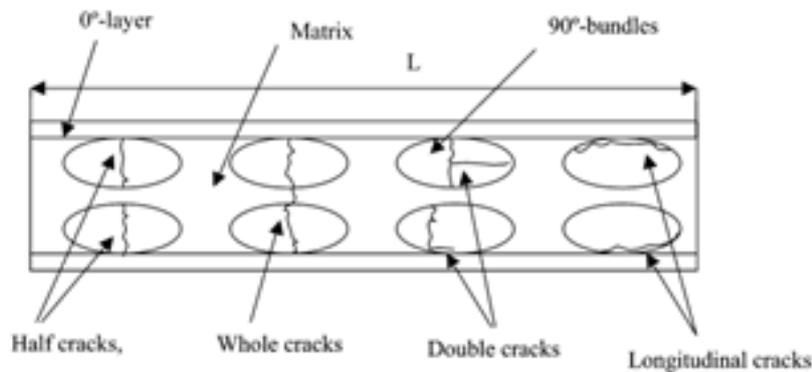
**Figura 6** - Esquema do processo de deformação de rotação e deslizamento dos *tows* (Kong, et al., 2004)

## 2.5.2. Resistência

### 2.5.2.1. Tração

As resistências à tração dos NCFs geralmente são inferiores aos laminados de prepreg correspondentes (Bibo, et al., 1997). Essa redução pode ser explicada em parte pela heterogeneidade da estrutura em meso-escala. A ondulação das fibras e a estrutura interna dos feixes (*tows*) podem conduzir a concentração de tensão que levam a falha prematura do laminado. A existência de fibras fraturadas devido ao processo de costura e, desalinhamento da direção predeterminada durante a etapa de produção influem para a redução da resistência do laminado.

Alguns mecanismos de falha são encontrados em laminados sob tração. No caso de laminados com fibras orientadas perpendicularmente à direção de carregamento é possível observar trincas transversais, como mostrado na Figura 7 (Edgren, et al., 2004). A medida que o carregamento é aumentado, mais trincas vão ocorrendo, e a resistência vai sendo comprometida além da manifestação de um comportamento não-linear. Quando o nível de tensão se torna muito elevado, trincas na direção do carregamento passam a ser observadas nos feixes (*tows*) orientados a 90° (Figura 7).



**Figura 7** - Representação das trincas observadas nas camadas perpendiculares a direção do carregamento (Edgren, et al., 2004)

### 2.5.2.2. Compressão

Uma das maiores preocupações para a aplicação dos NCFs está relacionada a sua resistência à compressão. Para aplicações aeronáuticas, NCFs têm sido utilizados, na maioria dos casos, em componentes carregados em tração.

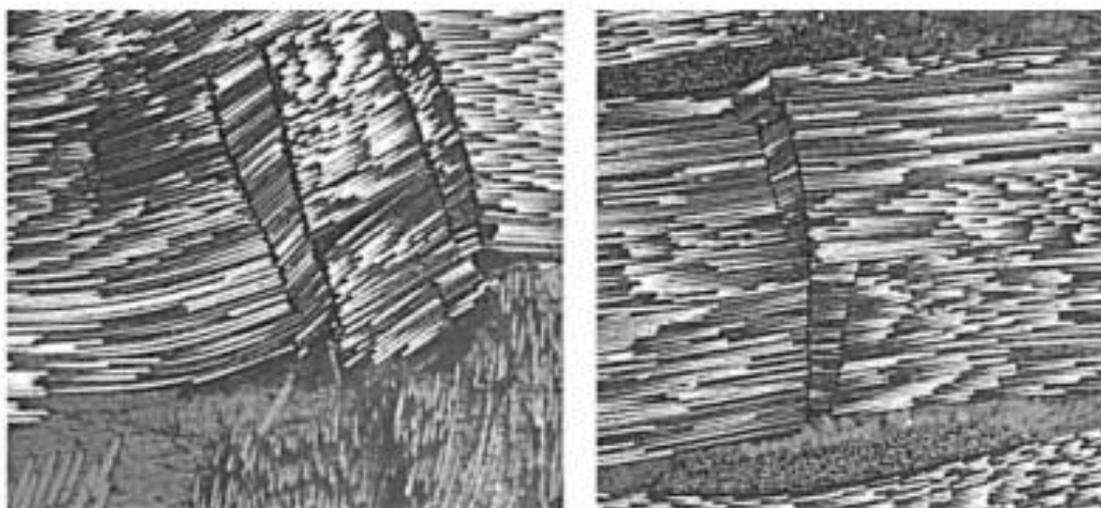
As lâminas com ondulação dentro do composto são cercadas pela matriz polimérica, e restritas por outras lâminas. Como resultado, o estado de tensão da lâmina desalinhada é mais complexo e pode ser analisado somente através de métodos numéricos. A definição adequada das condições de contorno, capazes de representar diferentes casos de confinamento das lâminas vizinhas, são fundamentais na condução da análise e nem sempre são elementares.

Na região da matriz que cerca os feixes (“tows”), um complexo estado de tensão é desenvolvido devido à flexão das fibras. Diante dessa situação, a falha pode ter início tanto no feixe (“tow”) como na matriz circundante, devido a sua falha.

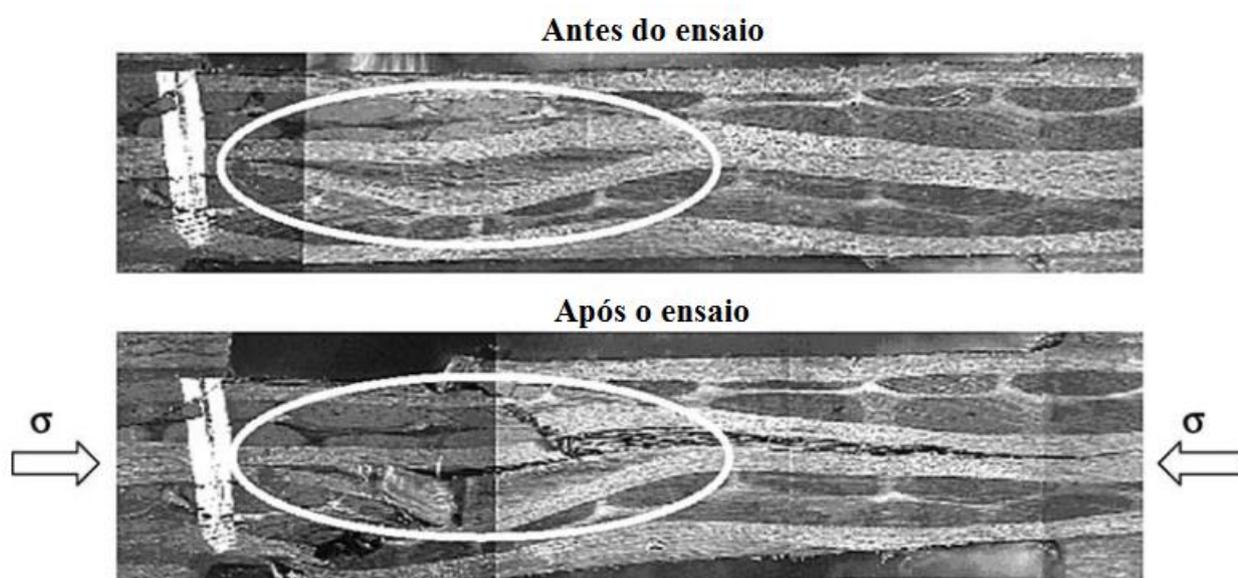
Para compreender o comportamento do NCF sob compressão é importante perceber que os materiais compostos NCF possuem imperfeições na forma de ondulação em duas escalas. Na microescala, o feixe (“tow”) é tratado como um composto unidirecional, detendo um certo grau de ondulação da fibra. Em compensação, permite aplicar critérios de falha de compostos unidirecionais à escala dos laminados. Na meso-escala a orientação do laminado não é perfeita e possui ondulação no plano e fora dele.

O mecanismo predominante da falha em compressão, conhecido como "kink-band", mostrado na Figura 8, ocorre devido à instabilidade das fibras onduladas. Esse mecanismo é responsável pela falha prematura do composto, como mostrado na Figura 9. Tal mecanismo foi analisado por Drapier e Wisnom

(Drapier & Wisnom, 1999), utilizando um modelo numérico 2D. Adicionalmente, modelos analíticos foram desenvolvidos e aperfeiçoados até o modelo proposto por Fleck e Budiansky (Fleck & Budiansky, 1990), e Slaughter (Slaughter, et al., 1993).



**Figura 8** - “Kink-band” em compostos NCF (Joffe, et al., 2005)

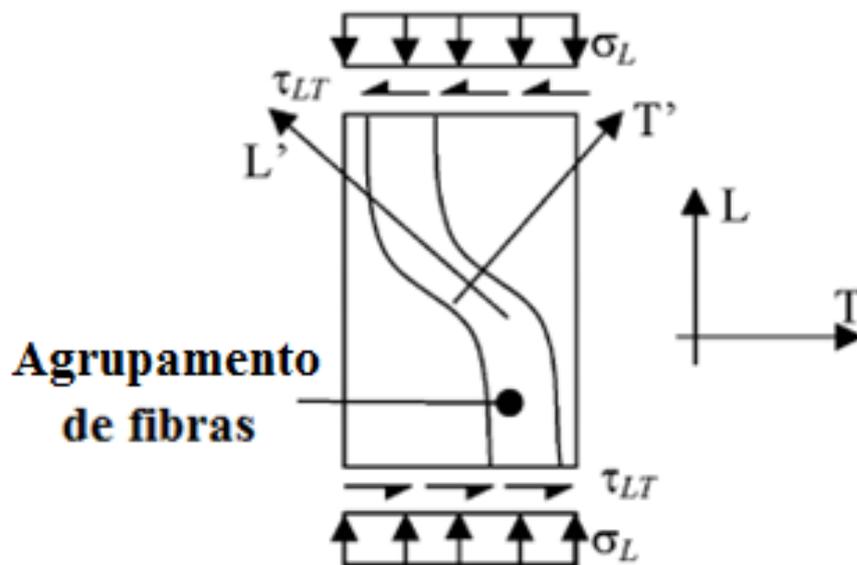


**Figura 9** - Falha prematura do composto NCF sob compressão devido a ondulação dos feixes (*tows*) (Joffe, et al., 2005)

O modelo de Slaughter (Slaughter, et al., 1993) pode ser simplificado pela desconsideração da tensão transversal, conveniente para carregamento no plano (Figura 10), e descrito na forma:

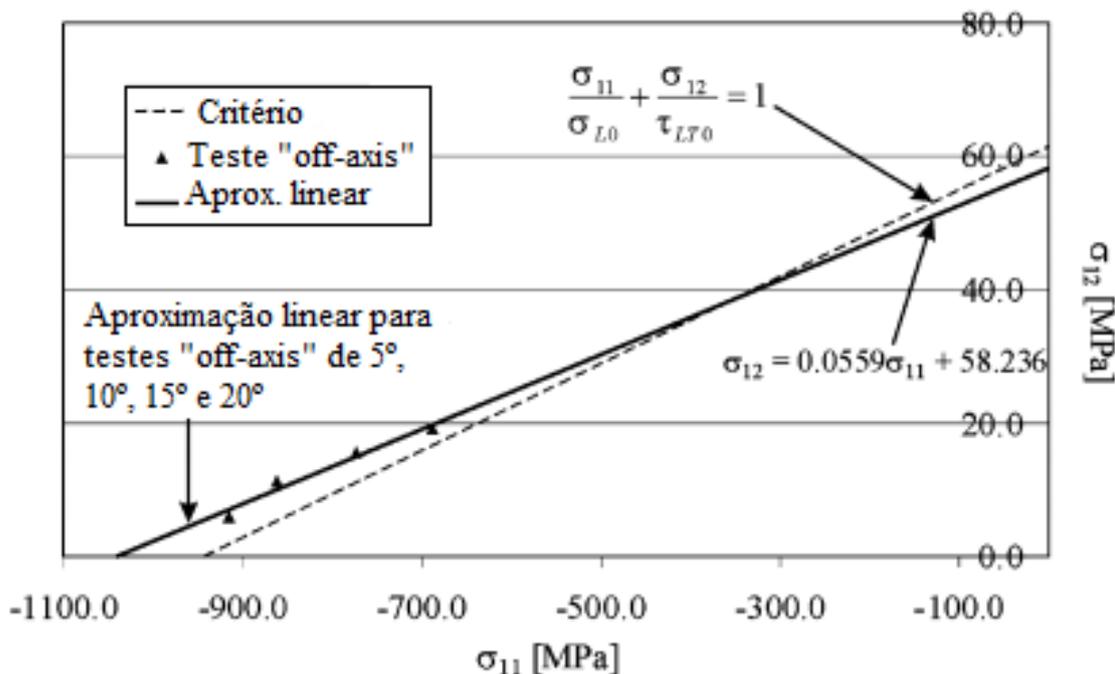
$$\frac{\sigma_L}{\sigma_{c0}} + \frac{\sigma_{LT}}{\sigma_{LT0}} = 1 \quad (\text{Eq. 6})$$

onde,  $\sigma_{c0}$  é a resistência a compressão uniaxial da lamina direcionada na direção de carregamento;  $\sigma_{LT0}$  é a resistência ao cisalhamento da lâmina;  $\sigma_L$  tensão compressiva aplicada na direção longitudinal; e  $\sigma_{LT}$  é a tensão de cisalhamento.



**Figura 10** - Esquema de ondulação do feite (*tow*) no composto NCF (Edgren, et al., 2006)

Em (Edgren, et al., 2006) foi obtido o efeito do ângulo de desvio da fibra através da variação da proporção entre a tensão longitudinal e cisalhamento. O resultado foi expresso e extrapolado em um gráfico da tensão longitudinal pela tensão transversal (Figura 11), criando um limite superior para a combinação entre as tensões que determinam falha por micro-flambagem das fibras.



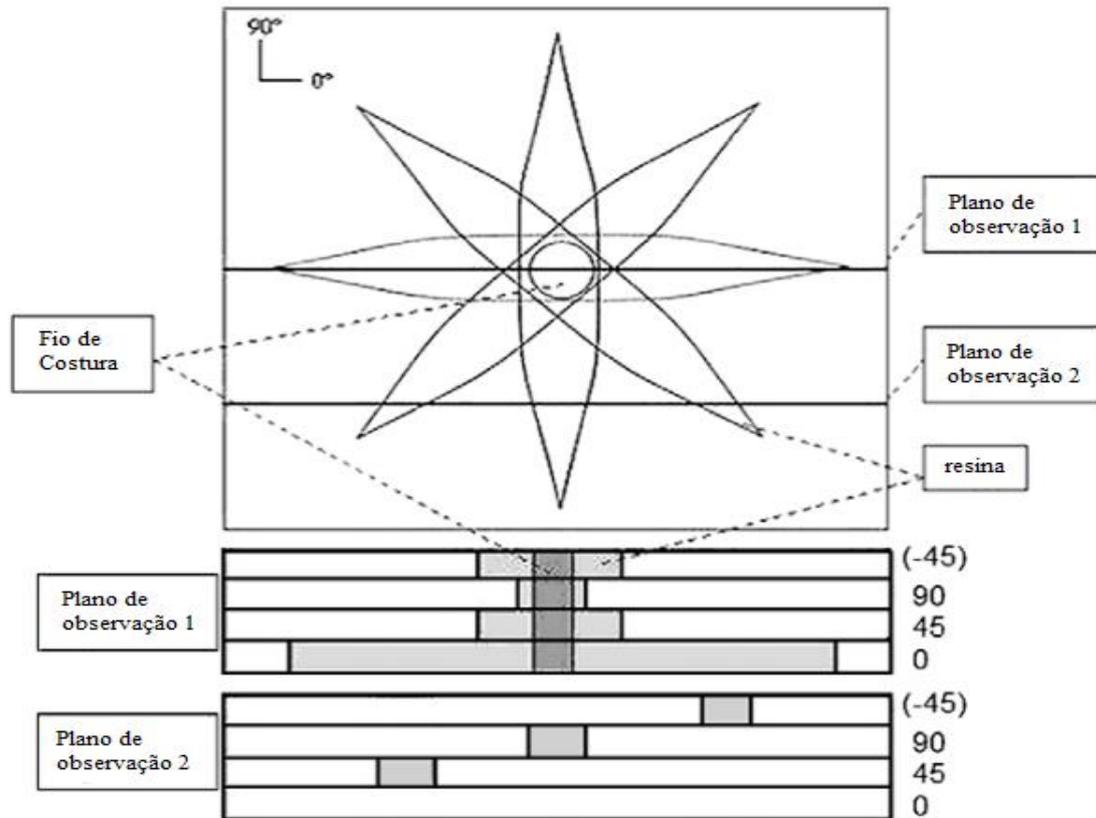
**Figura 11** - Aproximação linear para valores experimentais comparados com a predição através do critério de Slaughter simplificado (Edgren, et al., 2006)

### 2.5.3. Efeitos devido a costura

A costura é responsável por manter os feixes (tows) juntos, garantindo a regularidade da estrutura, e controlando as propriedades do laminado. A costura diminui a compactação do material em relação a laminados sem regiões ricas em resina. A densidade planar de costura controla a permeabilidade do NCF e controla o fluxo de resina através dos reforços de fibra durante o processo de injeção ou infusão (Lomov, et al., 2002; Drapier, et al., 2002).

A costura também introduz uma morfologia complexa dentro dos materiais compostos (Liotier, et al., 2010). Os dois principais efeitos são:

- Desorientação das fibras no plano, próximo a costura;
- E ocorrência de dois tipos de regiões ricas em resina. Uma nas costuras, e a outra entre as camadas multi-axiais devido ao *loop* da costura.



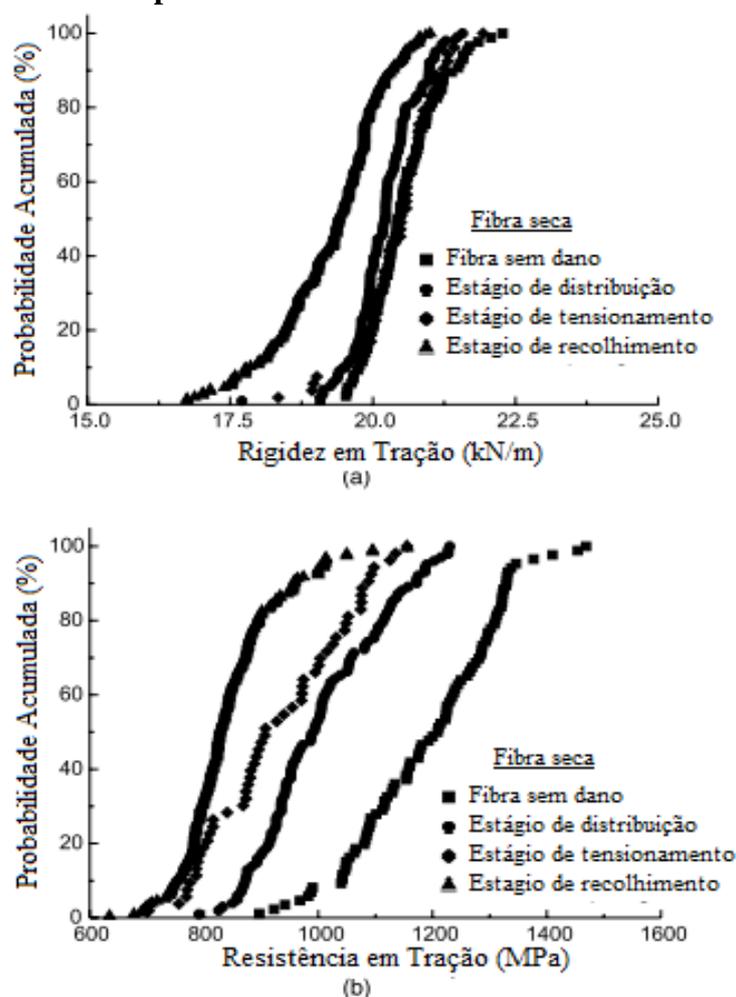
**Figura 12** - Esquema de regiões ricas em resinas em laminados NCF quase-isotrópicos (Liotier, et al., 2010)

Esses efeitos dependem do material em uso, e também dos parâmetros de processamento, como as dimensões do fio de costura, tensão aplicada, geometria e, características físicas e mecânicas.

Em (Liotier, et al., 2010) é observado que a costura introduz regiões ricas em resina após o processamento, por causa das aberturas entre as fibras de carbono próxima a costura. As regiões ricas em resina no formato de diamante (Figura 12) criam áreas heterogêneas dentro das lâminas e podem favorecer a formação de trincas (Drapier, et al., 2002; Reynolds & McManus, s.d.). Adicionalmente aos canais transversais, outras regiões ricas em resina são localizadas em vazios inter-laminares, próximos aos loops de costura.

Devido à distorção causada pelo fio de costura, regiões de concentração de tensão são geradas. Esses locais são iniciadores de falha, e podem ser observados tanto em ensaios estáticos (Truong, et al., 2005) como ensaios dinâmicos (Vallons, et al., 2009), onde a densidade de pontos de costura perpendicular à direção de carregamento conduz a redução da resistência do laminado.

### 2.1.4. Efeitos devido ao processo de manufatura



**Figura 13** - Gráficos de probabilidade acumulada para (a) rigidez em tração e (b) resistência em tração das fibras secas (Lee, et al., 2002)

Uma desvantagem do processo têxtil é a introdução de dano, e distorção das fibras. As fibras são danificadas devido às repedidas ações de abrasão e flexão que ocorrem durante as etapas de confecção e que afetam principalmente a resistência do material, sem grande efeito sobre a rigidez (Lee, et al., 2002). É importante conhecer bem as etapas de produção para finalidades tanto de projeto de NCF, quanto para desenvolvimento de novos mecanismos de produção que minimizem o impacto sobre as propriedades das fibras.

Em (Lee, et al., 2002) foram medidas a resistência e a rigidez dos feixes (*tows*) em diferentes etapas do processo têxtil clássico, para a fibra seca, e para o laminado. Foi possível detectar que a rigidez não

sofreu degradação considerável, enquanto que a resistência foi progressivamente afetada a cada estágio. A resistência caiu para 93% na etapa inicial de deposição das fibras da trama, posteriormente uma redução para 78% no estágio de tensionamento, e 70% ao final do processo, (Figura 13).

Durante o processo de fabricação do tecido as fibras são deslizadas várias vezes para frente e para trás através do sistema. Esse efeito também foi medido em função do número de repetições, e revelou um impacto maior sobre a resistência, enquanto que a rigidez se manteve inalterada. O fato de ocorrer um efeito sobre a resistência, e não sobre a rigidez, revela que durante o processo ocorre abrasão das fibras, enquanto poucas chegam a quebrar. Quando o foco da análise passa a ser o material composto, o impacto sobre a resistência é minimizado, reduzindo cerca de 20%, durante todo processo, devido ao efeito de cisalhamento que promove uma maior transferência de carga efetiva através das fibras quebradas. Quando comparada com os tecidos 2D, a rigidez do NCF (3D) é menor, enquanto que a resistência das duas configurações é semelhante. Isso acontece devido a costura e a sequência de empilhamento, que causam desalinhamento e ondulação das fibras que suportam carga nos NCFs.

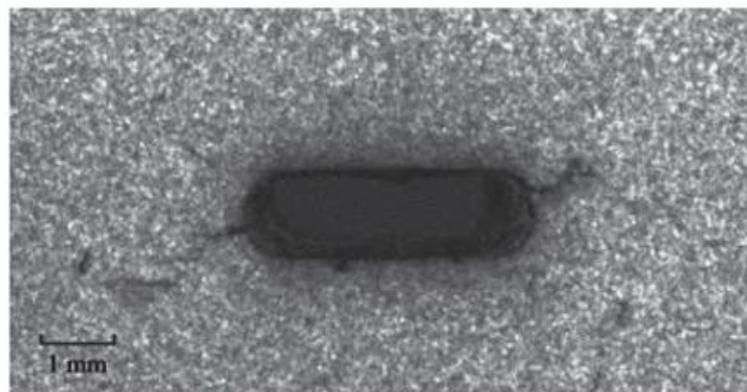
Outras técnicas de fabricação tem sido desenvolvidas para minimizar os efeitos introduzidos durante as etapas de confecção, e gerar laminados com um menor nível de ondulação das fibras. Entre estes, podem ser citados o 3DWEAVE® (Lomov, et al., 2009), que produz laminados com mínima variação entre as espessuras dos laminados e reduzida ondulação das fibras.

Outra tecnologia desenvolvida é utilizada para a produção de laminas secas com espessuras tão finas quanto 0,02 mm, conhecida como tecnologia de laminas finas por espalhamento dos arranjos de fibras (*spread tow thin-ply technology*) (Kawabe, et al., 1998). Essa técnica utiliza de jateamento de ar uniforme, auxiliado por vácuo, para espalhar as fibras na direção desejada. Assim que as fibras começam a se espalhar, o ar passa a fluir entre os feixes (*tows*) em maior velocidade, contribuindo para um melhor espalhamento dos feixes. Quanto mais espalhados os feixes (*tows*), mais fina se torna a lâmina, e menor o nível de ondulação induzido após a compactação do laminado.

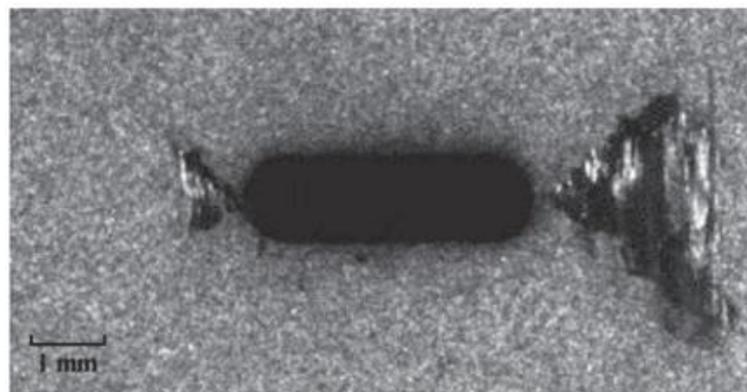
## **2.6 Laminados entalhados**

O conhecimento das propriedades elásticas do laminado e as resistências sem entalhe são essenciais para a caracterização mecânica do material composto, pois fornecem os parâmetros exigidos para os critérios de falha mais clássicos e, também permitem a avaliação de modelos numéricos e analíticos. Muitos

estudos na direção de estimar os valores de rigidez e resistência utilizam a abordagem micro-mecânica, o que contribui para conhecer melhor os mecanismos de dano e, conseqüentemente, servir de base para o desenvolvimento de novos processos produtivos. Estas abordagens são em muitos casos complexas, tornando proibitiva a aplicação a modelos de simulação de componentes estruturais (Tserpes & Labeas, 2009). Complementar a utilização de resultados de estudos micro-estruturais está o fato destes estarem restritos, geometricamente, a um volume representativo no qual foi inserido o defeito de interesse da investigação. Estruturas reais são cheias de defeitos, possuem ondulação e desalinhamento das fibras, bolsões de resina e, portanto, a utilização de dados experimentais se torna mais adequada para utilização em simulação de componentes, pois asseguram valores que sofreram a influência dos vários tipos de defeitos na microestrutura.



(a) Laminado 1 (assimétrico)



(b) Laminado 2 (simétrico)

**Figura 14** - Região danificada do espécime entalhado submetido a tração logo antes da falha completa (Arteiro, et al., 2013)

Ensaio de furo aberto são tipicamente usados para estudar a resposta mecânica de laminados compostos com concentradores de tensão e avaliar o efeito do tamanho do furo sobre a resistência (Arteiro, et al.,

2013). Além disso, esses testes são importantes para fornecer dados relativos ao comportamento do material, influência da sequência de empilhamento e parâmetros geométricos sobre a resposta mecânica do material em condições de concentração de tensão. Com isso em mãos, torna-se possível a utilização de tais informações para validação de modelos analíticos e numéricos e então a predição da resistência de laminados compostos entalhados.

## 2.7 Critérios de falha

Determinar a resistência de um material em um projeto estrutural é uma questão fundamental. Alguns componentes são pensados para nunca falharem, outros para permitirem um certo nível de deformação permanente, enquanto que outros componentes são dimensionados para falharem sob certas condições, como situações de falha segura.

Em todas situações citadas anteriormente, os critérios de falha que guiam o desenvolvimento da estrutura antes da sua manufatura. Se o critério de falha possuir uma boa correlação com a estrutura real, então a necessidade de ensaios se torna menor. É nesse sentido que o desenvolvimento do produto caminha com os recursos computacionais existentes hoje, uma vez que um projeto otimizado pode ser obtido, sem ensaiar nenhuma peça experimental e, portanto, economizando em tempo e custo.

Os critérios de falha tiveram seu desenvolvimento inicial com matérias isotrópicos, como a máxima tensão normal (Rankine), máxima tensão de cisalhamento (Tresca), máxima energia distorcional (Von Mises), e outros. Inicialmente os critérios de falha para materiais compostos, a nível macroscópico, descenderam dos critérios aplicados a materiais isotrópicos, com adaptações para contabilizar a anisotropia em relação a resistência e rigidez do material (Daniel & Ishai, 2006).

Os critérios de falha para laminas podem ser classificados em três grupos (Daniel & Ishai, 2006)

1. Teorias limitadas ou não interativas, nos quais um modo específico de falha é predito pela comparação da tensão ou deformação da lâmina com a respectiva resistência ou deformação última. Não é computada a interação entre as diferentes componentes de tensão para a determinação da falha. Exemplos dessa categoria são as teorias de máxima tensão e teoria de máxima deformação.

2. Teorias interativas, nas quais todas componentes de tensão são incluídas em uma expressão, que é a representação matemática do critério de falha. A falha da lamina é atingida sem referenciar o modo. Exemplos de teorias interativas são as teorias de Tsai-Hill e Tsai-Wu.
3. Teorias parcialmente interativas ou baseadas no modo de falha, onde critérios diferentes são aplicados para a falha da fibra e falha interfibra, que pode ser a falha da matriz ou interface. Exemplos dessa classe são as teorias de Hashin-Rotem e Puck.

Muitos outros critérios de falha estão documentados na literatura, não limitados apenas a macroestrutura, mas também a meso-estrutura e microestrutura, onde são utilizados parâmetros relacionados à interface e aos constituintes da lâmina. Apesar da utilização de critérios de falha mais complexos se aproximarem mais do comportamento real para determinada situação, incluindo fenômenos não captados pelas teorias macroscópicas, estes são computacionalmente mais elaborados, e também exigem uma maior quantidade de dados de entrada, que podem ser de difícil obtenção experimental e podem tornar proibitiva a aplicação do critério de falha.

### 2.7.1 Máxima tensão admissível

A teoria de máxima tensão determina que a falha ocorre se pelo menos uma das componentes de tensão em uma das direções principais do material exceder a resistência correspondente naquela direção. Para a condição de estado plano de tensão, a falha acontece se uma das condições abaixo for satisfeita, na direção da lamina.

$$\sigma_1 = F_{1t}, \text{ quando } \sigma_1 > 0 \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\sigma_1 = -F_{1c}, \text{ quando } \sigma_1 < 0 \quad (\text{Eq. 8})$$

$$\sigma_2 = F_{2t}, \text{ quando } \sigma_2 > 0 \quad (\text{Eq. 9})$$

$$\sigma_2 = -F_{2c}, \text{ quando } \sigma_2 < 0 \quad (\text{Eq. 10})$$

$$|\tau_6| = F_6 \quad (\text{Eq. 11})$$

O critério de máxima tensão é mais aplicável aos modos de fratura frágil do material, próximos aos casos de tensão longitudinal ou transversal. Complementarmente, esse critério não contabiliza a interação entre as componentes de tensão.

### 2.7.2 Critério de falha de Tsai-Wu

O critério de falha da teoria polinomial do tensor interativo, é capaz de prever a resistência de materiais anisotrópicos sob um estado qualquer de tensão. Este usa o conceito de tensores de tensão, o que permite a transformação entre sistemas de coordenadas.

A sua forma é de um invariante formado por componentes tensoriais de tensão ou deformação, e tem a capacidade de levar em conta a diferença entre as resistências sob tração e compressão.

Em sua forma mais simples contraída, o critério original baseado no invariante tensorial tem a seguinte expressão:

$$f_i \sigma_i + [f_{ij} \sigma_i \sigma_j]^{1/2} = 1 \quad (\text{Eq. 12})$$

Tsai e Wu modificarão o critério original da teoria polinomial para a representação no espaço de tensões, obtendo uma superfície de falha. Sua forma contraída tem a seguinte forma:

$$f_i \sigma_i + f_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad i,j=[1;6] \quad (\text{Eq.13})$$

Para o estado plano de tensão, o critério de Tsai-Wu possui a forma mais conhecida:

$$f_1 \sigma_1 + f_2 \sigma_2 + f_{11} \sigma_1^2 + f_{22} \sigma_2^2 + f_{66} \tau_6^2 + 2f_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1 \quad (\text{Eq.14})$$

Os termos lineares em tensão normal na equação acima (equação xxxx) permitem a distinção entre tensão e compressão. O coeficiente  $f_{12}$  incorpora a interação entre as duas componentes normais de tensão.

Os coeficientes gerais para o critério de falha quadrático de Tsai-Wu são obtidos através da aplicação de carregamentos elementares a lâmina.

$$f_1 = \frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}} \quad (\text{Eq.15}) \quad f_{11} = \frac{1}{F_{1t}F_{1c}} \quad (\text{Eq.16})$$

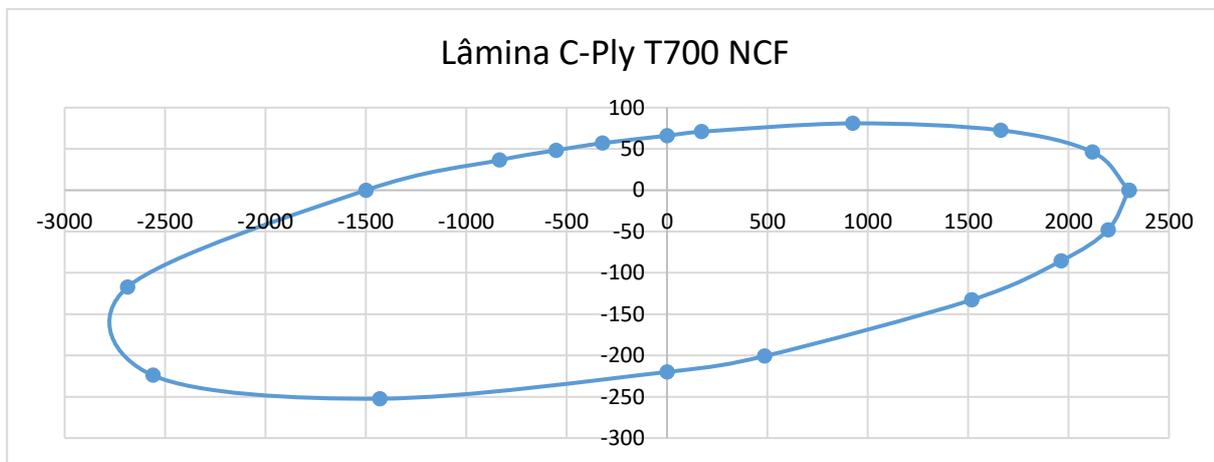
$$f_2 = \frac{1}{F_{2t}} - \frac{1}{F_{2c}} \quad (\text{Eq.17}) \quad f_{22} = \frac{1}{F_{2t}F_{2c}} \quad (\text{Eq.18})$$

$$f_{12} \cong -0,5(f_{11}f_{22})^{1/2} \quad (\text{Eq.19})$$

O critério de Tsai-Wu não é capaz de identificar o modo de falha do laminado. Este inclui todas as componentes de tensão em uma mesma equação a qual irá determinar a falha da lâmina de acordo com a contribuição de cada parcela.

Apesar de ser desenvolvido para materiais anisotrópicos, se forem aplicadas simplificações existentes para materiais isotrópicos, o critério de Tsai-Wu se reduzirá ao critério de falha de energia distorcional (Von Mises).

Embora o critério de falha de Tsai-Wu não ser capaz de identificar o modo de falha, este é operacionalmente simples e, conseqüentemente, sua implementação computacional. Pelo fato da teoria de falha satisfazer os requisitos de invariante tensorial, este pode ser transformado para outros sistemas de coordenada.

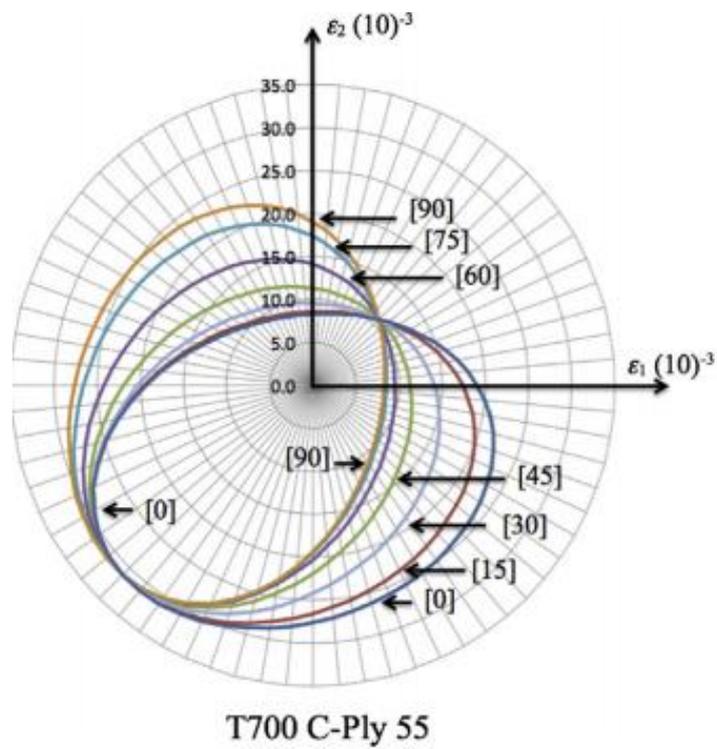


**Figura 15** - Envelope com critério de falha de Tsai-Wu para a lâmina unidirecional C-Ply T700 NCF da Chromarat

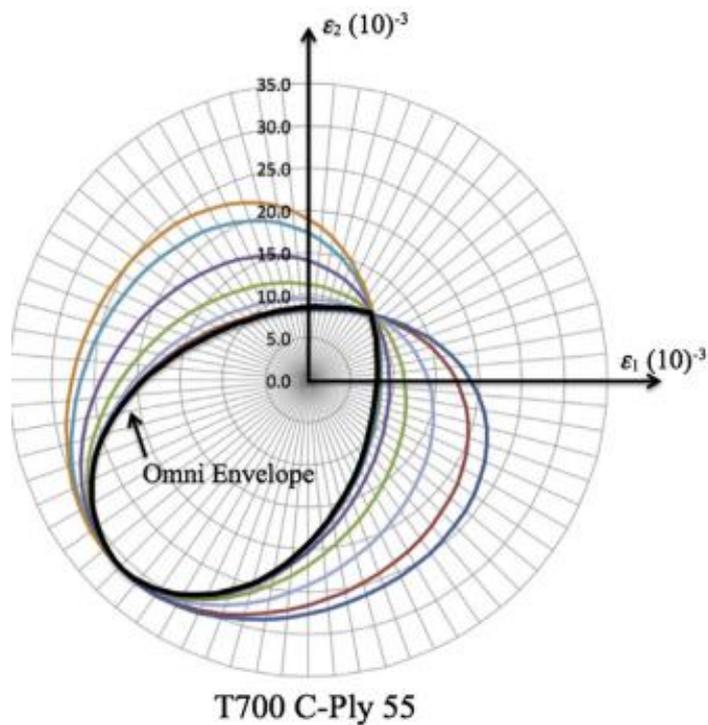
### 2.7.3 Tsai-Wu no espaço de deformação

Uma outra abordagem é a utilização do critério de Tsai-Wu no espaço de deformações (Tsai & D. Melo, 2014). Assim, para um laminado é possível obter diretamente a deformação admissível de cada lâmina, com orientação diferente, em apenas um gráfico. Com esse recurso fica possível obter um envelope omni de deformação, através do qual é possível projetar um laminado, tal que nenhuma de suas lâminas falhem.

A Figura 16, mostra um exemplo do envelope no espaço de deformação, com a indicação da orientação relativa a cada envelope. A Figura 17 mostra a composição do espaço de deformações coberto por todas as lâminas, que é denominado o espaço omni de deformação, para o qual todas as lâminas estão seguras.



**Figura 16** - Envelopes de falha de Tsai-Wu no espaço de deformação para várias orientações de lâmina (Tsai & D. Melo, 2014)



**Figura 17** - Envelope omni de deformação para o laminado constituído de laminas em várias orientações (Tsai & D. Melo, 2014)

## 2.8 Dano progressivo

Estruturas de materiais compostos conseguem suportar uma elevada quantidade de micro-trincas antes de perder a capacidade de resistir às cargas de projeto, apesar do dano permanente da estrutura. O mecanismo de deformação é condicionado pela degradação da rigidez, e também pelas lâminas vizinhas (Edgren, et al., 2004; Mattson, et al., 2008).

O grande interesse em utilizar NCFs para estruturas primárias, em aplicações aeronáuticas, exige o conhecimento dos mecanismos de evolução do dano. Conhecido isso, modelos confiáveis que possam ser incorporados durante a fase de projeto da estrutura são desenvolvidos. Muito tem sido investido em pesquisa nessa área, principalmente na obtenção de relações que prevejam a degradação da rigidez do material e predição da resistência da estrutura.

O método dos elementos finitos muito tem sido empregado em análise de NCF para estudo de parâmetros relacionados a micro-estrutura do material, como a forma do feixe (tow), costura, e comportamento na região de falha. Apesar da grande contribuição desses estudos, eles são muitas vezes restritos ao volume representativo de interesse e, portanto, não são adequados para aplicação direta em simulação de componentes estruturais.

Para aplicação em engenharia de uma forma eficiente, é preciso transferir o comportamento micro-estrutural do NCF para macro-estrutural. Isso é feito através da homogeneização do comportamento mecânico, que então permitirá a aplicação em modelos computacionais submetidos a qualquer condição de carregamento. Em (Tserpes & Labeas, 2009) aborda essa transferência através do uso de um elemento de volume representativo e aplicação de uma análise com falha progressiva em nível micro-mecânico. Finalmente, a modelagem do comportamento mecânico é associada ao modelo de elementos finitos de toda estrutura.

Para a aplicação do mecanismo de falha progressiva existem várias abordagens, sendo algumas muito discretas, ou pouco seletivas. Em (Tserpes & Labeas, 2009) são utilizados três critérios de falha para comparação e degradação do material. Isso é definido em um nível muito discreto, com redução das propriedades de rigidez para níveis de 1%, 10% e 20% dos valores originais, imediatamente após atingir o critério de falha. A abordagem através desse método acaba se tornando fortemente dependente da malha de elementos finitos empregada (Zhao, et al., 2006), pois ela determinará computacionalmente a

extensão do dano do material e, conseqüentemente, o novo estado de carregamento da estrutura em estudo.

Os métodos de degradação são classificados entre seletivos (modo dependente) e não-seletivos. Os métodos seletivos levam em conta qual o modo de falha atingido e degrada somente as propriedades associadas a esse modo. Dentre estes está o critério de Máxima Tensão, onde mesmo que a resistência transversal seja superada, ainda assim o material continuará a suportar carga na direção das fibras e, portanto, a rigidez nessa direção permanece inalterada. Os métodos não-seletivos desconsideram o modo de falha, como por exemplo Tsai-Wu, e degradam todas as propriedades do material após atingir o critério de falha.

Existem modelos de degradação mais sofisticados que utilizam teorias de mecânica da fratura (Joffe, et al., 2001) na determinação do limite de abertura de uma trinca para sua propagação catastrófica. Complementar a isso, ferramentas estatísticas de distribuição e probabilidade acumulada de falhas são utilizadas para efetuar uma degradação de forma contínua em função da deformação (Edgren, et al., 2004; Joffe, et al., 2001). Esses métodos permitem a utilização de uma malha de elementos finitos menos refinada, mas ainda assim elevam o esforço computacional por exigirem cálculos complementares para a determinação das propriedades do material e convergência a cada iteração.

## **2.9 Resultados Experimentais**

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais obtidos em ensaios unidirecionais, em laminados reforçados por fibra de carbono, de lâminas finas (Arteiro, et al., 2013). O referido trabalho teve como objetivo investigar o efeito de entalhes e furos sobre a resistência de laminados constituídos de lâminas finas fabricados através da técnica de espalhamento de fibras por jateamento de ar, previamente citada.

Duas configurações de laminados foram investigadas, ambas utilizando o sub-laminados de laminas finas [0/-45] C-PLY™ T700 NCF da Chromarat, com densidade de 75g/m<sup>2</sup> por lâmina. O Laminado 1 é [(0/-45)/(90/45)]6T, com espessura total de 2,0 mm, e o Laminado 2 é [(0/-45)/(45/0)/(90/45)/(-45/90)]s com espessura total de 1,3mm, sem as costuras. Cada lâmina possui a espessura de 0,08mm.

Os corpos de prova foram analisados em carregamentos de tração e compressão através de extensômetros e correlação por imagem digital. Nos corpos de prova sob compressão foram utilizados extensômetros em ambos os lados para detectar a ocorrência de flambagem.

As resistências obtidas estão reunidas nas tabelas 2 e 3. No trabalho completo (Arteiro, et al., 2013) estão detalhados os valores médios para as resistências encontradas, junto com desvio-padrão, gráficos de tensão-deslocamento e tensão-deformação, além de imagens dos corpos fraturados e imagens processadas digitalmente, mostrando o campo de deformação logo antes da falha dos corpos de prova.

**Tabela 2** - Resistências obtidas para o Laminado 1 (Arteiro, et al., 2013)

	Sem entalhe	Com Entalhe
$F_{1t}$ (MPa)	800,2	481,2
$F_{1c}$ (MPa)	540,2	285,7

**Tabela 3** - Resistências obtidas para o Laminado 2 (Arteiro, et al., 2013)

	Sem entalhe	Com Entalhe
$F_{1t}$ (MPa)	710,3	475,9
$F_{1c}$ (MPa)	464,5	299,7

$F_{1t}$  e  $F_{1c}$  são a resistência a tração e compressão, respectivamente.

Para o teste em espécime entalhado, em ambos os laminados, a trinca transversal ficou restrita aos extremos do entalhe e, especialmente para o Laminado 1, a extensão do dano é bem reduzida, revelando a habilidade de laminados de laminas finas de retardarem trincas transversais, mesmo na presença de entalhes. O dano desenvolvido na vizinhança do entalhe, para ambos laminados, logo antes da propagação instável da trinca possui um efeito benéfico na resposta mecânica desses laminados entalhados. Isso porque as tensões na vizinhança do entalhe são redistribuídas, dissipando a energia, diminuindo a concentração de tensões e, por fim, aumentando a resistência e a tenacidade à fratura do Laminado 2 entalhado.

A Figura 14 mostra a zona de danos dos laminados, onde é possível observar que o Laminado 2 exibe uma zona de dano bem mais complexa, afetando extensamente as fibras e a matriz, além de estar espalhada em diferentes direções.

Nos laminados com furo aberto analisados, a razão entre a largura do espécime e diâmetro do furo é  $w/d=4$ .

Os resultados experimentais mostraram o efeito do diâmetro do furo, conforme as tabelas 4 e 5. Foi notada uma redução da resistência do laminado entalhado com o aumento do diâmetro do furo. Esse efeito detectado é causado pelo desenvolvimento da zona de processo de fratura, que redistribui as tensões e dissipa a energia. Em espécimes pequenos, o tamanho da zona de processo da fratura é importante quando comparada com as dimensões do espécime, e a tensão média na fratura plana irá tender para a resistência do laminado liso. De outra forma, para grandes espécimes o tamanho relativo da zona de processo de fratura é bem pequena e permanece contida na vizinhança do furo, resultando em uma resposta mecânica característica de material frágil.

**Tabela 4** - Resistência obtidas para o Laminado 1 com furos abertos (Arteiro, et al., 2013)

	d=3mm	d=6mm	d=10mm	d=5mm	d=7mm
F <sub>1t</sub> (MPa)	431,8	384,9	366,8	-	-
F <sub>1c</sub> (MPa)	-	-	-	267,8	247,1

**Tabela 5** - Resistência obtidas para o Laminado 2 com furos abertos (Arteiro, et al., 2013)

	d=3mm	d=6mm	d=10mm	d=5mm	d=7mm
F <sub>1t</sub> (MPa)	448,1	389,9	380,4	-	-
F <sub>1c</sub> (MPa)	-	-	-	276,0	237,6

## 2.9 Resultados Numéricos

Muitos trabalhos são executados utilizando dados determinísticos em relação as propriedades do material adotado. Apesar dessa abordagem ser eficiente por não considerar a incerteza e os resultados decorrentes dos mesmos serem diretos, não é adequado para comparação com dados experimentais.

Estes por sua vez são capazes de fornecer, na maioria dos casos, os dois principais parâmetros estatísticos para avaliação de incertezas, que são a média e o desvio padrão. (Fong, et al., s.d.)

As incertezas a serem introduzidas em um modelo mais refinado devem ser bem escolhidas para não tornar o problema muito complexo de ser analisado e gerar conclusões incertas (Fong, et al., s.d.). Os parâmetros a serem variados no estudo de materiais compostos podem ser desde propriedades mecânicas como rigidez em cada direção, coeficiente de Poisson, resistências, mas também parâmetros geométricos, como desalinhamento das fibras e comprimentos característicos. Um bom conhecimento do comportamento mecânico, baseado em experimentos, contribui para a seleção dos parâmetros variáveis na análise numérica com o objetivo desejado.

Com respeito à variação de parâmetros de propriedades mecânicas de materiais, segundo o que está apresentado no manual (MIL-HDBK-17, 2002), existem duas bases estatísticas para determinação desses parâmetros:

- "Valores base A: Propriedade do material estatisticamente determinada; um limite inferior de 95% para confiança no primeiro percentil de uma população específica de medidas" ou, "um limite inferior de tolerância de 95% até os 99% superiores (cobertura) de uma população específica".

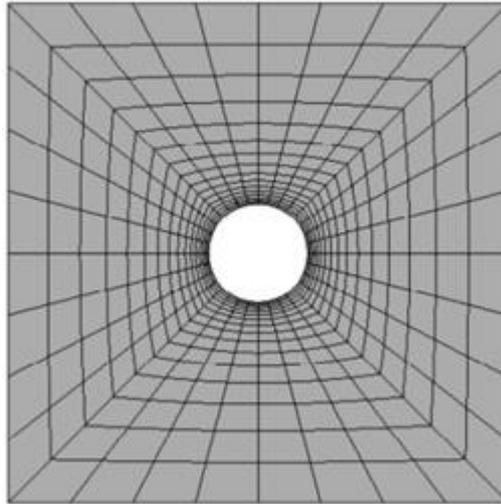
- "Valores base B: Propriedade do material estatisticamente determinada; o limite inferior de 95% para confiança no décimo percentil de uma população específica de medidas" ou, "um limite inferior de tolerância de 95% até os 90% superiores (cobertura) de uma população específica".

Um trabalho de referência, através de simulação numérica de painel com furo aberto (Fong, et al., s.d.) (Figura 18), utilizou o tratamento estatístico das resistências das lâminas, juntamente com a técnica utilizada em projetos de experimentos para produzir envelopes de falhas com incertezas, e ampliar a análise para os admissíveis na base A e B para aplicação aeronáutica.

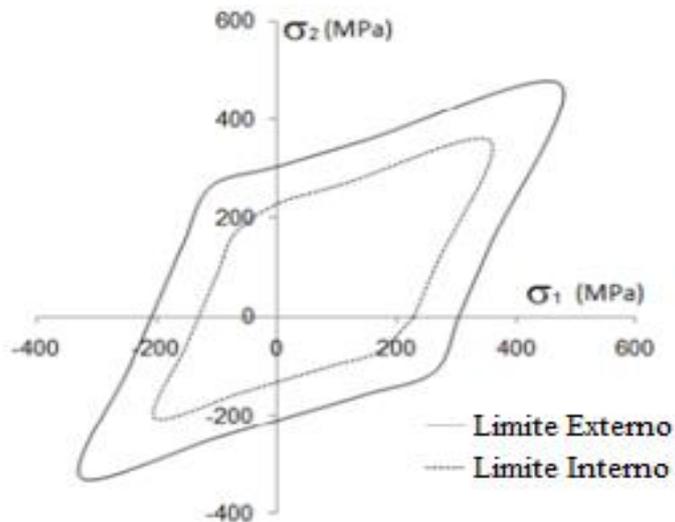
O laminado empregado no modelo de elementos finitos (Fong, et al., s.d.) é reforçado por fibras de carbono, quase-isotrópico com empilhamento  $[45/90/-45/0]_4s$  IM7/8552.

A Figura 19 sumariza através de um envelope de falha com os limites superiores e inferiores para com uma cobertura de 95% dos casos em uma distribuição normal.

Posteriormente, considerando a distribuição normal dos resultados, os limites foram modificados para atender aos admissíveis na base A e B, e restringir o envelope de falha conforme a Figura 20.

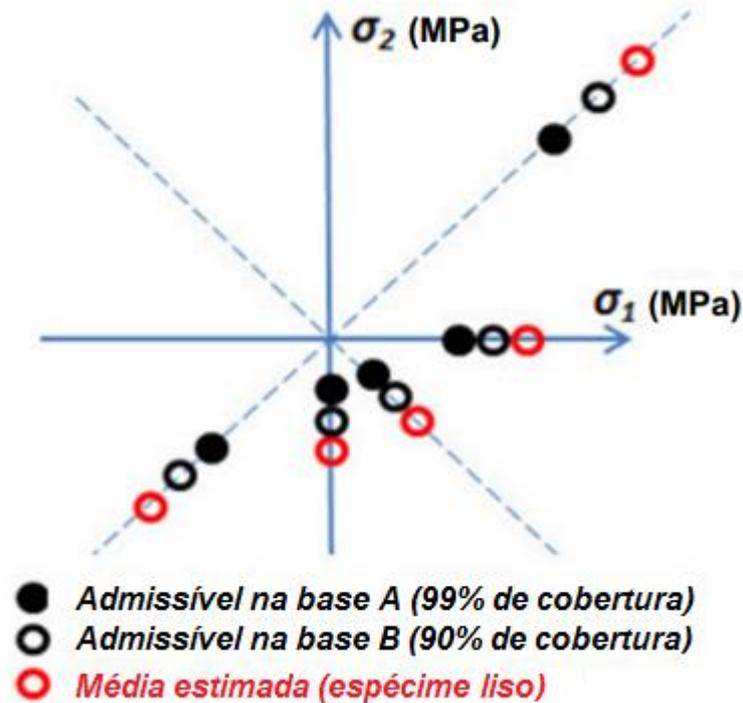


**Figura 18** - Malha de elementos finitos para espécimen com furo aberto (*Fong, et al., s.d.*)



**Figura 19** - Limites para possíveis envelopes de falha considerando todas as variações estatísticas, critério de falha de Tsai-Wu (*Fong, et al., s.d.*)

Desse modo, é preciso conhecer qual distribuição estatística melhor se adequa a uma população submetida a teste de resistência. A primeira opção, e mais clássica, é a distribuição normal, mas somente os dados experimentais irão revelar se a escolha foi adequada ou se o conjunto de dados se adapta melhor a outras distribuições não-normais, como a distribuição Weibull, utilizada para suportar dados de densidade de trincas transversais em compostos  $0^{\circ}/90^{\circ}$  (JOFFE, KRASNIKOVS e VARNA, 2001) e gerar um modelo de dano progressivo.



**Figura 20** - Valor médio e os valores admissíveis das duas bases para cada condição de carregamento (Fong, et al., s.d.)

### 2.9.1 Modelos avançados

Vários modelos com uma maior complexidade são utilizados na tentativa de captar com mais exatidão algum comportamento do laminado. Geralmente, quanto mais sofisticado é um modelo, maior a quantidade de parâmetros que devem ser fornecidos. Essa é uma grande restrição, não somente pela indisponibilidade de muitos dados necessários, mas também pelas dificuldades operacionais e financeiras na elaboração de ensaios que permitam obter as informações necessárias.

Uma modelagem através de elementos coesivos, e critério de falha baseado em energia de fratura (Chen, et al., 2013) foi utilizada para obter a resistência de laminados, computando o efeito da delaminação. Os resultados numéricos obtidos são muito coerentes com os experimentais, e alguns deles estão sumarizados na Tabela abaixo (Tabela 6).

**Tabela 6** - Efeito do escalamento da espessura da lâmina: diâmetro do furo  $d=3,175\text{mm}$ , lay-up:  $[45_m/90_m/-45_m/0_m]_s$  (Chen, et al., 2013)

Escalamento de espessura	Resistência (MPa)	
	Experimental	Numérico
m=1	570 (cv, 7,69%)	566,6 (-0,6%)
m=2	396 (cv, 5,18%)	410,8 (+3,7%)
m=3	275 (cv, 5,56%)	278,4 (+1,2%)

### 3 METODOLOGIA

Neste trabalho será estudado o efeito de concentradores de tensão, especificamente furos abertos, na resistência de laminados constituídos de lâminas unidirecionais. Os dados de entrada da análise se restringem aos obtidos em ensaios com carregamento unidirecional e, em corpos de prova sem entalhes.

Primeiramente, será analisado, através do método dos elementos finitos, uma placa de material composto, sem entalhe. Está será submetida à uma série de carregamentos, unidirecionais e bidirecionais. Os resultados unidirecionais servirão para comparação entre o valor atingido na simulação e o valor experimental. Adicionalmente, os casos bidirecionais serão utilizados na elaboração do envelope de falha para o material sem entalhe.

Um painel com furo aberto (Figura 18) também será simulado através do método dos elementos finitos submetido a várias configurações de carregamento. Os resultados dos casos de carregamento unidirecional, trativo e compressivo são utilizados para a avaliação do modelo em relação a ensaios experimentais unidirecionais. Não haverá tentativa de validação das simulações com carregamentos bidirecionais, já que não há dados experimentais para estes, devido aos respectivos ensaios possuírem dificuldades operacionais, serem mais caros e, portanto, seus resultados são menos comuns na literatura.

#### 3.1 Material

O laminado adotado nesse estudo é um NCF citado previamente (Arteiro, et al., 2013), e que possui dados de ensaios unidirecionais, para corpos de prova lisos e entalhados. A sequência de empilhamento é  $[(0/-45)/(45/0)/(90/45)/(-45/90)]_s$ , constituído por sublaminados [0/-45] C-PLY™ T700 NCF da Chromarat, com densidade de 75g/m<sup>2</sup> por lâmina. Cada lâmina tem 0,08 mm de espessura, totalizando 1,28 mm de espessura para o laminado, sem considerar a costura.

**Tabela 7** - Propriedades mecânicas da lâmina C-PLY™ T700/AR-2527

<b>E<sub>1</sub> [GPa]</b>	110	<b>F<sub>1t</sub> (MPa)</b>	2300	<b>V<sub>f</sub> [%]</b>	50
<b>E<sub>2</sub> [GPa]</b>	7,4	<b>F<sub>1c</sub> (MPa)</b>	1500	<b>E<sub>f</sub> [Gpa]</b>	210
<b>E<sub>12</sub> [GPa]</b>	4,2	<b>F<sub>2t</sub> (MPa)</b>	66	<b>X<sub>f</sub> [Mpa]</b>	4900
<b>v<sub>12</sub></b>	0,3	<b>F<sub>2c</sub> (MPa)</b>	220		
		<b>F<sub>6</sub> (MPa)</b>	93		

Geralmente, as análises numéricas são conduzidas com valores determinísticos para as propriedades do material, o que pode conduzir a erros de dimensionamento da estrutura, seja por conservadorismo ou confiança excessiva em um resultado de uma condição específica. Por conta disso, nesse trabalho também é investigado o efeito da dispersão nos valores das propriedades do material, especificamente as resistências da lamina lisa, sobre as resistências finais do laminado liso e entalhado.

Três combinações das resistências foram utilizadas para a análise da resistência do laminado. Uma das combinações compreende os valores médios de todas resistências com dispersão. Os outros dois conjuntos de propriedades concentram em pegar o valor mínimo para a dispersão assumida em todas as propriedades, enquanto que o último conjunto de propriedades reúne o valor máximo dessas resistências.

Os valores das propriedades do material utilizados para a investigação estão na Tabela 8 e foram assumidos os seguintes valores de dispersão para dois desvios-padrão, o que confere uma cobertura de 95% das ocorrências:  $\pm 14\%$  para X,  $\pm 21\%$  para X',  $\pm 11\%$  para Y,  $\pm 20\%$  para Y'. Estes valores foram assumidos baseados no que é obtido na prática e também utilizado no trabalho de análise numérica de (Fong, et al., s.d.). Neste trabalho, assim como na referência citada anteriormente, apenas estas quatro resistências foram adotadas para observação da influência da dispersão de seus valores sobre as resistências do laminado. As demais propriedades permaneceram inalteradas.

**Tabela 8** - Valores de resistência médio superior e inferior para as propriedades de interesse na lâmina

<b>Propriedade</b>	<b>Valores Médios</b>	<b>Valores para o Limite Inferior</b>	<b>Valores para o Limite Superior</b>
<b>F<sub>1t</sub> (MPa)</b>	2300	1978	2622
<b>F<sub>1c</sub> (MPa)</b>	1500	1185	1815
<b>F<sub>2t</sub> (MPa)</b>	66	58,74	73,26
<b>F<sub>2c</sub> (MPa)</b>	220	176	264

### 3.2 Software utilizado

Para o desenvolvimento das simulações, o software Abaqus foi utilizado para análise e criação da malha de elementos finitos. Complementarmente, subrotinas em FORTRAN com os critérios de falha de Tsai-

Wu e Máxima Tensão Admissível foram utilizados para o desenvolvimento do dano progressivo, para cada elemento de cada camada.

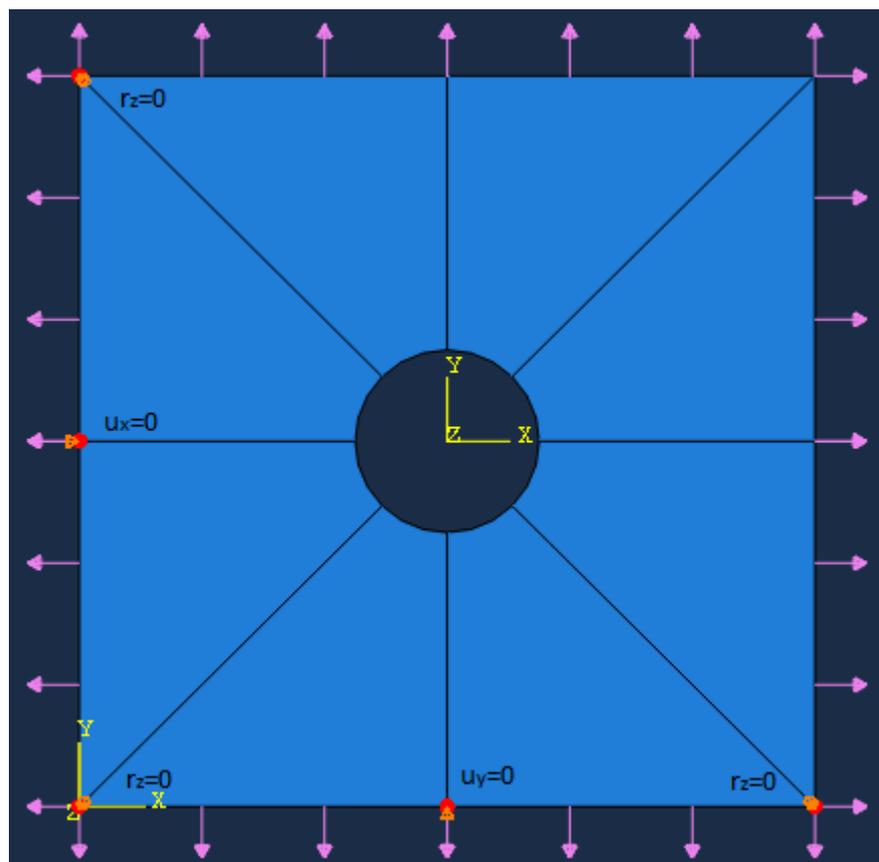
A simulação foi dividida em passos de carregamento de tal forma que existe um passo inicial que aproxime da falha da primeira lâmina e posteriormente pequenos incrementos de carga são adicionados até a falha última do laminado. Nesse ponto, vale ressaltar que quanto menor o incremento, maior será a capacidade de observação do desenvolvimento da falha no laminado, porém o esforço computacional se torna maior, o que exige uma escolha racional para o tamanho do incremento.

O objetivo deste trabalho é analisar a possibilidade de prever a resistência do material composto entalhado através de valores de resistências primários, obtidos em ensaios mais comuns. Diante disso, o modelo e o critério de falha ficarão limitados aos dados de entrada que esses ensaios conseguem fornecer, ou seja, as resistências a tração e compressão longitudinais e transversais, e resistência ao cisalhamento.

### **3.3 Definição da malha com furo**

Para a simulação dos modelos entalhados, um modelo com elementos de placa S4R foi utilizado. O elemento S4R é o nome utilizado no software comercial Abaqus para referir a um elemento de casca com 4 nós, que possui ordem de integração reduzida, converge tanto para solução com teoria de placas finas quanto espessas, funciona com deformações de membrana finitas e, possui controle de deformação de elemento em formato de ampulheta. O elemento S4R é robusto e de aplicação geral, o que permite sua utilização em uma ampla gama de problemas.

Uma representação do modelo está na Figura 21, onde estão as condições de contorno e o carregamento. Os dois pontos no meio das arestas esquerda e inferior restringem o deslocamento. Os três pontos vermelhos nos vértices restringem a rotação no plano. Como o carregamento é aplicado igualmente nas arestas opostas, essas condições de contorno são impostas para que o modelo não tenha movimento de corpo rígido e, tal que influenciem o mínimo possível no modelo, sem resultar em concentrações de tensão.



**Figura 21** - Condições de contorno e modelo utilizado para simulação da placa com furo centrado

Um dos objetivos deste trabalho é obter a sensibilidade da resistência do material em relação ao tamanho do furo. Para conseguir captar parte desse efeito, a partir de uma análise estática linear por passos, a malha utilizada para todos os casos, teve a mesma dimensão mínima de elemento. Utilizando esse artifício, é possível obter uma sensibilidade ao tamanho do furo, mas sem abordar critérios de falha que exijam dados de entradas de obtenção mais complexa, como energia de fratura do material (Chen, et al., 2013). Diante disso, o tamanho dos elementos na região próxima ao furo, possui o mesmo comprimento, e com aumento gradual a medida que vai se afastando da singularidade, até atingir as extremidades, onde é aplicado o carregamento.

Os modelos possuem uma razão de comprimentos entre o diâmetro do furo e a aresta da placa,  $w/d=4$ . Para todos os casos, o menor comprimento de elemento é de 0,1 mm, que está situado na borda do furo. Os valores utilizados para o diâmetro do furo são 3,0 mm, 6,0mm e 10,0 mm, pois estes possuem resultados experimentais para comparação (Arteiro, et al., 2013).

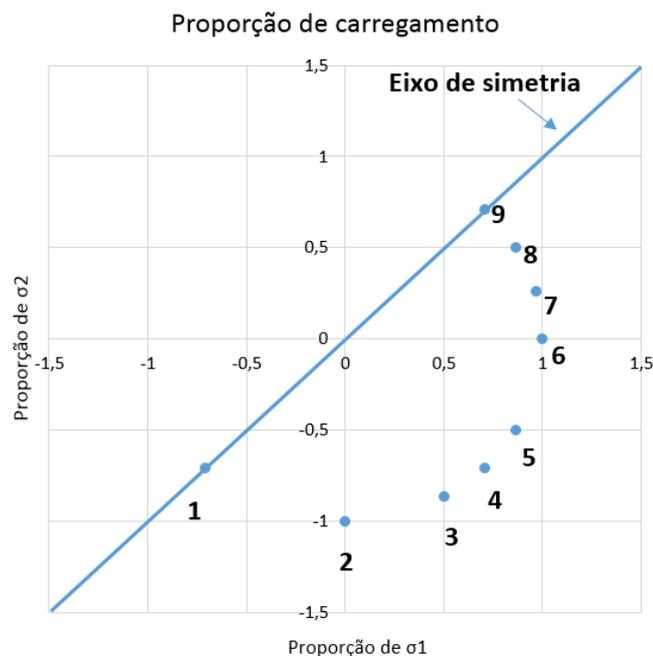
### 3.4 Carregamento

Para elaborar o envelope de falha 2D, e por se tratar de um laminado quase-isotrópico, pode-se reduzir a quantidade de casos a serem analisados, uma vez que o envelope de falha irá apresentar simetria através de um eixo criado a 45°, no primeiro quadrante.

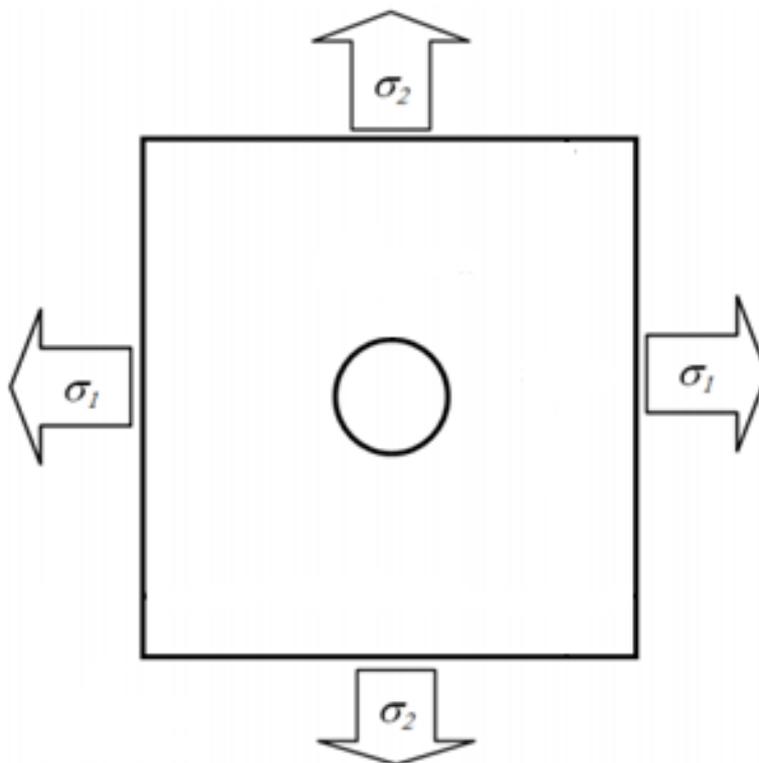
Os casos a serem simulados estão sumarizados na Tabela 9 em função da proporção entre a tensão longitudinal ( $\sigma_1$ ) e transversal ( $\sigma_2$ ) aplicada.

**Tabela 9** - Proporção de carregamento para os casos a serem analisados

Caso	Ângulo (°)	$\sigma_1$	$\sigma_2$
1	225	-0,707	-0,707
2	270	0,000	-1,000
3	300	0,500	-0,866
4	315	0,707	-0,707
5	330	0,866	-0,500
6	360	1,000	0,000
7	15	0,966	0,259
8	30	0,866	0,500
9	45	0,707	0,707



**Figura 22** - Proporção entre carregamentos  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$



**Figura 23** - Esquema de carregamento bidirecionais do laminado com furo aberto

Com a adição do carregamento bidirecionais torna-se possível a obtenção do envelope de falha do material. Para a determinação do envelope de falha, serão utilizados os critérios de falha de Tsai-Wu e máxima tensão admissível como determinantes para degradação progressiva do material. O critério de Tsai-Wu é bem eficiente computacionalmente, apesar de não levar em conta o modo de falha, o que lhe dá um caráter conservador. Para a aplicação aeronáutica não é desejado que um material tenha sofrido algum modo de falha, visto que isso reflete em alguma modificação geométrica na estrutura, o que dá maior credibilidade para o critério de Tsai-Wu.

A utilização do critério de falha da Máxima Tensão Admissível permite identificar o modo de falha, e essa vantagem é aproveitada através de um dano seletivo. Ao atingir a tensão limite normal em uma direção, são penalizadas a rigidez nessa direção, a rigidez de cisalhamento no plano e também o coeficiente de Poisson. Para a tensão de cisalhamento, ao atingir o limite admissível, todas as rigidezes do modelo são penalizadas, além do coeficiente de Poisson.

### 3.5 Dano progressivo

O procedimento adotado para a determinação da falha da primeira lâmina (FPF) é a tensão para a qual o primeiro elemento da primeira atinge o critério de falha. Ao acontecer a falha, o elemento, na lâmina falhada, tem suas propriedades penalizadas. A Tabela 10 mostra os fatores de penalização, para cada propriedade, no caso do critério de falha de Tsai-Wu. As tabelas 10 e 11 listam os valores finais das propriedades degradadas, tanto para o critério de Tsai-Wu, quanto para cada um dos estados de falha atingidos com o critério de falha de máxima tensão.

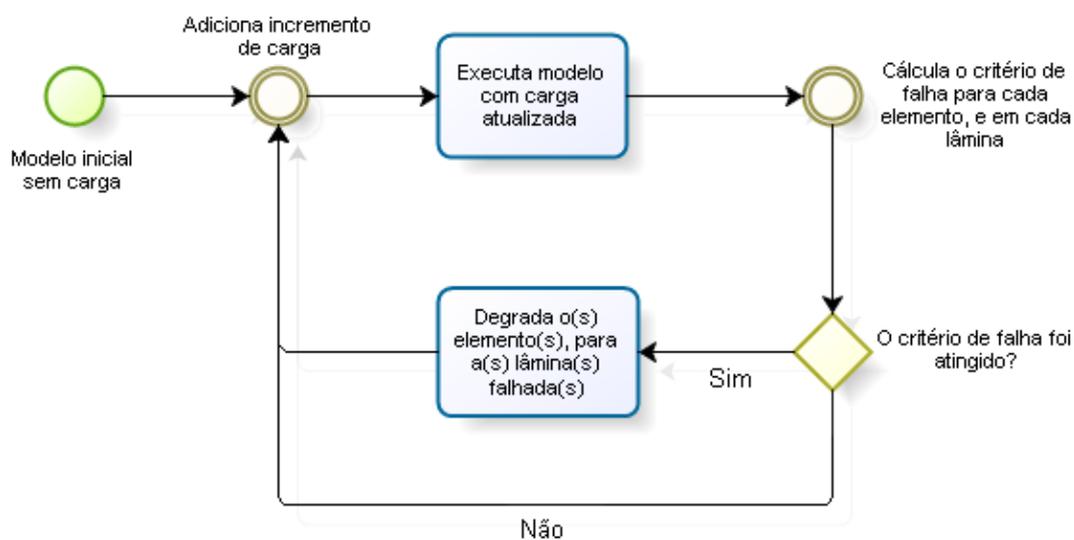
**Tabela 10** - Penalização das propriedades através do critério de falha de Tsai-Wu

Propriedade	Inicial	Degradada	Fator de penalização
<b>E1 [GPa]</b>	110	11	90%
<b>E2 [GPa]</b>	7,4	0,74	90%
<b>E12 [GPa]</b>	4,2	0,42	90%
<b>v12</b>	0,3	0	100%

**Tabela 11** - Penalização das propriedades através do critério de falha por máxima tensão admissível

Propriedade	Inicial	Falha do laminado		
		Direção 1	Direção 2	Direções 1 e 2
		Degradada	Degradada	Degradada
<b>E1 [GPa]</b>	110	11	110	11
<b>E2 [GPa]</b>	7,4	7,4	0,74	0,74
<b>E12 [GPa]</b>	4,2	0,42	0,42	0,42
<b>v12</b>	0,3	0	0	0

Quanto a falha última do laminado (ULF), está é determinada quando o primeiro elemento dos que compõe a aresta da placa violar o critério de falha em todas as camadas, pois significa que o corpo de prova falhou inteiramente, e é a situação encontrada no ensaio experimental.



**Figura 24** - Fluxograma de dano progressivo implementado

O trabalho aqui proposto consiste em utilizar abordagem com incertezas relacionadas ao material e, o método dos elementos finitos, para determinar envelopes de falha em materiais compostos de lâminas finas com furos-abertos, a partir das propriedades de laminados sem entalhe.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Laminado sem entalhe

Em primeiro estágio, os resultados obtidos numericamente são confrontados com valores experimentais (Arteiro, et al., 2013). Essa análise foi conduzida utilizando apenas o critério de falha de Tsa-Wu. Devido às limitações do ensaio, apenas os casos de carregamento unidirecional são considerados. A maior divergência é observada no valor de resistência a compressão (Tabela 12), o que pode ser explicado pelo funcionamento do critério de Tsai-Wu, que tem sua capacidade afetada em laminados com laminas unidirecionais e, com carregamento em orientação diferente das fibras.

**Tabela 12** - Resistências para carregamento unidirecional, critério de Tsai-Wu

<b>Resistência</b>	<b>Experimental</b>	<b>Numérico (ULF)</b>
<b>F<sub>1t</sub> (MPa)</b>	710,3	778,4
<b>F<sub>1c</sub> (MPa)</b>	464,5	739,6

Os envelopes de falha 2D permitem dar uma sensibilidade mais direta da resistência do material para cada condição de carregamento. Nota-se que a forma básica de um envelope do mesmo material é minimamente alterada devido a dispersão nos valores de resistência.

Para a falha da primeira lâmina a dispersão para os casos unidirecionais ficam em  $\pm 21\%$  para compressão em relação ao valor médio, e  $\pm 12,7\%$  para tração. Já para a falha última do laminado as resistências variam  $\pm 21\%$  para compressão, e  $\pm 13,9\%$  para tração.

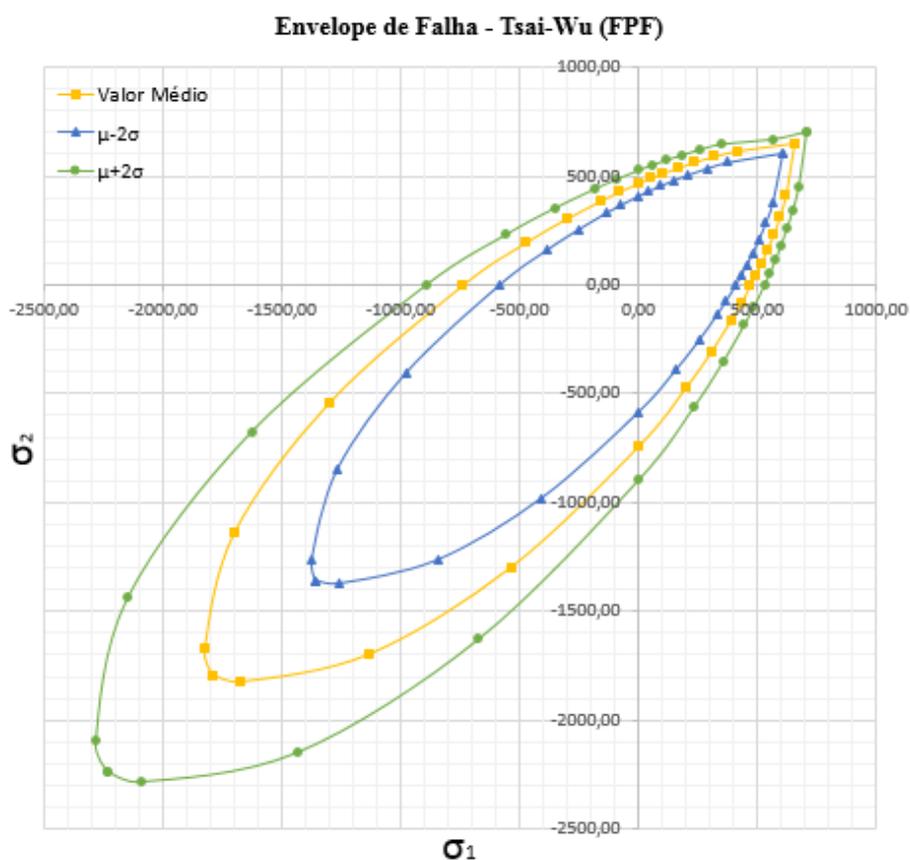
Para os casos de carregamento bidirecionais, três categorias serão abrangidas, ressaltando que o laminado é simétrico e quase-isotrópico e, portanto, o comportamento mecânico é simétrico em torno do eixo inclinado a  $45^\circ$  em relação ao eixo X. As três categorias de carregamento bidirecionais são; tração-tração, compressão-compressão e, tração-compressão. As tabelas abaixo (Tabela 13 e 14) mostram os limites mínimo e máximos de dispersão obtidos para cada um dos tipos de carregamentos citados, em FPF e ULF.

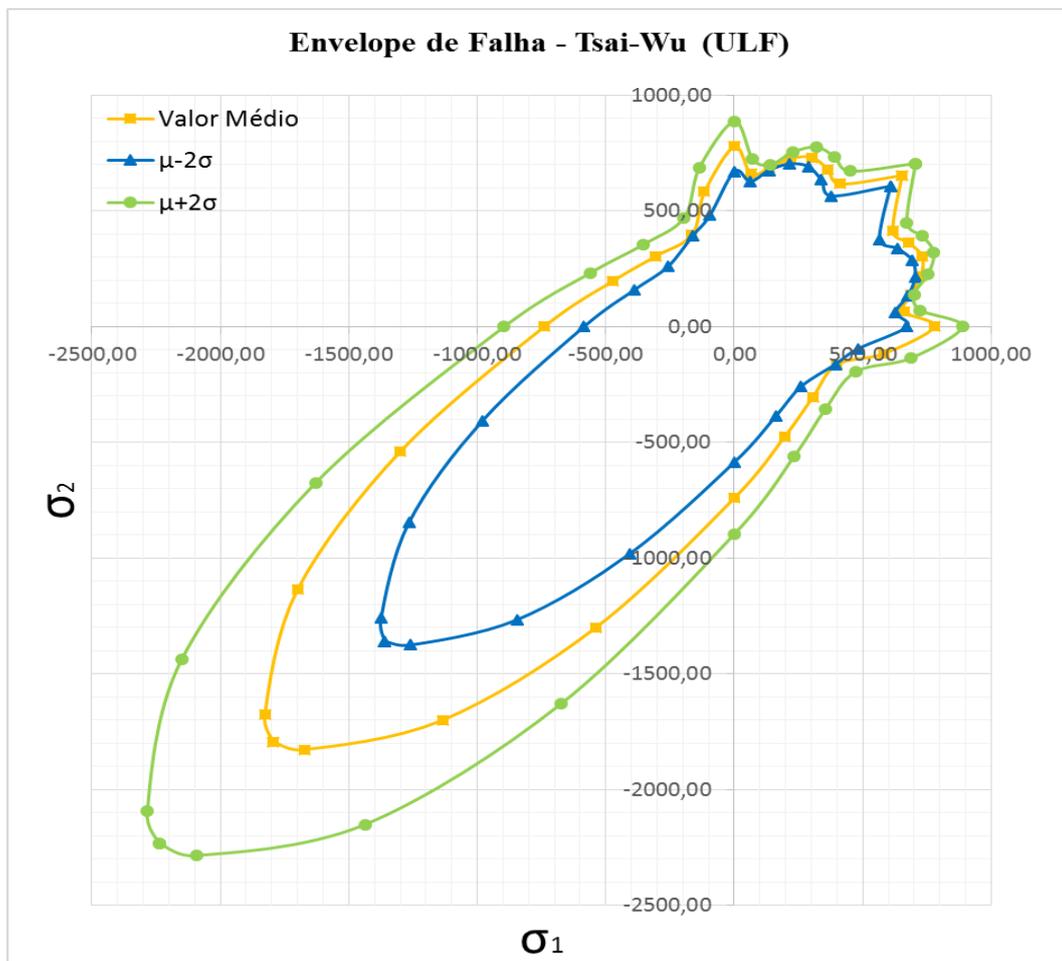
**Tabela 13** - Dispersão das resistências para falha da primeira lâmina, critério de Tsai-Wu

$\sigma_1$	tração		Compressão		tração	
$\sigma_2$	tração		Compressão		compressão	
<b>Variação Mínima</b>	-7,0%	+8,0%	-24,2%	+24,6%	-13,9%	+13,3%
<b>Variação Máxima</b>	-12,3%	+12,1%	-25,5%	+26,4%	-18,4%	+18,1%

**Tabela 14** - Dispersão das resistências para falha última do laminado, critério de falha de Tsai-Wu

$\sigma_1$	tração		Compressão		tração	
$\sigma_2$	tração		Compressão		compressão	
<b>Variação Mínima</b>	-1,5%	+1,9%	-24,2%	+24,6%	-1,2%	+18,6%
<b>Variação Máxima</b>	-8,4%	+9,8%	-25,5%	+26,5%	-17,5%	+17,7%

**Figura 25** - Envelope de Falha – Tsai-Wu (FPF)



**Figura 26** - Envelope de Falha – Tsai-Wu (ULF)

Observando os envelopes de falha FPF e ULF (Figuras 25 e 26), é notável que a região sob compressão em uma ou duas direções apresentam maior dispersão em magnitude da resistência do que a região apenas sob tração. Vale ressaltar que, na prática, a falha de um painel sob compressão ocorre bem antes dos valores apontados. Isto ocorre devido aos mecanismos de falha, como “*kinking band*”, falha da matriz, ou flambagem da estrutura. A situação se torna mais complicada se o laminado é assimétrico ou se submetido a flexão, o que conduziria o laminado a assimetria devido a falha individual das laminas ou tensão normal induzida por flexão, respectivamente.

Para o laminado estudado, se este for projetado para trabalhar sob tração, a variação da resistência é menor e um coeficiente de segurança de 12,3% absorveria uma possível dispersão da resistência do material em até 95% dos casos, para a falha da primeira lâmina. Em relação a compressão, não é possível

quantificar um valor confiável de resistência com a abordagem utilizada nesse trabalho. Qualitativamente, para um laminado composto de lâminas unidirecionais, a resistência a compressão possui uma variação em magnitude muito maior, o que demanda maior atenção para uso nesta condição. Por fim, o envelope de falha última do laminado, com o critério de Tsai-Wu, possui uma forma não intuitiva no primeiro quadrante em relação aos envelopes de falha última de laminados compostos de lâminas bidirecionais.

## 4.2 Laminados entalhados

Nessa etapa é apresentado os resultados para as simulações no modelo de placa com furo, com empilhamento [(0/-45)/(45/0)/(90/45)/(-45/90)]s C-PLY™ T700 NCF, para os diâmetros de 3,0 mm, 6,0 mm, e 10,0 mm.

Apenas dados relacionados a um carregamento unidirecional destes laminados estão disponíveis. A Tabela 15 mostra os valores obtidos numericamente, para os critérios de falha de máxima tensão admissível e, para os valores médios das propriedades do material, além da comparação com valores experimentais. Nesta Tabela é possível verificar que os valores de resistência encontrados numericamente em condição de carregamento unidirecional, para o critério de máxima tensão, permanecem quase constantes. Enquanto que para o menor diâmetro, o valor de resistência obtida é satisfatoriamente compatível, à medida que se aumenta o diâmetro a resistência numérica não sofre mudanças significativas, o que revela uma baixa sensibilidade do critério de falha ao tamanho do defeito inserido.

**Tabela 15** - Comparativo de resistências tratativas unidirecionais para os valores médios das propriedades para tração unidirecional, critério de máxima tensão admissível

Diâmetro [mm]	Resistência ULF (Máxima Tensão) [MPa]	Resistência ULF (experimental) [MPa]
<b>3,0</b>	432,0	431,8
<b>6,0</b>	448,4	384,9
<b>10,0</b>	439,7	366,8

A Tabela 16 apresenta os resultados com dispersão, para tração unidirecional, com cobertura de 95% para as propriedades da lâmina. Apesar da dispersão, não foi possível cobrir o valor de resistência obtido experimentalmente.

**Tabela 16** - Comparativo de resistências trativas unidirecionais para os valores mínimo e máximo para cobertura de 95% das propriedades da lâmina, critério de máxima tensão admissível

<b>Diâmetro [mm]</b>	<b>Resistência ULF (Máxima Tensão) [MPa]</b>	
	<b>Limite Inferior</b>	<b>Limite Superior</b>
<b>3,0</b>	415,6	451,2
<b>6,0</b>	426,6	465,9
<b>10,0</b>	441,9	468,1

Para compressão unidirecional, a Tabela 17, resume os resultados numéricos, e os valores experimentais da literatura (Arteiro, et al., 2013). Como o tamanho dos diâmetros são distintos para o caso compressivo, será analisado se o valor de resistência experimental está coberto por alguma das resistências obtidas experimentalmente, tal que o diâmetro experimental seja intermediário aos casos simulados.

No caso de compressão unidirecional, a situação é semelhante, pois não é observada sensibilidade ao tamanho do furo. O valor superior de resistência para o caso de diâmetro de 10,0 mm é contrário a tendência experimental, e é maior que os demais casos devido a flutuações na degradação dos elementos para a malha de elementos finitos do modelo para esse tamanho de furo.

**Tabela 17** - Comparativo de resistências compressivas unidirecionais para os valores médios das propriedades para compressão unidirecional, critério de máxima tensão admissível

<b>Diâmetro [mm]</b>	<b>Resistência ULF (Máxima Tensão) [MPa]</b>	<b>Resistência ULF (experimental) [MPa]</b>
3,0	295,3	-
5,0	-	276,0
6,0	293,1	-
7,0	-	237,6
10,0	315,0	-

**Tabela 18** - Comparativo de resistências compressivas unidirecionais para cobertura de 95% das propriedades da lâmina, critério de máxima tensão admissível

<b>Diâmetro [mm]</b>	<b>Resistência ULF (Máxima Tensão) [MPa]</b>	
	<b>Limite Inferior</b>	<b>Limite Superior</b>
<b>3,0</b>	252,9	353,1
<b>6,0</b>	247,2	345,6
<b>10,0</b>	253,8	378,4

#### 4.2.1 Resistência FPF

A subrotina de dano progressivo permite identificar se algum elemento está degradado e, portanto, foi utilizada para monitorar o momento da ocorrência da falha da primeira lâmina (FPF), evolução do dano e falha última do laminado (ULF). Envelopes de falha foram elaborados a partir das resistências alcançadas através do critério de falha de máxima tensão admissível.

Para todos os envelopes de falha da primeira lâmina obtidos (Figuras 27, 28 e 29), nota-se que a dispersão entre os valores de resistência em relação ao tamanho do diâmetro do furo, para um mesmo conjunto de propriedades do material, é muito pequena. Essa dispersão, para o laminado em estudo, é de no máximo 2%.

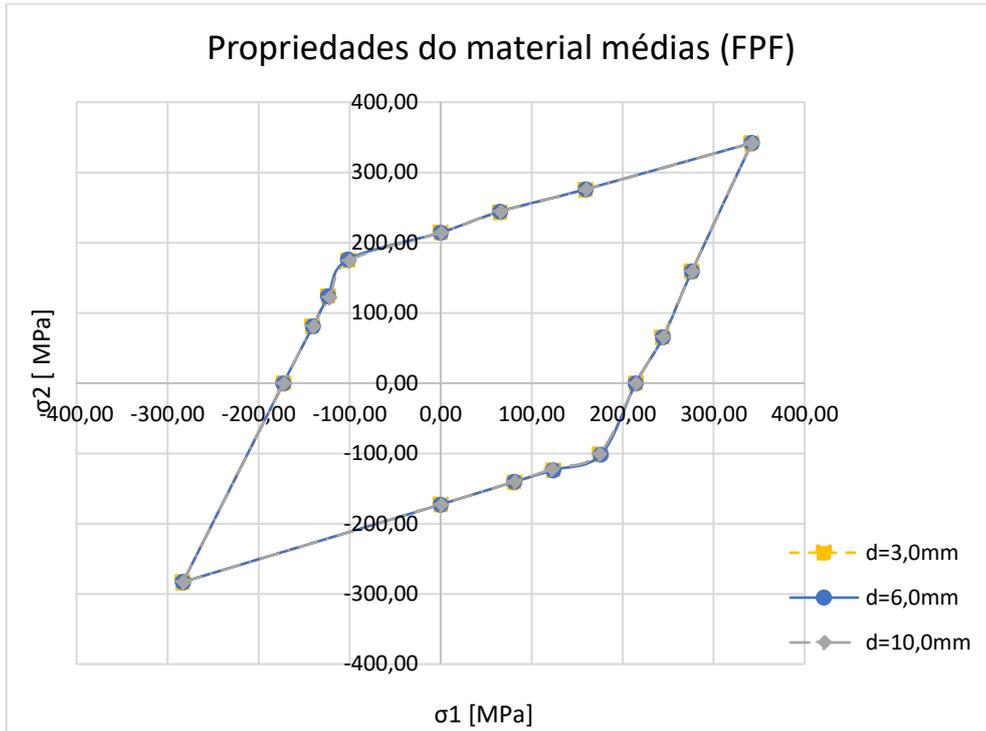


Figura 27 - Envelopes de falha FPF para propriedades médias, critério de máxima tensão admissível

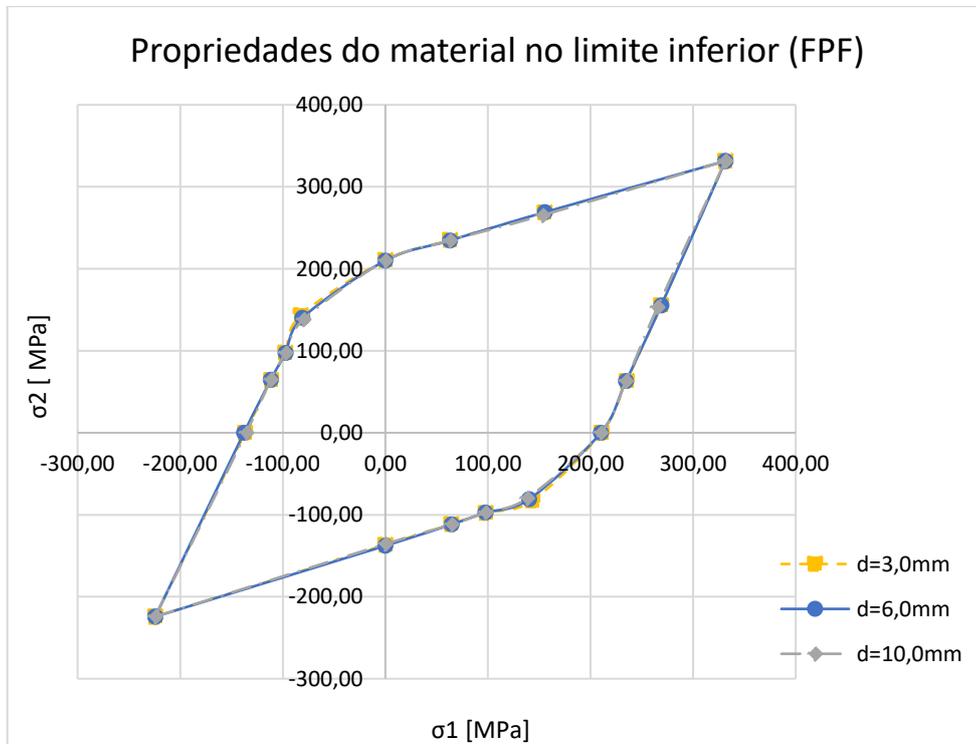
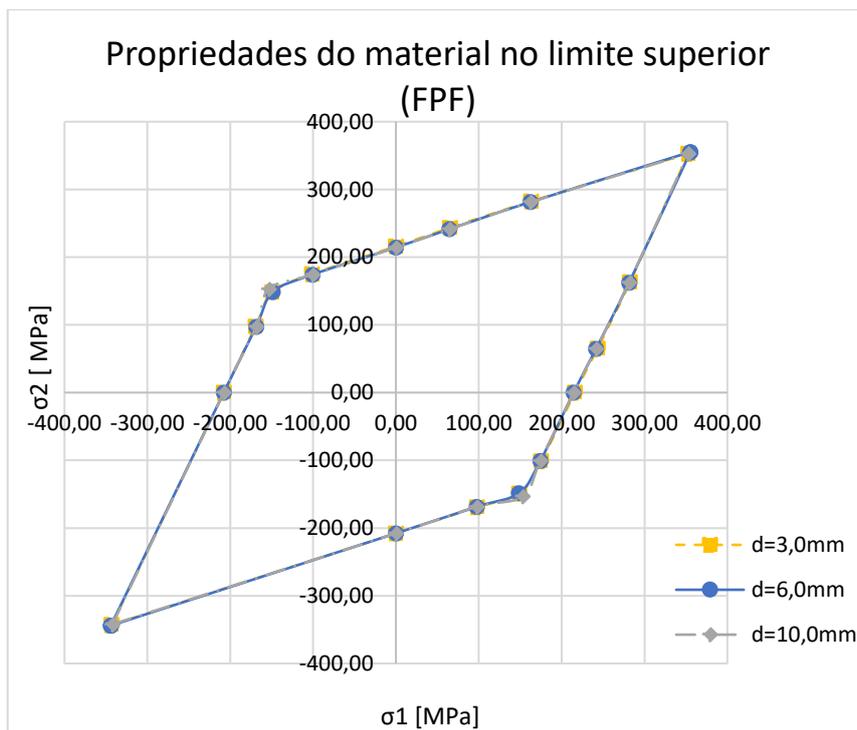
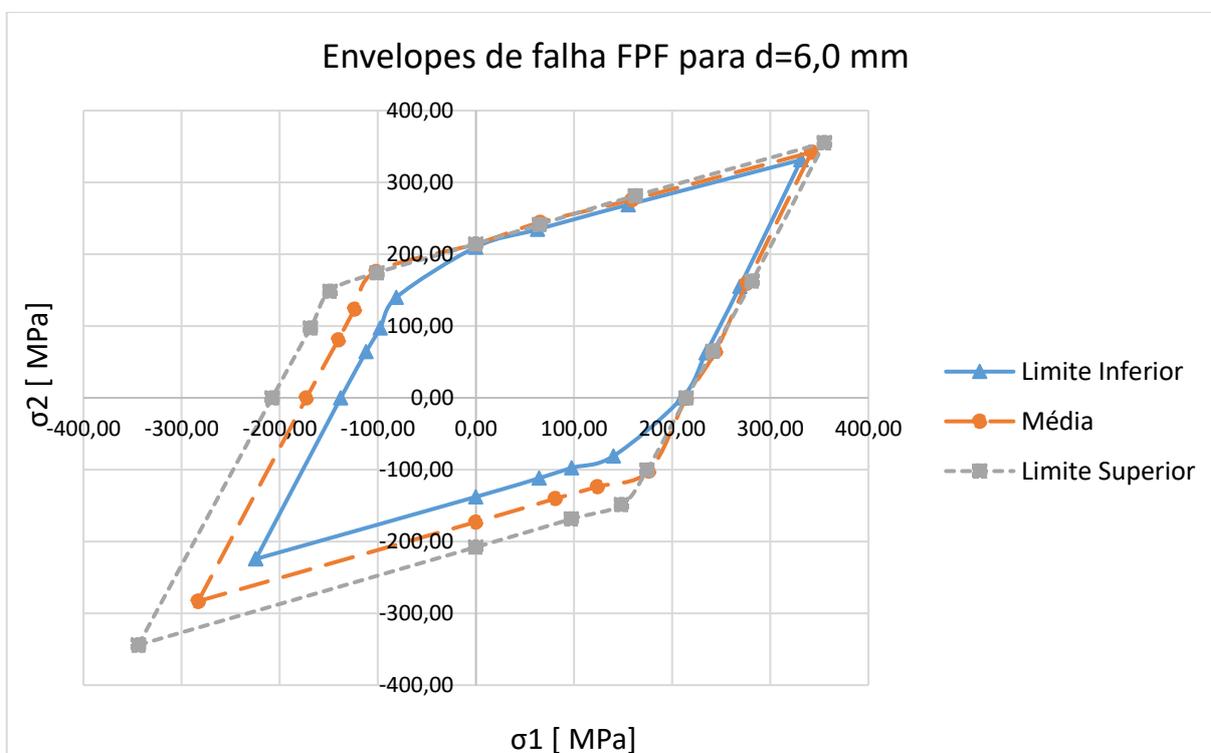


Figura 28 - Envelopes de falha FPF para propriedades no limite inferior, critério de máxima tensão admissível



**Figura 29** - Envelopes de falha FPF para propriedades no limite superior, critério de máxima tensão admissível



**Figura 30** - Envelopes de falha FPF para diâmetro d=6,0 mm, critério de máxima tensão admissível

A Figura 30 reúne os envelopes de FPF para o diâmetro de 6,0mm, para cada conjunto de propriedades. O envelope mais interno e o mais externo definem as fronteiras de resistência que cobrem 95% dos valores possíveis para as propriedades da lâmina.

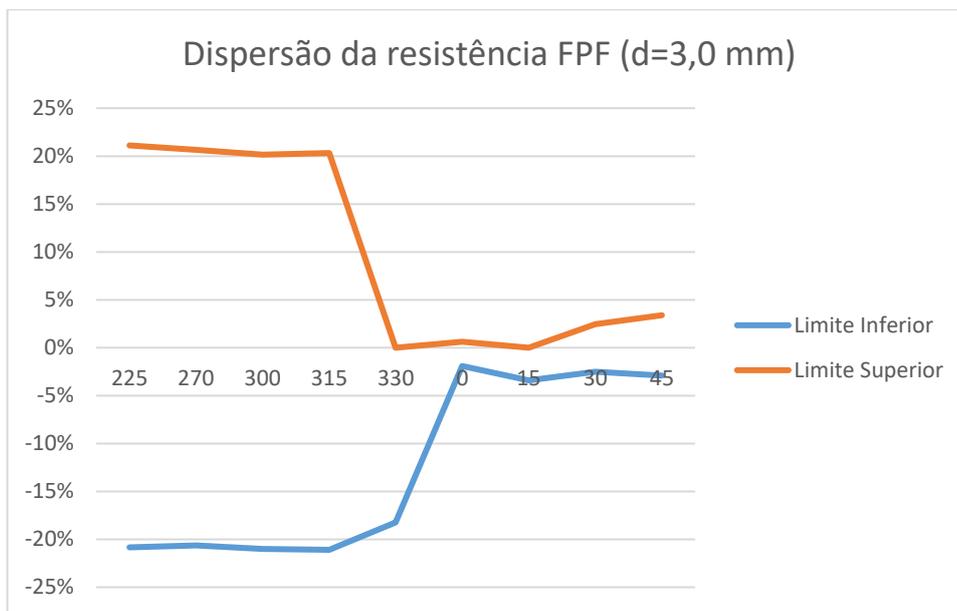
A Figura 30 juntamente com a Tabela 19 mostram uma dispersão maior na região de compressão do laminado, com máximo de 25% em relação ao valor médio. Na região de tração, a máxima dispersão é de 4%.

**Tabela 19** - Dispersão das resistências FPF em relação ao conjunto de propriedades médias, critério de máxima tensão admissível

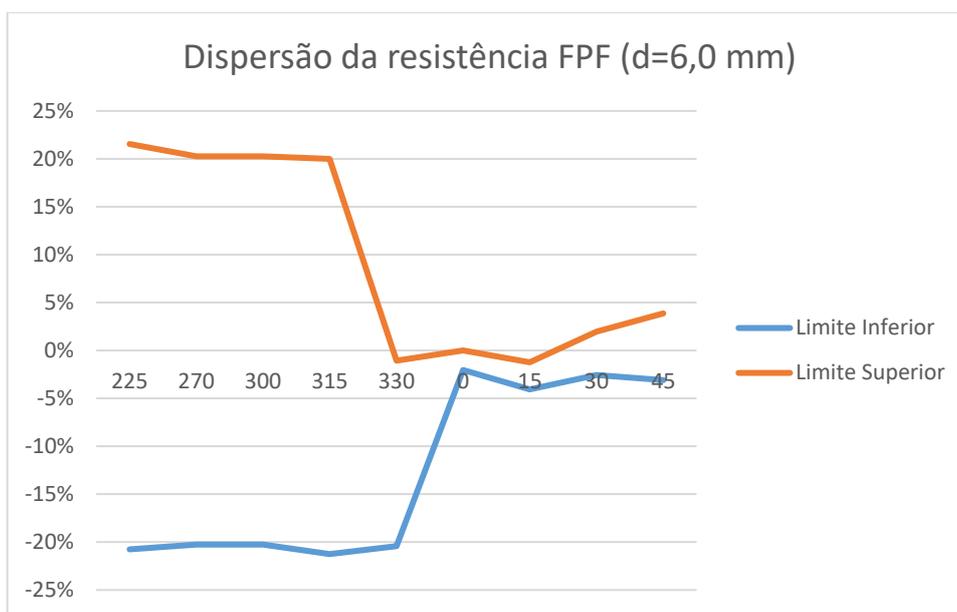
Ângulo	d=3,0 mm		d=6,0 mm		d=10,0 mm	
	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior
<b>225</b>	-21%	21%	-21%	22%	-21%	21%
<b>270</b>	-21%	21%	-20%	20%	-22%	20%
<b>300</b>	-21%	20%	-20%	20%	-20%	20%
<b>315</b>	-21%	20%	-21%	20%	-20%	25%
<b>330</b>	-18%	0%	-20%	-1%	-21%	0%
<b>0</b>	-2%	1%	-2%	0%	-2%	0%
<b>15</b>	-3%	0%	-4%	-1%	-4%	-1%
<b>30</b>	-3%	2%	-3%	2%	-4%	2%
<b>45</b>	-3%	3%	-3%	4%	-3%	3%
<b>Mínimo</b>	-21%	0%	-21%	-1%	-22%	-1%
<b>Máximo</b>	2%	21%	2%	22%	2%	25%

Os gráficos (Figuras 31, 32 e 33) mostram a dispersão no valor da resistência em relação ao valor médio. O eixo das abscissas contém o ângulo da carga, que fornece a proporção entre os carregamentos nas direções principais do laminado.

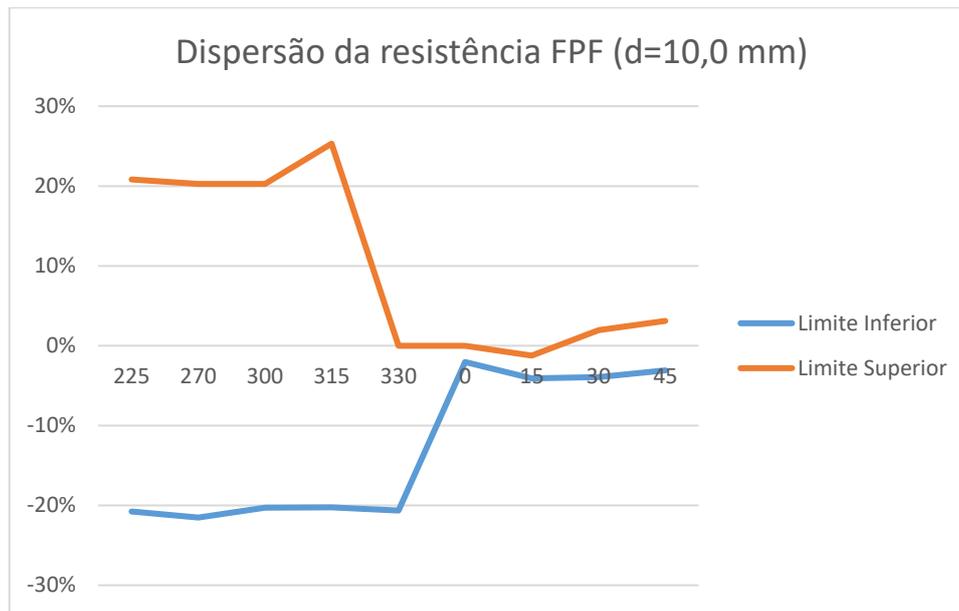
Observa-se que a variação da resistência é aproximadamente constante na região de 225° a 315°, em torno de 21%, ressaltando que as resistências são simétricas em torno do eixo inclinado a 45°. Para a faixa de 330° até 45° os valores de dispersão são muito menores, na maioria das vezes inferior a 5%.



**Figura 31** - Dispersão da resistência FPF em função do ângulo de carregamento, d=3,0 mm, critério de máxima tensão admissível



**Figura 32** - Dispersão da resistência FPF em função do ângulo de carregamento, d=6,0 mm, critério de máxima tensão admissível



**Figura 33** - Dispersão da resistência FPF em função do ângulo de carregamento,  $d=10,0$  mm, critério de máxima tensão admissível

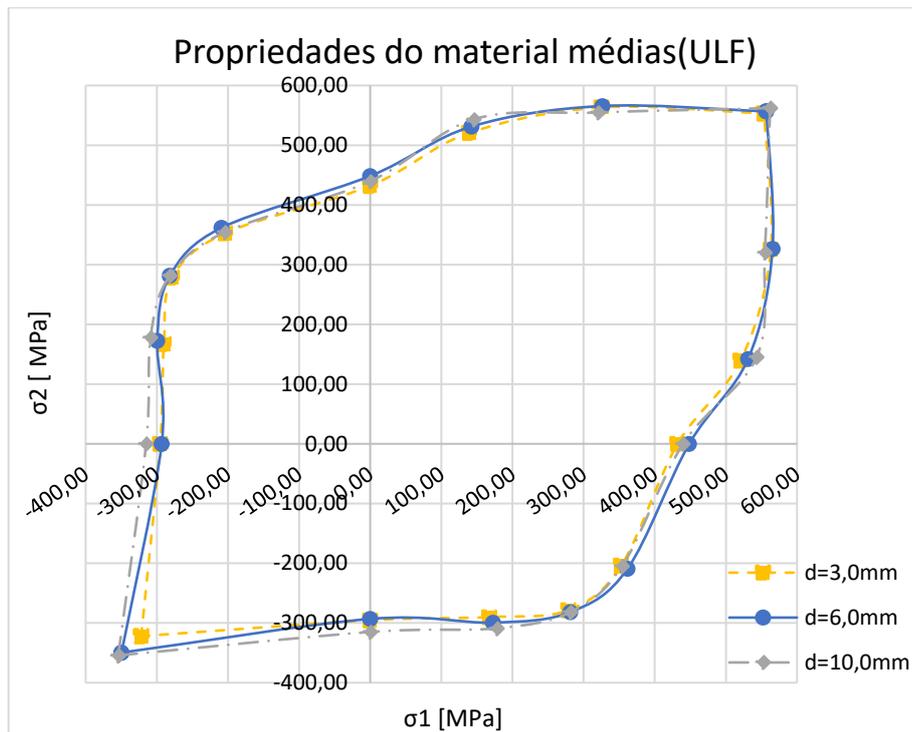
#### 4.2.2 Resistência ULF

O critério utilizado para determinar a falha última do laminado (ULF) é tal que exista a formação de um caminho de elementos, tal que todas as lâminas estejam falhadas, partindo da borda do furo até atingir a aresta externa do modelo. Uma vez que a resistência do corpo de prova experimental é dada como a tensão para a qual houve o seu rompimento completo, esse valor é o disponível na literatura e, então, a base para validação numérica.

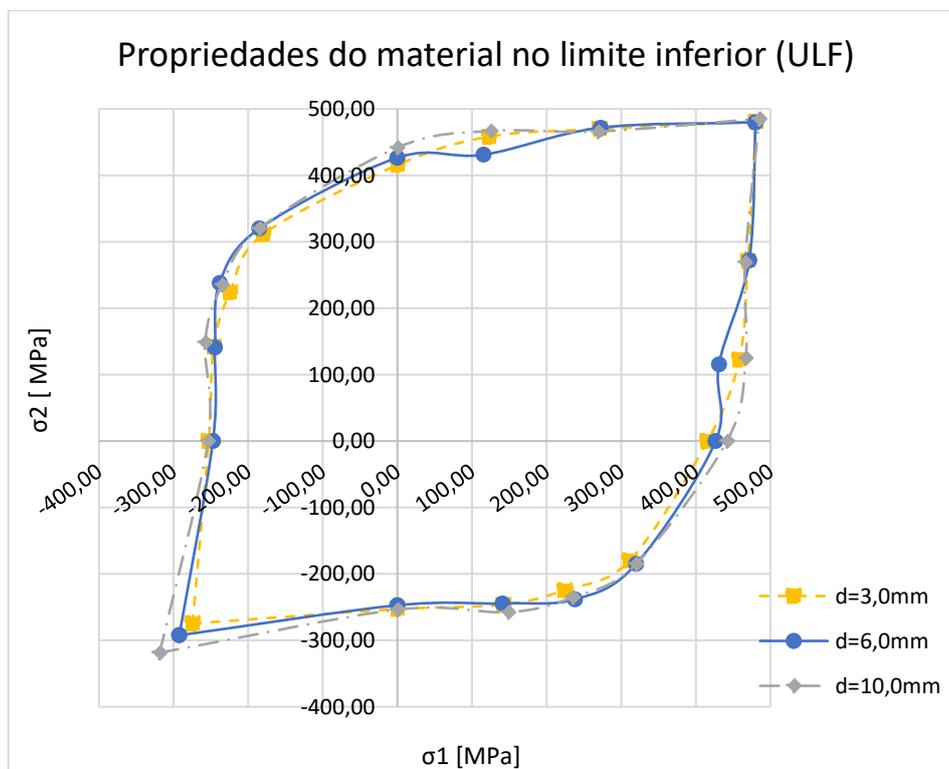
O modelo foi calibrado até restringir a quantidade de casos de carga ao mínimo possível para fornecer um esboço do envelope com algumas características relevantes.

Os envelopes de falha ULF mostrados nas figuras 34 a 36 mostram um comportamento mecânico favorável ao carregamento bidirecional em proporções iguais ( $\sigma_1=\sigma_2$ ).

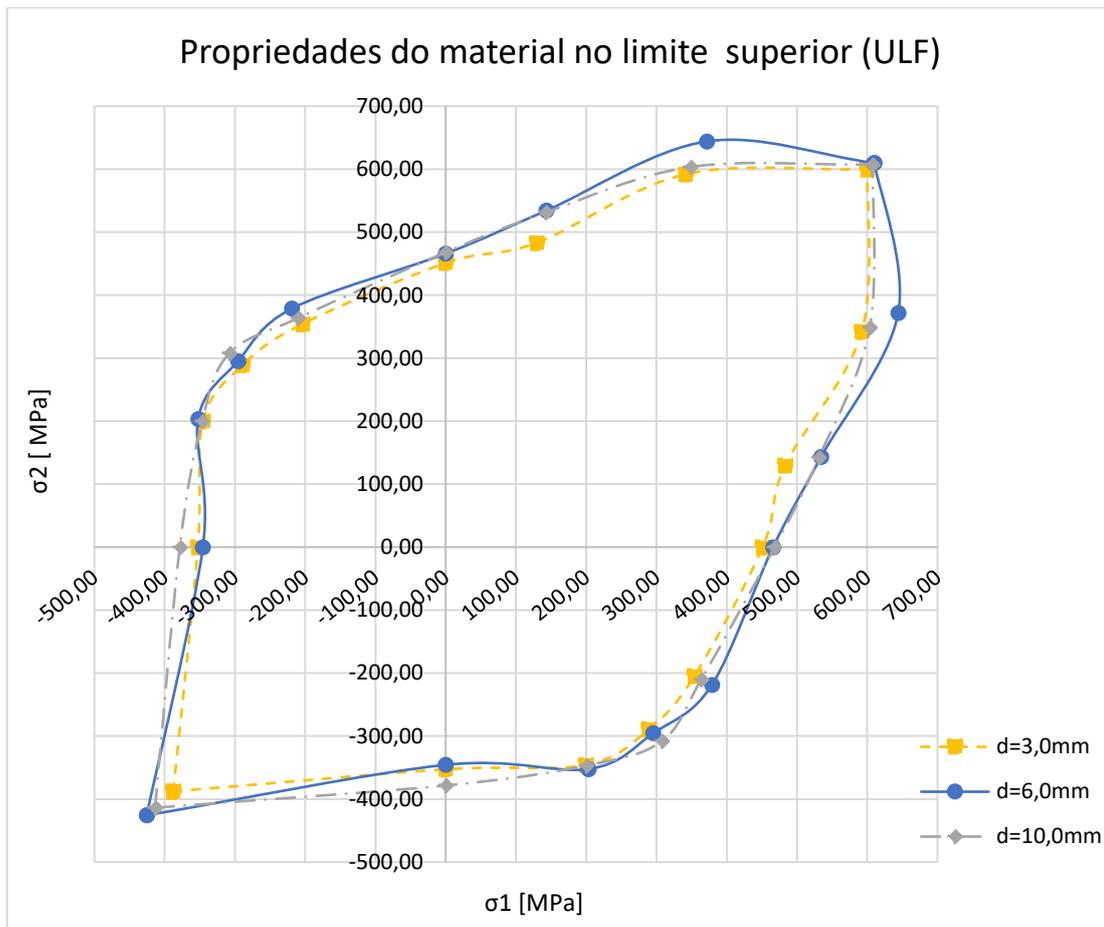
O modelo utilizado possui tamanho de elemento crescente da borda do furo para a extremidade da placa, o que induz à imposição de um defeito com maior extensão a medida que se propaga para as arestas. Também há dependência do incremento de carga a cada passo da simulação, o que contribui para uma correta degradação dos elementos e, portanto, coerência com a trajetória da fratura. Esses dois motivos justificam o porquê de algumas mudanças não intuitivas entre os gráficos, como a alternância entre o tamanho de furo que fornece maior resistência para cada conjunto de propriedades da lâmina.



**Figura 34** - Envelopes de falha ULF para propriedades médias, critério de máxima tensão admissível



**Figura 35** - Envelopes de falha ULF para propriedades no limite inferior, critério de máxima tensão admissível

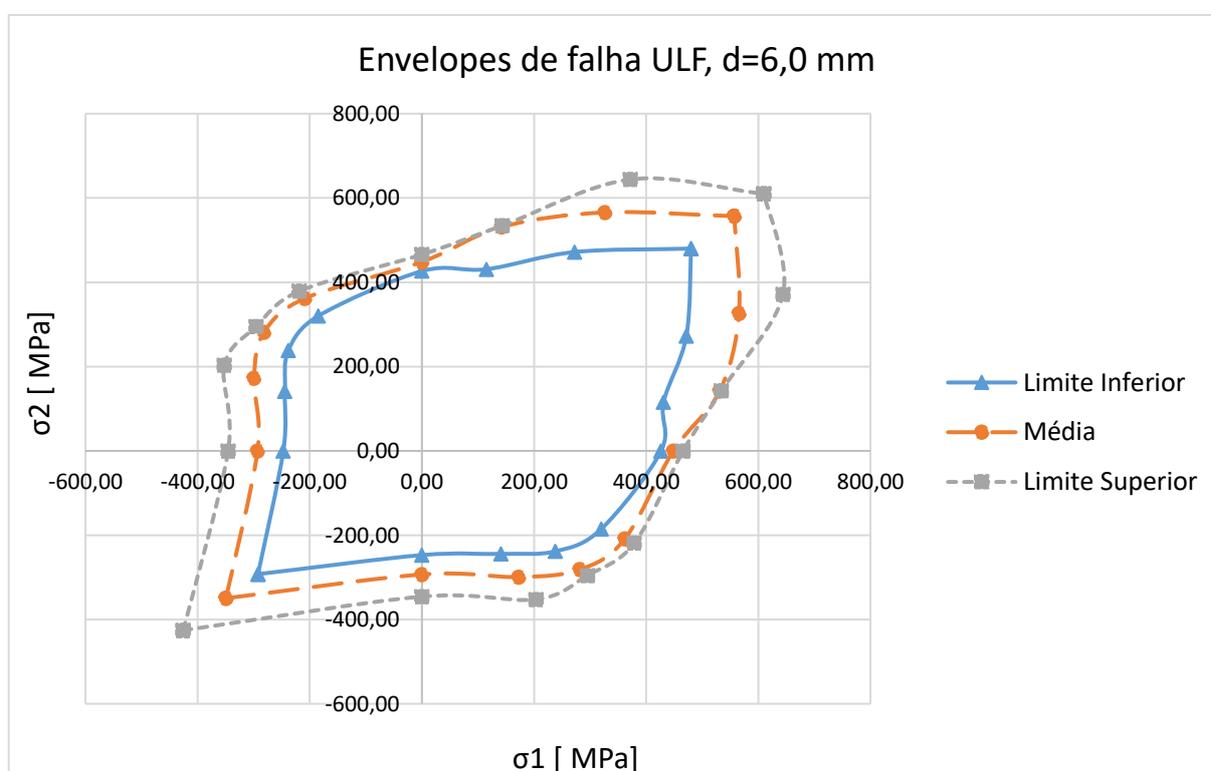


**Figura 36** - Envelopes de falha ULF para propriedades no limite superior, critério de máxima tensão admissível

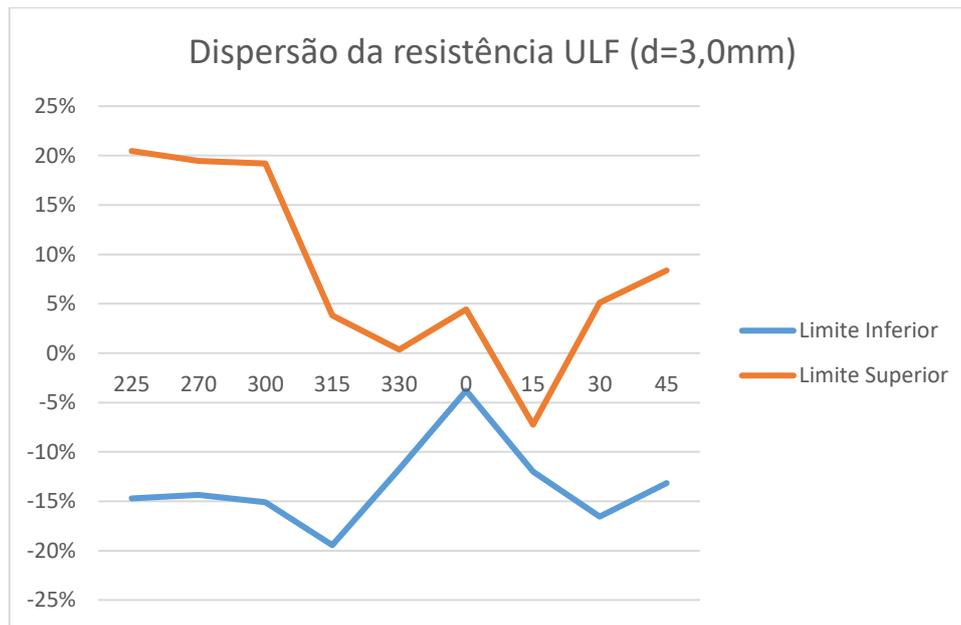
A variação da resistência do material em relação à dispersão das propriedades da lâmina está representada na Figura 37. Diferente da dispersão das resistências no caso de falha da primeira lâmina, aqui não há um valor de tendência para a dispersão, porém os valores na região sob carga biaxial tendem a uma maior dispersão, tanto em tração quanto a compressão. Para o caso de carga uniaxial, a dispersão máxima é de 20% em compressão e 6% em tração. A Tabela 20 detalha as dispersões para cada valor de diâmetro utilizado.

**Tabela 20** - Dispersão das resistências ULF em relação ao conjunto de propriedades médias, critério de máxima tensão admissível

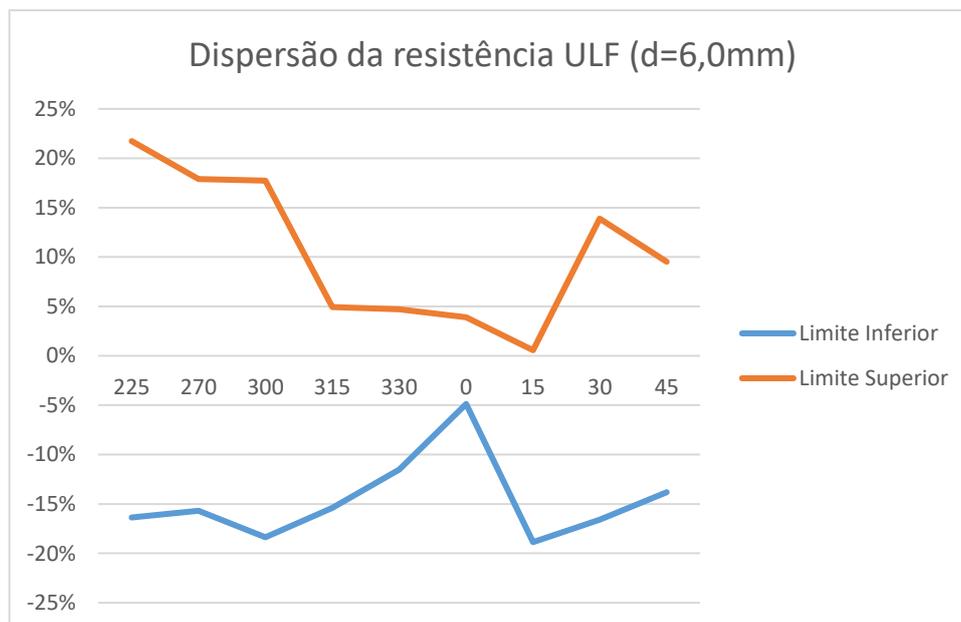
	d1		d2		d3	
	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior
<b>225</b>	-15%	20%	-16%	22%	-10%	17%
<b>270</b>	-14%	19%	-16%	18%	-19%	20%
<b>300</b>	-15%	19%	-18%	18%	-17%	12%
<b>315</b>	-19%	4%	-15%	5%	-16%	9%
<b>330</b>	-12%	0%	-12%	5%	-10%	3%
<b>0</b>	-4%	4%	-5%	4%	0%	6%
<b>15</b>	-12%	-7%	-19%	1%	-14%	-2%
<b>30</b>	-17%	5%	-17%	14%	-16%	9%
<b>45</b>	-13%	8%	-14%	10%	-14%	8%
<b>Mínimo</b>	-19%	-7%	-19%	1%	-19%	-2%
<b>Máximo</b>	4%	20%	5%	22%	0%	20%



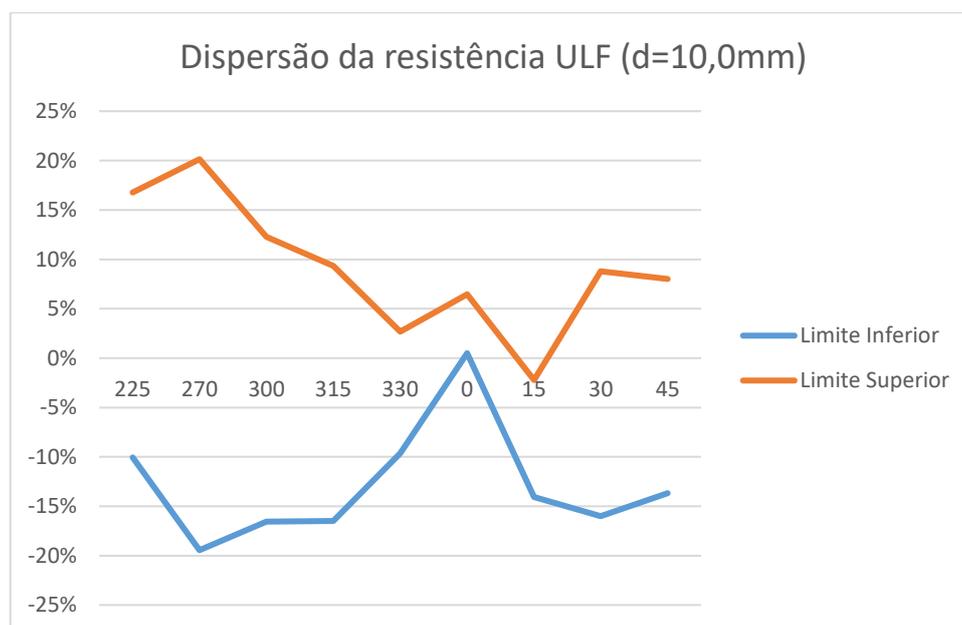
**Figura 37** - Envelopes de falha ULF, d=6,0 mm, critério de máxima tensão admissível



**Figura 38** - Dispersão da resistência ULF em função do ângulo de carregamento, d=3,0 mm, critério de máxima tensão admissível



**Figura 39** - Dispersão da resistência ULF em função do ângulo de carregamento, , d=6,0 mm, critério de máxima tensão admissível



**Figura 40** - Dispersão da resistência ULF em função do ângulo de carregamento, d=10,0 mm, critério de máxima tensão admissível

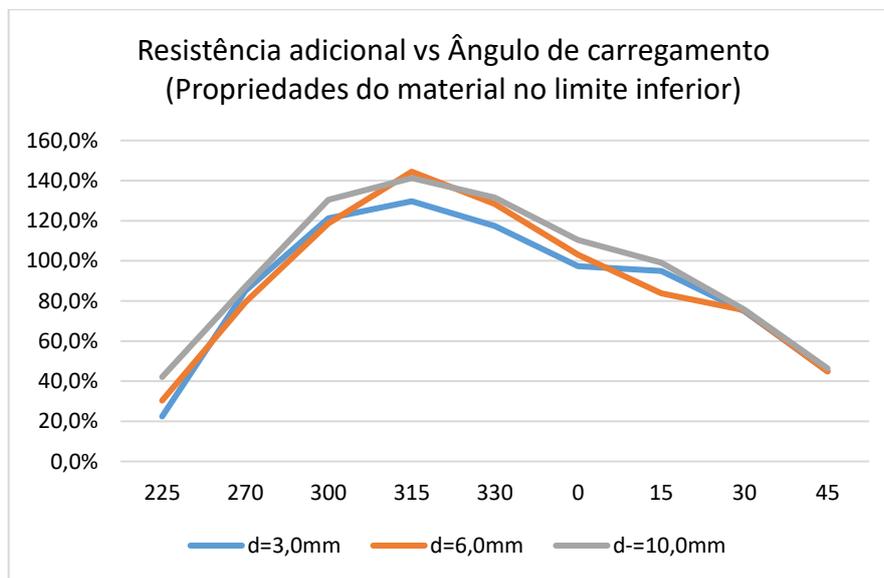
#### 4.2.3 Resistência adicional até ULF

O interesse em conhecer a resistência última do laminado está em saber o quanto de resistência adicional o laminado ainda consegue suportar entre a falha da primeira lâmina e fratura completa do laminado. Essa é uma informação importante em projetos de falha segura, com o objetivo de evitar excessivo reforço da estrutura para compensar uma carga que irá ocorrer remotamente. Por outro lado, trabalhar com a estrutura na região pós falha da primeira lâmina exige um monitoramento mais rigoroso da integridade da estrutura.

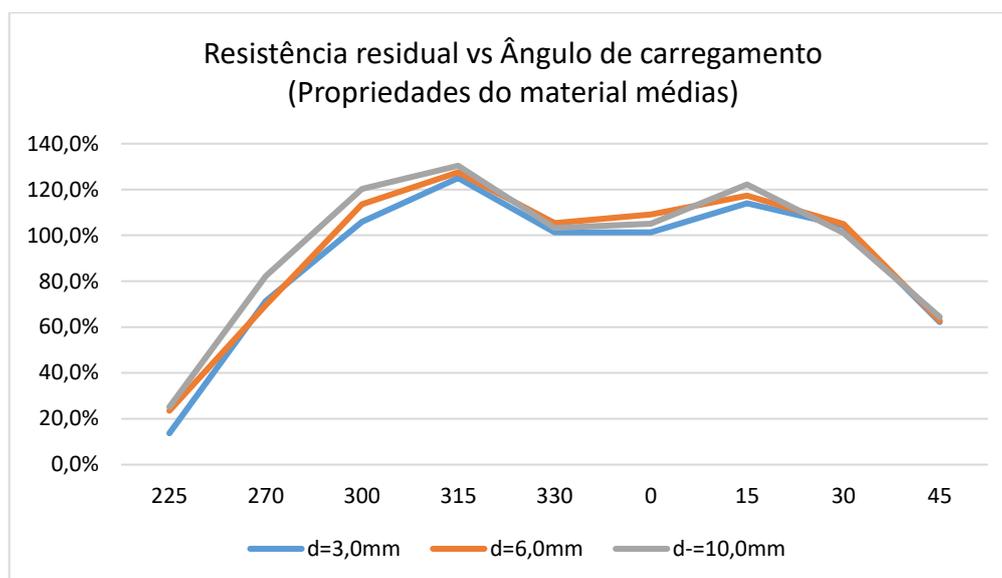
A Tabela 21 sumariza a resistência adicional que o laminado suporta após a falha da primeira lâmina, onde foi possível obter até 130% de resistência adicional. Os casos com carregamento combinado,  $\sigma_1=\sigma_2$ , obtiveram as menores margens de resistência adicional, com mínimo de 13,0%, no caso compressivo. A região em que existe carga de tração obteve resistência adicional mínima de 44,8%. As figuras 41 a 43 revelam um aumento da resistência adicional.

**Tabela 21** - Resistência adicional em relação a resistência FPF, até a fratura do laminado para critério de máxima tensão admissível

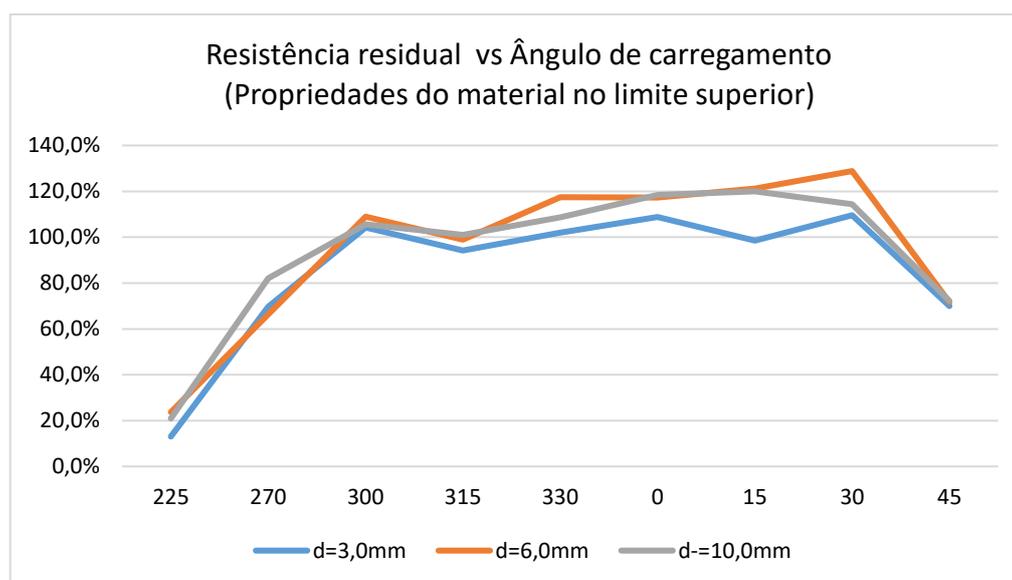
Diâmetro do furo	Limite Inferior			Propriedades Médias			Limite Superior		
	3,0mm	6,0mm	10,0mm	3,0mm	6,0mm	10,0mm	3,0mm	6,0mm	10,0mm
<b>225</b>	22,4%	30,3%	42,1%	13,7%	23,5%	25,1%	13,0%	23,7%	20,9%
<b>270</b>	85,0%	79,4%	87,1%	71,4%	69,6%	82,3%	69,7%	66,3%	82,1%
<b>300</b>	121,3%	118,6%	130,5%	105,9%	113,5%	120,3%	104,2%	109,0%	105,6%
<b>315</b>	129,7%	144,4%	141,3%	125,0%	127,5%	130,4%	94,2%	99,0%	101,0%
<b>330</b>	117,4%	128,4%	131,5%	101,4%	105,4%	103,3%	102,0%	117,4%	108,7%
<b>0</b>	97,4%	103,1%	110,4%	101,3%	109,2%	105,1%	108,9%	117,3%	118,4%
<b>15</b>	94,9%	83,8%	99,1%	114,0%	117,3%	122,2%	98,4%	121,3%	120,0%
<b>30</b>	74,9%	75,4%	75,7%	104,3%	104,9%	101,0%	109,6%	128,8%	114,4%
<b>45</b>	45,0%	44,8%	46,4%	62,1%	62,8%	64,3%	70,0%	71,6%	72,2%
<b>Mínimo</b>	22,4%	30,3%	42,1%	13,7%	23,5%	25,1%	13,0%	23,7%	20,9%
<b>Máximo</b>	130%	144%	141%	125%	128%	130%	110%	129%	120%



**Figura 41** - Resistência adicional em função do ângulo de carregamento, propriedades no limite inferior, critério de máxima tensão admissível

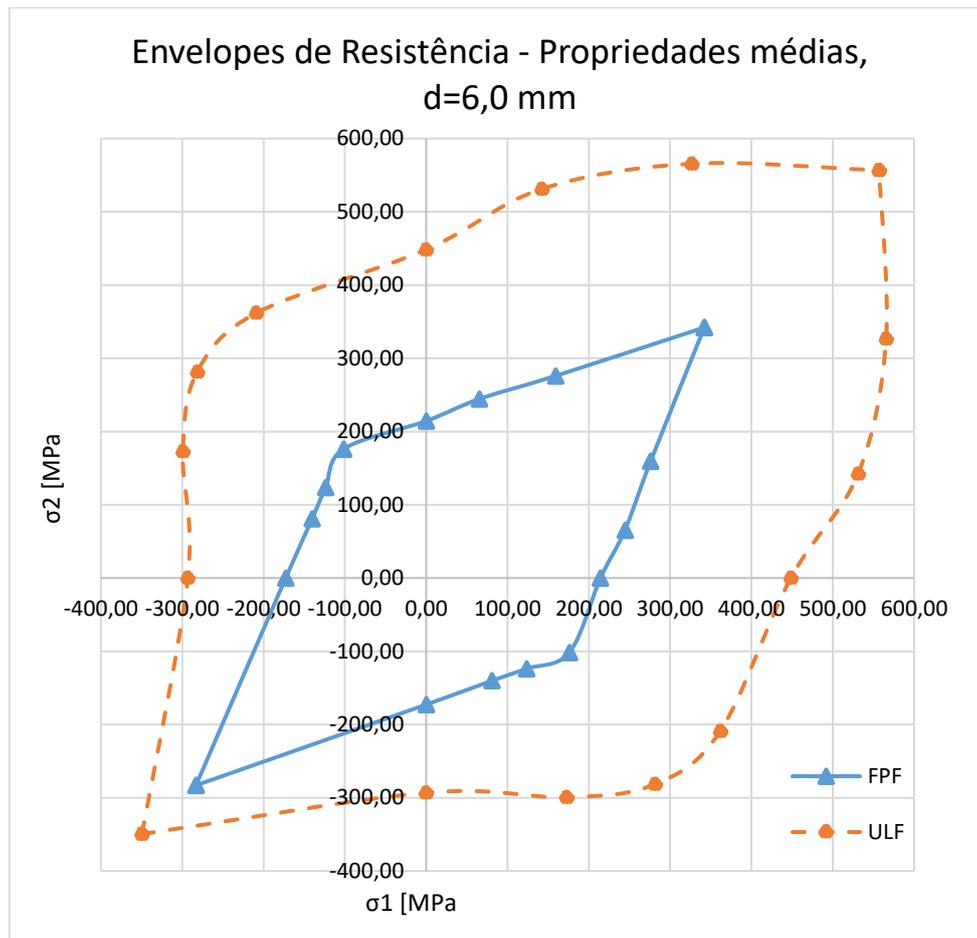


**Figura 42** - Resistência adicional em função do ângulo de carregamento, propriedades médias, critério de máxima tensão admissível



**Figura 43** - Resistência adicional em função do ângulo de carregamento, propriedades no limite superior, critério de máxima tensão admissível

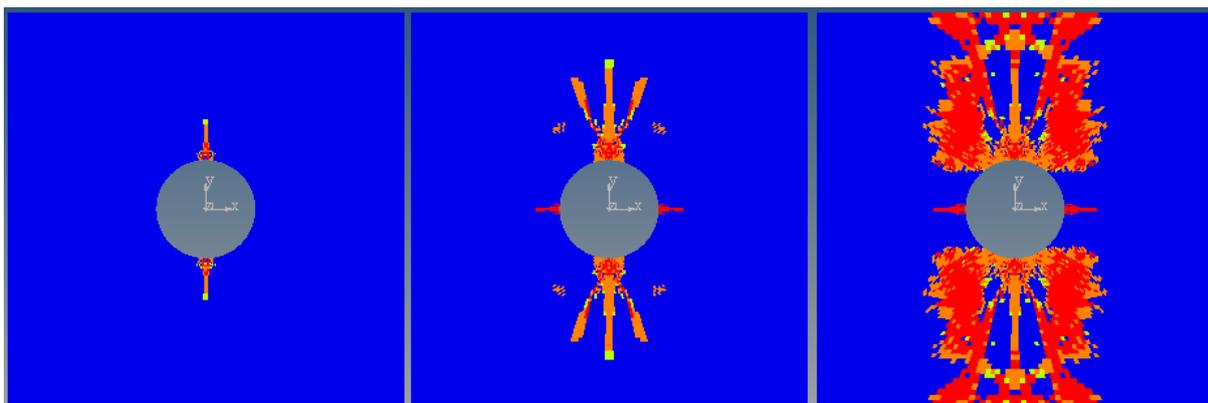
Uma superposição dos envelopes de falha FPF e ULF, para a condição de propriedades médias da lamina, e diâmetro 6,0 mm está apresentada na Figura 44. A área compreendida entre os envelopes é a região de resistência adicional do laminado.



**Figura 44** - Superposição dos envelopes de falha para critério de máxima tensão admissível, FPF e ULF, propriedades médias, d=6,0 mm

#### 4.2.4 Evolução da falha

As figuras 45 e 46 mostra a evolução do dano na placa até o seu rompimento completo. É possível notar um crescimento bem contido da falha sem muita dispersão lateral até certo nível de tensão, e posteriormente novos caminhos de falha são gerados antes que o primeiro caminho de trinca atinja a extremidade do corpo de prova. Experimentalmente é observado apenas uma superfície de fratura final, mas com grande presença de delaminação após certa distância do furo. A direção de fratura numérica e experimental é semelhante, apesar da resistência à tração unidirecional obtida ser aplicável somente para o caso com diâmetro do furo de 3,0 mm. Essa divergência ressalta a necessidade de um modelo capaz de captar outros efeitos do laminado, como a delaminação, e, modificar o comportamento mecânico adequadamente.



**Figura 45** - Evolução do dano e formação do caminho de fratura, carga unidirecional em X, propriedades médias,  $d=3,0\text{mm}$ , critério de falha de máxima tensão admissível



**Figura 46** - Corpo de prova fraturado em tração unidirecional (Arteiro, et al., 2013)

### 4.3 Critério de falha de Tsai-Wu vs. Máxima tensão

Como referência do estudo, também foi elaborado um envelope de falha através do critério de Tsai-Wu, onde a determinação da falha ocorre para qualquer um dos modos, porém a penalização das propriedades depende do modo. A Figura 47 tem a superposição dos envelopes de falha FPF e ULF para os dois critérios de falha, para o mesmo diâmetro do furo,  $d=3,0\text{ mm}$ .

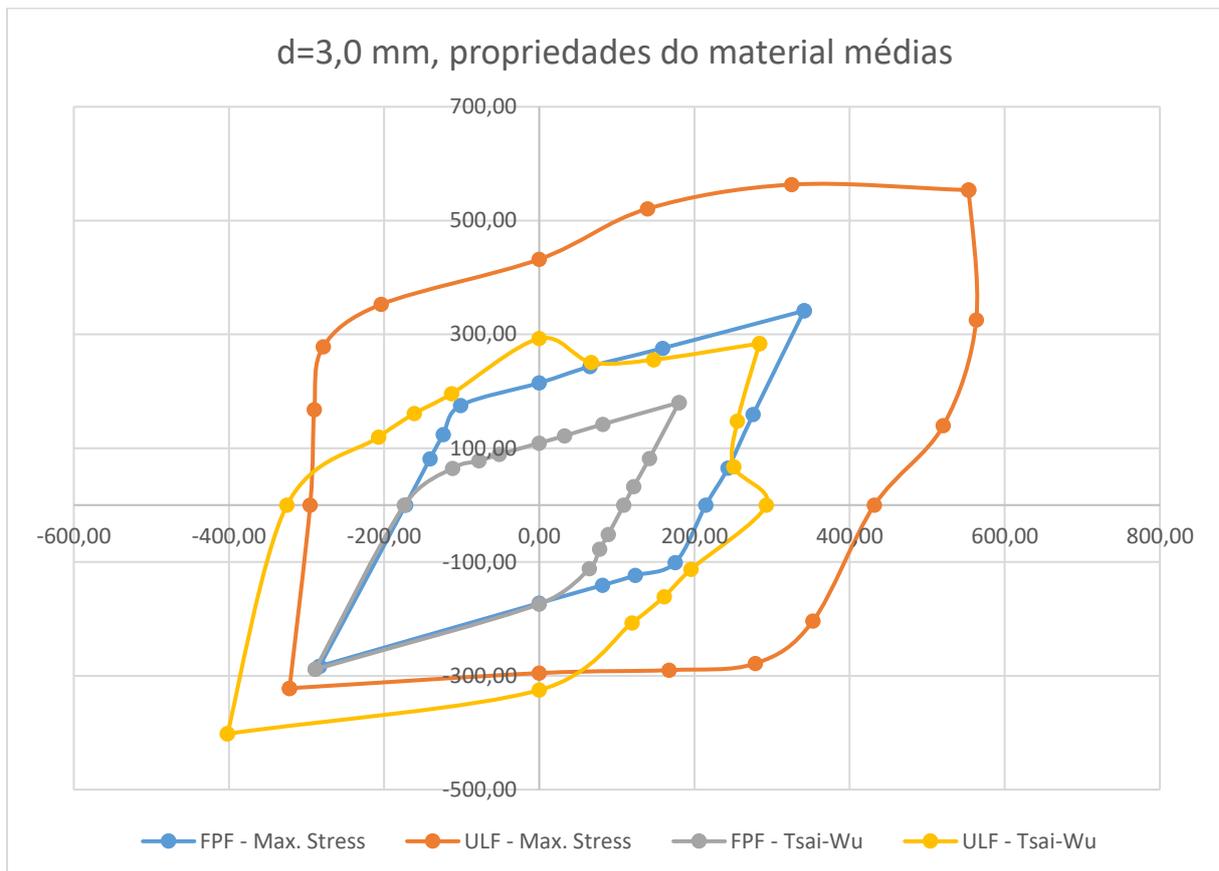
O critério de Tsai-Wu, em geral, resulta em resultados de falha precoce. No caso de lâminas unidirecionais a situação é mais severa.

Os valores de resistências obtidas através do critério de Tsai-Wu para carregamento uniaxial, são muito inferiores aos experimentais, com apenas 292,7 MPa de resistência para tração, e 325 MPa para

compressão. Por essa razão, todos estudos para o laminado entalhado, neste trabalho, foram conduzidos utilizando apenas o critério de máxima tensão admissível.

Para a falha última do laminado, o envelope para o critério de máxima tensão é muito mais abrangente que o envelope de Tsai-Wu, principalmente na região onde existe componente trativa. Em relação aos pontos de carregamento unidirecional, o critério de máxima tensão se aproxima melhor dos resultados experimentais.

Quanto aos casos de carga combinada,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , há necessidade de resultados experimentais para afirmação do critério de falha mais adequado. Na situação atual, o critério de Tsai-Wu se enquadra como muito conservativo em relação ao critério de máxima tensão, para laminados constituídos de lâminas unidirecionais.



**Figura 47** - Superposição entre envelopes de Tsai-Wu e Máxima Tensão Admissível

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi possível observar a influência da dispersão nas propriedades da lâmina unidirecional sobre a resistência final do laminado. Através do critério de falha de máxima tensão admissível, para carregamento unidirecional em tração, o valor de resistência é bem aderente para pequenos tamanhos de furo,  $d=3,0\text{mm}$ , enquanto que para compressão o valor para estudo numérico é superestimado.

As dispersões utilizadas sobre as propriedades da lâmina influenciaram mais as resistências em casos em que existiam carga biaxial. Os valores encontrados para os casos com carga compressiva não são sensíveis ao diâmetro do furo imposto.

As resistências ULF na região de compressão dispersaram em no máximo 22%. Na região apenas sob tração do envelope de falha, a dispersão máxima foi de 19%. Em relação a resistência adicional que o material consegue suportar após a falha da primeira lâmina, pode se atingir um valor de 130% em relação a carga de FPF.

A abordagem utilizada não considera delaminação, o que impacta nos valores de resistência à tração e compressão, tanto no sentido de conferir resistência a fratura total ou impactar a evolução do dano dependendo da condição de carregamento.

## **6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS**

O modelo utilizado foi resolvido em uma simulação linear estática por partes, o que impede a redistribuição de carga no laminado logo após um elemento ser degradado. Para prevenir esse fenômeno, é recomendado como trabalho futuro a execução do problema através de uma solução iterativa para contornar esse problema.

Uma análise estatística também é recomendada como trabalho futuro, para isso se faz necessário varrer a região de confiança dos dados das propriedades, e obter as resistências do laminado, para então ter um espaço amostral para ser estudado.

## 7 REFERÊNCIAS

- Arteiro, A., Catalanotti, G., Xavier, J. & Camanho, P., 2013. Notched response of non-crimp fabric thin-ply laminates. *Composites Science and Technology*, Issue 79, pp. 97-114.
- Bibo, G., Hogg, P. & Kemp, M., 1997. Mechanical characterisation of glass- and carbon fibre-reinforced composites made with non-crimp fabrics. *Composites Science*, Volume 57, pp. 1221-1241.
- Chen, B., Tay, T., Baiz, P. & Pinho, S., 2013. Numerical analysis of size effects on open-hole tensile composite laminates. *Composites: Part A*, Issue 47, pp. 52-62.
- Daniel, I. M. & Ishai, O., 2006. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. 2<sup>a</sup> ed. s.l.:Oxford University Press.
- Drapier, S., Pagot, A., Vautrin, A. & Henrat, P., 2002. Influence of the stitching density on transverse permeability of non-crimped new concept (NC2) multiaxial reinforcements: measurements and predictions.. *Composite Science Technology*, Volume 62, pp. 1971-1991.
- Drapier, S. & Wisnom, M. R., 1999. Finite-element investigation of the compressive strength of noncrimp-fabric-based composites. *Composites Science and Technology*, Issue 59, pp. 1287-1297.
- Edgren, F., Asp, L. E. & Joffe, R., 2006. Failure of NCF composites subjected to combined compression and shear loading. *Composites Science and Technology*, Issue 66, pp. 2865-2877.
- Edgren, F., Asp, L. E. & Joffe, R., 2006. Failure of NCF composites subjected to combined compression and shear loading. *Composites Science and Technology*.
- Edgren, F., Mattson, D., Asp, L. E. & Varna, J., 2004. Formation of damage and its effects on non-crimp fabric reinforced composites loaded in tension. *Composites Science and Technology*, Issue 64, pp. 675-692.
- Fleck, N. & Budiansky, B., 1990. *Compressive failure of notched carbon fibre composites due to microbuckling*. s.l., New York, Springer, pp. 235-274.
- Fong, J. et al., n.d. Theoretical failure envelopes of open hole composite caminated with A- and B-basis allowables estimated from smooth specimen properties. *The 19th International Conference on Composite Materials*.
- Formax, M.-A. F., 2012. <http://www.formax.co.uk/>. [Online].
- Günel, M. & Kayran, A., 2013. Non-linear progressive failure analysis of open-hole composite laminates under combined loading. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, May, 15(3), pp. 309-339.
- Joffe, R., Krasnikovs, A. & Varna, J., 2001. COD-based simulation of transverse cracking and stiffness reduction in [S/90n]s laminates. *Composites Science and Technology*, Issue 61, pp. 637-656.
- Joffe, R., Mattson, D., Modniks, J. & Varna, J., 2005. Compressive failure analysis of non-crimp fabric composites with large out-of-plane misalignment of fiber bundles. *Composites: Part A*, Issue 36, pp. 1030-1046.

- Kawabe, K., Matsuo, T. & Maekawa, Z., 1998. New technology for opening various reinforcing fiber tows. *J Soc Mater Sci*, 47(7), pp. 727-734.
- Kong, H., Mouritz, A. & Paton, R., 2004. Tensile extension properties and deformation mechanisms of multi-axial non-crimp fabrics. *Composite Structures*, Issue 66, pp. 249-259.
- Lee, L. et al., 2002. Effect of weaving damage on the tensile properties of three-dimensional woven composites. *Composite Structures*, Issue 57, pp. 405-413.
- Liotier, P., Alain, V. & Christine, D., 2010. Characterization of 3D morphology and microcracks in composites reinforced by multi-axial multi-ply stitched preforms. *Composites: Part A*, Issue 41, pp. 653-662.
- Lomov, S. et al., 2002. Carbon composites based on multi-axial multiply stitched preforms. Part 1: geometry of the preform.. *Composites: Part A*, Volume 33, pp. 1171-1183.
- Lomov, S. et al., 2009. A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 1: Materials, methods and principal results. *Composites: Part A*, Volume 40, pp. 1134-1143.
- Mattson, D., Joffe, R. & Varna, J., 2008. Damage in NCF composites under tension: Effect of layer stacking sequence. *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 2666-2682.
- MIL-HDBK-17, 2002. Volume 1: Guidelines for Characterization of Structural Materials, Chapter 8 (Statistical Methods). *U.S. Department of Defense, U.S.A.*
- Reynolds, T. & McManus, H., n.d. Accelerated tests of environmental degradation in composites materials.. *Composites Structures: theory and practice*, Volume West Conshohocken (PA): ASTM STP 1383, pp. 513-525.
- Slaughter, W., Fleck, N. & Budiansky, B., 1993. Compressive failure of fiber composites: The roles of multi-axial loading and creep.. *Eng Mater Technol*, Volume 115, pp. 308-313.
- Truong, T., Vettori, M., Lomov, S. & Verpoest, I., 2005. Carbon composites based on multi-axial multi-ply stitched preforms. Part 4. Mechanical properties of composites and damage observation. *Composites: Part A*, Issue 36, pp. 1207-1221.
- Tsai, S. W. & D. Melo, J. D., 2014. An invariant-based theory of composites. *Composites Science and Technology*, Volume 100, pp. 237-243.
- Tserpes, K. & Labeas, G., 2009. Mesomechanical analysis of non-crimp fabric composite structural parts. *Composite Structures*, Issue 87, pp. 358-369.
- Vallons, K., Lomov, S. V. & Verpoest, I., 2009. Fatigue and post-fatigue behaviour of carbon/epoxy non-crimp fabric composites. *Composites: Part A*, Volume 40, pp. 251-259.
- Zhao, L., Warrior, N. & Long, A., 2006. Finite element modelling of damage progression in non-crimp. *Composites Science and Technology*, Issue 66, pp. 36-50.