

Laminados de carbono com defeitos interlaminares: análise experimental e modelação numérica

(versão final após defesa)

Mariana da Silva Veloso

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2^o ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Abílio Manuel Pereira da Silva
Co-orientador: Prof. Doutor André Ferreira Costa Vieira

novembro de 2023

Declaração de Integridade

Eu, Mariana da Silva Veloso, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M11711 de Engenharia Eletromecânica da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 28 /11 /2023



Mariana da Silva Veloso

Dedicatória

Dedico esta dissertação à minha querida mãe Helena, ao meu pai José e ao meu irmão Renato, eles que sempre acreditaram em mim, que fizeram de mim a pessoa que sou hoje e que sempre me derem o apoio e a confiança para traçar este percurso.

Aos meus avós maternos, Severiano e Teresa, e à minha madrinha Paula, que ocupam sempre um grande espaço no meu coração e na minha vida.

Aos meus avós paternos, Celestino e Inês, padrinho Pedro, tia Cristina e primos Tomás e Matilde, um muito obrigada.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de deixar um especial agradecimento ao Professor Doutor Abílio Manuel Pereira Silva pela oportunidade de desenvolver este trabalho, pelo seu incentivo, o apoio, a confiança, pela sua disponibilidade e orientação.

Ao Professor Doutor André Ferreira Costa Vieira, pela sua orientação, ajuda, partilha de conhecimentos, nomeadamente no desenvolvimento numérico, e sugestões na prossecução deste trabalho.

À Universidade da Beira Interior, sobretudo a todos os membros do Departamento de Engenharia Eletromecânica, pela disponibilização de conhecimentos e meios ao longo do meu percurso.

Ao C-MAST-UBI (*Centre for Mechanical and Aerospace Science and Technologies*) pela disponibilização de matérias-primas, equipamentos, recursos e todo o tipo de meios laboratoriais.

À minha família e amigos, que embarcaram nesta aventura comigo, pelo vosso apoio e motivação que me permitiu seguir sempre em frente.

Ao meu namorado Daniel, pela sua constante ajuda e opinião crítica.

Resumo

Um compósito CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*) é uma classe de materiais amplamente utilizado em aplicações que exigem elevado desempenho mecânico, pois este exibe propriedades como elevada resistência, durabilidade e rigidez combinado com baixa densidade.

Assim, qualquer tipo de defeito no seu interior pode resultar numa redução significativa da sua performance. Os defeitos como as porosidades, rugas e/ou corpos estranhos, promovem os danos com origem em condições de serviço, podendo ocorrer casos de deslocamento, delaminação, fissuração da matriz e rotura de fibras.

Para uma análise experimental de laminados CFRP seguiram-se diferentes sequências de empilhamento, $[0_{10}]$ e $[0_2/90_2/0_2/90_2/0_2]$, e foram construídas amostras submetidas a um teste mecânico de flexão em três pontos. Durante a construção do laminado foi embebido entre camadas um filme em Teflon com diferentes dimensões (5 mm e 10 mm) e em diferentes posições, isto é, em zonas sujeitas à tração e em zonas sujeitas à compressão.

De modo a comprovar os resultados experimentais foi desenvolvido um modelo numérico recorrendo ao método de elementos finitos, com recurso ao *Ansys*.

A comparação entre dados experimentais e numéricos permite concluir que a implementação de um defeito em laminados CFRP influencia o seu desempenho em 5,75% para amostras de construção unidirecional e 5,50% nas amostras de construção cruzada. Fatores como a dimensão do defeito apresentam divergências, sendo que um defeito de 10 mm apresenta uma maior influência comparativamente ao defeito de 5 mm. A posição do defeito também é uma variável, sendo que quando este se encontra à compressão a performance final da amostra será mais prejudicada comparativamente ao defeito à tração.

O modelo digital foi validado pelos ensaios experimentais e permitiu obter estimativas de comportamento para diversas condições, tais como: sequência de empilhamento, número de camadas, espessura da lâmina, geometria do laminado e dimensão do defeito.

Palavras-chave

Laminados de fibra de carbono; Ensaios experimentais de flexão; Gémeo digital; Modo de ruína; Defeito de delaminação.

Abstract

CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*) composite is a material widely used in applications requiring high mechanical performance, as it exhibits properties such as high strength and stiffness combined with low density.

Thus, any type of defect inside can result in a significant reduction in its performance. Defects include porosity, wrinkles and/or foreign bodies, and damage occurs under service conditions, which can include displacement, delamination, matrix cracking and fiber breakage.

For an experimental analysis of CFRP laminates, different stacking sequences were followed, $[0_{10}]$ and $[0_2/90_2/0_2/90_2/0_2]$, and the samples were subjected to a three-point bending test. During the construction of the laminate, a Teflon film with different sizes (5 mm and 10 mm), was implemented in different positions, in areas prone to traction and areas subjected to compression.

In order to verify the experimental results, a numerical simulation using finite element analysis was carried out using *Ansys*.

The comparison between experimental and numerical data shows that the implementation of a defect in CFRP laminates influences its performance by 5,75% for unidirectional construction samples and 5,50% for cross construction samples. Factors such as the size of the defect differ, with a 10 mm defect having a greater impact than a 5 mm defect. The position of the Teflon film is also a variable element, and when it is in compression the final performance of the sample will be more impaired compared to a tensile defect.

The digital model was validated by experimental tests and it allowed behavior estimates to be obtained for various conditions such as: stacking sequence, number of layers, lamina thickness, laminate geometry and defect size.

Keywords

CFRP laminates; Experimental bending test; Digital twin; Failure analysis; Delamination defect.

Índice

Lista de Figuras.....	xvi
Lista de Tabelas.....	xxiii
Lista de Acrónimos	xxv
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do tema.....	1
1.2 Objetivos estabelecidos	3
1.3 Organização do documento	3
Capítulo 2.....	4
Revisão da Literatura.....	4
2.1 Materiais Compósitos.....	4
2.1.1 Compósitos CFRP.....	6
2.1.2 Defeitos/Danos em Materiais Compósitos	9
2.1.3 Casos de Estudo	10
2.2 Estudo Mecânico de Materiais Compósitos.....	12
2.2.1 Ensaio de Flexão em Compósitos Laminados.....	16
2.3 Estudo Numérico de Materiais Compósitos	24
2.3.1 Casos de Estudo	25
Capítulo 3.....	33
Metodologia Experimental	33
3.1 Materiais e Equipamentos	33
3.2 Preparação Laminados CFRP	34
3.3 Ensaio de Caracterização Mecânica	38
3.4 Registo de Resultados	38
Capítulo 4.....	40
Resultados Experimentais e Discussão	40

4.1 Ensaio Mecânico de Flexão em três pontos	40
4.2 Imagens em lupa	49
4.3 Discussão de resultados	51
Capítulo 5	55
Análise Numérica e Discussão.....	55
5.1 Metodologia.....	55
5.2 Modelação Numérica.....	66
5.3 Solução Numérica	69
5.3.1 Previsões com a solução numérica.....	73
Capítulo 6.....	83
Conclusão.....	83
6.1 Considerações Finais.....	83
6.2 Trabalhos Futuros.....	83
Referências Bibliográficas	85

Lista de Figuras

Figura 1: Unidade básica de um material direcional (anisotropia) [20].	4
Figura 2: Material compósito lamelar. a) camada de material compósito ortotrópico, b) sobreposição de várias camadas com diferentes orientações, sequência quasi-isotrópica [20].	6
Figura 3: Gráfico comparativo de compósitos e metais tendo em conta a fadiga e o número de ciclos de vida útil [22].	7
Figura 4: Número de publicações científicas com o termo FRP e CFRP ao longo dos anos, considerando a base de dados Scopus.....	8
Figura 5: Representação esquematizada de defeitos em compósitos laminares [21].	10
Figura 6: Evolução no estudo de materiais compósitos, desde escala microscópica até uma escala macroscópica, adaptado [32]......	13
Figura 7: Desenvolvimento do dano em compósitos no seu tempo de vida [22].	14
Figura 8: Radiografia onde é detetável delaminação na periferia de compósitos laminados, adaptado de [31]......	15
Figura 9: Processo de delaminação num composto laminado cuja construção: $[\pm 30/\pm 30/90/90]_s$, adaptado de [31]......	15
Figura 10: Modos de falha de materiais compósitos com construção unidirecional, adaptado [22]......	16
Figura 11: Representação de duas possíveis montagens para realização de ensaios de flexão. Flexão em três pontos e flexão em quatro pontos [34]......	17
Figura 12: Diferentes respostas de compósitos laminados sujeitos a flexão. a) sequência de empilhamento $[0/90]_s$ e b) sequência de empilhamento $[90/0]_s$, adaptado [20]......	18
Figura 13: Curvas força - deslocamento para as diferentes geometrias (A, B, C, D) sujeitas a testes de compressão, adaptado [18]......	19

Figura 14: Falha mecânica nas amostras em teste de encurvadura. a) amostra B, defeito no plano do meio e b) amostra D, defeito na face superior [18].	20
Figura 15: Resultado de testes mecânicos de flexão em laminados CFRP. a) amostra após ensaio mecânico, b) análise segundo micrografia ótica da secção da amostra e c) esquema alusivo aos testes de flexão e distribuição de danos nas amostras [27].	21
Figura 16: Análise utilizando microscópio ótico de amostras CFRP com PTFE, adaptado [28].	22
Figura 17: Imagens de amostras após testes mecânicos. a) falha transversal de 45° na camada com orientação 90° e b) delaminação na interface 90°/0° [29]	23
Figura 18: Evolução de dano em testes mecânicos de flexão, desde o início do teste até ao ponto de rotura, adaptado [29].	24
Figura 19: Comparação entre valores experimentais e numéricos para a amostra com defeito no plano médio [18].	27
Figura 20: Evolução de danos na amostra com defeito na camada superior. a) delaminação e b) falha intralaminar [18].	27
Figura 21: Resultados da simulação para previsão o início e propagação do dano. a) início do aparecimento de danos, b) aplicação da carga máxima, c) propagação de danos e d) falha total do laminado [40]	29
Figura 22: Condições de fronteira adotadas no <i>Abaqus</i> para teste de flexão em três pontos [43].	30
Figura 23: Aplicação de condições de fronteira no <i>Ansys</i> com base no teste experimental. a) teste experimental de flexão em três pontos, b) condições de fronteira no <i>Ansys</i>	31
Figura 24: Viga submetida a flexão em três pontos, separação em secções com diferentes parâmetros na malha.	31
Figura 25: Definição de malha tetraédrica e hexaédrica no <i>Ansys</i>	32
Figura 26: Densidade da malha para um teste de flexão numa amostra GFRP [45]	32
Figura 27: Equipamento laboratorial utilizado. a) autoclave, b) máquina de teste universal, c) máquina para polimento, d) luz e lupa.	34

Figura 28: Corte de pré-impregnado de fibra de carbono 30 cm X 30 cm e película protetora de nylon e papel.	34
Figura 29: Esquema ilustrativo da sequência de empilhamento adotada para amostras de construção unidirecional e cruzada, no total foram construídas amostras.	35
Figura 30: a) placas resultantes antes do processo de cura, b) equipamento utilizado para selar o saco com a placa e c) interior da autoclave onde é visível a aplicação do peso e válvula de vácuo.	36
Figura 31: Esquema de corte a seguir para a placa de construção cruzada e unidirecional para obtenção de seis amostras finais com defeito de 10 mm, seis amostras finais com defeito de 5 mm e seis amostras finais sem defeito.	36
Figura 32: Amostras após o teste mecânico. A sua identificação parte do princípio O (construção unidirecional), X (construção cruzada), P (defeito de 5 mm) e G (defeito de 10 mm).	39
Figura 33: Construção unidirecional sem defeito, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].	40
Figura 34: Construção unidirecional sem defeito, gráfico de tensão [N/mm ²] por deformação [%].	41
Figura 35: Construção Unidirecional defeito de 10mm à tração, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].	41
Figura 36: Construção Unidirecional defeito de 10mm à tração, gráfico de tensão [N/mm ²] por deformação [%].	41
Figura 37: Construção Unidirecional defeito de 10 mm à compressão, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].	42
Figura 38: Construção Unidirecional defeito de 10mm à compressão, gráfico de tensão [N/mm ²] por deformação [%].	42
Figura 39: Construção Unidirecional defeito de 5 mm à tração, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].	42
Figura 40: Construção Unidirecional defeito de 5 mm à tração, gráfico de tensão [N/mm ²] por deformação [%].	43

Figura 41: Construção Unidirecional defeito de 5 mm à compressão, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].....	43
Figura 42: Construção Unidirecional defeito de 5 mm à compressão, gráfico de tensão [N/mm ²] por deformação [%].	43
Figura 43: Construção Cruzada sem defeito, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].....	44
Figura 44: Construção Cruzada sem defeito, gráfico de tensão [N/mm ²] por deformação [%].....	44
Figura 45: Construção Cruzada defeito de 10 mm à tração, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].	44
Figura 46: Construção Cruzada defeito de 10 mm à tração, gráfico de tensão [N/mm ²] por deformação [%].	45
Figura 47: Construção Cruzada defeito de 10 mm à compressão, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].....	45
Figura 48: Construção Cruzada defeito de 10 mm à compressão, gráfico de tensão [N/mm ²] por deformação [%].	45
Figura 49: Construção Cruzada defeito de 5 mm à tração, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].....	46
Figura 50: Construção Cruzada defeito de 5 mm à tração, gráfico de tensão [N/mm ²] por deformação [%].	46
Figura 51: Construção Cruzada defeito de 5 mm à compressão, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].....	46
Figura 52: Construção Cruzada defeito de 5 mm à compressão, gráfico de tensão [N/mm ²] por deformação [%].	47
Figura 53: Comparação entre ensaios de construção unidirecional e ensaios de construção cruzada, para valores de tensão de rotura e deformação de rotura. .	47
Figura 54: Amostras sem defeito. a) amostra 1 construção unidirecional, b) amostra 2 construção unidirecional, c) amostra 3 construção unidirecional, d) amostra 1 construção cruzada, e) amostra 2 construção cruzada e f) amostra 3 construção cruzada.	49

Figura 55: Amostras com defeito de 10 mm à tração. a) amostra 1 construção unidirecional, b) amostra 2 construção unidirecional, c) amostra 3 construção unidirecional, d) amostra 1 construção cruzada, e) amostra 2 construção cruzada e f) amostra 3 construção cruzada.....	49
Figura 56: Amostras com defeito de 10 mm à compressão. a) amostra 4 construção unidirecional, b) amostra 5 construção unidirecional, c) amostra 6 construção unidirecional, d) amostra 4 construção cruzada, e) amostra 5 construção cruzada e f) amostra 6 construção cruzada.	50
Figura 57: Amostras com defeito de 5 mm à tração. a) amostra 1 construção unidirecional, b) amostra 2 construção unidirecional, c) amostra 3 construção unidirecional, d) amostra 1 construção cruzada, e) amostra 2 construção cruzada e f) amostra 3 construção cruzada.....	50
Figura 58: Amostras com defeito de 5 mm à compressão. a) amostra 4 construção unidirecional, b) amostra 5 construção unidirecional, c) amostra 6 construção unidirecional, d) amostra 4 construção cruzada, e) amostra 5 construção cruzada e f) amostra 6 construção cruzada.....	51
Figura 59: Comparação direta entre a tipologia de construção (unidirecional e cruzada) e a presença/ausência de defeito.....	52
Figura 60: Análise do estado do defeito depois do teste mecânico. a) construção unidirecional e b) construção cruzada.	54
Figura 61: Resultados experimentais onde é detetável delaminação e perda de adesão entre o filme em teflon e as camadas constituintes do laminado.....	54
Figura 62: Representação da configuração de referência e configuração deformada, com indicação dos versores m e n	57
Figura 63: Aplicação do “método do corte”	5760
Figura 64: Tetraedro de volume dV , constituído por dA_1 , dA_2 , dA_3	61
Figura 65: a) material sem simetria de propriedades, b) material com simetria de propriedades.	63
Figura 66: Comparação entre materiais ortotrópicos, materiais transversalmente isotrópicos e materiais isotrópicos	63

Figura 67: esquema síntese das relações constitutivas entre tensão e deformação.	64
Figura 68: Representação de uma viga à flexão.....	65
Figura 69: a) Esquema dos modelos construídos no <i>Ansys Workbench</i> , b) tipo de ligação entre modelos desenvolvidos.	67
Figura 70: Outline do projeto no Módulo <i>Static Structure</i>	68
Figura 71: Condições impostas entre os apoios da máquina de teste e a amostra no <i>Ansys</i>	68
Figura 72: Estudo do número de elementos da malha para valores de tensão máxima em amostras de construção unidirecional	69
Figura 73: Malha otimizada utilizada na simulação numérica no <i>Ansys</i>	69
Figura 74: Comparação de dados experimentais e numéricos sobre a influência da presença e dimensão do defeito na resistência dos laminados CFRP.	71
Figura 75: Resultado da simulação numérica utilizando a função <i>Path</i> . a) tensão máxima obtida para a primeira camada (0°) e b) tensão máxima para a terceira camada (90°).	73
Figura 76: Simulação numérica da amostra com construção unidirecional e defeito de 5 mm à compressão, destacando com etiqueta zona de tensão máxima.	73
Figura 77: Resultados de tensão máxima obtidos na simulação numérica. a) tipologia de construção $[\pm 45]_{3s}$, b) tipologia de construção $[0/90/(\pm 45)_2]_s$ e c) tipologia de construção $[0/-35/0/+35/0]$	75
Figura 78: Resultados de tensão máxima obtidos no <i>Ansys</i> para amostras cuja espessura por lâmina é de 0,250 mm. a) tipologia de construção $[0]_8$, b) tipologia de construção $[0]_{12}$ e c) tipologia de construção $[0]_{16}$	79
Figura 79: Resultados de tensão máxima obtidos no <i>Ansys</i> para amostras cuja espessura por lâmina é de 0,164 mm. a) tipologia de construção $[0]_8$, b) tipologia de construção $[0]_{12}$ e c) tipologia de construção $[0]_{16}$	79
Figura 80: Comparação entre amostras de construção unidirecional e construção cruzada para diferentes dimensões do defeito.....	81

Lista de Tabelas

Tabela 1: Propriedades do pré-impregnado HS 160 REM, [23].	33
Tabela 2: Medidas finais das amostras obtidas.	377
Tabela 3: Síntese de valores obtidos no teste experimental para todas as amostras testadas.	488
Tabela 4: Propriedades mecânicas de HS 160 REM [57] e Teflon [58].	677
Tabela 5: Resultados numéricos obtidos no <i>Ansys</i> .	70
Tabela 6: Comparação entre valores do teste experimental e da modelação numérica, cálculo do erro associado entre as diferentes condições de simulação.	71
Tabela 7: Comparação de valores de tensão, para resultados experimentais [43, 63] e a modelação numérica.	74
Tabela 8: Comparação de valores de tensão, para resultados experimentais [63] e a modelação numérica.	76
Tabela 9: Comparação de valores de comprimento, largura e espessura, entre estudo [64] e geometria das amostras adotada nesta dissertação.	76
Tabela 10: Resultados de tensão máxima obtidos no <i>Ansys</i> para amostras com diferente número de camadas.	77
Tabela 11: Resultados de tensão máxima obtidos no <i>Ansys</i> para amostras com diferente número de camadas e espessura por lâmina.	78
Tabela 12: Resultados de tensão máxima obtidos no <i>Ansys</i> para amostras com diferente geometria.	80

Lista de Acrónimos

CDS	<i>Characteristic Damage State</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
DT	<i>Destructive Testing</i>
FPF	<i>First Ply Failure</i>
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer</i>
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i>
PTFE	Politetrafluoretileno
SCRIMP	<i>Seemann Composites Resin Infusion Molding Process</i>
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>

Capítulo 1

Introdução

O primeiro capítulo desta dissertação tem como finalidade a contextualização do tema em estudo. Por conseguinte estão presentes três tópicos introdutórios e complementares. Primeiramente é apresentado um breve enquadramento do tema, em seguida uma exposição dos objetivos definidos e por fim, na organização do documento são sucintamente apresentados os conteúdos a serem abordados e explorados em cada capítulo.

1.1 Enquadramento do tema

A procura incessante, por parte da indústria, por materiais mais resistentes, mais rígidos, duradouros e leves conduziu à utilização de uma fração muito pequena de metais, designados como os metais leves, entre eles: as ligas de magnésio, alumínio e titânio [1]. Porém, não só estes materiais têm limitações na medida em que não são assim tão leves quanto desejado, servindo de exemplo a baixa densidade apresentada pelos polímeros ($\sim 1,2 \text{ g/cm}^3$), mas também a sua falta de rigidez quando comparados com o aço e com as cerâmicas, especialmente quando estas se apresentam na forma de pequenas partículas. Deste modo, surgem os materiais híbridos, neles encontramos: materiais compósitos, espumas reticuladas, sanduiches e estruturas multicamadas e segmentadas [1]. Este estudo pretende focar, com mais detalhe, os compósitos laminados.

Os materiais compósitos podem ser definidos como a conjugação de dois ou mais materiais de natureza diferente com interface. Por conseguinte, o resultado culmina em um composto cujas propriedades são superiores quando comparadas às dos materiais individualmente [2]. Em termos estruturais os materiais compósitos são, muitas vezes, denominados como compósitos de fibras ou partículas, que podem ser misturadas em várias geometrias: unidirecional, fibras descontinuas, particulados e laminados. Estes materiais são constituídos por fibras, que atuam como reforço e uma matriz, que atua como elemento de ligação, ou seja, a matriz funciona como o meio de transferência dos diferentes tipos de tensões entre as fibras [2].

O termo FRP (*fiber reinforced polymer*), polímeros reforçados com fibras, trata de materiais compósitos que partiram de uma matriz polimérica e são reforçados com fibras. Estes materiais têm demonstrado as suas vantagens enquanto substitutos dos metais. Tais juízos são sustentados pela elevada resistência e rigidez, combinando com a baixa densidade que apresentam e, contrariamente à maioria dos metais, não sofrem corrosão [3]. Todas estas características tornam os materiais compósitos uma solução bastante cobiçada, nomeadamente no que toca a aplicações de alta performance, englobando a indústria aeronáutica [4,5], aeroespacial [6,7], marinha [8,9], transportes [10,11] e engenharia civil [12,13].

Não obstante todas as vantagens na utilização de materiais compósitos, os mesmos apresentam algumas limitações, nomeadamente a existência de uma interface entre a matriz e o reforço que conduz à inerente presença de defeitos de fabrico (como bolhas de ar na interface devido a

cavitação no fluxo de resina), ou danos no seu interior resultantes de carregamentos mais ou menos impulsivos, que devido à diferença de rigidez entre reforço e matriz produz tensões de corte na interface. Muitas vezes, tais defeitos ou danos não são perceptíveis exteriormente, mas consoante a sua extensão podem provocar alterações significativas no comportamento mecânico do compósito, nomeadamente na resposta a um carregamento ou propagação de vibrações.

Posto que, estes materiais são amplamente utilizados em aplicações de ponta, qualquer tipo de dano no interior de um material compósito pode resultar numa redução significativa no que toca à sua performance. Assim, NDT (*non-destructive testing*) consistem em várias técnicas cujo intuito é proceder à inspeção do compósito sem o danificar a sua estrutura, para tal são utilizados equipamentos como ultrassom e *C-scan*.

Contudo, estes métodos não permitem a monitorização estrutural do material, então, surgem sistemas SHM (*structural health monitoring*) [14]. O objetivo destes sistemas de monitorização a tempo real passa pelo diagnóstico, deteção, identificação, localização e avaliação [14] dos defeitos que possam afetar a segurança ou desempenho estrutural do material. Neste ramo, os sensores de fibra ótica, ao serem incorporados na estrutura composta, são capazes de monitorizar as tensões, temperatura, processo de cura do composto, vibrações, humidade, delaminação e rotura do material, demonstrando, assim, o seu grande potencial enquanto tecnologia de monitorização para uma vasta variedade de aplicações dos materiais compósitos [15, 16]. No entanto, a ideia de implementação de um processo *self-healing* (auto-reparação) de um composto é algo que pode funcionar como uma alternativa aos danos provocados ora por testes mecânicos, ora por um impacto [17], entre outros. Deste modo, a incorporação de um sistema vascular, por vezes com diferentes escalas, com agentes de cura distintos do material base, é visto como a inclusão de defeitos na estrutura do composto, neste caso defeitos circulares [17]. Estas inclusões irão perturbar a arquitetura e a continuidade estrutural do laminado composto.

Para além da inclusão de defeitos no processo de fabrico dos laminados, também os processos de maquinação dos compósitos, como furação, fresagem, torneamento [3], ou o comportamento anisotrópico gerado pelas fibras [18], contribuem para a diminuição da integridade estrutural destes compostos, nomeadamente promovendo a delaminação.

A delaminação de um composto é considerada o dano mais significativo em termos de promoção de falhas mecânicas [18, 19], porque se inicia e propaga-se sem ser visível no exterior. Esta é uma das características chave que distingue os metais dos compósitos. Esta falha é, muitas vezes, descrita segundo a conjectura *first ply failure theory* (FPF), a mesma considera a falha do laminado desde o momento em que a primeira camada é danificada.

Por forma a estudar a importância de uma delaminação pré-existente no interior do laminado, em que a sua posição varia, pretende-se analisar experimentalmente e numericamente este fenómeno e avaliar o seu efeito em termos mecânicos, e avaliar a alteração da resposta de um laminado após um carregamento quasi-estático à flexão. Esta resposta pode variar consoante a posição do defeito/dano de delaminação.

1.2 Objetivos estabelecidos

Esta dissertação apresenta como objetivo principal o estudo da resposta mecânica de um laminado com defeitos no seu interior, após um carregamento quasi-estático.

De modo a complementar este objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- i. Fabricar laminados de carbono com recurso à autoclave, sem defeito e com vários defeitos em diferentes camadas;
- ii. Caracterizar experimentalmente as amostras sem defeito e as amostras com defeitos;
- iii. Construir um modelo numérico do compósito sem defeito e com defeitos;
- iv. Caracterizar numericamente as amostras sem defeito e as amostras com defeito;
- v. Comparação dos resultados obtidos com a literatura.

1.3 Organização do documento

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos e devidos subcapítulos.

No presente capítulo, capítulo 1, é enquadrado o tema em estudo, deste modo é possível introduzir a importância dos compósitos e expor a sua versatilidade enquanto material de ponta na engenharia.

No capítulo 2, Revisão da Literatura, são introduzidos conceitos fundamentais para a compreensão do que é um material compósito, mais concretamente laminados CFRP. É, também, exposto o estudo dos defeitos/danos nestes materiais, introduzido o teste mecânico e a análise numérica em materiais compósitos. Para tal, são utilizados vários exemplos presentes na literatura.

O capítulo 3, Metodologia Experimental, é dedicado à descrição e explicação do procedimento experimental, desde produção de amostras, utilização de equipamentos laboratoriais e realização do teste mecânico de flexão em três pontos.

No capítulo 4, Resultados Experimentais, são expostos os resultados obtidos no ensaio experimental e é realizada a respetiva análise e discussão dos valores obtidos.

No capítulo 5, Análise Numérica e Discussão, são introduzidos vários conceitos da área Mecânica dos Sólidos e é apresentada a análise no *Ansys*, desde o desenvolvimento das amostras até à obtenção de resultados, e posterior discussão dos mesmos. Ainda neste capítulo, é apresentado um subcapítulo de previsão numérica, no mesmo são realizadas algumas alterações nas amostras e os resultados obtidos são discutidos e comparados com a literatura.

Por fim, o capítulo 6, Conclusão, é dedicado à apresentação de considerações finais e exposição de sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

O segundo capítulo desta dissertação expõe conceitos fundamentais para a realização deste estudo. Em primeiro lugar é introduzida a definição de materiais compósitos. São também referidas propriedades e características destes materiais, dando especial ênfase a laminados CFRP (carbon fiber reinforced polymer). Seguidamente são apresentados ensaios experimentais usados para avaliar e caracterizar o comportamento mecânico de materiais compósitos, desde testes à compressão e flexão. Por fim, comumente à revisão da literatura feita para o estudo experimental, também são referenciados análises numéricas sobre a delaminação e rotura de materiais compósitos, recorrendo ao método de elementos finitos. Assim, é possível compreender os estudos previamente executados e antecipar conclusões aos testes mecânicos para as amostras posteriormente fabricadas em pré-impregnado de fibra de carbono.

2.1 Materiais Compósitos

O conceito primário de material anisotrópico passa pela apresentação da unidade básica de um material, a Figura 1 ilustra essa representação. Nas extremidades encontram-se os átomos ou moléculas constituintes do material, posicionados devido a ligações interatômicas, porém estas ligações são mais fortes em determinadas direções. Deste modo, os materiais apresentam dependência direcional [2], ou seja, o material tem elevada resistência em determinadas direções, mas em outras exibe propriedades inferiores [20]. Nestes casos o material é classificado como anisotrópico.

As propriedades direcionais não se aplicam a todos os materiais, servindo de exemplo os materiais obtidos através da fundição. Neste caso as unidades do material, os grãos, estão aleatoriamente orientadas pelo volume do material. Assim, as propriedades são similares em todas as direções, esta característica é denominada por isotropia [20].

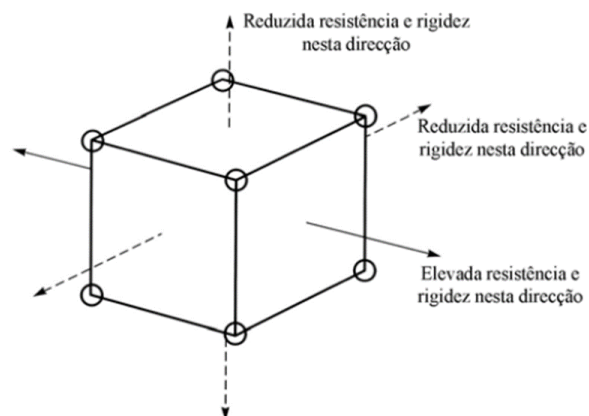


Figura 1: Unidade básica de um material direcional (anisotropia) [20].

Se, por sua vez, o material for processado de modo a alinhar propriedades superiores na mesma direção, contrariando a isotropia, este tipo de processamento resulta em um elemento denominado fibra [20].

As fibras apresentam dimensões reduzidas e características superiores na direção do seu comprimento. Deste modo quando pretendemos extrair o seu maior proveito devemos alinhá-las com as direções da tensão principais. Assim a carga pode ser transferida para as fibras, porém é essencial que elas mantenham a sua forma e posição [20], e assim a matriz apresenta as suas valências como elemento ligante e responsável pelo alinhamento das fibras no momento de a carga ser aplicada. Por sua vez, a matriz apresenta características inferiores no que toca a resistência mecânica e rigidez [20].

Em termos de classificação de um material compósito segundo a natureza da matriz, existem as seguintes possibilidades: compósitos de matriz metálica, compósitos de matriz cerâmica e compósitos de matriz polimérica [21, 22].

Apesar da matriz ter como principal função manter as fibras na sua posição e possibilitar a transferência de carga para as fibras [20], a matriz apresenta outras características como: conferir forma e bom acabamento superficial do compósito, proteger as fibras do desgaste (ataques químicos, calor, humidade), facilitar a produção de componentes mais complexos e proporcionar resistência aos materiais compósitos [22].

No que toca ao reforço, este também apresenta as suas funções, tais como: suportar as tensões exercidas sobre o compósito, diminuir a propagação de fissuras, aumentar as propriedades mecânicas e moderar a diminuição de propriedades afetadas pela temperatura [22].

Os materiais compósitos podem ser classificados consoante a morfologia dos seus reforços destacando três categorias principais: compósitos reforçados com fibras, compósitos reforçados com partículas e compósitos estruturais [22]. A incorporação de fibras pode seguir pela utilização de fibras contínuas ou descontínuas [21], por sua vez quando é adotado o uso de partículas, estas podem possuir diversas formas e dimensões e estão aleatoriamente distribuídas pela matriz [21]. Por fim, os compósitos estruturais englobam laminados e sanduíche [22].

Tal como referido anteriormente, este estudo foca a utilização de compósitos laminados (Figura 2). Estes são obtidos através do empilhamento ordenado de camadas (lâminas), que podem ou não ser do mesmo material de reforço, impregnados com resina [21]. Uma particularidade dos laminados consiste na orientação das fibras utilizadas na construção do laminado. Aquando da construção podem ser adotadas variadas orientações [21, 22], notando que consoante a orientação e sequência de empilhamento o laminado apresentará diferentes respostas quando sujeito a testes mecânicos [20].

Na Figura 2 a está esquematicamente representada uma camada de um compósito unidirecional, em termos de classificação este material insere-se nos materiais anisotrópicos, apresentando a peculiaridade que as suas propriedades são diferentes em direções perpendiculares entre si, ou seja, existe simetria de propriedades em relação aos três planos perpendiculares aos eixos de ortotropia, sendo eles os eixos 1, 2 e 3. Assim, esta camada de material compósito é classificada como ortotrópica [20].

A Figura 2 b apresenta um exemplo de orientação seguida para a construção de um laminado, neste caso foram tidos alguns cuidados como: um laminado sujeito a tensão axial e corte necessita de camadas com orientação de 0° e 90° para suportar as solicitações axiais e com 45° para as tensões de corte. Por sua vez a relação entre camadas depende de fatores como a magnitude da carga aplicada [20].

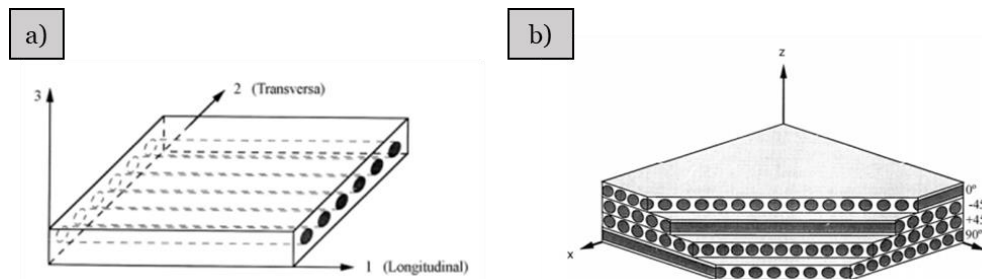


Figura 2: Material compósito lamelar. a) camada de material compósito ortotrópico, b) sobreposição de várias camadas com diferentes orientações, sequência quasi-isotrópica [20].

2.1.1 Compósitos CFRP

O termo CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*) trata de um material compósito cujo reforço são fibras de carbono. Estas são amplamente utilizadas em aplicações que exigem elevado desempenho mecânico devido à elevada resistência à tração, compressão e fadiga. Contudo estas também exibem algumas limitações, nomeadamente uma menor resistência ao impacto, custo elevado e a possibilidade de sofrer corrosão galvânica, em particular em contacto com ligas de elevado carácter anódico, como o caso das ligas de alumínio [21, 22].

Assim sendo, CFRP é amplamente utilizado em aplicações com excepcionais propriedades mecânicas e peso reduzido, sendo exemplo a aeronave Boeing 787 Dreamliner [3, 22], pois grande parte da sua fuselagem, bem como as asas e superfícies da cauda são compostos por materiais compósitos. A atribuição de uma fração de aproximadamente 50% do peso a materiais compósitos conduziu à substituição de sensivelmente 1500 componentes em alumínio. Apesar das exigentes cargas que um avião demanda, a utilização de CFRP colmata os parâmetros de resistência e rigidez. Porém estes laminados demonstram a sua fragilidade a impactos exteriores, servindo de exemplo operações de manutenção e de serviço.

Em contraste com as estruturas homogêneas e tradicionais, como os metais, os materiais compósitos não exibem propriedades de resistência à rotura padronizadas e bem estabelecidas [23], mas, tal como referido anteriormente, os materiais compósitos exibem um comportamento anisotrópico, deste modo, geralmente eles apresentam maior resistência à tração, à compressão e a testes cíclicos [22] do que os metais.

Porém, os metais apresentam uma forte capacidade de absorção de energia que muitas vezes culmina com a sua deformação [22], mas esta característica de deformação plástica não assiste os compósitos.

Na Figura 3 está expresso um gráfico comparativo destas unidades (metais e compósitos) em termos de degradação das suas propriedades durante a sua vida útil. Uma breve análise desse

gráfico permite-nos concluir que existe uma relação linear entre a tensão e a deformação nos metais durante a fadiga, deste modo os metais não apresentam degradação das suas propriedades durante os vários ciclos de vida útil, até à sua fase final, aí a presença de fissuras conduz à fratura do componente em pouco tempo. Por sua vez, os compósitos apresentam um processo gradual, isto é, ocorrem danos no seu início de vida útil e eles vão progredindo até resultarem na fratura do compósito [22].

É de notar que em termos absolutos a resistência à fadiga dos compósitos é superior à dos metais. Deste modo, a análise da Figura 3 tem em consideração o período de vida útil, não tendo em atenção os valores absolutos de fadiga dos materiais em comparação.



Figura 3: Gráfico comparativo de compósitos e metais tendo em conta a fadiga e o número de ciclos de vida útil [22].

Os compósitos apresentam vários modos de dano e fratura devido à sua heterogeneidade e microestrutura. A evolução destes danos afeta tanto as suas propriedades enquanto material em serviço, como o seu desempenho ao longo do tempo [24].

Quando abordamos o assunto compósitos, certas propriedades devem ser consideradas de antemão, nomeadamente as propriedades dos seus constituintes, isto é, a natureza da fibra e da matriz, a fração de volume de fibra utilizada, a adesão interfacial entre as fibras e a matriz, entre outros [2].

Historicamente e de acordo com a informação retirada na base de dados Scopus, o termo FRP (*fiber reinforced polymer*) começou por ser implementado em documentos científicos em 1962, demonstrando, deste modo, o nascer do interesse por parte da comunidade científica por este material. Porém, passados sete anos (1969) é publicado o primeiro artigo responsável pela apresentação da sigla CFRP, neste caso McElhinney *et al.* sugerem a implementação de CFRP em aeronaves comerciais e convencionais. Concomitantemente à publicação deste estudo, Adams *et al.* divulgam um artigo científico acerca de ensaios mecânicos de flexão e torção em amostras de CFRP e GFRP (*glass fiber reinforced polymer*).

A Figura 4 representa a evolução no que toca ao número de publicações ao longo dos anos que contêm o termo FRP e CFRP, neste caso cada curva é alusiva a um material.

Ao analisarmos a Figura 4 constatamos semelhanças entre as duas curvas, nomeadamente o seu crescimento quase exponencial e muito similar, revelando que ambos os materiais exibem propriedades significativas e com interesse.

No que toca ao FRP, desde 1962 os benefícios por trás deste material foram fortemente estudados, mas a sua curva característica apresenta algumas perturbações, particularmente em 2002, no período 2008 a 2010 e mais recentemente em 2021. Por oposto, CFRP apresenta um crescimento com menos perturbações e demonstra a sua dominância no mundo dos artigos e documentos científicos, comparativamente ao FRP, desde 2012.

A análise destes dados revela o seu interesse na medida em que a primeira publicação sobre CFRP apostava na implementação deste compósito na indústria aeronáutica, ou seja, algo que atualmente se tornou bastante comum, deste modo concluímos que o nascimento do interesse por parte da comunidade científica por um material em 1962 ou 1969 exigiu um estudo intensivo do assunto até à sua vasta aplicação, por parte da indústria, em equipamentos de ponta na engenharia, englobando não só, mas também a indústria aeronáutica.

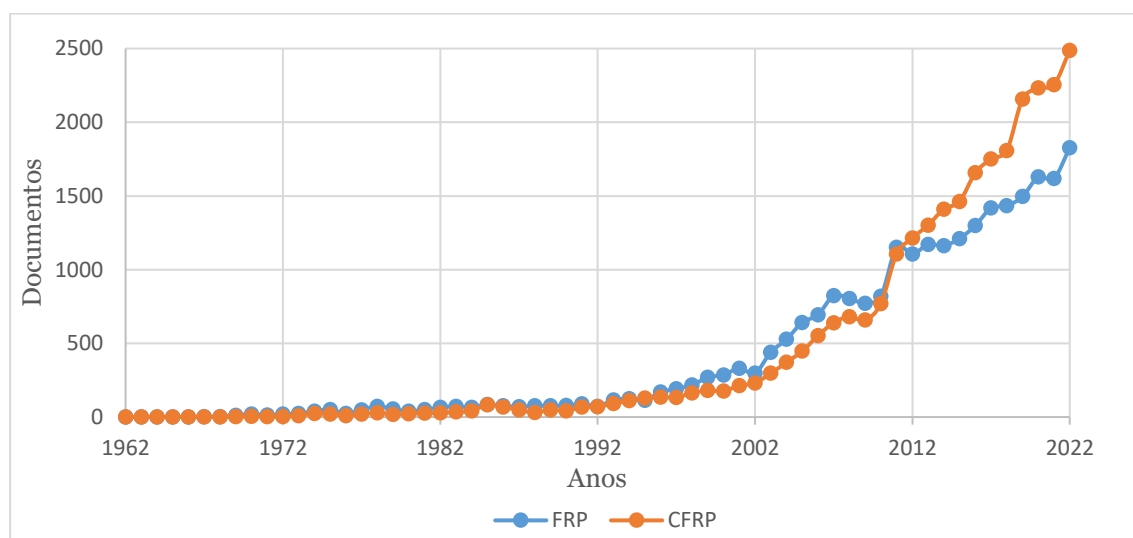


Figura 4: Número de publicações científicas com o termo FRP e CFRP ao longo dos anos, considerando a base de dados Scopus.

Atualmente, é possível desenvolver amostras de laminados CFRP através de diversas formas, sendo uma opção a utilização de pré-impregnado de fibra de carbono. O termo pré-impregnado designa um reforço (fibra) que foi impregnado numa matriz (resina), geralmente, termoestável. As fibras podem tomar a forma de tecido e a matriz serve como elemento ligante das fibras com outros componentes durante a fabricação. Porém, a matriz encontra-se num estado de cura parcial, de modo a facilitar o seu manuseamento. Assim, devido ao seu estado de polimerização, este material deve ser armazenado no frio de modo a evitar a sua cura completa [25].

Na grande maioria das vezes, os componentes compostos por pré-impregnado necessitam de um processo de forno ou autoclave de modo a completar a sua cura [25]. Quando a resina é sujeita a temperaturas elevadas adquire o estado líquido antes do seu endurecimento completo, após o seu processo de cura, a resina termoestável fica completamente retalhada.

Normalmente, a resina utilizada em pré-impregnados é a epóxi, podendo também estar presente resinas bismaleimidadas (para moldes) ou resinas fenólicas (aplicações resistentes ao fogo) [25].

A utilização de pré-impregnados de fibra de carbono apresenta algumas vantagens, por exemplo a sua facilidade em termos de uso e o facto de a resina já estar misturada com o endurecedor, ou seja, não existe a possibilidade de erros na relação de mistura resina-endurecedor. Certamente que estes materiais também apresentam as suas limitações, neste caso o facto de a resina epóxi se encontrar no estado de polimerização o que requer o seu armazenamento no frio (-18°C) e o seu prazo de validade limitado.

Previamente, foi referida a necessidade do autoclave para completar o processo de cura das amostras, mais concretamente, o autoclave consiste num aparelho onde é colocada a amostra de pré-impregnado. Por conseguinte este equipamento oferece um ambiente cuja temperatura e pressão são controlados, ou seja, a amostra é colocada dentro de um saco e o mesmo conectado a um sistema de vácuo, à qual se soma uma pressão externa produzida na câmara da autoclave. Assim são definidos os valores de temperatura e pressão dando, deste modo, início ao processo de cura no laminado [25]. Neste processo, a temperatura é responsável por sustentar a reação química de cura da resina. Por sua vez a pressão ajuda a compactar o laminado e, desse modo, colapsar qualquer vazio (*void*) presente durante o processo de cura. Caso se trate de uma superfície irregular, como uma ferramenta, a pressão ajuda a conformar o laminado na superfície em questão [25].

Contudo, apesar da utilização de pré-impregnado de fibra de carbono exibir simplificações no processo de construção de amostras, muitos outros parâmetros devem ser tidos em conta, servindo de exemplo a orientação de cada camada, o número de camadas, a implementação de um defeito, as dimensões das amostras, os parâmetros de fabrico, entre outros.

2.1.2 Defeitos/Danos em Materiais Compósitos

Após uma breve exposição de alguns métodos a adotar para a construção de amostras de laminados CFRP, deve-se, também, enunciar alguns dos defeitos e/ou danos que são suscetíveis de ocorrer nestes materiais. Desta forma é possível compreender a importância do procedimento experimental e dos cuidados a ter com o mesmo.

Primeiramente, o termo defeito emprega vazios (*voids*), porosidades, rugas e corpos estranhos, esquematicamente representados na Figura 5 [21], estes ocorrem unicamente na fase de produção da amostra. Por conseguinte, os danos dão-se em condições de serviço, podendo ocorrer casos de deslocamento, delaminação, fissuração da matriz e rotura das fibras [21, 26], sendo que estes danos resultam de solicitações de furação, impacto, fadiga ou sobrecarga [21].

A ocorrência de defeitos está conectada a fatores como: inexperiência dos envolvidos no processo de produção, preparação inadequada e manuseamento inadequado da matéria-prima [21].

Porém, atualmente é possível detetar as principais causas para a formação de certos defeitos como vazios e porosidade, para além dos referidos anteriormente. Elas são: ar no interior da resina, inclusões orgânicas sujeitas a processos de cura com temperatura elevadas e produtos de reação resultantes do processo de cura [26].

Outros defeitos como rugas, ocorrem devido à ondulação de uma ou várias camadas. Assim durante o processo de construção da amostra é fundamental remover as rugas, até porque estas podem conduzir à concentração de excesso de resina e formação de vazios [21].

No que toca a defeitos com corpos estranhos, estes podem ser poeiras e contaminantes que consequentemente causam o aparecimento de defeitos [21, 26], ou podem ser inclusões propositalizadas e até com o intuito de simular a delaminação [18, 21].

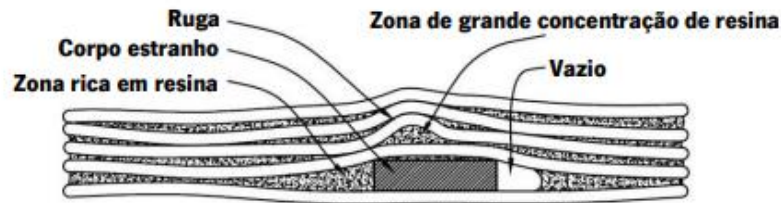


Figura 5: Representação esquematizada de defeitos em compósitos laminares [21].

Por sua vez, na temática danos, a ocorrência do deslocamento consiste na separação de componentes através de juntas adesivas. Este dano é tipicamente associado a estruturas sanduiche [26].

De forma sucinta, a delaminação consiste numa separação de camadas adjacentes do laminado [21], e o risco de esta ocorrer aumenta quando o compósito apresenta zonas de grande concentração de resina ou zonas sem resina. Outro cenário tipicamente marcado pela presença da delaminação são os casos de testes mecânicos de impacto ou sobrecarga [21, 26].

A fissuração da matriz, tal como o nome indica consistem em microfendas ou fendas que surgem no interior da matriz. Estas podem atuar como pontos de concentração de tensões e promover a delaminação ou rotura das fibras [21].

Por fim, a rotura das fibras pode ocorrer por manuseamento inadequado, imperfeições, solicitações mecânicas de impacto, corte, tração e compressão [21].

2.1.3 Casos de Estudo

Após a introdução de conceitos e definições, neste subcapítulo apresentam-se alguns trabalhos científicos, sendo que para a temática Materiais Compósitos apenas serão abordados os métodos experimentais utilizados para construção das amostras, nomeadamente orientação das camadas e inclusão de defeitos. Posteriormente serão abordados outros tópicos relevantes para esta dissertação.

Calvo *et al.* [18] procedeu a testes experimentais de laminados CFRP com delaminação inicial, as amostras foram obtidas graças ao processo autoclave e subsequentemente sujeitas a testes mecânicos de compressão. Em termos de construção, partindo de um laminado plano com quatro camadas unidirecionais de pré-impregnado (carbono/epóxi) resultaram amostras com 140 x 20 mm e 1,3 mm espessura. Todavia, foram desenvolvidas quatro configurações diferentes de amostras, primeiramente foram construídas amostras sem qualquer tipo de dano no laminado, em seguida foram acrescentadas três configurações diferentes, onde foi induzida a delaminação. De modo a induzir a delaminação e assim poder prosseguir ao seu estudo, foram implementados defeitos na construção das amostras. Para tal, um filme de Teflon (0,025 mm) com diferentes comprimentos foi colocado aquando da construção das mesmas. A implementação deste defeito

variou em termos de posição do filme de Teflon, num dos casos o defeito foi implementado no meio da construção da amostra e tem um comprimento de 14 mm, por sua vez os outros dois foram impregnados numa camada superior, porém um deles com 30 mm e outro com 20 mm de comprimento.

Morokov *et al.* [27] apresenta um estudo dedicado aos processos irreversíveis de deformação e rotura de amostras de laminados CFRP sujeitos a testes de flexão em três pontos. A monitorização a tempo real, bem como o acompanhamento e visualização dos danos em diferentes estágios da aplicação da carga mecânica foram executados com recurso a NDT (*non-destructive testing*), sendo elas a emissão acústica e microscopia acústica. Para este estudo foram desenvolvidas amostras em pré-impregnado de fibra de carbono, onde foram empilhadas dezasseis camadas seguindo a sequência $[0^\circ/90^\circ]_{4s}$ obtendo amostras com 150 mm x 17 mm e 4,32 mm de espessura. Ashir *et al.* [28] expôs um estudo acerca da posição dos defeitos nas amostras de laminados CFRP em testes mecânicos. Para tal o desenvolvimento das amostras envolveu a utilização do processo SCRIMP (*seemann composites resin infusion molding process*) que trata da moldagem por transferência da resina, que utiliza vácuo para extrair a resina líquida para uma camada seca. Este processo revela-se muito utilizado graças às vantagens que apresenta em termos da relação qualidade preço. A utilização desta técnica para construção de amostras CFRP exige o empilhamento de seis camadas unidireccionais perfazendo uma placa inicial de 300 x 600 mm², em seguida o processo de cura tomou 15 h no forno, a 50 °C. Porém, este estudo exhibe o desenvolvimento de laminados CFRP onde foi implementado um filme em PTFE (politetrafluoretileno) com 0,05 mm de espessura e 3 x 3 mm². Assim o defeito foi implementado entre o centro das camadas 1 e 2, 2 e 3, 3 e 4. Após o processo de cura, as amostras foram cortadas, obtendo as seguintes dimensões: 250 x 15 mm², 100 x 15 mm² e 40 x 15 mm². Comumente a alguns estudos já aqui apresentados, para além das amostras de CFRP com PTFE também foram desenvolvidas amostras sem qualquer defeito, e assim foi possível estabelecer a comparação entre a presença e ausência de defeito em testes mecânicos.

Mortell *et al.* [29] apresenta um estudo bastante minucioso no que toca à avaliação passo a passo de danos em compósitos laminados de construção cruzada $[0/90]_s$ e $[90/0]_s$. Nestas amostras foi induzida a falha intralaminar utilizando um aparelho capaz de aplicar 2 kN de força com uma taxa de deslocamento de 33 µm/min. Em termos de construção, foi utilizada matriz epóxi isotrópica reforçada com fibras de carbono anisotrópicas, e estas amostras ficaram completas com um processo de cura na autoclave de 2h (175 °C e 700 kN/m²).

A ideia por trás da construção destas amostras passa por conseguir representar dois cenários distintos nos testes mecânicos, em primeiro lugar uma amostra que segue a tipologia de construção $[90_4/0_7/90_4]$ representa o pior cenário para testes à flexão, e as amostras $[0_4/90_7/0_4]$ apresentam a melhor construção para testes à flexão, pois as camadas com 0° apresentam maior rigidez e são capazes de suportar cargas mais elevadas de tração.

Para este estudo foram obtidas amostras planas e retangulares, as mesmas maquinadas a partir do painel previamente construído. Graças a um disco de corte foram obtidas as amostras, com espessura de 2 mm, que posteriormente foram polidas.

Este ensaio caracteriza-se pela utilização de SEM (*scanning electron microscopy*), isto é, para se obter imagens de alta resolução da superfície da amostra. Por esse motivo, as amostras foram revestidas com um filme condutor. Seguidamente, o teste mecânico foi realizado com auxílio à câmara do SEM. A tensão de aceleração do SEM foi de 15 kV e as amostras foram carregadas em quatro pontos sob flexão, de modo a induzir condições normais de carregamento.

2.2 Estudo Mecânico de Materiais Compósitos

Até ao momento o termo delaminação foi introduzido como um dos enfoques a ser estudado. Porém, quando abordamos a temática “dano” num compósito laminado, o estudo pode ser feito a nível macroscópico, mesoscópico e microscópico [30-33].

A nível macroscópico o laminado é encarado como um material anisotrópico, não homogêneo e a falha ocorre quando a tensão média suportada pelo material é ultrapassada [30, 31]. No nível mesoscópico a camada é encarada como meio homogêneo anisotrópico, e neste nível simula-se a delaminação [32, 33]. A nível microscópico pode-se simular as fibras e a matriz. É possível simular a quebra de fibras, o *pull-out* (arrancamento da fibra da matriz devido à falha na interface) e fissuras na matriz [30, 31].

A abordagem analítica, nomeadamente numa escala microscópica, permite obter expressões bem-sucedidas, mas os pressupostos idealistas em que se baseiam limitam a sua capacidade de previsão em condições mais gerais [33]. Assim, a utilização de abordagens baseadas em elementos finitos tornou-se popular.

Nestes termos, uma análise macroscópica é a mais fácil de efetuar e é a que requer menos esforço computacional [33]. Pois esta permite o estudo de padrões de tensões e zonas de concentração de tensões no compósito. Por sua vez, na escala mesoscópica o esforço computacional não é muito elevado e permite um estudo mais aprofundado de diferentes mecanismos de dano [33]. No que diz respeito à análise microscópica, esta apenas se tornou possível devido aos avanços tecnológicos. Assim, esta análise permite uma boa visão da influência de cada constituinte no comportamento mecânico do compósito. Além disso todos os tipos de mecanismo de dano podem ser recriados neste nível [33]. Se cada um dos constituintes do compósito for modelado como um modelo constitutivo fisicamente sólido, as propriedades não lineares podem ser totalmente determinadas.

Na Figura 6 é possível constatar não só a evolução na escala para o estudo de compósitos, mas também os dados necessários para efetuar um estudo numa determinada escala.

Diferentes ensaios mecânicos em materiais compósitos podem apresentar objetivos diferentes, por exemplo: controlo da qualidade, comparação entre materiais para posterior seleção ou a obtenção de propriedades para projetos [34]. No entanto, um ensaio mecânico que não visa a rotura total do compósito pode ser utilizado para identificar a presença de danos na estrutura do compósito, pois a presença de um dano transpõe alterações na curva força-deslocamento devido à presença de descontinuidades. Assim, há ensaios mecânicos que podem ser usados para caracterizar as propriedades de um laminado, posteriormente essas propriedades são adotadas no método de elementos finitos para construção de um modelo numérico de um laminado.

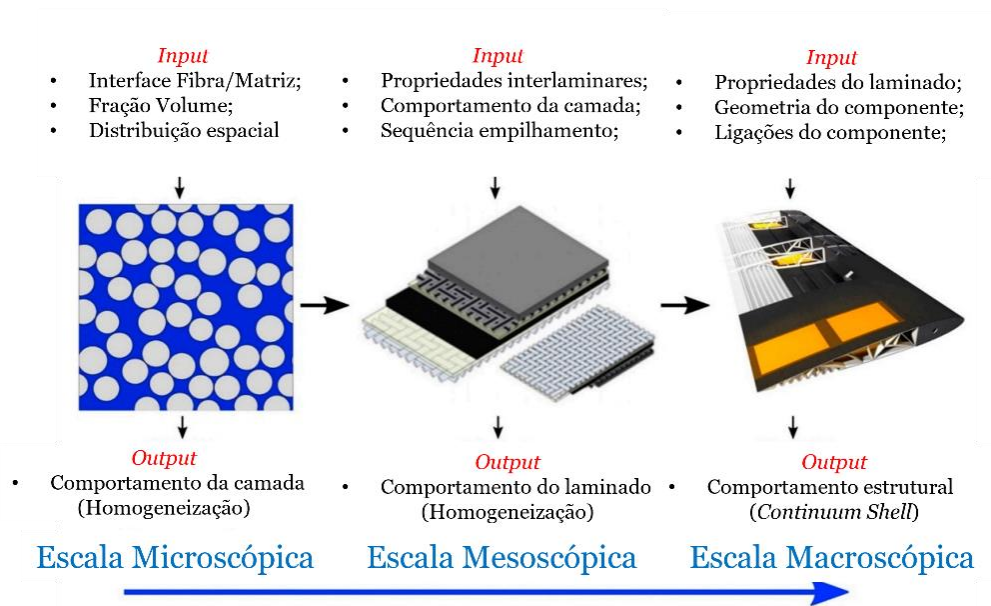


Figura 6: Evolução no estudo de materiais compósitos, desde escala microscópica até uma escala macroscópica, adaptado [32].

Dependendo do tipo de compósito em estudo certos cuidados devem ser tidos, por exemplo quando se trata de compósitos de matriz polimérica, a natureza polimérica da matriz introduz o caráter viscoelástico em alguns componentes. A anisotropia é outra característica que requer atenção, pois exige um maior número de ensaios para poder caracterizar o material [34].

Assim, os principais ensaios com intuito de caracterizar o comportamento mecânico de materiais compósitos são: ensaios de tração, ensaios de compressão, ensaios de corte e ensaios de flexão [34]. Uma característica associada aos ensaios mecânicos são as várias normas internacionais que visam a supressão de dificuldades para a obtenção de resultados válidos, porém face a propriedades específicas de certos materiais em estudo, nem sempre as normas e recomendações podem ser seguidas [34].

Quando realizamos ensaios mecânicos em compósitos existem modos mais comuns de falha que passam por: falha na ligação interface fibra-matriz; rotura por tração, compressão ou corte (cisalhamento) da matriz e falha por tração ou encurvadura (*buckling*) das fibras [22, 29, 30].

Na Figura 7 é possível constatar as cinco fases de progressão do dano durante o tempo de vida útil de um compósito, sendo o primeiro estágio o aparecimento de micro fendas na matriz, seguido da falha na interface fibra-matriz, crescimento da delaminação, rotura das fibras e por fim, o crescimento da delaminação e rotura final do compósito [22, 30]. É de notar que estes modos de falha não são isolados nem independentes podendo interagir ou desencadear-se uns aos outros. As falhas microscópicas dentro de uma camada podem causar falhas por delaminação entre camadas e resultar em falhas macroscópicas do laminado (rotura do compósito).

Os cinco estágios que conduzem à rotura do compósito enquadram-se em três fases principais [22, 27, 31]. A Fase I é caracterizada pela alteração estrutural sob carga mecânica [27], neste momento a fase elástica do material é ultrapassada e o contínuo aumento de carga conduz à formação de múltiplas micro fendas na matriz, relacionadas com o volume de cada camada usada

no empilhamento para a construção do laminado. Os danos podem atingir a interface fibra-matriz, mas a espessura das fendas é mínima. Porém, em alguns casos, o seu comprimento atinge proporções macroscópicas. Estima-se que nesta fase ocorram pequenos danos entre os primeiros 10% a 20% da vida útil dos materiais [22]. A Fase II é marcada pelo início da delaminação interlaminar devido à concentração de tensões [22], acumulação e acoplamento de fissuras [27], os danos ocorrem a uma velocidade inferior, comparando com a Fase I, e prologam-se até 70% a 80% da vida útil [22]. Por fim, a Fase III é caracterizada pela formação de danos macroscópicos na integridade do material, desde falha localizada de múltiplas fibras e crescimento da delaminação culminando com a rotura do compósito.

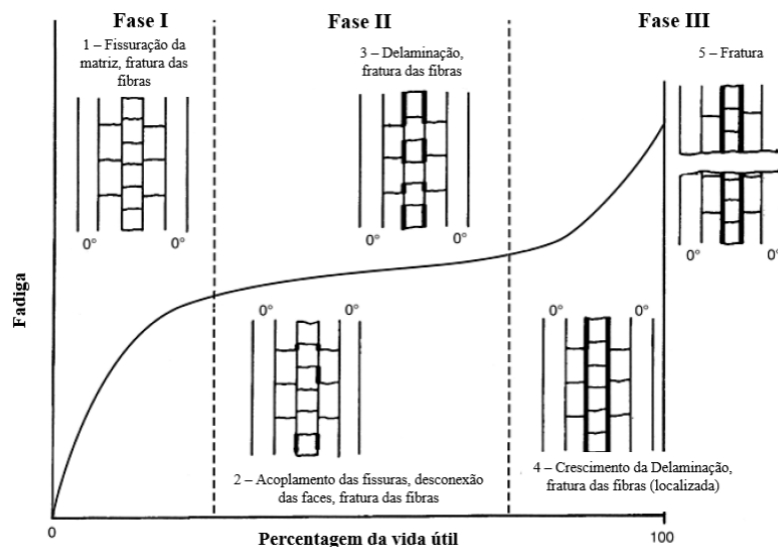


Figura 7: Desenvolvimento do dano em compósitos no seu tempo de vida [22].

Alguns estudos debruçam-se sobre a delaminação em compósitos de construção cruzada [31]. A evolução em termos de danos é algo muito semelhante ao referido anteriormente, porém à medida que são formadas e desenvolvidas micro fendas, elas são deparadas com uma região do material onde as tensões mecânicas são muitas baixas, ou seja, a camada com uma orientação diferente. Em testes mecânicos, servindo de exemplo, uma camada com orientação 0° poderá não apresentar nenhuma alteração nem exibir qualquer tipo de dano, por sua vez tal acontecimento pode não se verificar nas camadas com orientação díspar, por exemplo 90°, mas à medida que a carga é removida, e porque as camadas se encontram ligadas, as camadas com orientação 0° apresentam a capacidade de modelar as camadas com 90° à sua posição inicial.

Certamente, quando a carga mecânica não é removida, o desenvolvimento e crescimento da delaminação é impulsionado pelo facto de que as regiões locais do composto deformar-se-ão de forma diferente, pois são camadas com diferentes orientações [31]. Na Figura 8, é possível constatar uma imagem alusiva à delaminação em compósitos laminados de construção cruzada. O que podemos analisar desta imagem é que a delaminação tende a iniciar-se na periferia das amostras e à medida que esta energia é libertada é promovida a separação entre camadas, tipicamente entre camadas de orientações diferentes Figura 9 [31].

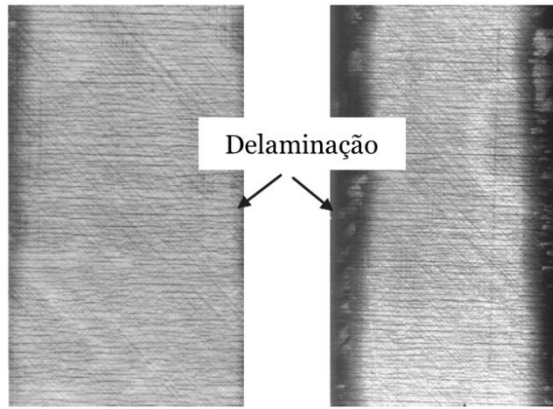


Figura 8: Radiografia onde é detetável delaminação na periferia de compósitos laminados, adaptado de [31].

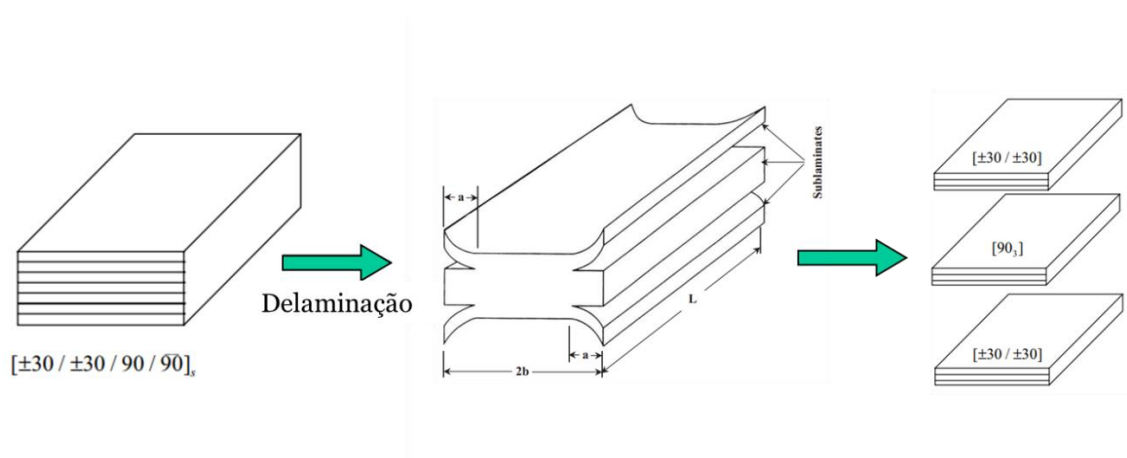


Figura 9: Processo de delaminação num compósito laminado cuja construção: $[\pm 30 / \pm 30 / 90 / 90]_s$, adaptado de [31].

A delaminação de compósitos com matriz polimérica possui vários estágios de resistência à rotura. Por conseguinte são vários os parâmetros de avaliação deste problema [19]. A definição de Modo I para compósitos unidirecionais diz respeito ao modo de abertura da fenda num plano de simetria paralelo às fibras [19, 22]. Este modo de divisão longitudinal é também encarado como o modo de abertura de uma fenda por delaminação. A resposta à delaminação segundo o Modo II de um material homogêneo é descrita conforme o modo de corte, neste caso as faces das fendas exibem um movimento de deslizamento sem fricção. Por fim, o Modo III para classificar a delaminação de um material homogêneo é descrito pelo modo torção [19, 22]. Na Figura 10 estão esquematicamente representados os Modos de falha referidos.

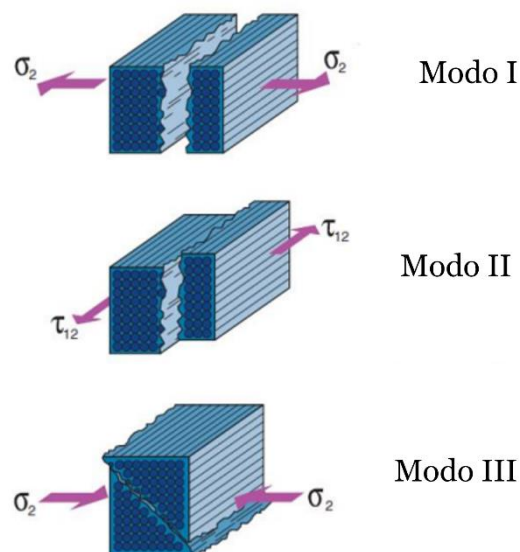


Figura 10: Modos de falha de materiais compósitos com construção unidirecional, adaptado [22].

Até ao momento percebemos que o estudo de danos em compósitos laminados é algo complexo, mas importante. Porém, em termos experimentais são vários os possíveis testes a executar nestas amostras de modo a entender o seu comportamento mecânico. Neste ramo surgem os NDT (*non-destructive testing*) e os DT (*destructive testing*). Estes dois procedimentos são considerados os métodos mais comuns para proceder a controlo de qualidade de amostras FRP [21, 28]. Dentro da categoria NDT encontramos testes utilizando aparelhos ultrassónicos, eletromecânicos, acústicos, análises termográficas, radiografias dos materiais e a inspeção visual [21, 28]. A principal vantagem destes métodos consiste na fiabilidade e precisão, principalmente em testes de controlo de qualidade, que oferecem, por exemplo a localização e tamanho de um defeito numa amostra FRP graças a testes com contraste de cores [28]. Porém, estes métodos exigem equipamentos avançados e pessoal especializado, algo dispensável aos DT. O principal inconveniente dos DT é que após os testes as amostras não podem mais ser utilizadas. Alguns exemplos de DT são: testes de flexão, tensão ou impacto em FRP [28].

2.2.1 Ensaios de Flexão em Compósitos Laminados

Previamente foram referidos os vários ensaios mecânicos para materiais compósitos, porém pela facilidade e pelo tipo de solicitações associadas a placas, vigas e cascas os ensaios de flexão em compósitos laminados são frequentes e torna-se pertinente a compreensão deste ensaio mecânico.

Os ensaios mecânicos de flexão são empregues para testes de controlo de qualidade devido à simplicidade do procedimento e dos equipamentos, considerando que este ensaio apresenta duas variantes [34], flexão em três pontos e flexão em quatro pontos, esquematicamente representados na Figura 11. Como notado nestas imagens, a variação dá-se no número total de suportes e pontos de carregamento.

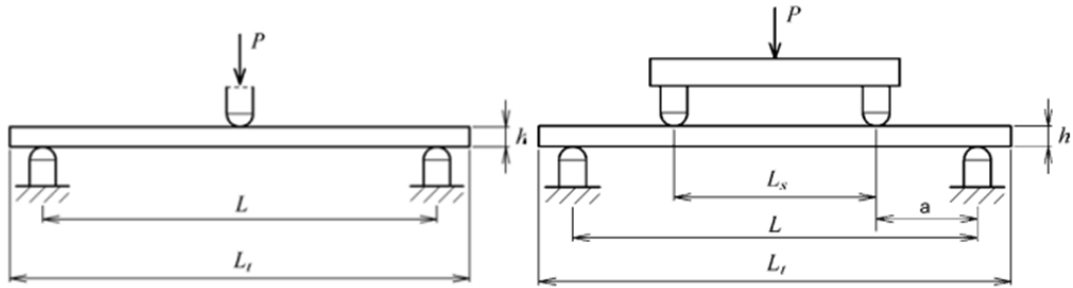


Figura 11: Representação de duas possíveis montagens para realização de ensaios de flexão. Flexão em três pontos e flexão em quatro pontos [34].

No ensaio de flexão em três pontos o volume de material sujeito a tensões máximas é inferior ao ensaio de flexão em quatro pontos. Porém, o ensaio com três pontos revela ser mais simples e suficiente. Em termos mais específicos, para a realização deste ensaio experimental é preciso colocar a amostra sobre os apoios inferiores, tendo em consideração a sua simetria e alinhamento [21], em seguida a cabeça móvel (punção) da máquina desce para exercer força sobre a amostra. De notar que esta carga é aplicada no ponto intermédio da amostra [21].

Alguns autores apresentam um ponto de vista teórico sobre este assunto [35, 36]. Isto é, as propriedades de flexão dos materiais compósitos são frequentemente caracterizadas com vigas simplesmente apoiadas sob cargas concentradas. Os resultados dos ensaios são baseados em equações de vigas homogêneas [35]. No entanto, para compósitos laminados estas fórmulas devem ser diferentes, pois deve ser tida em consideração a sequência de empilhamento do laminado [35].

Assim, de entre vários métodos disponíveis para medir as propriedades de corte, o ensaio de corte de uma viga-curta (*short-beam*) tornou-se um método amplamente utilizado para caracterizar a resistência à rotura interlaminar de compósitos reforçados com fibras [35, 36]. Este método envolve o carregamento sob flexão de três pontos com determinadas dimensões, de modo que seja induzida a rotura por corte interlaminar.

A realização de um teste mecânico de flexão em três pontos envolve a utilização das dimensões adequadas, que neste caso, correspondem à relação comprimento do vão de suporte (L) e espessura da amostra (h). O rácio mais indicado L/h é escolhido tendo por base ensaios estáticos [37].

A Equação (2.2.1.1) [37] mostra que o erro devido à variação do vão de suporte depende da gama de deformações adotadas para o cálculo do módulo (E_{3P}), do raio dos apoios (R_A) e da espessura da amostra (h), sendo ε^{3P} correspondente à deformação máxima.

$$E_f = E_{3P} \left[1 - \frac{3R_A}{h} (\varepsilon_1^{3P} + \varepsilon_2^{3P}) \right] \quad (2.2.1.1).$$

Por conseguinte, quando a relação L/h é pequena, espera-se que uma viga ortotrópica de baixa resistência ao corte falhe por corte no eixo neutro. Para valores L/h superiores espera-se que a resistência à tração seja inferior comparando com a resistência à compressão. Por fim, existem valores intermédios, nestes o comportamento é transitório e o modo de rotura pode variar entre amostras [36].

Na Figura 11 podemos constatar vários dados (L , L_t , L_s , h e a) cujos valores são fornecidos por normas recomendadas, como por exemplo ASTM D 790, ISO 14125, entre outras [34].

Após a preparação do equipamento para a realização dos testes mecânicos, podem ser esperados alguns resultados já expostos na literatura [20] para compósitos laminados. Por exemplo, uma amostra de quatro camadas com orientações $[0/90]_s$ e $[90/0]_s$, tal como no estudo proposto por Mortell *et al.* [29] sujeita a testes de flexão.

Para estes casos podemos esperar algo semelhante ao representado na Figura 12, ou seja, no primeiro caso as camadas exteriores têm orientação de 0° , logo as lâminas interiores têm orientação 90° , para o segundo caso a situação inverte-se. Neste caso, uma simples troca de orientação conduziu a resultados diferentes, portanto para o mesmo valor de momento fletor, o primeiro laminado apresenta menos deformação quando comparado com o segundo. Porém, um exemplo prático semelhante será abordado em seguida.

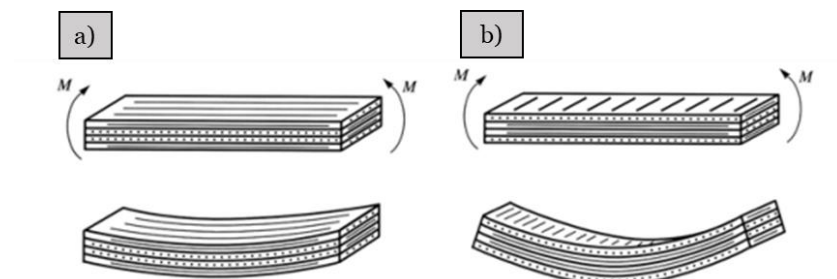


Figura 12: Diferentes respostas de compósitos laminados sujeitos a flexão. a) sequência de empilhamento $[0/90]_s$ e b) sequência de empilhamento $[90/0]_s$, adaptado [20].

O estudo de laminados CFRP sujeito a carga de compressão proposto por Calvo *et al.* [18] defende que o estudo da delaminação é especialmente relevante sob cargas de compressão, pois neste cenário é promovida a falha interlaminar. A análise de encurvadura de estruturas laminadas são descritas segundo três estágios de dano: primeiramente inicia-se o dano no compósito, em seguida está presente a evolução dos danos originando modos *mixed* ou *global buckling*, dependendo do tamanho e localização da delaminação. A presença destes modos de instabilidade está diretamente ligada a parâmetros como: geometria da delaminação, propriedades materiais de cada camada e sequência de empilhamento.

Neste estudo, os testes mecânicos ocorreram com recurso a uma máquina de testes eletromecânica. Neste processo foi utilizada a técnica DIC (*digital image correlation*), que passa por um método de medição ótica do deslocamento, utilizando padrões de imagens de referência para medições precisas da deformação em superfícies 3D durante os testes. Este método não destrutivo, divide a região de interesse em faces quadradas para mostrar o seu deslocamento com base em um critério padrão de imagem e compara cada imagem deformada com a referência ou com a anterior. A região de interesse foi definida como toda a superfície superior da amostra.

As imagens evolutivas em termos de danos foram capturadas com uma lente local fixa de alta resolução com anéis de extensão de 10 mm. Para além disso, a camada superior da amostra foi aleatoriamente pintada com *spray* preto e branco de modo a realçar contraste do dano na

amostra. A utilização da técnica DIC levou à utilização do *software* de correlação de imagens digitais com intuito de verificar a melhor resolução padrão na superfície das amostras.

A análise experimental proposta por Calvo *et al.* [18] fundamenta a presença de dois modos de *buckling* das amostras. Das quatro geometrias criadas, as amostras sem defeito (A), bem como as que possuíam defeito na camada do meio (B) apresentam uma encurvadura global (*global buckling*) e exibem comportamentos muito semelhantes. Por sua vez, as duas outras geometrias, onde está presente um defeito na camada superior (C e D), manifestam encurvadura mista (*mixed buckling*). Estas duas configurações atingem cargas máximas ligeiramente superiores, mas com um deslocamento inferior. Para além disso, a falha destas amostras revela ser bastante mais abrupta, quando comparando com as outras duas sujeitas à encurvadura global, como podemos constatar na Figura 13. Estas duas amostras possuem um defeito muito próximo da superfície livre o que conduz à delaminação na face superior. Concluiu-se, experimentalmente, que amostras com delaminação superior apresentam uma resposta mais rígida do que a delaminação no plano médio.

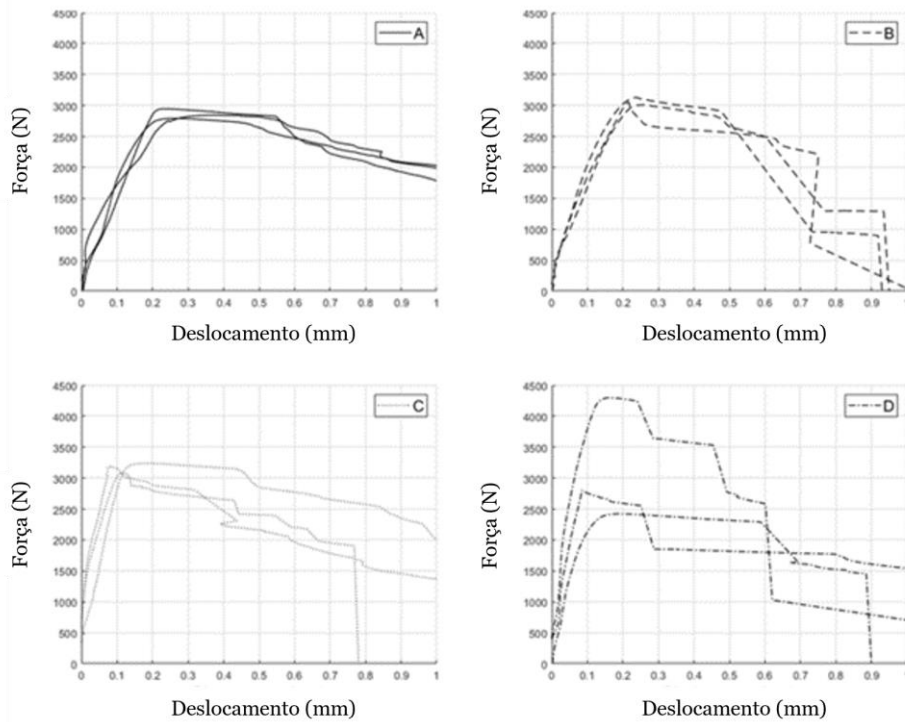


Figura 13: Curvas força - deslocamento para as diferentes geometrias (A, B, C, D) sujeitas a testes de compressão, adaptado [18].

Em termos mais específicos, a geometria sem defeito (A), à medida que o deslocamento aumenta, a capacidade de suportar a carga é reduzida até atingir a rotura da amostra. Por sua vez, quando o defeito está aplicado no plano do meio (B), a deflexão ocorre na mesma direção que a delaminação em Modo II, contudo observa-se o mesmo pico de força e o mesmo deslocamento que a amostra sem defeito. Em contrapartida, as amostras com defeitos na camada superior (C e

D) revelam um valor de carga máxima para um descolamento menor, devido à encurvadura local inicial, gerando uma abertura Modo I, contudo a evolução para a encurvadura mista altera o modo de delaminação para Modo II.

Na Figura 14 observa-se o resultado obtido após a realização do teste mecânico para as amostras B e D, comumente com a amostra C, todas apresentaram delaminação até à rotura final, caracterizado como falha fibra-matriz.



Figura 14: Falha mecânica nas amostras em teste de encurvadura. a) amostra B, defeito no plano do meio e b) amostra D, defeito na face superior [18].

Morokov *et al.* [27] caracteriza a flexão como um dos principais tipos de carga mecânica na engenharia, pois a flexão é uma carga complexa com tipos distintos de tensão que atuam em zonas diferentes da amostra em estudo. Tensões por compressão e tração apresentam valores máximos na face frontal e posterior da amostra, por sua vez no plano médio as tensões de corte são máximas, maior (e menos desprezável) quanto menor a distância entre apoios.

Experimentalmente, com o intuito de detetar e capturar a imagem relativa ao aparecimento de deformação no laminado, cada amostra foi sujeita ao processo de carregar-descarregar três vezes. A incorporação da emissão acústica neste estudo visa a monitorização da integridade estrutural da amostra nos estudos experimentais. A emissão acústica é um método passivo, que regista vibrações mecânicas geradas no volume de uma amostra sob tensão mecânica. Este método deteta o crescimento de danos a tempo real, deste modo este processo é capaz de detetar o início da falha da matriz, a quebra das fibras e a delaminação no compósito.

Este estudo também apresenta a imagem ultrassónica por camadas nos ensaios à flexão. As imagens obtidas por ultrassom foram usadas para cada iteração e tratadas como uma imagem padrão, onde o brilho de cada ponto é determinado pela amplitude do sinal recebido. Quando o sinal é refletido ou disperso no volume do laminado significa que estão presentes discontinuidades na microestrutura. Por sua vez, danos maiores como fendas e delaminação são áreas marcadas como brilhantes no *C-scan* (dados de inspeção obtidos através de equipamentos ultrassom, a representação *C-scan* mostra uma projeção ortogonal ao plano da superfície dos danos ao longo da espessura do laminado em inspeção [21]). Uma limitação do *C-scan*, como no raio X, é que não é capaz de detetar a que altura está o defeito. As fissuras verticais na matriz e

fratura das fibras são representadas pela sombra causada pela queda de amplitude do sinal proveniente dos elementos abaixo destes danos.

Nas amostras em estudo, diferentes tensões estiveram presentes em diferentes zonas das amostras. A camada superior sujeita à compressão caracterizou-se pela presença de um defeito causado pelo processo de corte das amostras, este defeito estava presente entre a segunda e terceira camada e possuía uma largura de 1,5 mm.

O primeiro carregamento resultou na rotura da primeira camada de fibras. Como esperado, quando aplicada a segunda carga o número de fibras a ceder à rotura progrediu, atingindo a terceira camada, aumentando, inclusive, a profundidade da fenda. Neste ensaio foi possível constatar pequenos sinais de delaminação entre camadas muito próximas da fenda. Para além disso, a delaminação emergiu das camadas com 0° de orientação, mais concretamente da primeira e terceira camada. Após a terceira e última carga foram observadas fissuras e a descolagem da matriz nas camadas com orientação de 90° na zona sujeita a compressão.

Por outro lado, na zona inferior, sujeita à tração, após a carga um ser aplicada, observaram-se micro fendas na décima quinta camada, cuja orientação é de 90° , ela foi sujeita à tração máxima. Após a segunda carga nenhum sinal de delaminação foi detetado, mas na região propensa à tração, numerosas fissuras na matriz foram visualizadas, na camada com orientação de 90° . Depois da última carga, múltiplas fissuras estavam distribuídas quer nas camadas com orientação de 90° , quer nas camadas com 0° . A carga três resultou na rotura das fibras na décima sexta camada com 0° de orientação. Tanto a quebra das fibras como delaminação resultaram na instabilidade da amostra.

A rotura no teste mecânico de flexão deu-se por completo para a carga de 2,9 kN e na Figura 15 é possível visualizar uma amostra sujeita a estes testes, com a particularidade de graças à micrografia de ótica ampliada (X50) ser possível detetar os danos finais na secção da amostra, nomeadamente: falha da matriz, rotura das fibras e delaminação entre camadas. É ainda apresentado um esquema ilustrativo e comparativo destes danos nas amostras.

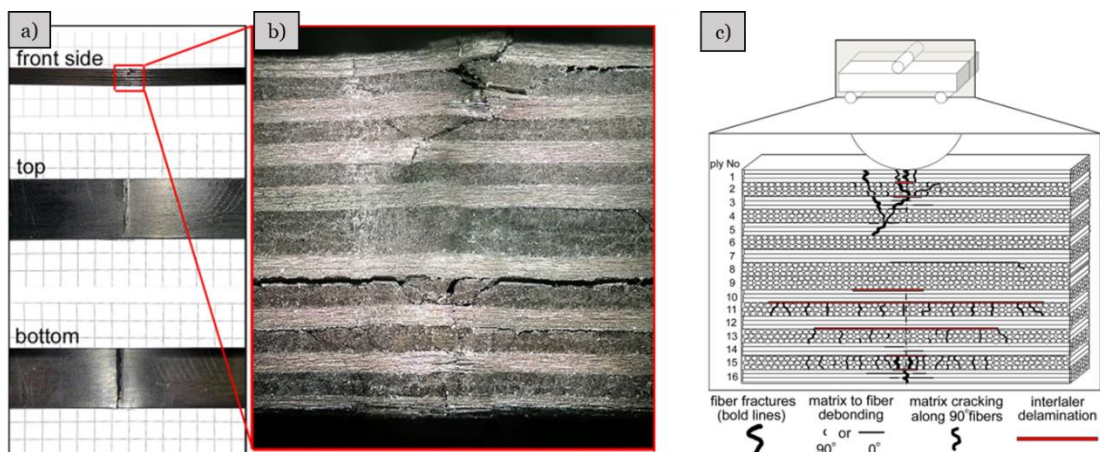


Figura 15: Resultado de testes mecânicos de flexão em laminados CFRP. a) amostra após ensaio mecânico, b) análise segundo micrografia ótica da secção da amostra e c) esquema alusivo aos testes de flexão e distribuição de danos nas amostras [27].

Ashir *et al.* [28] apresenta um estudo onde são executados testes mecânicos (tensão, flexão e impacto) em amostras CFRP (laminados CFRP obtidos pelo empilhamento de seis camadas unidirecionais) com a inclusão de um filme de PTFE. Este ensaio experimental visa a avaliação da distância entre o PTFE e a camada superior do laminado, em termos de comportamento mecânico. Dessa forma, foram retiradas as seguintes conclusões: os testes de resistência à flexão variam entre 720 MPa e 850 MPa; foram notados alguns desvios, no que toca à força resultante para amostras semelhantes, atribuídos ao possível deslocamento do filme de PTFE quando ocorreu a infusão da resina; da mesma forma que nos testes de tração, o efeito da sobreposição de fibra de carbono e delaminação fibra-matriz afeta os testes de flexão das amostras CFRP com PTFE. Assim, conclui-se que ao aumentar a distância entre o filme de PTFE e o topo do laminado CFRP a sua resistência à flexão é reduzida, o mesmo acontece para testes à tração e impacto. Este ensaio experimental foi suportado pela utilização de um microscópio ótico, na Figura 16 podemos constatar o resultado desta análise. Nela está demarcada com um retângulo vermelho o filme de PTFE, as manchas cinzentas espelham a matriz, entre outros. Graças a esta análise foi possível confirmar a posição do PTFE e averiguar a espessura da amostra (2,193 mm). É de notar que para estes ensaios mecânicos todas as amostras sujeitas a testes de flexão foram testadas até à rotura completa do material.

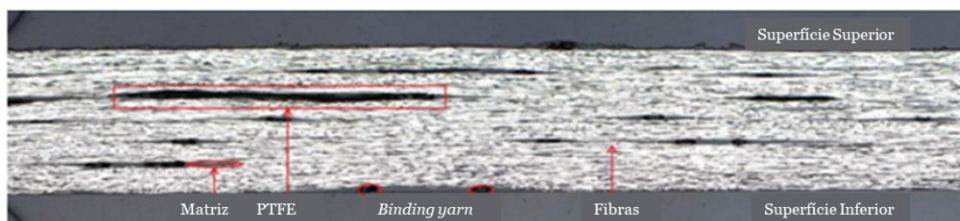


Figura 16: Análise utilizando microscópio ótico de amostras CFRP com PTFE, adaptado [28].

Mortell *et al.* [29] apresenta um estudo experimental baseado na construção de dois cenários distintos de amostras, a maioria do progresso micro mecânico é apresentado para o laminado [90/0] devido à evolução lenta em termos de danos, sendo possível avaliar e registar cada passo dessa evolução. Por sua vez, a construção [0/90] exhibe uma falha abrupta, e por esse motivo é apresentada uma breve descrição para este cenário.

A amostra [0/90] foi sujeita a um teste mecânico de flexão em quatro pontos, na Figura 17 a [29] é apresentada uma imagem da amostra após a rotura. Nela observamos o ângulo de falha na camada com orientação de 90° até ao limite da interface 90°/0°, este ângulo é de 45°. O facto de ser notável uma falha com 45° sugere que a falha no laminado [90/0] é dominada pela tensão de corte, comum em testes de flexão em quatro pontos entre o *pin* de carga e o suporte.

Curiosamente, antes da fissuração apresentada, nenhum dano tinha sido detetado na camada 90° ou na fronteira entre camadas. Este comportamento é causado pela elevada rigidez apresentada pela camada de 0° no exterior do laminado. Apesar do início de propagação de danos ser atrasado

com esta característica, após ser aplicado um certo nível de carga dá-se a falha catastrófica de imediato.

A Figura 17 apresenta o estado da amostra após a falha, onde está presente uma amostra com uma fenda transversal e delaminação nos limites da camada, estima-se que a falha por delaminação seja responsável pela perda de 50% da capacidade de carga da amostra, na Figura 17 b conseguimos observar várias fissuras ao longo da camada.

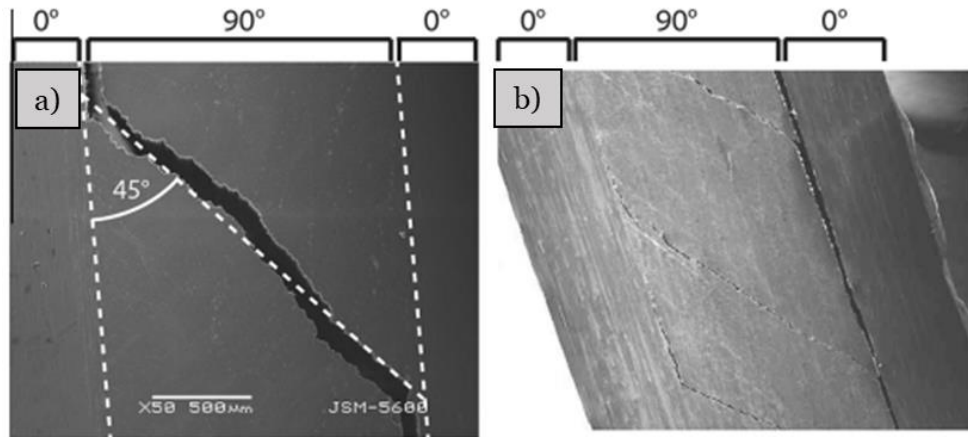


Figura 17: Imagens de amostras após testes mecânicos. a) falha transversal de 45° na camada com orientação 90° e b) delaminação na interface $90^\circ/0^\circ$ [29].

Por sua vez, a amostra [90/0] também sujeita a flexão em quatro pontos apresenta vários estágios de dano. Neste estudo, através de um vídeo a tempo real e com o auxílio da microscopia eletrônica foi possível contruir uma sequência de imagens que retratam a progressão de dano das amostras, como podemos constatar na Figura 18. Em primeiro lugar, dá-se a falha na interface fibra-matriz (Figura 18 a). Este dano ocorre devido à proximidade entre fibras na direção da carga. Na Figura 18 b, observamos o segundo estágio de dano, neste caso a formação de micro fendas. Seguidamente, a continua formação e propagação das micro fendas leva a menos resistência por parte da interface fibra-matriz e da matriz. Na Figura 18 c é visível o estado de progressão de fenda, neste momento, o continuo aumento de carga origina o crescimento das micro fendas, as mesmas estendem-se até às próximas camadas do laminado, eventualmente este acontecimento leva à delaminação, exposta na Figura 18 d, que por sua vez conduz à falha total do compósito, Figura 18 e.

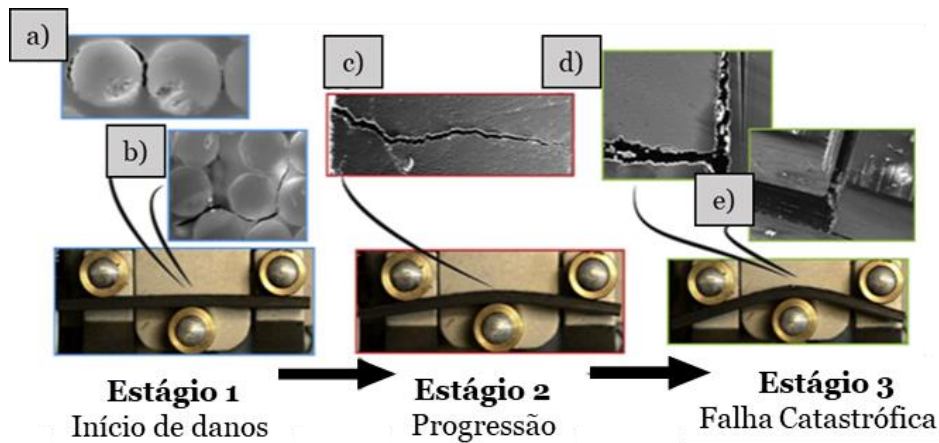


Figura 18: Evolução de dano em testes mecânicos de flexão, desde o início do teste até ao ponto de rotura, adaptado [29].

2.3 Estudo Numérico de Materiais Compósitos

O estudo numérico de compósitos tem como propósito a compreensão da falha dos materiais sob testes mecânicos, de modo a otimizar estruturas em compósitos [38]. De entre vários estudos, a delaminação é caracterizada como a falha principal nos compósitos. Assim, modelações fidedignas de compósitos revelam a sua importância para o estudo destes materiais.

A modelação usando o método de elementos finitos é bastante utilizada para prever o início e propagação de danos em compósitos, usualmente associado com mecanismos de fratura ou zona de elementos coesivos [38, 39]. Em suma, a modelação numérica, segundo o método de elementos finitos, é utilizada para determinar soluções aproximadas de problemas que envolvem equações diferenciais em problemas que envolvem condições de fronteira [22]. A justificação para a utilização deste método, passa também pela desintegração dos problemas em partes pequenas (elementos finitos), que estão conectados entre si por nós, sendo o conjunto de nós denominado por malha, e todas as propriedades relativas aos materiais são definidas na malha [22].

Os progressos informáticos que marcaram os anos 90 foram fundamentais para impulsionar a simulação segundo o método de elementos finitos. Para obter resultados credíveis através desta análise existem certos requisitos como o desenvolvimento de um código fiável de elementos finitos, capaz de solucionar as equações inseridas, um grau suficientemente elevado de discretização e modelos constitutivos que descrevem bem o comportamento mecânico local do compósito laminado [39].

À semelhança de uma análise experimental, também neste caso, dependendo da dimensão macroscópica ou microscópica da fenda são abordadas técnicas de análise distintas. Portanto, se estão presentes apenas algumas fendas macroscópicas, elas podem ser encaradas como partes limite do compósito e podem ser estudadas individualmente [39]. Se, por outro lado, estão presentes numerosas fendas microscópicas que estão livremente dispersas pelo compósito, torna-se impossível o seu estudo individual [39].

Uma fenda, em um material sob carga, deve propagar-se em qualquer direção no plano ortogonal à direção da tensão principal máxima. A delaminação consiste numa fenda que gera uma rotura

na adesão e cresce entre duas camadas [39], possivelmente quando o contacto se dá entre duas camadas com diferentes orientações, e, portanto, com rigidez diferente. Assim, quando ocorre uma falha por delaminação o caminho de propagação da fenda está confinado à superfície da camada. Isto pode ser explorado pela análise de elementos finitos, modelando o trajeto presumido como uma interface, a mesma inicialmente responsável por conectar cada camada do laminado [39].

Atualmente, existem duas classificações possíveis para os critérios de falha em materiais compósitos. Por definição os critérios de falha servem para prever as falhas que ocorrem em estruturas sob carregamentos multiaxiais [9]. Porém, estes critérios não conseguem acompanhar a propagação da falha durante todo o processo de falha até à rotura do laminado, mas preveem a primeira ocorrência de falha, seja esta em uma ou várias camadas.

Os critérios fenomenológicos [22] estão associados aos modos de falha, considerando a heterogeneidade dos materiais e avaliam a probabilidade de os modos de falha ocorrerem separadamente, nesta categoria inserem-se: critérios de tensão máxima, deformação máxima, nomeadamente são exemplos destes critérios os métodos de Hashin, Hashin-Rotem e Puck.

Por sua vez, os critérios não fenomenológicos [22] não estão associados aos modos de falha, tal deve-se ao facto de eles preverem se o material falha ou não. Neste caso não é indicado o modo de falha do compósito, apenas se ele ocorre. Assim, não é possível prever os efeitos das falhas nas propriedades mecânicas, alguns destes critérios são: Tsai-Wu, Tsai-Hill, Azzi-Tsai, Hoffman e Chamis.

Outros autores [30] fazem esta divisão em três categorias, sendo os critérios iterativos (Tsai-Wu e Tsai-Hill), critérios parcialmente iterativos (Hashin-Rotem e Puck) e os critérios não iterativos (tensão máxima e deformação máxima).

2.3.1 Casos de Estudo

A análise segundo o método dos elementos finitos proposta por Calvo *et al.* [18] foi desenvolvida com recurso ao *Abaqus*, tendo como objetivo a simulação de testes à compressão. Sendo que cada modelo foi desenvolvido de acordo com a sequência de empilhamento anteriormente referida, incluindo a implementação de defeitos. Para o correto desenvolvimento destas amostras, as camadas foram modeladas assumindo comportamento elástico até à rotura. Para tal devem ser incorporados no programa dados acerca das propriedades mecânicas das amostras em CFRP.

A análise de elementos finitos introduz o modelo de Hashin, que consistem em expressões numéricas para definir o fracasso do laminado. Este modelo é muitas vezes aplicado ao estudo de compósitos. Nele são consideradas quatro falhas possíveis: falha da fibra à compressão (Equação 2.3.1.1), falha da fibra à tração (Equação 2.3.1.2), falha da matriz à compressão (Equação 2.3.1.3) e falha da matriz à tração (Equação 2.3.1.4) [18].

$$\frac{-\sigma_{11}}{X_c} = 1 \quad (2.3.1.1).$$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_l^2} = 1 \quad (2.3.1.2).$$

$$\left[\left(\frac{Y_c}{2S_t} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_t} \right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_t^2} + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_l^2} = 1 \quad (2.3.1.3).$$

$$\left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_t} \right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_t^2} + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_l^2} = 1 \quad (2.3.1.4).$$

Nas equações apresentadas, σ_{ij} e τ_{ij} são os componentes do tensor de tensão, X_t e X_c correspondem à resistência do laminado em tração e compressão na direção das fibras, Y_t e Y_c tratam da resistência do laminado em tração e compressão na direção transversal das fibras, por fim S_l e S_t representam a resistência ao corte no plano longitudinal e transversal.

De notar que quando estas equações atingem o valor um, o material encontra-se completamente danificado e a resistência é perdida.

A utilização de elementos coesivos também foi introduzida neste estudo, esta tem como função a simulação da progressão da delaminação. Trata-se de uma camada de 0,001 m de espessura constituída por elementos coesivos, a mesma é inserida ao longo do plano horizontal entre cada duas camadas. Notando que para cada geometria testada, a zona coesiva foi modificada, removendo os elementos onde o filme de Teflon é aplicado para simular a delaminação. Comumente ao modelo de Hashin, vários dados acerca do material devem ser introduzidos para proceder a esta análise de elementos coesivos, entre eles: energia libertada para delaminação Modo I e Modo II, a rigidez dos elementos coesivos, a tensão normal máxima, as tensões máximas na primeira e segunda direção e o coeficiente regulação da viscosidade, estes valores são retirados da literatura do assunto.

Após a realização deste trabalho prévio, desde inserção de dados e desenvolvimento das amostras, passamos à análise proporcionada pelos elementos finitos. No que toca à amostra sem defeito, é possível constatar que a delaminação teve início nas extremidades livres do material, levando à rotura da fibra do compósito no centro do laminado. A concordância com os testes experimentais apresenta um erro de 7%. Suportando os testes experimentais, a análise numérica da geometria com delaminação no plano médio, apresenta um comportamento muito semelhante com a primeira amostra. Segundo a análise de elementos coesivos podemos constatar que a delaminação se propagou numa direção até atingir o limite do laminado, aumentando os danos interlaminares. O valor de pico semelhante à primeira geometria é explicado pela predominância do Modo II, o mesmo que favorece a delaminação. Por outro lado, os danos na matriz propagam-se perpendicularmente à direção de delaminação, reduzindo a capacidade de carga da amostra drasticamente. Para esta amostra, a semelhança entre testes numéricos e testes experimentais é de 6,8%, sendo apresentado na Figura 19 a comparação entre dados teóricos e experimentais.

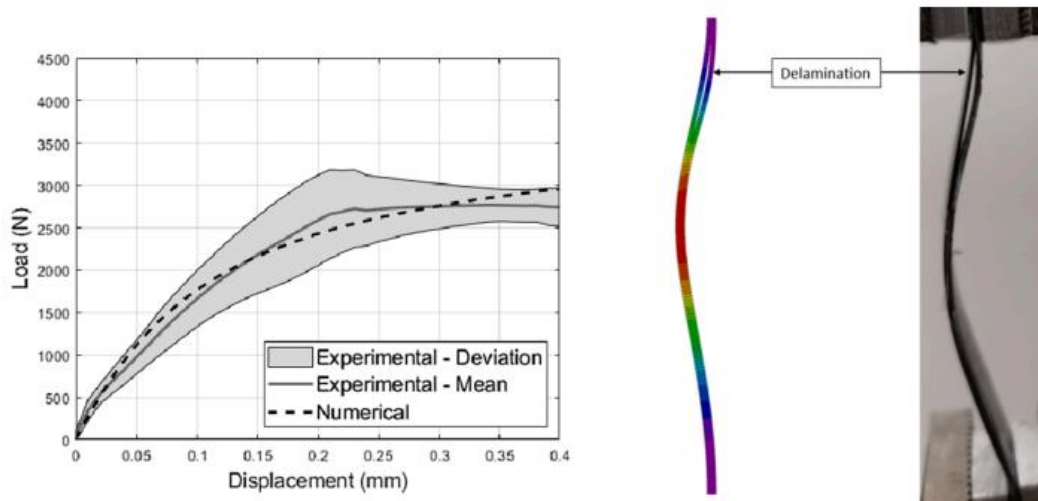


Figura 19: Comparação entre valores experimentais e numéricos para a amostra com defeito no plano médio [18].

As amostras cuja geometria apresenta defeito na camada superior confirmam a teoria FPF, isto é, a camada externa sofre delaminação em primeiro lugar devido às tensões máximas aplicadas. Esta análise permite, ainda, comprovar que o modo de abertura da fenda é Modo I, associada à encurvadura local que progrediu para encurvadura mista. Ao analisar os dados intralaminares e interlaminares observou-se que a delaminação se propaga em ambas as direções, aumentando a área danificada. Contudo, graças à análise numérica, é possível prever que para as duas geometrias, a falha intralaminar ocorre por falha da matriz, como é visível na Figura 20. Neste caso, ambas as amostras com defeito na camada superior exibem comportamentos semelhantes.

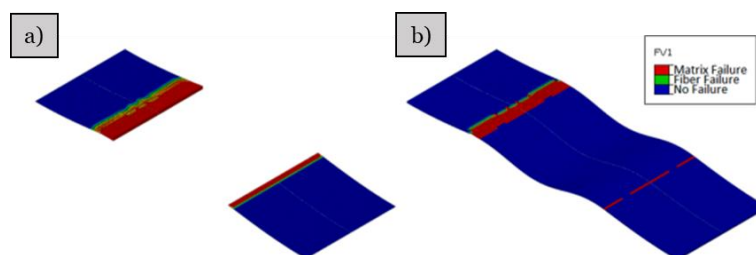


Figura 20: Evolução de danos na amostra com defeito na camada superior. a) delaminação e b) falha intralaminar [18].

As previsões desta análise numérica apresentam um erro de 11% (defeito de 30 mm de comprimento) e 0,5% (defeito de 20 mm de comprimento).

Como podemos concluir, a análise de elementos finitos está em concordância com a análise experimental, inclusive apresenta erros muito pequenos, demonstrando a sua aproximação à realidade.

No estudo proposto por Morokov *et al.* [27] a análise microscópica da falha dos compósitos é simulada com uso de elementos finitos. O início dos danos provocados pelo teste mecânico de flexão no laminado é descrito pela simulação numérica de micro fendas da resina na camada com

orientação 90° na região de tração. Para a realização desta componente foram assumidas as seguintes considerações: a fibra e a resina são homogêneas, as fibras interagem com a resina em toda a sua superfície de contacto, a fibra é um cilindro com secção circular e eixo retilíneo e as fibras em cada camada são paralelas entre si e equidistantes.

A ideia para a modelação de micro danos sob ensaios de flexão baseou-se nas mudanças estruturais irreversíveis iniciadas por micro fendas na zona de tração.

Esta análise introduz a teoria de *Timoshenko* que consiste numa expressão numérica (Equação 2.3.1.5) com finalidade de medir a tensão de deformação na camada exterior de um laminado.

$$\frac{w}{\varepsilon} = \frac{L^2}{6h} \quad (2.3.1.5).$$

Na equação mencionada ε representa a deformação, w corresponde à deflexão da linha média da amostra, h trata da espessura da amostra e L a distância entre apoios.

Assim sendo, a primeira curva de carga obtida apresenta uma deflexão de 1,8 mm correspondendo a uma deformação de 1%. Esta deformação conduziu às micro fraturas inicialmente detetadas na matriz. Esta análise numérica demonstrou que a descolagem inicial da matriz-fibra é iniciada por uma rotura estrutural em zonas de espaçamento muito próximo entre fibras vizinhas, são as zonas de tensão inicial. Enquanto aumenta a carga de flexão, as falhas estruturais concentram-se na interface fibra-matriz.

O resultado desta análise segundo o método de elementos finitos correlaciona-se com os dados retirados do ensaio por ultrassom, comprovando a ocorrência de inúmeras fissuras após a primeira fase de carregamento.

O estudo proposto por Yang *et al.* [40] apresenta uma abordagem numérica sobre a previsão em termos de evolução de danos em compósitos laminados sujeitos a flexão em três pontos. À semelhança do estudo previamente apresentado por Calvo *et al.*, é-nos introduzido o modelo de Hashin e a zona de elementos coesivos. Neste estudo foi desenvolvido um modelo capaz de prever o início de dano e os modos de falha de um compósito laminar. Para tal foram considerados oito possíveis falhas.

Em termos de modelação foi desenvolvida uma película com espessura zero para ser introduzida entre camadas do compósito, a criação desta película foi considerada devido ao *offset method* simulado graças ao uso de elementos coesivos. O facto da delaminação se dar preferencialmente entre interfaces do laminado relaciona-se com a utilização de uma película sem espessura, pois deste modo é obtida uma melhor resposta em termos de previsão da delaminação.

Nas propriedades do laminado são consideradas todas as camadas constituintes, assim foi necessário consultar documentos científicos para obter valores de G_f e G_m , isto é, energia de rotura para a fibra e matriz, respetivamente.

O desenvolvimento de um modelo numérico que prevê o início e evolução de danos tem como necessidade definir critérios sobre o início e propagação de danos como a delaminação. Assim, com base na literatura, são utilizados critérios como critério de tensão nominal quadrática utilizado para simular o início da delaminação, contudo também é necessário a definição de critérios para a propagação da fenda, sendo, inclusive, fornecida uma representação escalar sobre

o estado de dano no compósito. No caso do *Abaqus*, o implica que não há delaminação, por sua vez 1 representa a presença da delaminação.

Por fim, neste estudo, os suportes da amostra e a carga foram modelados como corpos rígidos.

Em termos de resultados, na Figura 21, é visível a evolução de danos, considerando que estes resultados são a combinação de oito modos de falha.

Na Figura 21 a, é possível constatar a forte componente de força de compressão, devido aos danos causados na face superior da amostra. Em seguida, na Figura 21 b os danos propagam-se para as camadas adjacentes. Por sua vez, a Figura 21 c, apresenta delaminação nas camadas inferiores, causada pela força de tração. Por fim, na Figura 21 d, a delaminação propaga-se e os danos na camada superior estão dispersos por toda a espessura do laminado, assim dá-se a falha total do compósito.

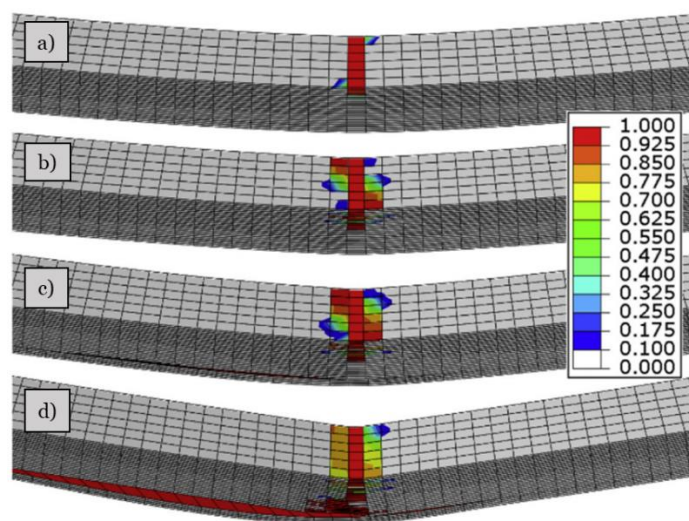


Figura 21: Resultados da simulação para previsão o início e propagação do dano. a) início do aparecimento de danos, b) aplicação da carga máxima, c) propagação de danos e d) falha total do laminado [40].

O objetivo principal de uma simulação numérica é a previsão do cenário experimental. Deste modo é relevante verificar o nível de semelhança entre testes experimentais e numéricos, assim no que toca à resposta força-deslocamento obtida no teste numérico, esta revela estar em concordância com o teste experimental. O erro relativo em termos de rigidez é de -0,35% e carga máxima de 0,75%. No que toca a previsão de danos a semelhança também foi notável, sendo apresentado um erro relativo de força de 12,5%.

Os estudos previamente referidos debruçam-se com grande intensidade em parâmetros de elementos coesivos e em modelos a adotar no estudo numérico das amostras. Porém existem outros parâmetros de igual pertinência, nomeadamente a definição das condições de fronteira e otimização da malha.

Segundo Monte *et al.* [41] alguns dos aspetos mais relevantes no desenvolvimento de trabalhos científicos destinados à validação de modelos computacionais preditivos com dados experimentais consiste na construção de modelos computacionais capazes de produzir com

exatidão as verdadeiras condições de fronteira e aplicação de carga utilizadas na montagem experimental.

A definição das condições de fronteira tem como intuito restringir o movimento da amostra em estudo sob influência de cargas externas. Por conseguinte os apoios são definidos segundo seis graus de liberdade (x , y , z , R_x , R_y e R_z), isto é, x , y e z , correspondem a deslocamentos e R_x , R_y e R_z são rotações, ambos segundo os três eixos ortogonais.

Assim, é necessário estabelecer relações de contacto entre a amostra e os apoios da máquina de teste. Em vários casos de estudo em programas de simulação, a escolha das superfícies de contacto e de destino pode representar um ponto crítico, visto que são impostas diferentes condições de penetração e os materiais em contacto apresentam grandes diferenças nas suas propriedades.

Assim a solução final pode não se verificar [42]. Deste modo, a superfície plana da amostra deve ser considerada como alvo e a zona convexa da máquina de teste como contacto [42].

Na Figura 22 é possível constatar um exemplo das condições aplicadas no *Abaqus* para um teste de flexão em três pontos, neste caso a amostra é suportada por apoios simples. O teste experimental permite o movimento segundo o eixo x da amostra e a rotação em torno do eixo y , sendo que na linha de apoios os restantes graus de liberdade estão limitados [43]. Na linha de carga, os graus de liberdade são nulos, exceto o deslocamento ao longo da direção z [43].

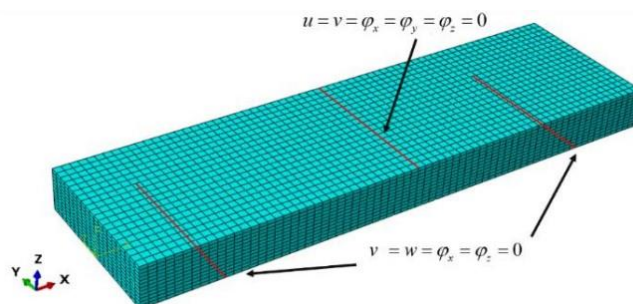


Figura 22: Condições de fronteira adotadas no *Abaqus* para teste de flexão em três pontos [43].

Além da adoção de apoios simples como forma de suportar a amostra [24, 41, 43], outra possibilidade é apresentada, onde são adotados apoios fixos [44]. Isto é, considerando o exemplo previamente referido, o movimento na direção z , ao longo da linha de contacto dos eixos (segundo y), é nulo. Não havendo carregamentos externos na direção y , é possível impor também um deslocamento nulo nessa direção.

Na Figura 23, estão representadas as condições de fronteira para um teste de flexão em três pontos no *Ansys*, com os apoios fixos. Nesta condição de apoio, todos os graus de liberdade são nulos, sendo que o ponto/ apoio/ superfície não se pode deslocar nem rodar. É de salientar que esta escolha tem por base as condições adotadas na realização do teste experimental [44]. Assim, a Figura 23 apresenta a correspondência entre as condições de apoio e carregamento do teste experimental (Figura 23, a) e da modelação numérica (Figura 23, b).

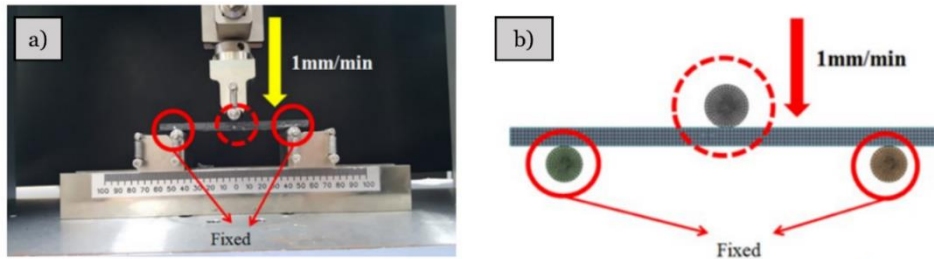


Figura 23: Aplicação de condições de fronteira no *Ansys* com base no teste experimental. a) teste experimental de flexão em três pontos, b) condições de fronteira no *Ansys*.

No que toca à seleção do refinamento da malha de elementos finitos, esta deve considerar um número razoável de elementos no plano, ou, alternativamente, aumentar a ordem da função de aproximação para aproximar o resultado da simulação numérica da curva tensão-deformação ao resultado do ensaio de flexão em três pontos. Na Figura 24 encontra-se ilustrado um teste de flexão em três pontos, sendo apresentadas três secções do mesmo, onde a parametrização da malha é distinta. Neste caso, é facilmente perceptível que quanto mais refinada a malha, mais próximos se encontram os elementos, daí a maior precisão nos resultados.

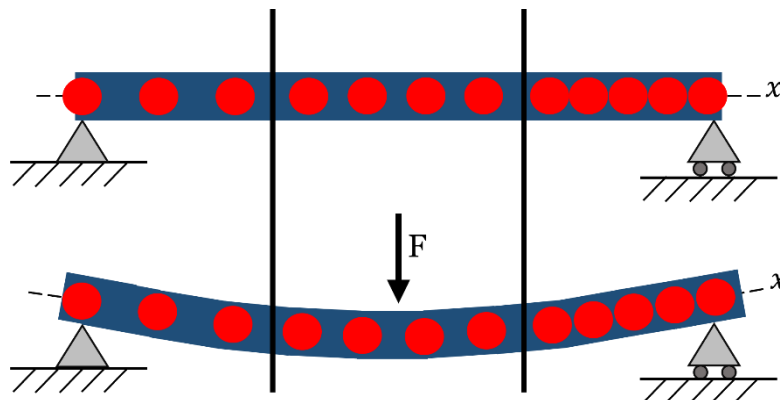


Figura 24: Viga submetida a flexão em três pontos, separação em secções com diferentes parâmetros na malha.

Dependendo da geometria e natureza física do problema em estudo, o domínio de interesse no que toca à malha pode ser discretizado através de diferentes elementos. Estes podem assumir diferentes formas, entre elas a tetraédrica e hexaédrica.

Na Figura 25 encontram-se representados dois elementos com definições de malha distintas. Nesta situação em particular, a definição de uma malha tetraédrica apresenta vantagens, nomeadamente na base do cone, pois a sua face triangular consegue cobrir formas irregulares. Alguns estudos, efetuam uma análise de sensibilidade da malha de modo a compreender se a malha possui precisão suficiente para as simulações [45]. Estes estudos de convergência permitem aproximar a deformada calculada pelo modelo numérico da deformada real, e encontrar o refinamento da malha de elementos finitos ideal a usar no cálculo, acima do qual a aproximação com maior precisão (com mais casas decimais) é desnecessária. Importa referir que

quanto maior o número de elementos, mais tempo demora cada cálculo, considerando a mesma capacidade de cálculo.

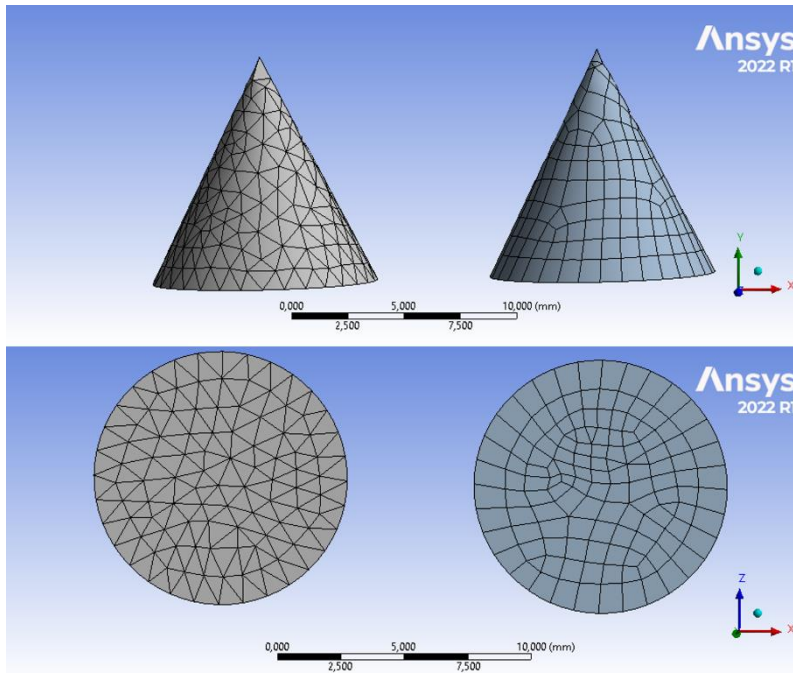


Figura 25: Definição de malha tetraédrica e hexaédrica no Ansys.

Na Figura 26 é visível o refinamento da malha na zona central da amostra, ora como no estudo em questão é esperado que os danos ocorram na zona central, aumentar a densidade da malha nessa zona concede maior precisão na simulação, neste caso em específico o refinamento da malha na zona central é de 0,48 mm [45].

De notar, que o refinamento da malha numa região de interesse ao invés de toda a amostra, evita longos períodos de simulação [42].

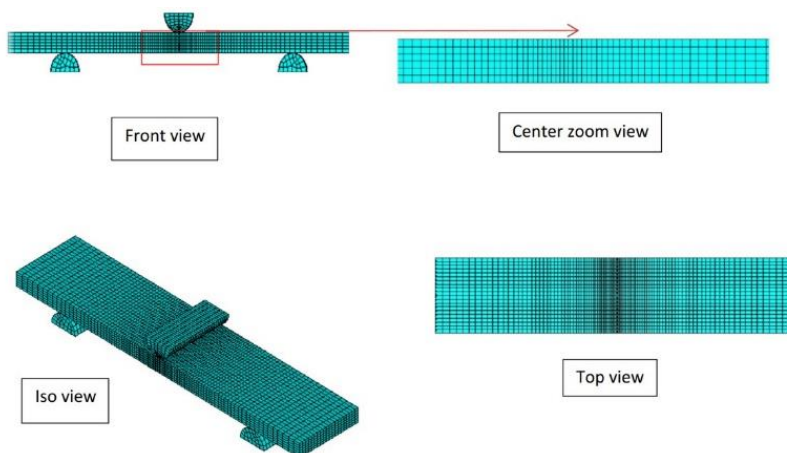


Figura 26: Densidade da malha para um teste de flexão numa amostra GFRP [45]

Capítulo 3

Metodologia Experimental

O terceiro capítulo desta dissertação visa a apresentação e descrição dos materiais, equipamentos e metodologias adotados para a construção e teste das amostras.

Primeiramente, são referidas as propriedades dos materiais e equipamentos utilizados. Em seguida, a preparação dos laminados de CFRP e por fim, é descrito o procedimento utilizado para testar as amostras.

3.1 Materiais e Equipamentos

Para a construção de laminados de fibra de carbono foi utilizado pré-impregnado unidirecional de fibra de carbono, neste caso em particular, HS 160 REM (*high strength 160 g/mm² resin epóxi matrix*), fornecido pela empresa Rebelco [46] e fabricado pela empresa SEAL. As propriedades deste composto estão expostas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades do pré-impregnado HS 160 REM, [23].

Pré-impregnado unidirecional de fibra de carbono (HS 160 REM)	
Módulo de Elasticidade à Tração 0° [GPa]	123,0
Resistência à Tração 0° [MPa]	2294
Deformação máxima à tração [%]	1,72
Módulo Elasticidade à Compressão 0° [GPa]	109,8
Resistência à Compressão 0° [MPa]	1152
Módulo Elasticidade à Flexão 0° [GPa]	134,0
Resistência à Flexão 0° [MPa]	1850
Resistência ao corte inter laminar [MPa]	81,5
Espessura da camada curada [mm]	0,164

Além da utilização do pré-impregnado, este trabalho experimental exigiu a utilização dos seguintes equipamentos: autoclave, máquina de teste universal *Shimadzu*, máquina para polimento das amostras (*Struers*), lupa (*Nikon AFX-DX*) e uma fonte de luz (*Nikon*). Os equipamentos utilizados encontram-se representados na Figura 27.

Em modo secundário, foi utilizado um equipamento para selar a amostra laboratorial em um saco de vácuo e para a máquina de polimento foi utilizado papel de polimento *Buehler* de carboneto de silício com grão de 320 e 400.



Figura 27: Equipamento laboratorial utilizado. a) autoclave, b) máquina de teste universal, c) máquina para polimento, d) luz e lupa.

3.2 Preparação Laminados CFRP

O procedimento experimental para a preparação de laminados CFRP pode ser dividido em duas etapas complementares, começando com a produção das amostras, seguido do processo de cura em autoclave.

Para a preparação de laminados em pré-impregnado de fibra de carbono é necessário retirar o pré-impregnado da arca frigorífica, este encontra-se armazenado em rolo com largura de 60 cm à temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estando o material pronto para ser utilizado, em primeiro lugar:

- Foram cortadas folhas com 30 cm X 30 cm de pré-impregnado, este material apresenta uma película protetora em *nylon* (poliamida) em um dos lados e no outro papel, presente na Figura 28.

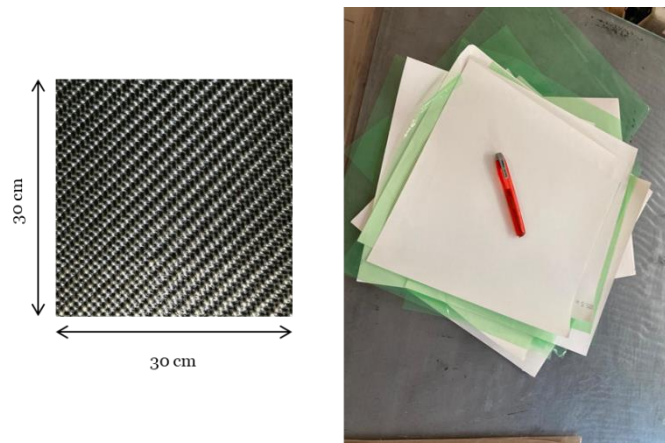


Figura 28: Corte de pré-impregnado de fibra de carbono 30 cm X 30 cm e película protetora de *nylon* e papel.

- Em seguida, procedemos ao empilhamento das várias camadas, nesta fase do processo é essencial considerar a sequência de empilhamento desejada. Para este estudo, foram seguidas duas sequências distintas, ambas com um total de 10 camadas sobrepostas. Numa das amostras foi adotada uma tipologia de construção unidirecional $[0_{10}]$, e na segunda amostra aptou-se por uma construção cruzada $[0_2/90_2/0_2/90_2/0_2]$, na Figura 29

é possível constatar o esquema ilustrativo seguido para a sequência de empilhamento. No exterior foram usadas duas folhas de desmoldante (Teflon).

- Nesta fase de construção foram implementados os defeitos. Para tal foi adotado um filme em Teflon com 5 mm e 10 mm (comprimento). Estes recortes foram inseridos entre a segunda e terceira camada de prepreg. Na Figura 29 é possível averiguar a posição do filme em Teflon e o tipo de amostras resultantes.

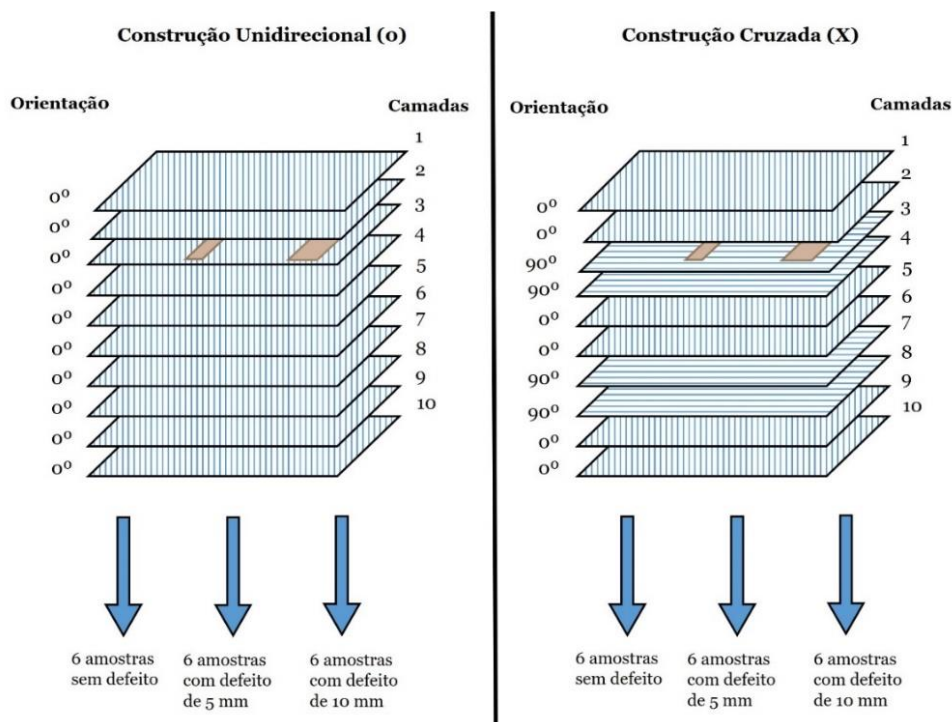


Figura 29: Esquema ilustrativo da sequência de empilhamento adotada para amostras de construção unidirecional e cruzada, no total foram construídas 36 amostras.

- Após o processo de preparação segue-se a etapa de cura em autoclave. Para tal coloca-se as camadas empilhadas, presentes na Figura 30 a, em um saco de vácuo. De notar que o saco deve conter um orifício para aplicação da válvula de vácuo. Este processo exige especial atenção pois o vácuo não deve causar protuberâncias na superfície da placa.
- Seguidamente, sela-se o saco por termo colagem com auxílio do equipamento presente na Figura 30 b e colocamos o saco selado com a amostra na autoclave.
- Depois é necessário aplicar um peso na parte superior da placa para evitar empenos e garantir o paralelismo, como esquematizado na Figura 30 c.
- De modo a fechar a autoclave, é necessário aplicar graxa de vácuo na borracha (cordão de viton) para lubrificar a extremidade em borracha da autoclave e ajustar os parafusos da autoclave como segurança durante o processo de pressurização.
- As condições de fabrico em autoclave foram vácuo -1 bar, pressão 5 bar a 125°C, durante 1 h.

Na Figura 30 c é também visível o interior da autoclave, as pequenas aberturas na superfície têm como função uniformizar o calor das resistências. Para além disso, encontra-se destacada a válvula de vácuo do autoclave, neste caso ainda por fechar.



Figura 30: a) placas resultantes antes do processo de cura, b) equipamento utilizado para selar o saco com a placa e c) interior da autoclave onde é visível a aplicação do peso e válvula de vácuo.

- Após o processo de cura na autoclave, procedeu-se à divisão da placa em várias amostras. Para tal a placa foi marcada e dividida com o auxílio de uma régua. Seguidamente com o disco de corte (*Accutom 2* da *Struers*) e respetivo equipamento de segurança, seguiu-se o esquema representado na Figura 31, tanto para a construção cruzada como unidirecional, e procedeu-se à obtenção das amostras.
- Depois de obtidas todas as amostras, efetuou-se o processo de polimento das amostras, este passo tem como principal objetivo a perda das irregularidades laterais nas amostras.

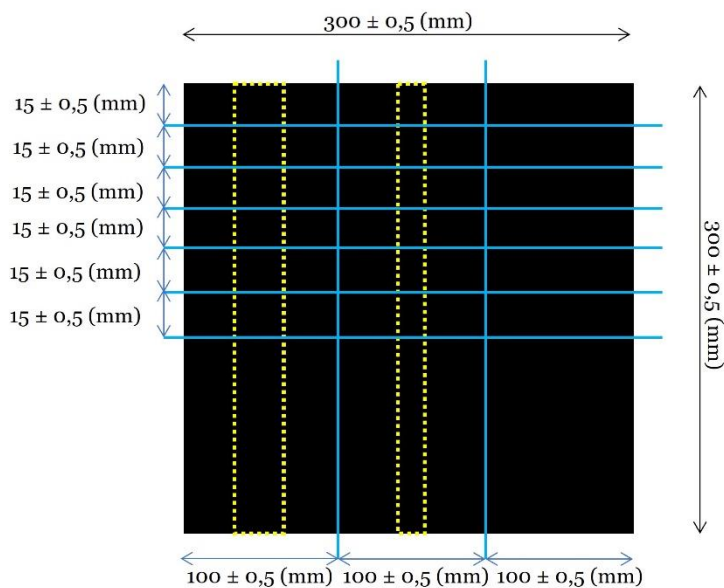


Figura 31: Esquema de corte a seguir para a placa de construção cruzada e unidirecional para obtenção de seis amostras finais com defeito de 10 mm, seis amostras finais com defeito de 5 mm e seis amostras finais sem defeito.

Assim, obtidas as amostras procedeu-se à sua medição final, com auxílio de um paquímetro digital (*Mitutoyo*) mediu-se a espessura das amostras. Com uma régua mediu-se a largura e o comprimento. As medições obtidas estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Medidas finais das amostras obtidas.

Construção Unidirecional				Construção Cruzada			
Sem Defeito							
Amostra	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]	Amostra	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]
1	100	14	1,6	1	99	14	1,6
2	100	14	1,6	2	100	14	1,6
3	97	14	1,5	3	99	14	1,5
4	102	15	1,6	4	99	14	1,7
5	102	15	1,6	5	100	14	1,6
6	102	13	1,7	6	99	15	1,7
Defeito 10 mm							
Amostra	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]	Amostra	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]
1	98	13	1,6	1	99	15	1,7
2	99	15	1,6	2	99	15	1,5
3	102	14	1,6	3	99	15	1,5
4	98	16	1,6	4	98	14	1,6
5	97	15	1,6	5	99	14	1,6
6	97	14	1,6	6	99	15	1,7
Defeito 5 mm							
Amostra	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]	Amostra	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]
1	102	15	1,6	1	102	14	1,6
2	101	13	1,6	2	101	15	1,6
3	101	16	1,5	3	102	14	1,7
4	100	13	1,6	4	102	14	1,6
5	100	15	1,6	5	102	15	1,7
6	100	14	1,6	6	101	15	1,6

Após a obtenção destes dados procedemos à medição do erro relativo destas medições. No total, considerando ambas as construções, para o comprimento somos deparados com um erro de 1,31%, para a largura 4,74% e para a espessura 5,56%.

É de notar que estes erros estão associados a aparelhos de medição (régua e paquímetro), e a mão humana, neste caso, no processo de corte em disco.

3.3 Ensaio de Caracterização Mecânica

Os ensaios mecânicos foram todos realizados na máquina de teste universal *Shimadzu*, AGS-X, Japão, com célula de carga de 10 kN. Para este ensaio mecânico foi adotada a norma D 790-03 [47]. Esta descreve métodos de ensaio normalizados para propriedades de flexão, em plásticos reforçados e não reforçados e material de isolamento elétrico.

Segundo a norma [47], para testar compósitos reforçados de alta resistência, incluindo laminados ortotrópicos, a distância entre apoios deve seguir a relação (L/h) 32:1, sendo neste caso 54 mm de distância entre apoios.

Para a realização deste teste mecânico foram obtidas 36 amostras, sendo 18 amostras de construção unidirecional, das quais 6 são sem defeito, 6 com defeito de 10 mm e 6 com defeito de 5 mm, e igual para a construção cruzada.

Porém, apenas serão testadas três amostras sem defeito, pois não são esperadas variações consideráveis. Desse modo, das seis amostras com defeito de 10 mm, três serão testadas de modo que o defeito esteja sujeito a uma zona de tração, ou seja, na parte inferior da amostra; e três serão testadas com o defeito na zona propensa a compressão, isto é, na parte superior da amostra.

De notar que as amostras obtidas são sujeitas a um teste mecânico de flexão em três pontos até à rotura.

3.4 Registo de Resultados

Após a realização do teste mecânico procedeu-se à visualização do dano nas amostras.

Na Figura 32 estão presentes todas as amostras devidamente identificadas depois do teste mecânico.

A visualização do dano no microscópio ótico revela ser um processo bastante linear, na maioria dos casos o registo destes resultados não exigiu a utilização de um apoio que tem como função manter a amostra fixa para proceder à recolha da imagem.

A identificação das amostras segue uma tipologia simples, O representa a construção unidirecional e X a construção cruzada. O P implica a presença de um defeito de 5 mm e G o defeito de 10 mm. As primeiras três amostras (1, 2 e 3) foram testadas de modo que o defeito esteja à tração e as últimas três amostras (4, 5 e 6) foram testadas com o defeito à compressão.

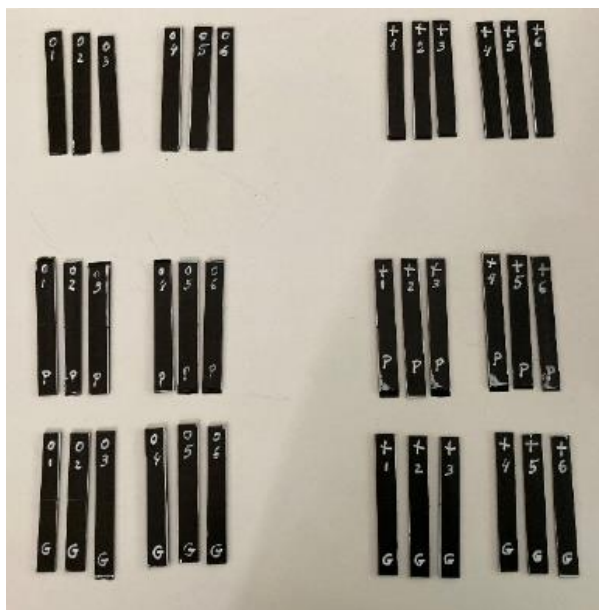


Figura 32: Amostras após o teste mecânico. A sua identificação parte do princípio O (construção unidirecional), X (construção cruzada), P (defeito de 5 mm) e G (defeito de 10 mm).

Capítulo 4

Resultados Experimentais e Discussão

O quarto capítulo desta dissertação tem como objetivo a apresentação dos resultados obtidos experimentalmente e a sua comparação com a literatura.

Em primeiro lugar são expostos os resultados conseguidos no teste mecânico de flexão em três pontos. Seguidamente, estão presentes as imagens registadas na lupa, onde é possível constatar o estado final das amostras. Assim, após a apresentação destes resultados procedeu-se à sua comparação em função de diferentes sequências de empilhamento, localização e tamanho do defeito com a literatura.

4.1 Ensaio Mecânico de Flexão em três pontos

Da realização do teste mecânico de flexão provêm dados, que ao serem tratados em Excel, resultam em gráficos de força [N] por deslocamento [mm] e tensão [N/mm²] por deformação [%]. Analiticamente, o cálculo da tensão (σ) e da deformação (ε) pode ocorrer pela Equação (4.1.1) e Equação (4.1.2), respetivamente. Onde F corresponde à carga aplicada, L ao comprimento da amostra, b à largura da amostra, h à espessura da amostra e δ simboliza a deflexão.

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (4.1.1)$$

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (4.1.2)$$

De modo a simplificar o estudo destes gráficos iremos proceder à comparação direta das três amostras do mesmo tipo.

Em primeiro lugar estão presentes os resultados obtidos na construção unidirecional sem defeito, em seguida com o defeito de 10 mm sujeito a tração, depois o defeito de 10 mm propenso a compressão, posteriormente com o defeito de 5 mm à tração e por fim com o defeito de 5 mm submetido a uma zona de compressão. Após a exposição de dados referentes à construção unidirecional a mesma sequência será utilizada para a construção cruzada.

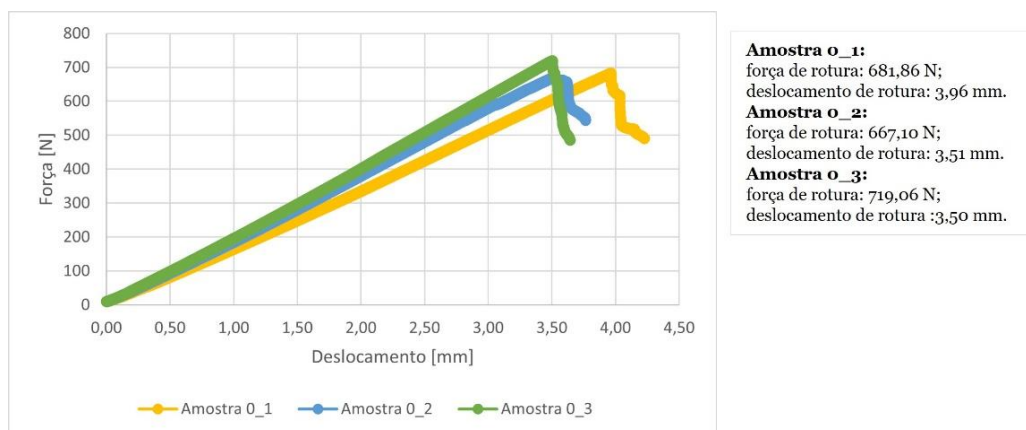
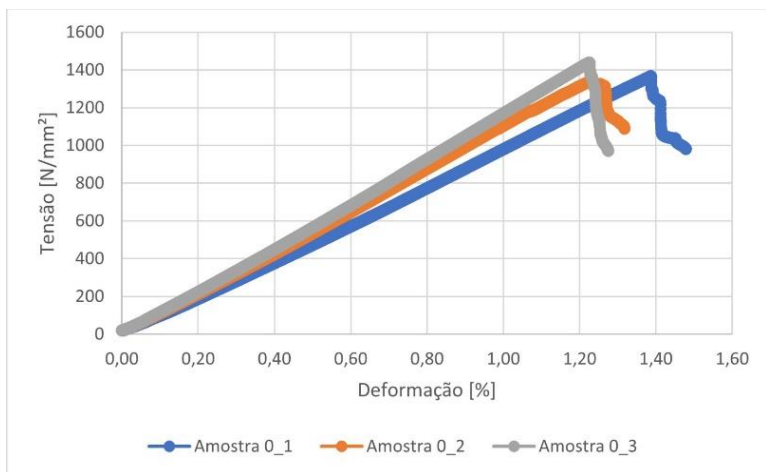


Figura 33: Construção unidirecional sem defeito, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].

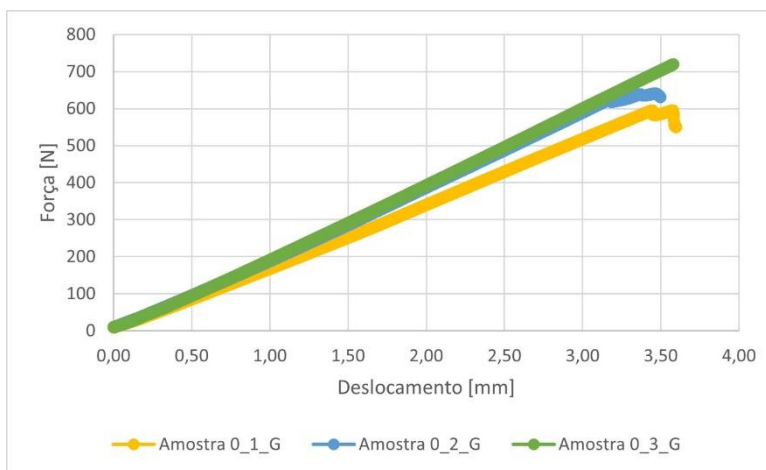


Amostra 0_1:
 tensão de ruptura: 1367,08 N/mm²;
 deformação de ruptura: 1,40 %.

Amostra 0_2:
 tensão de ruptura: 1340,08 N/mm²;
 deformação de ruptura: 1,22 %.

Amostra 0_3:
 tensão de ruptura: 1440,12 N/mm²;
 deformação de ruptura: 1,23 %.

Figura 34: Construção unidirecional sem defeito, gráfico de tensão [N/mm²] por deformação [%].

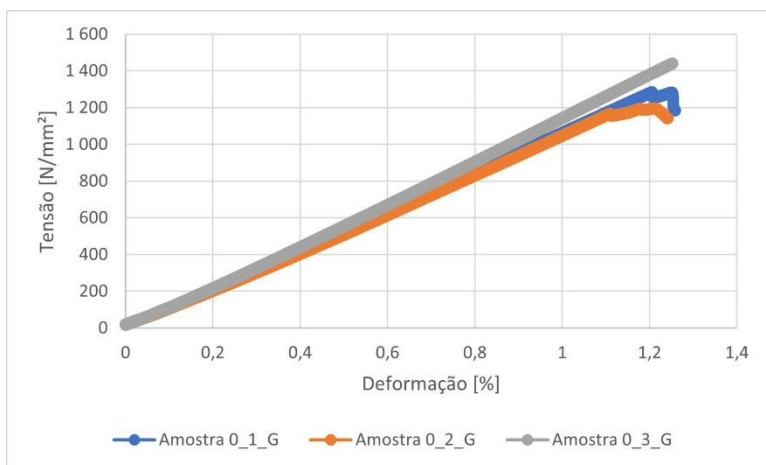


Amostra 0_1_G:
 força de ruptura: 595,46 N;
 deslocamento de ruptura: 3,57 mm.

Amostra 0_2_G:
 força de ruptura: 640,82 N;
 deslocamento de ruptura: 3,45 mm.

Amostra 0_3_G:
 força de ruptura: 719,06 N;
 deslocamento de ruptura :3,58 mm.

Figura 35: Construção Unidirecional defeito de 10mm à tração, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].

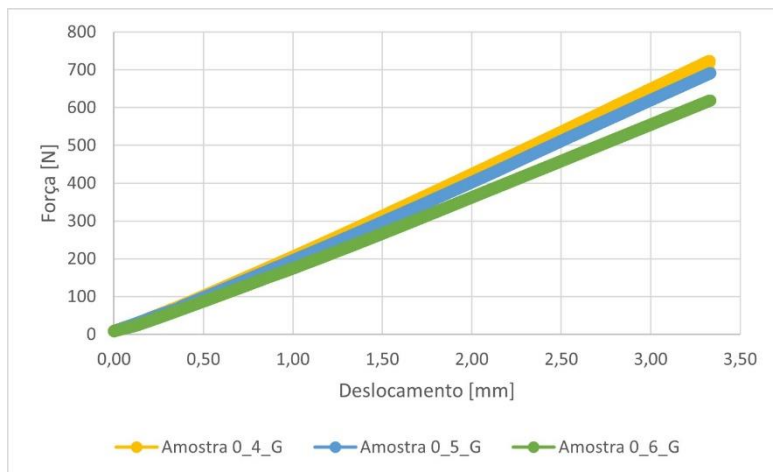


Amostra 0_1_G:
 tensão de ruptura: 1284,24 N/mm²;
 deformação de ruptura: 1,25 %.

Amostra 0_2_G:
 tensão de ruptura: 1197,66 N/mm²;
 deformação de ruptura: 1,21 %.

Amostra 0_3_G:
 tensão de ruptura: 1440,66 N/mm²;
 deformação de ruptura: 1,25 %.

Figura 36: Construção Unidirecional defeito de 10mm à tração, gráfico de tensão [N/mm²] por deformação [%].

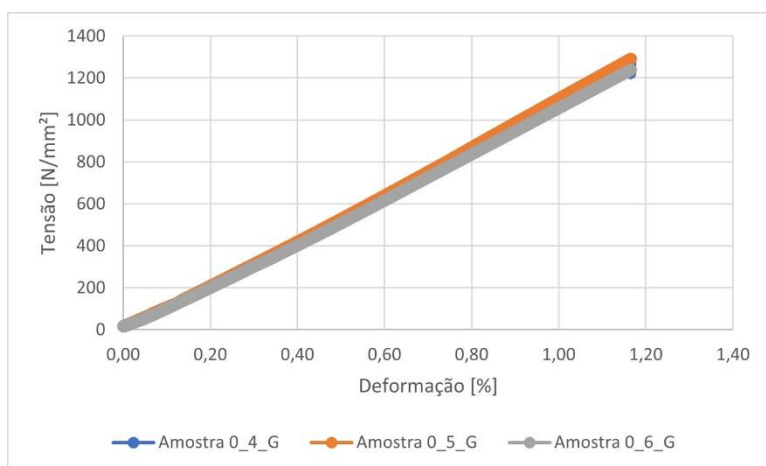


Amostra 0_4_G:
força de ruptura: 723,79 N;
deslocamento de ruptura: 3,33 mm.

Amostra 0_5_G:
força de ruptura: 691,22 N;
deslocamento de ruptura: 3,33 mm.

Amostra 0_6_G:
força de ruptura: 619,28 N;
deslocamento de ruptura :3,33 mm.

Figura 37: Construção Unidirecional defeito de 10 mm à compressão, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].

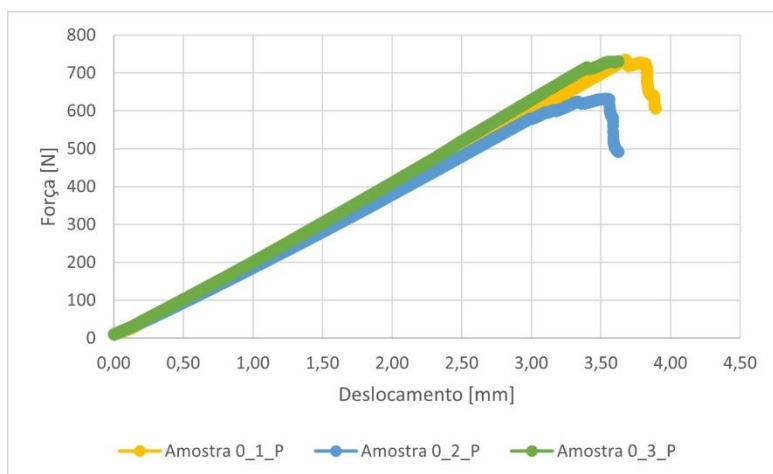


Amostra 0_4_G:
tensão de ruptura: 1267,89 N/mm²;
deformação de ruptura: 1,16 %.

Amostra 0_5_G:
tensão de ruptura: 1291,73 N/mm²;
deformação de ruptura: 1,16 %.

Amostra 0_6_G:
tensão de ruptura: 1239,79 N/mm²;
deformação de ruptura: 1,16 %.

Figura 38: Construção Unidirecional defeito de 10mm à compressão, gráfico de tensão [N/mm²] por deformação [%].

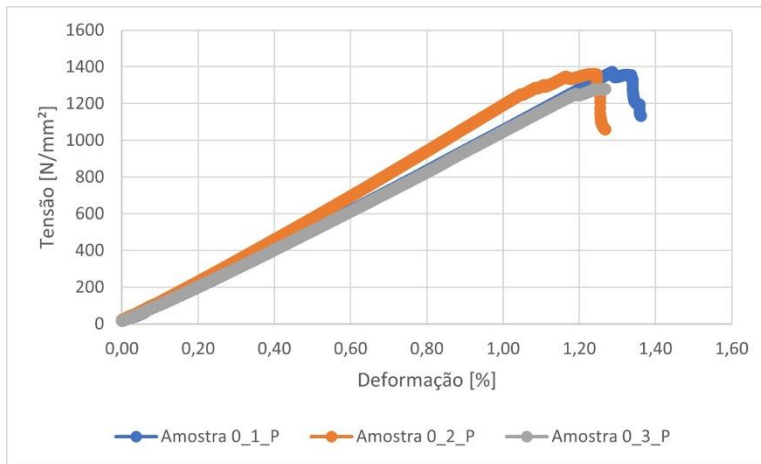


Amostra 0_1_P:
força de ruptura: 734,37 N;
deslocamento de ruptura: 3,67 mm.

Amostra 0_2_P:
força de ruptura: 632,46 N;
deslocamento de ruptura: 3,54 mm.

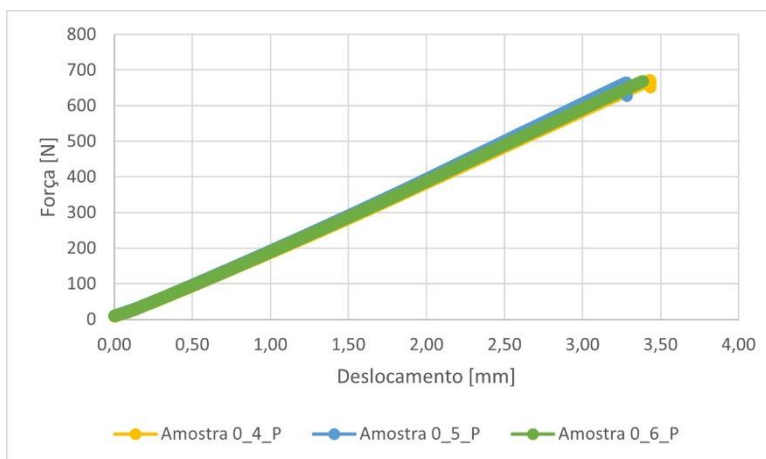
Amostra 0_3_P:
força de ruptura: 730,82 N;
deslocamento de ruptura :3,62 mm.

Figura 39: Construção Unidirecional defeito de 5 mm à tração, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].



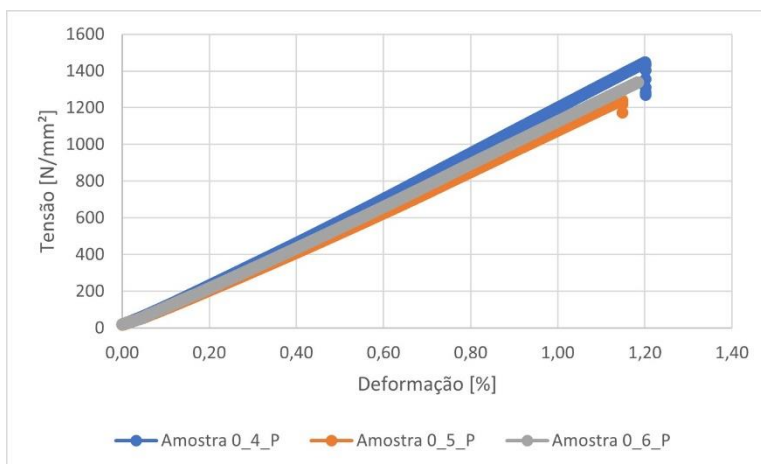
Amostra 0_1_P:
 tensão de rotura: 1371,67 N/mm²;
 deformação de rotura: 1,32 %.
Amostra 0_2_P:
 tensão de rotura: 1361,39 N/mm²;
 deformação de rotura: 1,16 %.
Amostra 0_3_P:
 tensão de rotura: 1280,19 N/mm²;
 deformação de rotura: 1,26 %.

Figura 40: Construção Unidirecional defeito de 5 mm à tração, gráfico de tensão [N/mm²] por deformação [%].



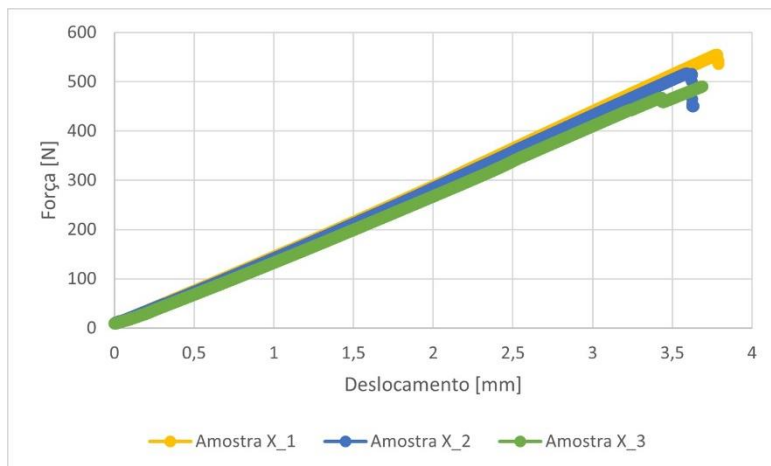
Amostra 0_4_P:
 força de rotura: 671,11 N;
 deslocamento de rotura: 3,43 mm.
Amostra 0_5_P:
 força de rotura: 664,97 N;
 deslocamento de rotura: 3,28 mm.
Amostra 0_6_P:
 força de rotura: 668,90 N;
 deslocamento de rotura: 3,39 mm.

Figura 41: Construção Unidirecional defeito de 5 mm à compressão, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].



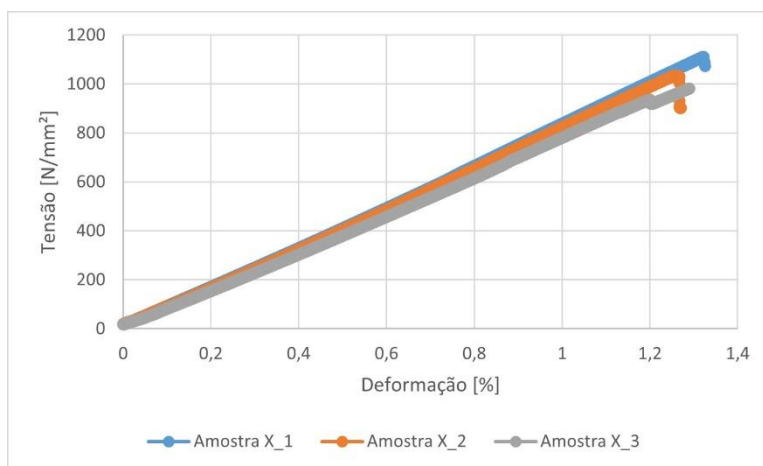
Amostra 0_4_P:
 tensão de rotura: 1444,89 N/mm²;
 deformação de rotura: 1,20 %.
Amostra 0_5_P:
 tensão de rotura: 1242,51 N/mm²;
 deformação de rotura: 1,14 %.
Amostra 0_6_P:
 tensão de rotura: 1339,13 N/mm²;
 deformação de rotura: 1,18 %.

Figura 42: Construção Unidirecional defeito de 5 mm à compressão, gráfico de tensão [N/mm²] por deformação [%].



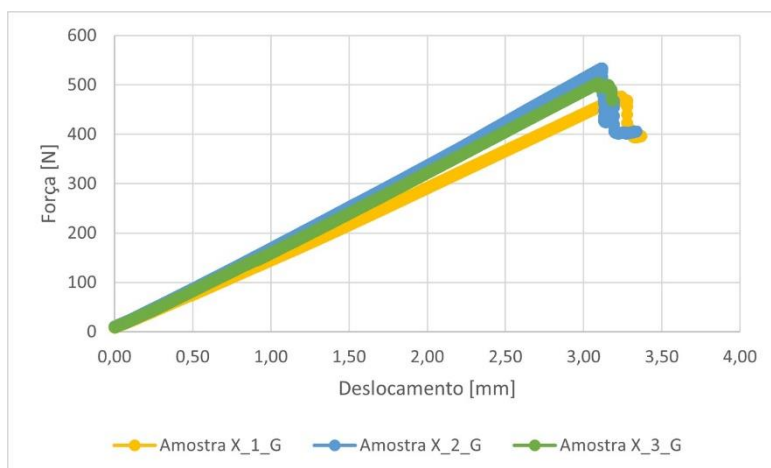
Amostra X_1:
força de ruptura: 555,05 N;
deslocamento de ruptura: 3,77 mm.
Amostra X_2:
força de ruptura: 516,45 N;
deslocamento de ruptura: 3,58 mm.
Amostra X_3:
força de ruptura: 490,52 N;
deslocamento de ruptura: 3,68 mm.

Figura 43: Construção Cruzada sem defeito, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].



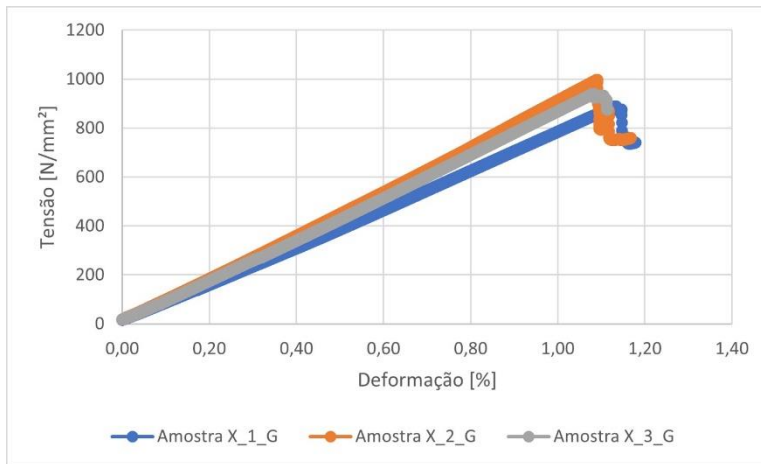
Amostra X_1:
tensão de ruptura: 1111,20 N/mm²;
deformação de ruptura: 1,32 %.
Amostra X_2:
tensão de ruptura: 1032,27 N/mm²;
deformação de ruptura: 1,27 %.
Amostra X_3:
tensão de ruptura: 982,00 N/mm²;
deformação de ruptura: 1,28 %.

Figura 44: Construção Cruzada sem defeito, gráfico de tensão [N/mm²] por deformação [%].



Amostra X_1_G:
força de ruptura: 475,68 N;
deslocamento de ruptura: 3,23 mm.
Amostra X_2_G:
força de ruptura: 533,69 N;
deslocamento de ruptura: 3,11 mm.
Amostra X_3_G:
força de ruptura: 503,64 N;
deslocamento de ruptura: 3,09 mm.

Figura 45: Construção Cruzada defeito de 10 mm à tração, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].

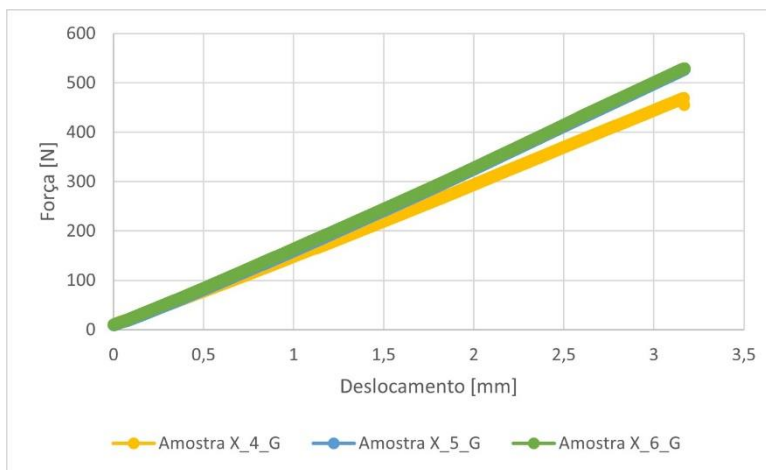


Amostra X_1_G:
 tensão de ruptura: 875,50 N/mm²;
 deformação de ruptura: 1,16 %.

Amostra X_2_G:
 tensão de ruptura: 997,27 N/mm²;
 deformação de ruptura: 1,09 %.

Amostra X_3_G:
 tensão de ruptura: 933,38 N/mm²;
 deformação de ruptura: 1,15 %.

Figura 46: Construção Cruzada defeito de 10 mm à tração, gráfico de tensão [N/mm²] por deformação [%].

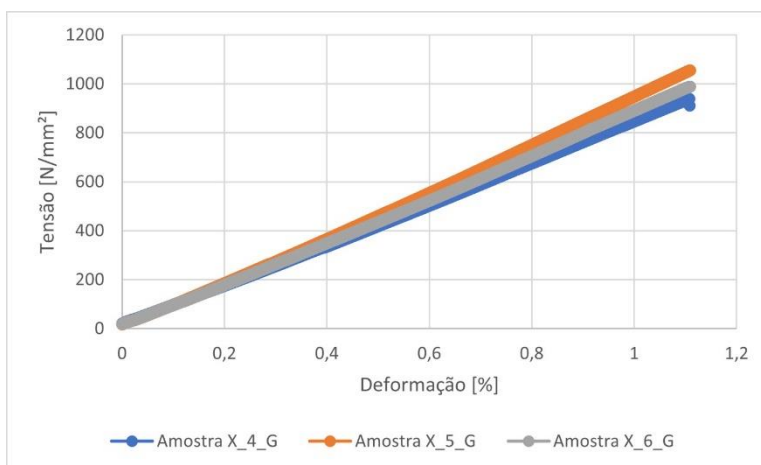


Amostra X_4_G:
 força de ruptura: 469,22 N;
 deslocamento de ruptura: 3,17 mm.

Amostra X_5_G:
 força de ruptura: 527,28 N;
 deslocamento de ruptura: 3,17 mm.

Amostra X_6_G:
 força de ruptura: 529,51 N;
 deslocamento de ruptura: 3,17 mm.

Figura 47: Construção Cruzada defeito de 10 mm à compressão, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].

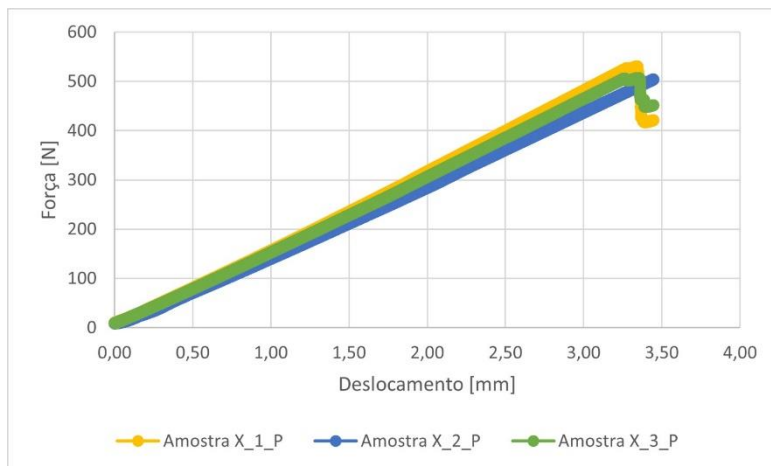


Amostra X_4_G:
 tensão de ruptura: 939,36 N/mm²;
 deformação de ruptura: 1,10 %.

Amostra X_5_G:
 tensão de ruptura: 1055,43 N/mm²;
 deformação de ruptura: 1,10 %.

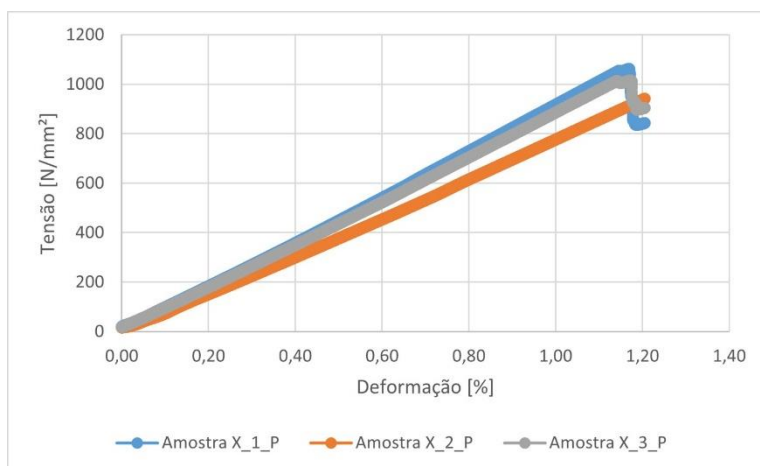
Amostra X_6_G:
 tensão de ruptura: 989,40 N/mm²;
 deformação de ruptura: 1,10 %.

Figura 48: Construção Cruzada defeito de 10 mm à compressão, gráfico de tensão [N/mm²] por deformação [%].



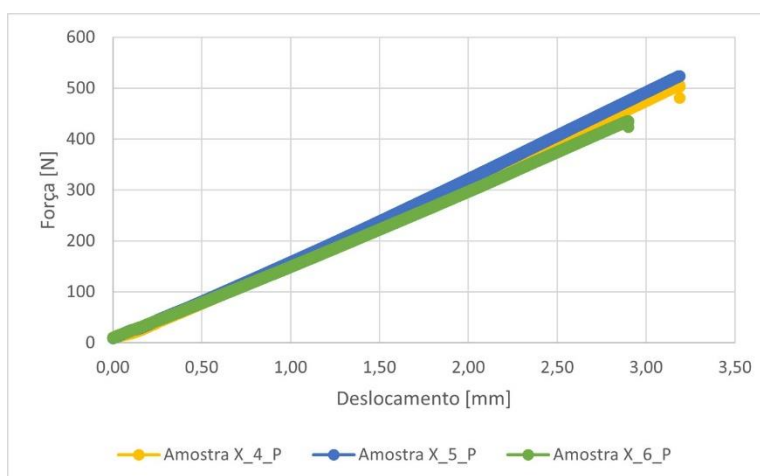
Amostra X_1_P:
 força de ruptura: 530,61 N;
 deslocamento de ruptura: 3,34 mm.
Amostra X_2_P:
 força de ruptura: 504,05 N;
 deslocamento de ruptura: 3,44 mm.
Amostra X_3_P:
 força de ruptura: 507,30 N;
 deslocamento de ruptura: 3,35 mm.

Figura 49: Construção Cruzada defeito de 5 mm à tração, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].



Amostra X_1_P:
 tensão de ruptura: 1061,46 N/mm²;
 deformação de ruptura: 1,17 %.
Amostra X_2_P:
 tensão de ruptura: 941,84 N/mm²;
 deformação de ruptura: 1,20 %.
Amostra X_3_P:
 tensão de ruptura: 1015,63 N/mm²;
 deformação de ruptura: 1,17 %.

Figura 50: Construção Cruzada defeito de 5 mm à tração, gráfico de tensão [N/mm²] por deformação [%].



Amostra X_4_P:
 força de ruptura: 506,15 N;
 deslocamento de ruptura: 3,18 mm.
Amostra X_5_P:
 força de ruptura: 524,44 N;
 deslocamento de ruptura: 3,19 mm.
Amostra X_6_P:
 força de ruptura: 435,58 N;
 deslocamento de ruptura: 2,89 mm.

Figura 51: Construção Cruzada defeito de 5 mm à compressão, gráfico de força [N] por deslocamento [mm].

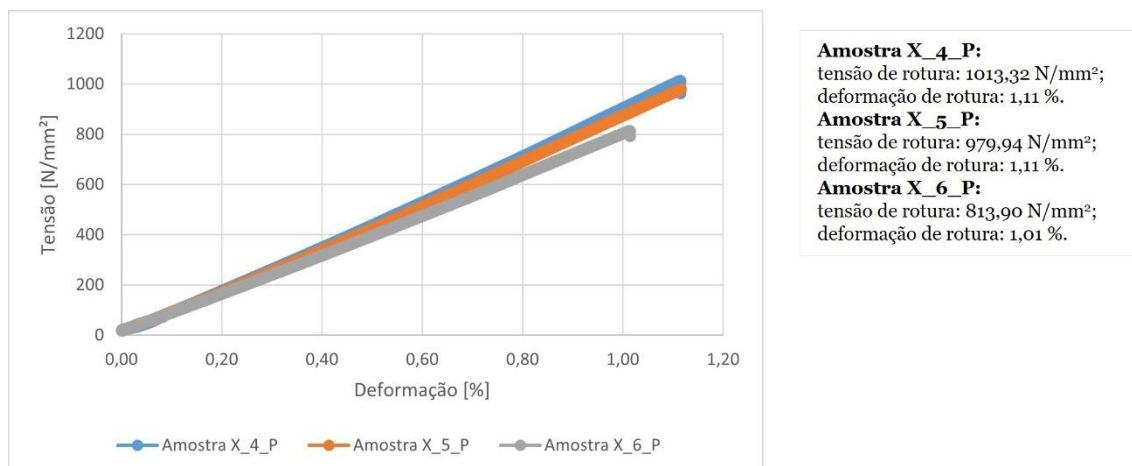


Figura 52: Construção Cruzada defeito de 5 mm à compressão, gráfico de tensão [N/mm²] por deformação [%].

Na Figura 53 estão representadas as curvas médias de cada ensaio. A comparação direta entre todas as curvas para dados de tensão [N/mm²] e deformação [%] permite compreender a grande distinção entre ensaios com construção unidirecional e construção cruzada.

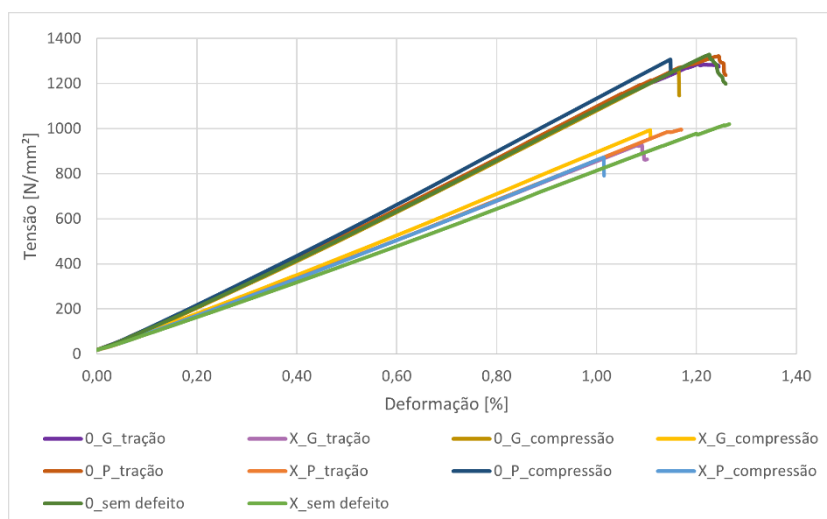


Figura 53: Comparação entre ensaios de construção unidirecional e ensaios de construção cruzada, para valores de tensão de rotura e deformação de rotura.

Em modo síntese na Tabela 3 estão expostos os valores referentes à tensão [N/mm²], deformação [%], força [N] e deslocamento [mm] de cada amostra, bem como a média e desvio padrão entre cada teste. É, também, apresentado o Módulo de Elasticidade à Flexão (M. Flexão), calculado através da Lei de Hooke, que representa a resistência de uma viga feita num determinado material homogéneo a ser deformada. Este Módulo de Elasticidade à Flexão resulta da relação entre a flexa máxima a meio do vão e a força concentrada aplicada no mesmo ponto, e das características geométricas da secção crítica (largura, espessura e distância entre apoios).

Tabela 3: Síntese de valores obtidos no teste experimental para todas as amostras testadas.

Construção Unidirecional						Construção Cruzada					
Amostras	Tensão [N/mm ²]	Deformação [%]	M. Flexão [GPa]	Força [N]	Deslocamento [mm]	Amostras	Tensão [N/mm ²]	Deformação [%]	M. Flexão [GPa]	Força [N]	Deslocamento [mm]
Sem defeito											
1	1367,08	1,40	976,49	681,86	3,96	1	1111,20	1,32	841,82	555,05	3,77
2	1340,08	1,22	1098,43	667,10	3,51	2	1032,27	1,27	812,81	516,45	3,58
3	1440,12	1,23	1170,83	719,06	3,50	3	982,00	1,28	767,19	490,52	3,68
Média	1382,43	1,28	1081,91	689,734	3,66	Média	1041,82	1,29	807,27	520,67	3,67
Desvio Padrão	51,76	0,1011	98,22	26,77	0,2627	Desvio Padrão	65,13	0,02646	37,62	32,47	0,09504
Defeito 10 mm (tração)											
1	1283,24	1,25	1026,59	595,46	3,57	1	875,50	1,16	754,74	475,68	3,23
2	1197,66	1,21	989,81	640,82	3,45	2	997,27	1,09	914,93	533,69	3,11
3	1440,66	1,25	1152,53	719,06	3,58	3	933,38	1,15	811,64	503,64	3,09
Média	1307,19	1,24	1056,31	651,78	3,53	Média	935,38	1,13	827,10	504,34	3,14
Desvio Padrão	123,3	0,02309	85,34	62,52	0,07234	Desvio Padrão	60,90	0,03786	81,20	29,01	0,07572
Defeito 10 mm (compressão)											
4	1267,89	1,16	1093,0	723,79	3,33	4	939,36	1,10	853,96	469,22	3,17
5	1291,73	1,16	1113,56	691,22	3,33	5	1055,43	1,10	959,48	527,28	3,17
6	1239,79	1,16	1068,78	619,28	3,33	6	989,40	1,10	899,45	529,51	3,17
Média	1266,47	1,16	1091,78	678,09	3,33	Média	994,73	1,10	904,30	508,67	3,17
Desvio Padrão	25,99	0	22,41	53,48	0	Desvio Padrão	58,22	0	52,93	34,18	0
Defeito 5 mm (tração)											
1	1371,67	1,32	1039,14	734,37	3,67	1	1061,46	1,17	907,23	530,61	3,34
2	1361,39	1,24	1097,89	632,46	3,54	2	941,84	1,20	784,87	504,05	3,44
3	1280,19	1,26	1016,02	730,82	3,62	3	1015,63	1,17	868,06	507,30	3,35
Média	1337,75	1,27	1051,02	699,22	3,61	Média	1006,31	1,18	853,39	531,99	3,37
Desvio Padrão	50,11	0,04163	34,46	57,84	0,05354	Desvio Padrão	60,35	0,01732	51,02	14,49	0,04497
Defeito 5 mm (compressão)											
4	1444,89	1,20	1204,08	671,11	3,43	4	1013,32	1,11	912,90	506,15	3,18
5	1242,51	1,14	1089,92	664,97	3,28	5	979,94	1,11	882,83	524,44	3,19
6	1339,13	1,18	1134,86	668,90	3,39	6	813,90	1,01	805,84	435,58	2,89
Média	1342,18	1,17	1142,95	668,33	3,36	Média	935,72	1,07	867,19	488,72	3,08
Desvio Padrão	101,2	0,03055	57,51	3,109	0,07768	Desvio Padrão	106,8	0,05773	55,22	46,92	0,1704

4.2 Imagens em lupa

Após a exposição das curvas obtidas no teste mecânico procedeu-se à visualização e registo do estado das amostras.



Figura 54: Amostras sem defeito. a) amostra 1 construção unidirecional, b) amostra 2 construção unidirecional, c) amostra 3 construção unidirecional, d) amostra 1 construção cruzada, e) amostra 2 construção cruzada e f) amostra 3 construção cruzada.

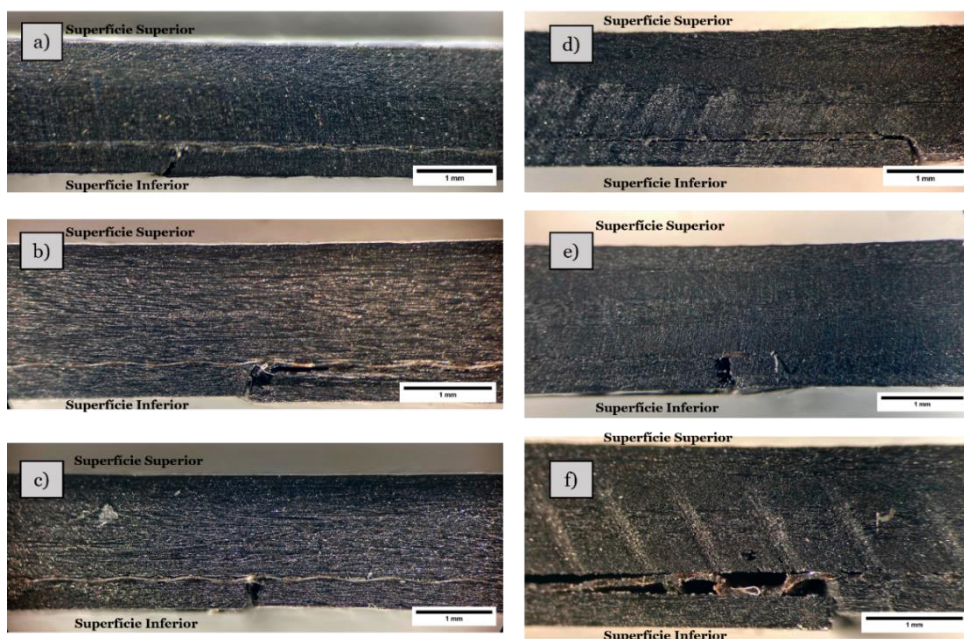


Figura 55: Amostras com defeito de 10 mm à tração. a) amostra 1 construção unidirecional, b) amostra 2 construção unidirecional, c) amostra 3 construção unidirecional, d) amostra 1 construção cruzada, e) amostra 2 construção cruzada e f) amostra 3 construção cruzada.

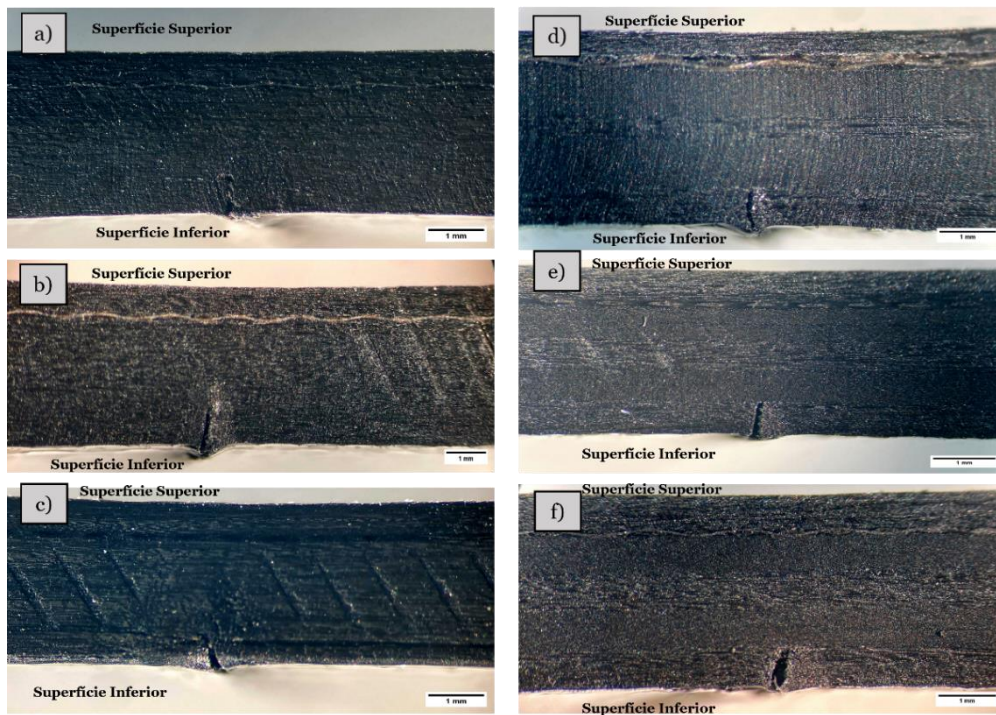


Figura 56: Amostras com defeito de 10 mm à compressão. a) amostra 4 construção unidirecional, b) amostra 5 construção unidirecional, c) amostra 6 construção unidirecional, d) amostra 4 construção cruzada, e) amostra 5 construção cruzada e f) amostra 6 construção cruzada.

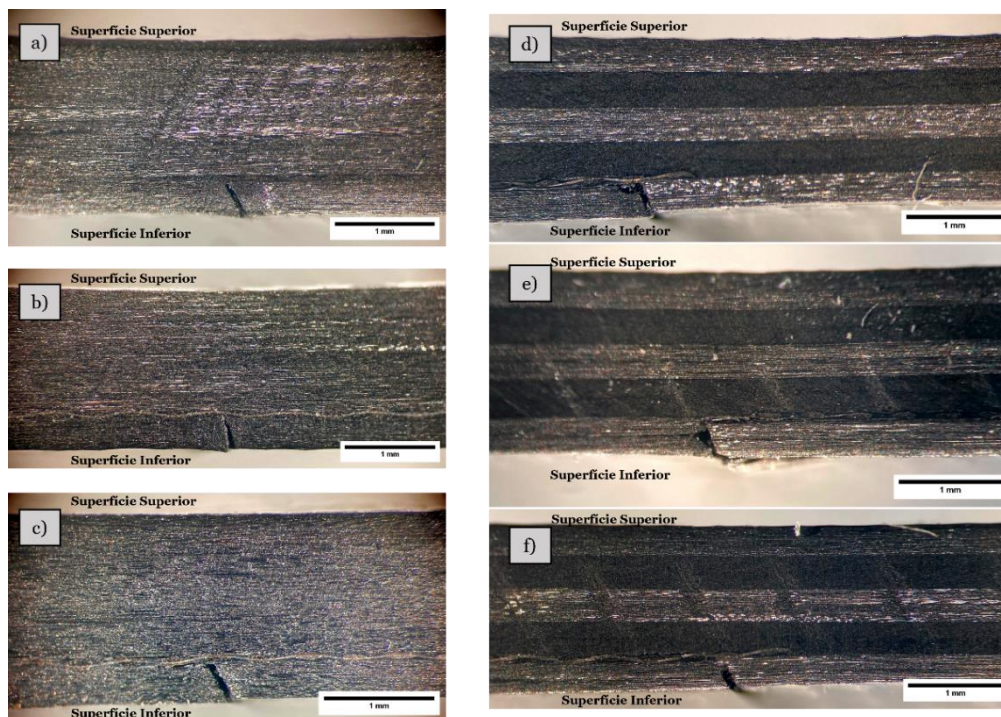


Figura 57: Amostras com defeito de 5 mm à tração. a) amostra 1 construção unidirecional, b) amostra 2 construção unidirecional, c) amostra 3 construção unidirecional, d) amostra 1 construção cruzada, e) amostra 2 construção cruzada e f) amostra 3 construção cruzada.



Figura 58: Amostras com defeito de 5 mm à compressão. a) amostra 4 construção unidirecional, b) amostra 5 construção unidirecional, c) amostra 6 construção unidirecional, d) amostra 4 construção cruzada, e) amostra 5 construção cruzada e f) amostra 6 construção cruzada.

4.3 Discussão de resultados

Uma breve análise da Tabela 3 permite concluir que a inclusão de defeitos, independentemente do tipo de construção em causa (unidirecional ou cruzada), contribui para a perda de propriedades mecânicas do laminado.

Ao analisar a Figura 53, onde são diretamente comparadas todas as curvas médias dos ensaios executados, é visivelmente notória a separação entre os ensaios de construção unidirecional e cruzada.

Na Figura 59 são comparadas as curvas médias resultantes de ensaios tensão por deformação. Foram consideradas amostras com e sem defeito, conferindo distinção à dimensão do filme em Teflon. Assim, é possível analisar de que modo é que a dimensão do defeito contribui para a perda de resistência do laminado.

Para a construção unidirecional, a implementação de um defeito de 5 mm corresponde à perda de resistência do laminado em 3%, por sua vez quando o filme em Teflon apresenta 10 mm de comprimento, a sua influência no laminado é superior, sendo 7%.

Do mesmo modo, para as amostras com construção cruzada, a presença de um filme em Teflon com 5 mm ou 10 mm de comprimento contribui para a perda de resistência do laminado em 7%. Como resultado, a inclusão de um filme em Teflon no laminado induz uma perda média de 5% (construção unidirecional) e 7% (construção cruzada) nas propriedades do compósito.

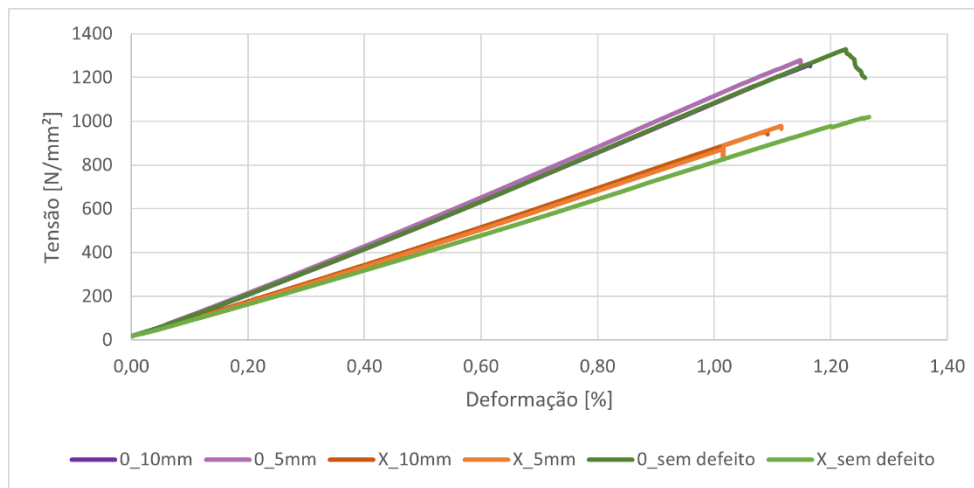


Figura 59: Comparação direta entre a tipologia de construção (unidirecional e cruzada) e a presença/ausência de defeito.

No estudo proposto por Ullah *et al.* [24] foram testadas amostras de construção unidirecional sem defeito. Neste caso, consistem no empilhamento de seis camadas unidirecionais de prepreg, sendo o valor máximo de flexão de 833 MPa. Visto que, não só o material utilizado apresenta diferentes propriedades mecânicas, como as dimensões finais da amostra são distintas, os valores retirados no ensaio mecânico são pouco semelhantes. Contudo, algo comum nestas amostras consiste no padrão de rotura.

Ao analisar a Figura 54 a, b, c, percebemos que a fenda se propagou numa zona sujeita à tração, do mesmo modo Ullah *et al.* descreve que o padrão de rotura para amostras com construção unidirecional consiste no facto de o dano se prolongar pela largura do laminado e no seu centro. Além de que, o carácter de fratura demonstra que as fibras na superfície (em compressão) permanecem intactas, por oposto na zona inferior (em tração) estão fraturadas.

Moreno *et al.* [48] apresentam um estudo sobre testes de flexão em laminados CFRP, sendo o principal intuito a avaliação das zonas propensas à tração e compressão. Para tal, foram obtidas amostras com a seguinte tipologia de construção $[0_2/90_2]_s$. Após o teste mecânico de flexão em três pontos e a análise microscópica, foi registado que a rotura da amostra ocorreu numa camada com orientação 0° , devido ao facto das camadas com esta orientação serem subjugadas a valores mais elevados de tensão. Ao analisar a Figura 54 d, e, f é possível verificar que a camada danificada possui orientação 0° .

Yang *et al.* [49] apresentam uma perspetiva acerca de um teste de flexão em três pontos para laminados CFRP, seguindo a tipologia de construção cruzada, perfazendo um total de 12 camadas. Neste trabalho foram testadas três amostras e os valores registados passam por: $\sigma_1 = 1097,866$ MPa, $\sigma_2 = 1047,430$ MPa e $\sigma_3 = 1030,594$ MPa, ou seja, $\sigma_{média} = 1058,63$ MPa. O valor médio de tensão anotado na Tabela 3 para a construção cruzada é de $\sigma = 1041,820$ MPa, mostrando, deste modo, a semelhança entre os valores obtidos.

Lee *et al.* [50] apresentam um estudo sobre um teste de flexão em três pontos para um laminado CFRP, sendo adotada a tipologia de construção cruzada do modo $[0/90/0/90/0]_2$, assim o teste

mecânico registou 755 MPa de tensão máxima. Ora, apesar de terem sido adotados materiais com propriedades distintas e a dimensão final do laminado ser diferente, a comparação com a construção cruzada adotada $[0_2/90_2/0_2/90_2/0_2]$ revela diferenças em utilizar uma sequência de empilhamento onde as camadas se encontram acopladas duas a duas, visto que a tensão alcançada experimentalmente pela construção cruzada foi de 1041,820 MPa.

Assim, um estudo sobre o efeito da sequência de construção nas propriedades mecânicas de laminados CFRP [51] permite a compreensão do modo de falha encontrado nas amostras. Este revela que um laminado que possua a interface $0^\circ/0^\circ$ desenvolve fissuras entre a fibra e a matriz, responsáveis pela perda de propriedades do laminado, mas não refletem a falha total. Por sua vez, uma amostra que possui na sua sequência de empilhamento a interface $0^\circ/90^\circ$ possui fissuras relativamente ao deslocamento interfacial, mas a fissura principal inicia-se pela rotura das fibras na camada 0° .

Shen *et al.* [52] expõem um estudo onde foi desenvolvida uma amostra de laminado CFRP com a seguinte sequência de construção $[0/90]_{10}$. Indubitavelmente, esta amostra apresenta um grande número de camadas, de modo que os valores retirados no teste mecânico em pouco se assemelham aos registados nesta dissertação. Não obstante o teste mecânico, o desenvolvimento do comportamento do material e posterior falha é descrito com elevada precisão, isto é, quando é alcançado o valor máximo de tensão, já são notórios danos na amostra, nomeadamente na zona onde é aplicada a carga, o que de certa forma, induz a rotura longitudinal por compressão na zona superior. Porém, com o aumento da deformação a área danificada expande-se para a parte inferior da amostra, ao longo da sua espessura, o que leva à falha por compressão das fibras na camada 0° e danos por compressão da matriz nas camadas 90° , tal como referido anteriormente [48, 51]. Assim, a área danificada resulta numa fenda contínua acompanhada por delaminação como presente na Figura 54 d, e, f.

Quando é abordada a temática implementação de um defeito, o estudo apresentado por Luo *et al.* [53] desenvolve um laminado com construção unidirecional e empilhamento de 65 camadas, neste caso foi introduzido um filme em Polietileno na camada 60, estando, portanto, este defeito sujeito à compressão. A realização do teste mecânico de flexão em três pontos demonstrou uma diferença entre a amostra sem defeito e com defeito de 9%. Nesta dissertação, para a amostra desenvolvida segundo construção unidirecional a presença de um defeito à compressão contribui para a perda da resistência do laminado em 6%.

Contudo, uma observação feita neste estudo revela que a implementação de um defeito na zona de compressão reduz a concentração de tensões na posição da cabeça da máquina de teste, assim o laminado está mais propenso a falhas por tração na zona inferior. Para além disso, esta situação está marcada pela presença de rugas na zona de compressão. Por conseguinte, uma breve análise da Figura 60 permite-nos comprovar a “ondulação” criada no defeito nesta zona de compressão, sendo este cenário comum à construção unidirecional e cruzada.

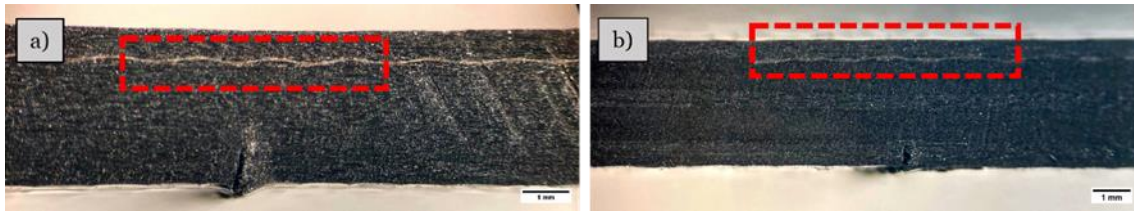


Figura 60: Análise do estado do defeito depois do teste mecânico. a) construção unidirecional e b) construção cruzada.

Amaro *et al.* [54] apresentam um estudo sobre o efeito da delaminação para um teste mecânico de flexão. Nesse estudo, foram desenvolvidas amostras com 150 mm de comprimento e 25 mm de largura, sendo empilhadas unidirecionalmente doze camadas de prepreg. A delaminação foi simulada com recurso a um filme em Teflon colocado entre a nona e décima camada, ou seja, à tração e entre a terceira e quarta camada, isto é, à compressão. Para este estudo, a presença de um defeito diminuiu em 24,4% a resistência do material, sendo que, com o defeito posicionado à tração a influência é de 14,3% e à compressão é de 17,1%.

Uma comparação com os valores obtidos para esta análise experimental rapidamente expressa que os erros obtidos são bastante inferiores aos registados por Amaro *et al.* No entanto, é descrita uma relação de proximidade linear entre a diminuição da carga máxima e o aumento do tamanho das delaminações [54].

A delaminação refere a separação entre camadas sob a influência de carga durante a vida útil do material [55], todavia a realização deste teste laboratorial notou delaminação e casos de perda de adesão entre o filme de Teflon e as camadas do laminado.

Na Figura 61 é possível constatar a presença de delaminação e a separação entre materiais, nomeadamente prepreg e Teflon, na realização do teste mecânico.

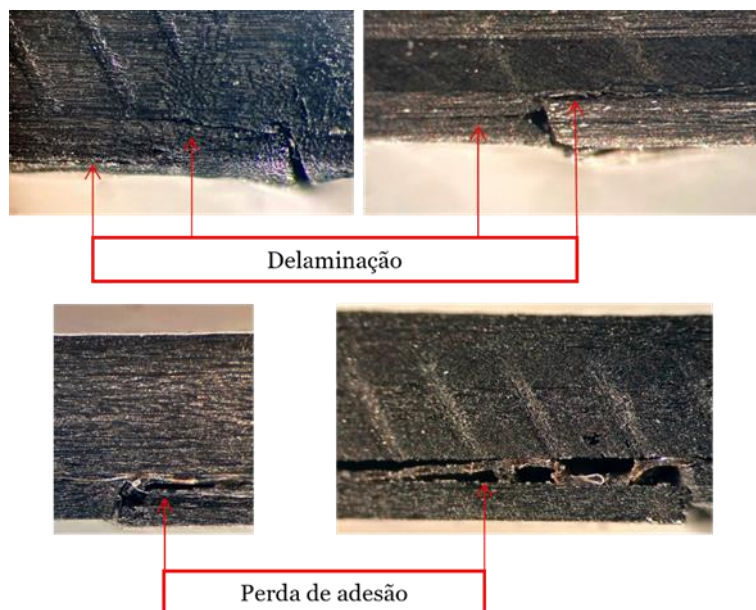


Figura 61: Resultados experimentais onde é detetável delaminação e perda de adesão entre o filme em teflon e as camadas constituintes do laminado.

Capítulo 5

Análise Numérica e Discussão

O quinto capítulo desta dissertação tem como objetivo apresentar a modelação e validação dos modelos analíticos e numéricos.

Em primeiro lugar são introduzidos conceitos da mecânica dos sólidos, sendo o principal intuito a exposição da metodologia utilizada para o desenvolvimento do modelo de elementos finitos criado para o estudo dos laminados.

Em seguida, é discutido o trabalho desenvolvido no software Ansys e os resultados obtidos. Por fim, é realizada a comparação entre valores numéricos e experimentais, após a validação do modelo numérico (digital twin) são realizadas previsões para amostras com diferentes construções.

5.1 Metodologia

Segundo a mecânica dos sólidos, um corpo sólido é idealizado como um meio contínuo que pode ser discretizado pelas partículas de dimensão muito pequena e finita que o constituem.

Um corpo sólido pode ser submetido a forças internas por unidade de volume (peso), forças por unidade de superfície (contacto com outros corpos) e forças pontuais externas [56]. Assim, a ação destas forças provoca o movimento das partículas do meio contínuo, sendo que este movimento pode ser descrito por funções matemáticas que relacionam as forças aplicadas com os deslocamentos relativos entre os diversos pontos materiais, designadas de relações constitutivas. Deste modo, os diversos comportamentos mecânicos dos materiais são descritos pelas suas leis constitutivas, que consistem nas relações constitutivas, pois relacionam os campos de tensões com os campos de deformações. Estas devem ser determinadas experimentalmente através da medição de grandezas físicas como a tensão e a deformação. Por outro lado, a relação entre o campo de tensões e de deformações pode variar em função da temperatura do ensaio, do tempo (ou velocidade do ensaio), ou de parâmetros internos como a direção das tensões principais (no caso de materiais anisotrópicos) e da densidade ou do peso molecular local (no caso de materiais heterogéneos) [56].

A combinação das relações constitutivas de materiais, condições continuidade (ou compatibilidade) e equações de equilíbrio são apresentadas como as condições necessárias para solucionar os problemas da mecânica dos sólidos. Por um lado, as condições de equilíbrio relacionam as forças externas aplicadas à geometria sólida com o campo de tensões devidas aos esforços internos. As condições de continuidade permitem relacionar os deslocamentos dos vários pontos materiais com o campo de deformações, garantindo a continuidade do meio.

Assim, um determinado ponto do sólido, que no estado não deformado, assume uma posição X_i sofre um deslocamento após ser deformado pela aplicação do carregamento externo, e passa a assumir uma nova posição x_i no mesmo referencial cartesiano. O campo de deslocamentos permite conhecer o vetor deslocamento de cada ponto do sólido deformável. O gradiente do

campo dos deslocamentos, um campo vetorial, é um tensor de segunda ordem definido pela Equação (5.1.1).

$$\frac{\partial u_i}{\partial X_j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial X_1} & \frac{\partial u_1}{\partial X_2} & \frac{\partial u_1}{\partial X_3} \\ \frac{\partial u_2}{\partial X_1} & \frac{\partial u_2}{\partial X_2} & \frac{\partial u_2}{\partial X_3} \\ \frac{\partial u_3}{\partial X_1} & \frac{\partial u_3}{\partial X_2} & \frac{\partial u_3}{\partial X_3} \end{bmatrix} \quad (5.1.1).$$

Por sua vez, para descrever a alteração da forma do sólido é necessário considerar a derivada da posição na configuração deformada x_i relativamente à posição na configuração não deformada, ou de referência X_i . Assim sendo, o gradiente de deformações é dado pela Equação (5.1.2), segundo a descrição de Lagrange.

$$F_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial X_1} & \frac{\partial x_1}{\partial X_2} & \frac{\partial x_1}{\partial X_3} \\ \frac{\partial x_2}{\partial X_1} & \frac{\partial x_2}{\partial X_2} & \frac{\partial x_2}{\partial X_3} \\ \frac{\partial x_3}{\partial X_1} & \frac{\partial x_3}{\partial X_2} & \frac{\partial x_3}{\partial X_3} \end{bmatrix} \quad (5.1.2).$$

O gradiente de deformação permite a compreensão física da deformação de forma mais simples. Este transforma o vetor dX , responsável por definir a direção e comprimento de um segmento de reta infinitesimal na sua configuração de referência, num vetor dx , este que define a direção e o comprimento de um segmento de reta infinitesimal na configuração deformada:

$$dx_i = F_{ij}dX_j = dX_i + u_i(X_j + dX_j) - u_i(X_i) \quad (5.1.3).$$

Considerando a expansão de Taylor de 1ª ordem:

$$u_i(X_j + dX_j) \approx u_i(X_j) + \frac{\partial u_i}{\partial X_j} dX_j \quad (5.1.4).$$

O gradiente de deformação pode ser definido pela Equação (5.1.5).

$$F_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} = \delta_{ij} + \frac{\partial u_i}{\partial X_j} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\partial u_1}{\partial X_1} & \frac{\partial u_1}{\partial X_2} & \frac{\partial u_1}{\partial X_3} \\ \frac{\partial u_2}{\partial X_1} & 1 + \frac{\partial u_2}{\partial X_2} & \frac{\partial u_2}{\partial X_3} \\ \frac{\partial u_3}{\partial X_1} & \frac{\partial u_3}{\partial X_2} & 1 + \frac{\partial u_3}{\partial X_3} \end{bmatrix}, \delta_{ij} = \begin{cases} 0, se i \neq j \\ 1, se i = j \end{cases} \quad (5.1.5).$$

O estado de deformação de um ponto é definido como o conjunto de todas as alterações de comprimentos das linhas (fibras do material) que passam pelo ponto e de todas as alterações do ângulo formado entre duas dessas linhas. Ao considerar que há continuidade do material, as alterações numa direção podem ser calculadas com base na alteração na direção dos eixos cartesianos. Porém, para caracterizar alterações de forma em torno de um ponto são necessárias seis componentes independentes.

Ao considerar dois segmentos de reta infinitesimais na configuração de referência dX_1 e dX_2 que se transformam em dx_1 e dx_2 na configuração deformada, o produto escalar de $dx_1 \cdot dx_2$ pode ser calculado considerando a transformação dos vetores dX_1 e dX_2 :

$$dx_{1i} \cdot dx_{2i} = dX_{1i} \cdot F_{ki} \cdot F_{kj} \cdot dX_{2j} = dX_{1i} \cdot C_{ij} \cdot dX_{2j} \quad (5.1.6).$$

O Tensor de Deformações Direto de Cauchy-Green, \mathbf{C} , pode ser calculado em função do gradiente de deformações, presente na Equação (5.1.7).

$$C_{ij} = F_{ki} \cdot F_{kj} \quad (5.1.7).$$

O Tensor de Deformações Direto de Cauchy-Green permite quantificar o comprimento infinitesimal de uma fibra que na direção de m (configuração deformada), é representada pelo vetor $dX = l_0 \cdot m$, e que depois de deformada passa ao vetor $dx = l \cdot n$. m e n são versores que indicam as direções da fibra na direção de referência e na direção deformada, respetivamente, como esquematizado na Figura 62.

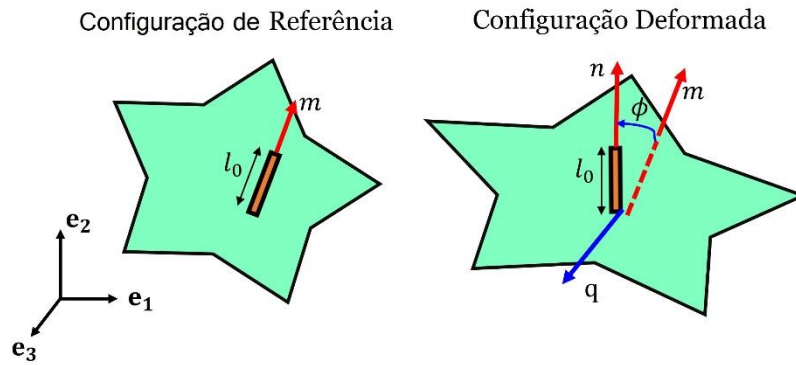


Figura 62: Representação da configuração de referência e configuração deformada, com indicação dos versores m e n .

Considerando que o produto escalar de $dx \cdot dx$ permite determinar o módulo do vetor dx , isto é:

$$l^2 = dx_k \cdot dx_k = F_{ki} \cdot dX_i \cdot F_{kj} \cdot dX_j = F_{ki} \cdot l_0 \cdot m_i \cdot F_{kj} \cdot m_j \cdot l_0 \quad (5.1.8).$$

Assim,

$$\frac{l^2}{l_0^2} = F_{ki} \cdot F_{kj} m_i \cdot m_j = C_{ij} \cdot m_i \cdot m_j \quad (5.1.9).$$

A variação do produto escalar pode ser expressa em função dos vetores dX_1 e dX_2 e do Tensor de Deformação de Lagrange, \mathbf{E} , expresso na Equação (5.1.10).

$$\frac{1}{2} (dx_{1i} \cdot dx_{2i} - dX_{1i} \cdot dX_{2i}) = dX_{1i} \cdot E_{ij} \cdot dX_{2j}$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} (F_{ki} \cdot F_{kj} - \delta_{ij}) = \frac{1}{2} (C_{ij} - \delta_{ij}) \quad (5.1.10).$$

O Tensor de Deformações de Lagrange, \mathbf{E} , permite a quantificação da variação do comprimento $\delta l = l - l_0$ de uma fibra na direção m relativamente à configuração de referência, representada pelo vetor $dX = l_0 \cdot m$, que depois de deformada é representada pelo vetor $dx = l \cdot n$:

$$E_{ij} \cdot m_i \cdot m_j = \frac{l^2 - l_0^2}{2 \cdot l_0^2} = \frac{\delta l}{l_0} - \frac{\delta l^2}{2 \cdot l_0^2} \quad (5.1.11).$$

Ao considerar que δl assume valores reduzidos, $\delta l^2 \approx 0$:

$$E_{ij} \cdot m_i \cdot m_j = \frac{\delta l}{l_0} = \varepsilon_L \quad (5.1.12).$$

Assim, segundo a descrição de Lagrange, é possível determinar a deformação linear (ε_L) na direção do versor m , na configuração de referência.

O Tensor de Deformações de Lagrange, \mathbf{E} , pode ser representado em função do campo de deslocamentos, como na Equação (5.1.13).

Porém, ao considerar a Equação (5.1.8) e a Equação (5.1.13) é possível obter a expressão representada na Equação (5.1.14).

$$dx_i = \left(\delta_{ij} + \frac{\partial u_i}{\partial X_j} \right) \cdot dX_j = \left(\delta_{ij} + \frac{\partial u_i}{\partial X_j} \right) \cdot l_0 \cdot m_j \quad (5.1.13).$$

$$l^2 = dx_k \cdot dx_k = \left(\delta_{kj} + \frac{\partial u_k}{\partial X_j} \right) \cdot l_0 \cdot m_j \cdot \left(\delta_{ki} + \frac{\partial u_k}{\partial X_i} \right) \cdot l_0 \cdot m_i = \left(\delta_{ij} + \frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_k}{\partial X_j} \frac{\partial u_k}{\partial X_i} \right) \cdot l_0^2 \cdot m_j \quad (5.1.14).$$

Tendo em conta a Equação (5.1.11) e a Equação (5.1.12) combinando com a Equação (5.1.14), é possível obter a Equação (5.1.15) e a Equação (5.1.16).

$$\varepsilon_L = \frac{l^2 - l_0^2}{2 \cdot l_0^2} = E_{ij} \cdot m_i \cdot m_j = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_k}{\partial X_j} \frac{\partial u_k}{\partial X_i} \right) \cdot m_j \cdot m_i \quad (5.1.15).$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_k}{\partial X_j} \frac{\partial u_k}{\partial X_i} \right) = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} u_{r,j}) \quad (5.1.16).$$

De acordo com a Equação (5.1.16), se existir o movimento de um corpo rígido, isto é, sem variação relativa da posição dos vários pontos materiais, então $E_{ij} = 0$.

Ao considerar as deformações muito pequenas, as derivadas dos deslocamentos também são pequenas, ou seja, $\frac{\partial u_i}{\partial X_j} \ll 1$.

Desse modo, o produto das derivadas pode ser desprezado ($\frac{\partial u_k}{\partial X_j} \frac{\partial u_k}{\partial X_i} \approx 0$), por conseguinte o resultado culmina na Equação (5.1.17) ou na Equação (5.1.18).

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_k}{\partial X_j} \frac{\partial u_k}{\partial X_i} \right) \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} \right) \quad (5.1.17).$$

$$\mathbf{E} = E_{ij} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} \right) = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial X_1} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial X_2} + \frac{\partial u_2}{\partial X_1} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial X_3} + \frac{\partial u_3}{\partial X_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial X_1} + \frac{\partial u_1}{\partial X_2} \right) & \frac{\partial u_2}{\partial X_2} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial X_3} + \frac{\partial u_3}{\partial X_2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial X_1} + \frac{\partial u_1}{\partial X_3} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial X_2} + \frac{\partial u_2}{\partial X_3} \right) & \frac{\partial u_3}{\partial X_3} \end{bmatrix} = \varepsilon_{ij} \quad (5.1.18).$$

Apesar de neste subcapítulo ter sido explorada a versão de tensores de Lagrange, \mathbf{E} , também é possível desenvolver a versão de Euler, \mathbf{E}^* , onde o gradiente do campo de deslocamentos é relativo à configuração deformada, porém obtém-se o mesmo resultado para o tensor de deformações.

A condição de deslocamento sem deformação, que ocorre no movimento de um sólido não deformado, é satisfeita se E_{ij} e E_{ij}^* forem nulos, portanto:

$$E_{ij} = E_{ij}^* = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (5.1.19).$$

Em suma, considerando um campo de deslocamentos $u_i (u_1, u_2, u_3$ ou $u, v, w)$ as deformações são determinadas segundo a Equação (5.1.20).

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (5.1.20).$$

Porém, as condições de compatibilidade são necessárias para obter um único campo de deslocamento. Elas garantem que o deslocamento é uma acumulação contínua de deformações. Assim, o campo de deformações deve obedecer à condição expressa na Equação (5.1.21).

$$\varepsilon_{ij,kl} + \varepsilon_{kl,ij} - \varepsilon_{ij,kl} - \varepsilon_{kl,ij} = 0 \quad (5.1.21).$$

Expandindo a Equação (5.1.21) é possível obter as seguintes seis equações de compatibilidade:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} \quad (5.1.22).$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{yz}}{\partial y \partial z} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial x \partial y} \quad (5.1.23).$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{zx}}{\partial z \partial x} \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x \partial y} \quad (5.1.24).$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} \quad (5.1.25).$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z \partial x} \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} \quad (5.1.26).$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} \quad (5.1.27).$$

Para ser possível avaliar a interação interna entre as partes de um corpo sólido deformável, tanto pela abordagem da “mecânica dos sólidos” como da “mecânica do contínuo” é utilizado o “método do corte”, ilustrado na Figura 63.

Portanto, considerando que um sólido se encontra em equilíbrio estático quando submetido a carregamentos externos, este pode ser dividido em duas partes por um plano de corte que passa num determinado ponto material P , que é definido matematicamente pelo seu versor normal ao plano n_i e pela posição $P(x_i)$.

Ao considerar apenas uma das partes do sólido, e tendo em conta que todo o corpo sólido se encontra em equilíbrio estático, uma parte isolada da outra também se encontra em equilíbrio estático, devido a carregamentos externos aplicados nessa parte e aos esforços internos distribuídos ao longo do plano de corte.

Os esforços internos representam o efeito da parte retirada sobre a parte isolada através da secção S , contida no plano de corte. A ação das forças externas que atuam na parte isolada são contrabalançadas pelos esforços internos que se distribuem pela secção S . Ao assumir este equilíbrio estático da parte isolada, é possível determinar os esforços internos considerando o diagrama de corpo livre.

Devido ao facto de a distribuição dos esforços internos variar consoante a posição x_i , para caracterizar a distribuição dos esforços internos, deve-se considerar uma pequena porção de S .

Assim, numa área elementar ΔS , contida num plano de corte, em torno do ponto P , pode-se representar um vetor de força ΔF_i e um vetor de momentos ΔM_i . O vetor força ΔF_i pode ser decomposto em três direções ortogonais, onde uma tem a direção do versor normal n_i , e as outras duas direções são paralelas ao plano de corte. Temos assim esforço normal e esforços de corte. O

mesmo ocorre com o vetor momento ΔM_i , que pode ser decomposto no momento tissor, na direção normal ao plano, e em momentos fletores paralelos ao plano de corte.

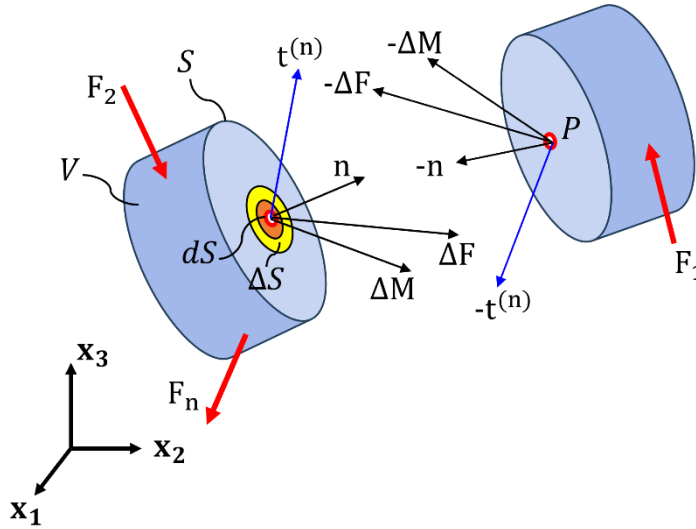


Figura 63: Aplicação do “método do corte”.

A relação $\Delta F_i/\Delta S$ define um valor de força interna média aplicada à área ΔS . Considerando a continuidade do meio, é possível assumir esta força interna média quando a área elementar ΔS diminui para o em torno do ponto $P(x_i)$, nesse limite $\Delta F_i/\Delta S$ assume um valor finito. Por conseguinte, define-se o vetor de tensão $t_i^{(n_i)}$ no ponto $P(x_i)$:

$$\lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F_i}{\Delta S} = \frac{dF_i}{dS} = t_i^{(n_i)} \quad (5.1.28).$$

Devido à presença do par ação-reação, devido às interações com $-\Delta F_i$ e $-\Delta M_i$:

$$t_i^{(-n_i)} = -t_i^{(n_i)} \quad (5.1.29).$$

Quando a área elementar ΔS diminui até o, em torno do ponto $P(x_i)$, é possível admitir que nesse limite $\Delta M_i/\Delta S$ assume um valor nulo, uma vez que o braço do momento passa a ser nulo:

$$\lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta M_i}{\Delta S} = \frac{dM_i}{dS} = 0 \quad (5.1.30).$$

Ao considerar um sistema cartesiano formado pelos versores e_1, e_2, e_3 e os vetores $t_i^{(e_1)}, t_i^{(e_2)}$ e $t_i^{(e_3)}$ que atuam nas respectivas áreas dA_1, dA_2, dA_3 , e cujos planos onde estão contidos passam pela origem O e são definidos pelos respectivos versores normais n_1, n_2, n_3 , paralelos a e_1, e_2, e_3 . Os vetores de tração $t_i^{(e_1)}, t_i^{(e_2)}$ e $t_i^{(e_3)}$ resultam da decomposição do vetor de tração $t_i^{(n_i)}$.

Para o tetraedro do volume dV , apresentado na Figura 64, constituído pelas áreas dA_1, dA_2, dA_3 , com os vetores $-t_i^{(e_1)}, -t_i^{(e_2)}$, e $-t_i^{(e_3)}$, e dA onde atua o vetor de tração $t_i^{(n_i)}$, estar em equilíbrio estático, implica que o somatório das forças deve ser nulo como é visível na Equação (5.1.31), posteriormente após dividir por dA é obtida a Equação (5.1.32).

$$t_i^{(n_i)} dA - t_i^{(e_1)} dA_1 - t_i^{(e_2)} dA_2 - t_i^{(e_3)} dA_3 + \rho b_i dV = 0 \quad (5.1.31).$$

$$t_i^{(n_i)} - t_i^{(e_1)} \frac{dA_1}{dA} - t_i^{(e_2)} \frac{dA_2}{dA} - t_i^{(e_3)} \frac{dA_3}{dA} + \rho b_i dV = 0 \quad (5.1.32).$$

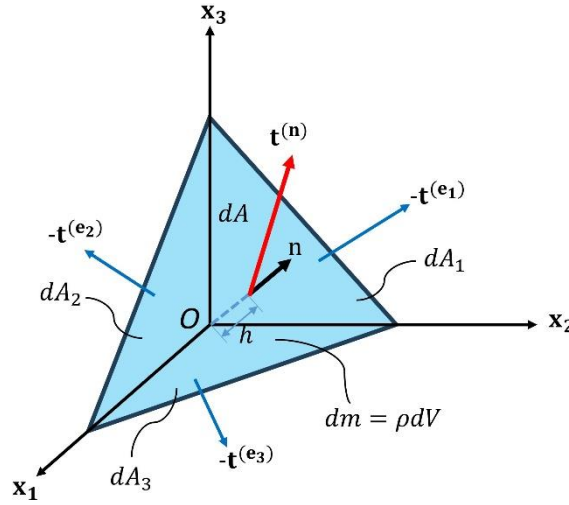


Figura 64: Tetraedro de volume dV , constituído por dA_1 , dA_2 , dA_3 .

Quando dA tende para o, é possível obter:

$$\lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dA_1}{dA} = n_1 \quad (5.1.33).$$

$$\lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dA_2}{dA} = n_2 \quad (5.1.34).$$

$$\lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dA_3}{dA} = n_3 \quad (5.1.35).$$

$$\lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dV}{dA} = 0 \quad (5.1.36).$$

Assim,

$$t_i^{(n_i)} = t_i^{(e_1)} n_1 + t_i^{(e_2)} n_2 + t_i^{(e_3)} n_3 = 0 \quad (5.1.37).$$

Desse modo, o vetor de tração $t_i^{(e_1)} n_1$ pode ser decomposto nos três vetores: $t_1^{(e_1)}$, $t_2^{(e_2)}$, e $t_3^{(e_3)}$, paralelos aos versores e_1 , e_2 , e_3 , como representado na Equação (5.1.38). Por sua vez, o mesmo processo é repetido para o vetor $t_i^{(e_2)}$ na Equação (5.1.39) e $t_i^{(e_3)}$ na Equação (5.1.40).

$$t_i^{(e_1)} = t_1^{(e_1)} e_1 + t_2^{(e_1)} e_2 + t_3^{(e_1)} e_3 = \sigma_{11} e_1 + \sigma_{12} e_2 + \sigma_{13} e_3 \quad (5.1.38).$$

$$t_i^{(e_2)} = t_1^{(e_2)} e_1 + t_2^{(e_2)} e_2 + t_3^{(e_2)} e_3 = \sigma_{21} e_1 + \sigma_{22} e_2 + \sigma_{23} e_3 \quad (5.1.39).$$

$$t_i^{(e_3)} = t_1^{(e_3)} e_1 + t_2^{(e_3)} e_2 + t_3^{(e_3)} e_3 = \sigma_{31} e_1 + \sigma_{32} e_2 + \sigma_{33} e_3 \quad (5.1.40).$$

Aplicando o tensor de Cauchy, ou tensor de segunda ordem à Equação (5.1.37):

$$t_i^{(n_i)} = t_i^{(e_1)} n_1 + t_i^{(e_2)} n_2 + t_i^{(e_3)} n_3 = \sum_{j=1}^3 t_i^{(e_j)} n_j = \sigma_{1i} n_1 + \sigma_{2i} n_2 + \sigma_{3i} n_3 = \sum_{j=1}^3 \sigma_{ji} n_j \quad (5.1.41).$$

Ou seja:

$$t_i^{(n_i)} = n_j \sigma_{ij} \quad (5.1.42).$$

O tensor de Cauchy permite calcular o vetor de tração $t_i^{(n_i)}$ em qualquer ponto $P(x_i)$, segundo um plano perpendicular ao versor normal n_i . Assim, o tensor de Cauchy permite definir de forma unívoca o estado de tensão num ponto, independentemente do sistema de eixo ortogonais usado. As componentes σ_{11} , σ_{22} e σ_{33} são denominadas de tensões normais porque são perpendiculares às faces do tetraedro, e as componentes σ_{12} , σ_{13} , σ_{21} , σ_{23} , σ_{31} e σ_{32} são consideradas tensões de corte porque são paralelas às faces do tetraedro. Assim, o tensor de tensões de Cauchy é definido como:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} t_i^{(e_1)} \\ t_i^{(e_2)} \\ t_i^{(e_3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (5.1.43).$$

O tensor de tensões de Cauchy relaciona as forças na configuração deformada com áreas na configuração deformada. Outra notação em que é possível escrever o tensor de tensões de Cauchy é:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (5.1.44).$$

Deduzindo a 2ª lei de Cauchy é ainda possível provar que o tensor de tensões é simétrico:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (5.1.45).$$

Então, o tensor de tensões é composto por 6 componentes independentes: σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} , σ_{12} , σ_{13} e σ_{32} .

Ao considerar que um sólido deformável pode ser decomposto em tetraedros muito pequenos, mas de dimensão finita, cada vértice de um tetraedro, que corresponde a um nó na malha de elementos finitos, é partilhado por três tetraedros. Então, o deslocamento relativo dos diversos pontos materiais (ou nós da malha) depende do material. Se o material é mais flexível, para uma determinada carga aplicada, então os deslocamentos e distorções angulares relativos dos diversos pontos materiais será maior. São os modelos constitutivos que relacionam o campo de tensões ao campo de deformações. Estes modelos constitutivos são diferentes consoante o tipo de material em questão, neste caso para materiais ortotrópicos, ou seja, com três planos de simetria mutuamente perpendiculares, implica a presença de 9 constantes independentes.

Na Figura 65, encontram-se explícitos materiais com simetria de propriedades e materiais sem simetria de propriedades e na Figura 66 são apresentados os planos e simetria de materiais ortotrópicos versus os materiais isotrópicos.

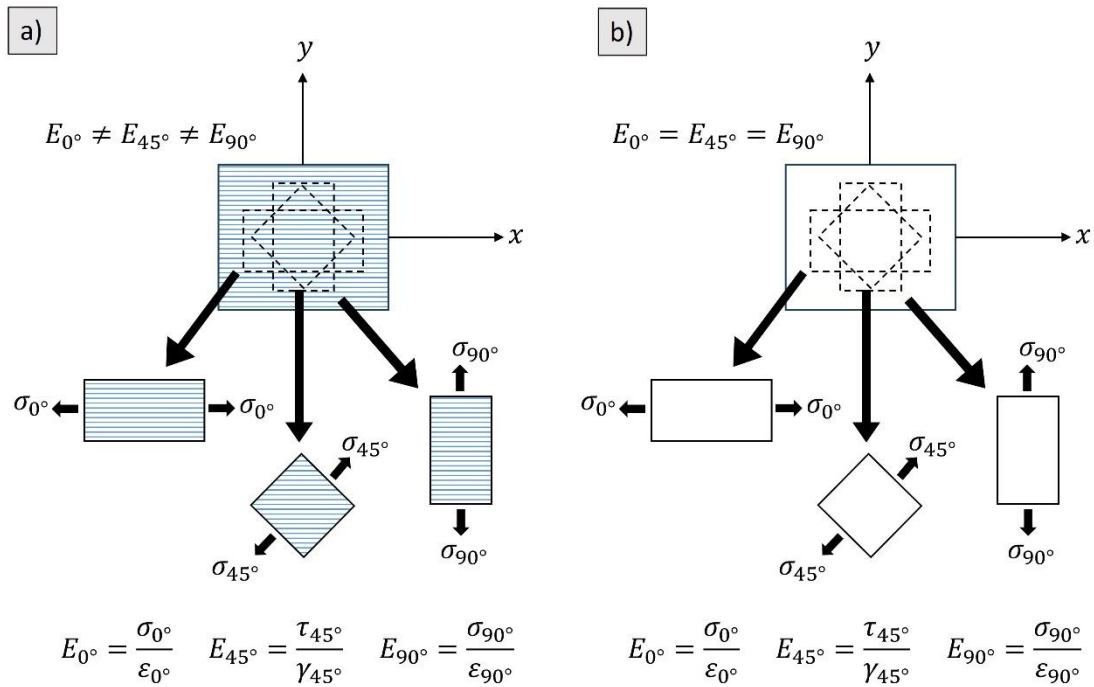


Figura 65: a) material sem simetria de propriedades, b) material com simetria de propriedades.

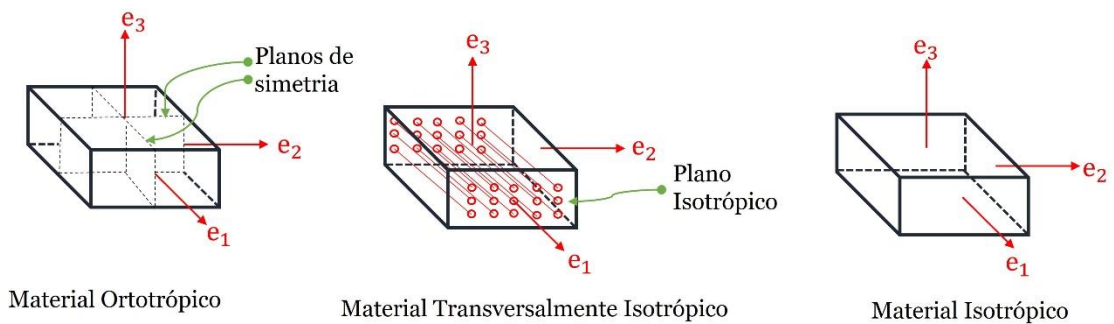


Figura 66: Comparação entre materiais ortotrópicos, materiais transversalmente isotrópicos e materiais isotrópicos.

Sendo os vetores de base perpendiculares aos planos de simetria, a matriz da elasticidade ortotrópica tem a forma de matriz de tensor de 2º grau e está presente na Equação (5.1.46).

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & c_{44} & 0 & 0 \\ sym & & & & c_{55} & 0 \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix} \quad (5.1.46).$$

Esta matriz permite relacionar o campo de tensões com o campo de deformações. Importa referir, que nesta equação, o tensor de tensões é de 2ª ordem (σ_{ij}) com 9 componentes, está representado com um vetor de 6 componentes, de acordo com a 2ª lei de Cauchy (5.1.44), assim como o tensor de deformações:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & c_{44} & 0 & 0 \\ & sym & & & c_{55} & 0 \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (5.1.47).$$

Desta forma, é possível calcular numericamente o campo de tensões, e através das relações de equilíbrio estático entre carregamentos externos e esforços internos, e assim saber se a tensão no ponto mais crítico ultrapassa a tensão limite de elasticidade, ou seja, permite representar tridimensionalmente a distribuição das tensões ao longo do volume do sólido deformável, para um dado deslocamento aplicado e considerando determinados graus de liberdade para os apoios dos sólidos (que implica impedimentos de deslocar e rodar segundo determinadas direções).

Em suma, na Figura 67 está presente um esquema ilustrativo das relações constitutivas, e respetivas condições de compatibilidade entre deformação e deslocamento, e as condições de fronteira e equilíbrio entre tensões e forças de campo e superfície.

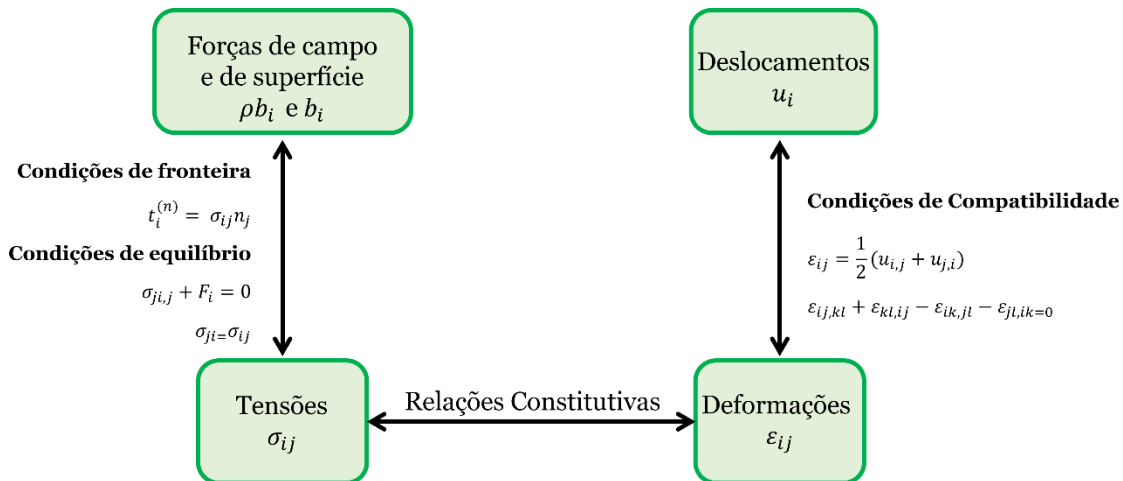


Figura 67: esquema síntese das relações constitutivas entre tensão e deformação.

Esta relação pode ser expressa na sua forma inversa. Sendo os vetores de base perpendiculares aos planos de simetria, a matriz de rigidez ortotrópica, que é a matriz inversa da matriz de elasticidade, considerando os módulos de Young e os coeficientes de Poisson nas três direções ortogonais, tem a forma de matriz presente na Equação (5.1.48).

$$S = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\mu_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\mu_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\mu_{12} \end{bmatrix} \quad (5.1.48).$$

Onde,

$$E_1 = \frac{c_{11}c_{22}c_{33} + 2c_{23}c_{12}c_{13} - c_{11}c_{23}^2 - c_{22}c_{13}^2 - c_{33}c_{12}^2}{c_{22}c_{33} - c_{23}^2}$$

$$E_2 = \frac{c_{11}c_{22}c_{33} + 2c_{23}c_{12}c_{13} - c_{11}c_{23}^2 - c_{22}c_{13}^2 - c_{33}c_{12}^2}{c_{11}c_{33} - c_{13}^2}$$

$$E_2 = \frac{c_{11}c_{22}c_{33} + 2c_{23}c_{12}c_{13} - c_{11}c_{23}^2 - c_{22}c_{13}^2 - c_{33}c_{12}^2}{c_{11}c_{22} - c_{12}^2}$$

$$v_{12} = \frac{c_{12}c_{33} - c_{13}c_{23}}{c_{22}c_{33} - c_{23}^2}, v_{13} = \frac{c_{22}c_{13} - c_{12}c_{23}}{c_{22}c_{33} - c_{23}^2}$$

$$v_{21} = \frac{c_{12}c_{33} - c_{13}c_{23}}{c_{11}c_{33} - c_{13}^2}, v_{23} = \frac{c_{11}c_{23} - c_{12}c_{13}}{c_{11}c_{33} - c_{13}^2}$$

$$v_{31} = \frac{c_{13}c_{22} - c_{12}c_{23}}{c_{11}c_{33} - c_{13}^2}, v_{32} = \frac{c_{11}c_{23} - c_{12}c_{13}}{c_{11}c_{22} - c_{12}^2}$$

$$\mu_{23} = c_{44}, \mu_{13} = c_{55}, \mu_{12} = c_{66}$$

Esta matriz permite relacionar o campo de deformações com o campo de tensões.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -v_{21}/E_2 & -v_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -v_{12}/E_1 & 1/E_2 & -v_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -v_{13}/E_1 & -v_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\mu_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\mu_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\mu_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (5.1.49).$$

Desta forma, é possível calcular numericamente o campo de deformações, e através das relações de compatibilidade entre deslocamentos e deformações é possível prever o campo de deslocamentos de cada ponto material, ou em cada nó da malha de elementos tetraédricos finitos, ou seja, representar tridimensionalmente o aspeto deformado do sólido deformável, para um dado carregamento externo e interno (ação da força gravítica considerando o peso próprio) e considerando determinados graus de liberdade para os apoios dos sólidos (que implica o cálculo das reações força e momento nos apoios).

Por sua vez, quando abordamos a temática de uma viga à flexão, como representado na Figura 68, o seu comportamento é descrito segundo o plano longitudinal de simetria, sendo independente do eixo z, como apresentado na Equação (5.1.50).

$$d(x, y) = u(x, y)e_1 + v(x, y)e_2 + 0e_3 \quad (5.1.50).$$

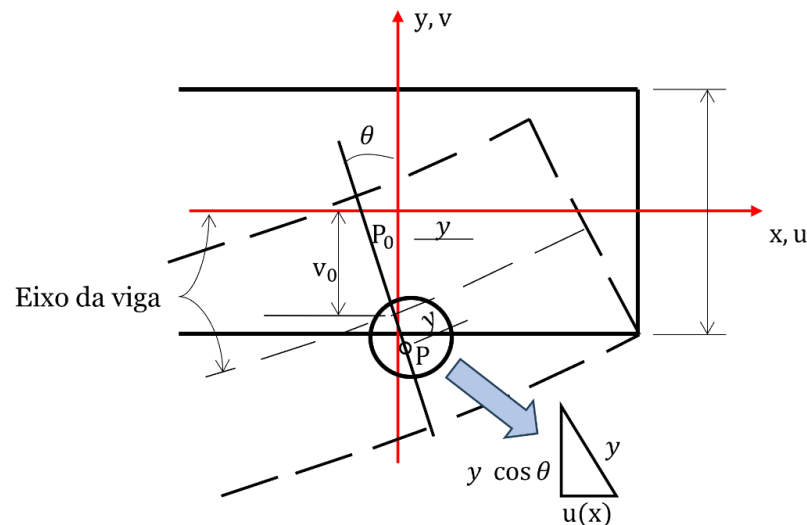


Figura 68: Representação de uma viga à flexão.

Analisando a Figura 68, segundo a hipótese cinemática adotada, o ângulo θ confunde-se com a primeira derivada da função y , por conseguinte:

$$v(x) = -v_0(x) - y(1 - \cos \theta) \quad (5.1.51).$$

$$u(x) = y \sin \theta \quad (5.1.52).$$

Assim, as relações de compatibilidade são dadas pelas seguintes equações:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}(y \sin \theta) = \frac{\partial}{\partial x}\left(y \frac{\partial v}{\partial x}\right) = y \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = yv'' \quad (5.1.53).$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y}(-v_0) = 0 \quad (5.1.54).$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = v' - v' = 0 \quad (5.1.55).$$

Considerando a relação constitutiva entre tensão e deformação presente na Equação (5.1.56).

$$\sigma_x = E\varepsilon_x = Eyv'' \quad (5.1.56).$$

As relações de equilíbrio são dadas pelas seguintes equações:

$$V = \int_A \tau_{xy} dA = \int_A G\gamma_{xy} dA = 0 \quad (5.1.57).$$

$$N = \int_A \sigma_x dA = \int_A Eyv'' dA = Ev'' \int_A y dA = 0 \quad (5.1.58).$$

$$M = \int_A y\sigma_x dA = \int_A Ey^2v'' dA = Ev'' \int_A y^2 dA = Elv'' \quad (5.1.59).$$

5.2 Modelação Numérica

A modelação numérica foi realizada com o *Ansys*. Este programa apresenta a possibilidade de trabalhar em linguagem de programação e interface gráfica, na qual vários tipos de simulação podem ser realizados dentro do mesmo projeto.

Neste caso foi adotada a interface gráfica, e uma das primeiras etapas consiste na definição das propriedades do material, seguido do desenvolvimento da geometria, caracterização do laminado, definição dos parâmetros da malha, inserção das condições de fronteira e o carregamento do sistema.

Assim, o desenvolvimento de um ensaio mecânico de flexão no *Ansys* envolve a utilização de quatro módulos, esquematicamente representados na Figura 69 a. No ACP (Pre) é construído o laminado, desde a introdução das propriedades do material, definição da sua geometria e sequência de empilhamento do laminado. Em seguida, no módulo D, *Mechanical Model*, são construídos os apoios da máquina de teste, tendo em consideração a relação L/h.

Posteriormente, estes dois parâmetros são desenvolvidos no módulo *Static Structure*. A ligação entre módulos implica transferir a informação do compósito como um elemento sólido ou casca. Para esta simulação numérica foi escolhida a opção sólido, como representado na Figura 69 b.

Nesta fase, é essencialmente necessário definir as condições de fronteira entre a amostra e os apoios, definir as condições para aplicação de carga e parametrizar a malha. Por fim, no ACP

(Post) é feito o pós-processamento do ensaio numérico, e são representados tridimensionalmente os campos de tensões $\sigma_{ij}(X_i)$, de deformações $\varepsilon_{ij}(X_i)$ e de deslocamentos $d_i(X_i)$.

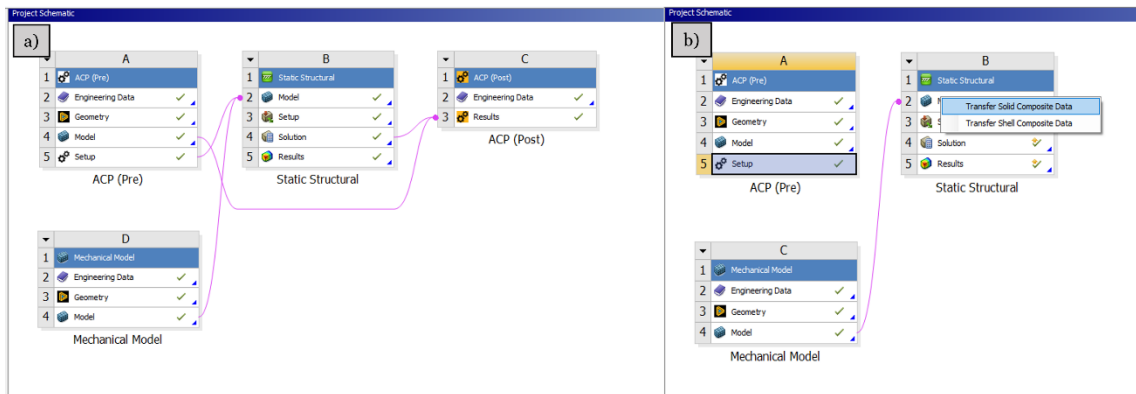


Figura 69: a) Esquema dos modelos construídos no *Ansys Workbench*, b) tipo de ligação entre modelos desenvolvidos.

No que toca às propriedades mecânicas e elásticas do material, devido à informação insuficiente presente na ficha técnica, recorreu-se à literatura para colmatar os dados em falta. Na Tabela 4 estão presentes os valores das propriedades mecânicas do material para o HS 160 REM [57] e Teflon [58].

Tabela 4: Propriedades mecânicas de HS 160 REM [57] e Teflon [58].

HS 160 REM					
E_{11} (GPa)	E_{22} E_{33} (GPa)	$\nu_{12} = \nu_{13}$	ν_{23}	$\mu_{12} = \mu_{13}$ (GPa)	μ_{23} (GPa)
109,34	8,82	0,342	0,52	4,32	3,2
Teflon					
E (GPa)		ν			
0,437		0,45			

Na Figura 70 é apresentada a *Outline* do projeto, que de certo modo consiste numa série de patamares do módulo *Static Structure*, para a definir todos os parâmetros necessários para a simulação, como condições de fronteira e carregamento (cargas pontuais ou distribuídas à superfície, e peso próprio), ou imposição de deslocamentos (rotações e deslocamentos dos três eixos). A destacado encontram-se a definição das condições de fronteira.

Assim, entre a amostra e os apoios são consideradas relações de fricção, porém entre um dos apoios e a amostra é necessário definir a condição de “Não há separação” por forma a realizar o teste mecânico como ocorreu experimentalmente. Na Figura 71 estão ilustradas as condições adotadas.

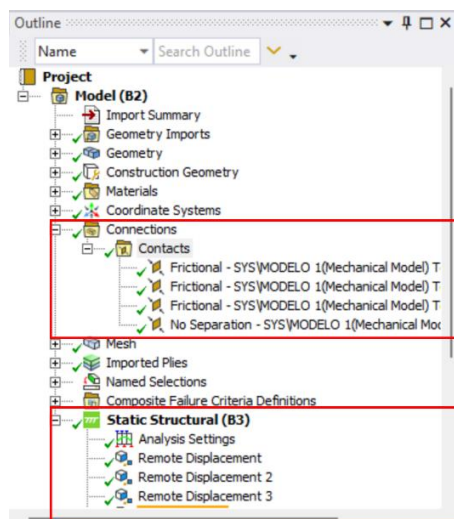


Figura 70: Outline do projeto no Módulo *Static Structure*.

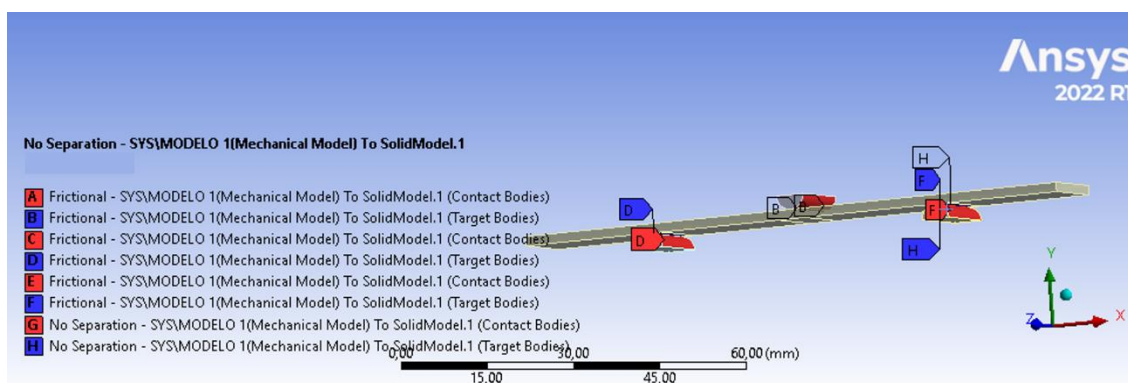


Figura 71: Condições impostas entre os apoios da máquina de teste e a amostra no *Ansys*.

Em seguida, para cada apoio é criado um *Remote Displacement*, este comando permite definir os graus de liberdade de cada apoio, ou seja, vetores deslocamento e rotação decompostos nos três eixos segundo os versores e_i . Os deslocamentos e rotações podem ainda ter atrito tangencial ao contacto, que é proporcional à pressão de contacto entre a superfície plana do laminado e cilíndrica dos apoios e carga, e ao coeficiente de atrito. Isto é, não só conferir valores de deslocamento segundo os eixos x , y e z , mas também valores de rotação R_x , R_y e R_z .

Deste modo, para os elementos que apoiam a amostra os graus de liberdade são nulos segundo x e y . Por sua vez, ao elemento responsável por simular a carga é conferido um deslocamento segundo o eixo do y .

No que concerne a dimensão da malha, na Figura 72 é apresentado um gráfico evolutivo entre o número de elementos da malha e o valor de tensão máxima.

Assim, é possível constatar que refinar a malha até aos 3000 elementos, permite obter, com maior grau de precisão, os resultados numéricos. Sendo possível constatar a malha final na Figura 73.

Por fim, de modo a obter o valor de tensão máxima foi utilizado o Critério de Von-Mises.

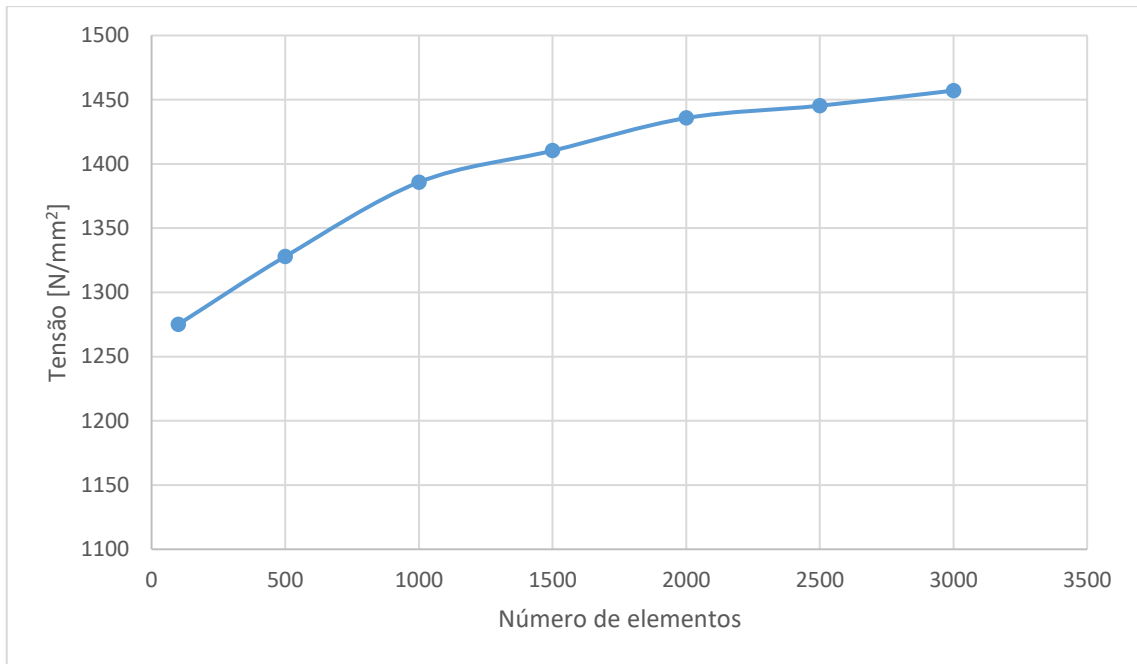


Figura 72: Estudo do número de elementos da malha para valores de tensão máxima em amostras de construção unidirecional.

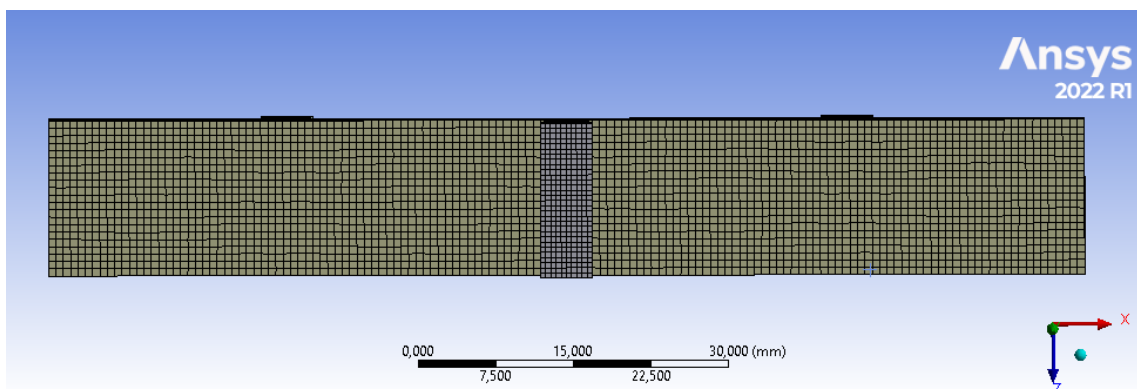


Figura 73: Malha otimizada utilizada na simulação numérica no Ansys.

5.3 Solução Numérica

Na Tabela 5 estão presentes os resultados da simulação numérica no *Ansys*, onde foram desenvolvidas amostras adotando a construção unidirecional sem defeito e com defeito (5 mm e 10 mm), e seguindo uma tipologia de construção cruzada sem defeito e com defeito (5 mm e 10 mm).

Tabela 5: Resultados numéricos obtidos no Ansys.

Amostras	Construção Unidirecional			Construção Cruzada		
	Tensão [N/mm ²]	Força [N]	Deslocamento [mm]	Tensão [N/mm ²]	Força [N]	Deslocamento [mm]
Sem defeito	1409,10	667,23	4,709	1054,90	630,17	3,899
Defeito 10 mm tração	1317,80	721,83	4,317	953,39	566,36	3,267
Defeito 10 mm compressão	1286,40	760,44	4,037	1029,9	516,25	3,226
Defeito 5 mm tração	1348,90	743,47	4,032	1103,7	540,94	3,532
Defeito 5 mm compressão	1319,70	679,86	4,023	977,78	623,83	3,154

Uma breve análise da Tabela 3 e da Tabela 5 permite concluir não só, que o estudo numérico está em concordância com o estudo experimental, na medida em que a construção unidirecional sem defeito apresenta valores mais elevados de tensão de rotura, mas também que a implementação de um filme em Teflon confere a perda de propriedades mecânicas do laminado.

De acordo com a modelação numérica, a implementação de um defeito contribui para a perda em 6,5 % (construção unidirecional) e 3,7 % (construção cruzada) da resistência do laminado. Ao ter em conta a dimensão do defeito para a construção unidirecional, a presença de um defeito de 5 mm apresenta uma influência de 5,3%, e para 10 mm 7,6%, na resistência final do laminado. Na construção cruzada, para 5 mm o valor é de 1,3 % e para 10 mm é de 6,0%.

Previamente, o mesmo raciocínio foi adotado para os resultados do teste experimental sendo efetuada uma comparação na Figura 74, no eixo do x são avaliados os valores médios obtidos para ensaios com defeito, dando distinção ao tipo de construção e dimensão do defeito. No eixo do y é avaliada a percentagem de influência que esse defeito possui na resistência do laminado.

Ao analisar a Figura 74 é notável a discrepância de valores que envolve os testes com defeito de 5 mm, tanto para uma construção unidirecional como cruzada. Assim, voltando a analisar a Tabela 3 é visível que a análise experimental de amostras com defeito de 5 mm apresenta uma grande variação de valores, 19%, principalmente em amostras de construção cruzada. Posteriormente, esta discordância de valores reflete-se na comparação de amostras em construção cruzada com defeito.

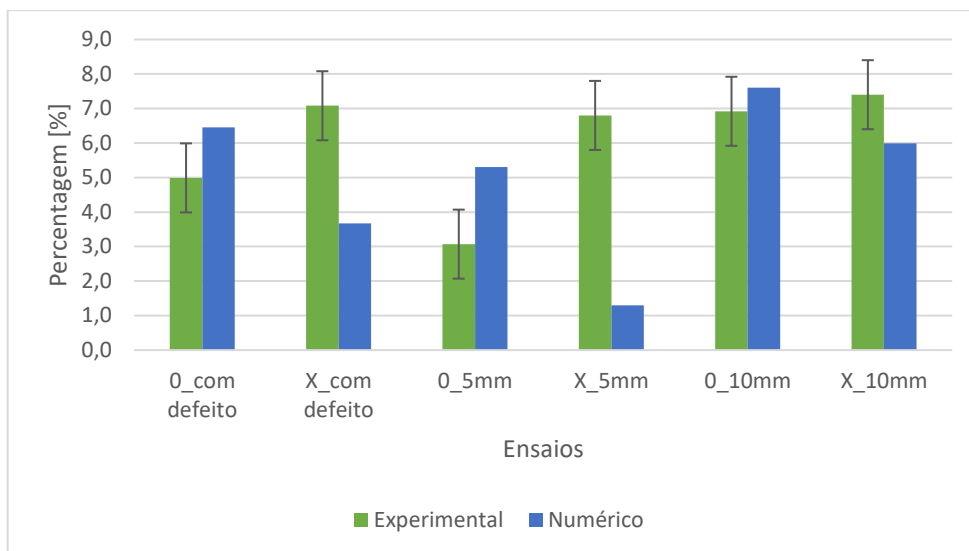


Figura 74: Comparação de dados experimentais e numéricos sobre a influência da presença e dimensão do defeito na resistência dos laminados CFRP.

Todavia, de modo a proceder à análise dos resultados numéricos, segue-se a comparação entre valores numéricos e experimentais, tal como realizado em [54] e [59].

Por conseguinte, a Tabela 6 exhibe a comparação entre estes estudos, sendo de notar que o valor experimental consiste na média dos três ensaios executados para cada amostra e para o ensaio numérico é considerado o valor máximo da modelação para cada parâmetro em estudo.

Tabela 6: Comparação entre valores do teste experimental e da modelação numérica, cálculo do erro associado entre as diferentes condições de simulação.

Construção Unidirecional									
Amostras	Tensão [N/mm ²]		Erro [%]	Força [N]		Erro [%]	Deslocamento [mm]		Erro [%]
	Experimental	Numérico		Experimental	Numérico		Experimental	Numérico	
Sem defeito	1382,43	1409,10	1,89	689,73	667,23	3,26	3,66	4,709	22,2
Defeito 10 mm tração	1307,19	1317,80	0,81	651,78	721,83	9,70	3,53	4,317	18,2
Defeito 10 mm compressão	1266,47	1286,40	1,55	678,09	760,44	10,8	3,33	4,037	17,5
Defeito 5 mm tração	1337,75	1348,90	0,83	699,22	743,47	5,95	3,61	4,032	10,5
Defeito 5 mm compressão	1342,18	1319,70	1,67	668,33	679,86	1,70	3,36	4,023	16,4

Construção Cruzada									
Sem defeito	1041,82	1054,90	1,23	520,67	630,17	17,4	3,67	3,899	5,87
Defeito 10 mm tração	935,38	953,39	1,89	504,34	566,36	10,9	3,14	3,267	3,88
Defeito 10 mm compressão	994,73	1029,9	3,41	508,67	516,25	1,47	3,17	3,226	1,74
Defeito 5 mm tração	1006,31	1103,7	8,82	531,99	540,94	1,65	3,37	3,532	4,57
Defeito 5 mm compressão	935,72	977,78	4,30	488,72	623,83	21,6	3,08	3,154	2,34

Como é possível observar na Tabela 6, os erros associados ao deslocamento são os que apresentam valores superiores, variando entre 1,74 % e 22,2 %. Porém, estes valores, ao serem comparados com a literatura [59], apresentam estar dentro de uma gama aceitável.

Por oposto, os valores referentes à tensão exibem, na sua maioria, erros pouco significativos, demonstrando, deste modo a concordância entre o teste experimental e a simulação numérica.

Uma grande vantagem na modelação numérica consiste na possibilidade de avaliar os valores de tensão pelas várias camadas do laminado e, assim, proceder a um paralelismo entre a dimensão da fenda obtida experimentalmente, e os valores de tensão máxima conseguidos na simulação numérica.

Em seguimento, ao analisar a Figura 54 d, e, f, referente à fenda obtida para a construção cruzada sem defeito, a Figura 56 d, e, f e Figura 58 d, e, f, onde os defeitos estão posicionadas à compressão para a construção cruzada, e tendo em conta a análise ótica, é apresentada uma fenda que se propaga por toda a camada 0° , mas não pela 90° . Ora, seguindo a descrição de [31], tal sucede-se pelas diferentes tensões em camadas com diferentes orientações. Assim, com recurso ao *Ansys* foi realizada uma avaliação desta situação.

Consequentemente, servindo de exemplo o modelo numérico para a construção cruzada, registaram-se os devidos valores de tensão para cinco camadas do laminado, sendo anotado em índice a camada referente: $\sigma_1 = 1063,5$ MPa, $\sigma_2 = 934,5$ MPa, $\sigma_3 = 423,6$ MPa, $\sigma_4 = 42,3$ MPa e $\sigma_5 = 82,46$ MPa.

A Figura 75 apresenta a modelação obtida no *Ansys* para a primeira e terceira camada.

Ao analisar os valores de tensão retirados é possível reter que as camadas 0° estão sujeitas a valores de tensão superiores face às camadas com orientação 90° . Inclusive, a quinta camada com orientação 0° ($\sigma_5 = 82,46$ MPa), apresenta um valor de tensão superior face à quarta camada com orientação 90° ($\sigma_4 = 42,3$ MPa).

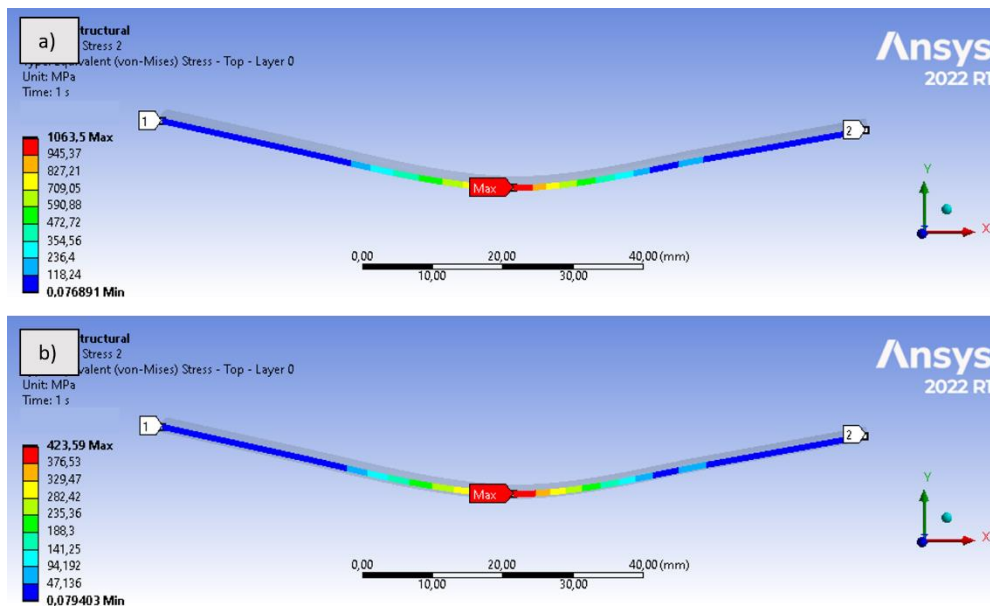


Figura 75: Resultado da simulação numérica utilizando a função *Path*. a) tensão máxima obtida para a primeira camada (0°) e b) tensão máxima para a terceira camada (90°).

No que toca à construção unidirecional, a literatura [53] apresenta a posição de que quando a construção unidirecional partilha de um defeito à compressão, a zona inferior está submetida a uma maior concentração de tensões, assim sendo, servindo de exemplo a construção unidirecional com defeito de 5 mm à compressão, a Figura 76 apresenta uma modelação no *Ansys* que confirma esta ideia.

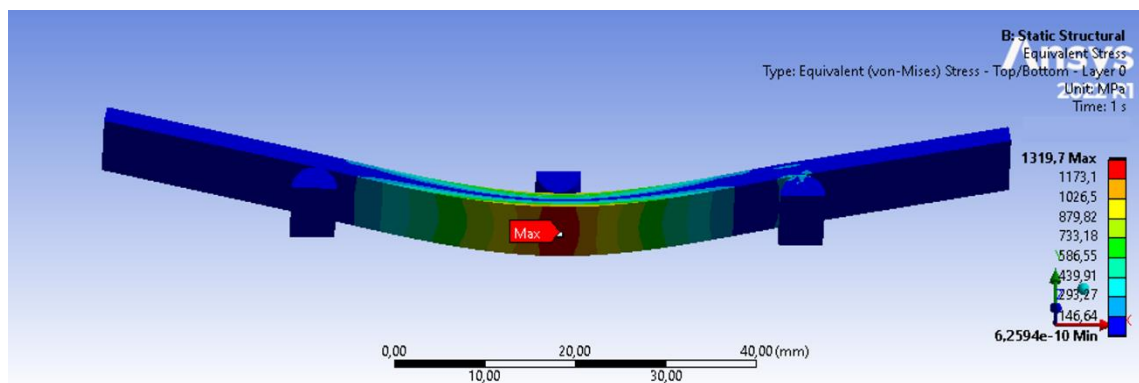


Figura 76: Simulação numérica da amostra com construção unidirecional e defeito de 5 mm à compressão, destacando com etiqueta zona de tensão máxima.

5.3.1 Previsões com a solução numérica

Nesta dissertação, a componente experimental desenvolveu laminados CFRP com duas tipologias de construção, unidirecional $[0_{10}]$ e cruzada $[0_2/90_2/0_2/90_2/0_2]$. Porém, esta secção pretende explorar outras possibilidades de orientação das lâminas, por exemplo, variar o número de camadas e adotar outra geometria do laminado.

Deste modo, esta secção tem como intuito desenvolver previsões no *Ansys*, e posteriormente compará-las com a literatura, ou vice-versa.

A importância da orientação das lâminas

O estudo apresentado por Caminero *et al.* [60] desenvolve experimentalmente várias tipologias de construção, entre elas $[0]_{12}$, $[90]_{12}$, $[\pm 45]_{3s}$ e $[0/90/(\pm 45)_2]_s$. Por conseguinte, a análise numérica deste estudo é proposta por Bellahkim *et al.* [43].

Por sua vez, existem alguns estudos que desenvolvem várias tipologias de construção, sendo o seu intuito perceber qual a mais resistente. Servindo de exemplo $[0/90/-45/45]_{2s}$ e $[45/45/90/0]_{2s}$ [61, 62]. Neste caso, a construção $[45/45/90/0]_{2s}$ apresenta um modo de rotura progressivo marcado pela rotura de fibras e delaminação, e em simulações mecânicas a força resultante máxima é de 750 N. Por sua vez, a construção $[0/90/-45/45]_{2s}$ exibe danos inferiores e valores de força resultante máxima além dos 1000 N.

Outros autores [63] defendem que a implementação de lâminas com orientação $\pm 35^\circ$ ou a combinação desta orientação com lâminas 0° , como $[0/-35/0/+35/0]$, confere o maior padrão de resistência à rotura.

Assim, o objetivo da extrapolação do modelo numérico desenvolvido e validado com os resultados experimentais, passa pela modelação de três sequências de construção distintas das adotadas, nomeadamente $[\pm 45]_{3s}$, $[0/90/(\pm 45)_2]_s$ e $[0/-35/0/+35/0]$ e a sua comparação com o ensaio experimental apresentado [43, 63].

De notar que para desenvolver estes modelos no *Ansys*, as propriedades do material escolhido e a geometria do laminado estão presentes no estudo [60] para as construções $[\pm 45]_{3s}$, $[0/90/(\pm 45)_2]_s$, por sua vez a informação necessária para a modelação numérica da amostra $[0/-35/0/+35/0]$ está no estudo [63].

Na Tabela 7 estão os resultados obtidos experimentalmente e as respetivas comparações com a literatura. E na Figura 77 estão presentes os resultados obtidos no *Ansys* para as amostras.

Tabela 7: Comparação de valores de tensão, para resultados experimentais [43, 63] e a modelação numérica.

Tipo de construção	Tensão [N/mm ²]		Erro [%]
	Experimental	Numérico	
$[\pm 45]_{3s}$	394,9 [43]	399,8	1,26
$[0/90/(\pm 45)_2]_s$	833,1 [43]	856,4	2,70
$[0/-35/0/+35/0]$	879,5 [63]	906,9	1,04

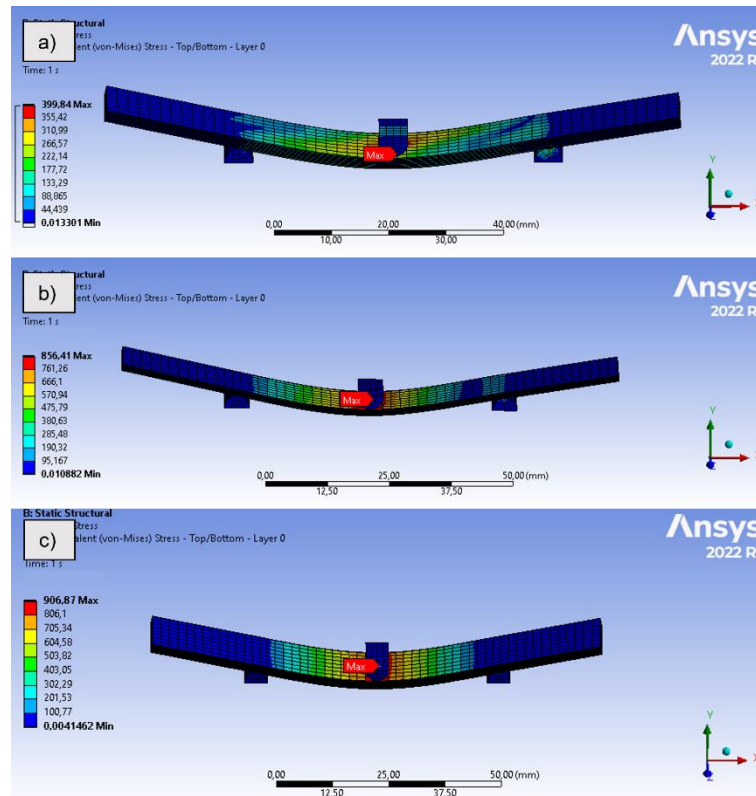


Figura 77: Resultados de tensão máxima obtidos na simulação numérica. a) tipologia de construção $[\pm 45]_{3s}$, b) tipologia de construção $[0/90/(\pm 45)_2]_s$ e c) tipologia de construção $[0/-35/0/+35/0]$.

A análise da Tabela 7 permite obter conclusões semelhantes às de Bellahkim *et al.* [43], isto é, a adoção de uma sequência de empilhamento diferente, transpõe resultados mecânicos diferentes. Na sua análise, a construção unidirecional $[0]_{12}$ apresenta o maior valor de tensão, seguido da sequência $[0/90/(\pm 45)_2]_s$, em terceiro posto a tipologia de construção $[\pm 45]_{3s}$ e só por fim a construção $[90]_{12}$. Demonstrando, deste modo, que a combinação de camadas com orientação 0° , 90° e 45° apresenta vantagens face às seguintes amostras $[\pm 45]_{3s}$ e $[90]_{12}$.

Além disso, a análise numérica [43] apresenta erros não superiores a 3%, algo também obtido nesta simulação numérica, presente na Tabela 7.

A implementação de lâminas com orientação $\pm 35^\circ$ conjugadas com lâminas 0° apresenta um elevado valor de tensão máxima, porém fatores como número de camadas e geometria do laminado dificultam a comparação direta com os restantes elementos.

A importância do número de camadas

Assim, de modo a compreender qual a influência do número de camadas num laminado, procedeu-se ao estudo das seguintes amostras de construção unidirecional, $[0]_8$, $[0]_{12}$ e $[0]_{16}$, tal como apresentado no estudo [64].

Camirero *et al.* [64] apresentam um estudo com intuito de avaliar de que modo a espessura final do laminado afeta o seu comportamento quando sujeito a um teste de flexão em três pontos. O teste dos seguintes laminados CFRP, $[0]_8$, $[0]_{12}$ e $[0]_{16}$, concluiu que com o aumento da espessura verifica-se uma diminuição de 20,9% nos valores de tensão máxima.

Deste modo, o objetivo passa por desenvolver as construções [O]₈, [O]₁₂ e [O]₁₆ no *Ansys* e comparar com os resultados obtidos por Caminero *et al* [64].

Na Tabela 8 encontram-se os resultados obtidos no *Ansys* para as amostras de construção unidirecional, tal como proposto no estudo [64]. É, também, feita a comparação entre os valores experimentais [64] e os resultados da simulação no *Ansys*.

Tabela 8: Comparação de valores de tensão, para resultados experimentais [63] e a modelação numérica.

Tipo de construção	Tensão [N/mm ²]		Erro [%]
	Experimental [64]	Numérico	
[O] ₈	839,1	840,4	0,15
[O] ₁₂	768,5	773,6	0,66
[O] ₁₆	663,1	666,6	0,53

De acordo com os resultados obtidos na simulação numérica o aumento da espessura final das amostras contribui para uma diminuição de 20,6% nos valores de tensão máxima.

Assim, é possível concluir que a espessura final do laminado influencia o seu desempenho quando sujeito a um teste mecânico. Porém, é necessário salientar que para a execução destes testes foram consideradas as propriedades do material e a geometria do laminado expostas em [64].

Contudo, para além de variações na espessura final da amostra também podem ser adotadas alterações em termos de comprimento e largura, e deste modo, compreender qual a sua influência nos resultados.

Por conseguinte, usando a geometria desenvolvida para a construção de amostras nesta dissertação, procedeu-se à elaboração de novos modelos no *Ansys*. Para tal, na Tabela 9 são comparadas as dimensões utilizadas.

Tabela 9: Comparação de valores de comprimento, largura e espessura, entre estudo [64] e geometria das amostras adotada.

Tipo de construção	Comprimento [mm]		Largura [mm]		Espessura [mm]	
	[64]		[64]		[64]	
[O] ₈	85 [64]	100	13 [64]	15	2 [64]	1,312
[O] ₁₂	120 [64]	100	13 [64]	15	3 [64]	1,968
[O] ₁₆	160 [64]	100	13 [64]	15	4 [64]	2,624

Em primeiro lugar, o desenvolvimento de amostras no *Ansys* com outra geometria tende a verificar se o aumento da espessura influencia do mesmo modo o desempenho final de uma amostra sujeita a um teste mecânico.

Assim, adotando a geometria 100 mm X 15 mm, procedeu-se à comparação das seguintes amostras [O]₈, [O]₁₂, [O]₁₆ e [O]₁₀ previamente desenvolvida, utilizando o material HS 160 REM. Na Tabela 10 é possível constatar os resultados obtidos no *Ansys* para a simulação de testes mecânicos de flexão em três pontos nas amostras previamente referidas.

Tabela 10: Resultados de tensão máxima obtidos no *Ansys* para amostras com diferente número de camadas.

Tipo de construção	Dimensão da amostra [mm]	Tensão [N/mm ²]
[O] ₈	100 X 15 X 1,312	1423,8
[O] ₁₀	100 X 15 X 1,640	1353,4
[O] ₁₂	100 X 15 X 1,968	1382,3
[O] ₁₆	100 X 15 X 2,624	1240,1

A visualização da Tabela 10 permite determinar que independentemente da geometria utilizada a teoria apresentada em [64] verifica-se. Na medida em que com o aumento do número de camadas regista-se uma diminuição de 13% no valor de tensão máxima. Por sua vez, este cenário apresenta valores 37% inferiores comparativamente aos observados previamente por Caminero *et al.* [64].

A importância da espessura da lâmina

Contudo, voltando a analisar a Tabela 9, ao comparar as dimensões das amostras presentes no estudo proposto por Caminero *et al.* [64] e as desenvolvidas, é possível concluir que amostras com o mesmo número de camadas possuem um valor de espessura final distinta. Deste modo, destaca-se que a espessura do prepreg utilizado é diferente.

No estudo proposto por Caminero *et al.* [64] a espessura de cada camada é de 0,250 mm e nesta dissertação o material HS 160 REM apresenta uma espessura de 0,164 mm por lâmina.

Segundo Huang *et al.* [65] é considerada uma camada de espessura fina quando a sua espessura varia entre 0,020 mm e 0,055 mm; uma lâmina com espessura *standard* ronda os 0,125 mm; por sua vez uma camada de elevada espessura é superior a 0,200 mm.

Este estudo [65] defende a ideia de que quanto mais fina for a camada constituinte do laminado, maior é a sua resistência à delaminação e ao dano. Contudo, laminados com camadas finas podem exibir tensões de corte elevadas.

Deste modo, serão desenvolvidas no *Ansys* amostras adotando as duas vertentes de espessura. Esta variação em termos de espessura e comprimento, origina diferentes relações L/h que serão tidas em conta.

Na Tabela 11 encontram-se explícitos os resultados obtidos na simulação numérica no *Ansys* para amostras com a espessura por camada entre 0,250 mm e 0,164 mm, sendo testadas amostras com 8, 12 e 16 lâminas de prepreg.

Em seguida, na Figura 78 e na Figura 79 encontram-se os resultados obtidos no *Ansys* para amostras com uma espessura por lâmina de 0,250 mm e 0,164 mm, respetivamente.

Tabela 11: Resultados de tensão máxima obtidos no *Ansys* para amostras com diferente número de camadas e espessura por lâmina.

Tipo de construção	Dimensão da amostra [mm]	Tensão [N/mm ²]
[0] ₈	100 X 15 X 2	985,58
[0] ₁₂	120 X 15 X 3	867,48
[0] ₁₆	160 X 15 X 4	778,09
[0] ₈	100 X 15 X 1,312	1423,8
[0] ₁₂	100 X 15 X 1,968	1353,4
[0] ₁₆	100 X 15 X 2,624	1240,1

Ao analisar a Tabela 11 e cingindo uma simples comparação entre valores de tensão máxima, é possível concluir que a ideia proposta por Huang *et al.* [65] se verifica, na medida em que amostras construídas com lâminas 0,164 mm, isto é, lâmina *standard*, apresentam valores 35% superiores de tensão máxima face a amostras com lâminas 0,250 mm, ou seja, lâmina com elevada espessura.

Porém, é de notar que para amostras com lâminas 0,250 mm foi utilizado o material expresso em [64], e por sua vez para amostras com lâminas 0,164 mm o material é HS 160 REM.

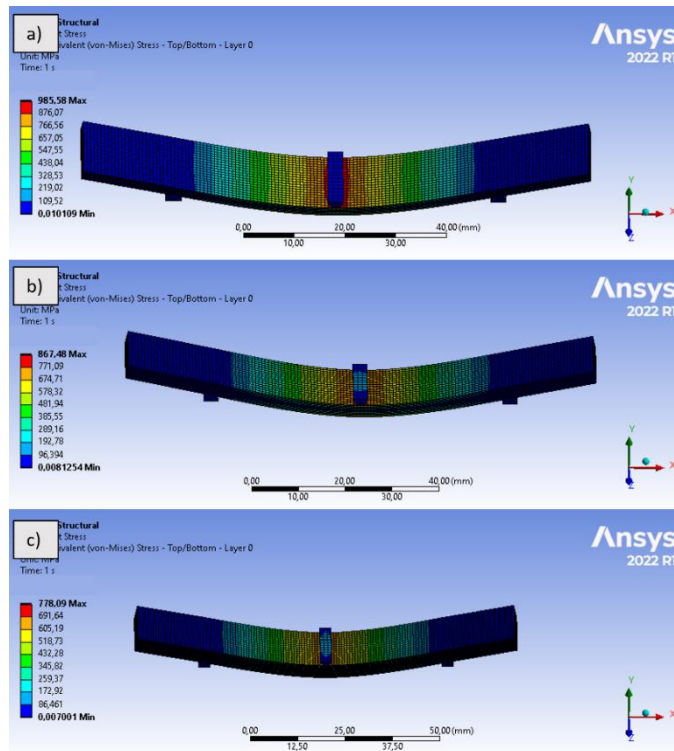


Figura 78: Resultados de tensão máxima obtidos no *Ansys* para amostras cuja espessura por lâmina é de 0,250 mm. a) tipologia de construção [0]_s, b) tipologia de construção [0]₁₂ e c) tipologia de construção [0]₁₆.

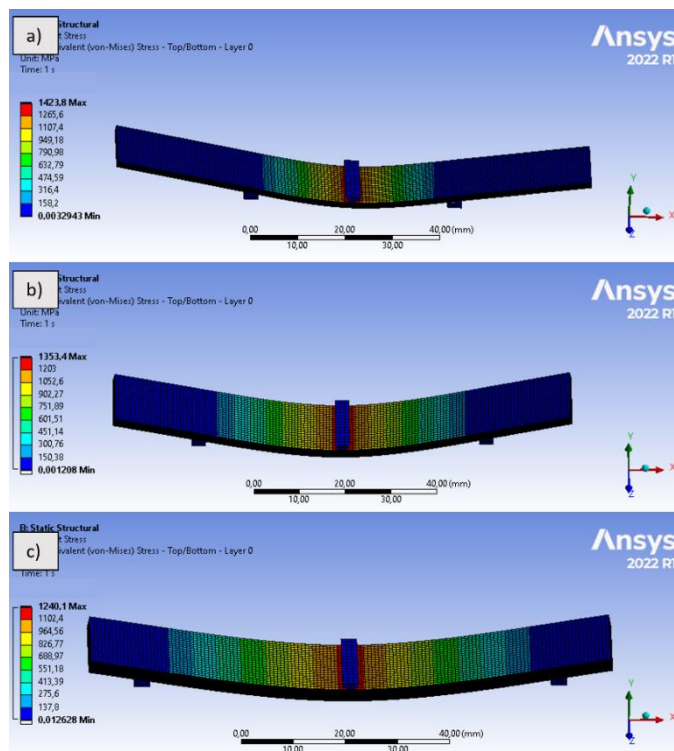


Figura 79: Resultados de tensão máxima obtidos no *Ansys* para amostras cuja espessura por lâmina é de 0,164 mm. a) tipologia de construção [0]_s, b) tipologia de construção [0]₁₂ e c) tipologia de construção [0]₁₆.

A importância da geometria do laminado

Por fim, e no que toca ao efeito da geometria no comportamento final do laminado, alguns estudos [66, 67] apresentam o seu ponto de vista no assunto.

De acordo com Pemberton *et al.* [67] as normas *standards* permitem à indústria obter dados fiáveis e precisos em testes mecânicos. No entanto, os projetistas podem procurar fontes alternativas para obter as propriedades dos materiais, incluindo a utilização de valores presumidos ou teóricos [67]. Assim, alterações em termos de geometria devem ser tidas especialmente em conta quando o teste mecânico tem como intuito medir propriedades mecânicas. Igualmente, em [66] são consideradas várias geometrias para estudar o valor do módulo de flexão, sendo que as conclusões se baseiam em relações L/h e a sua influência.

Assim, na Tabela 12, utilizando amostras com lâminas de 0,250 mm encontram-se comparadas duas geometrias. De notar que o material utilizado apresenta as suas propriedades em [64].

Tabela 12: Resultados de tensão máxima obtidos no *Ansys* para amostras com diferente geometria.

Tipo de construção	Dimensão da amostra [mm]	Tensão [N/mm ²]
[0] ₈	100 X 15 X 2	985,58
[0] ₁₂	120 X 15 X 3	867,48
[0] ₁₆	160 X 15 X 4	778,09
[0] ₈	85 X 13 X 2	840,4
[0] ₁₂	120 X 13 X 3	773,6
[0] ₁₆	160 X 13 X 4	666,6

Analisando a Tabela 12 é possível concluir que a diferença nos valores de tensão máxima não é substancial, sendo em média 14%. Portanto, o efeito da geometria não apresenta variações consideráveis em termos de valores de tensão máxima. Inclusive, estabelecendo um paralelismo com a Tabela 11, alterações em termos de espessura da lâmina apresentam disparidades 60% superiores face a alterações somente na largura e comprimento.

A influência da dimensão do defeito

Até ao momento foram abordadas várias possíveis alterações no que concerne a amostra final. Porém, alterações em termos da dimensão do defeito também transpõem alterações na amostra quando esta é subjugada a um teste de flexão em três pontos.

O estudo proposto por Wisnom [68], defende que quanto maior o tamanho do defeito maior será a sua influência na amostra. Por conseguinte, na Figura 80 estão representadas duas curvas, uma é alusiva à construção unidirecional e a outra à construção cruzada, onde o propósito passa pelo

estudo da influência do tamanho do defeito no comportamento final da amostra quando esta é sujeita a um teste de flexão em três pontos.

Para tal, foram considerados defeitos com 2 mm, 15 mm e 20 mm de comprimento, sendo também tidos em conta os valores previamente estudados para defeitos de 5 mm e 10 mm.

Ao analisar a Figura 80 é facilmente comprovada a teoria proposta por Wisnom. Contudo, para a construção cruzada verifica-se um crescimento exponencial no que toca à influência da dimensão do defeito no comportamento final da amostra, sendo detetadas diferenças na ordem dos 61% entre defeitos de 10 mm e 15 mm.

De outro modo, a construção unidirecional apresenta dissemelhanças de valores na ordem dos 30% para amostras com defeito de 10 mm e 15 mm, sendo demarcada uma alteração pico de 54% entre defeitos de 15 mm e 20 mm.

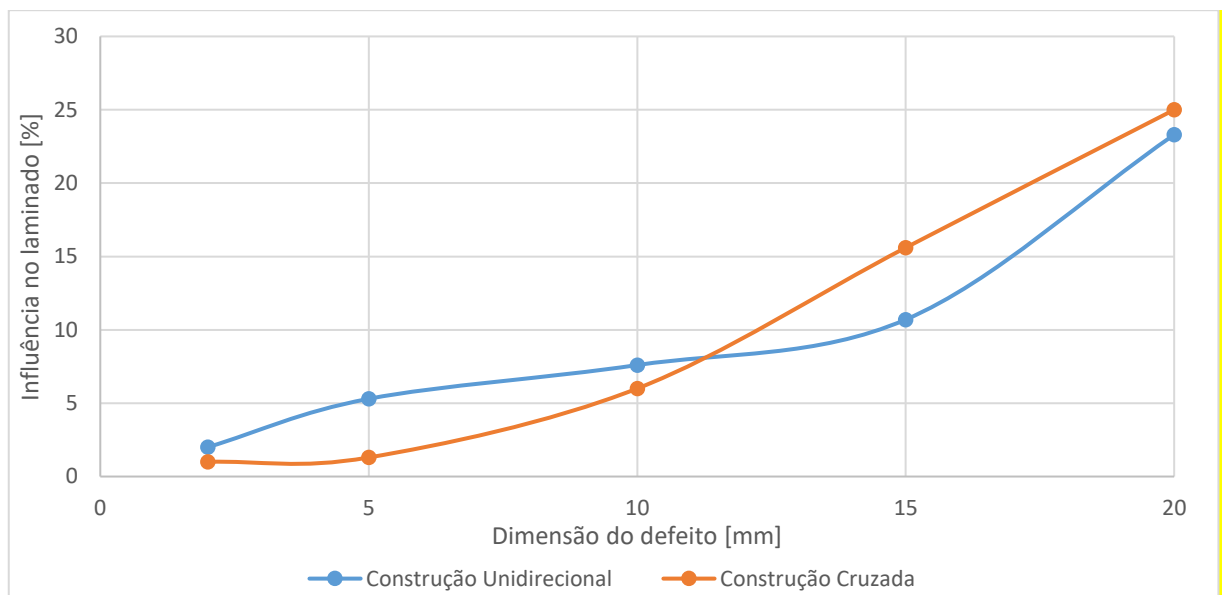


Figura 80: Comparação entre amostras de construção unidirecional e construção cruzada para diferentes dimensões do defeito.

Após a realização de previsões em termos de orientação das fibras, número de lâminas, espessura por lâmina, geometria e dimensão do defeito, é possível, tal como em [63], estabelecer uma sequência de quais os fatores que mais influenciam o desempenho de uma amostra CFRP quando sujeita a um teste mecânico de flexão em três pontos.

Assim, segundo [63, 69-71] o fator que apresenta o maior peso em termos de resultados de tensão máxima é a orientação das fibras. Ao analisar a Tabela 7 é possível constatar que a diferença de valores em estudo é de 53%, ou seja, alterações no que toca à orientação das lâminas podem resultar em grandes disparidades no valor de tensão máxima.

Em seguida, considerando a média de valores para construção unidirecional e cruzada, alterações na dimensão do defeito registam alterações na ordem dos 45%. Por sua vez, variações no que toca à espessura final da amostra ou na espessura da lâmina, apresentam alterações na ordem dos 20%

a 30%. Alguns autores [70] apresentam resultados favoráveis na utilização de amostras com menos lâminas. Porém, nesta secção, alterações na espessura final apresenta variações de 21%. No entanto, uma comparação direta entre a amostra $[0]_8$ com lâminas de 0,250 mm e 0,164 mm, presente na Tabela 11, apresenta alterações na ordem dos 30%. Por fim, ao comparar diretamente a amostra $[0]_8$ com duas geometrias, como apresentado na Tabela 12, são expostas dissemelhanças na ordem dos 14%.

Por conseguinte, e de acordo com [63, 69-71] e as previsões realizadas no *Ansys*, os fatores que se revelam mais importantes no desempenho de uma amostra sujeita a um teste mecânico de flexão em três pontos são, por ordem decrescente: orientação das fibras, dimensão do defeito, espessura por lâmina/espessura final da amostra e geometria do laminado.

Capítulo 6

Conclusão

O sexto capítulo desta dissertação tem como objetivo a apresentação das considerações finais deste trabalho, e em seguida a enumeração de algumas sugestões para trabalhos no futuro.

6.1 Considerações Finais

A utilização de laminados CFRP é algo bastante cobiçado na atualidade devido às suas excelentes propriedades mecânicas. No entanto, devido a defeitos de fabrico, solicitações extremas ou simplesmente a necessidade de incorporar sistemas de sensores, a existência de defeitos, em particular delaminações são frequentes e podem comprometer a resposta mecânica da estrutura. Assim, o principal objetivo desta dissertação passa pelo estudo da resposta mecânica de laminados CFRP com defeito e sem defeito, após a aplicação de um carregamento quasi-estático. A implementação de um defeito passa pela inserção de um filme em Teflon na construção do laminado, este apresenta diferentes dimensões e é aplicado em diferentes zonas do laminado.

Deste modo, foram fabricadas amostras e foi desenvolvido um modelo digital representativo de amostras com duas tipologias de construção, unidirecional $[0_{10}]$ e cruzada $[0_2/90_2/0_2/90_2/0_2]$.

Os resultados obtidos numericamente foram validados com os resultados experimentais, e é possível concluir que para a construção unidirecional a presença de um filme de Teflon no laminado CFRP irá comprometer o desempenho da amostra no teste mecânico em 5,50%. Sendo que para a construção cruzada, o valor é de 5,75%.

A validação do modelo numérico permitiu o desenvolvimento de previsões de resultados para laminados CFRP sob teste de flexão em três pontos. Para tal, foram consideradas alterações a nível da orientação das lâminas, variação no número total de camadas constituintes do laminado, modificações na espessura da lâmina, alterações na geometria do laminado e por fim, variação na dimensão do defeito.

Ao comparar os resultados obtidos com a literatura foi possível compreender quais das alterações feitas tem mais impacto no desempenho do laminado, quando este é submetido a um teste mecânico de flexão em três pontos.

6.2 Trabalhos Futuros

Ao longo deste estudo, foram encontrados vários desafios e limites, que afetaram tanto os aspetos experimentais como numéricos da investigação. Com base no conhecimento adquirido através da revisão da literatura, atividade experimental e análise numérica, apresentam-se as reais perspectivas de investigação e exploração, que podem fazer avançar a compreensão dos defeitos nos materiais compósitos:

- Testar experimentalmente amostras com outras orientações de lâminas.

- Estudar, experimentalmente e numericamente, o efeito de um defeito com outra geometria, nomeadamente um defeito circular.
- Realizar uma vasta caracterização com ensaios mecânicos representativos dos esforços que os compósitos laminados estão sujeitos, nomeadamente, experimentalmente e numericamente testes de compressão, tração, fadiga, impacto, viscoelasticidade e/ou fluência.
- Realização de um estudo mais detalhado do modo de ruína final das amostras, recorrendo a técnicas de caracterização não destrutivas, como ultrassons, corrente induzida e/ou tomografia computacional 3D.
- Realização de uma modelo numérico mais profundo, envolvendo elementos coesivos.

Referências Bibliográficas

- [1] Ashby, M. F. (2016). *Materials Selection in Mechanical Design* (pp.100-200), vol 5. Elsevier Science.
- [2] Bhadane, G. S., & Patil, S. B. (2023). Mathematical modeling of multilayered composite material to obtain in plane elastic constants. *Materials Today: Proceedings*, 72, 794-801, doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.035.
- [3] Karmakov, S., Cepero-Mejías, F., & Curiel-Sosa, J. L. (2020). Numerical analysis of the delamination in CFRP laminates: VCCT and XFEM assessment. *Composites Part C: Open Access*, 2, doi: 10.1016/j.jcomc.2020.100014.
- [4] Goraj, Z. (2007). Load composite structure in aeronautical engineering. *Prace Instytutu Lotnictwa*, (4 (191), 13-32.
- [5] Zimmermann, N., & Wang, P. H. (2020). A review of failure modes and fracture analysis of aircraft composite materials. *Engineering failure analysis*, 115, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104692.
- [6] Mangalgi, P. D. (1999). Composite materials for aerospace applications. *Bulletin of Materials Science*, 22, 657-664.
- [7] Soutis, C. (2020). Aerospace engineering requirements in building with composites. In *Polymer composites in the aerospace industry* (pp. 3-22). Woodhead Publishing.
- [8] Wang, Y. H., Wang, Y. Y., Hou, C., Zhou, X. H., Deng, R., Lan, Y. S., ... & Kong, W. B. (2020). Combined compression-bending-torsion behaviour of CFST columns confined by CFRP for marine structures. *Composite Structures*, 242, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112181.
- [9] Kimpara, I. (1991). Use of advanced composite materials in marine vehicles. *Marine structures*, 4(2), 117-127, doi: 10.1016/0951-8339(91)90016-5.
- [10] Fragassa, C., Pavlovic, A., & Minak, G. (2020). On the structural behaviour of a CFRP safety cage in a solar powered electric vehicle. *Composite structures*, 252, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112698.
- [11] Jiang, J., Zhang, Z., Fu, J., Ramakrishnan, K. R., Wang, C., & Wang, H. (2022). Impact damage behavior of lightweight CFRP protection suspender on railway vehicles. *Materials & Design*, 213, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110332.
- [12] Collavino, L., & Eng, P. (2002). Design-Construction of Bridge Street Bridge—First CFRP Bridge in the United States. *Structure*, 21.
- [13] Vijayan, D. S., Sivasuriyan, A., Devarajan, P., Stefańska, A., Wodzyński, Ł., & Koda, E. (2023). Carbon Fibre-Reinforced Polymer (CFRP) Composites in Civil Engineering Application—A Comprehensive Review. *Buildings*, 13(6), 1509.
- [14] Ramakrishnan, M., Rajan, G., Semenova, Y., & Farrell, G. (2016). Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials. *Sensors*, doi: 10.3390/s16010099.

- [15] Miluski, P., Kochanowicz, M., Zmojda, J., Silva, A. P., Reis, P. N. B., Ragin, T., & Dorosz, D. (2019). UV sensing optode for composite materials environment monitoring. *Science and Engineering of Composite Materials*, 26(1), 240-243, doi: 10.1515/secm-2019-0008.
- [16] Silva, J. M., Devezas, T. C., Silva, A. P., & Ferreira, J. A. (2005). Mechanical characterization of composites with embedded optical fibers. *Journal of composite materials*, 39(14), 1261-1281, doi: 10.1177/0021998305050423.
- [17] Huang, C. Y., Trask, R. S., & Bond, I. P. (2010). Characterization and analysis of carbon fibre-reinforced polymer composite laminates with embedded circular vasculature. *Journal of the royal society Interface*, 7(49), 1229-1241, doi: 10.1098/rsif.2009.0534.
- [18] Calvo, J. V., Feito, N., Miguélez, M. H., & Giner, E. (2022). Modeling the delamination failure under compressive loads in CFRP laminates based on digital image correlation analysis. *Composite Structures*, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115265.
- [19] Pagano, N. J., & Schoeppner, G. A. (2000). Delamination of polymer matrix composites: problems and assessment, *Comprehensive composite materials*.
- [20] Campilho, R. D. S. G. (2005). Modelação da execução de reparações em materiais compósitos (Master's dissertation, Mechanical Engineering, Instituto Superior de Engenharia do Porto).
- [21] Coelho, B. M. A. (2020). *Deteção de defeitos em materiais compósitos usando tecnologia de ultrassons* (Master's dissertation, Polymer Engineering, Universidade do Minho).
- [22] Mula, S. N. (2020). *Estudo sobre falha e fadiga em materiais compósitos laminados* (Master's dissertation, Mechanical Engineering, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa).
- [23] Cepero, F., García, I. G., Justo, J., Mantič, V., & París, F. (2019). An experimental study of the translaminar fracture toughnesses in composites for different crack growth directions, parallel and transverse to the fiber direction. *Composites Science and Technology*, 181, doi: 10.1016/j.compscitech.2019.107679.
- [24] Ullah, H., Harland, A. R., Lucas, T., Price, D., & Silberschmidt, V. V. (2012). Finite-element modelling of bending of CFRP laminates: Multiple delaminations. *Computational Materials Science*, 52(1), 147-156, doi: 10.1016/j.commatsci.2011.02.005.
- [25] Ekuase, O. A., Anjum, N., Eze, V. O., & Okoli, O. I. (2022). A Review on the Out-of-Autoclave Process for Composite Manufacturing. *Journal of Composites Science*, 6(6), doi: 10.3390/jcs6060172.
- [26] Angelopoulos, N. (2017). *Damage detection and damage evolution monitoring of composite materials for naval applications using acoustic emission testing* (Doctoral dissertation, Materials Engineering, University of Birmingham).
- [27] Morokov, E., Levin, V., Ryzhova, T., Dubovikov, E., Petronyuk, Y., & Gulevsky, I. (2022). Bending damage evolution from micro to macro level in CFRP laminates studied by high-frequency acoustic microscopy and acoustic emission. *Composite Structures*, 288, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115427.

- [28] Ashir, M., Nocke, A., & Cherif, C. (2019). Effect of the position of defined local defect on the mechanical performance of carbon-fiber-reinforced plastics. *Autex Research Journal*, 19(1), 74-79, doi: 10.1515/aut-2018-0034.
- [29] Mortell, D. J., Tanner, D. A., & McCarthy, C. T. (2016). An experimental investigation into multi-scale damage progression in laminated composites in bending. *Composite structures*, 149, 33-40, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.03.054.
- [30] Daniel, I. (1978). Failure mechanisms in fiber-reinforced composites.
- [31] Reifsnider, K. L., Case, S.W. (2012). *Fatigue of composite materials*. (pp. 410-435), Elsevier.
- [32] David Müzel, S., Bonhin, E. P., Guimarães, N. M., & Guidi, E. S. (2020). Application of the finite element method in the analysis of composite materials: A review. *Polymers*, doi: doi.org/10.3390/polym12040818.
- [33] Melro, A. R. D. O. S. S. (2011). Analytical and numerical modelling of damage and fracture of advanced composites (Doctoral dissertation, Mechanical Engineering, Universidade do Porto).
- [34] Neves, V. L. V. (2009). Comportamento mecânico de compósitos com aplicações navais (Master's dissertation, Mechanical Engineering, Universidade de Aveiro).
- [35] Sideridis, E., & Papadopoulos, G. A. (2004). Short-beam and three-point-bending tests for the study of shear and flexural properties in unidirectional-fiber-reinforced epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 93(1), 63-74, doi: 10.1002/app.20382.
- [36] Theotokoglou, E. E., & Sideridis, E. P. (2017). Study of unidirectional fiber reinforced epoxy composites in short-beam bending test. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36(24), 1781-1789, doi: 10.1177/0731684417725807.
- [37] Mujika, F. (2006). On the difference between flexural moduli obtained by three-point and four-point bending tests. *Polymer testing*, 25(2), 214-220, doi: 10.1016/j.polymertesting.2005.10.006.
- [38] Wan, L., Sheng, Y., McCarthy, E. D., & Yang, D. (2023). A novel approach for 3D discrete element modelling the progressive delamination in unidirectional CFRP composites. *Engineering Fracture Mechanics*, doi: 10.1016/j.engfracmech.2022.108982.
- [39] Borg, R., Nilsson, L., & Simonsson, K. (2001). Simulation of delamination in fiber composites with a discrete cohesive failure model. *Composites Science and Technology*, 61(5), 667-677, doi: 10.1016/S0266-3538(00)00245-1.
- [40] Yang, Y., Liu, X., Wang, Y. Q., Gao, H., Li, R., & Bao, Y. (2017). A progressive damage model for predicting damage evolution of laminated composites subjected to three-point bending. *Composites Science and Technology*, 151, 85-93, doi: 10.1016/j.compscitech.2017.08.009.
- [41] Monte, S. M., Infante, V., Moleiro, F., & Madeira, J. F. A. (2015). DEFORMATION PREDICTION OF COMPOSITE SPECIMENS SUBJECTED TO THREE-POINT BENDING TESTS. In the 10th International Conference on composite science and technology.

- [42] Panella, F. W., & Pirinu, A. (2021). Fatigue and damage analysis on aeronautical CFRP elements under tension and bending loads: Two cases of study. *International Journal of Fatigue*, *152*, 106403.
- [43] Bellahkim, M., Ouezzan, A., Benbouras, Y., Maziri, A., Mallil, E., & Echaabi, J. (2022). 3D finite element analysis of laminated composites under three-point bending. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1244, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.
- [44] Choi, K., Hwang, G., & Cho, J. (2017). A comparative analysis on fracture behaviors of 3-point bending specimens made of CFRP and metal. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, *18*, 197-202, doi: 10.1007/s12541-017-0025-4.
- [45] Seifoori, S., Mirzaei, M., & Afjoland, H. (2020). Experimental and FE analysis for accurate measurement of deflection in CFRP and GFRP laminates under bending. *Measurement*, doi: 10.1016/j.measurement.2019.107445.
- [46] Rebelco, Mechanical Properties of prepreg laminates. Accessed: 13/04/2023. [Online]. Available: <http://www.rebelco.pt/preIMP.html>
- [47] “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials” (2003).
- [48] Moreno, M. S., Gutierrez, A. R., & Vicente, J. M. (2016). Flexural testing on carbon fibre laminates taking into account their different behaviour under tension and compression. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 139, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.
- [49] Yang, T., He, M. H., Niu, X. J., & Du, Y. (2017). Experimental investigation of the three-point bending fatigue properties of carbon fiber composite laminates. *Advances in Material Science*, doi: 10.26789/AMS.2017.01.003.
- [50] Lee, M. S., Seo, H. Y., & Kang, C. G. (2016). Comparative study on mechanical properties of CR340/CFRP composites through three point bending test by using theoretical and experimental methods. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, *3*, 359-365, doi: 10.1007/s40684-016-0045-z.
- [51] Morioka, K., & Tomita, Y. (2000). Effect of lay-up sequences on mechanical properties and fracture behavior of CFRP laminate composites. *Materials Characterization*, *45*(2), 125-136, doi: 10.1016/S1044-5803(00)00065-6.
- [52] Shen, B., Liu, H., Lv, S., Li, Z., & Cheng, W. (2022). Progressive Failure Analysis of Laminated CFRP Composites under Three-Point Bending Load. *Advances in Materials Science and Engineering*, doi: 10.1155/2022/3047319.
- [53] Luo, N., Xiao, S., Wang, Z., & Liu, B. (2022). Influence of inclusion defects on bending properties and failure modes of composites. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2285, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.
- [54] Amaro, A. M., Reis, P. N. B., & De Moura, M. F. S. F. (2011). Delamination effect on bending behaviour in carbon–epoxy composites. *Strain*, *47*(2), 203-208, doi: 10.1111/j.1475-1305.2008.00520.x.

- [55] Senthil, K., Arockiarajan, A., Palaninathan, R., Santhosh, B., & Usha, K. M. (2013). Defects in composite structures: Its effects and prediction methods—A comprehensive review. *Composite Structures*, *106*, 139-149, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.06.008
- [56] Bower, A. F. (2012). *Applied mechanics of solids*. (Capítulo 2 - 4), CRC Press.
- [57] Amaro, A. M., Reis, P. N. B., Magalhães, A. G., & De Moura, M. F. S. F. (2011). The influence of the boundary conditions on low-velocity impact composite damage. *Strain*, *47*, e220-e226, doi: 10.1111/j.1475-1305.2008.00534.x.
- [58] Nunes, L. C. S. (2011). Mechanical characterization of polytetrafluoroethylene polymer using full-field displacement method. *Optics and Lasers in Engineering*, *49*(5), 640-646, doi: 10.1016/j.optlaseng.2011.01.011.
- [59] Figueiredo, I. M. P. (2016). Previsão do Comportamento Mecânico e Otimização de Placas em Material Compósito Híbrido (Master's dissertation, Aerospace Engineering, Técnico de Lisboa).
- [60] Caminero, M. A., Rodríguez, G. P., & Muñoz, V. (2016). Effect of stacking sequence on Charpy impact and flexural damage behavior of composite laminates. *Composite Structures*, *136*, 345-357, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.10.019.
- [61] Azzam, A., & Li, W. (2014, August). An experimental investigation on the three-point bending behavior of composite laminate. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 62, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.
- [62] Jepleting, F. M., & David-West, O. (2022). Study of the Effect of Stacking Sequence on the Bending Resistance of Composites using Finite Element Analysis. *PROCEEDINGS OF ABSTRACTS SCHOOL OF PHYSICS, ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE*, 102.
- [63] Rahmani, H., Najafi, S. H. M., & Ashori, A. (2014). Mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminated composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *33*(8), 733-740, doi: 10.1177/07316844135182.
- [64] Caminero, M. A., Rodríguez, G. P., Chacón, J. M., & García-Moreno, I. (2019). Tensile and flexural damage response of symmetric angle-ply carbon fiber-reinforced epoxy laminates: non-linear response and effects of thickness and ply-stacking sequence. *Polymer Composites*, *40*(9), 3678-3690, doi: 10.1002/pc.25230.
- [65] Huang, C., He, M., He, Y., Xiao, J., Zhang, J., Ju, S., & Jiang, D. (2018). Exploration relation between interlaminar shear properties of thin-ply laminates under short-beam bending and meso-structures. *Journal of Composite Materials*, *52*(17), 2375-2386, doi: 10.1177/0021998317745586.
- [66] Kumar, M. P., & Murthy, V. B. (2012). Effect of specimen dimensions on flexural modulus in a 3-point bending test. *International Journal of Engineering Research & Technology*, *1*(8), 1-6.
- [67] Pemberton, R., Crocker, L., Poole, M., Shaw, R., & Gower, M. (2021). Comparison of Specimen Geometries for Measuring Through-Thickness Tensile Mechanical Properties of Fibre-Reinforced Polymer Composites. *Journal of Composites Science*, *5*(3), 84.
- [68] Wisnom, M. R. (1999). Size effects in the testing of fibre-composite materials. *Composites Science and Technology*, *59*(13), 1937-1957.

- [69] Ogunleye, R. O., Rusnakova, S., Zaludek, M., & Emebu, S. (2022). The influence of ply stacking sequence on mechanical properties of carbon/epoxy composite laminates. *Polymers*, 14(24), 5566.
- [70] Subhedar, K. M., Chauhan, G. S., Singh, B. P., & Dhakate, S. R. (2021). Effect of fibre orientation on mechanical properties of carbon fibre composites. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS)*, 27(6), 1100-1103.
- [71] Meng, M., Le, H. R., Rizvi, M. J., & Grove, S. M. (2015). 3D FEA modelling of laminated composites in bending and their failure mechanisms. *Composite Structures*, 119, 693-708, doi: 10.1016/j.compstruct.2014.09.048.