



BEATRIZ VOGADO ATAÍDE

Licenciada em Ciências da Engenharia Mecânica

**ESTUDO DA LIGAÇÃO COLADA
ENTRE PAINÉIS COMPÓSITOS PARA
A CONSTRUÇÃO DE CASCOS DE
EMBARCAÇÕES**

ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Novembro, 2021



ESTUDO DA LIGAÇÃO COLADA ENTRE PAINÉIS COMPÓSITOS PARA A CONSTRUÇÃO DE CASCOS DE EMBARCAÇÕES

BEATRIZ VOGADO ATAÍDE

Licenciada em Ciências da Engenharia Mecânica

Orientador: João Mário Burguete Botelho Cardoso
Professor Auxiliar, NOVA School of Science and Technology, UNIDEMI

Coorientador: Sérgio Ribeiro e Silva
Professor Auxiliar, Instituto Superior Técnico, CENTEC

Júri:

Presidente: Pedro Samuel Gonçalves Coelho
Professor Auxiliar, NOVA School of Science and Technology, UNIDEMI

Arguente: Marta Isabel Pimenta Verdete da Silva Carvalho
Professora Auxiliar, NOVA School of Science and Technology, UNIDEMI

Orientador: João Mário Burguete Botelho Cardoso
Professor Auxiliar, NOVA School of Science and Technology, UNIDEMI

Estudo da Ligação Colada entre Painéis Compósitos para a Construção de Cascos de Embarcações

Copyright © Beatriz Vogado Ataíde, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha família

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador, o professor Doutor João Burguete Cardoso, por estar sempre disponível para me ajudar, apoiar e guiar durante todos estes meses, por todo o entusiasmo e confiança que me transmitiu ao longo de todo o trabalho que foi desenvolvido e por tudo o que me ensinou ao longo destes cinco anos de curso.

Agradeço ao meu coorientador, o professor Doutor Sérgio Ribeiro e Silva, por me ter introduzido aos conceitos de engenharia naval necessários para a elaboração desta dissertação e por ter estado sempre disponível para me ajudar.

Quero ainda agradecer à Nautiber, e em particular ao engenheiro Tiago Cristo, por se terem mostrado sempre disponíveis para fornecer o material necessário à elaboração da componente experimental desta dissertação e para darem o seu parecer acerca dos resultados obtidos.

A todos os colegas mais velhos que me receberam de braços abertos, me integraram neste curso e me deram a conhecer o grande espírito académico desta faculdade deixo o meu obrigado. Agradeço também a todos os meus amigos que me acompanharam durante os últimos cinco anos, nos melhores e nos piores momentos, que me apoiaram e que eu apoiei, que festejaram e estudaram comigo e que estiveram sempre do meu lado. Todos eles tornaram estes anos melhores e especiais, nomeadamente aqueles que considero mais próximos.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer à minha família por ter acreditado sempre em mim e por me ter apoiado sempre, e em especial aos meus pais, por todos os sacrifícios que fizeram e toda a ajuda que sempre me deram, sem eles nada disto tinha sido possível.

RESUMO

Os materiais compósitos são cada vez mais utilizados na indústria da construção naval, sendo necessário um estudo mais intensivo das suas características mecânicas, de forma a ser possível prever o seu comportamento estrutural quando sujeitos a diferentes carregamentos. É também cada vez mais comum a realização de ligações coladas entre diversos componentes em detrimento de outros métodos de ligação. Contudo, existe a necessidade de caracterizar estas ligações e perceber se as mesmas são tão seguras como os métodos tradicionalmente utilizados.

No decorrer desta dissertação foi realizado um estudo de laminados, onde foram realizados ensaios experimentais e construídos modelos numéricos à meso-escala dos provetes ensaiados, utilizando critérios de falha, de forma a compreender se é possível prever o comportamento destes materiais através de modelação numérica. Foram ainda desenvolvidos modelos numéricos de ligações coladas, através dos quais se procurou caracterizar e prever o comportamento estrutural ou as características mecânicas das mesmas.

Os modelos numéricos de elementos finitos dos laminados foram capazes de prever a falha destes materiais com pequenas diferenças relativamente aos resultados experimentais. Os modelos da ligação colada demonstraram que a modelação numérica é uma ferramenta útil na avaliação e caracterização destas ligações. Foi construída uma superfície de resposta que demonstra a variação da resistência mecânica da ligação em função da variação do volume do adesivo utilizado, sendo possível encontrar a geometria ótima para a ligação a efetuar.

Palavras-chave: materiais compósitos, laminados, modelos numéricos, ligações coladas

ABSTRACT

Composite materials are increasingly used in the shipbuilding industry, requiring a more intensive study of their mechanical characteristics, in order to be possible to predict their structural behavior when subjected to different loads. Adhesive bonding between various components is also increasingly common at the expense of other connection methods. However, it is necessary to characterize these types of connections and understand if they are as secure as the traditionally used methods.

In the course of this dissertation a study of laminates was carried out, where experimental tests were performed and mesoscale numerical models of the tested specimens were built, using failure criteria, in order to understand whether it is possible to predict the behavior of these materials through numerical modeling. Numerical models of adhesive joints were also developed, with the purpose of characterize and predict their structural behavior or mechanical characteristics.

The finite element method numerical models of the laminates were able to predict the failure of these materials with small differences compared to experimental results. The adhesive joint models demonstrated that numerical modeling is a useful tool in the evaluation and characterization of these connections. A response surface was built that demonstrates the variation in the mechanical strength of the bond as a function of the variation in the volume of the adhesive used, making it possible to find the optimal geometry for the bond to be made.

Keywords: composite materials, laminates, numerical models, adhesive bonding

ÍNDICE

Índice de Figuras	xix
Índice de Tabelas	xxiii
Siglas e Acrónimos	xxv
Símbolos	xxvii
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Enquadramento	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 Enquadramento Teórico	5
2.1 Materiais Compósitos	5
2.1.1 Matriz	6
2.1.2 Fibras	6
2.1.3 Tecidos	7
2.1.4 Laminados	7
2.2 Falha de Materiais Compósitos	9
2.2.1 Resistência da Lâmina	9
2.2.2 Modos de Falha	10
2.2.3 Critérios de Falha	12
2.3 Modos de Fratura	15
2.4 Delaminação	16
2.5 Modelos Numéricos	16
2.5.1 Modelos à Micro-escala	17
2.5.2 Modelos à Meso-escala	18
2.5.3 Modelos à Macro-escala	19

2.6	Elementos Coesivos	19
2.7	Ligações Coladas	21
3	Estudo dos Laminados	23
3.1	Materiais Utilizados	23
3.1.1	Fibra de Vidro e Resina de Poliéster	23
3.2	Ensaio Experimental das Lâminas de MAT 450 e de WRM 800/450	24
3.2.1	Resultados	27
3.3	Ensaio Experimental dos Laminados	32
3.3.1	Ensaio dos Provetes com a Sequência A	33
3.3.2	Ensaio dos Provetes com a Sequência B	35
3.4	Modelos Numéricos das Lâminas de MAT 450 e WRM 800/450	37
3.5	Modelos Numéricos dos Laminados	42
3.6	Comparação de Resultados e Conclusões	45
3.6.1	Resultados Obtidos para as Lâminas de Compósito	45
3.6.2	Resultados Obtidos para os Laminados	49
4	Estudo de Ligações Coladas	53
4.1	Materiais Utilizados	53
4.1.1	Adesivo Crestomer	53
4.2	Modelo da Ligação Colada com o Adesivo Crestomer	54
4.2.1	Modelo em 2D	54
4.2.2	Definição da Geometria do Modelo da Ligação Colada	59
4.2.3	Modelo Simples da Ligação Colada em H	64
4.2.4	Modelo Complexo da Ligação Colada em H	69
5	Conclusão	73
5.1	Trabalhos Futuros	74
	Referências Bibliográficas	77
	Apêndices	
A	Resultados dos Ensaio Experimentais das Lâminas	81
A.1	MAT 450	81
A.2	WRM 800/450	82
B	Resultados dos Ensaio Experimentais do Laminado com a Sequência de Empilhamento B	85
C	Gráficos de Comparação de Resultados Numéricos e Experimentais para as Lâminas	87
C.1	MAT 450 T	87

C.2 WRM 800/450 T	88
D Gráficos de Comparação de Resultados Numéricos e Experimentais para os Laminados	91
E Resultados dos Modelos em H	93
Anexos	
I Resultados dos Ensaios da <i>Bureau Veritas</i> - Sequência A	95
II Resultados Obtidos no Artigo [36]	97

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Exemplo de um casco de uma embarcação	2
2.1	Formas do material de reforço	6
2.2	Alguns tipos de tecidos [6]	7
2.3	Referencial local de uma lâmina	8
2.4	Planos de fratura e correspondentes estados de tensão [8]	10
2.5	(a) Esquema de microencurvadura das fibras; (b) Esquema de uma banda de deslizamento; (c) Banda de deslizamento real. [9]	11
2.6	Modos de fratura [2]	16
2.7	Representação de modelos em três escalas [17]	17
2.8	Volume elementar representativo ou célula unitária de um compósito [19] .	18
2.9	Representação de um elemento coesivo	20
2.10	Modelo bilinear [2]	20
2.11	Esquema dos modos de falha de ligações coladas	21
3.1	Tecidos que constituem os dois tipos de provetes	24
3.2	Montagem experimental	27
3.3	Gráficos Tensão - Extensão obtidos nos ensaios experimentais de MAT 450 L	28
3.4	Gráficos Tensão - Extensão obtidos nos ensaios experimentais de MAT 450 T	29
3.5	Fratura dos provetes	30
3.6	Gráficos Tensão - Extensão obtidos nos ensaios experimentais de WRM 800/450 L	31
3.7	Gráficos Tensão - Extensão obtidos nos ensaios experimentais de WRM 800/450 T	31
3.8	Fratura dos provetes	32
3.9	Sequência de empilhamento A	33
3.10	Gráficos Tensão - Extensão obtidos nos ensaios experimentais da Sequência A-L	34

3.11 Gráficos Tensão - Extensão obtidos nos ensaios experimentais da Sequência A-T	34
3.12 Sequência de empilhamento B	35
3.13 Gráficos Tensão - Extensão obtidos nos ensaios experimentais da Sequência B-L	36
3.14 Fratura de um provete com sequência de empilhamento B	37
3.15 Modelos numéricos das lâminas	38
3.16 Gráfico de convergência de malha	39
3.17 Representação da malha e das condições de fronteira e carregamento	40
3.18 Gráfico dos resultados obtidos com o critério da Tensão Máxima	41
3.19 Gráfico dos resultados obtidos com o critério LaRC04	41
3.20 Modelos dos laminados com as respectivas sequências de empilhamento	42
3.21 Representação da malha e das condições de fronteira e carregamento	43
3.22 Gráfico dos resultados obtidos com o critério da Tensão Máxima para os laminados	44
3.23 Gráfico dos resultados obtidos com o critério LaRC04 para os laminados	45
3.24 Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério da Tensão Máxima para os provetes de MAT 450 L	46
3.25 Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério LaRC04 para os provetes de MAT 450 L	47
3.26 Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério da Tensão Máxima para os provetes de WRM 800/450 L	47
3.27 Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério LaRC04 para os provetes de WRM 800/450 L	48
3.28 Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério da Tensão Máxima para os provetes do Laminado A - L	50
3.29 Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério LaRC04 para os provetes do Laminado A - L	50
3.30 Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério da Tensão Máxima para os provetes do Laminado B	51
3.31 Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério LaRC04 para os provetes do Laminado B	51
4.1 Gráfico tensão de corte - deslocamento para os vários tempos de cura da resina Crestomer [32]	55
4.2 Representação da tensão de corte no provete contendo a resina Crestomer [32]	55
4.3 Geometria da junta de sobreposição (dimensões em [mm])	56

4.4	Malha utilizada no modelo e localização dos elementos coesivos	57
4.5	Gráfico Tensão - Deslocamento	58
4.6	Representação da tensão de corte no provete e do descolamento entre o adesivo e as placas de compósito	59
4.7	Geometria e montagem experimental dos provetes em T [36]	60
4.8	Geometria da ligação entre a antepara e o casco [34]	61
4.9	Geometrias em T inicialmente consideradas	61
4.10	Geometrias em H inicialmente consideradas	61
4.11	Condições de fronteira e carregamento dos modelos T e H	63
4.12	Dimensões do modelo em H parametrizado (em [mm])	65
4.13	Malha do modelo em H e localização dos elementos coesivos	66
4.14	Condições de fronteira e carregamento do modelo H	67
4.15	Gráfico do rácio força máxima suportada/volume de adesivo em função dos parâmetros "LADO" e "RAIO" (modelo H_D)	68
4.16	Gráfico do rácio força máxima suportada/volume de adesivo em função do parâmetro "LADO" (modelo H_A)	68
4.17	Referenciais definidos	70
C.1	Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério da Tensão Máxima para os provetes de MAT 450 T	87
C.2	Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério LaRC04 para os provetes de MAT 450 T	88
C.3	Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério da Tensão Máxima para os provetes de WRM 800/450 T	88
C.4	Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério LaRC04 para os provetes de WRM 800/450 T	89
D.1	Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério da Tensão Máxima para os provetes do Laminado A - T	91
D.2	Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério LaRC04 para os provetes do Laminado A - T	92
I.1	Resultados dos ensaios da <i>Bureau Veritas</i> [29]	95

ÍNDICE DE TABELAS

3.1	Propriedades mecânicas da fibra de vidro do tipo E [1]	24
3.2	Propriedades mecânicas da resina de poliéster [1]	24
3.3	Resultados dos ensaios de MAT 450	28
3.4	Resultados dos ensaios de WRM 800/450	30
3.5	Resultados dos ensaios dos provetes com a sequência A [29]	33
3.6	Resultados dos ensaios dos provetes com a sequência B	35
3.7	Propriedades do MAT 450 e do WRM 800/450	38
3.8	Resistência das lâminas	39
3.9	Resultados obtidos para os modelos das lâminas	41
3.10	Resultados obtidos para os modelos dos laminados	44
3.11	Comparação dos resultados experimentais com os resultados numéricos obtidos através do critério da Tensão Máxima para os modelos das lâminas	45
3.12	Comparação dos resultados experimentais com os resultados numéricos obtidos através do critério LaRC04 para os modelos das lâminas	46
3.13	Comparação dos resultados experimentais com os resultados numéricos obtidos através do critério da Tensão Máxima para os modelos dos laminados	49
3.14	Comparação dos resultados experimentais com os resultados numéricos obtidos através do critério LaRC04 para os modelos dos laminados	49
3.15	Comparação dos resultados experimentais e numéricos para o Módulo de Young	51
4.1	Propriedades mecânicas do adesivo Crestomer 1186PA [31]	54
4.2	Propriedades do compósito e do adesivo	57
4.3	Propriedades coesivas iniciais do adesivo Crestomer 1186PA	58
4.4	Propriedades coesivas finais do adesivo Crestomer 1186PA	59
4.5	Propriedades das placas de compósito e do adesivo para os modelos T e H	62
4.6	Resultados numéricos dos modelos T	63
4.7	Resultados numéricos dos modelos H	63

ÍNDICE DE TABELAS

A.1	Resultados obtidos sem extensómetro para o MAT 450 L	81
A.2	Resultados do Módulo de Young obtidos com extensómetro para o MAT 450 L	82
A.3	Resultados obtidos sem extensómetro para o MAT 450 T	82
A.4	Resultados do Módulo de Young obtidos com extensómetro para o MAT 450 T	82
A.5	Resultados obtidos sem extensómetro para o WRM 800/450 L	83
A.6	Resultados do Módulo de Young obtidos com extensómetro para o WRM 800/450 L	83
A.7	Resultados obtidos sem extensómetro para o WRM 800/450 T	83
A.8	Resultados do Módulo de Young obtidos com extensómetro para o WRM 800/450 T	84
B.1	Resultados obtidos sem extensómetro para o laminado B	85
B.2	Resultados do Módulo de Young obtidos com extensómetro para o laminado B	86
E.1	Resultados obtidos para o modelo H_D (modelo com raio)	93
E.2	Resultados obtidos para o modelo H_A (modelo sem raio)	94
II.1	Resultados obtidos no artigo [36]	98

SIGLAS E ACRÓNIMOS

CENTEC	Centro de Engenharia e Tecnologia Naval e Oceânica
CLT	<i>Classical Laminate Theory</i>
FSDT	<i>First Order Shear Deformation Theory</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MEF	método dos elementos finitos
PRFV	plástico reforçado a fibra de vidro
RVE	<i>Representative Volume Element</i>
TNT	Tecidos Não Tecidos
UNIDEMI	Research & Development Unit for Mechanical and Industrial Engineering

SÍMBOLOS

A	Área de secção transversal
α	Ângulo de fratura
$\chi(\gamma_{12})$	Energia interna de corte no plano
cp	Coefficiente característico da prensa MTS
D_g	Distância inicial entre garras
ΔD_g	Aumento da distância entre garras
ΔL_0	Aumento do comprimento de referência do extensómetro
E	Módulo de Young
ε	Extensão
ε_r	Extensão de rotura
η	Coefficiente de atrito
F	Força aplicada
G	Módulo de distorção
γ_{12}^u	Extensão de rotura ao corte no plano para um laminado unidirecional
$\gamma_{12 is}^u$	Extensão de rotura ao corte <i>in-situ</i> no plano
K	Declive da fase de carregamento do modelo bilinear
L	Comprimento do provete
L_0	Comprimento de referência do extensómetro
L_g	Comprimento das garras

SÍMBOLOS

ν	Coeficiente de Poisson
φ	Ângulo de desalinhamento das fibras
ψ	Ângulo do plano das bandas de deslizamento
ρ	Massa volúmica
S	Tensão resistente ao corte
σ	Tensão normal
σ_{11}	Tensão na direção longitudinal às fibras
σ_{12}	Tensão de corte puro
σ_{22}	Tensão na direção transversal às fibras
σ_{33}	Tensão na direção perpendicular ao plano da lâmina
σ_{max}	Tensão normal máxima
σ_r	Tensão de rotura
t	Espessura do provete
τ	Tensão de corte
τ_{max}	Tensão de corte máxima
w	Largura do provete
X_C	Tensão resistente à compressão segundo o eixo 1 ou x
X_T	Tensão resistente à tração segundo o eixo 1 ou x
Y_{is}^T	Resistência à tração na direção transversal <i>in-situ</i>
Y_C	Tensão resistente à compressão segundo o eixo 2 ou y
Y_T	Tensão resistente à tração segundo o eixo 2 ou y

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Enquadramento

O setor da construção naval apresenta-se como um setor bastante importante e estratégico para os países que o possuem. O desenvolvimento desta indústria permite melhorar a situação económica do país ou região em questão, pois possibilita a existência de rotas marítimas para comércio nacional e internacional, providencia equipamento para a atividade da pesca, permite o desenvolvimento do turismo em zonas passíveis do uso recreativo de embarcações e tem impacto no crescimento global da região.

Na indústria da construção naval são habitualmente utilizados materiais como o metal, a madeira, o plástico e compostos de fibra de vidro ou fibra de carbono.

A utilização de plástico reforçado a fibra de vidro (PRFV), na construção naval, permite o fabrico de embarcações mais resistentes e leves, face à construção com outros materiais. No entanto, é necessário estudar estes compósitos por forma a ter um melhor conhecimento das suas características e do seu comportamento. Este estudo é habitualmente realizado recorrendo a ensaios experimentais, uma vez que estes materiais têm propriedades muito variadas e comportamentos difíceis de prever. Contudo a modelação numérica apresenta atualmente um bom desenvolvimento na área dos compósitos sendo também uma ferramenta importante no estudo destes materiais.

Através de uma parceria entre o Research & Development Unit for Mechanical and Industrial Engineering (UNIDEMI), o Centro de Engenharia e Tecnologia Naval e Oceânica (CENTEC) e a Nautiber - Estaleiros Navais do Guadiana surgiu o interesse em estudar o comportamento dos laminados utilizados no fabrico de embarcações e também um processo de ligação entre componentes de PRFV, alternativo ao utilizado habitualmente por parte da Nautiber.

Assim sendo, como forma de obter mais informações sobre laminados de fibra de vidro e resina e de conseguir prever corretamente o comportamento deste tipo de material quando sujeito a certas solicitações, procurou-se, na presente dissertação, construir um

modelo numérico baseado em dados experimentais que fosse capaz de prever o comportamento deste material consoante diferentes organizações e sequências de empilhamento.

Esses laminados são utilizados na construção de uma embarcação que é constituída por vários componentes sendo dois deles o casco e as anteparas representados na figura 1.1.

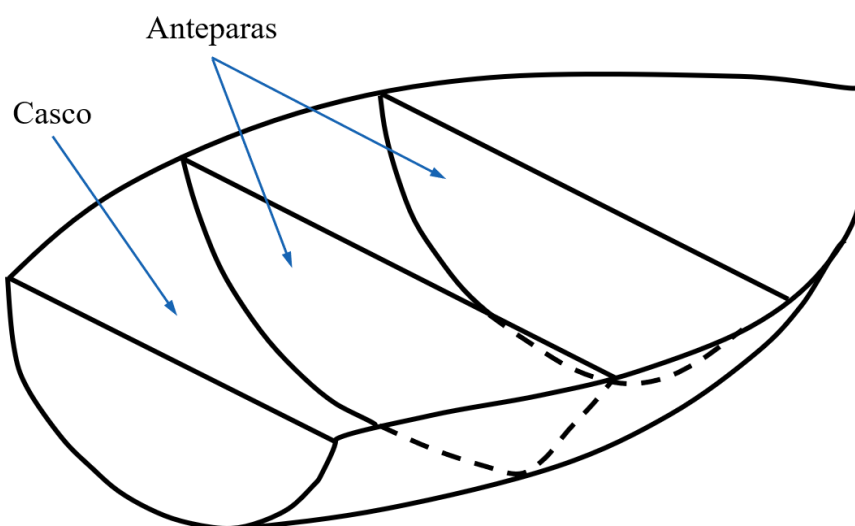


Figura 1.1: Exemplo de um casco de uma embarcação

As anteparas são ligadas ao casco como forma de lhe dar estabilidade estrutural e impedir a possibilidade de alagamentos progressivos em caso de avaria. Estas são habitualmente fixas recorrendo a camadas alternadas de resina e mantas de fibra de vidro, promovendo uma boa ligação entre a antepara e o casco. Contudo, este é um processo bastante moroso uma vez que é realizado manualmente, requerendo bastante mão-de-obra. Para além disso, as anteparas são apenas um dos muitos exemplos de componentes que são fixos ao casco, ou entre si, utilizando esse mesmo processo. Isto faz com que o tempo de produção da embarcação aumente bastante.

Com o objetivo de tornar este processo mais rápido e menos dispendioso, surgiu o projeto de realizar ligações entre painéis perpendiculares entre si recorrendo a um adesivo estrutural. No entanto, não existem dados que garantam que este processo de ligação é tão resistente como o processo descrito anteriormente.

Assim sendo, também na presente dissertação é realizado um estudo, utilizando modelos numéricos, da ligação entre placas de PRFV através de um adesivo estrutural. Uma vez que não se conhece à partida como se comporta esta ligação ou qual é o seu modo de falha, o estudo do comportamento dos laminados através de modelos numéricos de elementos finitos referidos anteriormente é essencial para que o comportamento dos laminados seja o mais fiel à realidade possível, de forma a que os resultados obtidos da análise da ligação sejam fidedignos.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação passa por avaliar a resistência da ligação colada entre painéis perpendiculares entre si. Um objetivo intermédio, que está inserido no objetivo principal, é a construção de modelos numéricos de elementos finitos capazes de simular e prever o comportamento de compósitos de fibra de vidro e resina.

Para conseguir cumprir estes objetivos realizar-se-ão dois grupos de ensaios experimentais. O primeiro grupo de ensaios será realizado com provetes manufacturados com dois tipos de mantas de fibra de vidro e resina e o segundo grupo de ensaios experimentais será realizado com provetes de dois laminados que contêm essas mesmas mantas organizadas em duas sequências de empilhamento distintas, todos fabricados pela Nautiber. Os primeiros ensaios têm como objetivo estudar as propriedades mecânicas destes materiais para que estas possam ser inseridas nos modelos numéricos, de modo a que estes sejam mais precisos e fidedignos. Este é um passo essencial, uma vez que estas propriedades não se encontram disponíveis para consulta e não são fornecidas pelo fabricante. Os segundos ensaios são fundamentais para calibrar e validar os modelos numéricos construídos a partir das propriedades obtidas do primeiro grupo de ensaios.

Com os modelos numéricos pretende-se prever o comportamento de diferentes sequências de empilhamento utilizando esses dois tipos de tecido. Os modelos numéricos serão construídos à meso-escala, utilizando o método dos elementos finitos (MEF), tendo em conta os critérios de falha dos materiais por forma a prever quando e de que modo ocorre a falha dos mesmos. Os modelos numéricos serão elaborados com recurso ao *software* de elementos finitos ANSYS Mechanical APDL. Posteriormente serão comparados os resultados obtidos através do modelo experimental dessas duas sequências com os resultados apresentados pelo modelo numérico e serão retiradas as respetivas conclusões.

Como forma de alcançar o objetivo principal desta dissertação, irá ser elaborado um modelo numérico à macro-escala da ligação colada entre as placas. A construção deste modelo visa determinar a influência dos parâmetros que definem a ligação colada na resistência dessa mesma ligação. Para o efeito irá ser estudada uma relação entre a força máxima suportada e o volume de adesivo utilizado, sendo possível optar pela geometria que apresente a melhor relação.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, cada um com diversas secções. De seguida apresenta-se um resumo do conteúdo de cada um desses capítulos.

No capítulo 1 é apresentada uma introdução ao tema da dissertação, contendo a motivação e o enquadramento que levaram à sua elaboração, quais os objetivos que se pretendem cumprir e a forma como esta está organizada.

No capítulo 2 é feito um enquadramento teórico da dissertação. São abordados vários conceitos como a constituição e organização dos materiais compósitos e os seus modos

e critérios de falha. É ainda realizada uma introdução à modelação numérica e suas características e às ligações coladas.

No capítulo 3 é realizado o estudo das lâminas e dos laminados de PRFV. Aqui são demonstrados os ensaios experimentais realizados com as lâminas, de onde se obtiveram as propriedades mecânicas dos materiais, e com os laminados, os quais têm como objetivo validar os modelos numéricos. De seguida são descritos os modelos numéricos construídos e apresentados os respetivos resultados. Estes resultados são posteriormente comparados com os resultados experimentais e são retiradas algumas conclusões.

No capítulo 4 é apresentado o estudo da ligação colada entre as placas de compósito utilizando um adesivo estrutural. São apresentadas algumas propriedades do adesivo e posteriormente são apresentados os modelos numéricos construídos para a avaliação desta ligação. Para terminar são apresentados os resultados obtidos e as conclusões retiradas relativamente a esta ligação colada.

No capítulo 5 é realizada uma avaliação geral do trabalho desenvolvido na dissertação, onde se apresentam as conclusões retiradas dos diversos resultados obtidos ao longo de todo o trabalho. Além das conclusões são também sugeridos trabalhos que podem ser realizados no futuro.

ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos nos quais assenta esta dissertação. Começa-se por definir o que são materiais compósitos, quais os seus componentes, os seus modos de falha e os critérios de falha que são habitualmente aplicados a este tipo de material. De seguida, é brevemente explicado o fenómeno de delaminação e apresentam-se algumas características relativas à modelação numérica. Para terminar abordam-se brevemente algumas características das ligações coladas.

2.1 Materiais Compósitos

Um material compósito é constituído por dois ou mais materiais e tem propriedades físicas e químicas diferentes das dos materiais que lhe deram origem [1]. O objetivo do fabrico de compósitos é que estes possuam novas propriedades mecânicas e químicas, ou as melhores propriedades de cada um dos materiais que os constituem, e que apresentem capacidades estruturais superiores às de qualquer um desses materiais individualmente.

A produção de um compósito, quando este é bem projetado, pode levar à melhoria de diversas propriedades do material como a resistência mecânica, a resistência à corrosão, a massa específica, o isolamento térmico e/ou elétrico, o tempo de vida à fadiga, entre outros [2].

Quando um compósito é constituído por dois materiais, um deles atua como reforço, habitualmente as fibras, dando resistência ao material, enquanto que o outro atua como matriz, mantendo todo o material coeso e protegendo as fibras do meio ambiente. Num material compósito a combinação desses materiais é feita à escala macroscópica, o que significa que este é um material heterogéneo, sendo possível distinguir facilmente os seus constituintes. Isto é o contrário do que se observa em algumas ligas metálicas, onde os diferentes materiais são combinados a uma escala microscópica, dando origem a um material homogéneo [3].

2.1.1 Matriz

A matriz consiste num material contínuo que garante a união do material de reforço (disperso) devido às suas propriedades coesivas e adesivas. Estas propriedades permitem à matriz transferir, de forma eficaz, a carga aplicada por entre todas as fibras. Dado este facto, a matriz ajuda a reduzir a concentração de tensões, uma vez que, as tensões que eram suportadas por fibras que sofreram fratura são transferidas, pela matriz, para as restantes fibras.

Para além disto, a matriz protege ainda o material de reforço (fibras) do meio ambiente durante a sua operação, aumentando a vida útil desse material.

A matriz pode ser constituída por metais, cerâmicos, polímeros ou carbono e é habitualmente menos rígida, resistente e com menor massa específica que o material de reforço [2]. Na presente dissertação a matriz consiste numa resina de poliéster.

2.1.2 Fibras

As fibras são um material de reforço que é disperso na matriz e que confere ao compósito maior resistência e rigidez [2]. Na figura 2.1 estão representadas as várias formas nas quais o material de reforço pode ser utilizado, sendo estas partículas (figura 2.1(a)), fibras curtas descontinuas (figura 2.1(b)) ou fibras longas contínuas (figura 2.1(c)).

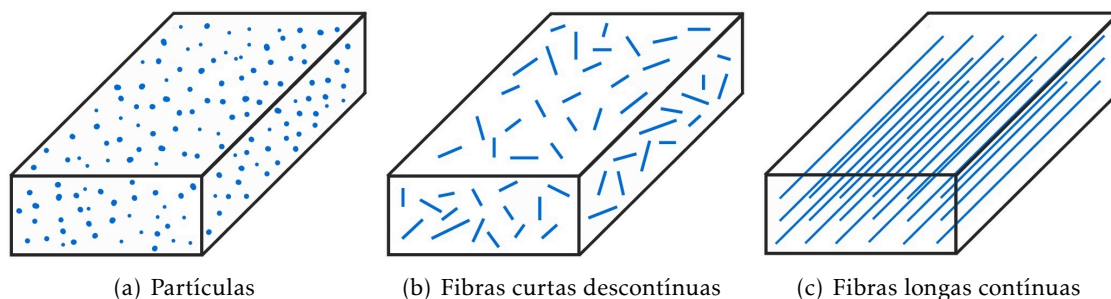


Figura 2.1: Formas do material de reforço

As diversas configurações do reforço providenciam diferentes características ao compósito mesmo quando o material da fibra se mantém o mesmo em ambas as configurações. Isto acontece pois um material com partículas ou fibras curtas descontinuas necessita de transferir carga através da matriz mais frequentemente, sendo por isso menos resistente que compósitos que apresentem fibras longas contínuas [3].

Alguns dos materiais mais comuns usados como reforço no fabrico de compósitos são a fibra de vidro e a fibra de carbono. Existem vantagens e desvantagens para ambos os materiais, por exemplo, a fibra de vidro é menos dispendiosa, mais resistente ao impacto e tem maior extensão à fratura mas é mais pesada e menos rígida que a fibra de carbono [3, 4]. A fibra de vidro é o material utilizado no âmbito desta dissertação.

2.1.3 Tecidos

Os tecidos são construídos com fibras orientadas em mais do que uma direção. Os tipos de tecidos mais comuns são os tecidos, construídos utilizando um tear, os tecidos trançados e os tecidos de malha. O tecido que se obtém depende da técnica utilizada para o construir [3].

Os tecidos construídos no tear são os tecidos mais amplamente utilizados em aplicações estruturais [5] e são os que são contemplados na presente dissertação. A construção deste tecido na sua forma simples é feita entrelaçando duas fibras denominadas urdidura e trama, sendo que esta última passa alternadamente por cima e por baixo de cada urdidura, obtendo-se um tecido simétrico. A urdidura é disposta longitudinalmente no tecido (ao longo do seu comprimento), enquanto que a trama é disposta transversalmente no tecido, isto é, perpendicular ao comprimento do mesmo [3]. Assim sendo, este é um tecido bidimensional.

Na figura 2.2 encontra-se ilustrada a variedade de tecidos que podem ser obtidos através de diferentes métodos de construção.

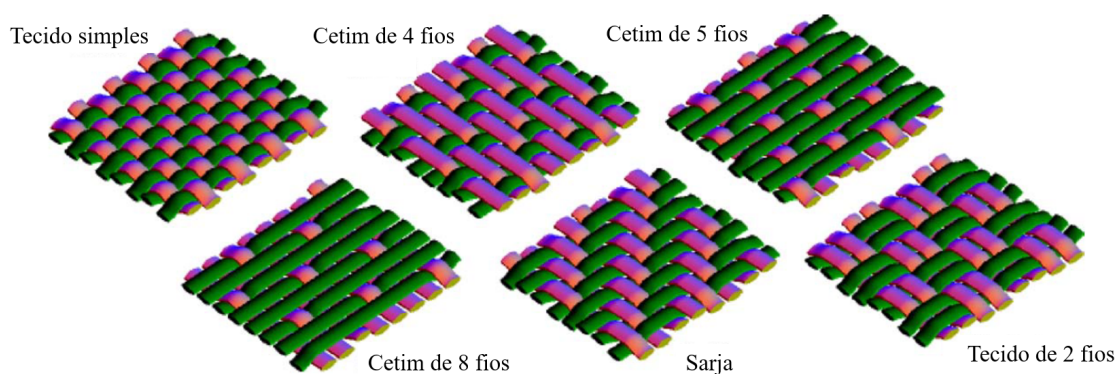


Figura 2.2: Alguns tipos de tecidos [6]

É de notar que o tecido de 2 fios apresenta o mesmo método de construção que o simples, isto é, a passagem alternada de uma fibra por cima e por baixo de outra, no entanto é utilizada mais do que uma fibra de cada vez.

Para além dos tipos de tecido já mencionados, existe ainda uma outra variedade denominada Tecidos Não Tecidos (TNT). Os TNT são produzidos através da ligação entre fibras dispostas aleatoriamente por processos mecânicos, térmicos ou químicos num procedimento semelhante ao usado para fabricar feltro, sem recurso a um tear como é utilizado na produção dos restantes tecidos [7]. Nesta dissertação será também utilizado um TNT.

2.1.4 Laminados

Uma lâmina é composta por um ou mais tipos de fibras ou tecidos impregnados pelo material que constitui a matriz. Habitualmente uma lâmina é apenas capaz de suportar

carga em duas direções, no entanto, é pouco comum existir uma estrutura que seja solicitada apenas nessas duas direções [3]. Surge daqui a necessidade do fabrico de laminados.

Um laminado é um conjunto de lâminas empilhadas umas sobre as outras e habitualmente unidas pelo mesmo material da matriz [1]. Estas lâminas podem ter diferentes orientações ou ser cada uma delas constituída por um tipo diferente de fibra, tecido ou combinação de ambos.

2.1.4.1 Sequência de Empilhamento

Como já foi referido, as lâminas individuais são empilhadas umas sobre as outras com o objetivo de construir um laminado. Contudo, há que definir exatamente qual a sequência pela qual estas lâminas são empilhadas e qual a sua orientação relativamente ao referencial do laminado, pois alterações nessa sequência podem produzir desempenhos do laminado diferentes.

Assim sendo, há que começar por definir algumas regras e a nomenclatura a utilizar quando se fala de sequências de empilhamento.

Em primeiro lugar é necessário definir um referencial local ou principal, de eixos 1, 2 e 3, para cada lâmina. Normalmente define-se o eixo 1 como sendo o eixo das fibras, quando estas são unidireccionais, e o eixo 3 como sendo sempre o eixo normal ao plano da lâmina [1]. Esta definição está ilustrada na figura 2.3.

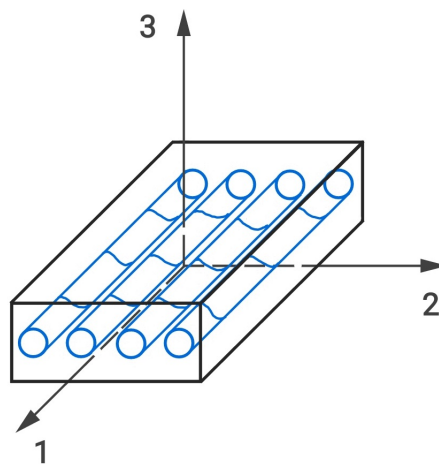


Figura 2.3: Referencial local de uma lâmina

Outro passo importante na definição da sequência de empilhamento, é a escolha de um referencial de eixos x , y e z para o laminado. Para facilitar a análise do comportamento do laminado é vantajoso que se alinhe o seu eixo x com o eixo 1 de uma das lâminas. Se a direção do carregamento aplicado for conhecida também é comum alinhar-se o eixo x com essa direção. Relativamente ao eixo y , este é o eixo transversal ao plano da lâmina, enquanto que o eixo z é normal ao plano da lâmina [1].

Há ainda que ter em mente outras regras de nomenclatura existentes, que são importantes para esta dissertação:

- A sequência das lâminas começa numa das faces do laminado e progride no sentido positivo do eixo z ;
- Um laminado é identificado por um conjunto de orientações das lâminas entre dois parênteses retos;
- O sentido dos ângulos segue a regra da mão direita em relação ao eixo z . Positivo para a esquerda e negativo para a direita [1].

2.2 Falha de Materiais Compósitos

À semelhança de todos os outros tipos de materiais, também os materiais compósitos sofrem falha. Contudo, uma vez que estes materiais têm um comportamento complexo, o modo e o instante em que essa falha ocorre podem ser difíceis de definir.

Considere-se um material compósito sem entalhes composto por fibras compridas unidirecionais embebidas numa matriz, por exemplo, fibra de vidro com resina de poliéster, sujeito a um estado plano de tensão geral (σ_{11} , σ_{22} e σ_{12}). Dependendo da forma como a carga é aplicada o material falha de uma certa maneira e tem um limite de tensão que consegue suportar. A união de todos os pontos na zona onde o material falha para um certo estado de tensão, gera uma superfície denominada superfície de falha. A representação analítica dessa superfície é conhecida como critério de falha. Todos os estados de tensão que se encontram no interior dessa superfície não causam a perda de integridade estrutural do material, ao contrário de qualquer estado de tensão que se encontre para além da mesma [2, 8].

Para definir corretamente os critérios de falha é necessário, em primeiro lugar, identificar os diferentes modos de falha do material e os parâmetros que definem a resistência de uma lâmina.

2.2.1 Resistência da Lâmina

Existem cinco ensaios uniaxiais que podem ser realizados com o objetivo de caracterizar o comportamento mecânico de PRFV. Assumindo que as fibras unidirecionais que constituem a lâmina estão orientadas segundo a direção 1, podem realizar-se ensaios de tração e compressão na direção das fibras (longitudinal), $\pm\sigma_{11}$, na direção perpendicular às fibras (transversal), $\pm\sigma_{22}$, e um ensaio de corte puro, σ_{12} . Para cada um destes ensaios as tensões de falha são representadas por X_T , X_C , Y_T , Y_C e S , respetivamente.

É aceitável considerar que as leis constitutivas podem ser razoavelmente aproximadas por um comportamento linear elástico até à rotura para as situações de tração e compressão na direção longitudinal ($\pm\sigma_{11}$) e para tração na direção transversal ($\sigma_{22} > 0$). Contudo, o mesmo não se pode considerar para compressão na direção transversal ($\sigma_{22} < 0$) nem para o corte puro (σ_{12}), pois nestes casos o material exhibe um comportamento extremamente não linear [8].

2.2.2 Modos de Falha

Define-se modos de falha de uma lâmina como o conjunto de mecanismos de degradação que conduzem à rotura do material [9].

Da observação de resultados experimentais é possível concluir que existem pelo menos quatro modos de falha que podem ser claramente observados para lâminas com fibras unidirecionais. Os planos de fratura criados por cada um desses modos de falha estão representados na figura 2.4, em conjunto com o estado de tensão que lhes dá origem [8].

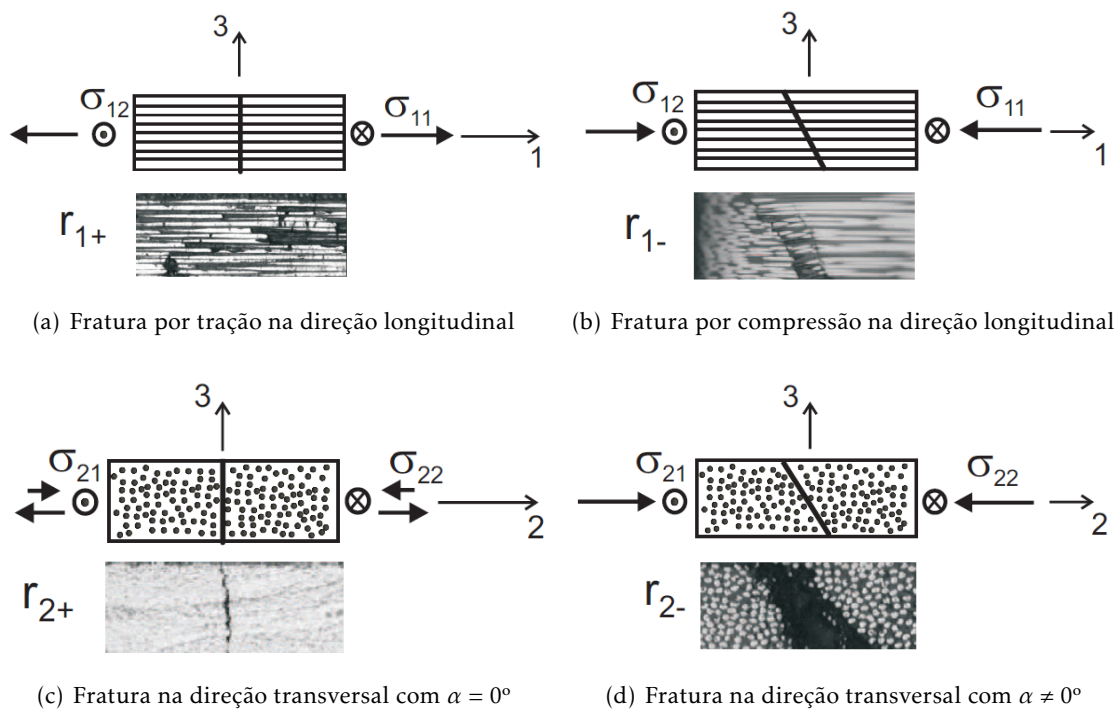


Figura 2.4: Planos de fratura e correspondentes estados de tensão [8]

2.2.2.1 Fratura por Tração na Direção Longitudinal

Este é o modo de falha mais simples de identificar, uma vez que a maioria da carga aplicada longitudinalmente em PRFV é transferida através das fibras. Em compósitos onde a matriz permite maior deformação do que as fibras ou onde a fração volúmica de fibras é elevada, a falha da lâmina inicia-se nas fibras que apresentam zonas com defeitos. A rotura dessas fibras provoca a transferência da carga, antes suportada por elas, para as fibras vizinhas através da matriz. Isto gera um aumento da tensão nessas fibras e causa a rotura da matriz e o descolamento entre as fibras e a matriz. O efeito do aumento da tensão nas fibras faz aumentar a quantidade de fibras que sofrem rotura, culminando na falha total do laminado.

Pode concluir-se então que, para este modo de falha, se verifica a rotura tanto da fibra como da matriz, sendo que a fratura do laminado se dá num plano cuja normal é o vetor definido pela carga aplicada [8].

2.2.2.2 Fratura por Compressão na Direção Longitudinal

Bessa [8] apresenta uma explicação detalhada deste modo de falha, onde refere que o modo de falha de fratura por compressão na direção longitudinal é considerado o modo mais complexo que pode ser identificado numa lâmina de fibras unidirecionais. Quando uma destas lâminas é sujeita a uma carga de compressão na direção das fibras, observa-se normalmente a formação de bandas de deslizamento (figuras 2.5(b) e 2.5(c)). Estas são, muito provavelmente, resultado da combinação de microencurvadura das fibras (um micromecanismo de falha das fibras), figura 2.5(a), e da transferência de tensões de corte através da interface entre a fibra e a matriz.

Este é um modo altamente influenciado pelo comportamento da matriz ao corte e pelas imperfeições presentes no laminado, tal como vazios ou desalinhamento inicial das fibras [9].

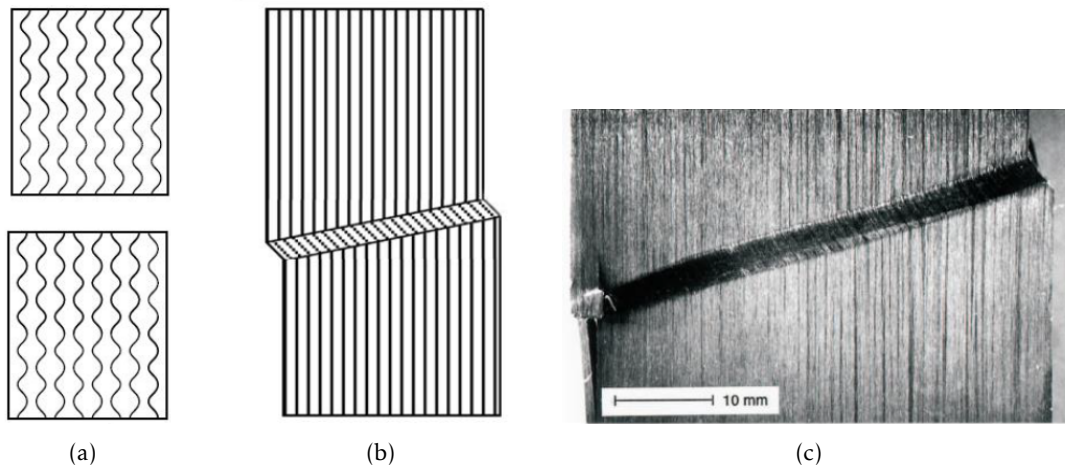


Figura 2.5: (a) Esquema de microencurvadura das fibras; (b) Esquema de uma banda de deslizamento; (c) Banda de deslizamento real. [9]

2.2.2.3 Fratura na Direção Transversal com $\alpha = 0^\circ$

Uma lâmina com fibras unidirecional sujeita a um carregamento de tração na direção perpendicular às fibras ($\sigma_{22} > 0$) ou de corte puro (σ_{12}) falha transversalmente, apresentando um ângulo de fratura $\alpha = 0^\circ$, tal como apresentado anteriormente na figura 2.4(c).

Este modo de falha também pode ser obtido através da aplicação de um pequeno carregamento de compressão na direção transversal às fibras ($\sigma_{22} < 0$) em conjunto com um elevado carregamento de corte puro (σ_{12}) [8].

2.2.2.4 Fratura na Direção Transversal com $\alpha \neq 0^\circ$

Tal como referido em 2.2.1, o comportamento do PRFV sob condições de compressão na direção transversal é altamente não linear.

Sabe-se ainda que quando se aumenta o valor do carregamento de compressão, observa-se, através de resultados experimentais, que existe um aumento do ângulo de fratura, α . Por exemplo, quando o material está sujeito apenas a compressão na direção transversal, o ângulo de fratura α é de aproximadamente 53° . Caso, em conjunto com a carga de compressão, seja aplicado um carregamento de corte puro, o ângulo de fratura diminui para cerca de 40° . Se o carregamento de corte puro for superior ao carregamento de compressão, então o ângulo de fratura passa para 0° , tal como referido na secção 2.2.2.3 [8].

2.2.3 Critérios de Falha

Dado que os materiais compósitos são utilizados em aplicações estruturais, é essencial que se compreenda de que forma ocorre cada modo de falha, isto é, que se possua um modelo físico para cada um desses modos. Os critérios de falha são modelos físicos através dos quais se procura estabelecer quando ocorre a falha do material e qual o seu comportamento após essa mesma falha [10].

A grande dificuldade no desenvolvimento de métodos numéricos precisos e computacionalmente eficientes que prevejam o crescimento da falha, prende-se com a análise das alterações da microestrutura do material e com o modo de relacionar essas alterações com a resposta do material. Ainda que tenha existido um bom progresso na investigação nesta área, não existe atualmente nenhum critério que seja capaz de prever a falha do material a todos os níveis de análise, para todas as condições de carregamento e para todos os tipos de laminados de PRFV [11]. Devido a este facto, existem diversos critérios de falha como o critério da Tensão Máxima, da Extensão Máxima, de Tsai-Hill, de Tsai-Wu, de Hashin, de Puck, o LaRC03 e o LaRC04, sendo que cada um deles se baseia em diferentes pressupostos. Na presente dissertação serão considerados dois critérios de falha, o critério da Tensão Máxima e o critério LaRC04.

2.2.3.1 Critério da Tensão Máxima

O critério da Tensão Máxima é um dos critérios mais utilizados na previsão da falha de materiais compósitos, uma vez que é o critério menos complexo. Este é um critério linear, baseado em valores de tensão e que não considera as interações entre as diferentes componentes da tensão, contudo possibilita a obtenção de informação relativamente ao modo de falha. A avaliação por este critério consiste na comparação das componentes da tensão no provete ($\pm\sigma_{11}$, $\pm\sigma_{22}$ ou σ_{12}) com os valores correspondentes de tensão limite do material utilizado (X_T , X_C , Y_T , Y_C e S). Segundo este critério, a falha ocorre quando a tensão máxima no provete é superior à tensão limite do material, ou seja quando se verifica alguma das seguintes condições [9, 12]:

$$+\sigma_{11} \geq X_T ; \quad -\sigma_{11} \geq X_C ; \quad +\sigma_{22} \geq Y_T ; \quad -\sigma_{22} \geq Y_C ; \quad |\sigma_{12}| \geq S \quad (2.1)$$

2.2.3.2 Critério LaRC04

O critério LaRC04 é um critério baseado em modelos físicos para cada um dos modos de falha, sendo desprovidos de variáveis empíricas e que têm em consideração o comportamento não linear da matriz ao corte. Este critério consiste num conjunto de seis expressões que podem ser utilizadas diretamente para fins de projeto [10]. O critério LaRC04 permite ter em conta estados de tensão tridimensionais [2].

Este critério é bastante mais complexo que o critério da Tensão Máxima, sendo de seguida apresentado um resumo do mesmo. Para uma explicação mais pormenorizada do critério LaRC04 consultar [10].

Critério LaRC04 para a falha da matriz: tração na direção transversal ($\sigma_{22} > 0$)

Um índice de falha para a tensão na matriz pode ser expresso em termos das tensões nas lâminas e das forças *in-situ*. Na equação 2.2 encontra-se a expressão para este índice [10].

$$FI_M = (1 - g) \frac{\sigma_{22}}{Y_{is}^T} + g \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_{is}^T} \right)^2 + \frac{\Lambda_{23}^o \tau_{23}^2 + \chi(\gamma_{12})}{\chi(\gamma_{12|is}^u)} = 1 \quad (2.2)$$

onde os valores de resistência *in-situ* para lâminas com elevada espessura são dados por

$$\begin{aligned} Y_{is}^T &= 1.12\sqrt{2}Y_T \\ \gamma_{12|is}^u &= \chi^{-1} [2\chi(\gamma_{12}^u)] \end{aligned} \quad (2.3)$$

e os valores de resistência *in-situ* para lâminas com pequena espessura são dados por

$$\begin{aligned} Y_{is}^T &= \sqrt{\frac{8G_{Ic}}{\pi t \Lambda_{22}^o}} \quad \text{onde} \quad \Lambda_{22}^o = 2 \left(\frac{1}{E_{22}} - \frac{\nu_{21}^2}{E_{11}} \right) \\ \gamma_{12|is}^u &= \chi^{-1} \left(\frac{8G_{IIc}}{\pi t} \right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

O valor de g pode ser obtido através da equação 2.5 para lâminas finas, ou através da equação 2.6 para todas as espessuras [10].

$$g = \frac{G_{Ic}}{G_{IIc}} \quad (2.5)$$

$$g = 1.12^2 \frac{\Lambda_{22}^o (Y_T)^2}{\chi(\gamma_{12}^u)} \quad (2.6)$$

Critério LaRC04 para a falha da matriz: compressão na direção transversal ($\sigma_{22} < 0$)

O índice de falha para o caso de compressão da matriz é dado pela equação 2.7 [10].

$$FI_M = \left(\frac{\tau_T}{S_T - \eta_T \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\tau_L}{S_{is}^L - \eta_L \sigma} \right)^2 \leq 1 \quad (2.7)$$

O ângulo de fratura para um carregamento de compressão pura na direção transversal pode ser considerado como $\alpha_o = 53^\circ$, caso não existam dados experimentais. O coeficiente de atrito η_T pode ser obtido através da expressão 2.8 [10].

$$\tan(2\alpha_o) = -\frac{1}{\eta_T} \quad (2.8)$$

A resistência transversal S_T é definida por

$$S_T = Y_C \cos(\alpha_o) \left(\sin(\alpha_o) + \frac{\cos(\alpha_o)}{\tan(\alpha_o)} \right) \quad (2.9)$$

e, na ausência de dados experimentais, η_L pode ser obtido da relação

$$\frac{\eta_L}{S_{is}^L} = \frac{\eta_T}{S_T} \quad (2.10)$$

As tensões nos potenciais planos de fratura no intervalo de $\alpha \in [0, \pi[$ são obtidas através das seguintes equações [10]

$$\begin{cases} \sigma = \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2} + \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{2} \cos(2\alpha) + \tau_{23} \sin(2\alpha) \\ \tau_T = \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2} + \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{2} \sin(2\alpha) + \tau_{23} \cos(2\alpha) \\ \tau_L = \tau_{12} \cos(\alpha) + \tau_{31} \sin(\alpha) \end{cases} \quad (2.11)$$

Critério LaRC04 para a falha da fibra: tração na direção longitudinal ($\sigma_{11} > 0$)

O critério LaRC04 para a falha da fibra por tração é um critério que tem apenas em consideração a tensão máxima admissível. Assim sendo, o índice de falha é dado pela equação 2.12 [10].

$$FI_F = \frac{\sigma_{11}}{X_T} \leq 1 \quad (2.12)$$

Critério LaRC04 para a falha da fibra: compressão na direção longitudinal ($\sigma_{11} < 0$)

A falha por compressão na direção da fibra é uma área complexa onde, dependendo do material considerado, podem ocorrer diferentes modos de falha. Estes modos são a microencurvadura das fibras, a formação de bandas de deslizamento e a falha da fibra [2].

Para o caso em que o modo de falha é a formação de bandas de deslizamento ($\sigma_{2^m 2^m} < 0$) o índice de falha é dado pela equação 2.13 [2].

$$FI_F = \left(\frac{|\tau_{1^m 2^m}|}{S_{is}^L - \eta_L \sigma_{2^m 2^m}} \right) \leq 1 \quad (2.13)$$

Quando existe compressão biaxial a falha da matriz é dada por

$$FI_M = \left(\frac{\tau^{TM}}{S_T - \eta_T \sigma^m} \right)^2 + \left(\frac{\tau^{LM}}{S_L - \eta_L \sigma^m} \right)^2 \leq 1 \quad (2.14)$$

onde

$$\begin{cases} \sigma = \frac{\sigma_{2^m 2^m} + \sigma_{3\psi 3\psi}}{2} + \frac{\sigma_{2^m 2^m} - \sigma_{3\psi 3\psi}}{2} \cos(2\alpha) + \tau_{2^m 3\psi} \sin(2\alpha) \\ \tau_T^m = -\frac{\sigma_{2^m 2^m} - \sigma_{3\psi 3\psi}}{2} \sin(2\alpha) + \tau_{2^m 3\psi} \cos(2\alpha) \\ \tau_L^m = \tau_{1^m 2^m} \cos(\alpha) + \tau_{3\psi 1^m} \sin(\alpha) \end{cases} \quad (2.15)$$

O critério para falha da matriz à tração quando sujeita a uma carga de compressão na direção longitudinal ($\sigma_{2^m 2^m} \geq 0$) é dado pela equação 2.16 [2].

$$FI_{M/F} = (1-g) \frac{\sigma_{2^m 2^m}}{Y_{is}^T} + g \left(\frac{\sigma_{2^m 2^m}}{Y_{is}^T} \right)^2 + \frac{\Lambda_{23}^o \tau_{2^m 3\psi}^2 + \chi(\gamma_{1^m 2^m})}{\chi(\gamma_{12|is}^u)} \leq 1 \quad (2.16)$$

As expressões para a falha por formação de bandas de deslizamento são apresentadas de seguida [2]. O plano onde se dá a formação das bandas é dado por

$$\tan(2\psi) = \frac{2\tau_{23}}{\sigma_{22} - \sigma_{33}} \quad (2.17)$$

Os valores das tensões rodados para esse plano são

$$\begin{cases} \sigma_{2\psi 2\psi} = \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2} + \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{2} \cos(2\psi) + \tau_{23} \sin(2\psi) \\ \sigma_{3\psi 3\psi} = \sigma_{22} + \sigma_{33} - \sigma_{2\psi 2\psi} \\ \tau_{12\psi} = \tau_{12} \cos(\psi) + \tau_{31} \sin(\psi) \\ \tau_{2\psi 3\psi} = 0 \\ \tau_{3\psi 1} = \tau_{31} \cos(\psi) - \tau_{12} \sin(\psi) \end{cases} \quad (2.18)$$

Conhecendo a orientação do desalinhamento, as tensões podem ser rodadas utilizando as equações seguintes [2]

$$\begin{cases} \sigma_{1^m 1^m} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{2\psi 2\psi}}{2} + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{2\psi 2\psi}}{2} \cos(2\varphi) + \tau_{12\psi} \sin(2\varphi) \\ \sigma_{2^m 2^m} = \sigma_{11} + \sigma_{2\psi 2\psi} - \sigma_{1^m 1^m} \\ \tau_{1^m 2^m} = -\frac{\sigma_{11} - \sigma_{2\psi 2\psi}}{2} \sin(2\varphi) + \tau_{12\psi} \cos(\varphi) \\ \tau_{2^m 3\psi} = \tau_{2\psi 3\psi} \cos(\varphi) - \tau_{3\psi 1} \sin(\varphi) \\ \tau_{3\psi 1^m} = \tau_{3\psi 1\psi} \cos(\varphi) \end{cases} \quad (2.19)$$

É de notar que, na presente dissertação, os cálculos apresentados para os critérios de falha serão efetuados pelo *software* ANSYS Mechanical APDL.

2.3 Modos de Fratura

A mecânica da fratura considera que a propagação da falha pode ocorrer em três modos diferentes, o modo I, o modo II e o modo III, dependendo da forma como o material é solicitado. O primeiro modo é denominado modo de abertura e ocorre quando existe

tração na direção perpendicular ao plano da fenda. Os modos II e III são modos de corte, sendo que o segundo modo se define como modo de corte no plano e o terceiro modo como modo de corte fora do plano. Estes dois modos ocorrem devido a esforços de corte que são aplicados paralelamente ao plano da fenda [2, 13].

Na figura 2.6 estão representados os modos de fratura I, II e III.

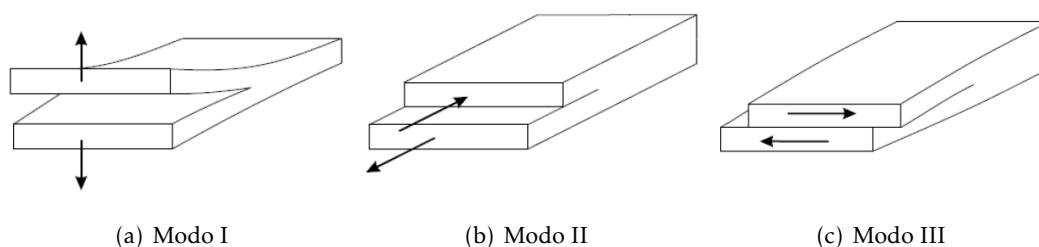


Figura 2.6: Modos de fratura [2]

Cada um destes três modos tem a sua própria energia de fratura, G_{Ic} , G_{IIc} e G_{IIIc} , respetivamente. Os valores destas energias são necessários para caracterizar o material que se encontra na interface entre lâminas adjacentes, de forma a ser possível simular o fenómeno de delaminação. Existe ainda a possibilidade de ocorrer uma combinação de dois dos três modos de fratura. Quando isto acontece dá-se o nome de modo misto [2].

2.4 Delaminação

A delaminação é um fenómeno que está associado à fratura da matriz ao longo da superfície que separa duas lâminas adjacentes por efeito de tensões interlaminares elevadas [14]. Este é um dos modos de falha mais predominantes em laminados, onde não existe reforço na direção da espessura, pois isso provoca a existência de uma fraca resistência interlaminar nestes materiais [15, 16].

A delaminação pode ocorrer por diversas causas como impactos, defeitos de fabrico, ou concentração de tensões devido a detalhes de geometria ou furos e entalhes [2]. Muitas vezes o fenómeno de delaminação inicia-se nos bordos livres da placa, dado que nessas zonas se verificam elevadas tensões interlaminares [14].

O estudo do fenómeno de delaminação é essencial, sendo que é algo complexo de detetar durante uma inspeção e pode provocar a falha prematura do material, devido à perda de integridade estrutural ou devido à exposição de camadas interiores do laminado ao meio ambiente [2, 16].

2.5 Modelos Numéricos

Os modelos numéricos pelo MEF são uma ferramenta poderosa que, quando utilizada de forma adequada, permite resolver problemas estruturais complexos que antes do

desenvolvimento desta tecnologia não possuíam uma solução prática.

A modelação numérica representa uma parte importante no desenvolvimento de estruturas e na sua avaliação a par com a experimentação e com o conhecimento teórico. A grande vantagem dos modelos numéricos é que se pode fazer todo o tipo de alterações ao modelo que se quer avaliar e melhorar, sem existir a necessidade de utilizar materiais na construção do mesmo, tornando todo o processo menos dispendioso.

A modelação de materiais compósitos como o PRFV é algo complicada, uma vez que estes são constituídos por dois ou mais materiais diferentes com características muito distintas. Dado esse facto, estes materiais apresentam uma enorme complexidade de fenómenos que ocorrem em simultâneo a diferentes escalas de comprimento do compósito. Todos os fenómenos, independentemente da escala em que ocorrem, podem contribuir para o colapso de uma estrutura construída utilizando materiais compósitos, dado que todos possuem uma influência direta na existência de dano. Posto isto, é importante estudar todos esses fenómenos, contudo, atualmente não é possível construir modelos numéricos de uma estrutura que consigam incluir o detalhe necessário para estudar o que ocorre ao nível da fibra. Como consequência, utilizam-se modelos numéricos em três escalas distintas, dependendo do que se pretende avaliar [14].

Na figura 2.7, estão representados modelos nessas três escalas, a micro-escala, a meso-escala e a macro-escala.

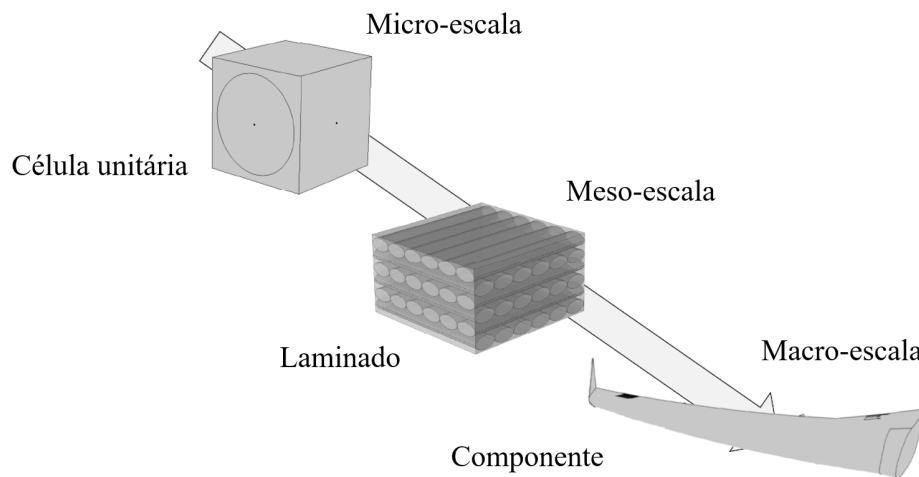


Figura 2.7: Representação de modelos em três escalas [17]

2.5.1 Modelos à Micro-escala

Os modelos à micro-escala são baseados no conceito de volume elementar representativo, ou *Representative Volume Element* (RVE), que é definido como a menor porção de lâmina onde as tensões e as deformações são consideradas macroscopicamente uniformes e que, ao mesmo tempo, possui uma representação correta das fibras e da matriz contidas na lâmina, preservando a proporção entre volumes [18]. Muitas vezes estes modelos são

constituídos apenas por uma fibra rodeada de matriz, no entanto existem outras configurações possíveis. Na figura 2.8 encontram-se representados dois modelos de RVE ou de célula unitária distintos.

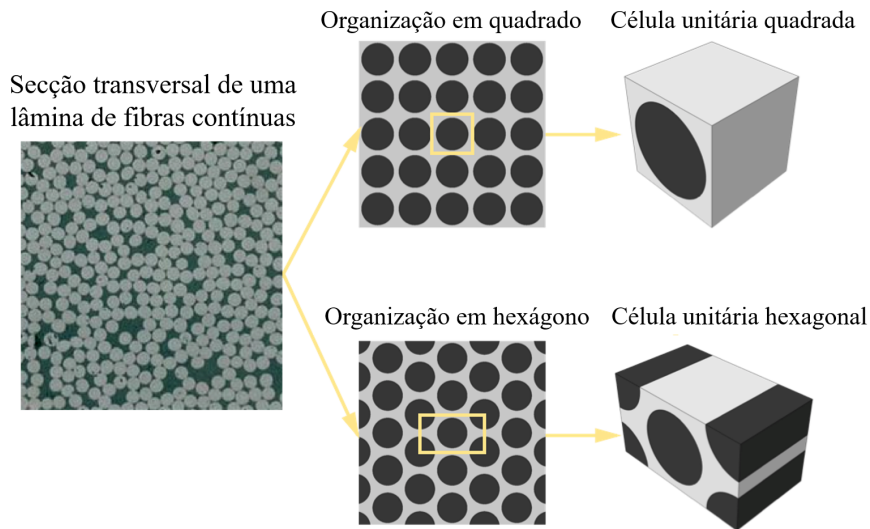


Figura 2.8: Volume elementar representativo ou célula unitária de um compósito [19]

Este tipo de modelo é utilizado para obter propriedades equivalentes ou homogeneizadas da lâmina a partir das propriedades dos seus componentes (fibra e matriz) [18]. Os modelos à micro-escala são importantes para estudar fenômenos de rotura das fibras ou da matriz, que induzem grandes alterações nas tensões em zonas vizinhas à falha [2].

Ainda que o modelo à micro-escala possa ser útil numa primeira fase de modelação em multi-escala, por exemplo na obtenção das propriedades equivalentes, este apresenta fortes limitações em relação à representação de estruturas mais complexas. Estes modelos possuem um grau de detalhe muito elevado, portanto seria necessário um enorme número de elementos para se conseguir representar apenas uma lâmina. Por essa razão, o modelo não tem em conta a totalidade da lâmina nem as tensões na interface entre lâminas adjacentes, sendo por isso incapaz de simular o fenómeno de delaminação [2, 18].

2.5.2 Modelos à Meso-escala

Os modelos à meso-escala são utilizados para simular e prever a falha de materiais compósitos. A esta escala, a lâmina é considerada como um material homogéneo e ortotrópico ou transversalmente isotrópico, dependendo da situação existente [20].

Estes modelos são construídos de forma a que cada camada de elementos, na direcção da espessura, corresponda a uma lâmina, ou seja, os elementos e a lâmina têm a mesma espessura. Habitualmente os elementos utilizados nestes modelos têm uma formulação baseada na teoria da elasticidade 3D, fornecendo uma informação completa sobre o seu estado de tensão. Com este tipo de elementos e o método de construção do modelo anteriormente descrito, é possível obter as tensões no interior das lâminas, onde se aplicam os

critérios de falha e ainda as tensões na superfície entre as lâminas, permitindo estudar o fenómeno de delaminação [14]. Por esta razão, esta é a escala escolhida para os modelos do laminado construídos no decurso desta dissertação.

Para se conseguir simular corretamente o fenómeno de delaminação, é ainda necessário colocar entre as lâminas, elementos capazes de representar a lei de adesão entre lâminas adjacentes [14]. Estes elementos têm o nome de elementos coesivos. Uma descrição mais detalha da função e do comportamento deste tipo de elementos será apresentada mais adiante, na secção 2.6.

2.5.3 Modelos à Macro-escala

Os modelos à macro-escala, ou à escala da estrutura, são utilizados para representar grandes estruturas constituídas por materiais compósitos. Na construção destes modelos são habitualmente utilizados elementos finitos baseados na teoria clássica de laminados (*Classical Laminate Theory* (CLT)) ou na teoria das deformações de corte de primeira ordem (*First Order Shear Deformation Theory* (FSDT)), com o objetivo de reproduzir uma estrutura [14].

A CLT não considera a existência de tensões interlaminares, isto é, tensões que se observam na interface entre lâminas adjacentes, considerando apenas as tensões que ocorrem no interior das lâminas, denominadas tensões intralaminares. Por consequência, modelos com esta escala não são capazes de simular o fenómeno de delaminação, uma vez que, tensões interlaminares elevadas estão na base da ocorrência desse fenómeno [14].

Na modelação à macro-escala, toda a estrutura é considerada contínua e homogénea e o material que a constitui é descrito como tendo um comportamento anisotrópico [20]. Estes modelos são bastante grosseiros, já que a espessura de várias lâminas pode ser representada por apenas um elemento, sendo por essa razão incapazes de prever o comportamento da fibra, da matriz ou da interface entre a fibra e a matriz [2, 14].

2.6 Elementos Coesivos

Em modelação numérica pelo MEF, para ser possível simular o fenómeno de delaminação descrito em 2.4, é necessário utilizar elementos coesivos, como foi referido na secção 2.5.2. A utilização destes elementos serve para simular as zonas ricas em resina que se encontram na interface entre duas lâminas adjacentes. Por essa razão, os elementos coesivos possuem propriedades iguais às da matriz [2, 8]. Na figura 2.9, estão representados esquematicamente um elemento coesivo não deformado e um deformado.

Estes elementos têm uma espessura infinitesimal e são colocados entre duas lâminas, unindo os seus nós aos nós dessas lâminas. Desta forma, o afastamento relativo entre as lâminas unidas pelo elemento coesivo representa o tamanho da falha por delaminação. Esse afastamento pode ser controlado por um modelo bilinear onde existem duas fases, a fase de carregamento e a fase de descarregamento [8, 14].

Na figura 2.10 encontra-se representada a curva que define o modelo bilinear.

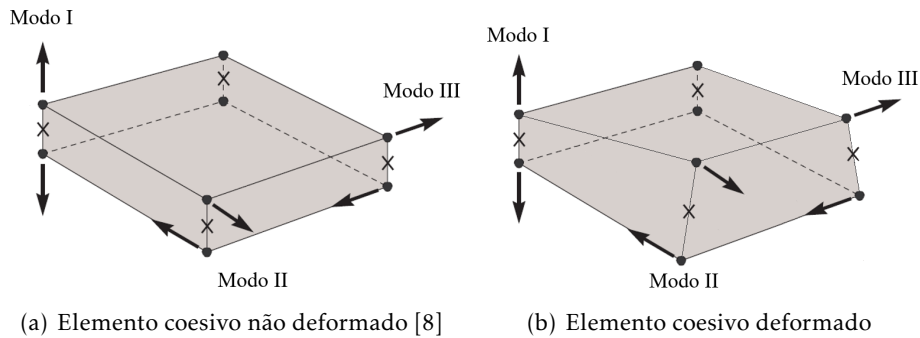


Figura 2.9: Representação de um elemento coesivo

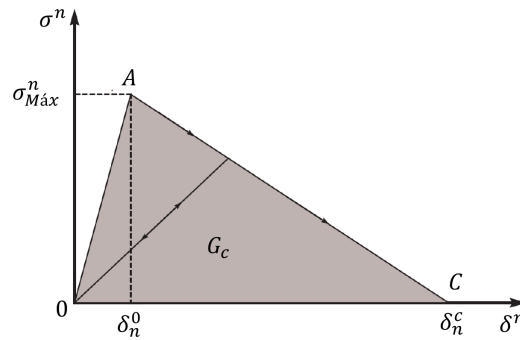


Figura 2.10: Modelo bilinear [2]

A zona OA da curva é a fase de carregamento, apresentando um comportamento elástico que antecede o início do dano. Nesta fase a curva tem um declive superior à fase de descarregamento, tendo por isso um comportamento mais rígido. A separação das duas superfícies, δ , começa quando se atinge o ponto A , sendo que este é o ponto de tensão de contacto máxima, e termina no ponto C onde essa tensão atinge o valor zero. A área abaixo da curva OAC , representa a energia de fratura, que dependendo do modo de delaminação, pode ser definida como G_{Ic} , G_{IIc} ou G_{IIIc} [2].

Para ser possível aplicar o modelo bilinear aos elementos coesivos presentes no modelo numérico é necessário conhecer alguns coeficientes, denominados no *software* ANSYS como $C1$, $C2$, $C3$, $C4$ e $C5$. Estes coeficiente são definidos por [21]:

- $C1$: tensão normal máxima (σ_{max});
- $C2$: deslocamento normal aquando do descolamento completo (δ_n^c);
- $C3$: tensão de corte máxima (τ_{max});
- $C4$: deslocamento tangencial aquando do descolamento completo (δ_t^c);
- $C5$: rácio entre δ_n^* , deslocamento normal no ponto de tensão máxima, e δ_n^c (α).

Os valores para δ_n^c , δ_t^c e δ_n^* são obtidos através das equações 2.20, 2.21 e 2.22.

$$\delta_n^c = \frac{2G_{Ic}}{\sigma_{max}} \quad (2.20)$$

$$\delta_t^c = \frac{2G_{IIc}}{\tau_{max}} \quad (2.21)$$

$$\delta_n^* = \frac{\sigma_{max}}{K} \quad (2.22)$$

2.7 Ligações Coladas

As ligações coladas consistem na ligação de dois materiais (aderentes) através de um material adesivo colocado entre eles. Estas ligações são uma tecnologia em evolução e importante em diversas aplicações estruturais e numa grande variedade de indústrias como a automóvel, a aeroespacial ou a aeronáutica. Este método de ligação pode melhorar o desempenho de uma estrutura e ser vantajoso do ponto de vista económico. É um método bastante versátil capaz de ligar diversos materiais, incluindo materiais compósitos, e componentes com geometrias complexas, o que o torna bastante atrativo [22].

As ligações coladas permitem também uma transferência de cargas mais suave entre os componentes ligados, o que diminui a concentração de tensões na zona da ligação. Apesar disso, existem diferentes modos de falha nas ligações coladas, os quais estão representados na figura 2.11 e explicados de seguida:

- Falha adesiva: consiste no descolamento entre o adesivo e o aderente, sendo reconhecida pela existência de adesivo apenas de um dos lados da ligação depois de existir a separação;
- Falha coesiva: consiste na falha do próprio material adesivo, sendo caracterizada pela permanência de adesivo nos dois lados da ligação depois de existir a separação;
- Falha do substrato: consiste na falha do aderente, demonstrando que o adesivo é mais resistente que os materiais ligados por ele [23].

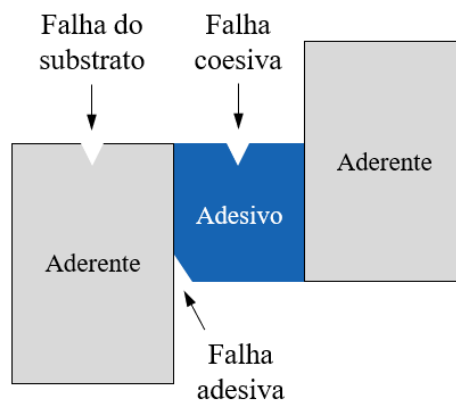


Figura 2.11: Esquema dos modos de falha de ligações coladas

ESTUDO DOS LAMINADOS

Neste capítulo é apresentado um estudo de lâminas e laminados de PRFV, composto por uma componente experimental e uma componente de modelação numérica.

O capítulo encontra-se dividido em 6 secções, sendo a primeira referente aos materiais utilizados nos ensaios experimentais. As seguintes consistem na apresentação dos resultados experimentais e na descrição dos modelos numéricos construídos com os respetivos resultados obtidos, para as lâminas e os laminados. Nesta dissertação utilizou-se o *software* ANSYS Mechanical APDL para o desenvolvimento dos modelos numéricos apresentados. Para terminar faz-se uma comparação dos resultados experimentais e numéricos e são retiradas algumas conclusões.

3.1 Materiais Utilizados

Os laminados utilizados nesta dissertação são constituídos por dois tecidos de fibra de vidro e por resina de poliéster. A escolha dos materiais para este estudo baseou-se no facto destes serem os materiais habitualmente utilizados pela Nautiber na construção das suas embarcações.

3.1.1 Fibra de Vidro e Resina de Poliéster

Começando pelos tecidos de fibras de vidro, representados na figura 3.1, estes são constituídos por fibra de vidro do tipo E.

O primeiro tecido é um TNT que tem o nome de MAT 450, figura 3.1(a), e consiste numa manta constituída por fibras curtas e descontínuas, como as apresentadas na figura 2.1(b), dispostas aleatoriamente umas sobre as outras. Este tecido apresenta 450 gramas de fibra de vidro por cada metro quadrado de manta [24].

O segundo tecido, figura 3.1(b), é denominado WRM 800/450 e é fabricado através da junção de um tecido de fibras com orientação de 90° entre si, de 800 gramas por metro

quadrado, que tem a forma simples e é construído tal como indicado na secção 2.1.3, e uma manta de fibras aleatórias de 450 gramas por metro quadrado. [25, 26].



(a) Tecido MAT 450 [27]

(b) Tecido WRM 800/450 [28]

Figura 3.1: Tecidos que constituem os dois tipos de provetes

A fibra de vidro do tipo E possui as características mecânicas presentes na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas da fibra de vidro do tipo E [1]

ρ [kg/m ³]	E [MPa]	G [MPa]	ν	σ_r [MPa]	ϵ_r [%]
2600	74000	30000	0.25	2500	3.5

Relativamente à resina utilizada na construção do laminado, esta é uma resina de poliéster. A resina de poliéster é um polímero termoendurecível, ou seja, resulta de uma reação química que produz uma rede reticulada em três dimensões que é irreversível. Isto significa que, depois de adquirida a sua forma sólida inicial, esta não pode ser alterada nem a resina reutilizada, uma vez que o aquecimento do material provoca a sua degradação [1]. Na tabela 3.2 são apresentadas algumas propriedades deste tipo de resina.

Tabela 3.2: Propriedades mecânicas da resina de poliéster [1]

ρ [kg/m ³]	E [MPa]	G [MPa]	ν	σ_r [MPa]	ϵ_r [%]
200	4000	1400	0.4	80	2.5

3.2 Ensaio Experimentais das Lâminas de MAT 450 e de WRM 800/450

Por forma a ser possível construir um modelo numérico capaz de simular e prever, de um modo preciso, o comportamento de um laminado de PRFV quando sujeito a cargas de tração, é necessário conhecer as propriedades mecânicas dos materiais que constituem

esse mesmo laminado. Contudo, as propriedades mecânicas de laminados de fibra de vidro e resina não se encontram disponíveis para consulta, pois apresentam elevada variação dada a diversidade que existe em termos de sequências de empilhamento, tipo de organização das fibras e constituição do próprio laminado. Posto isto, foi necessária a realização de ensaios de tração com o objetivo de obter o Módulo de Young e a Tensão de Rotura dos materiais utilizados (MAT 450 e WRM 800/450), para posteriormente serem inseridos em modelos numéricos.

Dos ensaios obtêm-se valores de força e deslocamento que têm de ser transformados em valores de tensão e extensão de modo a ser possível calcular o Módulo de Young. Para isso recorreu-se às expressões presentes na norma ISO 527-1 (2012), que se apresentam de seguida.

- **Tensão** (em megapascal [MPa]):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

onde F é a força aplicada, em Newton [N] e A é a área da secção transversal, em milímetros quadrados [mm²].

- **Extensão** (sem utilização de extensómetro):

$$\varepsilon = \frac{\Delta D_g}{D_g} \quad (3.2)$$

onde ΔD_g é o aumento da distância entre as garras, em milímetros [mm] e D_g é a distância inicial entre as garras, em milímetros [mm].

- **Extensão** (com utilização de extensómetro):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (3.3)$$

onde ΔL_0 é o aumento do comprimento de referência do extensómetro, em milímetros [mm] e L_0 é o comprimento de referência do extensómetro, em milímetros [mm].

- **Módulo de Young** (em megapascal [MPa]):

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.4)$$

onde σ_1 é a tensão, em megapascal [MPa], medida para um valor de extensão $\varepsilon_1 = 0.0005$ (0.05%) e σ_2 é a tensão, em megapascal [MPa], medida para um valor de extensão $\varepsilon_2 = 0.0025$ (0.25%).

- **Distância entre garras** (em milímetros [mm]):

$$D_g = L - L_g \quad (3.5)$$

onde L é o comprimento do provete em milímetros [mm] e L_g é o comprimento das garras em milímetros [mm].

- **Área da Secção Transversal** (em milímetros quadrados [mm²]):

$$A = w \times t \quad (3.6)$$

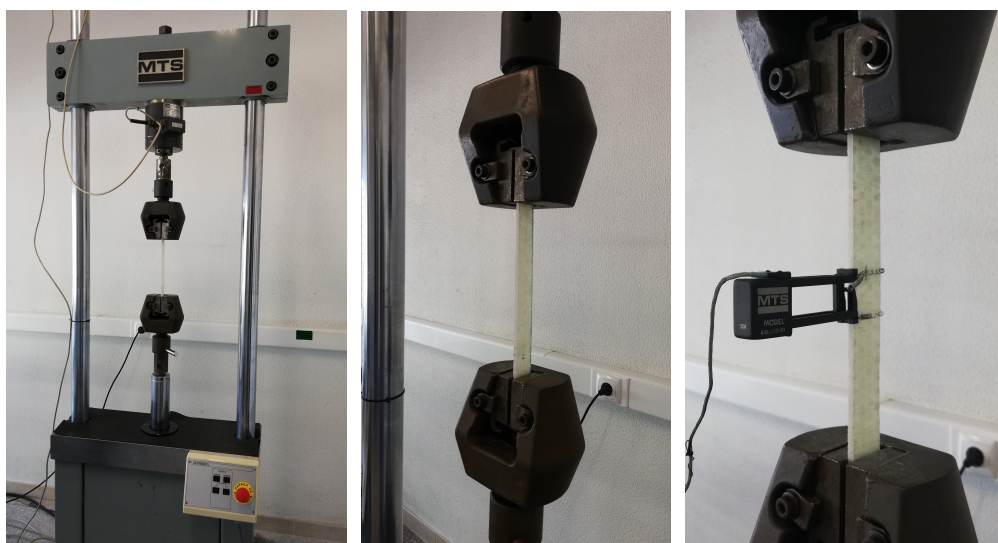
onde w é a largura do provete em milímetros [mm] e t é a espessura do provete em milímetros [mm].

Os ensaios foram realizados considerando duas direções das lâminas de cada material, a direção longitudinal (L) e a direção transversal (T), resultando assim em quatro conjuntos de provetes diferentes ensaiados. Estas direções foram definidas relativamente às dimensões das duas placas, uma de MAT 450 e uma de WRM 800/450, de onde foram retirados os provetes. As placas, fornecidas pela Nautiber, têm dimensões de aproximadamente 595 [mm] × 502 [mm], sendo que os provetes com a direção longitudinal têm o seu eixo alinhado com a maior dimensão da placa e os provetes com a direção transversal têm o seu eixo alinhado com a menor dimensão da placa. A placa de MAT 450 é constituída por cinco lâminas, enquanto que a placa de WRM 800/450 é constituída por três lâminas, sendo que ambas as placas apresentam todas as lâminas com a orientação de 0°.

É ainda de realçar que à data da realização dos ensaios a resina presente nos provetes apresentava 19 dias de cura.

Os provetes de ambos os materiais apresentam as dimensões presentes na norma ISO 527-4 (1997), que define que o provete deve ter uma largura de 25 [mm], uma espessura de 2 a 10 [mm] e um comprimento superior a 250 [mm]. Para este caso, decidiu-se utilizar provetes com as dimensões aproximadas de 25 [mm] de largura, 5 [mm] de espessura e 300 [mm] de comprimento.

Os ensaios foram realizados numa prensa hidráulica MTS à velocidade controlada de 2 [mm/min]. Para cada conjunto de provetes foram realizados três ensaios com recurso a um extensómetro, cujos resultados foram utilizados para calcular de forma precisa o Módulo de Young dos materiais, e cinco ensaios sem a utilização de extensómetro através dos quais se obteve o valor da Tensão de Ruptura para os vários materiais. A não utilização de extensómetro nos ensaios cujo objetivo é obter a Tensão de Ruptura, deve-se ao facto de o material que se pretende ensaiar possuir uma fratura do tipo frágil, que por vezes abrange uma grande zona do provete não se restringindo ao comprimento de referência do extensómetro utilizado, e que pode ocorrer em diversas zonas do provete, não sendo possível prever qual a zona onde a fratura se irá dar. Estas características do material fazem com que as curvas Tensão - Extensão dos ensaios realizados com extensómetro não representem corretamente o comportamento do material. O extensómetro utilizado nos ensaios apresenta um comprimento de referência $L_0 = 25$ [mm] e as garras com as quais se seguraram os provetes possuem um comprimento somado $L_g = 105$ [mm]. Na figura 3.2 é possível observar a montagem experimental utilizada.



(a) Prensa hidráulica MTS (b) Montagem de um provete sem extensómetro (c) Montagem de um provete com extensómetro

Figura 3.2: Montagem experimental

3.2.1 Resultados

Tal como referido anteriormente, cada tecido (MAT 450 e WRM 800/450) foi ensaiado na sua direção longitudinal (L) e na sua direção transversal (T), obtendo-se então quatro conjuntos de resultados.

Uma vez que se realizaram ensaios com e sem o extensómetro, ao analisar atentamente os resultados desses ensaios constatou-se que existia uma discrepância entre os valores de extensão obtidos através do extensómetro e através do sensor de deslocamento da prensa (*Linear Variable Differential Transformer* (LVDT)). Posto isto, iniciou-se um estudo para esclarecer se essa discrepância se mantinha aproximadamente constante, isto é, se era uma característica da máquina, ou se era muito variável e dependia do tecido que se estava a ensaiar e de outros fatores.

Nos ensaios onde se utilizou o extensómetro guardaram-se os valores de extensão obtidos por ele e também os valores de extensão obtidos pelo LVDT. Os resultados foram analisados através da relação apresentada na equação 3.7.

$$cp = \frac{\text{valores obtidos do extensómetro}}{\text{valores obtidos do LVDT}} \quad (3.7)$$

Esta relação foi aplicada a todos os ensaios realizados, tendo-se concluído que os valores do coeficiente (cp) se mantinham aproximadamente constantes, variando entre 0.47 e 0.53 para os vários ensaios, sem que existisse uma correlação entre a variação do valor do coeficiente e o tecido ensaiado. Consequentemente, concluiu-se que o coeficiente representa uma característica da prensa MTS, tendo sido por isso denominado de "coeficiente característico da prensa MTS" e definiu-se o seu valor como a média dos valores apresentados anteriormente, ou seja, 0.5. A existência deste coeficiente, relativo à discrepância

entre os valores de extensão obtidos pelo extensómetro e os obtidos pelo LVDT, pode ter várias causas, dentre elas, a existência de folgas na prensa, de uma baixa rigidez de alguns componentes da máquina ou devido ao *software* de cálculo do deslocamento através do LVDT que a prensa utiliza não ser o mais preciso.

Contudo, para retirar o valor da Tensão de Rotura e obter a curva Tensão - Extensão dos materiais foi necessário, como referido anteriormente, realizar ensaios utilizando apenas as garras da MTS e obter os valores de extensão através do LVDT. Posto isto, e conhecendo o valor do coeficiente, todos os resultados de extensão apresentados ao longo da dissertação que foram obtidos sem a utilização do extensómetro, foram multiplicados por este coeficiente de modo a que possam ser comparados com os restantes.

3.2.1.1 MAT 450

Na tabela 3.3 são apresentados os resultados dos ensaios de tração para o tecido MAT 450 na sua direção longitudinal (L) e transversal (T). Estes resultados são obtidos através das expressões presentes na secção 3.2 e representam uma média dos valores calculados para cada provete. No Apêndice A, secção A.1, estão presentes os resultados completos.

Tabela 3.3: Resultados dos ensaios de MAT 450

	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Rotura	Módulo de Young [GPa]
MAT 450 - L	122.84	0.019	7.45
MAT 450 - T	133.62	0.020	8.41

Nas figuras 3.3 e 3.4 é possível observar os gráficos Tensão - Extensão obtidos nos vários ensaios dos provetes de MAT 450 L e T, respetivamente. As curvas presentes nos gráficos foram obtidas dos ensaios sem extensómetro com a respetiva correção no valor da extensão.

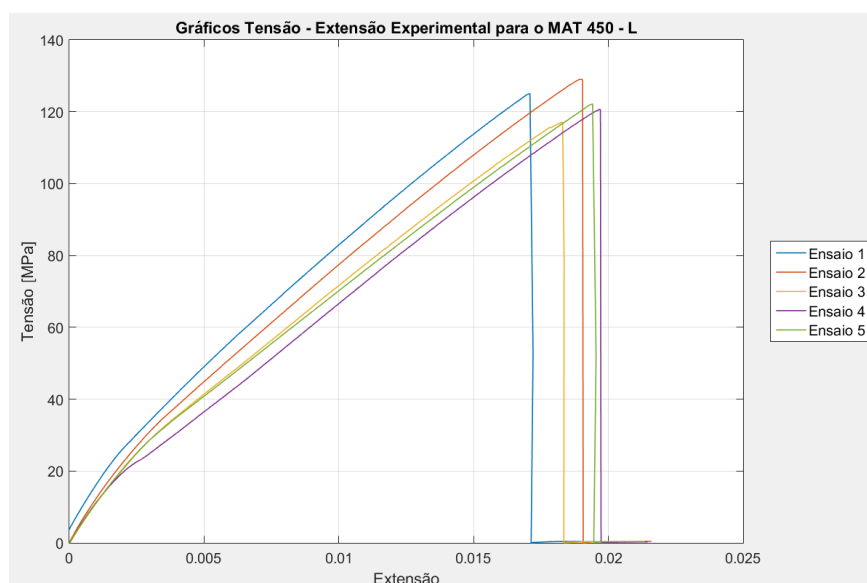


Figura 3.3: Gráficos Tensão - Extensão obtidos nos ensaios experimentais de MAT 450 L

3.2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS DAS LÂMINAS DE MAT 450 E DE WRM 800/450

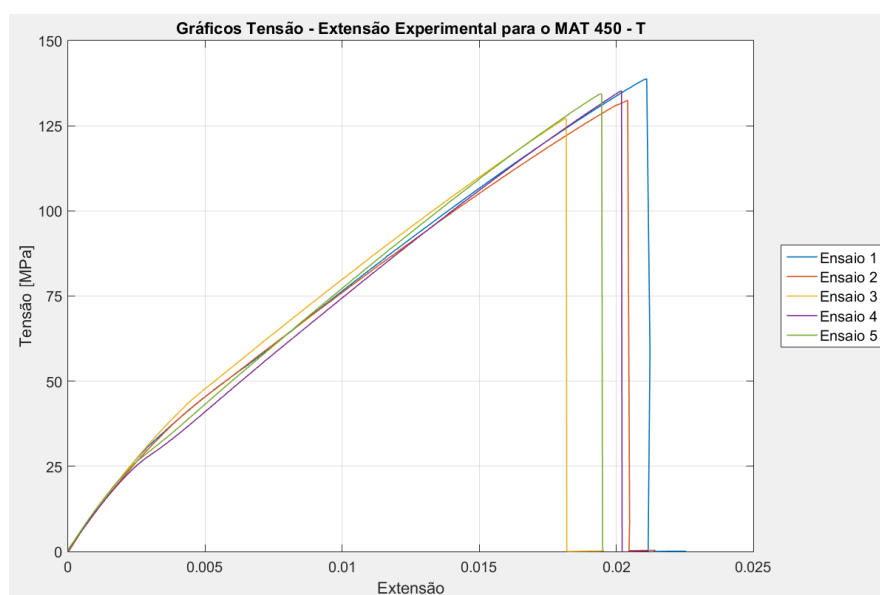


Figura 3.4: Gráficos Tensão - Extensão obtidos nos ensaios experimentais de MAT 450 T

É de realçar que este material é composto por fibras dispostas aleatoriamente, o que, em teoria, deveria produzir resultados aproximadamente iguais independentemente da direção na qual são retirados os provetes, isto é, deveria ter um comportamento isotrópico. No entanto, observando os resultados obtidos, percebe-se que, todos os parâmetros têm valores superiores na direção transversal relativamente à direção longitudinal, ainda que essa diferença seja moderada.

Analisando os gráficos pode concluir-se que os provetes de MAT 450 apresentam um comportamento frágil. É ainda possível observar que existe uma mudança de declive em todas as curvas Tensão - Extensão. Uma explicação para esta mudança de comportamento é o facto de, num primeiro momento, existir uma contribuição da matriz para a resistência do material, e num segundo momento essa contribuição deixar de surtir efeito por algum fenómeno de desagregação interna da matriz, diminuindo assim a resistência do material e o declive das curvas presentes na figura.

Uma característica do ensaio deste material que se verifica em ambas as direções nas quais o material foi ensaiado, consiste no facto de, muito perto do instante da fratura, ser possível ouvir pequenos estalos devido ao rompimento de algumas fibras e da matriz, seguidos de um som de grande intensidade que corresponde à falha catastrófica.

Nas figuras 3.5(a) e 3.5(b) são mostrados dois provetes depois de ensaiados, um de MAT 450 L e outro de MAT 450 T, respetivamente. A fratura de todos os provetes é semelhante sendo que, em ambas as direções, a fratura é frágil e localizada, ocorrendo falha das fibras e da matriz.

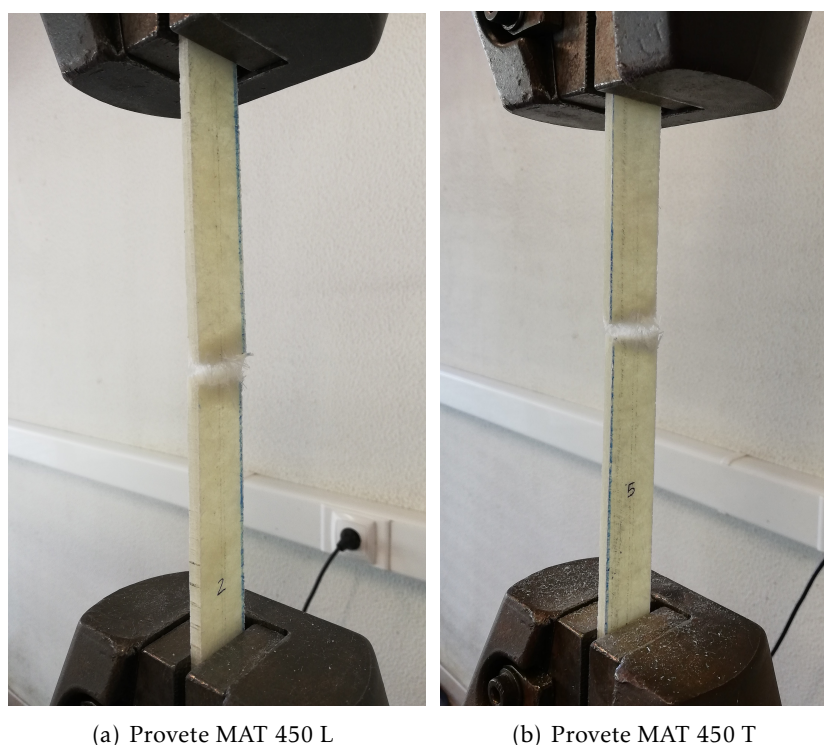


Figura 3.5: Fratura dos provetes

3.2.1.2 WRM 800/450

Os resultados dos ensaios dos provetes de WRM 800/450 estão presentes na tabela 3.4. À semelhança dos resultados dos provetes de MAT 450, também estes foram obtidos com recurso às expressões presentes na secção 3.2 e representam uma média dos resultados para todos os provetes. Os resultados experimentais completos dos ensaios deste material encontram-se no Apêndice A, secção A.2.

Tabela 3.4: Resultados dos ensaios de WRM 800/450

	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Rotura	Módulo de Young [GPa]
WRM 800/450 - L	208.08	0.023	13.75
WRM 800/450 - T	254.33	0.024	17.24

Da análise da tabela é possível constatar que a diferença presente nos valores da direção transversal em relação à direção longitudinal é bastante significativa. Uma vez que este material é composto por um tecido de fibras com orientação de 90° entre si e uma manta de fibras aleatórias, seria expectável que os resultados não variassem muito numa direção em relação à outra, dado que ambas as direções estão alinhadas com a orientação das fibras do tecido. Contudo, isto não se verificou e os resultados revelaram diferenças consideráveis.

Na figura 3.6 e 3.7 apresentam-se os gráficos Tensão - Extensão experimental dos vários ensaios dos provetes de WRM 800/450 L e T, respetivamente. As curvas presentes

3.2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS DAS LÂMINAS DE MAT 450 E DE WRM 800/450

nos gráficos foram obtidas dos ensaios sem extensômetro com a respectiva correção no valor da extensão.

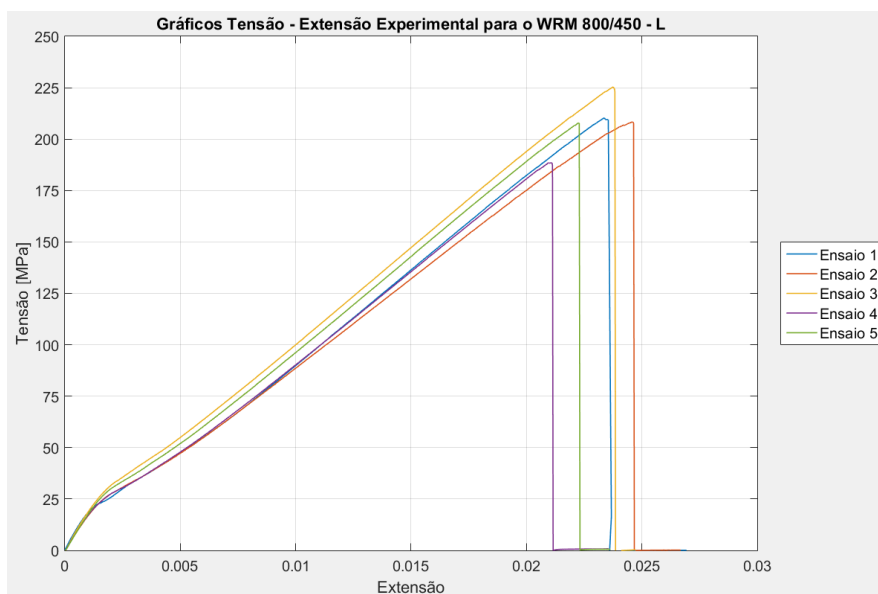


Figura 3.6: Gráficos Tensão - Extensão obtidos nos ensaios experimentais de WRM 800/450 L

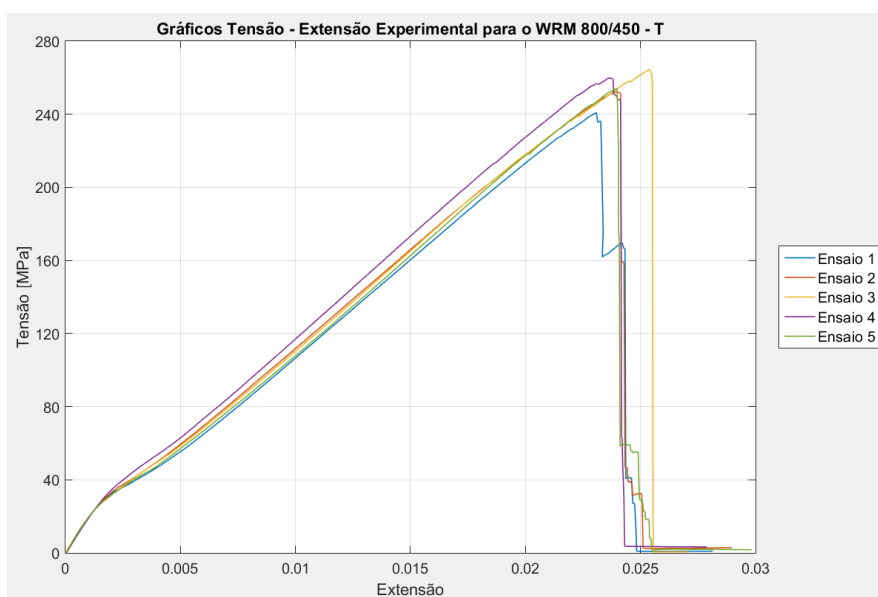


Figura 3.7: Gráficos Tensão - Extensão obtidos nos ensaios experimentais de WRM 800/450 T

No caso dos provetes de WRM 800/450, existe uma diferença no comportamento dos provetes ao longo do ensaio consoante a direção considerada, tal como se observa nas curvas Tensão - Extensão. Relativamente aos provetes com direção longitudinal, estes têm um comportamento semelhante aos de MAT 450. No entanto, quando se observa a figura 3.7, onde está presente o gráfico dos resultados dos provetes com direção transversal,

conclui-se que mesmo depois de ocorrer uma fratura no provete, este ainda é capaz de suportar uma certa carga, ou seja, certas zonas do provete não sofreram fratura completa num primeiro instante. Da análise dos resultados completos das diversas curvas verifica-se que este fenómeno ocorreu em 4 dos 5 ensaios realizados. Tal como se observou nos gráficos dos ensaios dos provetes de MAT 450, também nestes gráficos se verifica uma diminuição do declive da curva tensão - extensão. Uma possível explicação para esta mudança de comportamento foi apresentada na secção 3.2.1.1.

A fratura deste material é do tipo frágil, sendo que se estende a uma grande zona do provete. Neste caso está presente mais do que um mecanismo de fratura, uma vez que é possível observar delaminação entre as várias lâminas, falha da fibra e falha da matriz. Durante a maioria do tempo no qual decorre o ensaio é possível ouvir pequenos estalos, correspondentes à rotura de algumas fibras. Quando se dá a falha catastrófica do material é libertado um som de grande intensidade, tal como ocorre para os provetes de MAT 450.

Na figura 3.8 está representada a falha de dois provetes, sendo que a figura 3.8(a) corresponde a um provete WRM 800/450 L e a figura 3.8(b) corresponde a um provete WRM 800/450 T.

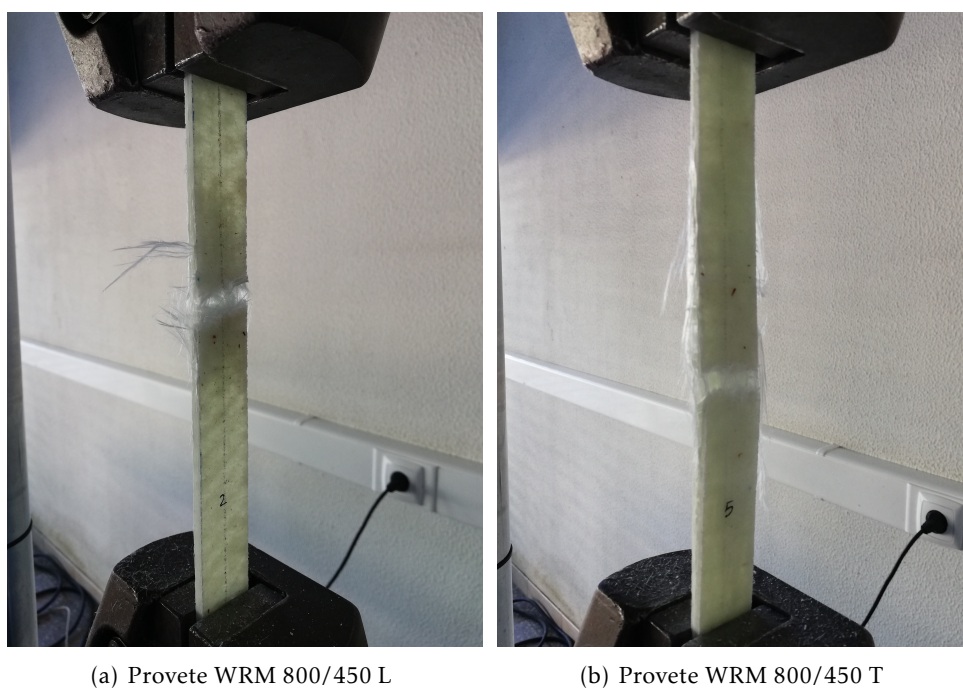


Figura 3.8: Fratura dos provetes

3.3 Ensaios Experimentais dos Laminados

Após o ensaio das lâminas de apenas um material e da obtenção das suas propriedades, procedeu-se à realização dos ensaios dos laminados. Neste caso foram considerados dois grupos de ensaios experimentais de provetes contendo lâminas de MAT 450 e de WRM

800/450, com duas seqüências de empilhamento diferentes A e B.

3.3.1 Ensaios dos Provetes com a Sequência A

Este conjunto de ensaios foi realizado pela *Bureau Veritas*, onde foram ensaiados provetes contendo treze lâminas, dez lâminas de WRM 800/450 e três lâminas de MAT 450, todas com uma orientação de 0° , com a seqüência de empilhamento A, que se encontra na figura 3.9.

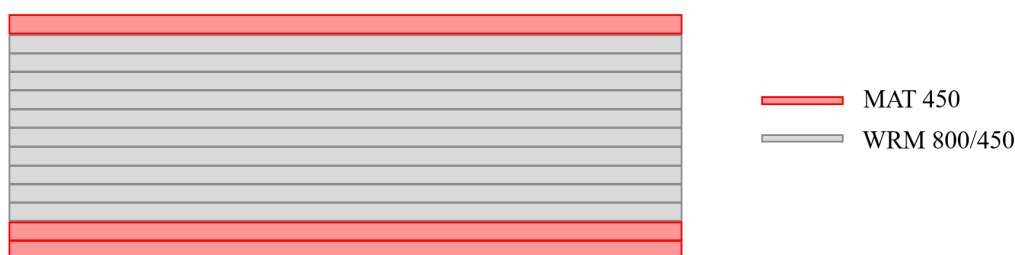


Figura 3.9: Sequência de empilhamento A

Os ensaios foram efetuados a uma velocidade de 2 [mm/min] com provetes com as dimensões aproximadas de 340 [mm] de comprimento, 25 [mm] de largura e 21 [mm] de espessura. A montagem experimental utilizada para os ensaios destes provetes incluía um extensômetro, com um comprimento de referência de 50 [mm], que foi utilizado para medir com maior precisão a extensão sofrida pelo provete. A distância entre as garras que seguravam o provete era de 150 [mm].

A *Bureau Veritas* procedeu à realização dos ensaios sendo que estes foram efetuados em duas direções, a longitudinal e a transversal. Para cada uma das direções foram ensaiados cinco provetes e os resultados obtidos foram apresentados no relatório [29]. Na tabela 3.5 é apresentado um resumo desses resultados, sendo que os resultados completos estão presentes no Anexo I.

Tabela 3.5: Resultados dos ensaios dos provetes com a seqüência A [29]

	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Rotura	Módulo de Young [GPa]
Direção Longitudinal	152.00	0.016	11.40
Direção Transversal	195.00	0.019	12.10

Observando os resultados obtidos, pode concluir-se que o laminado apresenta valores maiores de todos os parâmetros na direção transversal, o que também se verificou aquando dos ensaios das lâminas com apenas um material.

Relativamente ao comportamento deste laminado, o mesmo é do tipo frágil em ambas as direções, tal como se verificou nos ensaios das lâminas individuais (secção 3.2). Este comportamento pode ser observado através das figuras 3.10 e 3.11, onde estão representados os gráficos Tensão - Extensão dos ensaios realizados, na direção longitudinal e na direção transversal, respetivamente.

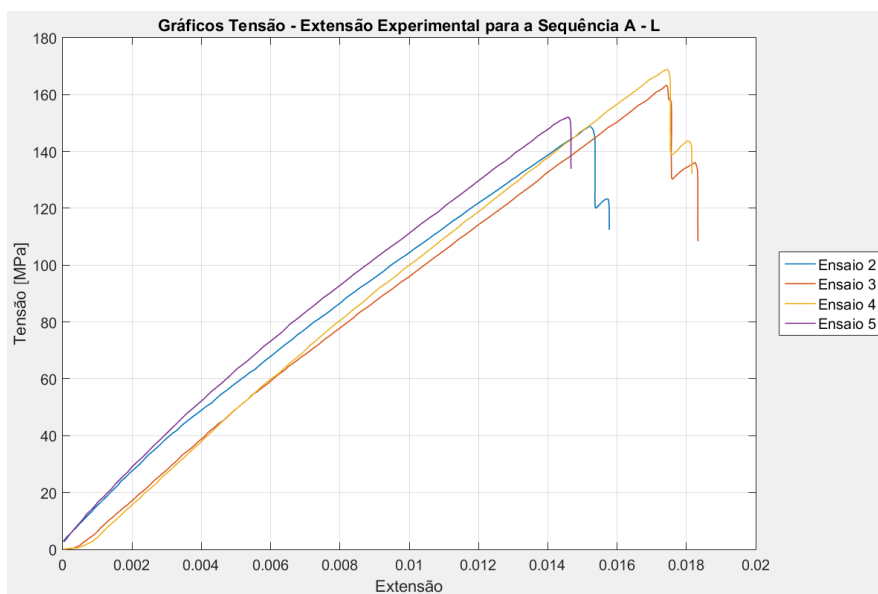


Figura 3.10: Gráficos Tensão - Extensão obtidos nos ensaios experimentais da Sequência A - L

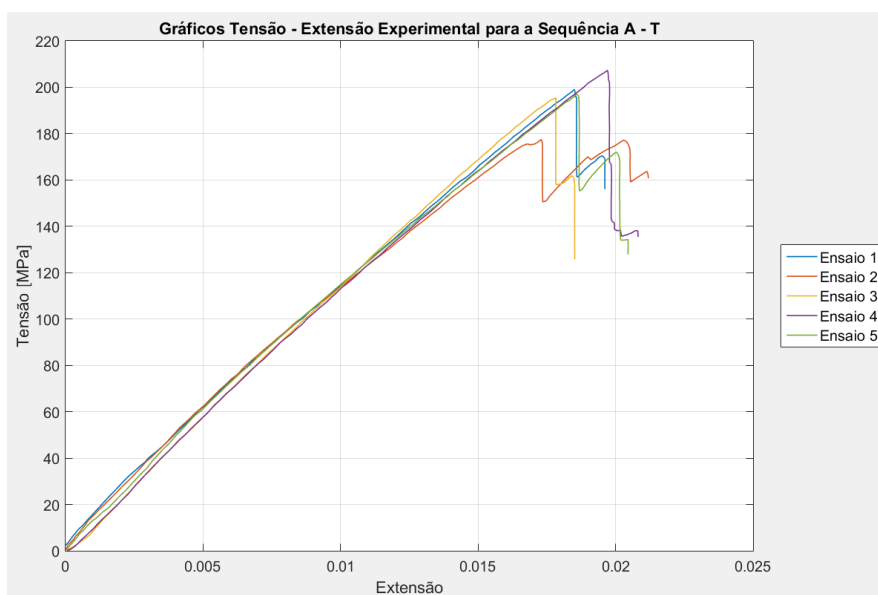


Figura 3.11: Gráficos Tensão - Extensão obtidos nos ensaios experimentais da Sequência A - T

É de notar que na figura 3.10 são apresentados apenas quatro ensaios dos cinco realizados, dado que no primeiro ensaio ocorreu um problema com o extensómetro, não se considerando esse ensaio para os resultados.

Através destas figuras verifica-se que, num primeiro instante, não ocorreu a rotura completa dos provetes, uma vez que estes ainda foram capazes de suportar alguma carga depois de terem atingido o valor de tensão máxima. Analisando a figura 3.10, observa-se que para o caso deste laminado também se verifica o fenómeno de diminuição do

declive da curva num determinado ponto do ensaio, apesar de neste caso essa mudança ser bastante menos acentuada.

A fratura deste laminado é bastante semelhante à fratura dos provetes de WRM 800/450, o que era expectável uma vez que estes provetes são maioritariamente constituídos por lâminas desse material.

3.3.2 Ensaios dos Provetes com a Sequência B

O segundo grupo de ensaios realizou-se numa prensa hidráulica MTS com uma montagem experimental idêntica à apresentada na figura 3.2. Os provetes deste laminado foram ensaiados apenas na direção longitudinal e apresentavam dimensões aproximadas de 295 [mm] de comprimento, 6.1 [mm] de largura e 12.2 [mm] de espessura.

Os ensaios foram efetuados a uma velocidade de 2 [mm/min] e com uma distância entre garras de 190 [mm]. Tal como para os ensaios das lâminas apresentados na secção 3.2, também neste caso foram efetuados três ensaios com o extensómetro, com um comprimento de referência $L_0 = 25$ [mm], e cinco ensaios sem o extensómetro, onde o comprimento somado das garras é $L_g = 105$ [mm].

Os provetes ensaiados eram constituídos por nove lâminas, cinco lâminas de WRM 800/450 e quatro lâminas de MAT 450, todas com a orientação de 0° , e apresentavam a sequência de empilhamento presente na figura 3.12.

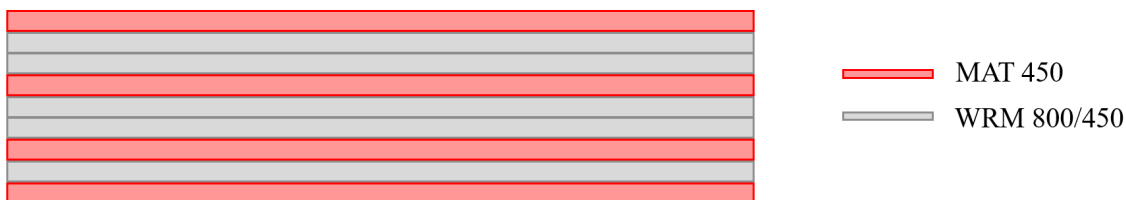


Figura 3.12: Sequência de empilhamento B

O resumo dos resultados obtidos para a tensão de rotura, extensão de rotura e módulo de Young é apresentado na tabela 3.6. É de notar que, à semelhança dos ensaios das lâminas, também no caso deste laminado foi aplicado o coeficiente característico da prensa MTS (cp), apresentado na secção 3.2.1, aos valores de extensão obtidos através das garras, de modo a que estes correspondam aos valores de extensão reais. Os resultados experimentais completos encontram-se no Apêndice B.

Tabela 3.6: Resultados dos ensaios dos provetes com a sequência B

	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Rotura	Módulo de Young [GPa]
Direção longitudinal	148.19	0.014	13.68

Na figura 3.13 encontram-se representadas as curvas Tensão-Extensão deste grupo de ensaios, através das quais é possível verificar que o laminado apresenta um comportamento frágil. As curvas presentes no gráfico foram obtidas dos ensaios sem extensómetro

com a respetiva correção no valor da extensão.

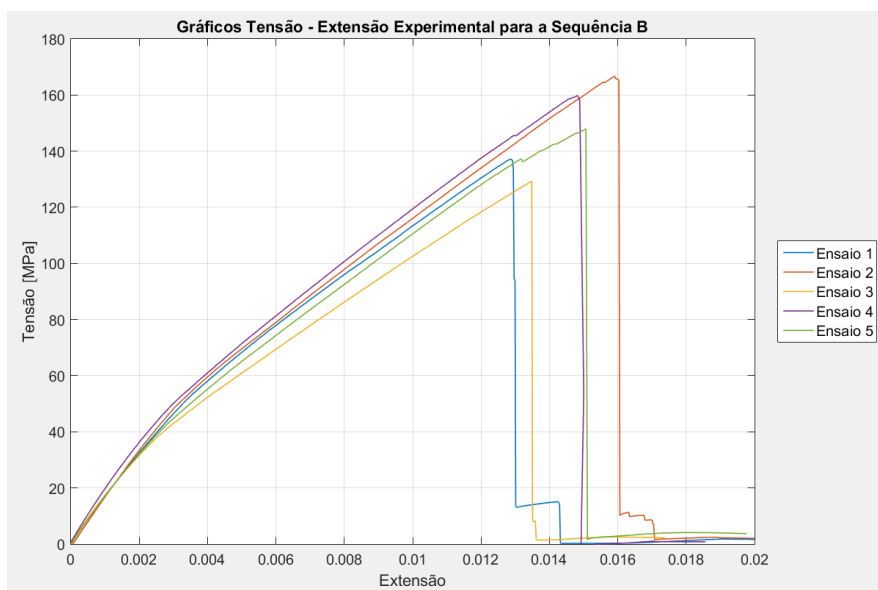


Figura 3.13: Gráficos Tensão - Extensão obtidos nos ensaios experimentais da Sequência B - L

Analisando esta figura observa-se que, assim como para o laminado com a sequência de empilhamento A, também este não sofre rotura total num primeiro instante, sendo ainda capaz de suportar uma pequena carga até sofrer a rotura completa. Contudo, existem algumas diferenças nas diversas curvas relativamente ao instante em que se observam os primeiros sinais de falha do provete. Os fenómenos de rotura incompleta podem manifestar-se em duas zonas, na zona de descarregamento ou na zona de carregamento. Quando a rotura incompleta ocorre na zona de descarregamento, a carga que é suportada depois dessa rotura já tem um valor baixo pois a falha abrange uma zona maior do provete, como se verifica nas curvas correspondentes aos ensaios 1, 2 e 3. Para o caso em que essa rotura se dá na zona de carregamento, a carga suportada ainda é significativa dado que a primeira falha ocorre apenas para uma pequena zona do provete, o que se observa nas curvas dos ensaios 2, 4 e 5. Estas pequenas falhas que surgem no provete podem consistir na rotura de algumas fibras ou de uma pequena parte da matriz, ou na delaminação de duas lâminas numa zona localizada.

Observando as curvas conclui-se ainda que, à semelhança do que aconteceu para as lâminas individuais e para o laminado com a sequência de empilhamento A, também no caso desta sequência de empilhamento ocorre uma diminuição do declive das curvas tensão - extensão, que representa uma diminuição da resistência mecânica do material.

A fratura deste laminado é do tipo frágil e estende-se pela maioria do comprimento do provete. Na figura 3.14 está representado um dos provetes que sofreu falha durante o ensaio, onde se observam vários mecanismos de fratura como delaminação, fratura da fibra e da matriz.



Figura 3.14: Fratura de um provete com sequência de empilhamento B

3.4 Modelos Numéricos das Lâminas de MAT 450 e WRM 800/450

Como forma de compreender se é ou não possível prever a falha dos materiais utilizados através de modelação numérica, foram elaborados dois modelos numéricos, sendo que cada um corresponde a um desses materiais, MAT 450 e WRM 800/450. Com a construção destes modelos pretende-se alcançar os mesmos resultados obtidos pela via experimental presentes na secção 3.2 e, a partir daí, construir os modelos dos laminados apresentados na secção 3.3 e quantificar se estes conseguem também reproduzir os resultados experimentais e prever a ocorrência da falha nos laminados.

Os dois modelos construídos, de MAT 450 e de WRM 800/450, são modelos à meso-escala, ou seja cada lâmina do provete é modelada individualmente. Na elaboração destes modelos utilizou-se o elemento *SOLID186* que é um elemento sólido 3D, com vinte nós e três graus de liberdade por cada nó (translação nas direções x , y e z) [30].

Os modelos têm uma geometria semelhante, sendo que ambos possuem 195 [mm] de comprimento, 25 [mm] de largura e 5 [mm] de espessura. Contudo, uma vez que o WRM 800/450 é um tecido que apresenta uma espessura superior, o seu modelo é constituído por três lâminas com 1.67 [mm] de espessura, ao passo que o modelo de MAT 450 possui cinco lâminas com 1 [mm] de espessura. Na figura 3.15, estão representados ambos os modelos. Relativamente ao comprimento do modelo é de notar que, apesar do comprimento dos provetes ensaiados experimentalmente ser cerca de 300 [mm], nos modelos numéricos apenas se consideraram 195 [mm], já que não se pretende modelar a zona do provete que se encontra no interior das garras.

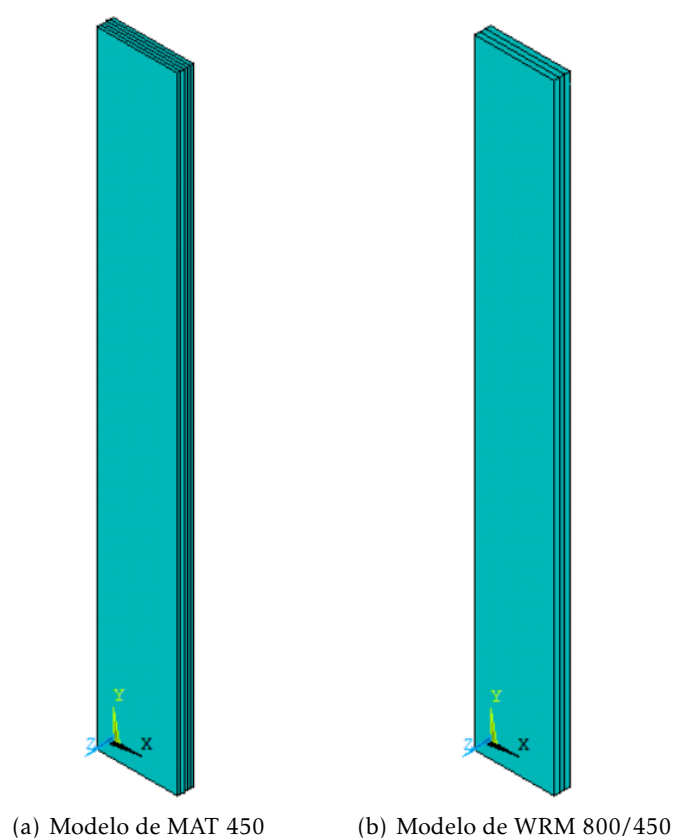


Figura 3.15: Modelos numéricos das lâminas

No que diz respeito ao material dos modelos, dos resultados obtidos na fase experimental concluiu-se que existiam algumas diferenças nas propriedades dependendo da orientação das lâminas. No entanto, optou-se por considerar que as lâminas apresentavam um comportamento isotrópico, pois não se possuía qualquer informação relativa aos valores dos módulos de distorção, não sendo por isso possível considerar o material das lâminas como ortotrópico. Contudo, para que se pudessem comparar os valores obtidos através dos modelos numéricos com os valores experimentais, realizaram-se quatro simulações de modelos isotrópicos, duas para o MAT 450, uma na direção longitudinal e outra na direção transversal e duas para o WRM 800/450, sendo também uma em cada direção. Consideraram-se os módulos de Young dos materiais como sendo os presentes na tabela 3.7, os quais foram obtidos através dos ensaios experimentais e das equações presentes na norma ISO 527-1 (2012), apresentadas na secção 3.2.

Tabela 3.7: Propriedades do MAT 450 e do WRM 800/450

	Módulo de Young [GPa]	Coefficiente de Poisson
MAT 450 - L	7.45	0.35
MAT 450 - T	8.41	0.35
WRM 800/450 - L	13.75	0.35
WRM 800/450 - T	17.24	0.35

Dado que se pretende perceber se é possível prever quando ocorre a falha do material, é necessário modelar os critérios de falha. Para este estudo optou-se por utilizar separadamente dois critérios dos vários existentes, de modo a selecionar dos dois o que produzia melhores resultados. Os critérios utilizados foram o critério da Tensão Máxima (TM) e o critério LaRC04. Para a utilização destes critérios é essencial conhecer os valores da resistência das lâminas X_T , X_C , Y_T , Y_C e S .

Por falta de informação e uma vez que se assumiram as lâminas como isotrópicas, considerou-se $X_C = Y_T = Y_C = S = X_T$ para a direção que se considerasse no modelo. Os valores de X_T , que estão presentes na tabela 3.8, são os valores da tensão de rotura obtidos através dos ensaios das lâminas (secção 3.2). Os pressupostos assumidos podem incorrer em pequenos desvios nos resultados numéricos face aos resultados experimentais, contudo considerou-se uma aproximação aceitável, dado que não se julgou que os restantes valores de resistência das lâminas fossem relevantes para a simulação efetuada, onde apenas se colocaram os modelos à tração na direção y .

Tabela 3.8: Resistência das lâminas

	$X_C = Y_T = Y_C = S = X_T$ [MPa]
MAT 450 - L	122.84
MAT 450 - T	133.62
WRM 800/450 - L	208.08
WRM 800/450 - T	254.33

Após a definição das propriedades do material, procedeu-se à criação da malha. Foi realizado um teste de convergência de malha, através do qual se procurou definir o tamanho máximo dos elementos que produziram resultados independentes da sua dimensão. O gráfico que resultou deste estudo apresenta-se na figura 3.16.

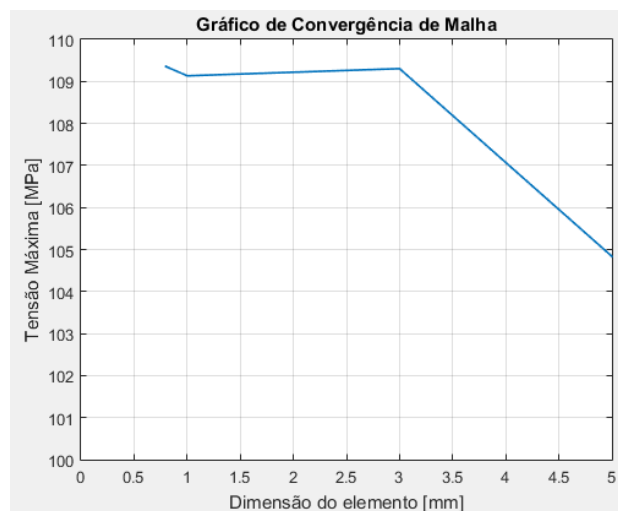


Figura 3.16: Gráfico de convergência de malha

O estudo foi feito apenas até à dimensão de 0.8 [mm] pois elementos com dimensões inferiores requeriam uma enorme potência computacional, dado que produziam modelos demasiado pesados e complexos. Contudo, concluiu-se que a dimensão de 1 [mm] era indicada para produzir resultados independentes da malha, uma vez que nessa zona o valor da tensão mantém-se aproximadamente constante.

Na figura 3.17 está representada a malha construída, na qual se utilizou apenas um elemento na direção da espessura de cada lâmina individual, dado que estes modelos são à meso-escala, e nas restantes direções elementos com 1 [mm] de lado, devido às conclusões retiradas do estudo de convergência de malha.

Ainda na mesma figura estão representadas as condições de fronteira e de carregamento, que consistem na simulação de um encastramento na extremidade inferior do provete (a azul) e num deslocamento aplicado, δ , de 20 [mm] no sentido positivo do eixo y na sua extremidade superior (a vermelho), respetivamente.

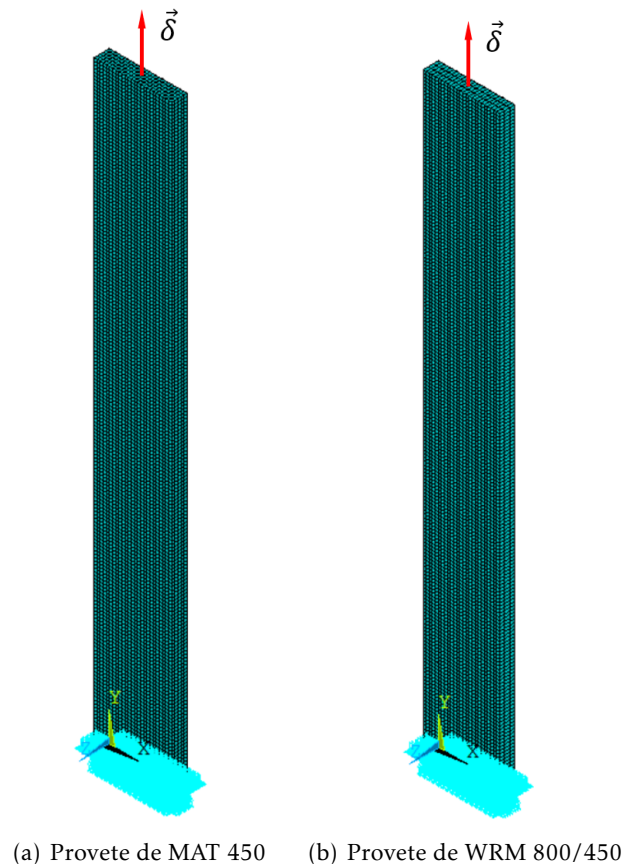


Figura 3.17: Representação da malha e das condições de fronteira e carregamento

Estando definida a totalidade do modelo realizaram-se várias análises não lineares para todos os materiais e todas as direções consideradas, variando o critério de falha que se utilizava. Os resultados dessas análises estão presentes na tabela 3.9. Nas figuras 3.18 e 3.19 encontram-se representadas as curvas Tensão - Extensão obtidas dessas análises, para o critério da Tensão Máxima e para o critério LaRC04, respetivamente.

3.4. MODELOS NUMÉRICOS DAS LÂMINAS DE MAT 450 E WRM 800/450

Tabela 3.9: Resultados obtidos para os modelos das lâminas

	Critério da Tensão Máxima		Critério LaRC04	
	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Rotura	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Rotura
MAT 450 - L	109.13	0.015	154.18	0.022
MAT 450 - T	123.48	0.016	163.96	0.020
WRM 800/450 - L	188.76	0.015	263.56	0.020
WRM 800/450 - T	241.47	0.015	323.10	0.020

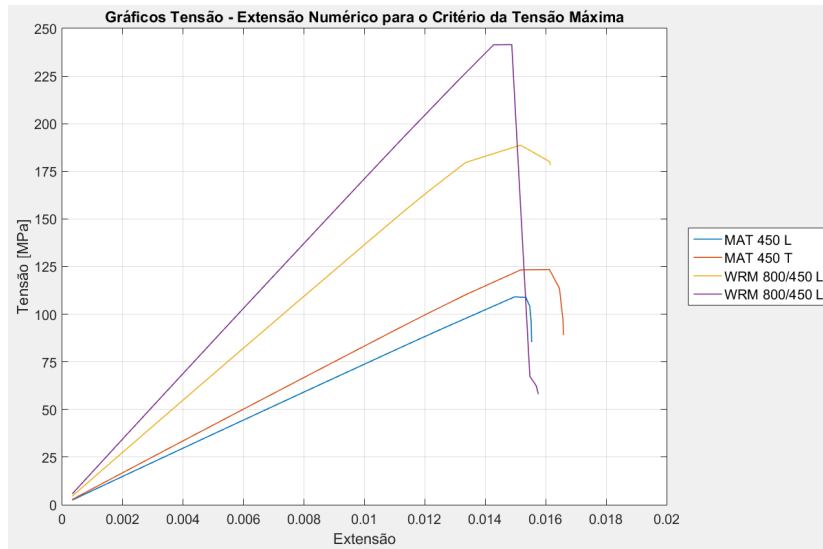


Figura 3.18: Gráfico dos resultados obtidos com o critério da Tensão Máxima

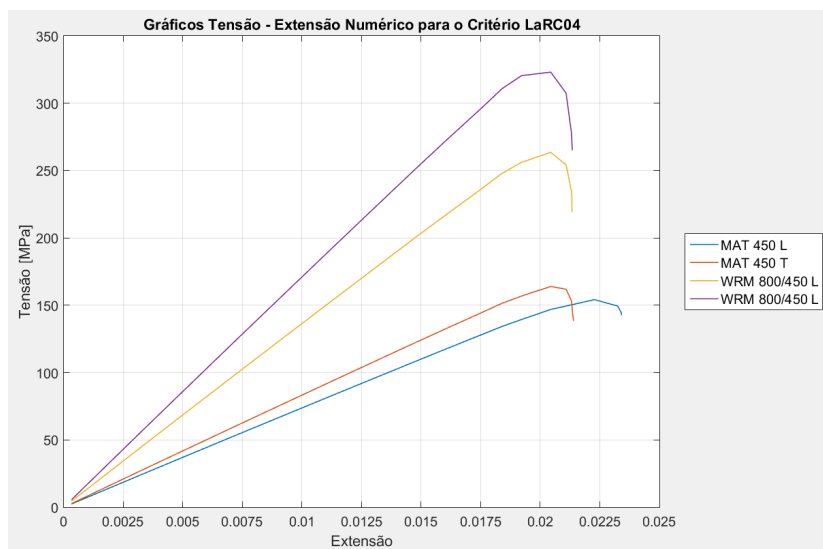


Figura 3.19: Gráfico dos resultados obtidos com o critério LaRC04

Através da tabela 3.9 observa-se que existe uma discrepância nos valores da tensão de rotura obtidos pelos diferentes critérios para o mesmo material. Este é um resultado expectável já que os critérios são baseados em diferentes pressupostos e expressões de

cálculo, tal como apresentado na secção 2.2.3. Independentemente da diferença entre os valores, ambos os critérios foram capazes de prever a falha do material e para valores de extensão de rotura bastante próximos, tal como se pode observar nas figuras 3.18 e 3.19.

3.5 Modelos Numéricos dos Laminados

Construídos os modelos das lâminas e obtidos os seus resultados, procedeu-se à construção dos modelos numéricos dos laminados. Nesta secção elaboraram-se dois modelos sendo que um deles corresponde ao laminado com a sequência de empilhamento A e o outro ao laminado com a sequência de empilhamento B, apresentados na secção 3.3. À semelhança dos modelos das lâminas, também estes são modelos à meso-escala e foram construídos utilizando o elemento *SOLID186*. Na figura 3.20 estão representados os modelos dos laminados, com a respetiva sequência de empilhamento.

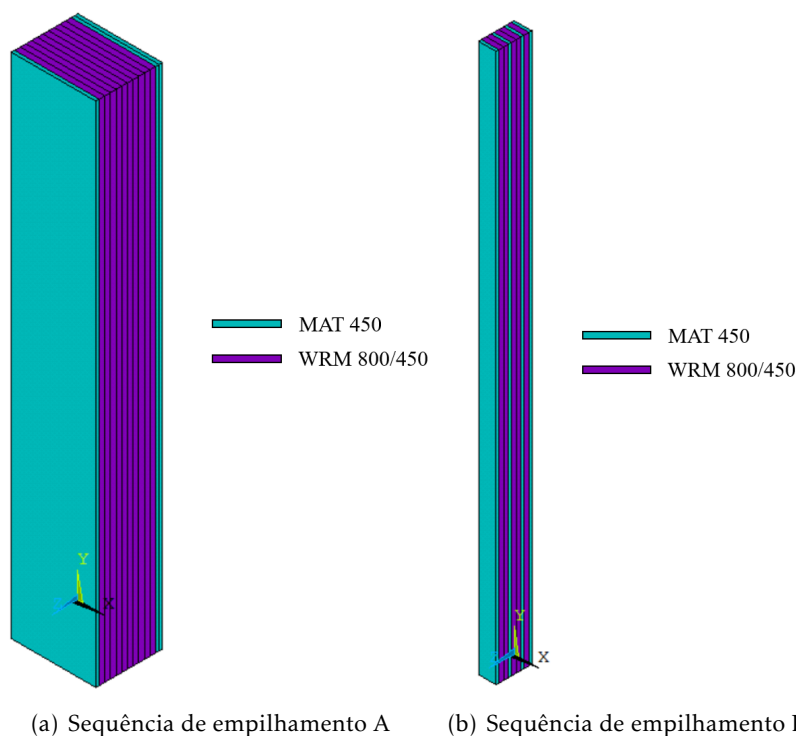


Figura 3.20: Modelos dos laminados com as respetivas sequências de empilhamento

O laminado com a sequência de empilhamento A, presente na figura 3.20(a), é composto por treze lâminas, três de MAT 450 e dez de WRM 800/450, e apresenta 150 [mm] de comprimento, 25 [mm] de largura e 19.7 [mm] de espessura, já que cada lâmina de MAT 450 e de WRM 800/450 têm 1 [mm] e 1.67 [mm] de espessura, respetivamente. Já o laminado com a sequência de empilhamento B (figura 3.20(b)) possui dimensões de 190 [mm] de comprimento, 6.1 [mm] de largura e 12.35 [mm] de espessura, contendo quatro lâminas de MAT 450 e cinco lâminas de WRM 800/450, cada uma com 1 [mm] e 1.67 [mm] de espessura, respetivamente. É de realçar que apenas se modelou um provete

com 150 [mm] de comprimento, no caso da sequência A, e com 190 [mm] de comprimento, no caso da sequência B, por não ser necessário quantificar o que se passa na zona que fica segura pelas garras.

Definida a geometria dos provetes procedeu-se à atribuição das propriedades dos materiais aos modelos. Tal como foi realizado para os modelos das lâminas, também para o modelo com a sequência A foram consideradas duas direções para as simulações, a direção longitudinal e direção transversal. Relativamente ao modelo com a sequência B apenas se considerou uma direção para as simulações, a direção longitudinal. As propriedades foram atribuídas consoante a direção que se pretendia analisar e estão presentes na tabela 3.7, já apresentada. As propriedades destes materiais são as mesmas que foram utilizadas na modelação das lâminas, isto porque o modelo é à meso-escala e permite que se utilize o módulo de Young do material de cada lâmina em detrimento de um módulo de Young equivalente que corresponde ao módulo de Young do laminado.

Dado que estes modelos têm como objetivo prever a falha do laminado, foi necessário utilizar novamente os critérios de falha. Tal como nos modelos das lâminas, também nestes modelos foram utilizados separadamente o critério da Tensão Máxima e o critério LaRC04. Os valores da resistência das lâminas necessários para a aplicação dos critérios encontram-se na tabela 3.8. De seguida procedeu-se à criação da malha de ambos os modelos que está representada na figura 3.21.

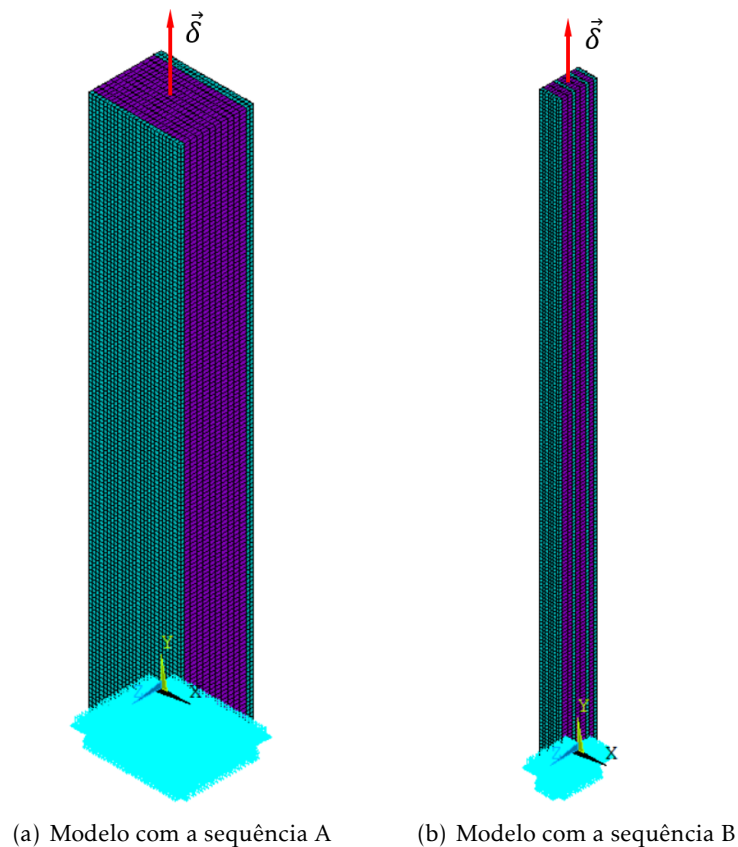


Figura 3.21: Representação da malha e das condições de fronteira e carregamento

Para ambas as sequências de empilhamento começou-se por construir a malha para as lâminas de MAT 450, seguidas das lâminas de WRM 800/450. Na direção da espessura cada lâmina apresenta apenas um elemento, por se tratarem de modelos à meso-escala, enquanto que nas restantes direções os elementos têm uma dimensão de 1 [mm]. Ainda na figura 3.21 é possível observar as condições de fronteira e de carregamento aplicadas nos modelos, sendo estas, um encastramento na extremidade inferior dos provetes (a azul) e um deslocamento aplicado de 20 [mm] na extremidade superior dos provetes (a vermelho).

Após ambos os modelos se encontrarem totalmente definidos foram realizadas análises não lineares para a direção longitudinal (L) e transversal (T) ou apenas longitudinal para o caso da sequência B, variando o critério de falha utilizado. Os resultados destas análises estão presentes na tabela 3.10.

Tabela 3.10: Resultados obtidos para os modelos dos laminados

	Critério da Tensão Máxima		Critério LaRC04	
	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Rotura	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Rotura
Laminado A - L	179.79	0.015	251.68	0.021
Laminado A - T	218.19	0.015	310.90	0.021
Laminado B - L	176.57	0.016	252.15	0.022

À semelhança dos resultados apresentados para os modelos das lâminas, também aqui se observa uma discrepância entre os valores da tensão máxima obtidos pelos dois critérios para o mesmo material, que ocorre devido à diferença de pressupostos que compõem cada um dos critérios. Nos gráficos que se apresentam nas figuras 3.22 e 3.23, pode observar-se que, para ambos os critérios, é possível prever a falha do material.

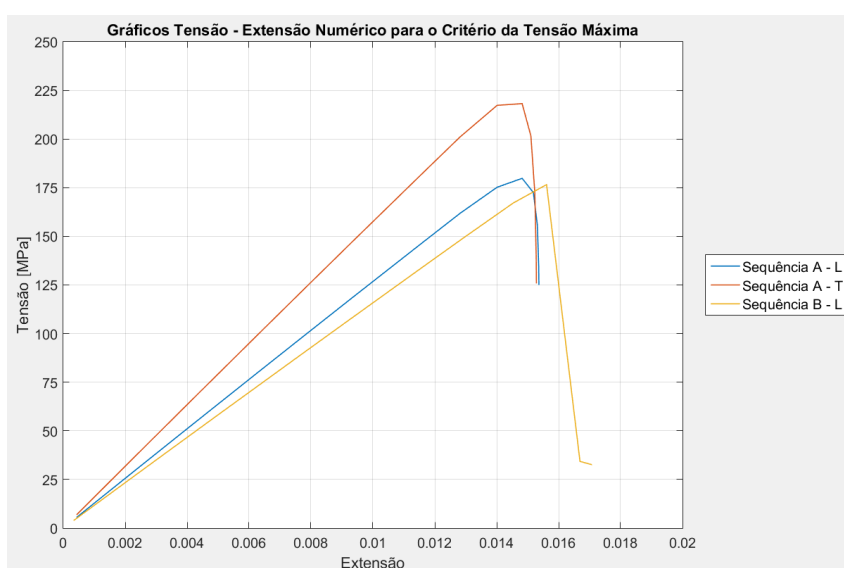


Figura 3.22: Gráfico dos resultados obtidos com o critério da Tensão Máxima para os laminados

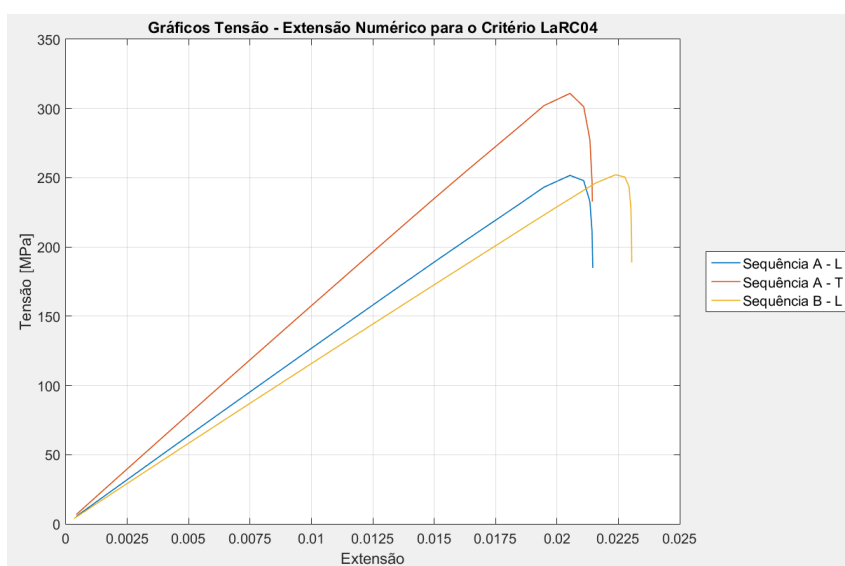


Figura 3.23: Gráfico dos resultados obtidos com o critério LaRC04 para os laminados

3.6 Comparação de Resultados e Conclusões

Como forma de compreender melhor se os modelos numéricos são ou não capazes de replicar os resultados experimentais e atingir um valor de tensão de rotura correspondente à falha do material, procedeu-se à comparação dos resultados numéricos e experimentais obtidos para as lâminas e para os laminados.

3.6.1 Resultados Obtidos para as Lâminas de Compósito

Nas tabelas 3.11 e 3.12 estão presentes os resultados da tensão de rotura obtidos através dos vários métodos utilizados. Ainda nestas tabelas encontra-se o valor do desvio relativo em percentagem, calculado através da equação 3.8.

$$\text{Desvio relativo [\%]} = \frac{\text{valor numérico} - \text{valor experimental}}{\text{valor experimental}} \times 100 \quad (3.8)$$

Tabela 3.11: Comparação dos resultados experimentais com os resultados numéricos obtidos através do critério da Tensão Máxima para os modelos das lâminas

	Tensão de Rotura [MPa]		
	Resultados Experimentais	Resultados Numéricos do critério da Tensão Máxima	Desvio relativo [%]
MAT 450 - L	122.84	109.13	-11.16
MAT 450 - T	133.62	123.48	-7.59
WRM 800/450 - L	208.08	188.76	-9.28
WRM 800/450 - T	254.33	241.47	-5.06

Tabela 3.12: Comparação dos resultados experimentais com os resultados numéricos obtidos através do critério LaRC04 para os modelos das lâminas

	Tensão de Rotura [MPa]		
	Resultados Experimentais	Resultados Numéricos do critério LaRC04	Desvio relativo [%]
MAT 450 - L	122.84	154.18	25.51
MAT 450 - T	133.62	163.96	22.71
WRM 800/450 - L	208.08	263.56	26.66
WRM 800/450 - T	254.33	323.10	27.04

Através das tabelas apresentadas anteriormente é possível retirar conclusões relativamente à precisão dos modelos em obter o valor da tensão de rotura do material. Observando a tabela 3.11, constata-se que existe um desvio relativo por defeito que varia entre cerca de 5% e 11% entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados obtidos pelo critério da Tensão Máxima. Isto significa que a utilização deste critério na simulação numérica deste material providencia resultados relativamente precisos e mais conservadores, permitindo uma margem de segurança. Analisando agora a tabela 3.12, nota-se que os valores do desvio relativo são substancialmente maiores que os da tabela anterior (entre cerca de 23% e 27%), o que significa que os resultados obtidos utilizando o critério LaRC04 são mais afastados dos resultados experimentais. Neste caso os desvios são por excesso, isto é, os resultados numéricos têm valores superiores aos experimentais.

Nas figuras 3.24 e 3.25 estão representados numa área cinzenta os resultados experimentais, em conjunto com a curva média dos resultados experimentais e a curva numérica obtida pelo critério da Tensão Máxima e pelo critério LaRC04, respetivamente, para os provetes de MAT 450 L. Gráficos semelhantes para os provetes de MAT 450 T estão presentes no Apêndice C, secção C.1.

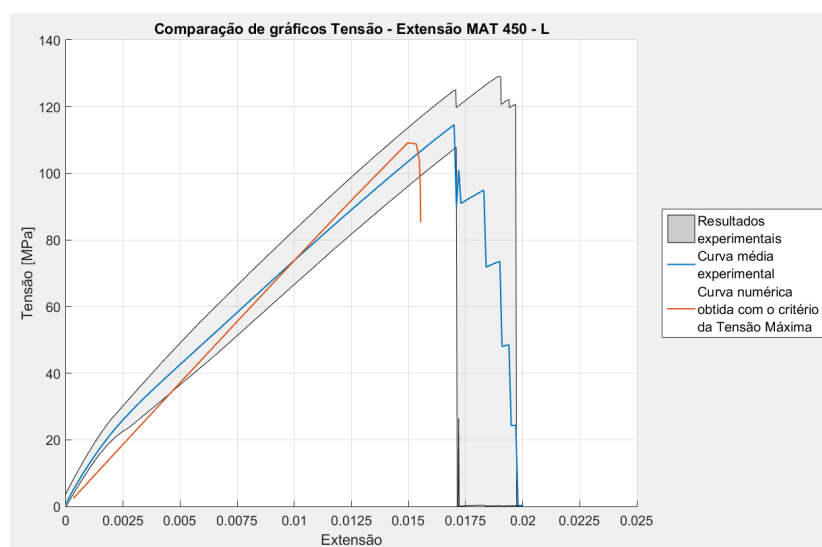


Figura 3.24: Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério da Tensão Máxima para os provetes de MAT 450 L

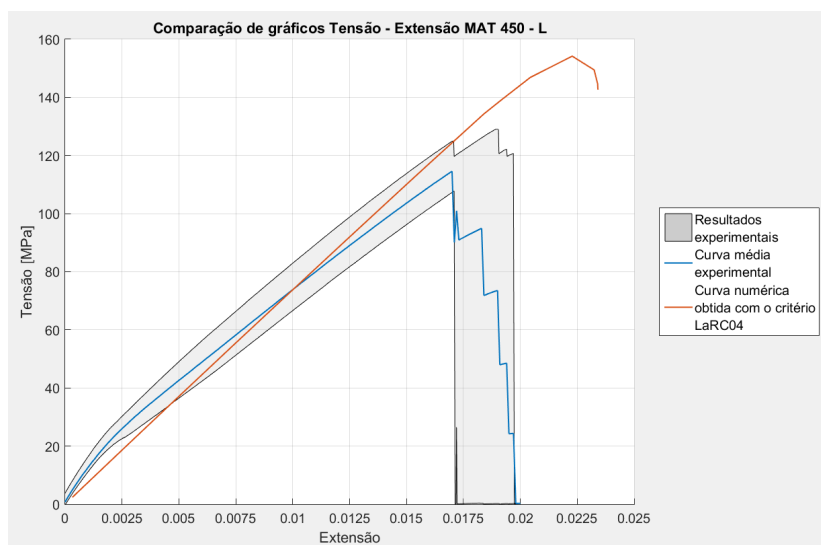


Figura 3.25: Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério LaRC04 para os provetes de MAT 450 L

Através da representação gráfica das curvas Tensão - Extensão e da obtenção da curva média experimental (a azul), é possível perceber que a curva numérica da figura 3.24 apresenta valores de tensão de rotura e de extensão de rotura bastante próximos da média, ainda que não sejam os valores exatos. Esta discrepância entre valores pode dever-se ao facto de, no caso dos resultados numéricos, não existir uma mudança de declive da curva Tensão - Extensão. No caso da figura 3.25 os valores obtidos numericamente diferem bastante dos experimentais.

Nas figuras 3.26 e 3.27 estão representados gráficos semelhantes aos anteriores para os provetes WRM 800/450 L. Os gráficos para os provetes de WRM 800/450 T estão presentes no Apêndice C, secção C.2.

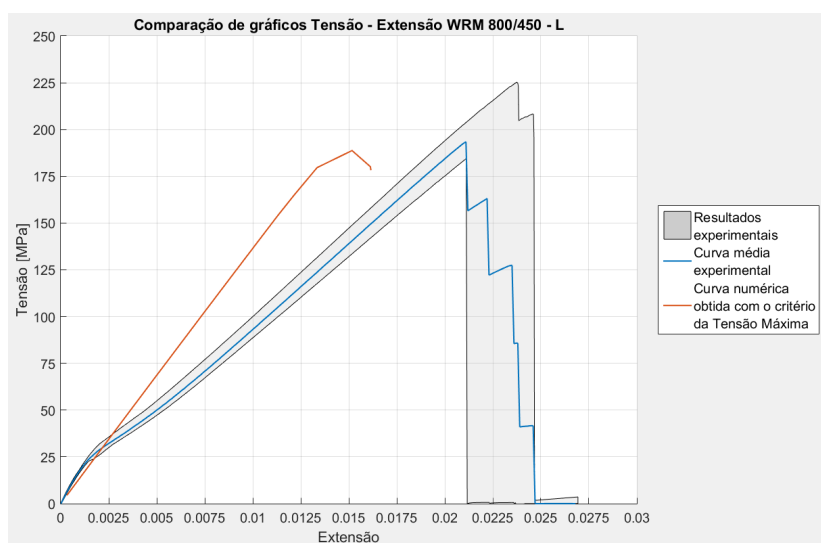


Figura 3.26: Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério da Tensão Máxima para os provetes de WRM 800/450 L

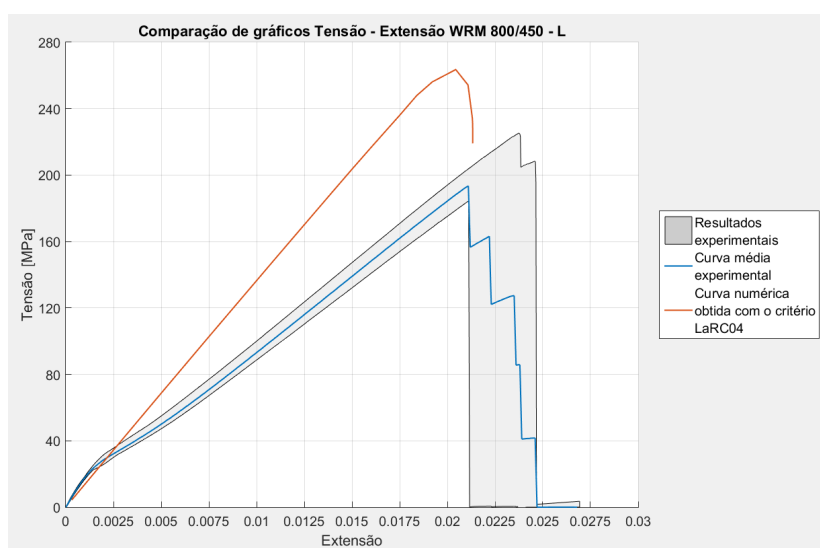


Figura 3.27: Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério LaRC04 para os provetes de WRM 800/450 L

Para o caso dos resultados dos provetes de WRM 800/450, constata-se que os valores de extensão de rotura obtidos numericamente são inferiores aos obtidos experimentalmente, dada a existência de uma mudança de declive nas curvas experimentais. Isto faz com que o módulo de Young numérico esteja bastante próximo do módulo de Young da zona inicial da curva experimental. Contudo, observando o gráfico da figura 3.26, conclui-se que à semelhança do que acontecia para os provetes de MAT 450, também neste caso o valor da tensão de rotura obtido numericamente se encontra bastante próximo do valor presente na curva média experimental.

Considerando todos os resultados obtidos para as lâminas, pode então concluir-se que os modelos numéricos replicam relativamente bem os resultados experimentais, em especial os modelos com o critério da Tensão Máxima, tendo em consideração que os materiais compósitos têm características e comportamentos muito variados e extremamente não lineares. Através da análise desses mesmos resultados conclui-se ainda que os provetes de WRM 800/450 apresentam uma maior resistência mecânica do que os provetes de MAT 450, o que era expectável já que os tecidos são habitualmente mais resistentes do que as mantas de fibras curtas e descontínuas, dispostas aleatoriamente.

Apesar de existirem bastantes diferenças entre os resultados obtidos pelo critério da Tensão Máxima e pelo critério LaCR04, ambos os critérios foram capazes de prever a falha dos materiais, ainda que um melhor que o outro, sendo esta uma das questões que se procurava responder nesta dissertação.

É ainda de notar que, como forma de tentar ajustar as curvas numéricas às experimentais, foram construídos modelos numéricos nos quais se tentou utilizar um modelo de material bilinear, sendo que se definiam dois valores de módulo de Young e o valor de tensão para o qual essa mudança de declive ocorria. Contudo, o *software* ANSYS Mechanical APDL não permite a utilização do modelo de material bilinear e dos critérios de falha

no mesmo modelo. Uma vez que o principal foco da dissertação estava em compreender se é ou não possível obter a tensão de rotura do material de forma precisa, optou-se por priorizar o uso dos critérios de falha em detrimento do modelo de material bilinear.

3.6.2 Resultados Obtidos para os Laminados

Os resultados para a tensão de rotura obtidos para os ensaios dos laminados são apresentados nas tabelas 3.13 e 3.14. Nestas tabelas encontra-se também o desvio relativo entre os resultados experimentais e os resultados numéricos calculado através da equação 3.8.

Tabela 3.13: Comparação dos resultados experimentais com os resultados numéricos obtidos através do critério da Tensão Máxima para os modelos dos laminados

	Tensão de Rotura [MPa]		
	Resultados Experimentais	Resultados Numéricos do critério da Tensão Máxima	Desvio relativo [%]
Laminado A - L	152.00	179.79	18.28
Laminado A - T	195.00	218.19	11.89
Laminado B - L	148.19	176.57	19.15

Tabela 3.14: Comparação dos resultados experimentais com os resultados numéricos obtidos através do critério LaRC04 para os modelos dos laminados

	Tensão de Rotura [MPa]		
	Resultados Experimentais	Resultados Numéricos do critério LaRC04	Desvio relativo [%]
Laminado A - L	152.00	251.68	65.58
Laminado A - T	195.00	310.90	59.44
Laminado B - L	148.19	252.15	70.15

A partir da análise das tabelas observa-se que, os resultados obtidos utilizando o critério da Tensão Máxima, apresentam um desvio relativo por excesso de cerca de 12% a 19%, em contraste com o desvio, também por excesso, de 59% a 70% calculado para o caso do critério LaRC04. Isto significa que o modelo que utiliza o critério da Tensão Máxima aproxima melhor os resultados experimentais, no entanto, não é capaz de garantir uma margem de segurança.

Para o caso dos laminados verifica-se um resultado semelhante ao que se obteve nas lâminas, onde o critério da Tensão Máxima também aproximava os resultados de forma mais precisa. Isto demonstra que, para estes dois materiais e suas combinações, neste tipo de ensaio, o critério da Tensão Máxima é o mais indicado para se utilizar.

Nos gráficos das figuras 3.28 e 3.29 apresenta-se uma comparação dos valores de tensão de rotura obtidos pela via experimental e pela via numérica utilizando o critério da

Tensão Máxima e o critério LaRC04, para o laminado A na direção longitudinal. Gráficos semelhantes para a direção transversal são apresentados no Apêndice D.

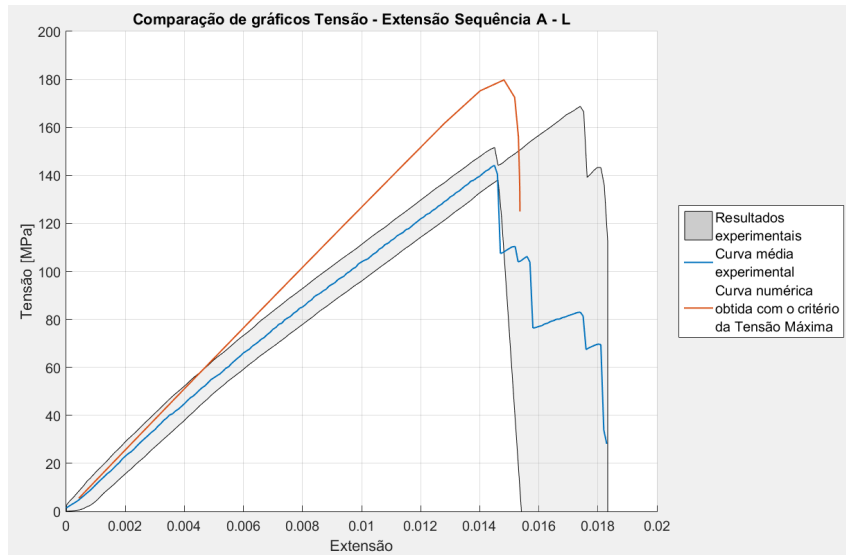


Figura 3.28: Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério da Tensão Máxima para os provetes do Laminado A - L

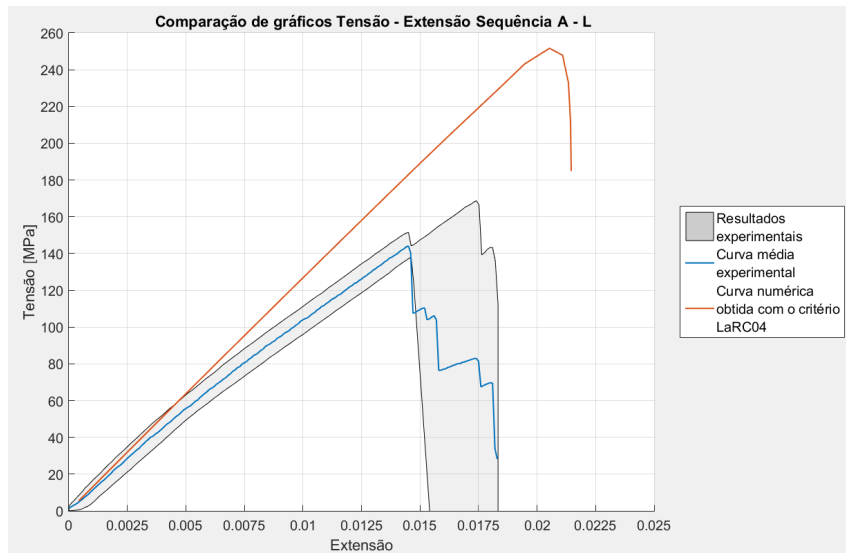


Figura 3.29: Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério LaRC04 para os provetes do Laminado A - L

Nas figuras 3.30 e 3.31 está representada uma comparação dos resultados obtidos experimentalmente e dos resultados obtidos numericamente para o laminado B, na única direção em que este foi ensaiado. Na figura 3.30 estão presentes os resultados obtidos com o critério da Tensão Máxima, e na figura 3.31 estão os resultados obtidos com o critério LaRC04.

3.6. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

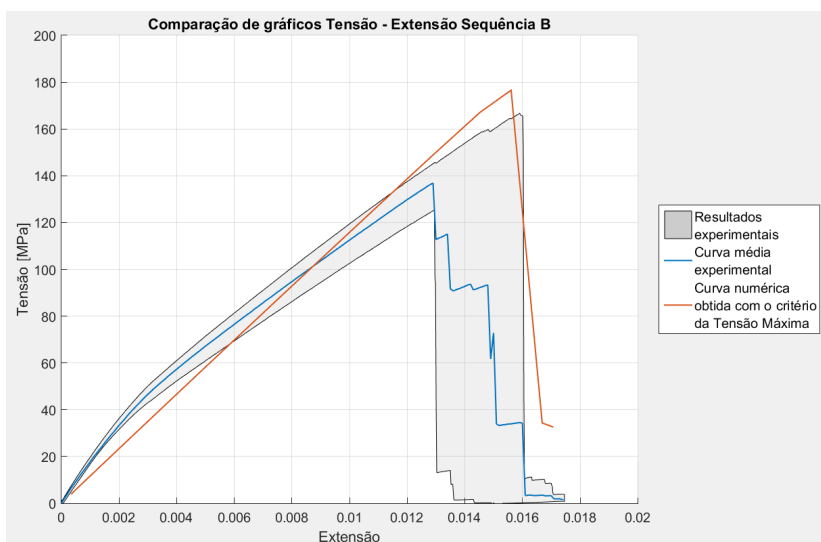


Figura 3.30: Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério da Tensão Máxima para os provetes do Laminado B

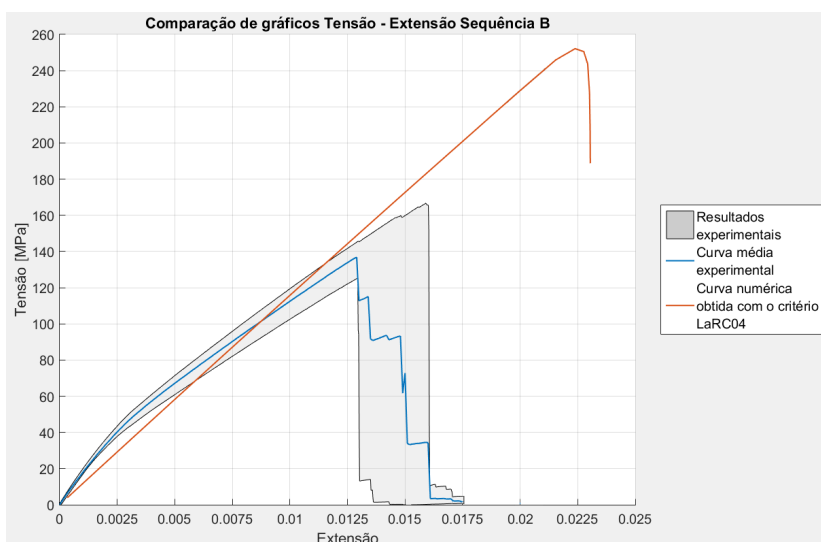


Figura 3.31: Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério LaRC04 para os provetes do Laminado B

Na tabela 3.15 apresenta-se uma comparação entre o módulo de Young experimental e o numérico, sendo este último independente do critério de falha utilizado.

Tabela 3.15: Comparação dos resultados experimentais e numéricos para o Módulo de Young

	Módulo de Young Experimental [GPa]	Módulo de Young Numérico [GPa]	Desvio relativo [%]
Laminado A - L	11.40	12.79	12.19
Laminado A - T	12.10	15.89	31.32
Laminado B - L	13.68	11.69	-14.55

Observando os gráficos de todas as figuras e a tabela 3.15 percebe-se que, para o caso do laminado A, o módulo de Young obtido numericamente apresenta valores superiores ao obtido experimentalmente, tanto na direção transversal como na direção longitudinal. Já no caso do laminado B, o módulo de Young experimental é superior ao numérico. Isto acontece pois o valor do módulo de Young experimental é calculado para valores de extensão baixos, os quais estão contidos na zona da curva antes da mudança de declive. Contudo, uma vez que a discrepância nos valores do módulo de Young não é muito acentuada, os valores da extensão de rotura experimental e numérica obtidos com o critério da Tensão Máxima são bastante próximos.

Ainda analisando as figuras 3.28, 3.29, 3.30 e 3.31, observa-se que, para ambas as sequências de empilhamento, o pico correspondente à tensão de rotura experimental se encontra abaixo dos dois picos de tensão numéricos, estando mais próximo do pico obtido utilizando o critério da Tensão Máxima.

Comparando diretamente o laminado A - L com o laminado B - L, é de notar que, apesar do laminado A possuir treze lâminas, das quais dez são de WRM 800/450 (o material mais resistente dos dois utilizados) e o laminado B possuir nove lâminas, das quais apenas cinco são de WRM 800/450, os valores obtidos para a tensão de rotura, tanto numérica como experimental, são bastante próximos. Isto demonstra que o comportamento dos laminados é bastante complexo de prever e que estes materiais não se comportam linearmente, exigindo estudos elaborados.

Concluindo, para o caso de ambos os laminados os modelos numéricos foram capazes de replicar razoavelmente todos os resultados experimentais, em especial quando é utilizado o critério da Tensão Máxima.

Por último, considerando tanto os resultados para as lâminas como para os laminados, verificou-se que o critério LaRC04 apresentava sempre valores de tensão de rotura numéricos superiores ao experimentais e aos obtidos com o critério da Tensão Máxima. Este facto pode dever-se à suposição realizada relativamente aos valores de resistência das lâminas, onde se considerou que X_C , Y_T , Y_C e S teriam o mesmo valor que X_T . Isto leva a que os valores de tensão de rotura obtidos com o critério LaRC04 sejam superiores aos reais, já que, ao contrário do critério da Tensão Máxima, o critério LaRC04 considera as várias componentes da tensão, e os valores de Y_T , Y_C e S , são habitualmente muito inferiores aos que foram considerados. Assim sendo, tanto para as lâminas como para os laminados, para este tipo de ensaio, é mais indicado utilizar o critério de Tensão Máxima quando se pretende estudar a falha do material.

ESTUDO DE LIGAÇÕES COLADAS

Neste capítulo é apresentado um estudo de ligações coladas utilizando placas de compósito e um adesivo estrutural. Em primeiro lugar, são descritas algumas características do adesivo que se pretende estudar, sendo posteriormente apresentado o modelo numérico construído para obter as suas propriedades coesivas.

De seguida, é apresentado um estudo realizado que visa definir a geometria a utilizar nos modelos da ligação colada que serão estudados. Durante este estudo foram analisados artigos científicos e realizadas análises aos modelos numéricos construídos com diferentes geometrias. No final da secção são apresentados os resultados destas análises e retiradas as respetivas conclusões.

Posteriormente apresenta-se a construção de um modelo numérico simples da ligação colada, do qual se obtiveram os resultados relativos à resistência da ligação em estudo. Para além disto, apresenta-se ainda o processo utilizado para a elaboração de um modelo complexo da mesma ligação. No entanto, não existiu a possibilidade de se retirarem resultados aceitáveis deste modelo.

4.1 Materiais Utilizados

Nesta fase do estudo de ligações coladas, é utilizado um dos adesivos da Crestomer. Para além disso é utilizado o laminado com a sequência de empilhamento B, apresentado na secção 3.3.2.

4.1.1 Adesivo Crestomer

O adesivo definido para realizar a ligação colada é o adesivo Crestomer 1186PA. Este é um adesivo estrutural que pode ser usado com diversos propósitos e numa vasta gama de aplicações, sendo que apresenta excelente adesão a um grande número de metais, cerâmicos e polímeros e proporciona adesão estrutural mesmo quando se utiliza com PRFV.

O adesivo é baseado numa tecnologia de acrilato de uretano insaturado da *Scott Bader*. Este apresenta uma elevada resistência ao impacto, dureza e resistência à propagação de fissuras [31]. Na tabela 4.1 estão presentes algumas propriedades do adesivo Crestomer 1186PA.

Tabela 4.1: Propriedades mecânicas do adesivo Crestomer 1186PA [31]

E [MPa]	σ_r [MPa]	ϵ_r [%]
700 - 900	13 - 16	4 - 7

4.2 Modelo da Ligação Colada com o Adesivo Crestomer

A elaboração deste modelo tem como objetivo simular uma ligação colada entre barras de PRFV. Pretende-se com a construção deste modelo avaliar o comportamento do adesivo nessa ligação, de modo a perceber qual a capacidade de resistência da ligação e se este método de ligação seria capaz de substituir o método atualmente utilizado pela Nautiber. Esse método consiste na construção de um estratificado de camadas alternadas de fibra de vidro e resina aplicadas manualmente, exigindo bastante mão-de-obra, e é denominado de soldadura.

Uma vez que se pretende simular uma ligação colada existe a necessidade de conhecer as propriedades coesivas do adesivo a utilizar. Contudo, não existe informação na literatura acerca destas propriedades, as quais são altamente importantes para a construção de um modelo preciso. Por essa razão, procedeu-se à realização de um modelo em duas dimensões (2D) de modo a procurar definir corretamente as propriedades coesivas deste material.

4.2.1 Modelo em 2D

O modelo em 2D teve por base o modelo de uma junta única de sobreposição apresentado por Borsellino *et al.* em [32].

Parte do estudo realizado neste artigo consiste na avaliação da influência do tempo de cura de duas resinas nas propriedades mecânicas de uma junta única de sobreposição de compósitos. Para isso foram realizados ensaios experimentais de provetes contendo juntas de sobreposição com ambas as resinas em estudo com diferentes tempos de cura, sendo que uma delas corresponde ao adesivo Crestomer 1186PA, o qual se encontra em estudo na presente dissertação.

Os resultados dos ensaios experimentais para o adesivo Crestomer presentes no artigo são apresentados na figura 4.1, onde se observam três curvas correspondentes a diferentes tempos de cura, 180 minutos, 3 dias e 10 dias. Para o caso desta dissertação apenas se considerou o resultado para 10 dias de cura.

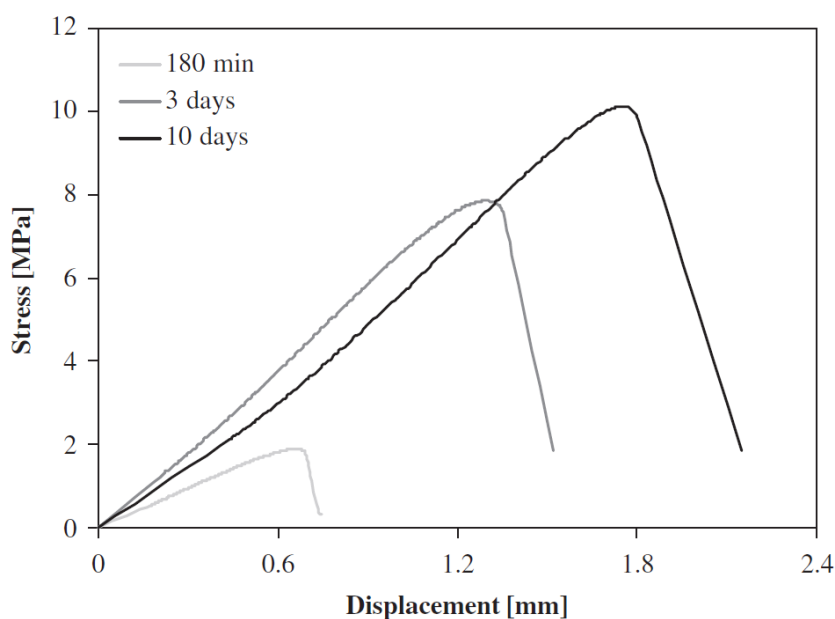


Figura 4.1: Gráfico tensão de corte - deslocamento para os vários tempos de cura da resina Crestomer [32]

Através da análise do gráfico observa-se que a falha da ligação, que corresponde ao pico de tensão para a curva para 10 dias de cura, ocorre para cerca de 10 [MPa], o que equivale a uma força de cerca de 3.125 [kN].

Ainda neste artigo é apresentado um modelo numérico simples da junta única de sobreposição, em duas dimensões, onde apenas se consideraram os materiais no seu regime elástico, omitindo proposadamente o regime pós-elástico. O modelo foi colocado à tração, através da aplicação de um deslocamento máximo de 1.7 [mm], e obtiveram-se os resultados presentes na figura 4.2.

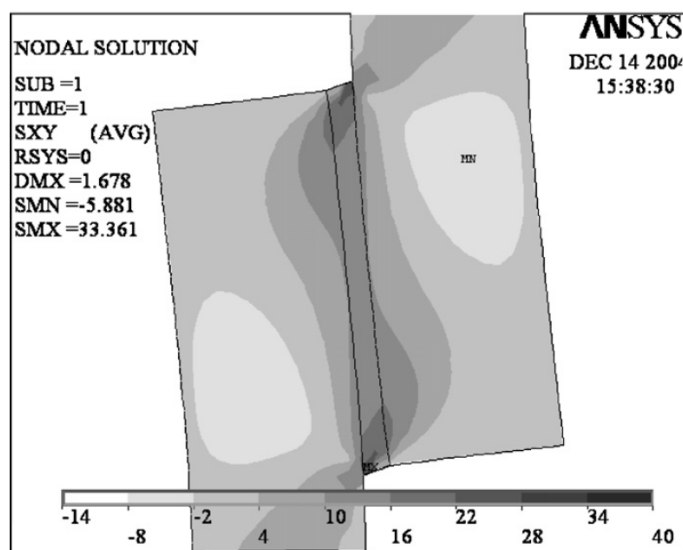


Figura 4.2: Representação da tensão de corte no provete contendo a resina Crestomer [32]

Tendo então como base o modelo numérico e os resultados experimentais apresentados em [32], construiu-se um modelo 2D mais complexo, que tem como objetivo obter as propriedades coesivas do adesivo Crestomer, através da comparação dos resultados experimentais obtidos no artigo com os resultados numéricos obtidos do modelo complexo. Este modelo foi adaptado de um provete tridimensional cuja geometria se encontra representada na figura 4.3.

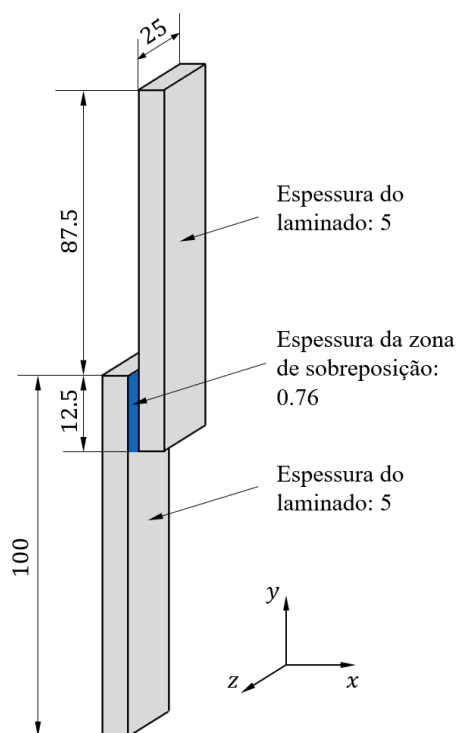


Figura 4.3: Geometria da junta de sobreposição (dimensões em [mm])

Uma vez que o modelo construído tem apenas duas dimensões, a sua largura foi considerada unitária, sendo por isso necessário corrigir os resultados obtidos de forma a que estes contemplem a largura total do provete. É de notar que na zona de sobreposição entre as duas placas se encontra o adesivo Crestomer 1186PA, dado que este é o material que se pretende estudar.

À semelhança do modelo apresentado em [32], também este modelo foi construído utilizando o elemento *PLANE82*, que corresponde a um elemento de duas dimensões com oito nós e dois graus de liberdade em cada nó (translação na direção x e y) [33].

Este modelo é mais complexo que o apresentado em [32], dado que se acrescentaram elementos coesivos na zona da interface entre o adesivo e o compósito, de forma a ser possível simular o descolamento entre os mesmos. Estes elementos coesivos são de extrema importância já que o objetivo da construção deste modelo é a obtenção das propriedades coesivas corretas do adesivo, as quais correspondem às propriedades desses mesmos elementos.

Relativamente aos materiais, consideraram-se tanto a placa de compósito como o adesivo como sendo isotrópicos, apresentando as propriedades que se encontram na tabela 4.2. Estas propriedades foram retiradas de [32], com exceção do módulo de Young do adesivo Crestomer que se retirou de [31], por ser o *Technical data sheet* do próprio produto.

Tabela 4.2: Propriedades do compósito e do adesivo

	Compósito	Crestomer 1186PA
E [MPa]	2110.7	800
ν	0.35	0.35

Uma vez definido o material e a geometria do provete iniciou-se o processo de geração da malha. Dado que a zona de interesse é aquela em que se encontra o adesivo, optou-se por utilizar uma malha mais refinada nesse local. Já na zona onde existe apenas compósito, optou-se pelo uso de elementos com um tamanho superior sem que fossem comprometidos os resultados da análise. A malha definida encontra-se representada na figura 4.4.

Posteriormente foram colocados no modelo, na zona da interface entre o adesivo e o compósito, os elementos coesivos referidos anteriormente. A localização destes elementos está também representada na figura 4.4.

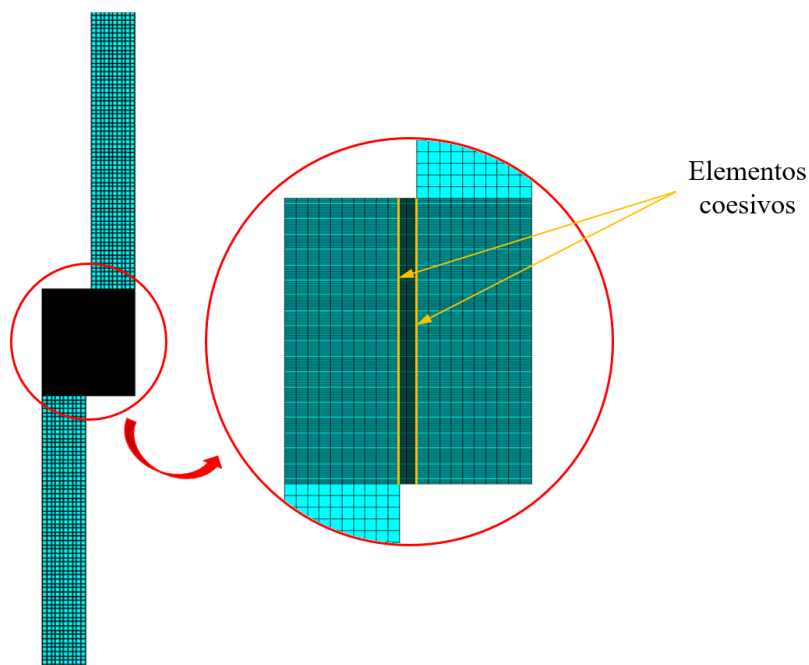


Figura 4.4: Malha utilizada no modelo e localização dos elementos coesivos

Após a criação da malha foram aplicadas no modelo as condições de fronteira e de carregamento. De modo a que estas condições representassem a realidade de uma forma mais fidedigna, foi simulado um encastramento na extremidade inferior do provete e foi

aplicado um deslocamento de 4 [mm] na sua extremidade superior no sentido positivo do eixo y , sendo que ainda nessa extremidade se impediu o deslocamento na direção do eixo x , para que o movimento do provete se restringisse apenas à vertical.

Dado que o objetivo deste modelo passava por obter as propriedades coesivas corretas, foi necessário utilizar um processo iterativo para as obter, partindo de um conjunto de propriedades iniciais, presentes na tabela 4.3. A maioria destas propriedades foram adaptadas de [34], uma vez que nesse estudo foi utilizado um adesivo Crestomer semelhante ao utilizado nesta dissertação, com exceção do valor de K que foi retirado de [35].

Tabela 4.3: Propriedades coesivas iniciais do adesivo Crestomer 1186PA

σ_{max} [MPa]	τ_{max} [MPa]	G_{Ic} [N/mm]	G_{IIc} [N/mm]	K [N/mm ³]
15	8.7	0.15	0.3	10^6

Como meta para o processo iterativo utilizou-se o resultado da figura 4.1, retirada de [32], considerando apenas a curva que diz respeito a um tempo de cura de 10 dias, onde está demonstrado que a tensão máxima antes da falha do provete é um pouco superior a 10 [MPa], correspondendo a uma força de cerca de 3.125 [kN].

O processo iterativo anteriormente referido consistiu em aumentar gradualmente o valor da tensão normal máxima e da tensão de corte máxima apresentadas na tabela 4.3, mantendo constante a diferença que existia inicialmente entre esses dois valores. Para cada conjunto de propriedades foi realizada uma análise não linear, da qual se extraíram os resultados pretendidos. Comparando os valores de tensão e força obtidos durante este processo com os valores originais presentes em [32], foi possível encontrar as propriedades coesivas finais para o adesivo Crestomer 1186PA. Na figura 4.5 é possível observar o resultado obtido através do modelo numérico com as propriedades coesivas finais.

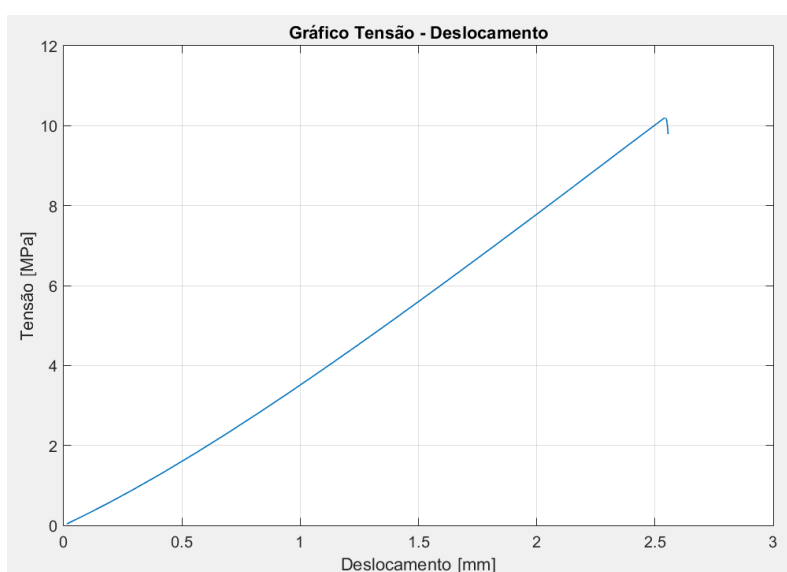


Figura 4.5: Gráfico Tensão - Deslocamento

Analisando a figura 4.5 verifica-se que o pico de tensão obtido se encontra num valor próximo dos 10 [MPa], o que corresponde aproximadamente ao valor obtido em [32].

O descolamento entre o adesivo e as placas de compósito, que corresponde à falha do provete, pode ser observado na figura 4.6 e ocorre em duas zonas, na zona superior do adesivo junto à placa de compósito do lado direito e na zona inferior do adesivo junto à placa de compósito do lado esquerdo, ambas assinaladas na figura com um círculo vermelho.

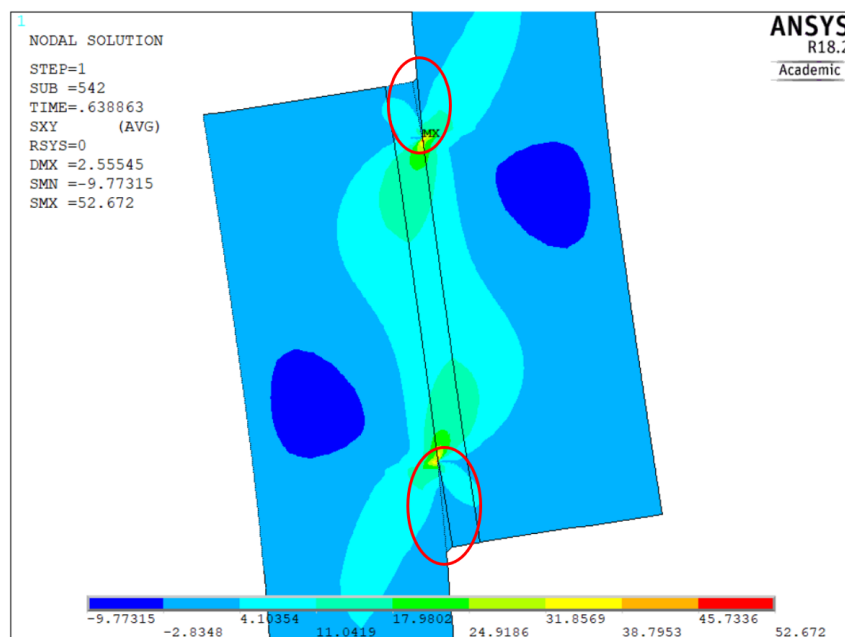


Figura 4.6: Representação da tensão de corte no provete e do descolamento entre o adesivo e as placas de compósito

Assim, as propriedades coesivas finais obtidas para o adesivo Crestomer 1186PA apresentam-se na tabela 4.4. Posto isto, procedeu-se à definição da geometria do modelo da ligação colada.

Tabela 4.4: Propriedades coesivas finais do adesivo Crestomer 1186PA

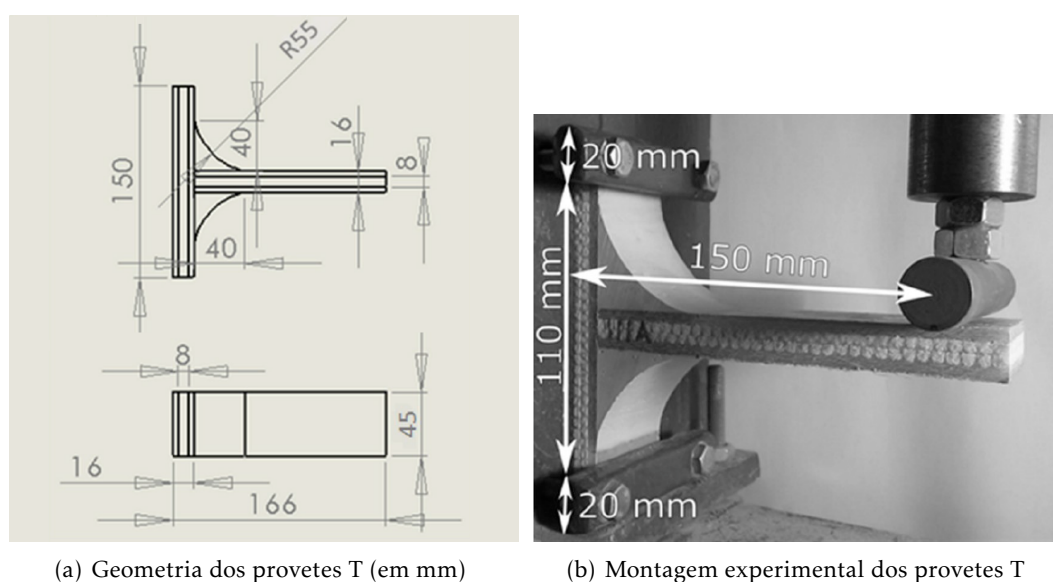
σ_{max} [MPa]	τ_{max} [MPa]	G_{Ic} [N/mm]	G_{IIc} [N/mm]	K [N/mm ³]
60	53.7	0.15	0.3	10 ⁶

4.2.2 Definição da Geometria do Modelo da Ligação Colada

Obtidas as propriedades coesivas para o adesivo Crestomer, procurou-se perceber qual seria a geometria mais indicada para o modelo da ligação colada em estudo, de forma a que este representasse a realidade de forma mais próxima. Posto isto, foi realizado um estudo onde foram inicialmente consideradas duas geometrias de ligação, a geometria em T e a geometria em H. A grande diferença entre estas duas geometrias prende-se com o

facto de que, uma carga aplicada numa ligação em T exerce um momento fletor maior sobre o adesivo quando comparado com o momento fletor que existe numa ligação em H. Isto faz com que a resistência mecânica de uma ligação em H seja bastante superior à resistência de uma ligação em T. Para além disso, foi ainda necessário definir a geometria do adesivo em si. Como base para o estudo da definição da geometria do adesivo foram analisados dois artigos científicos.

O primeiro artigo, [36], consiste numa investigação realizada com o objetivo de perceber os efeitos da preparação da superfície, dos métodos de limpeza e da escolha do adesivo na resistência de juntas em T de compósitos, utilizadas na construção de embarcações. Neste artigo são considerados três níveis de preparação da superfície, dois métodos de limpeza e três adesivos diferentes, sendo que um deles é o adesivo Crestomer 1186PA. Neste estudo foram realizados diversos ensaios experimentais de juntas em T com a mesma geometria e montagem experimental, apresentadas nas figuras 4.7(a) e 4.7(b) respetivamente, tendo apenas variado os parâmetros em estudo, já mencionados.



(a) Geometria dos provetes T (em mm)

(b) Montagem experimental dos provetes T

Figura 4.7: Geometria e montagem experimental dos provetes em T [36]

Dos ensaios realizados obtiveram-se diversos resultados, os quais estão presentes no Anexo II. Esses resultados dizem respeito à força máxima suportada por cada tipo de provete ensaiado. Para o caso da presente dissertação serão apenas tidos em consideração os resultados obtidos para o adesivo Crestomer 1186PA.

Relativamente ao segundo artigo analisado, [34], este consiste num estudo onde se investigou, através de modelação numérica, a resposta estrutural de uma ligação entre a antepara e o casco de uma embarcação realizada utilizando adesivos estruturais. Essa resposta foi comparada com a resposta estrutural do método de sobreposição usado tradicionalmente nestas ligações. A geometria da junta utilizada neste artigo, que se pode observar na figura 4.8, apresenta uma pequena diferença relativamente à geometria da

ligação apresentada em [36]. Essa diferença consiste na existência de um espaço, G_c , entre as placas que formam a ligação, que é preenchido com o adesivo utilizado.

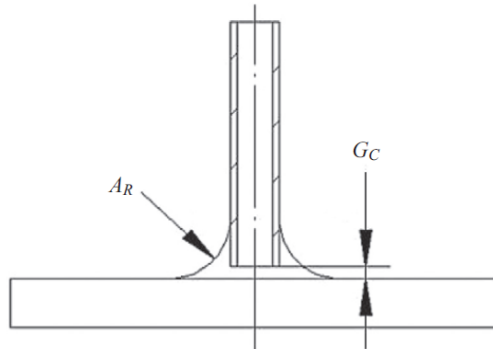


Figura 4.8: Geometria da ligação entre a antepara e o casco [34]

Tendo sido analisados os artigos, procedeu-se para a definição dos modelos a utilizar na presente dissertação, que têm como objetivo determinar a geometria mais indicada para o estudo da ligação colada. Foram então definidas quatro geometrias diferentes para o adesivo, para cada um dos dois modelos de ligação já mencionados, o T e o H, resultando assim num total de oito modelos. Estes modelos podem ser observados nas figuras 4.9 e 4.10, onde o adesivo está representado a roxo e as placas de compósito a azul.

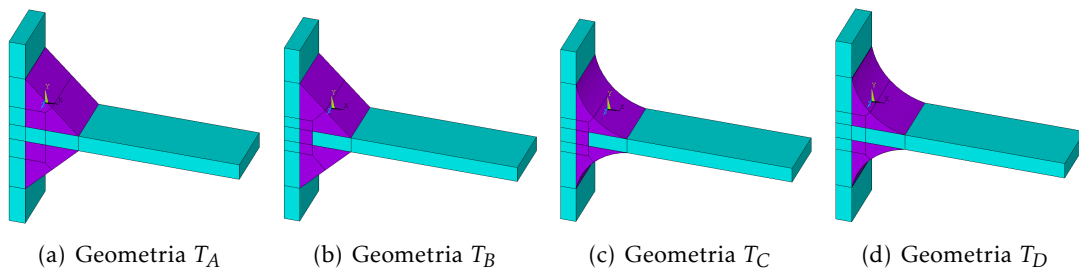


Figura 4.9: Geometrias em T inicialmente consideradas

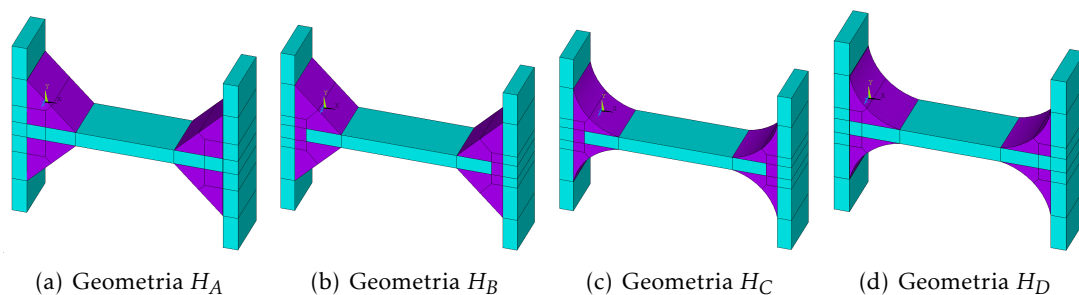


Figura 4.10: Geometrias em H inicialmente consideradas

Através das figuras é possível observar as diferenças existentes entre as várias geometrias. Começando pelo adesivo dos modelos T_A e H_A , este possui uma forma triangular e

não apresenta qualquer espaçamento entre as placas de compósito. Já nos modelos T_B e H_B , pode observar-se que existe um espaço entre as duas placas de compósito, o qual se encontra preenchido pelo adesivo. À semelhança do T_B e do H_B , também os modelos T_C e H_C possuem um espaçamento entre as placas, contudo a sua forma apresenta um boleado, isto é, a aresta exterior apresenta um raio de concordância. Por último, os modelos T_D e H_D também possuem a geometria com boleado, no entanto, não apresentam qualquer espaçamento entre as placas. Estas geometrias basearam-se nas apresentadas nas figuras 4.7(a) e 4.8, presentes em [36] e [34], respetivamente. O modelo com a geometria T_D foi propositadamente construído de forma muito semelhante ao apresentado na figura 4.7(a), para que os resultados dos ensaios experimentais realizados em [36], pudessem ser utilizados como forma de validar os modelos numéricos construídos para a realização do estudo da geometria.

Uma vez que com estes modelos apenas se pretende concluir qual a geometria a utilizar, os mesmos foram construídos à macro-escala, de forma simplificada, tendo sido considerados todos os materiais como homogêneos e isotrópicos, estando as suas propriedades presentes na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Propriedades das placas de compósito e do adesivo para os modelos T e H

	Placas de compósito	Crestomer 1186PA [31]
E [MPa]	8000	800
ν	0.35	0.35

Os modelos foram construídos utilizando o elemento *SOLID186*. Foram ainda colocados nos modelos elementos coesivos em todas as zonas da interface entre o adesivo e o compósito, cujas propriedades são as apresentadas na tabela 4.4, de forma a ser possível simular o descolamento entre os mesmos.

Aos modelos em T foi aplicado um deslocamento no sentido negativo do eixo vertical, y , de 30 [mm] a uma distância de 150 [mm] da zona da interface entre o adesivo e a placa vertical de compósito. Aos modelos em H foi aplicado um deslocamento de 20 [mm] no sentido negativo do eixo y , no centro da placa horizontal do modelo, a uma distância de 80 [mm] da zona da interface entre o adesivo e ambas as placas verticais de compósito. Relativamente às condições de fronteira, para ambos os modelos foi aplicado um encastamento nas extremidades superior e inferior da placa, ou placas verticais de compósito. As condições de fronteira e carregamento encontram-se representadas na figura 4.11. É de notar que estas condições são as mesmas para qualquer um dos modelos T e H.

Estando definida a totalidade dos modelos procedeu-se à realização de análises não lineares de onde se obtiveram resultados para a força máxima suportada para todos os modelos. Contudo, quando se observa apenas o valor de força máxima suportada, não se tem em conta que alguns dos modelos apresentam um volume de adesivo superior a outros, o que faz com que sejam capazes de suportar maiores cargas. Posto isto, para que

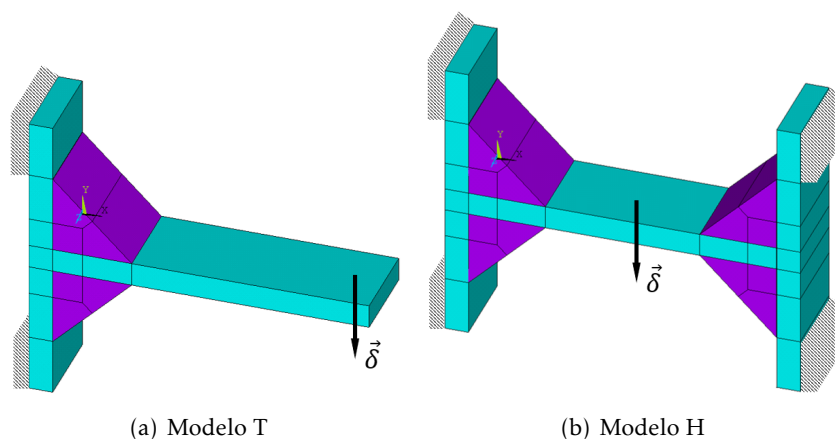


Figura 4.11: Condições de fronteira e carregamento dos modelos T e H

a comparação entre os vários modelos pudesse ser feita diretamente, utilizou-se um rácio força máxima/volume do adesivo.

Os resultados para a força máxima, o volume e o rácio força/volume, estão presentes nas tabelas 4.6 e 4.7, para os modelos em T e em H, respetivamente. Para além disso, na tabela 4.6, é ainda apresentado um dos resultados experimentais obtidos em [36], que diz respeito a um provete que não recebeu qualquer preparação da superfície, foi limpo com acetona e estireno e continha o adesivo Crestomer 1186PA.

Tabela 4.6: Resultados numéricos dos modelos T

Modelo	Volume do Adesivo [mm ³]	Força Máxima [N]	Rácio força/volume [N/mm ³]
T_A	72000.00	2511.43	0.034881
T_B	77490.00	2609.83	0.033680
T_C	47162.68	1502.51	0.031858
T_D	41672.68	1170.07	0.028078
Resultado experimental obtido em [36]	45020.78	1217.00	0.027032

Tabela 4.7: Resultados numéricos dos modelos H

Modelo	Volume do Adesivo [mm ³]	Força Máxima [N]	Rácio força/volume [N/mm ³]
H_A	144000.00	21381.76	0.148484
H_B	154980.00	35392.88	0.228371
H_C	94325.36	23209.48	0.246058
H_D	83345.36	10628.98	0.127529

Utilizou-se esse resultado em detrimento dos restantes apresentados na tabela II.1 do Anexo II, porque este apresentava características de preparação de superfície e limpeza semelhantes às que são utilizadas num ambiente de estaleiro.

Observando em primeiro lugar a tabela 4.6, e comparando o resultado numérico do

modelo T_D com o resultado experimental obtido em [36], conclui-se que, apesar de existirem pequenas diferenças entre os valores de volume do adesivo e da força máxima suportada, os valores do rácio força/volume são bastante próximos. Este facto faz com que o modelo T_D fique validado, assim como os restantes modelos em T e em H.

Uma vez que o rácio apresentado é o rácio força máxima suportada/volume de adesivo, o que se pretende é que o modelo tenha o maior valor possível desse rácio. Assim sendo, para o caso dos modelos em T, observa-se através da tabela 4.6, que o melhor modelo é o modelo T_A , contudo a diferença existente entre os diversos valores de rácio é bastante pequena. Já para o caso do modelo em H a conclusão é diferente, sendo possível perceber através da tabela 4.7, que o modelo com o melhor rácio força/volume é o modelo H_C , existindo neste caso uma discrepância maior entre os vários valores de rácio.

Comparando agora os valores presentes em ambas as tabelas, é notória a diferença dos valores do rácio entre ambas, sendo os valores para o modelo em H de uma ordem de grandeza acima dos valores para o modelo em T.

Assim sendo, concluiu-se que o modelo H_C teria a geometria mais indicada para a realização do estudo da ligação colada. Contudo, depois de serem apresentados e discutidos todos os resultados com a Nautiber, ficou acordado que as geometrias a estudar seriam a H_A e a H_D , ainda que estas não apresentem o melhor desempenho. Esta decisão deveu-se ao facto destes dois modelos não possuírem um espaço entre as placas de compósito, dado que se torna bastante mais difícil garantir esse espaçamento durante o fabrico da embarcação. A existência desse espaçamento requeria que a antepara fosse cortada de forma muito precisa para que a distância se mantivesse constante ao longo de toda a aresta do painel que se pretende colar, o que seria algo dispendioso tanto a nível monetário como de tempo consumido.

4.2.3 Modelo Simples da Ligação Colada em H

Tendo definido as geometrias base dos modelos a estudar (H_A e H_D), iniciou-se a construção dos modelos da ligação colada em H. A escolha destes modelos tem como propósito o estudo da resistência estrutural da ligação colada entre o casco e antepara de uma embarcação, sendo este um dos principais objetivos da presente dissertação.

Estes modelos foram construídos à macro-escala utilizando o elemento *SOLID186* que é um elemento sólido 3D, com vinte nós e três graus de liberdade por cada nó (translação nas direções x , y e z) [30].

Para iniciar a construção dos modelos, foi necessário definir as suas dimensões. Na figura 4.12 encontra-se representado o modelo H_D com as respetivas dimensões em milímetros. Uma vez que à partida não se conheciam as dimensões da zona de colagem, optou-se por construir um modelo parametrizado, tendo sido definidos dois parâmetros variáveis para as dimensões do adesivo: o "RAIO" e o "LADO". É de notar que o modelo H_A apresenta as mesmas dimensões que o modelo H_D , sendo que nesse caso o "RAIO" não se aplica porque se trata de uma reta.

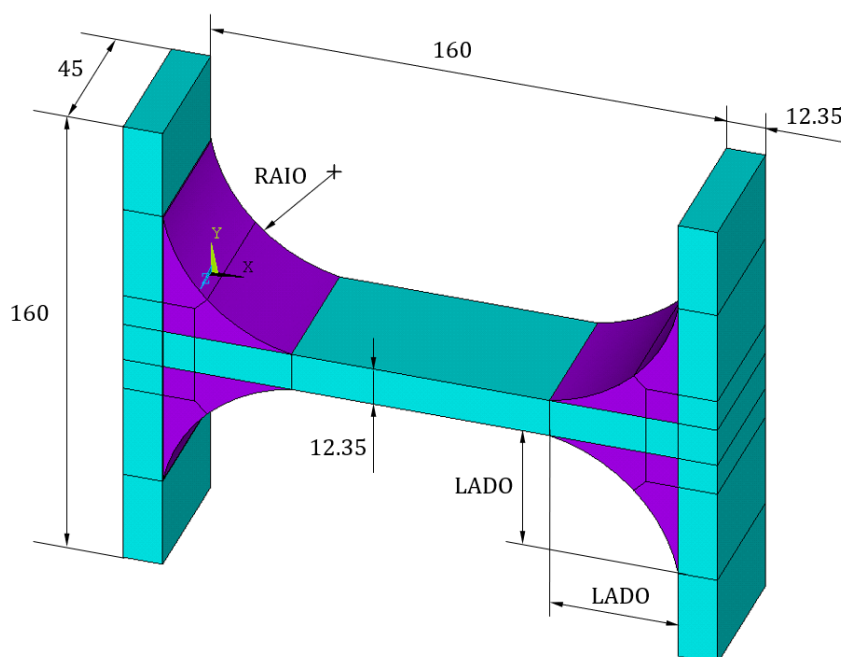


Figura 4.12: Dimensões do modelo em H parametrizado (em [mm])

Esta parametrização do modelo foi realizada no sentido de procurar perceber qual a combinação de "RAIO" e "LADO" que produzia os melhores resultados, em termos de relação entre a força suportada e o volume de adesivo utilizado. Como limite da variação dos parâmetros definiu-se que para o "LADO" os valores variam entre 40 [mm] e 60 [mm], com intervalos de 5 [mm], e para o caso do "RAIO" os valores variam entre 65 [mm] e 95 [mm] com intervalos de 5 [mm], no modelo H_D , ou sem raio no caso do modelo H_A .

Relativamente aos materiais, o adesivo utilizado neste modelo é o Crestomer 1186PA da *Scott Bader*, cujas características e propriedades estão presentes na secção 4.1.1.

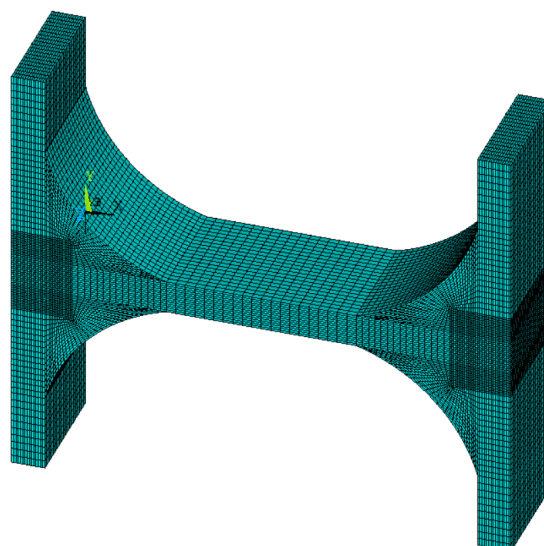
O laminado que constitui ambos os modelos é o laminado com a sequência de empilhamento B, apresentado na secção 3.3.2, constituído por nove lâminas, quatro lâminas de MAT 450 com 1 [mm] de espessura e cinco lâminas de WRM 800/450 com uma espessura de 1.67 [mm]. Para estes modelos optou-se por começar com uma construção simples, utilizando propriedades isotrópicas equivalentes, que correspondem às do laminado com a sequência de empilhamento B. Essas propriedades estão presentes na tabela 3.6, sendo apenas considerada a direção longitudinal, uma vez que os ensaios deste material foram realizados apenas nessa direção. Optou-se por construir estes modelos à macro-escala pois o comportamento do laminado já tinha sido estudado à meso-escala na secção 3.5 e porque um estudo destes modelos em H à meso-escala necessitaria de um enorme poder computacional, dado que seria um modelo bastante complexo.

Definidos a geometria e os materiais dos modelos procedeu-se à construção da malha de elementos finitos. Começou-se então por gerar a malha para a placa horizontal e posteriormente para as duas placas verticais. Por último gerou-se a malha para o adesivo utilizado. As dimensões dos elementos apresentam alguma variação tendo em conta a

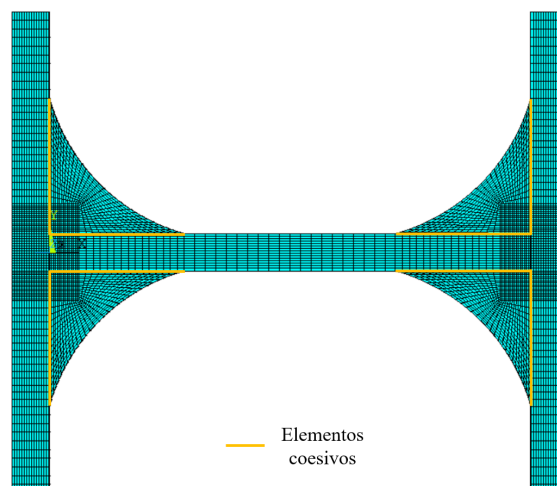
zona do modelo, dado que existem zonas de maior interesse que necessitam de uma malha mais refinada. Na figura 4.13(a) encontra-se representada a malha construída para o modelo H_D , sendo que a malha do modelo H_A é semelhante.

Dado que estes são modelos de uma ligação colada, é essencial que exista a modelação da zona da interface entre o adesivo e o laminado, de modo a que se possa simular o descolamento entre os mesmos. Para isso recorreu-se aos elementos coesivos, que foram colocados nas várias zonas de contacto entre o adesivo e o laminado assinaladas a amarelo na figura 4.13(b). As propriedades coesivas do adesivo Crestomer 1186PA utilizadas na elaboração deste modelo são as que estão presentes na tabela 4.4.

É de notar que tanto a localização dos elementos coesivos como as condições de fronteira e carregamento aplicadas, são iguais em ambos os modelos.



(a) Malha do modelo em H



(b) Elementos coesivos no modelo H

Figura 4.13: Malha do modelo em H e localização dos elementos coesivos

Para terminar a construção dos modelos foram aplicadas as condições de fronteira e de carregamento que estão representadas na figura 4.14.

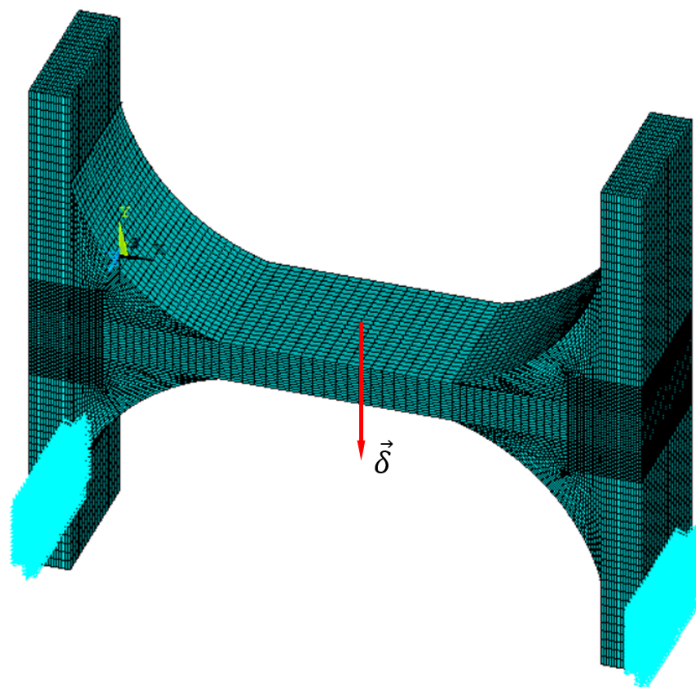


Figura 4.14: Condições de fronteira e carregamento do modelo H

A azul observam-se as condições de fronteira que consistem no impedimento dos deslocamentos na direção horizontal e vertical na zona inferior das placas verticais do modelo. A vermelho está representado o carregamento, que corresponde a um deslocamento aplicado de 20 [mm] no sentido negativo do eixo y no centro da placa horizontal. Terminada a construção dos modelos foram realizadas análises não lineares de onde se obtiveram os resultados apresentados de seguida.

4.2.3.1 Resultados do Modelo Simples da Ligação Colada em H

A construção destes modelos tem como objetivo compreender qual a melhor relação entre força suportada e volume de adesivo que se pode utilizar para realizar este tipo de ligação. Uma vez que os modelos construídos são modelos parametrizados, realizou-se uma análise por cada conjunto de parâmetros considerado.

Assim sendo, foram obtidos quarenta resultados para a força máxima suportada, um por cada modelo ensaiado, com diferentes parâmetros "LADO" e "RAIO". Com base nesses resultados elaborou-se o rácio força máxima suportada/volume de adesivo para todos os modelos considerados. Os resultados para a força máxima, para o volume de adesivo e para o rácio força/volume estão presentes nas tabelas E.1 e E.2 do Apêndice E.

De modo a facilitar a compreensão dos resultados obtidos para a relação entre a força e o volume, construiu-se, a partir dos dados da tabela E.1, uma superfície de resposta do

rácio força/volume em função dos dois parâmetros considerados, "LADO" e "RAIO", para o caso do modelo H_D . Esta superfície encontra-se representada no gráfico da figura 4.15.

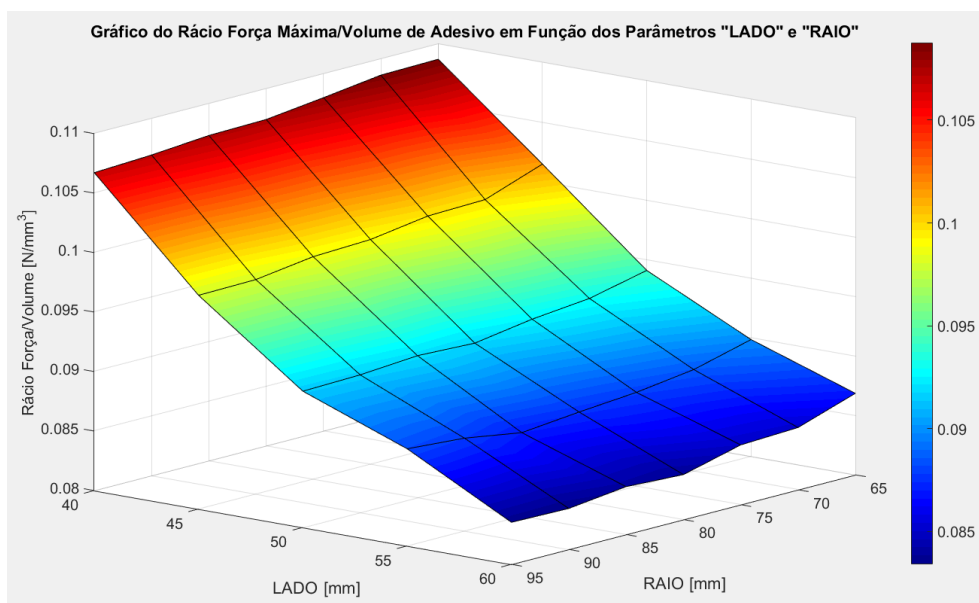


Figura 4.15: Gráfico do rácio força máxima suportada/volume de adesivo em função dos parâmetros "LADO" e "RAIO" (modelo H_D)

Relativamente aos resultados do modelo H_A , os mesmos não podem ser apresentados juntamente com os restantes, uma vez que, neste caso, o raio não é um parâmetro considerado. Assim sendo, elaborou-se um gráfico a partir dos dados da tabela E.2, apresentado na figura 4.16, que mostra a variação do rácio força/volume em função do parâmetro "LADO".

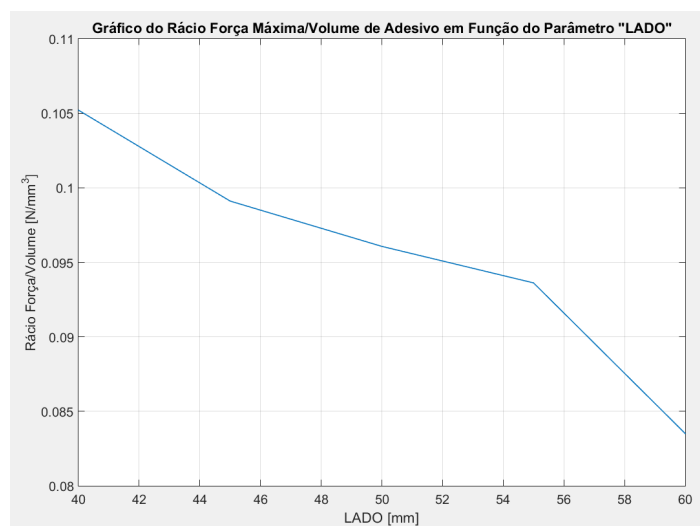


Figura 4.16: Gráfico do rácio força máxima suportada/volume de adesivo em função do parâmetro "LADO" (modelo H_A)

Dado que o rácio apresentado é o rácio força/volume, o que se pretende é que esse

rácio esteja maximizado, isto é, que tenha o maior valor possível, pois isso significa que um menor volume de adesivo consegue suportar uma maior força.

Através da análise da figura 4.15 e dos valores presentes na tabela E.1 referentes ao modelo H_D , observa-se uma tendência geral decrescente do rácio em função do aumento dos dois parâmetros. Essa tendência demonstra que o aumento do volume do adesivo não compensa, na maioria das situações, o aumento no valor da força suportada. Isto significa que, um aumento do volume para o dobro, por exemplo, não se traduz num aumento da força suportada também para o dobro, evidenciando o comportamento não linear apresentado por este adesivo.

Ainda relativamente aos resultados do modelo H_D , quando se tem apenas em consideração o aumento do volume devido ao aumento do lado, ou seja, mantendo o raio constante, a tendência decrescente verifica-se em todos os casos. Contudo, se apenas se considerar o aumento do raio mantendo o valor do lado constante, existem alguns casos onde essa tendência é contrariada, sendo um desses exemplos o aumento do raio de 90 [mm] para 95 [mm], quando o valor do lado é igual a 55 [mm].

Analisando agora os resultados apresentados na tabela E.2 e na figura 4.16, que dizem respeito aos resultados do modelo H_A , observa-se novamente a tendência decrescente do rácio quando se aumenta o valor do lado.

No entanto, dado que o objetivo passa por definir qual a geometria mais indicada a utilizar, existe a necessidade de comparar os resultados obtidos para ambos os modelos. Posto isto, comparando os resultados de ambas as tabelas apresentadas no Apêndice E, verifica-se que para os casos de "LADO" igual a 40 [mm] e 60 [mm] o pior valor de rácio é o obtido com o modelo H_A , sendo nestes casos mais vantajoso a existência de um boleado no adesivo. Contudo, para os restantes valores de lado, os resultados do modelo H_A não são os piores resultados obtidos, sendo até os melhores no caso de "LADO" igual a 50 [mm] e 55 [mm].

Apesar disso, observando a totalidade dos resultados, conclui-se que, para este caso, a geometria que possui 40 [mm] de lado e 65 [mm] de raio é a que apresenta o maior rácio, com um valor de $0.10873 \text{ [N/mm}^3\text{]}$. Assim sendo, para se obter a quantidade ótima de adesivo a utilizar, de forma a alcançar a melhor relação entre força e volume, aconselha-se a que se conheça a força que a ligação necessita de suportar e, a partir daí, que se obtenham os menores valores de "LADO" e "RAIO" possíveis para que a ligação seja segura. Ainda assim, de forma a garantir que esta solução é a solução ótima para um caso específico, deve realizar-se uma análise semelhante à que foi realizada na presente dissertação, para se compreender qual a melhor opção de geometria e valores de parâmetros para esse caso.

4.2.4 Modelo Complexo da Ligação Colada em H

Tal como referido anteriormente, o modelo apresentado do qual foram obtidos os resultados apresentados na secção 4.2.3.1, constitui um modelo simples com as propriedades equivalentes do laminado. Esta simplificação pode levar a pequenos erros e desvios

relativamente ao que acontece na realidade. Posto isto, foi iniciada a construção de um modelo em H parametrizado mais completo, com a mesma geometria que o modelo anterior, apresentada na figura 4.12, que representasse a realidade de uma forma mais fidedigna.

Este modelo complexo possui ainda, para além da geometria, o mesmo elemento utilizado na sua construção, os mesmos intervalos de variação para os parâmetros do modelo, as mesmas propriedades para o adesivo Crestomer, os mesmos elementos coesivos e as mesmas condições de fronteira e carregamento aplicadas que o modelo simples apresentado anteriormente.

As grandes diferenças entre o modelo simples e o modelo complexo centram-se nas propriedades e características do laminado e nos passos necessários à obtenção da malha de elementos finitos.

O elemento utilizado na construção deste modelo (*SOLID186*) permite definir uma sequência de empilhamento onde se estabelece o material, a orientação e a espessura de cada lâmina presente no laminado [30]. Assim sendo, e tendo por base a sequência de empilhamento B, foi definido o material de cada lâmina e a sua respetiva espessura dentro do sólido que constitui o laminado no modelo à macro-escala. As propriedades de ambos os materiais estão presentes na tabela 3.7, sendo que apenas se consideram as propriedades na direção longitudinal, já que esta foi a única direção considerada para o laminado B.

Neste modelo complexo foram ainda inseridos os critérios de falha do laminado utilizando as propriedades que se encontram na tabela 3.8. Decidiu-se incluir os critérios de falha neste novo modelo dado que quando o adesivo Crestomer 1186PA é utilizado para ligar duas placas de PRFV é comum que a falha da ligação seja na zona do compósito, denominada falha do substrato e não na zona da adesão, falha adesiva, ou do adesivo em si, denominada falha coesiva [22].

Definidas as novas propriedades dos materiais do modelo procedeu-se à construção da nova malha de elementos finitos. Para a realização deste passo foi necessária a criação de três referenciais adicionais, para que se pudesse orientar a sequência de empilhamento definida em cada uma das placas de compósito. Os referenciais definidos estão representados na figura 4.17.

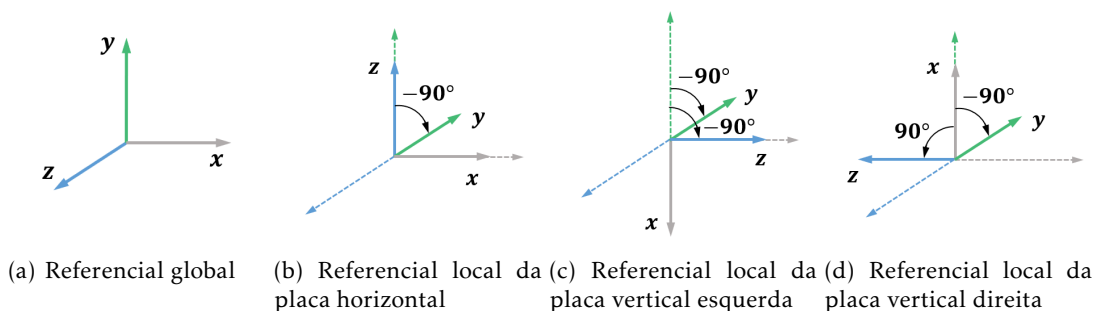


Figura 4.17: Referenciais definidos

Começou-se então por gerar a malha para a placa horizontal, orientando os seus elementos de acordo com o referencial da figura 4.17(b). De seguida realizou-se o mesmo processo para a placa vertical do lado esquerdo e para a placa vertical do lado direito, sendo que se orientou o referencial dos seus elementos de acordo com o referencial da figura 4.17(c) e 4.17(d), respetivamente.

Por último gerou-se a malha para o adesivo, que por apresentar um comportamento isotrópico, não necessita de um referencial específico. Por essa razão os seus elementos foram orientados de acordo com o referencial global (figura 4.17(a)). A malha gerada é idêntica à apresentada na figura 4.13(a), assim como as condições de fronteira e carregamento já mencionadas anteriormente.

Terminada a construção do modelo complexo iniciaram-se as simulações numéricas e as várias análises não lineares. Contudo, tal como previsto, este modelo exigia uma enorme potência computacional, levando a que as análises decorressem durante alguns dias, o que impediu que existissem resultados suficientes para serem retiradas quaisquer conclusões. Para além disto, durante as análises foram detetados alguns problemas relativamente ao posicionamento das condições de fronteira e carregamento impostas no modelo, pois estas provocavam a falha precoce do material numa zona onde essa falha não deveria ocorrer.

Assim sendo, não foi possível obter resultados suficientes e fidedignos deste modelo, existindo a necessidade de um aperfeiçoamento do mesmo, por forma a que se possam retirar as respetivas conclusões.

CONCLUSÃO

A presente dissertação apresentava dois grandes objetivos, o principal passava pela caracterização da ligação colada entre painéis de uma embarcação, o intermédio consistia na construção de modelos numéricos pelo MEF capazes de simular e prever o comportamento de compósitos de fibra de vidro e resina.

Em primeiro lugar, procurou-se atingir o objetivo intermédio, através da realização de diversos ensaios experimentais de lâminas e laminados e da simulação de modelos numéricos à meso-escala dos provetes ensaiados. Estes modelos foram testados separadamente com dois critérios de falha, o critério da Tensão Máxima e o critério LaRC04, de modo a compreender qual dos dois era capaz de prever, de forma mais próxima da realidade, a falha do material.

Das várias análises realizadas tanto para as lâminas como para os laminados, concluiu-se que ambos os critérios são capazes de prever a falha do material. Os resultados obtidos utilizando o critério LaRC04 apresentavam um afastamento superior aos resultados experimentais (cerca de 23 a 27% no caso das lâminas e 59 a 70% no caso dos laminados), quando comparados com os resultados obtidos com o critério da Tensão Máxima (cerca de 5 a 11% e 12 a 19% para o caso das lâminas e dos laminados respetivamente). Esse afastamento pode ser consequência de se terem considerado valores de Y_T , Y_C e S bastante superiores aos que são habitualmente utilizados, levando a que os valores de tensão de rotura obtidos com esse critério fossem maiores que os valores reais.

Assim sendo, para o caso estudado, o critério da Tensão Máxima foi o que produziu melhores resultados, aproximando com bastante precisão os resultados numéricos dos resultados experimentais. Concluiu-se então que este era o critério mais indicado a utilizar para modelar numericamente o tipo de ensaios realizados.

Para além disso, constatou-se ainda que os compósitos de fibra de vidro e resina estudados apresentam um comportamento extremamente não linear.

Como forma de cumprir o objetivo principal da dissertação, que consistia em caracterizar a ligação colada entre painéis de uma embarcação e compreender se esta ligação

era ou não viável, foram construídos dois modelos numéricos em H parametrizados, à macro-escala, dessa ligação. Desses modelos foram obtidos os valores da resistência dos mesmos e foi elaborada uma relação entre a força suportada e o volume do adesivo, de forma a perceber qual a geometria de adesivo mais indicada para a ligação.

Através dos resultados obtidos dos modelos, concluiu-se, em primeiro lugar, que o comportamento do adesivo utilizado é extremamente não linear, não mantendo sempre a mesma tendência de comportamento.

Para o caso analisado, concluiu-se que a geometria mais indicada era a que apresentava o menor valor de "LADO" e de "RAIO". Posto isto, e apresentando os modelos estudados uma tendência geral decrescente do rácio força/volume em função do aumento dos dois parâmetros considerados, concluiu-se que de forma a obter a quantidade ótima de adesivo para uma ligação deste tipo, deve conhecer-se a força que a mesma pretende suportar e, a partir desse valor, procurar os menores valores de "LADO" e de "RAIO" que façam com que a ligação seja capaz de suportar essa mesma força.

Observando os resultados obtidos para a força máxima, concluiu-se ainda que estas ligações coladas são bastante resistentes e que se forem realizadas simulações semelhantes à realizada na presente dissertação, é possível obter a geometria indicada de adesivo para cada caso particular.

Concluiu-se então que o método estudado da ligação colada funciona e pode ser uma mais valia importante na construção de embarcações, uma vez que, apesar de parecer um método mais dispendioso à partida do que o método original, devido ao custo do adesivo, é um método teórico-economicamente vantajoso, visto que, o processo necessário para a sua aplicação requer muito menos mão-de-obra e é bastante mais rápido de realizar do que a aplicação de camadas alternadas de fibra de vidro e resina. Para além disto, o tempo de cura deste adesivo é relativamente curto o que é tido como vantajoso nesta indústria.

As conclusões retiradas da presente dissertação são bastante importantes e relevantes para a indústria da construção naval, dado que demonstram que é possível a utilização de ferramentas numéricas para estudar materiais compósitos e ligações coladas, diminuindo as despesas em material necessário para a realização de estudos através da via experimental.

5.1 Trabalhos Futuros

Tendo sido concluída a presente dissertação, existem alguns desenvolvimentos da mesma que podem ser realizados, sendo estes:

1. Trabalhar no modelo complexo da ligação em H apresentado, efetuando melhorias, de forma a que seja possível obter resultados fiáveis do mesmo, já que este é um modelo que representa melhor a realidade;
2. Construir um modelo numérico que contenha o método de ligação original utilizado pela Nautiber, para que seja possível comparar diretamente os resultados obtidos dos dois métodos e verificar quais as características dessa ligação;

3. Realizar ensaios experimentais de modo a validar os modelos numéricos da ligação colada já construídos e a obter as propriedades coesivas do adesivo pela via experimental;
4. Elaborar um modelo do casco e das anteparas completo, com uma escala apropriada, para que se obtenham resultados diretos relativos às dimensões e geometria da ligação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Cardoso. *Aula 1 - Introdução aos materiais compósitos*. Apontamentos de Tópicos Avançados em Mecânica Estrutural, FCT/UNL, 2020.
- [2] I. M. T. Crespo. “Damage Propagation in Composite Materials Meso-Mechanical Models”. Tese de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2015.
- [3] E. Music e A. Widroth. “Modelling of Spread Tow Carbon Fabric Composites for Advanced Lightweight Products”. Tese de mestrado. 2013, p. 70.
- [4] *Composites World*. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/the-fiber>. Consultado em: 18.05.2021.
- [5] P. Tan, L. Tong e G. P. Steven. “Modelling for predicting the mechanical properties of textile composites - A review”. Em: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 28.11 (1997), pp. 903–922. ISSN: 1359835X. DOI: 10.1016/S1359-835X(97)00069-9.
- [6] A. D. Kelkar, J. S. Tate e R. Bolick. “Structural integrity of aerospace textile composites under fatigue loading”. Em: *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology* 132.1-2 (2006), pp. 79–84. ISSN: 09215107. DOI: 10.1016/j.mseb.2006.02.033.
- [7] W. W. Müller e F. Saathoff. “Geosynthetics in geoenvironmental engineering”. Em: *Science and Technology of Advanced Materials* 16.3 (2015), pp. 1–20. ISSN: 14686996. DOI: 10.1088/1468-6996/16/3/034605.
- [8] M. Bessa. “MESO-MECHANICALMODEL OF THE STRUCTURAL INTEGRITY OF ADVANCED COMPOSITE LAMINATES”. Tese de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [9] J. Cardoso. *Aula 2 – Comportamento macromecânico de uma lâmina*. Apontamentos de Tópicos Avançados em Mecânica Estrutural, FCT/UNL, 2020.

- [10] S. T. Pinho et al. *Failure Models and Criteria for FRP Under In-Plane or Three-Dimensional Stress States Including Shear Non-linearity*. Rel. téc. NASA/Tm-2005-213530. National Aeronautics e Space Administration, 2005.
- [11] C. G. Dávila e P. P. Camanho. *Failure criteria for FRP laminates in plane stress*. Rel. téc. NASA/TM-2003-212663. National Aeronautics e Space Administration, 2003.
- [12] N. L. Feng, S. D. Malingam e S. Irulappasamy. “Bolted joint behavior of hybrid composites”. Em: *Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Elsevier Ltd, 2018, pp. 79–95. ISBN: 9780081022931. DOI: 10.1016/B978-0-08-102293-1.00004-8.
- [13] N. A. Veiga. “Comportamento à fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica , reforçados com fibras de juta”. Tese de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [14] J. Cardoso. *Aula 5 – Resistência de laminados. Delaminação*. Apontamentos de Tópicos Avançados em Mecânica Estrutural, FCT/UNL, 2020.
- [15] C. G. Dávila, P. P. Camanho e A. Turon. *Cohesive elements for shells*. Rel. téc. NASA/TP-2007-214869. National Aeronautics e Space Administration, 2007.
- [16] A. Turon et al. “An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models”. Em: *Engineering Fracture Mechanics* 74.10 (2007). ISSN: 00137944. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2006.08.025.
- [17] J. Stolz, P. Fideu e A. Herrmann. *Homogenization of Fiber Composite Material Properties : an Adaptive Multiphysics Implementation*. 2018.
- [18] J. Cardoso. *Aula 3 – Comportamento micromecânico de uma lâmina*. Apontamentos de Tópicos Avançados em Mecânica Estrutural, FCT/UNL, 2020.
- [19] *xComposites*. URL: <https://www.xcomposites.com/>. Consultado em: 20.06.2021.
- [20] Y. W. Kwon, D. H. Allen e R. Talreja. *Multiscale modeling and simulation of composite materials and structures*. 2008. ISBN: 9780387363189. DOI: 10.1007/978-0-387-68556-4.
- [21] ANSYS. URL: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v202/en/ans_mat/cozonemats.html%5C%23cozonebilinear. Consultado em: 11.07.2021.
- [22] S. Bader. *Crestomer UK Brochure*. 2019.
- [23] S. K. Panigrahi e B. Pradhan. “Adhesion failure propagation in adhesively-bonded single-lap laminated FRP composite joints”. Em: *Journal of Adhesion Science and Technology* 21 (2007). ISSN: 01694243. DOI: 10.1163/156856107780474920.
- [24] *Fiberglass shop*. URL: <https://www.fiberglass-shop.com/chopped-strand-mat-450-g-m#tab-description>. Consultado em: 21.05.2021.

- [25] JLon Composite. URL: <https://www.jloncomposite.com/Product/Woven-Roving-Combimat.html>. Consultado em: 21.05.2021.
- [26] East Coast Fibreglass Suplies. URL: <https://www.ecfibreglasssupplies.co.uk/product/800g-woven-roving-1-mt-wide>. Consultado em: 21.05.2021.
- [27] Silicones and more. URL: <https://www.siliconesandmore.com/en/fiberglass-cloth-450-gram-m2.html#section-specifications>. Consultado em: 21.05.2021.
- [28] Hitex. URL: <http://www.hitex-composite.com/products/Fiberglass-Combo-Mat.html>. Consultado em: 21.05.2021.
- [29] P. Goma. *Report D-291220-11673*. Rel. téc. Bureau Veritas, 2021.
- [30] ANSYS, Inc. URL: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v202/en/ans_elem/Hlp_E_SOLID186.html. Consultado em: 26.07.2021.
- [31] S. Bader. *Crestomer 1186PA - Technical data sheet*. 2018.
- [32] C. Borsellino et al. “Comparisons of processing and strength properties of two adhesive systems for composite joints”. Em: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 27.6 (2007). ISSN: 01437496. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2006.01.012.
- [33] ANSYS. URL: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v202/en/ans_arch/Hlp_E_PLANE82.html. Consultado em: 04.07.2021.
- [34] G.-m. Luo e Y.-h. Lin. “STUDY ON STRUCTURAL ADHESIVE APPLIED TO THE BULKHEAD JOINTS SUBJECTED TO NON-CONTACT UNDERWATER EXPLOSION”. Em: (2018). DOI: 10.6119/JMST.2018.06.
- [35] J. Cardoso. *Aula prática 5 - Estudo da delaminação no ANSYS*. 2020.
- [36] L. S. Sutherland, C. Amado e C. Guedes Soares. “Statistical analyses of the effects of bonding parameters and fabrication robustness on the strength of adhesive T-joints”. Em: *Composites Part B: Engineering* 175 (2019). ISSN: 13598368. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107063. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107063>.
- [37] R. F. Wegman e J. Van Twisk. “8 - Plastics”. Em: *Surface Preparation Techniques for Adhesive Bonding (Second Edition)*. Ed. por R. F. Wegman e J. Van Twisk. Second Edition. William Andrew Publishing, 2013, pp. 115–130. ISBN: 978-1-4557-3126-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3126-8.00008-7>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781455731268000087>.

RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DAS LÂMINAS

Neste apêndice são apresentados os resultados completos referentes aos ensaios experimentais dos provetes de MAT 450 e de WRM 800/450.

A.1 MAT 450

Nas tabelas A.1 e A.2 estão presentes os resultados dos ensaios de tração para a direção longitudinal do MAT 450 sem extensômetro, de onde se obtiveram os valores da Tensão Rotura e com extensômetro, através dos quais se obteve o valor do Módulo de Young, respetivamente. É de notar que os resultados para a extensão de rotura foram corrigidos utilizando o coeficiente cp .

Tabela A.1: Resultados obtidos sem extensômetro para o MAT 450 L

Nº do Proвете	Espessura [mm]	Largura [mm]	Comprimento [mm]	Força Máxima [N]	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Rotura
1	4.63	24.33	301.00	14102.00	125.08	0.017
2	4.47	26.00	300.00	14987.00	129.05	0.019
3	4.73	25.00	300.00	13857.00	117.10	0.018
4	4.75	24.78	301.00	14214.00	120.75	0.020
5	4.65	26.12	300.00	14844.00	122.23	0.019
Média	4.65	25.25	300.40	14400.80	122.84	0.019
Desvio Padrão	0.11	0.78	0.55	489.89	4.51	0.001

Tabela A.2: Resultados do Módulo de Young obtidos com extensômetro para o MAT 450 L

Nº do Provete	Módulo de Young [GPa]
6	8.20
7	8.30
8	6.59
Média	7.45
Desvio Padrão	1.21

Nas tabelas A.3 e A.4 estão presentes os mesmos conjuntos de resultados anteriores mas para os ensaios de tração para a direção transversal do MAT 450.

Tabela A.3: Resultados obtidos sem extensômetro para o MAT 450 T

Nº do Provete	Espessura [mm]	Largura [mm]	Comprimento [mm]	Força Máxima [N]	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Rotura
1	4.48	24.60	302.00	15122.00	138.8	0.021
2	4.37	25.50	302.00	14749.00	132.46	0.020
3	4.38	23.67	302.00	13196.00	127.20	0.018
4	4.37	24.90	301.00	14704.00	135.23	0.020
5	4.47	24.23	302.00	14546.00	134.39	0.019
Média	4.41	24.58	301.80	14463.40	133.62	0.020
Desvio Padrão	0.06	0.69	0.45	739.31	4.26	0.001

Tabela A.4: Resultados do Módulo de Young obtidos com extensômetro para o MAT 450 T

Nº do Provete	Módulo de Young [GPa]
6	6.27
7	11.57
8	7.38
Média	8.41
Desvio Padrão	2.79

A.2 WRM 800/450

Nas tabelas A.5 e A.6 estão presentes os resultados dos ensaios de tração para a direção longitudinal do WRM 800/450 sem extensômetro, de onde se obtiveram os valores da Tensão Rotura e com extensômetro, através dos quais se obteve o valor do Módulo de Young, respetivamente. É de notar que os resultados para a extensão de rotura foram corrigidos utilizando o coeficiente cp .

Tabela A.5: Resultados obtidos sem extensômetro para o WRM 800/450 L

Nº do Provete	Espessura [mm]	Largura [mm]	Comprimento [mm]	Força Máxima [N]	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Rotura
1	4.63	25.77	300.00	25094.00	210.20	0.023
2	4.73	26.45	299.00	26086.00	208.36	0.025
3	4.78	25.72	297.00	27729.00	225.42	0.024
4	4.92	25.15	296.00	23313.00	188.53	0.021
5	4.93	25.35	297.00	25998.00	207.88	0.022
Média	4.80	25.69	297.80	25644.00	208.08	0.023
Desvio padrão	0.13	0.50	1.64	1612.76	13.11	0.001

Tabela A.6: Resultados do Módulo de Young obtidos com extensômetro para o WRM 800/450 L

Nº do Provete	Módulo de Young [GPa]
6	13.42
7	12.74
8	15.10
Média	13.75
Desvio Padrão	1.21

Nas tabelas A.7 e A.8 estão presentes os mesmos conjuntos de resultados anteriores mas para os ensaios de tração para a direção transversal do WRM 800/450.

Tabela A.7: Resultados obtidos sem extensômetro para o WRM 800/450 T

Nº do Provete	Espessura [mm]	Largura [mm]	Comprimento [mm]	Força Máxima [N]	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Rotura
1	4.97	24.77	299.00	29643.00	240.99	0.023
2	5.05	25.32	299.00	32241.00	252.18	0.024
3	4.95	25.05	300.00	32792.00	264.45	0.025
4	4.83	24.85	300.00	31204.00	259.80	0.024
5	4.58	25.92	300.00	30198.00	254.23	0.024
Média	4.88	25.18	299.60	31215.60	254.33	0.024
Desvio padrão	0.18	0.46	0.55	1327.14	8.88	0.001

APÊNDICE A. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DAS LÂMINAS

Tabela A.8: Resultados do Módulo de Young obtidos com extensômetro para o WRM 800/450 T

Nº do Provete	Módulo de Young [GPa]
6	16.62
7	17.97
8	17.13
Média	17.24
Desvio Padrão	0.69

**RESULTADOS DOS ENSAIOS
 EXPERIMENTAIS DO LAMINADO
 COM A SEQUÊNCIA DE
 EMPILHAMENTO B**

Neste apêndice são apresentados os resultados completos referentes aos ensaios experimentais dos provetes do laminado com a sequência de empilhamento B. Nas tabelas B.1 e B.2 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios sem extensômetro e com extensômetro, respetivamente. É de notar que os resultados para a extensão de rotura foram corrigidos utilizando o coeficiente cp .

Tabela B.1: Resultados obtidos sem extensômetro para o laminado B

Nº do Proвете	Espessura [mm]	Largura [mm]	Comprimento [mm]	Força Máxima [N]	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Rotura
1	5.40	12.30	295.00	9114.50	137.22	0.013
2	6.00	12.00	295.00	12004.00	166.72	0.016
3	6.70	12.30	295.00	10656.00	129.31	0.014
4	6.20	12.20	295.00	12088.00	159.81	0.015
5	6.20	12.20	295.00	11186.00	147.89	0.015
Média	6.10	12.20	295.00	11009.70	148.19	0.014
Desvio padrão	0.47	0.12	0.00	1214.43	15.45	0.001

APÊNDICE B. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DO LAMINADO
COM A SEQUÊNCIA DE EMPILHAMENTO B

Tabela B.2: Resultados do Módulo de Young obtidos com extensômetro para o laminado B

Nº do Provete	Módulo de Young [GPa]
6	8.20
7	8.30
8	6.59
Média	7.45
Desvio Padrão	1.21

GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO DE RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS PARA AS LÂMINAS

Neste apêndice estão presentes os restantes gráficos de comparação dos resultados numéricos e experimentais obtidos para as lâminas.

C.1 MAT 450 T

Nas figuras C.1 e C.2 estão representados os gráficos de comparação para os provetes de MAT 450 T.

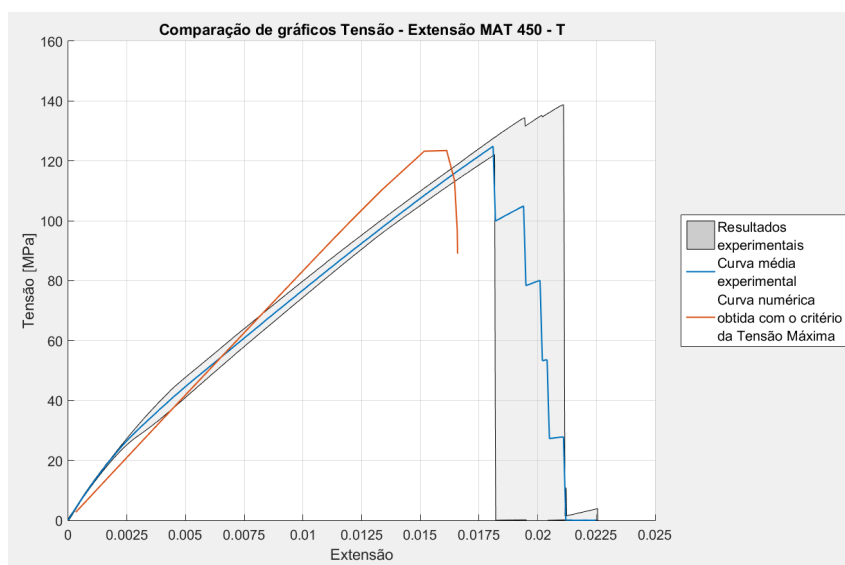


Figura C.1: Gráfico de compara o dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério da Tensão Máxima para os provetes de MAT 450 T

APÊNDICE C. GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO DE RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS PARA AS LÂMINAS

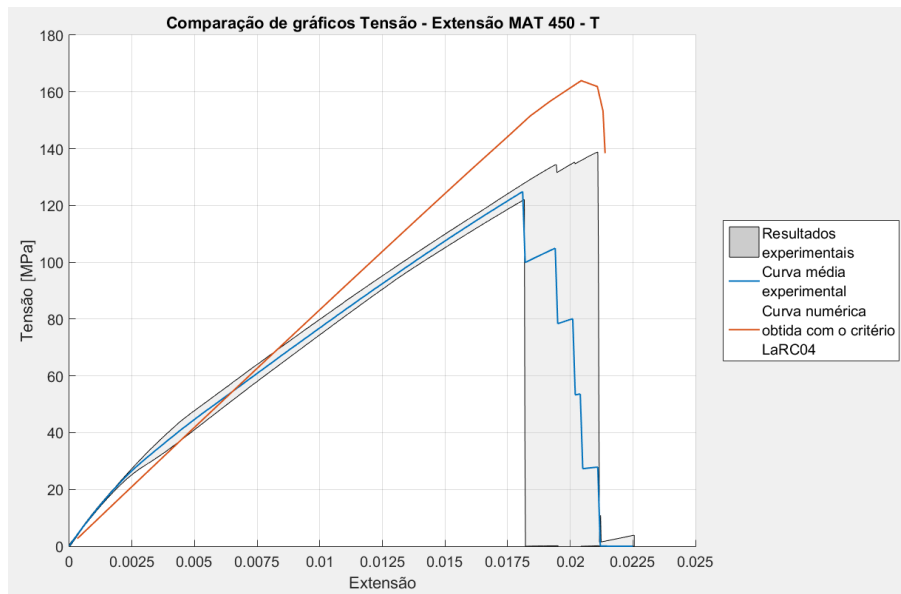


Figura C.2: Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério LaRC04 para os provetes de MAT 450 T

C.2 WRM 800/450 T

Nas figuras C.3 e C.4 estão representados os gráficos de comparação para os provetes de WRM 800/450 T.

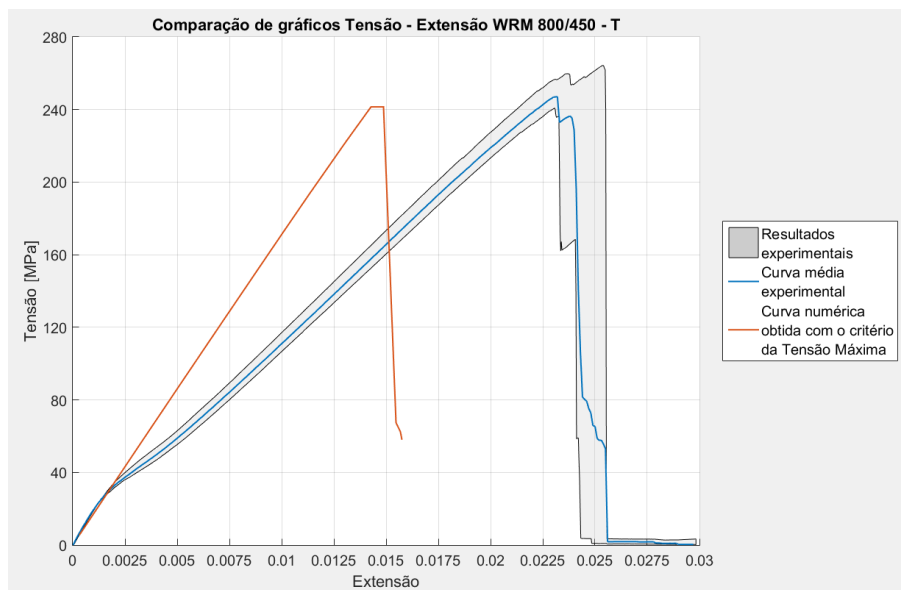


Figura C.3: Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério da Tensão Máxima para os provetes de WRM 800/450 T

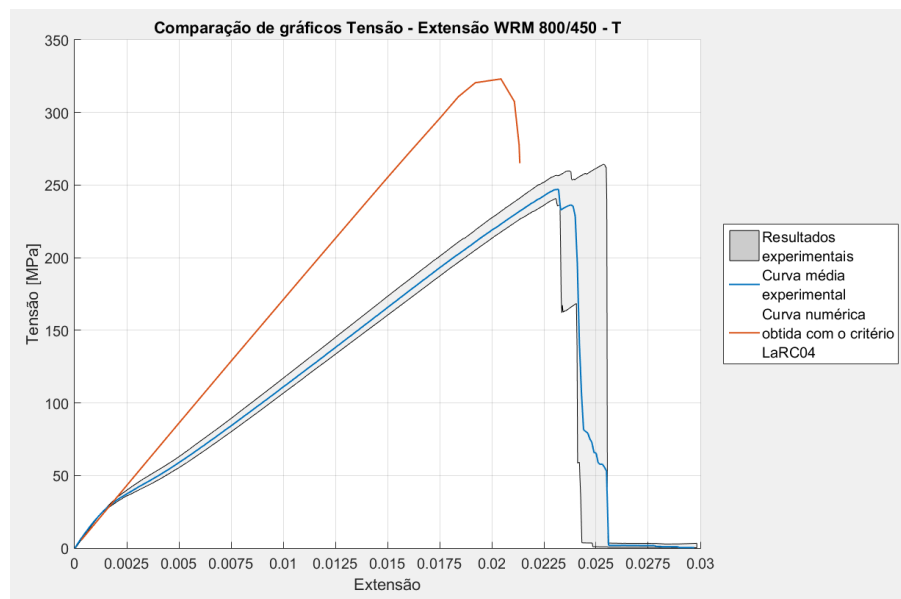


Figura C.4: Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério LaRC04 para os provetes de WRM 800/450 T

GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO DE RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS PARA OS LAMINADOS

Neste apêndice estão presentes os restantes gráficos de comparação dos resultados numéricos e experimentais obtidos para o laminado com a sequência de empilhamento A.

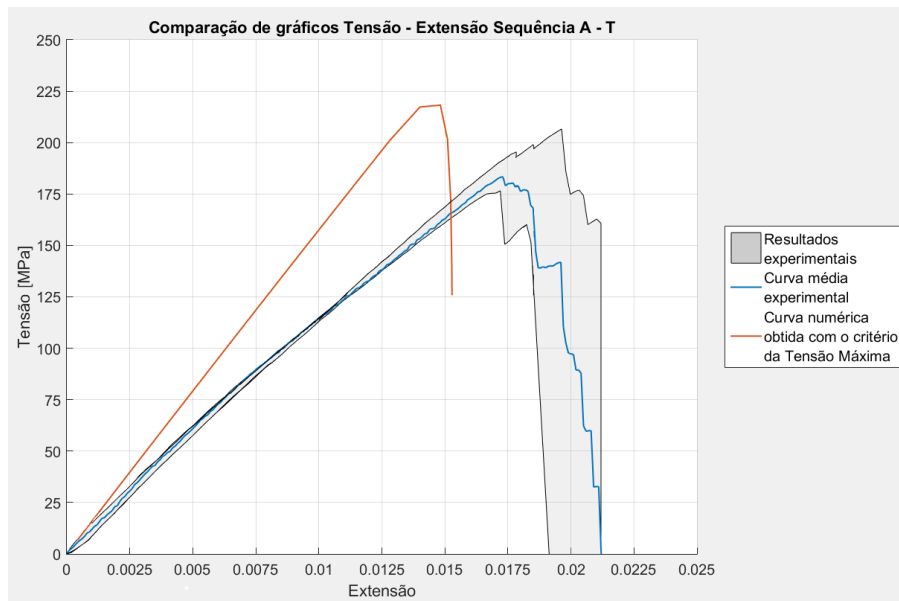


Figura D.1: Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério da Tensão Máxima para os provetes do Laminado A - T

APÊNDICE D. GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO DE RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS PARA OS LAMINADOS

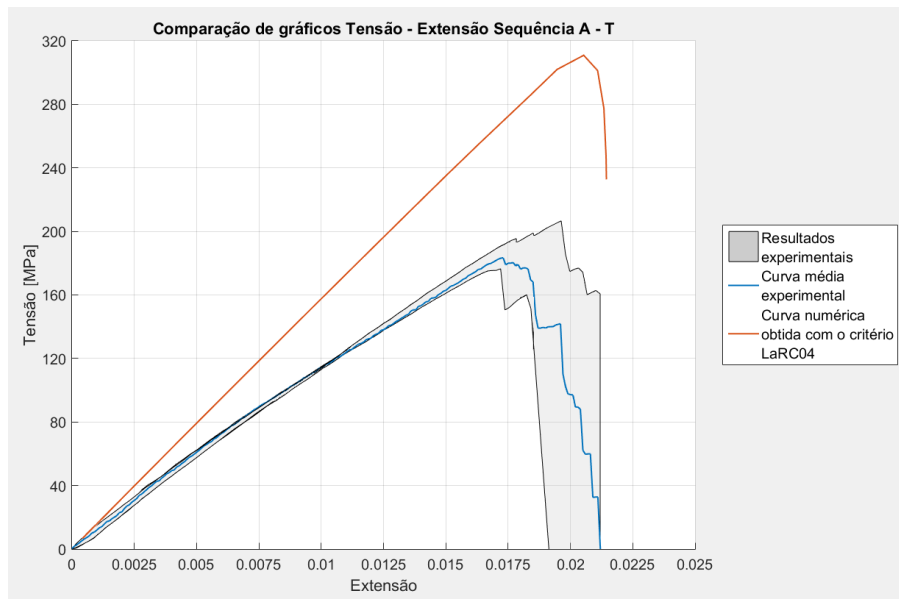


Figura D.2: Gráfico de comparação dos resultados experimentais com o resultado numérico obtido com o critério LaRC04 para os provetes do Laminado A - T

RESULTADOS DOS MODELOS EM H

Neste apêndice são apresentados os resultados para a força máxima, o volume e o rácio força/volume obtidos através das análises dos modelos em H. Nas tabelas E.1 e E.2, estão presentes os referidos resultados para o modelo H_D e H_A , respetivamente.

Tabela E.1: Resultados obtidos para o modelo H_D (modelo com raio)

LADO [mm]	RAIO [mm]	Força Máxima [N]	Volume do Adesivo [mm ³]	Rácio Força/Volume [N/mm ³]
40	65	10827.454	99578.44	0.10873
40	70	11204.927	103124.12	0.10865
40	75	11462.622	106121.64	0.10801
40	80	11676.764	108693.28	0.10743
40	85	11907.307	110926.44	0.10734
40	90	12073.487	112885.64	0.10695
40	95	12232.028	114619.60	0.10672
45	65	11957.921	117843.16	0.10147
45	70	12283.349	123157.52	0.09974
45	75	12711.749	127613.92	0.09961
45	80	12994.946	131413.16	0.09889
45	85	13295.009	134696.12	0.09870
45	90	13486.013	137564.92	0.09803
45	95	13723.204	140095.64	0.09796
50	65	12675.787	134740.84	0.09408
50	70	13248.881	142487.32	0.09298
50	75	13773.338	148917.76	0.09249
50	80	14158.531	154358.16	0.09173
50	85	14619.398	159031.28	0.09193
50	90	14933.853	163095.48	0.09157
50	95	15241.304	166666.96	0.09145


APÊNDICE E. RESULTADOS DOS MODELOS EM H

LADO [mm]	RAIO [mm]	Força Máxima [N]	Volume do Adesivo [mm ³]	Rácio Força/Volume [N/mm ³]
55	65	13388.627	149052.40	0.08982
55	70	14179.049	160131.04	0.08855
55	75	14871.228	169211.60	0.08789
55	80	15469.618	176822.32	0.08749
55	85	15949.866	183312.76	0.08701
55	90	16588.397	188925.56	0.08780
55	95	17088.456	193835.44	0.08816
60	65	13828.720	159228.40	0.08685
60	70	14906.491	174893.20	0.08523
60	75	15942.708	187527.08	0.08502
60	80	16587.023	197993.48	0.08378
60	85	17379.027	206841.60	0.08402
60	90	17892.839	214441.56	0.08344
60	95	18465.134	221054.08	0.08353

Tabela E.2: Resultados obtidos para o modelo H_A (modelo sem raio)

LADO [mm]	Força Máxima [N]	Volume do Adesivo [mm ³]	Rácio Força/Volume [N/mm ³]
40	15149.678	144000.00	0.10521
45	18063.148	182250.00	0.09911
50	21614.708	225000.00	0.09607
55	25488.304	272250.00	0.09362
60	27057.291	324000.00	0.08351

RESULTADOS DOS ENSAIOS DA BUREAU VERITAS - SEQUÊNCIA A


D-291220-11673
6/16

RESULTS

Tensile tests:

Customer reference	BVL reference	Average thickness h [mm]	Average width b [mm]	Max Load F _m [N]	Max stress σ _m [MPa]	Young modulus E _r [GPa]	Max elongation ε _m [%]
Glass fiber panel ship NC247 bv register n° 39654E	TA-1	21,73	25,05	69203	127	10,6	1,9
	TA-2	21,62	24,98	80523	149	12,2	1,5
	TA-3	20,76	25,06	84966	163	10,6	1,7
	TA-4	19,90	25,07	84565	169	10,8	1,7
	TA-5	19,42	25,08	74306	153	12,7	1,5
Average		20,69	25,05	78713	152	11,4	1,6
Standard deviation		1,02	0,04	6828	16	1,0	0,1
Glass fiber panel ship NC247 bv register n° 39654E	TB-1	21,49	25,04	107262	199	12,6	1,9
	TB-2	21,36	24,98	94813	178	12,4	2,0
	TB-3	21,76	24,93	105941	195	12,5	1,8
	TB-4	21,23	24,98	109769	207	12,0	2,0
	TB-5	21,43	24,95	105144	197	11,0	1,9
Average		21,45	24,98	104586	195	12,1	1,9
Standard deviation		0,20	0,04	5737	11	0,7	0,1

An early fiber failure under the extensometer created an abnormal displacement (see appendix 2). This tests result can't be used for the statistical calculations.

Figura I.1: Resultados dos ensaios da *Bureau Veritas* [29]

RESULTADOS OBTIDOS NO ARTIGO [36]

Na tabela II.1, são apresentados os resultados relativos à força máxima suportada por cada tipo de provete, obtidos no artigo [36]. De acordo com a nomenclatura utilizada no mesmo, têm-se os seguintes significados:

- PREP: tipo de preparação da superfície do compósito;
 - None: nenhuma preparação;
 - Grind: superfície alisada/polida;
 - Peel: Remoção de uma camada extra de tecido colocada sobre a superfície exterior do compósito aquando do seu fabrico, antes da colocação do adesivo [37].

- CLEAN: método de limpeza da superfície do compósito;
 - Cloth: superfície limpa com um pano seco;
 - Solv: superfície limpa com acetona e estireno.

- ADHES: adesivo utilizado.
 - Crest: adesivo Scott Bader Crestomer 1186PA;
 - Cryst: adesivo Scott Bader Crystic 2655 PA;
 - Poly: Microfibras de vidro / poliéster ortoftálico Scott Bader 446 PALV.

É ainda de notar que alguns provetes eram demasiado fracos e sofreram falha ao serem cortados ou manuseados. A esses provetes foi atribuída uma força de 0N como sendo a carga máxima suportada [36].

Tabela II.1: Resultados obtidos no artigo [36]

PREP	CLEAN	ADHES	Replicação	Força [N]			Média
				Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	
None	Cloth	Crest	1	768	661	720	716
			2	850	889	895	878
None	Cloth	Cryst	1	167	94	0	87
			2	78	0	0	26
None	Cloth	Poly	1	0	0	0	0
			2	0	0	0	0
None	Solv	Crest	1	1097	1245	1309	1217
			2	1022	1004	1022	1016
None	Solv	Cryst	1	268	249	321	279
			2	0	0	0	0
None	Solv	Poly	1	184	163	290	212
			2	0	0	0	0
Grind	Cloth	Crest	1	946	980	865	931
			2	893	856	781	843
Grind	Cloth	Cryst	1	724	634	737	698
			2	808	880	884	857
Grind	Cloth	Poly	1	1039	1028	783	950
			2	614	869	881	788
Grind	Solv	Crest	1	1059	1007	1042	1036
			2	897	986	906	930
Grind	Solv	Cryst	1	1114	1184	1268	1188
			2	924	974	1021	973
Grind	Solv	Poly	1	720	918	1025	887
			2	1111	1149	785	1015
Peel	Cloth	Crest	1	729	741	756	742
			2	690	721	689	700
Peel	Cloth	Cryst	1	736	997	922	885
			2	854	830	753	812
Peel	Cloth	Poly	1	867	893	725	828
			2	732	713	757	734
Peel	Solv	Crest	1	1147	997	1016	1053
			2	979	886	888	917
Peel	Solv	Cryst	1	741	766	810	772
			2	948	873	869	897
Peel	Solv	Poly	1	621	612	893	709
			2	713	699	726	713

