



Utilização do Método de Elementos Finitos eXtendido para a previsão da resistência de juntas adesivas de chanfro interior

INÊS RAFAELA SANTOS ARAÚJO

novembro de 2022

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO PARA A PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS DE CHANFRO INTERIOR

Inês Rafaela Santos Araújo

1170945

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO PARA A PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS DE CHANFRO INTERIOR

Inês Rafaela Santos Araújo

1170945

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação de Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação de Raul Domingos Ferreira Moreira.

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor António Gonçalves Magalhães

Professor Coordenador, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientador

Doutor Raul Domingos Ferreira Moreira

Professor Adjunto Convidado, ISEP

Arguente

Doutor Ricardo João Camilo Carbas

Investigador, INEGI

PALAVRAS-CHAVE

Juntas adesivas, Adesivo estrutural, Juntas de chanfro interior, Modelação numérica, Previsão de resistência, Método de Elementos Finitos eXtendido.

RESUMO

As juntas adesivas são cada vez mais utilizadas em diversos setores industriais e, dependendo da aplicação, diferentes tipos de configurações podem ser considerados. A configuração de junta mais comum e estudada academicamente é a junta de sobreposição simples. No entanto, existem outras configurações como a junta de chanfro interior que, embora possua alguma complexidade no processo de fabrico, obtém uma melhor distribuição de tensões quando comparada com juntas de sobreposição simples e dupla. Apesar de as juntas de chanfro interior já se encontrarem estudadas na literatura, a quantidade de estudos que analisam diferentes geometrias e adesivos ainda é escassa, assim como a validação de técnicas numéricas robustas e fiáveis para projeto de estruturas com este tipo de juntas, que permitam a sua aplicação em projetos estruturais.

Este trabalho tem como objetivo o estudo numérico paramétrico de juntas adesivas de chanfro interior à tração com diferentes adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752) e diferentes ângulos de inclinação ou α (3,43°, 10°, 15°, 20°, 30° e 45°) pelo Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX). Inicialmente, são descritos os resultados experimentais, obtidos num trabalho anterior, para efeitos de validação dos resultados numéricos obtidos. O trabalho numérico desenvolvido inclui a análise dos modos de rotura, distribuição de tensões de arrancamento e de corte no adesivo no regime elástico, distribuição da variável de dano, resistência das juntas e energia dissipada na rotura. É também efetuada uma comparação dos resultados de Modelos de Dano Coesivo (MDC) obtidos num trabalho anterior.

Com o trabalho realizado, observou-se a coerência dos resultados numéricos com os experimentais, com destaque para a resistência das juntas em função do ângulo de chanfro interior. Constatou-se que as juntas com $\alpha=3,43^\circ$ apresentam os melhores resultados de resistência à tração das juntas. Contrariamente, as juntas com $\alpha=45^\circ$ são as que apresentam o valor inferior de resistência. Ao comparar os três adesivos estudados, o adesivo Araldite® AV138 apresenta o melhor comportamento à tração, independentemente do valor de α . O adesivo Sikaforce® 7752, devido à sua baixa resistência, é aquele que, nas diferentes condições geométricas, apresenta o valor de resistência à tração inferior. A comparação com os valores de MDC mostrou resultados semelhantes. Em função dos resultados obtidos, considerou-se que o MEFX é uma ferramenta que pode ser usada com precisão para efeitos de projeto de juntas adesivas de chanfro interior.

KEYWORDS

Adhesive joints, Structural adhesive, Scarf joints, Numerical modelling, Strength prediction, Extended Finite Element Method.

ABSTRACT

Adhesive joints are increasingly used in various industrial sectors and, depending on the application, different types of configurations can be considered. The most common and academically studied joint configuration is the single-lap joint. However, there are other configurations such as the scarf joint which, although it has some complexity in the manufacturing process, obtains a better stress distribution when compared to single and double-lap joints. Although scarf joints have already been studied in the literature, the number of studies that analyse different geometries and adhesives is still scarce, as is the validation of robust and reliable numerical techniques for the design of structures with this type of joints, which enable its application in structural projects.

The objective of this work is the parametric numerical study of scarf adhesive joints in tension with different adhesives (Araldite® AV138, Araldite® 2015 and Sikaforce® 7752) and different scarf angles or α (3.43°, 10°, 15°, 20°, 30° and 45°) by the eXtended Finite Element Method (XFEM). Initially, the experimental results obtained in a previous work are described, for the purpose of validating the obtained numerical results. The developed numerical work includes the analysis of failure modes, peel, and shear stress distributions in the adhesive in the elastic regime, distribution of the damage variable, joint strength and energy dissipated at failure. A comparison is also made of the results by Cohesive Zone Models (CZM) obtained in a previous work.

With the work carried out, the coherence of the numerical results with the experimental ones was observed, with emphasis on the joint strength as a function of the scarf angle. It was found that joints with $\alpha=3.43^\circ$ present the best results in terms of tensile strength of the joints. On the other hand, joints with $\alpha=45^\circ$ are those with the lowest strength. When comparing the three adhesives studied, the adhesive Araldite® AV138 presents the best tensile behaviour, regardless of the α value. Due to its low strength, the adhesive Sikaforce® 7752 is the one that, under different geometric conditions, has the lowest tensile strength. Comparison with the CZM values showed similar results. Based on the results obtained, it was considered that the XFEM is a tool that can be accurately used to design scarf adhesive joints.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	2 Dimensões
3D	3 Dimensões
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CFRP	<i>Carbon-fibre reinforced plastic</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
EF	Elementos Finitos
EFG	<i>Element-Fre Galerkin</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
HRR	<i>Hutchinson-Rice-Rosengreen</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JSS	Junta de sobreposição simples
MAXE	Critério de deformação nominal máxima
MAXPE	Critério de deformação principal máxima
MAXPS	Critério de tensão principal máxima
MAXPE	Critério de deformação principal máxima
MDC	Modelo de Dano Coesivo
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos eXtendido
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica

PAM	<i>Point Assembly Method</i>
PIM	<i>Interpolation Method</i>
QUADE	Critério quadrático de deformação
QUADS	Critério quadrático de tensão
RKP	<i>Reproducing Kernel Particle</i>
RPIM	<i>Radial Point Interpolation Method</i>
SD	Sobreposição dupla
SDEG	<i>Stiffness degradation</i>
SPH	<i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i>
SS	Sobreposição Simples
TAST	<i>Thick Adherend Shear Test</i>
TFFV	Técnica do Fecho da Fenda Virtual

Lista de Unidades

°	Graus
g	Gramas
GPa	GigaPascal
kg	Quilograma
kN	QuiloNewton
kPa	QuiloPascal
m	Metro
mm	Milímetro
mm/min	Milímetro por minuto

MPa	MegaPascal
N	Newton
N/mm	Newton por milímetro
N.mm	Newton milímetro

Lista de Símbolos

\mathbf{a}_i	Vetor dos graus de liberdade nodais
E	Módulo de Young
G_{13}	Módulo de corte
G_{Ic}	Tenacidade à tração
G_{IIc}	Tenacidade ao corte
\mathbf{K}	Matriz constitutiva
L_t	Comprimento do provete
$P_{m\acute{a}x}$	Força máxima
t_A	Espessura da camada adesiva
t_m^0	Resistência coesiva em modo misto
t_n^0	Resistência coesiva à tração
t_p	Espessura do aderente
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
\mathbf{u}	Vetor deslocamento
α	Ângulo de inclinação
δ	Deslocamento
ε	Deformação

ϵ_f	Deformação de rotura à tração
ϵ_n	Componente de deformação normal
ϵ_s	Componente de deformação ao corte
γ_f	Deformação de rotura ao corte
σ	Tensão
σ_f	Tensão de rotura à tração
σ_y	Tensões de arrancamento
τ_f	Tensão de rotura ao corte
$\tau_{\text{méd}}$	Tensão de corte média
τ_y	Tensão de cedência ao corte
τ_{xy}	Distribuição de tensões de corte
ν	Coefficiente de Poisson

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de junta adesiva [5].	7
Figura 2 - Principais áreas de aplicações de adesivo num helicóptero [7].	9
Figura 3 - Esquema da secção de uma pá de turbina eólica [8].	9
Figura 4 - Carroçaria de um carro: (a) Materiais dissimilares; (b) Ligações adesivas (a azul) [10].	10
Figura 5 - Utilização das ligações adesivas na indústria automóvel [10].	10
Figura 6 - Tipos de solicitações possíveis em juntas adesivas: (a) tração; (b) compressão; (c) corte; (d) clivagem e (e) arrancamento [11].	11
Figura 7 - Representação esquemática dos diferentes modos de rotura (adaptado de [7]).	13
Figura 8 - Tipos de configurações de juntas adesivas [3].	13
Figura 9 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [32]).	19
Figura 10 - Modelo coesivo triangular (adaptado de [45]).	21
Figura 11 - Geometria do provete DCB [58].	23
Figura 12 - Geometria do provete ENF [58].	23
Figura 13 - Distribuição de nós através de uma método de previsão com malha (a) e um método sem malha (b) num modelo em duas dimensões (adaptado de [75]).	26
Figura 14 - Reparação <i>scarf</i> : (a) identificar o dano e remover a zona afetada; (b) ligar o remendo através do uso de adesivo; (c) junta adesiva de chanfro interior [92].	31
Figura 15 - Materiais no Boeing 787 [10].	32
Figura 16 - Geometria da junta de chanfro interior.	40
Figura 17 - Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [104].	41
Figura 18 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Araldite® AV138 [106].	41
Figura 19 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Araldite® 2015 [43].	42
Figura 20 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Sikaforce® 7752.	43
Figura 21 - Maquinagem da junta de chanfro interior com $\alpha=3,43^\circ$.	45
Figura 22 - Configuração utilizada para colagem das juntas.	45
Figura 23 - Grampo de fixação.	46
Figura 24 - Grampos para garantir a fixação da junta durante a cura.	46

Figura 25 - Máquina de ensaio de tração Shimadzu AG-X.....	47
Figura 26 - Atribuição de secções sólidas para modelação dos aderentes e adesivos.....	47
Figura 27 - Representação dos elementos constituintes da malha.....	48
Figura 28 - Representação de uma junta de chanfro interior com $\alpha=45^\circ$	48
Figura 29 - Representação de uma junta de chanfro interior com $\alpha=3,43^\circ$	48
Figura 30 - Efeito <i>bias</i> ao longo do comprimento da junta.	49
Figura 31 - Condições fronteira impostas nos modelos numéricos.	49
Figura 32 - Propagação do dano no MEFX usando o conceito de nós fantasmas antes (a) e depois (b) da repartição de elementos fraturados em subelementos [111].	50
Figura 33 - MDC triangular implementado no <i>software</i> ABAQUS®.....	52
Figura 34 - Modos de rotura dos provetes de junta de chanfro interior com o adesivo Sikaforce® 7752 e com $\alpha=3,43^\circ$ [1].	56
Figura 35 - Curvas $P-\delta$, dos provetes, obtidas experimentalmente - Araldite® AV138 $\alpha=45^\circ$ [1].	56
Figura 36 - Curvas $P-\delta$, dos provetes, obtidas experimentalmente - Araldite® 2015 $\alpha=10^\circ$ [1].	56
Figura 37 - Curvas $P-\delta$, dos provetes, obtidas experimentalmente - Sikaforce® 7752 $\alpha=3,43^\circ$ [1].	57
Figura 38 - Valores médios de $P_{máx}$ e desvio padrão em função de α para os diferentes adesivos em junta de chanfro.	57
Figura 39 - Modos de rotura obtidos na simulação: (a) $\alpha=45^\circ$ - Araldite® AV138; (b) $\alpha=10^\circ$ - Araldite® 2015; (c) $\alpha=3,43^\circ$ - Sikaforce® 7752.....	59
Figura 40 - Plastificação dos aderentes nas juntas de chanfro interior com $\alpha=3,43^\circ$ ligada com o adesivo Araldite® 2015.	60
Figura 41 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138.....	61
Figura 42 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015.	61
Figura 43 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para as juntas com o adesivo Sikaforce® 7752.	62
Figura 44 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente e experimentalmente para a junta ligada com o adesivo Araldite® AV138 e $\alpha=45^\circ$	63
Figura 45 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente e experimentalmente para a junta com o adesivo Araldite® 2015 e $\alpha=10^\circ$	63
Figura 46 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente e experimentalmente para a junta com o adesivo Sikaforce® 7752 e $\alpha=3,43^\circ$	64
Figura 47 - Comparação da tensão normalizada de arrancamento entre adesivos, para $\alpha=3,43^\circ$	65
Figura 48 - Comparação da tensão normalizada de arrancamento entre adesivos, para $\alpha=45^\circ$	65

Figura 49 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® AV138.....	66
Figura 50 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® 2015.	67
Figura 51 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos, para o adesivo Sikaforce® 7752.	67
Figura 52 - Comparação da tensão normalizada de corte entre adesivos, para $\alpha=3,43^\circ$	68
Figura 53 - Comparação da tensão normalizada de corte entre adesivos, para $\alpha=45^\circ$	68
Figura 54 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® AV138.	69
Figura 55 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® 2015.	69
Figura 56 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos, para o adesivo Sikaforce® 7752.	70
Figura 57 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para o adesivo Araldite® AV138 em juntas com diferentes α	71
Figura 58 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para o adesivo Araldite® 2015 em juntas com diferentes α	72
Figura 59 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para o adesivo Sikaforce® 7752 em juntas com diferentes α	72
Figura 60 - Evolução do dano (SDEG) com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para o adesivo Araldite® AV138 com $\alpha=3,43^\circ$	73
Figura 61 - Evolução do dano (SDEG) percentual com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para o adesivo Araldite® AV138 com $\alpha=45^\circ$	73
Figura 62 - Evolução do dano (SDEG) percentual com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para o adesivo Sikaforce® 7752 com $\alpha=3,43^\circ$	74
Figura 63 - Evolução do dano (SDEG) percentual com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para o adesivo Sikaforce® 7752 com $\alpha=45^\circ$	74
Figura 64 - Valores de E_{diss} obtidos para os três adesivos em estudo diferentes e diferentes α	75
Figura 65- Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função de α para as juntas com adesivo Araldite® AV138.	77
Figura 66 - Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função de α para as juntas com adesivo Araldite® 2015.	77
Figura 67 - Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função de α para as juntas com adesivo Sikaforce® 7752.	78
Figura 68 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de α para os três adesivos - resultados experimentais e previsão por MFEX para as juntas de chanfro interior.	78

Figura 69 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para as juntas com $\alpha=45^\circ$ coladas com o adesivo Araldite® AV138.....	80
Figura 70 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para as juntas com $\alpha=10^\circ$ coladas com o adesivo Araldite® 2015.....	81
Figura 71 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para as juntas com $\alpha=3,43^\circ$ coladas com o adesivo Sikaforce® 7752.....	81
Figura 72 - Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função de α com os diferentes adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) Sikaforce® 7752.....	82

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Estudos em juntas adesivas com recurso a métodos MEFX.	27
Tabela 2 - Avaliação numérica do comportamento em juntas adesivas de chanfro interior.....	32
Tabela 3 - Parâmetros geométricos da junta de chanfro interior.	40
Tabela 4 - Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [106].	42
Tabela 5 - Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [43, 108].	43
Tabela 6 - Propriedades do adesivo Sikaforce® 7752 [109].	44
Tabela 7 - Variação das dimensões da malha em função de α	49
Tabela 8 - Parâmetros em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm.	54
Tabela 9 - Parâmetros em tração e corte para uma camada adesiva Araldite® 2015 com uma espessura de 0,2 mm.	54
Tabela 10 - Parâmetros em tração e corte para uma camada adesiva Sikaforce® 7752 com uma espessura de 0,2 mm.	55
Tabela 11 - Valores obtidos para as juntas de chanfro interior e para os diferentes adesivos.	58
Tabela 12 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos pelo MEFX para os diferentes adesivos e valores de α e respetivas variações.	62
Tabela 13 - Valores de E_{diss} [N.mm] obtidos para os três adesivos em estudo e para os diferentes α	76
Tabela 14 - Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função do tipo de adesivo e α	79
Tabela 15 - Resultados numéricos e experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ [N] e respetivo desvio percentual entre os métodos MDC e MEFX para as juntas com chanfro interior ligadas com Araldite® AV138.....	83
Tabela 16 - Resultados numéricos e experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ [N] e respetivo desvio percentual entre os métodos MDC e MEFX para as juntas com chanfro interior ligadas com Araldite® 2015.	83
Tabela 17 - Resultados numéricos e experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ [N] e respetivo desvio percentual entre os métodos MDC e MEFX para as juntas com chanfro interior ligadas com Sikaforce® 7752.	84

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização do relatório.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Ligações adesivas	7
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	7
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	9
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	11
2.1.4	Configurações possíveis de junta	13
2.1.5	Adesivos estruturais	14
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	16
2.2.1	Mecânica dos meios contínuos	17
2.2.2	Mecânica da fratura	18
2.2.3	Modelos de dano coesivo.....	19
2.2.3.1	Tipos de leis coesivas	20
2.2.3.2	Determinação dos parâmetros coesivos.....	21
2.2.4	Mecânica do dano	23
2.2.5	Método de Elementos Finitos eXtendido.....	24
2.2.6	Outros métodos	25
2.2.7	Estado-da-arte.....	26
2.3	Juntas adesivas de chanfro interior	29
2.3.1	Caracterização das juntas.....	29
2.3.2	Aplicações das juntas de chanfro interior	30

2.3.3	Materiais tipicamente utilizados	31
2.3.4	Particularidades de fabrico.....	32
2.3.5	Estado-da-arte.....	32
3	DESENVOLVIMENTO	39
3.1	Metodologia.....	39
3.1.1	Geometria a estudar	39
3.1.2	Materiais utilizados	40
3.1.2.1	Aderentes.....	40
3.1.2.2	Adesivos.....	41
3.1.2.2.1	Araldite® AV138	41
3.1.2.2.2	Araldite® 2015.....	42
3.1.2.2.3	Sikaforce® 7752.....	43
3.1.3	Processo de fabrico	44
3.1.4	Ensaio realizados.....	46
3.1.5	Condições da análise numérica	47
3.1.6	Formulação do MEFX	50
3.1.7	Formulação do MDC.....	52
3.1.8	Determinação das propriedades de MEFX e MDC	53
3.2	Resultados experimentais.....	55
3.2.1	Modos de rotura	55
3.2.2	Curvas $P-\delta$	56
3.2.3	Resistência das juntas	57
3.2.4	Discussão dos resultados.....	58
3.3	Resultados numéricos	59
3.3.1	Modos de rotura	59
3.3.2	Curvas $P-\delta$	60
3.3.3	Análise de tensões.....	64
3.3.3.1	Tensões de arrancamento	64

3.3.3.2	Tensões de corte.....	67
3.3.4	Análise da variável de dano.....	70
3.3.5	Energia dissipada.....	75
3.3.6	Resistência das juntas	76
3.3.7	Comparação com MDC.....	79
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	87
4.1	Conclusões	87
4.2	Propostas de trabalhos futuros.....	88
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	91

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização do relatório

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Nas últimas décadas, a utilização de ligações adesivas tem vindo a aumentar no setor industrial. O uso desta técnica, em detrimento dos métodos de ligações convencionais como a ligação por rebites, ligações aparafusadas e soldadura, é cada vez mais comum, uma vez que as ligações adesivas oferecem vantagens como o menor peso estrutural, maior resistência à fadiga, maior uniformidade na distribuição de tensões ao longo da camada adesiva e a capacidade de ligar materiais diferentes. No entanto, estas apresentam também algumas limitações como condições de temperatura e humidade limitadas, baixa resistência ao arrancamento e a necessidade de cura e preparação da superfície.

Existem diversas configurações de juntas adesivas, das quais a mais comum e estudada é a junta de sobreposição simples (JSS). Apesar da sua facilidade de fabrico, este tipo de configuração está sujeito a tensões de arrancamento significativas nas extremidades da camada adesiva, devido à aplicação de carga descentrada a que este tipo de junta está sujeito. Para minimizar este efeito existe a possibilidade de utilizar outras configurações, como por exemplo a junta de chanfro interior.

Atualmente, a previsão da resistência de uma junta adesiva pode ser realizada recorrendo a *softwares* baseados no Método de Elementos Finitos (MEF) que, combinando a análise a critérios de dano ou modelos de dano, são capazes de prever de forma precisa o comportamento da junta adesiva. Neste contexto, o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX) apresenta-se como um método capaz de prever o comportamento da junta. Atualmente, já existem estudos que demonstram a capacidade de previsão do MEFX na previsão de juntas adesivas. No entanto, existem configurações menos estudadas na literatura, como é o caso da junta de chanfro interior, que necessitam da validação de técnicas numéricas fiáveis.

1.2 Objetivos

A dissertação apresentada consiste num estudo numérico paramétrico pelo MEFX de juntas de chanfro interior sujeitas a esforços de tração. Foram considerados aderentes de liga de alumínio AW6082-T65 e utilizados três adesivos, o Araldite® AV138, o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752. A simulação numérica foi realizada com recurso ao

software ABAQUS®, que permite analisar modelos com diferentes ângulos de inclinação (α).

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento dos adesivos utilizados, analisar a variação da resistência da junta com a variação de α e verificar a capacidade de previsão de resistência do MEFX como técnica de previsão de resistência de juntas de chanfro interior. A análise numérica inclui o estudo da distribuição de tensões de arrancamento e corte (σ_y e τ_{xy} , respetivamente) ao longo da camada adesiva, a análise da variável de dano, a análise da energia dissipada (E_{diss}) e o estudo da resistência da junta através dos valores de força máxima ($P_{m\acute{a}x}$) obtidos.

A validação dos resultados numéricos é realizada através da comparação com resultados obtidos experimentalmente e numericamente por modelos de dano coesivo (MDC), obtidos no trabalho de Barbosa [1].

1.3 Organização do relatório

Esta dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos. No capítulo 1 é realizada uma contextualização do tema, seguida da definição dos objetivos propostos e descrição da organização da dissertação.

No capítulo 2 é realizada a revisão bibliográfica, onde são abordadas as características das juntas adesivas, as suas aplicações mais comuns e as configurações mais utilizadas. Também são apresentados os diferentes modos de rotura, os esforços a que as juntas adesivas estão sujeitas e ainda uma breve descrição dos principais adesivos estruturais. Numa segunda fase são abordados os principais métodos analíticos e numéricos de previsão de resistência de juntas adesivas e é realizado também um estado da arte relativo ao uso do MEFX em juntas adesivas. A parte final deste capítulo é focada nas juntas de chanfro interior, onde é realizado um estado de arte relativo às juntas de chanfro interior e onde são analisados alguns dos estudos realizados neste tipo de junta.

O capítulo 3 é relativo ao trabalho experimental e numérico e está dividido em três partes. Na primeira secção são descritos os materiais utilizados, o processo de fabrico e os ensaios realizados. São também abordadas as condições da análise numérica e as formulações do MEFX e do MDC. Na segunda parte são apresentados e analisados os resultados experimentais. Por fim, são apresentados os resultados numéricos obtidos pelo MEFX, que posteriormente são comparados com os resultados experimentais e numéricos obtidos pelo MDC para efeitos de validação dos resultados obtidos.

O capítulo 4 é reservado às conclusões e propostas de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligações adesivas
- 2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas
- 2.3 Juntas adesivas de chanfro interior

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

Existem diversas evidências históricas que remetem a utilização de adesivos à antiguidade [2]. Atualmente, as ligações adesivas possuem uma grande aplicabilidade, sendo utilizadas nos diversos setores industriais. No entanto, a indústria percussora deste método de ligação foi a indústria aeronáutica que, no início do século passado, utilizava adesivos baseados em caseína (material polimérico natural) na estrutura das aeronaves. Durante a década de 50 os adesivos utilizados nas estruturas de aeronaves eram capazes de oferecer uma boa rigidez e resistência [3].

A utilização de ligações adesivas em diversas aplicações demonstra-se mais vantajosa comparativamente aos métodos de ligações mecânicas mais tradicionais, como parafusos, brasagem, rebites e outras ligações [4]. As ligações adesivas, quando projetadas e fabricadas corretamente, conferem vantagens significativas [3].

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Na Figura 1 encontra-se a representação esquemática de uma junta adesiva, correspondente ao conjunto formado pelos aderentes, pelo adesivo, pelo primário (quando presente) e por todas as interfases associadas. Os aderentes ou substratos são os componentes ligados pelo adesivo, que é um material polimérico capaz de promover a ligação. A interfase é a região entre o adesivo e o aderente. Nesta zona, as propriedades químicas e mecânicas diferem da parte maciça do aderente e do adesivo.

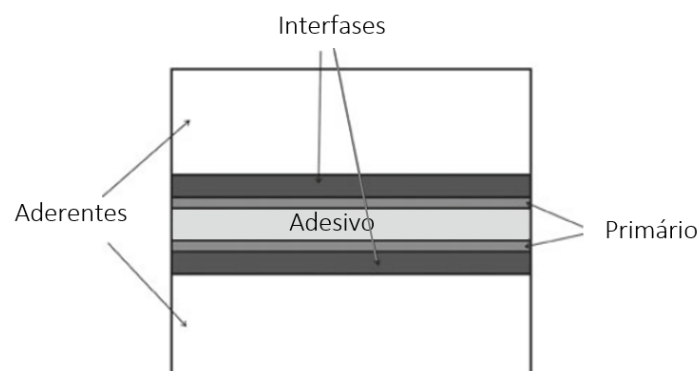


Figura 1 - Representação esquemática de junta adesiva [5].

A ampla utilização das juntas adesivas estruturais deve-se às vantagens que estas apresentam em relação a outros métodos de ligação. As suas principais vantagens são enumeradas de seguida [3, 6]:

1. Distribuição de tensões mais uniformes ao longo da camada adesiva, com redução das concentrações de tensões, uma vez que a ligação obtida é contínua. Esta distribuição permite uma maior rigidez e transmissão de carga elevada, o que possibilita uma redução de peso e um menor custo. Esta característica também confere uma melhor resistência à fadiga.
2. Amortecimento de vibrações, o que melhora a resistência à fadiga, uma vez que as tensões são parcialmente absorvidas.
3. Possibilidade de ligação de diferentes materiais.
4. Maior flexibilidade no projeto de juntas, permitindo o uso de novos materiais e conceitos.
5. Possibilidade de fabrico de formas mais complexas.
6. Obtenção de estruturas de contornos regulares, uma vez que não há necessidade de realizar furos.
7. Possibilidade de automatização do processo de fabrico.
8. Minimização dos problemas de corrosão, sobretudo em ligações com diferentes materiais.

As principais desvantagens das ligações adesivas são [3, 6]:

1. Necessidade de um projeto de junta que reduza ao máximo os esforços de arrancamento e clivagem.
2. A junta pode estar sujeita a esforços de clivagem quando a ligação é feita entre materiais rígidos.
3. A natureza polimérica do adesivo faz com que as ligações possuam uma resistência limitada a condições extremas de temperatura e humidade.
4. Necessidade de gabaritos de fixação para manter as peças em posição durante o processo de cura.
5. Para otimizar os resultados é necessária uma cuidada preparação das superfícies através de uma boa abrasão mecânica, desgorduramento com solvente, ataques químicos, entre outros. É importante que estes procedimentos sejam bem executados, caso contrário a resistência da junta pode ficar comprometida.
6. A cura dos adesivos é frequentemente realizada a elevadas temperaturas, o que exige a existência de um forno ou prensa.
7. O controlo de qualidade e segurança são mais difíceis.
8. Inexistência de um critério de dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura. Existem muitos adesivos que só funcionam corretamente quando são aplicados em situações específicas.

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

As juntas adesivas possuem grande aplicabilidade, encontrando-se amplamente difundidas nos diversos setores industriais. Uma das indústrias que mais contribuiu para o desenvolvimento das ligações adesivas foi a indústria aeronáutica, que ainda hoje utiliza juntas adesivas nas estruturas de aeronaves. Na Figura 2 é possível observar exemplos de aplicações adesivas num helicóptero.

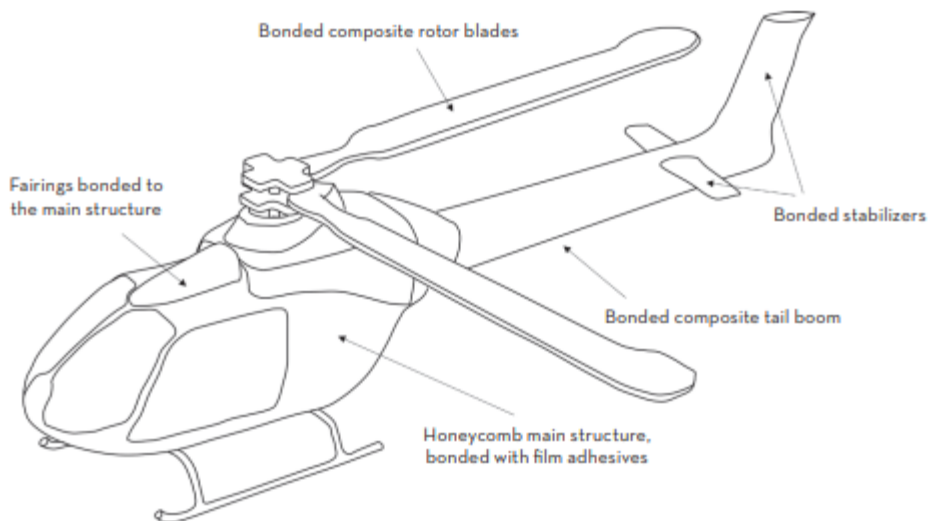


Figura 2 - Principais áreas de aplicações de adesivo num helicóptero [7].

Os adesivos, devido à sua boa resistência à fadiga, são utilizados no fabrico das pás dos helicópteros. De maneira análoga, também são muito utilizados no fabrico das pás das turbinas eólicas. Na Figura 3 é ilustrado o perfil transversal de uma pá de turbina eólica, onde é possível observar as zonas de aplicação adesiva (a amarelo).

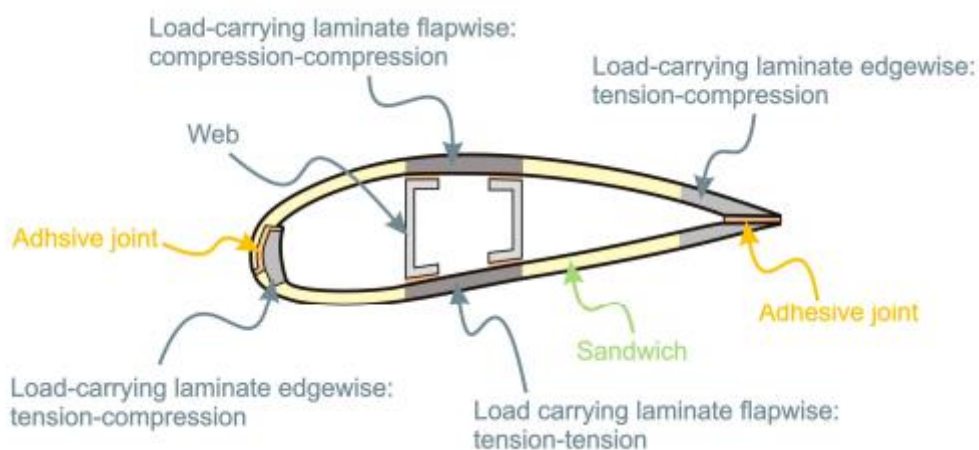


Figura 3 - Esquema da secção de uma pá de turbina eólica [8].

Na indústria automóvel, a necessidade de redução do peso do automóvel para diminuição de consumos e aumento de eficiência, originou o recurso a materiais mais leves, como o alumínio ou plásticos reforçados com fibras. Neste caso, a utilização de métodos de ligações tradicionais não se torna viável, pelo que se recorre às ligações adesivas. São vários os exemplos da utilização de adesivos estruturais na indústria automóvel. O Classe *S Coupé* possui mais de 100 m de ligações estruturais em aplicações *body-in-white*. Já o BMW série 7 possui na sua estrutura mais de 10 kg de adesivos estruturais aplicados [9]. Na Figura 4 (a) observam-se os materiais dissimilares utilizados na carroçaria de um carro. Na Figura 4 (b) estão ilustradas, a azul, ligações adesivas estruturais utilizadas na ligação de diferentes materiais.

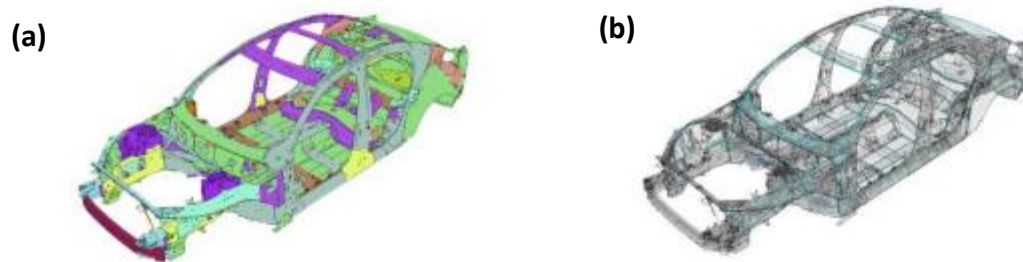


Figura 4 - Carroçaria de um carro: (a) Materiais dissimilares; (b) Ligações adesivas (a azul) [10].

A Figura 5 apresenta exemplos de outras aplicações adesivas na indústria automóvel.



Figura 5 - Utilização das ligações adesivas na indústria automóvel [10].

Na indústria naval as ligações adesivas também são muito utilizadas, uma vez que cada vez mais são utilizados plásticos e materiais compósitos nas estruturas devido ao baixo peso e à sua resistência à corrosão, características relevantes devido às condições a que os barcos estão sujeitos.

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Uma ligação adesiva eficiente deve manter a integridade estrutural da ligação sob solicitações estáticas e dinâmicas. Desta forma, torna-se necessário avaliar corretamente a distribuição do perfil de tensões e, conseqüentemente, os modos de rotura.

Os tipos de esforços que as ligações adesivas podem estar sujeitas são:

- Tração;
- Compressão;
- Corte;
- Clivagem;
- Arrancamento.

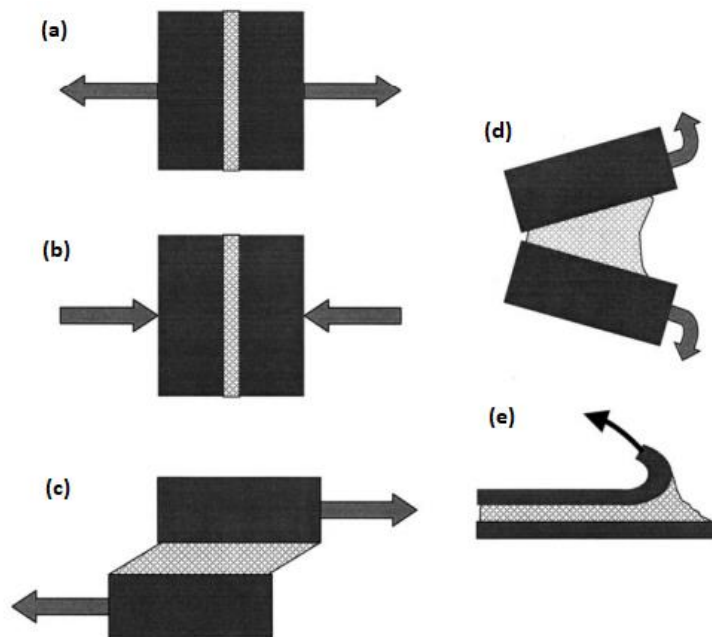


Figura 6 - Tipos de solicitações possíveis em juntas adesivas: (a) tração; (b) compressão; (c) corte; (d) clivagem e (e) arrancamento [11].

As tensões de tração, como ilustrado na Figura 6 (a), desenvolvem-se quando as forças atuam perpendicularmente ao plano de colagem e são distribuídas de forma uniforme ao longo da área colada. A fase de projeto das juntas sujeitas a este tipo de solicitações requer cuidados como a utilização de guias que garantam um carregamento perfeitamente axial e a aplicação de aderentes rígidos de forma a garantir uma

distribuição de tensões uniforme. As tensões de compressão também atuam perpendicularmente ao plano da junta, comprimindo um aderente contra o outro (Figura 6 (b)). Aqui, também se torna essencial que as forças de compressão se mantenham alinhadas. Desta forma, o adesivo encontrar-se-á em compressão pura, praticamente não necessitando de adesivo.

As tensões de corte surgem quando forças que atuam paralelamente ao plano da junta adesiva tendem a separar os aderentes por deslizamento, conforme exemplificado na Figura 6 (c). As juntas adesivas são muito resistentes quando solicitadas a esforços de corte, visto que toda a área colada contribui para a resistência da junta e existe facilidade em garantir o alinhamento dos aderentes. Neste caso, é importante evidenciar que a região central de sobreposição não contribuiu para a sustentação de carga, uma vez que existem grandes concentrações de tensões nas extremidades da sobreposição.

A clivagem, ilustrada na Figura 6 (d), ocorre quando se geram tensões originadas por forças de tração aplicadas nas extremidades de uma junta rígida. As solicitações por arrancamento são semelhantes às solicitações por clivagem, no entanto, um ou ambos os aderentes são flexíveis.

Quando sujeitas a este tipo de solicitações, as juntas adesivas sujeitas a clivagem e arrancamento apresentam uma menor resistência quando comparadas a juntas sujeitas maioritariamente ao corte, uma vez que toda a tensão se encontra concentrada na extremidade da junta.

Relativamente aos modos de rotura, existem fundamentalmente quatro (Figura 7):

- Rotura adesiva;
- Rotura coesiva;
- Rotura mista;
- Rotura do aderente.

A rotura coesiva surge quando a ligação entre o adesivo e o aderente é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo, o que resulta numa rotura onde ambas as superfícies dos aderentes ficam cobertas com adesivo.

A rotura adesiva ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes, resultando numa rotura em que um dos aderentes não apresenta vestígios de adesivo. Este tipo de rotura geralmente está associado à má preparação das superfícies dos aderentes.

A rotura pelo aderente ocorre quando a ligação entre o adesivo e o aderente é mais resistente relativamente ao aderente, originando a rotura parcial ou total do aderente, mantendo intacta a junta adesiva. Este tipo de rotura é o mais desejável numa ligação adesiva.

A rotura mista resulta de uma combinação entre a rotura adesiva e a rotura coesiva. Este tipo de rotura está associado a uma má preparação da superfície do aderente em zonas específicas.

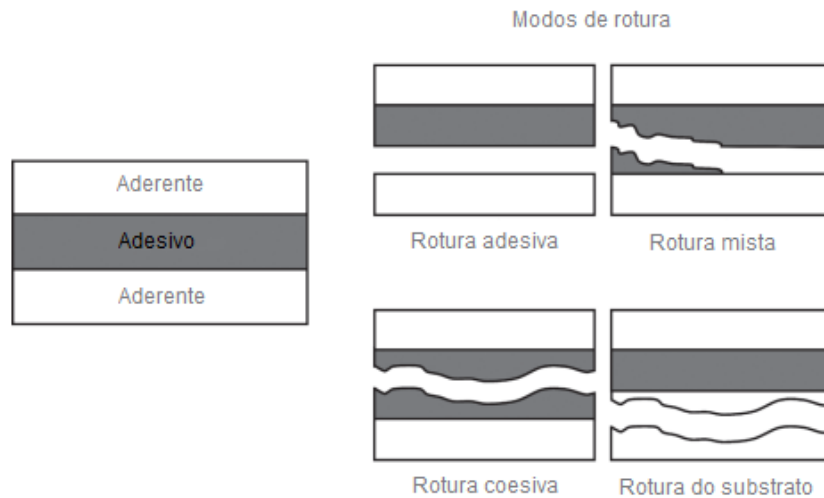


Figura 7 - Representação esquemática dos diferentes modos de rotura (adaptado de [7]).

2.1.4 Configurações possíveis de junta

Sendo as juntas adesivas cada vez mais utilizadas, existem vários tipos de configuração de junta que podem ser executadas dependendo da aplicação. A Figura 8 ilustra os tipos de ligações adesivas mais comuns.

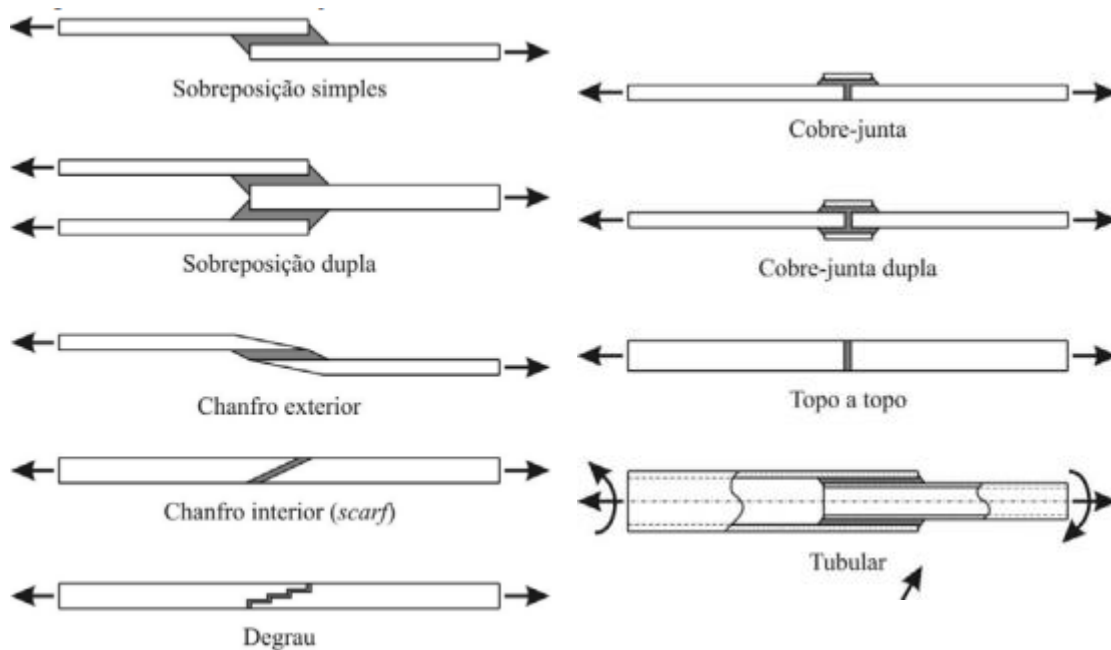


Figura 8 - Tipos de configurações de juntas adesivas [3].

As JSS são muito utilizadas, devido à sua facilidade de fabrico e ao facto de o adesivo estar, predominantemente, sujeito a solicitações de corte. Uma das limitações desta configuração deve-se às forças não colineares que são transmitidas que fazem com que o adesivo fique sujeito a tensões de arrancamento nas extremidades de sobreposição. Com o intuito de diminuir o efeito das tensões de arrancamento são utilizadas outras configurações, como juntas de sobreposição dupla, junta em chanfro e junta em degrau. As juntas de sobreposição dupla, quando comparadas com as JSS, possuem um fabrico mais complexo e demorado, no entanto, os efeitos da flexão são substancialmente inferiores [3].

As juntas topo a topo são as mais simples de fabricar. Estas possuem uma resistência reduzida devido à solicitação de tração e reduzida área de colagem. Para além disso, esta configuração não suporta solicitações de flexão, uma vez que o adesivo estaria sujeito a clivagem. De forma a melhorar o comportamento às solicitações é possível utilizar juntas que reduzam esse efeito. As juntas de chanfro interior possuem uma elevada resistência, uma vez que esta geometria favorece a diminuição dos gradientes de tensões ao longo do adesivo [12]. Em contrapartida, devido à necessidade de maquinaria da zona de sobreposição esta junta acarreta custos superiores [13]. Nas juntas de chanfro exterior a resistência está dependente do ângulo de inclinação [14].

Por fim, a ligação do tipo cobre-junta está sujeita, tal como a JSS, a esforços de arrancamento. A junta cobre-junta dupla é preferível visto que existe uma melhor distribuição de tensões por toda a superfície colada, evitando que se originem tensões de arrancamento [3].

As juntas cilíndricas ou tubulares possuem boa resistência a esforços de tração e compressão. Caso não exista um alinhamento dos eixos de revolução dos dois aderentes, podem-se gerar esforços de arrancamento.

2.1.5 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais apresentam elevados valores de resistência mecânica e são tipicamente utilizados em ligações de materiais de elevada resistência. Estes permitem uma resistência ao corte superior a 6,9 MPa [3]. Seguidamente serão abordados alguns dos adesivos estruturais existentes.

Adesivos Epóxidos

Estes adesivos são caracterizados pela elevada resistência química e mecânica e pela facilidade de aplicação, podendo ser utilizados na ligação de grande parte dos materiais usados em construções mecânicas tendo, por isso, uma grande aplicabilidade no setor automóvel e aeroespacial. Os adesivos à base de epóxido apresentam um custo relativamente baixo, não produzem substâncias voláteis durante o processo de cura e possuem uma grande diversidade de possibilidades na sua formulação podendo, por

exemplo, ser curados com diferentes endurecedores o que irá conferir diferentes propriedades aos adesivos [3]. Estes adesivos estão disponíveis comercialmente sob a forma de um só componente (resina e endurecedor num mesmo constituinte) ou vários, normalmente dois (o endurecedor em separado). Os epóxidos de um só componente curam a quente (com temperaturas a partir dos 120°C), já a cura dos epóxidos de dois componentes processa-se a temperaturas a partir dos 5°C, sendo que este processo pode ser acelerado através do aumento da temperatura. O processo de cura dos adesivos epóxidos não necessita da aplicação de pressão. Os epóxidos podem ser formulados para atender a uma ampla variedade de requisitos de colagem, sendo que as suas propriedades podem ser alteradas com a adição de outras resinas (poliamida, polisulfito, fenólico, entre outras) ou de elastómeros (poliuretano ou nitrilo) [15].

Adesivos Fenólicos

Os adesivos fenólicos são habitualmente utilizados na indústria, sendo caracterizados pela sua durabilidade, estabilidade dimensional e por possuírem uma boa resistência a altas temperaturas e a agentes ambientais. Em geral, estes apresentam um custo reduzido [16]. Devido à libertação de água durante o processo de cura, que se realiza a altas temperaturas, é importante que os aderentes sejam porosos ou que seja imposta uma elevada pressão, desta forma é evitado o aparecimento de vapor de água e dos respetivos defeitos de vazios na zona de colagem. As desvantagens destes adesivos consistem na baixa resistência à corrosão por solventes e baixa resistência ao impacto e vibração. Para resolver estes problemas, estes adesivos são combinados a resinas vinílicas ou elastómeros (nitrilo ou policloropropeno).

Poliimidas

As poliimidas foram desenvolvidas para aplicações aeroespaciais, que requerem adesivos que preservem as suas propriedades sem grandes alterações a temperaturas elevadas. Estes adesivos encontram-se disponíveis comercialmente sob forma de líquidos ou filmes, no entanto, o seu custo é muito elevado. No processo de cura, requerem longos ciclos de pressão e temperatura elevada, o que torna o processo mais complexo. São adesivos difíceis de manusear, frágeis e a resistência a vibrações é limitada.

Adesivos Poliuretanos

Os poliuretanos podem-se apresentar sob a forma de um ou dois componentes, são adesivos de alto desempenho e possuem uma enorme versatilidade. A cura pode-se processar à temperatura ambiente ou a elevadas temperaturas. As características mais marcantes destes adesivos são o seu bom comportamento perante baixas temperaturas e a elevada resistência ao arrancamento, choques e vibrações. Devido à sua flexibilidade e molhabilidade os poliuretanos aderem a diversos tipos de aderentes, incluindo a polímeros que geralmente são difíceis de colar. São utilizados na indústria automóvel e em aplicações criogénicas.

Adesivos Acrílicos

Nos adesivos acrílicos são incluídos os adesivos anaeróbicos, os cianoacrilatos e os acrílicos modificados.

- Os **acrílicos anaeróbicos** são designados desta forma devido ao seu processo de cura, que se inicia após a remoção do oxigênio da resina. Estes adesivos são apresentados sob forma de líquidos monocomponentes que podem ser curados à temperatura ambiente, no entanto, dependendo da natureza química dos aderentes a ligar a velocidade da cura pode variar, sendo que o processo pode ser acelerado através da adição de um primário ou de calor. São caracterizados pela sua facilidade de manuseamento e pela boa resistência à humidade e a solventes. Apesar da sua temperatura máxima de trabalho ser 150°C, existem alguns adesivos anaeróbicos capazes de resistir a temperaturas na ordem dos 230°C. São utilizados para aplicações estruturais e de maquinaria.
- Os **acrílicos cianoacrilatos** são adesivos instantâneos conhecidos vulgarmente como ‘supercola’, uma vez que permitem colagens rápidas. Apresentam uma boa resistência ao corte, no entanto, uma baixa resistência ao arrancamento, à humidade e ao calor. O processo de cura é influenciado por vários fatores, sendo a humidade um dos principais, uma vez que o processo de polimerização requer humidade para se iniciar. Importante salientar que a rapidez da cura impossibilita a ligação de grandes áreas. A aplicação estrutural destes adesivos é restringida aos casos onde as características do meio não são severas e onde a obtenção de colagens rápidas é essencial. Estes adesivos são muito usados nas montagens de estruturas leves constituídas por pequenos componentes. A indústria ótica e eletrónica também faz uso destes adesivos.
- Os **acrílicos modificados** apresentam uma elevada resistência à humidade e uma boa resistência ao arrancamento e ao impacto. Permitem ligações muito resistentes ainda que a preparação dos aderentes seja menos cuidada. Possuem um amplo campo de aplicações devido à resistência que apresentam sob diversos tipos de esforços. As desvantagens destes adesivos residem na baixa resistência mecânica que apresentam a elevadas temperaturas e na sua elevada inflamabilidade.

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

O processo evolutivo das juntas adesivas está intimamente relacionado com o desenvolvimento de metodologias de previsão fiáveis que permitam aumentar a eficiência na sua utilização, possibilitando assim ultrapassar o paradigma das juntas adesivas sobredimensionadas que resultavam em estruturas mais dispendiosas e mais pesadas, tudo isto relacionado com a falta de modelos materiais precisos e de critérios de rotura adequados que se faziam notar há algumas décadas. As duas metodologias

que podem ser aplicadas para a análise de juntas adesivas são as análises de forma fechada (métodos analíticos) e os métodos numéricos.

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [17], que parte do princípio que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade do adesivo se deformar plasticamente, da utilização de aderentes de compósito ou de materiais diferentes. O MEF [18] é então a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [19], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Recorreu-se então à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas coladas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [20]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

Mais recentemente, começou-se a usar outra técnica para modelar o crescimento de fendas com uma tensão, o MEFX, que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento contínuo.

2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [17], que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [21] usou o critério da tensão principal máxima obtida

pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspecto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [22]. No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [19], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

2.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180° . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, este se mantém com dimensões inferiores às críticas, embora se possa propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fissuras pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [23]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [24] através do estudo de fraturas em fibras de vidro, que lhe permitiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [25]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [26] e por Rice [27] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, G_I ou G_{II} , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [28], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos aderentes, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na sollicitação.

2.2.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com estudos de Barenblatt [29] e Dugdale [30], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caraterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [31].

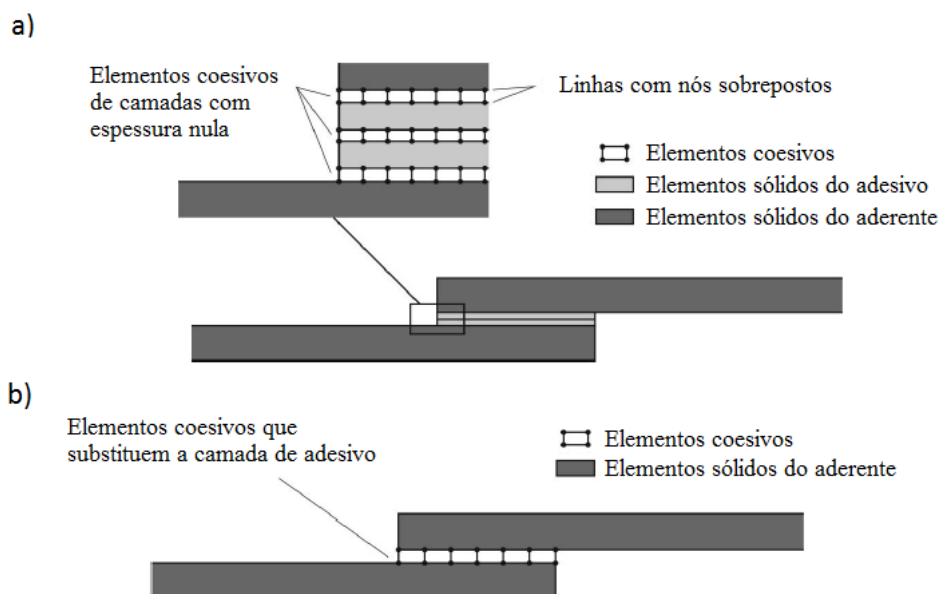


Figura 9 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [32]).

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [33]. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis

coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 9), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos - aproximação local [34], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva - aproximação contínua [35].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenômenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [36]. Este modelo está implementado em *softwares*, como o caso do ABAQUS®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D apresenta uma componente adicional de corte [37].

2.2.3.1 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [38], triangular [39], exponencial [40], polinomial [41] e trapezoidal [42]. Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [43].

A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [44]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [43] de quatro nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do ABAQUS®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 10).

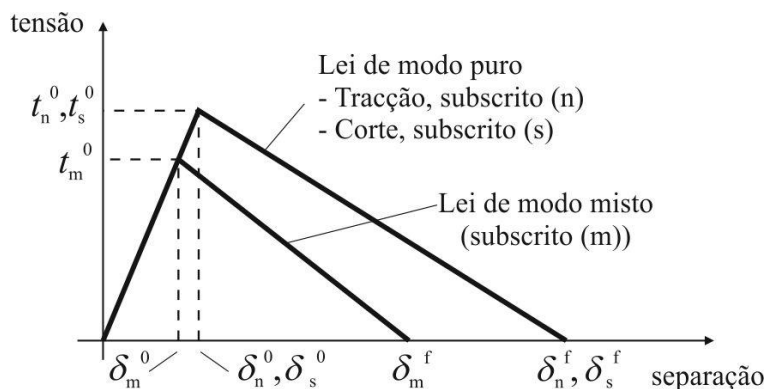


Figura 10 - Modelo coesivo triangular (adaptado de [45]).

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte [45].

Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [46] e modo II [47].

2.2.3.2 Determinação dos parâmetros coesivos

As análises por MDC permitem explicar o comportamento do dano em juntas adesivas. Contudo, os parâmetros coesivos devem ser calibrados com ensaios experimentais e respetivamente validados, de forma a simular com maior precisão a rotura da ligação [48]. Vários estudos têm sido publicados sobre a definição dos parâmetros coesivos (t_n^0 , t_s^0 , G_{Ic} e G_{IIc}). Contudo, segundo Jung Lee et al. [49], alguns parâmetros como t_n^0 e t_s^0 , ainda não se encontram devidamente padronizados. Assim surgem algumas técnicas de análise de dados, como por exemplo o método de definição individual de parâmetros, o método direto e o método indireto, sendo que estes apresentam diferentes graus de complexidade e de precisão. Alguns trabalhos realizados para validar ensaios em modo misto, estimando os MDC em modo puro através de ensaios através de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB), *End-Notched Flexure* (ENF) e JSS, alcançaram bons resultados [50, 51].

O método de definição individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. No entanto este método é particularmente crítico devidos desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e a ligação adesiva [52]. Este problema surge causado pelo efeito de restrição às deformações de uma camada fina de adesivos entre dois aderentes, e também devido

ao modo misto de propagação de fendas em ligações adesivas. De facto, as fendas em materiais maciços tendem a crescer de forma perpendicular à direção de tensão principal máxima [53]. Em ligações adesivas finas, como o adesivo é tipicamente mais fraco e flexível do que os aderentes, as fendas são obrigadas a propagar do sentido longitudinal da ligação. O método inverso consiste no procedimento iterativo de ajuste entre as previsões numéricas e os dados experimentais, considerando por exemplo a curva $P-\delta$, o que permite a estimativa de leis coesivas simplificadas para as condições específicas em que se está a executar o ajuste de parâmetros. Nos métodos de definição dos parâmetros e inverso é selecionada uma forma parametrizada da lei coesiva (por exemplo, bilinear ou trilinear) para obter o MDC, com base no comportamento do material a ser simulado. Por outro lado, o método direto define a forma exata as leis coesivas, na medida que este método calcula os MDC da ligação adesiva a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura [52], pela diferenciação das curvas $G_I-\delta_h$ ou $G_{II}-\delta_s$ (em que δ_h é deslocamento em tração e δ_s é deslocamento em corte). No entanto, no que respeita aos parâmetros dos MDC, G_{Ic} e G_{IIc} são normalmente os principais parâmetros a determinar, em função do papel preponderante que desempenham nos resultados globais. Para avaliação de G_{Ic} e G_{IIc} , os métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são geralmente mais simples de aplicar, embora só possam ser utilizados em adesivos que não apresentem uma ductilidade muito acentuada. De facto, a MFLE não é viável em adesivos com grande plastificação e, nestas condições, o integral- J surge como alternativa para definição de G_{Ic} e G_{IIc} .

Independentemente da técnica utilizada para avaliação dos parâmetros coesivos, os ensaios tipicamente usados para a determinação de G_{Ic} e G_{IIc} são o ensaio DCB (tração) e ENF (corte). O ensaio DCB é o mais utilizado para determinar G_{Ic} pois apresenta uma geometria simples e de fácil fabrico dos provetes. Existem vários métodos para obter G_{Ic} , como métodos baseados na teoria de vigas (corrigida ou não), métodos baseados no comprimento equivalente ou integral- J [54]. Rice [27] tornou possível obter uma expressão para o valor de G_{Ic} em provetes DCB através do método de integral- J , que também permite obter a relação entre as tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda, ou seja, a lei coesiva [55]. O ensaio DCB é constituído por dois aderentes colados entre si com uma camada fina de adesivo. Durante a fabricação do provete, é provocada uma fenda inicial numa das extremidades do mesmo. Todavia, podem ser sentidas algumas dificuldades quando se determina o valor de G . Por vezes a propagação da fenda pode ser instável e, nesses casos, a medição do comprimento de fenda durante o ensaio torna-se difícil. Em alguns ensaios DCB, a ponta da fenda pode não ser claramente visível, dependendo do adesivo utilizado [56]. A norma referente ao ensaio DCB é a norma ASTM D3433-99 [57], onde está enunciado o método para execução de ensaio. O esquema definido para este ensaio encontra-se representado na Figura 11. Na mesma norma é indicada a forma de determinar a altura mínima do aderente (h), de forma a evitar deformação plástica dos aderentes durante o ensaio,

pela equação (1) em que T corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda na ligação adesiva, a é o comprimento da fenda, B é a largura do aderente e σ_y corresponde à tensão de cedência do material do aderente.

$$h = \sqrt{\frac{6Ta}{B\sigma_y}}, \quad (1)$$

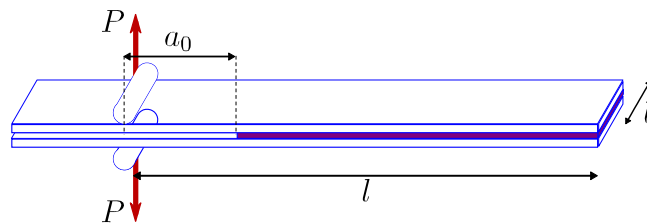


Figura 11 - Geometria do provete DCB [58].

O ensaio ENF descreve-se como uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e carregada a meio vão, com um comprimento da pré-fenda inicial (a_0) definido, onde a meio é aplicada uma carga P (Figura 12). A solicitação aplicada origina a propagação da fenda sem haver a separação dos aderentes. Para que a propagação da fenda seja estável, é necessário que o a_0 seja pelo menos igual a 70% do comprimento total do provete ($2L$) [59]. Como os métodos utilizados para determinação dos parâmetros coesivos tipicamente requerem a medição de a durante a propagação, podem-se observar dificuldades na estimativa de G_{IIC} por esta medição [60].

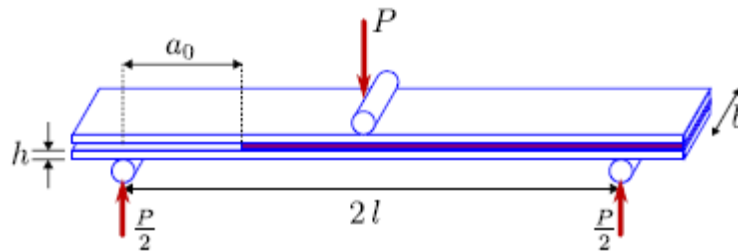


Figura 12 - Geometria do provete ENF [58].

2.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [61] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de

Khoramishad et al. [62] para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [31].

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [63]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [64] ou do número de ciclos para análises de fadiga [65, 66]. Comparativamente aos MDC e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetórias pré-definidas [67].

Hua et al. [68] propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que permitiu obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. [69] usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida em algum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de E e do coeficiente de Poisson (ν) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

2.2.5 Método de Elementos Finitos eXtendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tração e corte correspondentes a $P_{máx}$, respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX,

comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [70]. Belytschko e Black [71], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [72]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [73].

2.2.6 Outros métodos

Os métodos de previsão de resistência que não recorrem ao uso de malha têm vindo a tornar-se, cada vez mais, uma alternativa aos restantes métodos de previsão. Apesar de esta técnica já se encontrar bastante estudada em diversos ramos da engenharia, poucos trabalhos se encontram direcionados à previsão de resistência no que diz respeito a ligações adesivas.

Ainda que o MEF seja usado com sucesso em diversos estudos, este apresenta algumas limitações. Situações em que ocorram grandes deformações afetam o rigor deste método, devido a distorções na malha. Uma reorganização da malha poderia solucionar o problema, no entanto isto resultaria num aumento acentuado do esforço computacional. Por isto, o MEF não é a alternativa mais viável em situações em que há a constante necessidade de reajustar a malha. Assim, para transpor os problemas destes métodos, surge a necessidade de desenvolver métodos sem malha [74].

A aplicação de um método sem malha normalmente segue os seguintes princípios. Primeiro, estuda-se a geometria do problema e estabelece-se o domínio sólido e contorno. De seguida definem-se as condições naturais e essenciais dos limites. Posto isto, o domínio e fronteiras do problema são definidos por um conjunto de nós com uma

distribuição que pode ser regular ou irregular. Como representado na Figura 13, ao contrário dos métodos de previsão mais convencionais, neste método o conjunto de nós não forma uma malha, uma vez que para a formulação das funções (de aproximação ou interpolação) não é necessário qualquer tipo de conhecimento prévio relativo à relação entre cada um dos nós. Na verdade, a única informação necessária é a localização espacial de cada nó.

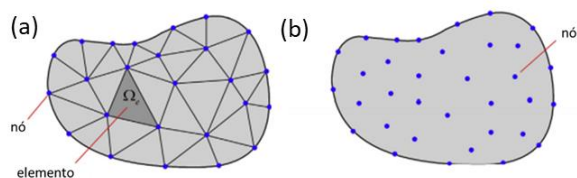


Figura 13 - Distribuição de nós através de um método de previsão com malha (a) e um método sem malha (b) num modelo em duas dimensões (adaptado de [75]).

Assim como os métodos dependentes de malha, a densidade de nós, bem como a sua distribuição, afeta o desempenho dos métodos sem malha. Uma distribuição de nós mais refinada leva a resultados mais precisos. No entanto, ao aumento do número de nós está também associado a um aumento do esforço computacional. Assim, zonas em que seja previsível uma elevada concentração de tensões devem apresentar uma densidade nodal maior, quando comparadas com zonas em que a concentração de tensões não é espetável. A utilização destes métodos pode apresentar diferentes modelos. Alguns dos modelos mais comuns são: *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) [76, 77], *Element-Free Galerkin* (EFG) [78], *Reproducing Kernel Particle* (RKP) [79, 80] e *Radial Point Interpolation Method* (RPIM) [81], que surge como melhoria dos modelos *Point Interpolation Method* (PIM) [82] e *Point Assembly Method* (PAM) [83].

No que toca a ligações adesivas, este método torna-se verdadeiramente vantajoso quando usado em problemas de mecânica da fratura ou de dano, uma vez que é possível simular a evolução do dano, sem que para isso seja necessário o reajuste da malha. Na verdade, nos modelos que não recorrem ao uso de malhas, o caminho de propagação da fenda é independente da distribuição das partículas no modelo [84]. Ainda que estes modelos sejam de uma elevada complexidade de aplicação e exijam um elevado esforço computacional, estudos recentes comprovam que este tipo de análise é mais capaz e preciso que outros métodos mais convencionais. De facto, o uso correto de métodos sem malha pode até resultar numa eficiência computacional superior à de modelos em 3D, obtidos por elementos finitos [85].

2.2.7 Estado-da-arte

Na Tabela 1 são apresentados, de forma breve, estudos utilizando o MEFX aplicados a juntas adesivas.

Tabela 1 - Estudos em juntas adesivas com recurso a métodos MEFX.

Referências bibliográficas	Descrição do trabalho
Numerical modelling and experimental validation of step bonded joints [86]	<p>Este trabalho consiste no estudo experimental e numérico pelo MEFX de juntas de sobreposição dupla, onde existe variação do comprimento de sobreposição e do adesivo. O trabalho foi realizado considerando aderentes de alumínio, submetidos a uma carga de tração, a fim de avaliar o seu desempenho. No estudo numérico é realizada uma análise das distribuições de tensões na camada adesiva, uma previsão de resistência por MEFX, uma previsão de resistência por MEFX considerando critérios de iniciação de dano baseados sobre tensões e deformações e ainda um estudo sobre o critério de energia para propagação de dano. Foi possível concluir que, com a utilização de critérios de iniciação e propagação de dano adequados, a análise pelo MEFX revela-se muito precisa. No entanto, a escolha de critérios que não são consistentes com o comportamento dos adesivos e com os modos de falha observados a análise pelo MEFX resulta em diversos erros.</p>
Modelling of tubular adhesively-bonded joints by the Extended Finite Element Method [87]	<p>Neste trabalho foi realizado uma análise paramétrica de juntas adesivas tubulares de sobreposição simples quanto ao seu desempenho à tração usando o MEFX. O principal objetivo do trabalho era avaliar a capacidade de previsão de resistência do MEFX, através da comparação com os dados experimentais. Concluiu-se que, com uma escolha correta dos critérios de iniciação e propagação de dano, o MEFX é um método viável e preciso para a previsão de resistência de juntas tubulares.</p>

Numerical modelling of adhesively-bonded double-lap joints by the eXtended Finite Element Method [88]

Neste trabalho foi realizado um estudo numérico pelo MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição dupla. Os resultados obtidos numericamente pelo MEFX foram posteriormente comparados aos valores obtidos experimentalmente e numericamente pelo MDC. Para esse efeito foram considerados três adesivos com propriedades de resistência e ductilidade diferentes, e diferentes comprimentos de sobreposição. A análise numérica mostrou que, quando são utilizados o critério de tensão nominal máxima (MAXS) e o critério quadrático de tensão (QUADS), o MEFX é capaz de prever com precisão a resistência da junta. O estudo numérico pelo MEFX produziu valores próximos dos valores obtidos pela análise MDC.

Cohesive and XFEM evaluation of adhesive failure for dissimilar single-lap joints [89]

Neste trabalho foi utilizado o MEFX e o MDC para prever a resistência de JSS com diferentes aderentes (alumínio - alumínio; carbono - alumínio; carbono - carbono). Foi utilizado o método de correlação de imagem digital ou *digital image correlation* (DIC) para medição dos campos de deformação. Foram utilizados aderentes de alumínio e de fibra de carbono com resina epóxi com diferentes espessuras (3 mm e 5 mm). O adesivo utilizado foi o Araldite® 2015. A comparação de resultados mostrou que para as juntas de alumínio e carbono e para as juntas carbono- carbono, os valores numéricos sobrestimam os valores obtidos experimentalmente pelo DIC. Concluiu-se que o uso de aderentes dissimilares reduz a resistência e rigidez das juntas e a delaminação das fibras de carbono reduz a integridade da junta.

Numerical analysis by XFEM of hybrid T-peel joints [90]

O principal objetivo deste trabalho consiste em validar a capacidade de previsão da resistência à tração de diferentes juntas T do MEFX. Para isso, foram comparados os resultados obtidos experimentalmente e numericamente. Experimentalmente, foram testados à tração três tipos de juntas - juntas adesivas, juntas soldadas e juntas híbridas. O material do aderente foi o aço carbono C45 e, no caso das juntas adesivas e híbridas, foi utilizado o adesivo Araldite® 2015. Numericamente foram efetuadas duas análises - análise de iniciação e propagação de dano. Os resultados experimentais revelaram que as juntas adesivas e as juntas híbridas sofreram rotura na camada adesiva (rotura coesiva). Em termos de $P_{máx}$ as juntas híbridas obtiveram valores consideravelmente superiores às juntas adesivas e soldadas. A adição de adesivo às juntas puramente soldadas (juntas híbridas) melhorou o comportamento da junta, uma vez que existe uma redução de picos de tensão e a criação de caminhos alternativos para a transferência de carga. Os modos de rotura observados na previsão numérica correspondiam aos observados experimentalmente. Relativamente à previsão de $P_{máx}$, a sua precisão varia dependendo dos critérios de iniciação e propagação de dano. Os melhores resultados foram obtidos com a utilização dos critérios de iniciação de dano QUADS e MAXS. Na análise da propagação de dano a lei exponencial não se revela adequada, devido aos valores de deslocamento obtidos, mas a lei linear obteve bons resultados. Conclui-se que o MEFX é um método capaz de prever a resistência das juntas.

2.3 Juntas adesivas de chanfro interior

2.3.1 Caracterização das juntas

Como referido anteriormente no capítulo 2.1.4 (Figura 8), existem várias configurações de juntas adesivas. A JSS é a junta adesiva mais utilizada, uma vez que a sua fabricação é muito simples e a junta está sujeita maioritariamente a solicitações de corte. No entanto, as distribuições de σ_y e τ_{xy} resultantes na camada adesiva são muito complexas,

visto que as forças transmitidas não são colineares, o que provoca efeitos de flexão que induzem tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição, reduzindo assim a resistência da junta [3]. Para minimizar este problema existem outras configurações que podem ser utilizadas, entre elas as juntas de chanfro. Estas, ao contrário da JSS, não provocam flexão dos aderentes e, por isso, são uma boa alternativa, sendo cada vez mais utilizadas em aplicações industriais [3, 91].

O ângulo de inclinação α é um parâmetro muito importante neste tipo de juntas, uma vez que este desempenha um papel importante na resistência da junta, pelo que, a escolha de um ângulo otimizado permite uma distribuição mais uniforme dos esforços, o que aumenta a resistência da junta. O valor de α deve variar entre 0° e 90° (juntas topo a topo).

A resistência mecânica da junta pode ser afetada por diversos fatores como o valor de α , o processo de maquinagem, o tipo de adesivo, sequência de empilhamento, entre outros [92].

2.3.2 Aplicações das juntas de chanfro interior

As juntas de chanfro interior possuem uma ampla aplicabilidade na reparação de estruturas na indústria aeronáutica (reparações *scarf*). As aeronaves estão expostas a condições adversas e, por isso, as partes estruturais como a fuselagem e as asas (fabricadas com *carbon-fibre reinforced plastic* ou CFRP) muitas vezes sofrem danos, o que compromete a integridade geral da estrutura [93]. Nestes casos, devido ao elevado custo que a substituição de peças acarreta, são feitas reparações das estruturas no local do dano.

Existem diversas técnicas de reparações, como as reparações por sobreposição simples (SS) e por sobreposição dupla (SD). No entanto, as mais utilizadas são as reparações *scarf*, uma vez que estas, quando comparadas com as restantes, apresentam uma maior eficiência, resultante da eliminação das excentricidades presentes nas restantes configurações. Outra das vantagens da utilização das reparações *scarf* é a ausência de perturbação aerodinâmica e a uniformidade de distribuição de tensões ao longo do comprimento da ligação [94, 95]. No entanto, devido à sua geometria esta é uma reparação de difícil execução, o que, naturalmente, resulta no aumento do custo de fabrico [96]. Na Figura 14 está representada, de forma simplificada, o processo de reparação *scarf*. Inicialmente é identificada e removida a parte danificada de acordo com o ângulo pré-determinado (Figura 14 (a)). Posteriormente, são aplicadas finas camadas de adesivo, onde é aplicado o remendo (Figura 14 (b) e Figura 14 (c)).

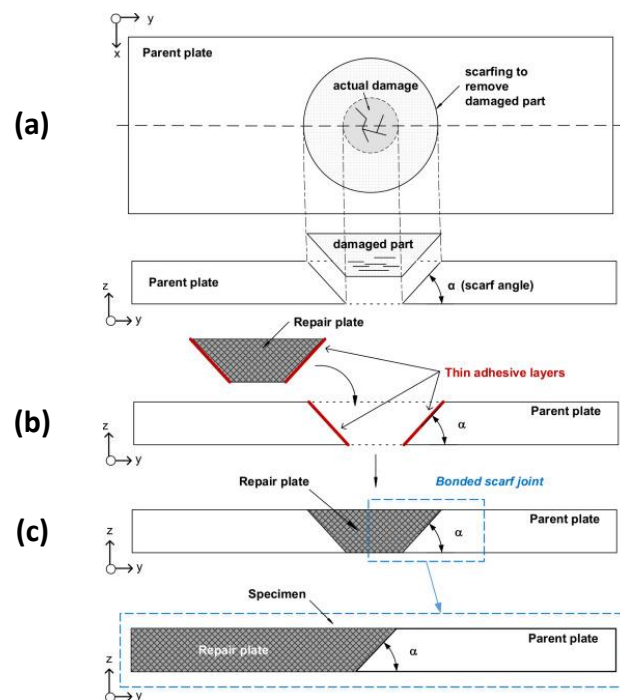


Figura 14 - Reparação scarf: (a) identificar o dano e remover a zona afetada; (b) ligar o remendo através do uso de adesivo; (c) junta adesiva de chanfro interior [92].

Este processo de reparação também pode ser utilizado na indústria automóvel e na reparação de turbinas eólicas [97, 98].

2.3.3 Materiais tipicamente utilizados

Um dos motivos para a ampla aplicação das juntas de chanfro interior na reparação de estruturas de aeronaves, automóveis e turbinas eólicas, deve-se à crescente utilização de materiais compósitos nestas estruturas, que se torna cada vez mais comum, uma vez que estes materiais permitem a redução do peso da estrutura, aumentando o seu desempenho e diminuindo o consumo de combustível [9].

Na Figura 15 são apresentados os materiais utilizados na estrutura do Boeing 787, onde mais de 50% dos materiais utilizados na fuselagem são compósitos [10]. O projeto de um remendo scarf é complexo uma vez que existem várias variáveis como a quantidade de materiais e parâmetros geométricos que afetam o comportamento do remendo. Existem, por isso, diversos estudos de juntas de chanfro interior com a utilização de compósitos como o CFRP [91, 92, 99].

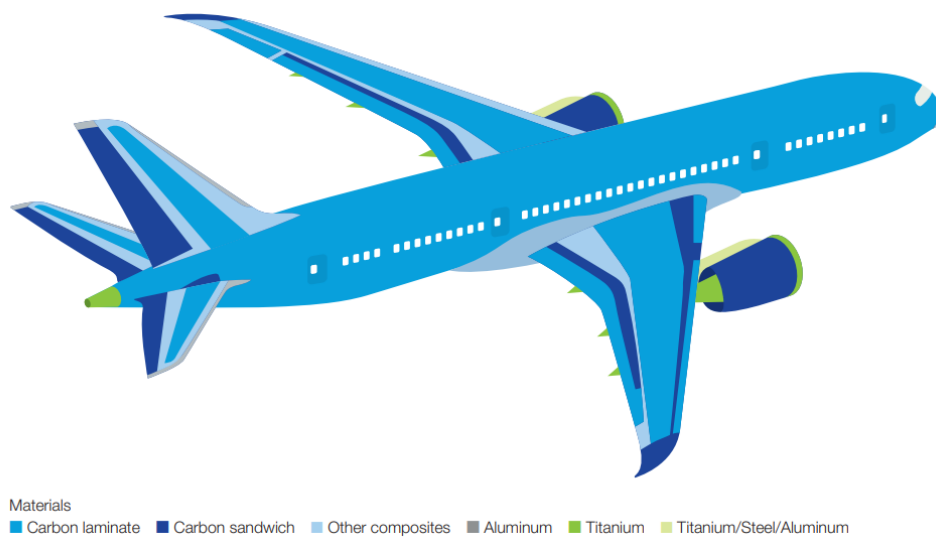


Figura 15 - Materiais no Boeing 787 [10].

2.3.4 Particularidades de fabrico

As juntas de chanfro interior são juntas que, devido à sua geometria, requerem maquinagem. Após a obtenção dos aderentes nas dimensões pretendidas é realizada a maquinagem da rampa, onde deve ser utilizado um prato de metal de 10 mm como suporte, de forma a prevenir a flexão excessiva do aderente. Depois é efetuada a preparação da superfície a ser ligada, etapa que deve ser efetuada com especial atenção uma vez que a resistência da junta depende do tratamento dado à superfície [13, 100].

2.3.5 Estado-da-arte

Na Tabela 2 são apresentados, de forma breve, estudos recentes e relevantes efetuados na previsão da resistência de juntas de chanfro interior.

Tabela 2 - Avaliação numérica do comportamento em juntas adesivas de chanfro interior.

Referências bibliográficas	Descrição do trabalho
Experimental and numerical analysis of scarf aluminum adhesive joints [12]	Neste trabalho é feita uma validação das leis coesivas em tração e corte de juntas de chanfro interior, estimadas pela aplicação do método direto na previsão da resistência das juntas em solitação mista. Foram utilizados aderentes de alumínio e estudados três adesivos (Araldite® 2015, Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752). As leis coesivas em modo puro serviram de base para a criação de leis simplificadas triangulares, trapezoidais e exponenciais,

testadas para cada um dos adesivos. Os resultados experimentais demonstraram que o comportamento mecânico das juntas depende do valor de α e do tipo de adesivo aplicado, sendo que é o adesivo frágil Araldite® AV138 que apresenta um melhor desempenho. Os resultados demonstraram que o método direto é uma técnica viável para a previsão de resistência. No caso do Araldite® AV138 é o modelo triangular que se encontra mais próximo do modelo de modo misto. No adesivo Araldite® 2015 é o modelo triangular e, por fim, no Sikaforce® 7752 é o exponencial, apesar de todos os modelos possuírem resultados muito próximos.

Prediction of failure behavior of adhesively bonded CFRP scarf joints using a cohesive zone model [99]

Neste trabalho foi realizado um estudo experimental e numérico para o desempenho à tração de juntas adesivas de chanfro interior. Foi utilizado um adesivo dúctil e considerados aderentes de CFRP. Experimentalmente foram testadas juntas de chanfro interior com diferentes valores de α (3°, 5°, 10°, 15°, 20° e 30°). Numericamente, de forma a validar a precisão de previsão de um MDC definido pelo utilizador, os resultados numéricos foram comparados com os resultados experimentais. Foi também utilizado um modelo de dano triangular. Experimentalmente verificou-se que o $P_{m\acute{a}x}$ aumenta exponencialmente com a diminuição de α , exceto para as juntas com aderentes com a sequência de empilhamento [45/0/-45/90]_{3S}. A distribuição de tensões no adesivo não é uniforme e depende de α e da sequência de empilhamento do aderente. A magnitude da tensão de arrancamento e corte aumenta com o aumento de α , uma vez que este resulta numa área de ligação menor. A comparação de resultados mostra que o MDC definido pelo utilizador foi capaz de prever a resistência da junta e o deslocamento até à rotura com maior precisão do que o modelo de dano triangular, que subestimada os valores obtidos experimentalmente. As curvas P - δ obtidas pelo MDC apresentam um comportamento semelhante às obtidas experimentalmente. Por outro lado, as curvas previstas pelo modelo de dano triangular apresentam um comportamento aproximadamente linear.

Experimental and numerical analysis of hybrid adhesively-bonded scarf joints [101]

Este trabalho consiste num estudo experimental e numérico de juntas de chanfro interior híbridas. Foram utilizados aderentes de CFRP e alumínio e variados os valores de α . Os adesivos estudados foram o Araldite® AV138 e o Araldite® 2015. Através do MEF foram obtidas as tensões σ_y e τ_{xy} . O MDC foi utilizado para prever a resistência da junta. Os resultados numéricos mostraram que a magnitude de σ_y e τ_{xy} aumenta com o valor α , embora este aumento seja mais significativo para σ_y . A variável de dano mostrou que a falha da camada adesiva inicia nas extremidades da ligação e cresce ao longo do comprimento da camada até à rotura total do adesivo. O valor experimental de $P_{m\acute{a}x}$ aumenta exponencialmente com a redução de α para os dois adesivos utilizado, devido ao aumento de área e numa distribuição mais uniforme de tensões. Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pelo MDC são muito próximos dos obtidos experimentalmente. No entanto, no adesivo Araldite® 2015, os valores numéricos ficaram ligeiramente abaixo dos experimentais. Isto justifica-se devido ao uso de uma lei triangular que subestima os valores para adesivos dúcteis. A comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos nas juntas híbridas (aderente de alumínio e CFRP) com o $P_{m\acute{a}x}$ obtido nas juntas com aderentes de alumínio e nas juntas com aderentes de CFRP, demonstrou uma melhoria não desprezável para o adesivo Araldite® AV138. Para o Araldite® 2015 a diferença foi mínima.

Strength prediction of epoxy adhesively bonded scarf joints of dissimilar adherends [102]

Neste trabalho são estudados os efeitos da variação de α (45°, 60° e 75°) e da espessura dos adesivos na resistência de juntas de chanfro interior com aderentes dissimilares. Experimentalmente, as juntas são submetidas a ensaios de tração. Numericamente, é feita uma análise de EF com o intuito de investigar a distribuição de tensões ao longo da camada adesiva e são utilizados três critérios de falha com o intuito de prever a relação entre a espessura da ligação e a resistência da junta. Foi possível observar que o módulo de Young aparente e o coeficiente de Poisson aparente são afetados pela espessura, uma vez que diferem das propriedades *bulk* do adesivo. Os resultados relativos aos critérios de falha aplicados não foram satisfatórios.

Fatigue life evaluation
of adhesively bonded
scarf joints [103]

Este trabalho tem como objetivo o estudo da resistência à fadiga de juntas adesivas de chanfro interior. Foram considerados diferentes valores de α (0° , 30° , 45° e 60°). Experimentalmente foram efetuados testes de fadiga e, numericamente, foi feita uma análise de EF. Experimentalmente foi possível concluir que a resistência à fadiga aumenta com o aumento de α . O modo de rotura altera-se com o aumento de α , sendo que para $\alpha=0^\circ$ e $\alpha=30^\circ$ a rotura é coesiva, enquanto para $\alpha=45^\circ$ e $\alpha=60^\circ$ a rotura é adesiva. Na análise de EF verifica-se que as tensões de arrancamento ao longo da interface diminuem com o aumento de α , o que justifica a alteração do modo de rotura.

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Metodologia
- 3.2 Resultados experimentais
- 3.3 Resultados numéricos

3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo encontra-se dividido em duas partes, a experimental e a numérica. Na parte experimental, baseada no trabalho de Barbosa [1], são descritos os materiais utilizados e os procedimentos efetuados, desde a obtenção dos provetes aos ensaios realizados. Por fim, são apresentados e analisados os resultados obtidos. A parte numérica foi efetuada com recurso ao *software* ABAQUS® utilizando o MEFX. Nesta parte do trabalho, é realizada a análise dos resultados obtidos pelo MEFX e, posteriormente, é feita uma comparação com os resultados experimentais e com os resultados obtidos pelo MDC.

3.1 Metodologia

Este trabalho tem como objetivo a verificação da capacidade de previsão de resistência do MEFX em juntas de chanfro interior, através da comparação dos resultados numéricos com resultados experimentais, obtidos no trabalho de Barbosa [1].

Inicialmente, é descrita a componente experimental, referente ao estudo da resistência de juntas de chanfro interior sujeitas a esforços de tração. Neste trabalho prático foram usados aderentes de alumínio AW6082-T651 com uma espessura de 3 mm. Para a ligação adesiva foram utilizados três tipos de adesivos, um epóxico frágil (Araldite® AV138), um epóxico dúctil (Araldite® 2015) e um poliuretano estrutural que combina alta ductilidade e resistência moderada (Sikaforce® 7752). As juntas foram projetadas com diferentes valores de α ($\alpha=3,43^\circ$, $\alpha=10^\circ$, $\alpha=15^\circ$, $\alpha=20^\circ$, $\alpha=30^\circ$ e $\alpha=45^\circ$). Por último, serão abordadas as condições da análise numérica bem como a formulação do MEFX e do MDC.

3.1.1 Geometria a estudar

A geometria da junta estudada encontra-se ilustrada na Figura 16. Trata-se de uma junta de chanfro interior, cujos valores dos parâmetros geométricos são apresentados na Tabela 3. O valor de α foi o único parâmetro modificado, enquanto os restantes se mantiveram constantes.

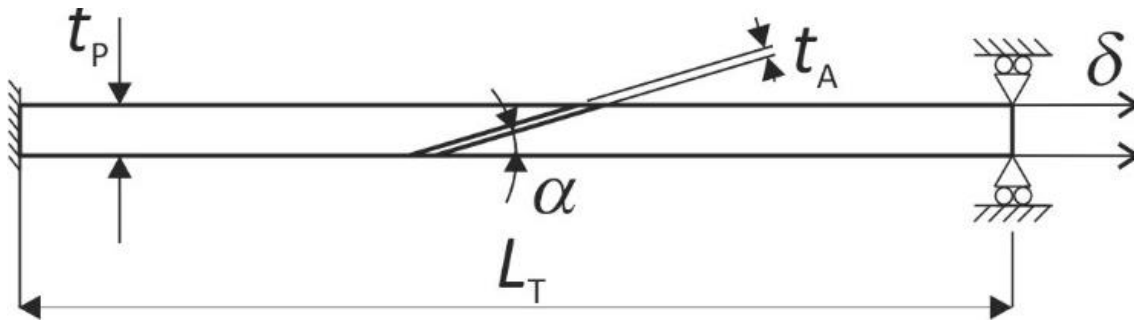


Figura 16 - Geometria da junta de chanfro interior.

Tabela 3 - Parâmetros geométricos da junta de chanfro interior.

Designação	Dimensão
Comprimento do provete, L_t [mm]	170
Ângulo de inclinação, α [°]	3,43/ 10/ 15/ 20/ 30/ 45
Espessura do aderente, t_p [mm]	3
Espessura da camada adesiva, t_A [mm]	0,2

3.1.2 Materiais utilizados

3.1.2.1 Aderentes

O material utilizado como aderente foi a liga de alumínio AW6082-T651. A seleção deste material deve-se, não só às suas boas propriedades mecânicas, mas também ao amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada que possui. Esta liga de alumínio foi caracterizada em trabalhos anteriores [104], onde foram definidas as seguintes propriedades: resistência à tração de $324,00 \pm 0,16$ MPa, módulo de Young (E) de $70,07 \pm 0,83$ GPa, tensão de cedência à tração de $261,67 \pm 7,65$ MPa e deformação de ruptura à tração de $21,70\% \pm 4,24\%$.

As curvas tensão-deformação (σ - ϵ) dos aderentes de alumínio foram obtidas experimentalmente, de acordo com a norma ASTM E8/E8M [105]. Na Figura 17 é possível observar as curvas obtidas, bem como a aproximação numérica utilizada no software ABAQUS®.

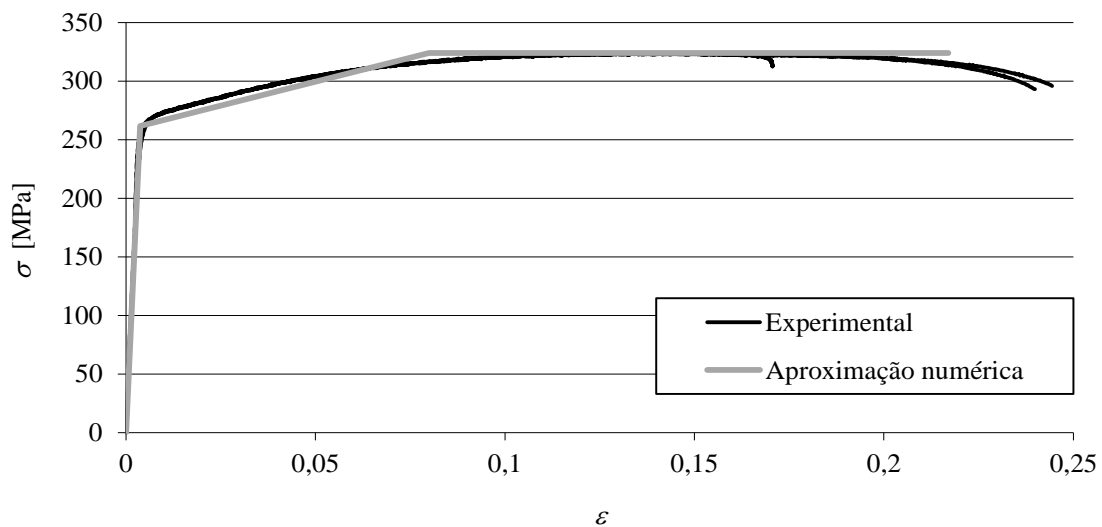


Figura 17 - Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [104].

3.1.2.2 Adesivos

De forma a abranger uma gama alargada de ductilidades foram selecionados três tipos de adesivos, o Araldite® AV138 (adesivo epóxico frágil), o Araldite® 2015 (adesivo epóxico dúctil) e o Sikaforce® 7752 (adesivo poliuretano estrutural que combina alta ductilidade e resistência moderada).

3.1.2.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138/HV988 é um adesivo frágil, conforme se pode observar nas curvas σ - ϵ da Figura 18. Trata-se de um adesivo epóxico que se apresenta sob forma líquida de dois componentes, a resina Araldite® AV138M-1 e o endurecedor HV988. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100 g/40 g, respetivamente.

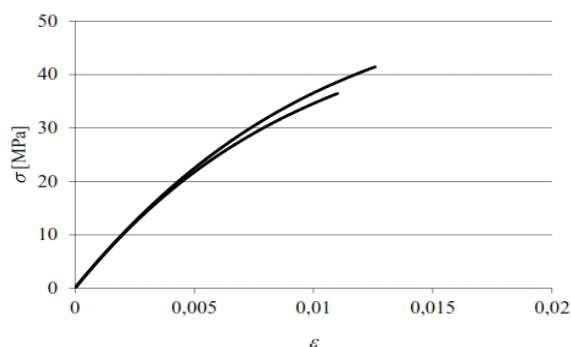


Figura 18 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Araldite® AV138 [106].

Na Tabela 4 são apresentados os valores das propriedades relevantes do adesivo.

Tabela 4 - Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [106].

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	4,89±0,81
Coeficiente de Poisson, ν	0,35 ^a
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	1,21±0,10
Módulo de corte, G_{13} [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	30,2±0,40
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	7,8±0,7
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	0,2 ^b
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	0,38 ^b

^a valor do fabricante

^b valores estimados na referência [107]

3.1.2.2.2 Araldite® 2015

Este adesivo é caracterizado como um adesivo epóxico estrutural de dois componentes, com ductilidade moderada e com bom comportamento quando sujeito à tração ou ao corte. Por ser um adesivo dúctil, permite uma redistribuição de tensões nas zonas de concentração, tipicamente nas extremidades das juntas, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes [43]. Quando comparado ao adesivo Araldite® AV138, percebe-se que a deformação de rotura ao corte é cerca de seis vezes superior. Por outro lado, a tensão de rotura ao corte e à tração do adesivo Araldite® AV138 é praticamente o dobro do Araldite® 2015. Na Figura 19 estão representadas as curvas σ - ε obtidas experimentalmente para provetes maciços de Araldite® 2015 [43].

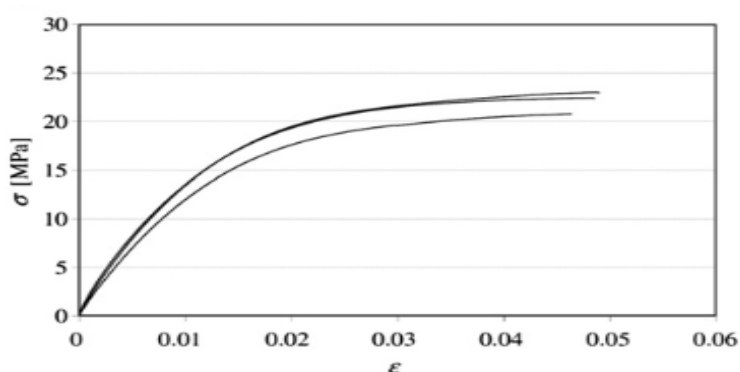


Figura 19 - Curvas σ - ε de provetes maciços de Araldite® 2015 [43].

As propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [43, 108].

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	1,85±0,81
Coefficiente de Poisson, ν	0,33 ^a
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	12,3±0,61
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	21,63±1,61
Deformação de rotura à tração, ε_f [74]	4,77±0,15
Módulo de corte, G_{13} [GPa]	0,56±0,21
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	14,6±1,3
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	17,9±1,8
Deformação de rotura ao corte, γ_f [74]	43,9±3,4
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	0,43±0,02
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	4,7±0,34

^a valor do fabricante

3.1.2.2.3 Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 é um adesivo dúctil, à base de poliuretano, que se apresenta sob a forma de dois componentes, resina e endurecedor (FRW L60). A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100 g/20 g. Quando comparado aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, este adesivo é aquele que apresenta uma menor resistência ao corte e à tração. Na Figura 20 estão representadas as curvas σ - ε do adesivo.

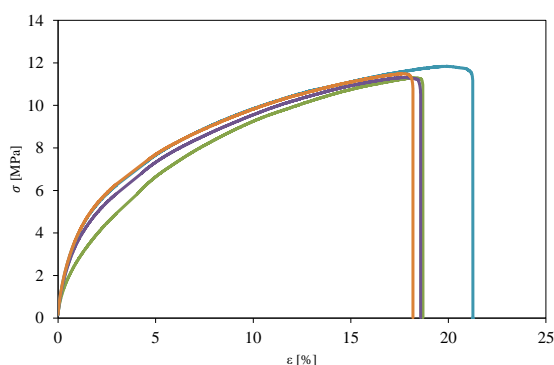


Figura 20 - Curvas σ - ε de provetes maciços de Sikaforce® 7752.

Na Tabela 6 são apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo Sikaforce® 7752 [109].

Tabela 6 - Propriedades do adesivo Sikaforce® 7752 [109].

Propriedades	Sikaforce® 7752 L60
Módulo de Young, E [GPa]	0,493±0,0896
Coefficiente de Poisson, ν	0,33 ^a
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	3,24±0,5
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	11,49±0,3
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	19,18±1,4
Módulo de corte, G_{13} [GPa]	0,187±0,0164
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	5,16±1,1
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	10,17±0,6
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	58,42±6,4
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	2,36±0,2
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	5,41±0,5

^a valor do fabricante

Em função das propriedades obtidas é expectável que a resistência de juntas adesivas ligadas com este adesivo seja elevada, uma vez que combina uma resistência muito aceitável, com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Assim, são permitidas tensões elevadas na camada adesiva, bem como um efeito acentuado de plastificação sem rotura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência.

3.1.3 Processo de fabrico

De seguida, é descrito o processo de fabrico para a execução das juntas adesivas de chanfro interior ensaiadas à tração.

O material dos aderentes foi fornecido em forma de barras, com aproximadamente 1 m de comprimento cada. Com recurso a um serrote mecânico, as barras foram cortadas de acordo com as dimensões pretendidas. Após o corte, as secções cortadas foram limpas com acetona, de forma a remover o óleo de corte proveniente do serrote e levadas ao esmeril para remover a rebarba resultante do corte. Depois de preparados, os aderentes foram para a fresadora convencional (Figura 21) e a zona de adesão foi maquinada de acordo com o ângulo de inclinação pretendido para cada uma das configurações. Com o intuito de remover a rebarba resultante do processo de maquinagem, os aderentes foram novamente levados ao esmeril.

Após a obtenção dos aderentes é necessário que a superfície seja preparada e limpa. A preparação da superfície consiste em lixar os aderentes na região a ser ligada, de forma a remover um eventual acumulo de óxidos. Depois da preparação, é efetuada a limpeza da região de ligação dos aderentes com acetona para remover a sujidade resultante.



Figura 21 - Maquinagem da junta de chanfro interior com $\alpha=3,43^\circ$.

A próxima etapa consiste na preparação para a aplicação do adesivo. Para isso, foram utilizados grampos e barras para facilitar o alinhamento e fixação dos aderentes (Figura 22). Com recurso a fita adesiva foi colocado um fio de pesca calibrado com 0,2 mm de diâmetro, com o objetivo de garantir a espessura da camada adesiva em toda a zona de ligação (Figura 23).

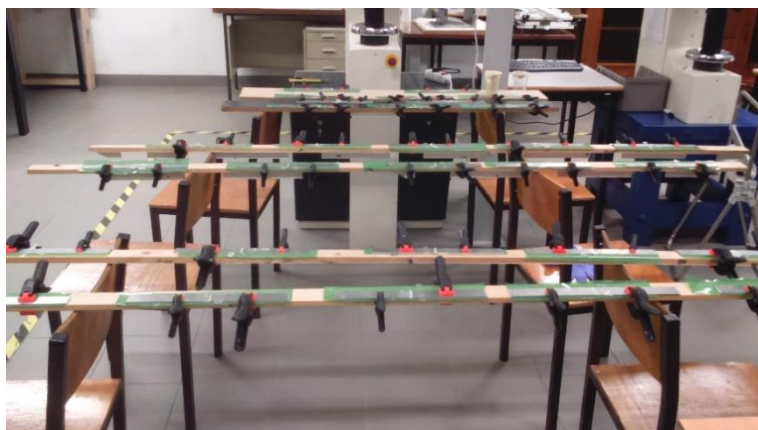


Figura 22 - Configuração utilizada para colagem das juntas.

Após a conclusão do processo preparatório é realizada a ligação adesiva dos aderentes. O adesivo é aplicado no aderente previamente fixo e, de seguida, é colocada meticulosamente a outra metade, para garantir um correto alinhamento, assim como uma distribuição uniforme do adesivo. A fixação é concluída com recurso a um segundo grampo (Figura 24) que, devido à pressão que exerce, remove o adesivo em excesso e garante a espessura pretendida de 0,2 mm da camada adesiva. Posteriormente procede-se à cura dos provetes à temperatura ambiente. Este processo durou aproximadamente sete dias. Após curados os provetes é necessária a remoção do adesivo em excesso nos topos e nas laterais das juntas, que foi realizada com recurso a uma mó de esmeril.



Figura 23 - Grampo de fixação.



Figura 24 - Grampos para garantir a fixação da junta durante a cura.

3.1.4 Ensaios realizados

Para a realização dos ensaios de tração foi usada uma máquina de ensaios Shimadzu®, modelo AG-X 100 (Figura 25) equipada com uma célula de carga de 100 kN. A distância entre maxilas foi de 170 mm, os ensaios foram realizados à temperatura ambiente e a uma velocidade de 1 mm/min. Todos os provetes foram tracionados até à rotura. Durante os ensaios, as curvas $P-\delta$ foram registadas pelo sistema de aquisição de dados do computador. O tratamento dos dados foi realizado recorrendo ao Microsoft Excel®.



Figura 25 - Máquina de ensaio de tração Shimadzu AG-X.

3.1.5 Condições da análise numérica

Neste subcapítulo é abordada a análise numérica da junta de chanfro interior. Esta análise é baseada no MEFX e, para isso, foi utilizado o *software* ABAQUS®. Este *software* baseia-se no método de EF e a sua escolha deve-se à possibilidade de utilização do módulo integrado de MEFX para prever a resistência das juntas de chanfro interior.

Inicialmente, foi criado um modelo bidimensional da junta, cujos aderentes e adesivos foram modelados por secções sólidas e homogêneas (Figura 26).

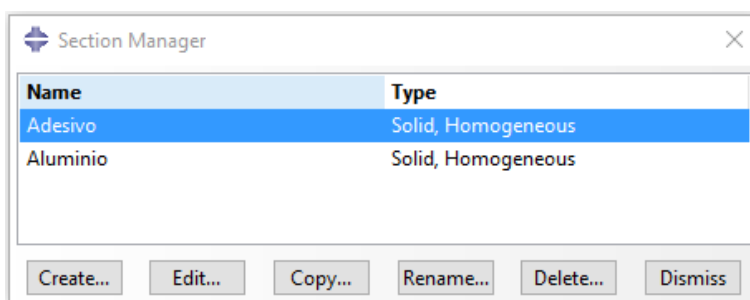


Figura 26 - Atribuição de secções sólidas para modelação dos aderentes e adesivos.

Após a criação do modelo 2D, foram introduzidas as propriedades mecânicas e de fratura dos materiais utilizados na simulação ABAQUS® e, posteriormente, atribuídas às secções previamente definidas. As propriedades mecânicas referentes à liga de alumínio utilizada encontram-se descritas no capítulo 3.1.2.1. Relativamente aos adesivos usados (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752), os valores das propriedades mecânicas utilizadas foram apresentados na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6, respetivamente.

As juntas foram modeladas em 2D, com recurso a elementos sólidos de estado plano de deformação para a modelação dos aderentes (CPE4R e CPE3 do ABAQUS®). Na Figura 27 é possível observar o tipo de elementos utilizados e a sua evolução ao longo do comprimento da junta. Os elementos do tipo CPE3 estão assinalados a vermelho, enquanto os restantes são do tipo CPE4R. A camada adesiva foi modelada por uma fila de elementos coesivos de 0,1 x 0,2 mm na direção da espessura (aproximação contínua) e uma lei de tração-separação triangular que inclui a rigidez da camada adesiva.

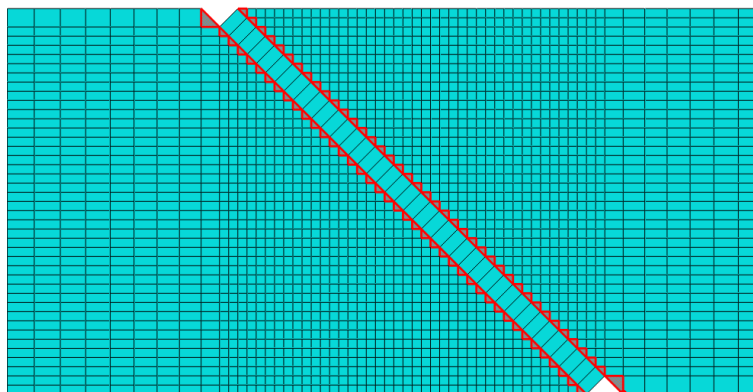


Figura 27 - Representação dos elementos constituintes da malha.

Na Figura 28 e Figura 29 encontra-se ilustrada, de forma pormenorizada, a modelação 2D das juntas de chanfro interior com $\alpha=45^\circ$ e $\alpha=3,43^\circ$, respetivamente.

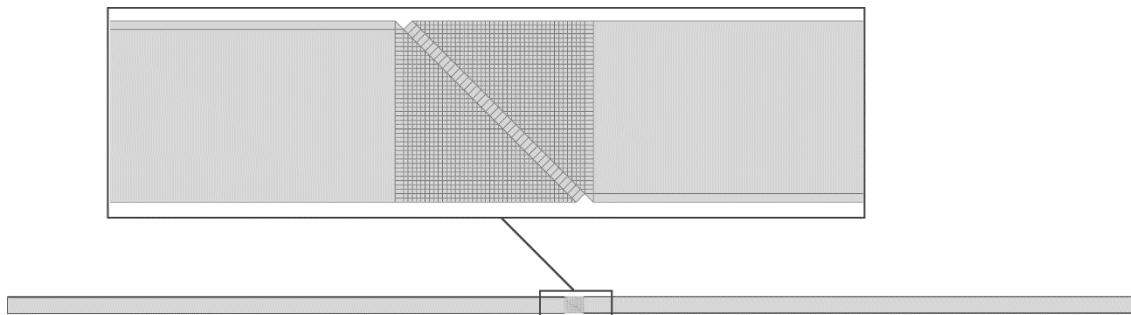


Figura 28 - Representação de uma junta de chanfro interior com $\alpha=45^\circ$.

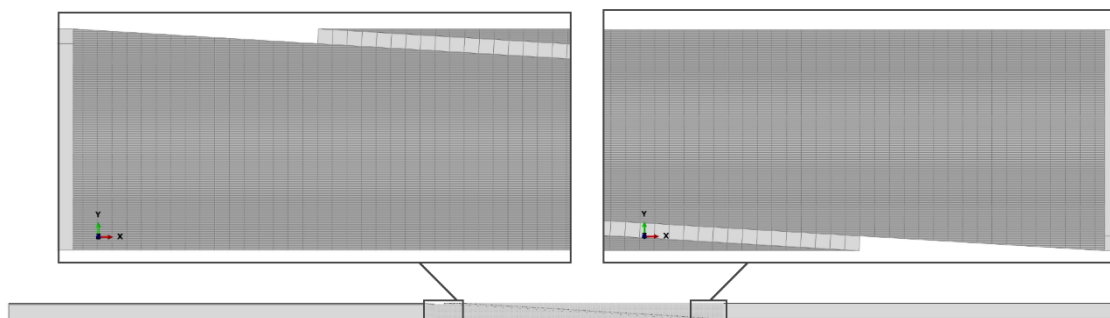



Figura 29 - Representação de uma junta de chanfro interior com $\alpha=3,43^\circ$.

Na direção do comprimento dos aderentes foi considerado um refinamento seletivo de malha, através do *bias ratio* (rácio de refinamento). A malha possui um maior refinamento nas extremidades e perto da camada adesiva.

O número de elementos e rácio de refinamento de cada aresta da junta foram escolhidos de forma a garantir um maior refinamento nas zonas críticas da junta. Este processo foi realizado no ABAQUS® através da criação de sementes com espaçamentos pré-definidos. Na Tabela 7 são apresentadas as dimensões da malha.

Tabela 7 - Variação das dimensões da malha em função de α .

α [°]	3,43	10	15	20	30	45
Zona de inclinação	140	160	250	250	200	150
Número de Elementos						
Rácio de refinamento	5	5	10	10	10	10

A variação do número de elementos e do rácio de refinamento tem como objetivo reduzir o esforço computacional e o tempo na obtenção de resultados, não interferindo com a sua precisão. Na Figura 30 é possível observar a variação do efeito *bias* ao longo do comprimento da junta, com maior refinamento nas extremidades e perto da zona de inclinação.

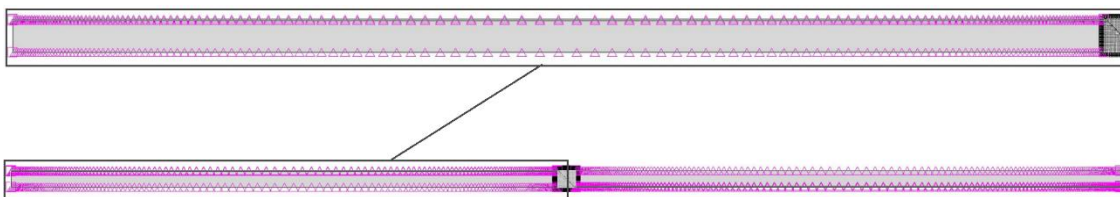


Figura 30 - Efeito *bias* ao longo do comprimento da junta.

As condições fronteira e de carregamento foram aplicadas aos modelos, no *software* ABAQUS® (Figura 31), de forma a simular as condições reais dos ensaios experimentais. A junta foi encastrada numa das extremidades e restringida na direção transversal na extremidade oposta. Nesta última, foi também aplicado um deslocamento longitudinal.



Figura 31 - Condições fronteira impostas nos modelos numéricos.

3.1.6 Formulação do MEFX

A expressão fundamental do vetor de deslocamentos \mathbf{u} , incluindo o enriquecimento dos deslocamentos, é dada por [110]:

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^N N_i(\mathbf{x}) [\mathbf{u}_i + H(\mathbf{x}) \mathbf{a}_i], \quad (2)$$

onde $N_i(\mathbf{x})$ e \mathbf{u}_i estão relacionados com a componente convencional de EF, e correspondem pela ordem respectiva às funções de interpolação e ao vetor de deslocamentos nodais. O segundo termo entre parêntesis retos, $H(\mathbf{x})\mathbf{a}_i$, apenas está ativo para os nós nos quais alguma função de forma é cortada pela fenda e pode ser expresso pelo produto do vetor dos graus de liberdade nodais enriquecidos incluindo os nós mencionados, \mathbf{a}_i , com as funções de forma descontínuas associadas, $H(\mathbf{x})$, nas superfícies da fenda. O método é baseado no estabelecimento de nós fantasmas, que subdividem os elementos intercetados por uma fenda e simulam a separação entre os subelementos criados. A propagação da fenda é possível pelo uso de nós fantasmas, que inicialmente têm as mesmas coordenadas que os nós reais e que estão completamente fixos aos nós reais até à iniciação do dano. Após o elemento ter sido intercetado por uma fenda, este é dividido em dois subdomínios. A descontinuidade nos elementos é tornada possível pela adição de nós fantasmas sobrepostos aos nós originais (Figura 32). Quando um elemento fratura, cada um dos dois subelementos vai ser formado pelos nós reais (aqueles correspondentes à parte fraturada) e nós fantasmas (aqueles que já não pertencem à parte respetiva do elemento original). Estes dois subelementos têm campos de deslocamentos completamente independentes e substituem o elemento original. A partir deste ponto, cada par de nó real/fantasma do elemento fraturado separa de acordo com uma lei de dano até à rotura. Neste ponto os nós reais e fantasmas ficam livres de se mover sem restrições, simulando assim o crescimento do dano.

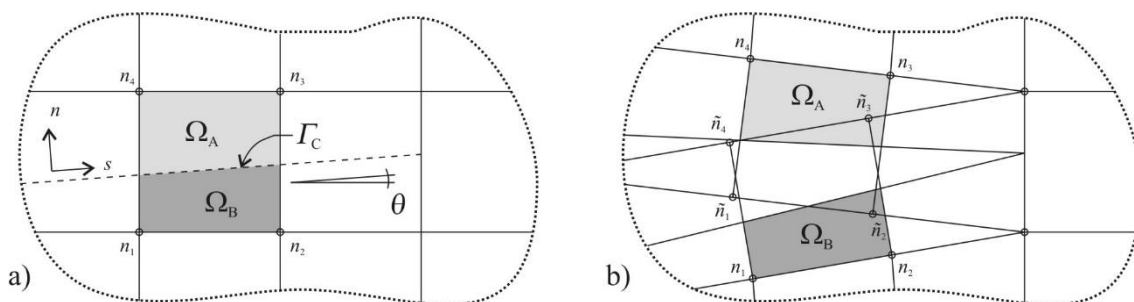


Figura 32 - Propagação do dano no MEFX usando o conceito de nós fantasmas antes (a) e depois (b) da repartição de elementos fraturados em subelementos [111].

O MEFX considera que os materiais assumem um comportamento linear elástico.

Existem dois tipos distintos de modelação de dano por MEFX:

1. Abordagem por segmentos coesivos- utiliza as leis tração-separação, seguindo um comportamento baseado num comportamento coesivo e as propriedades de dano são parte integral das propriedades do material.
2. MFLE - utiliza a TFFV, e as propriedades de dano são especificadas através de uma propriedade de interação atribuída ao MEFX.

Neste caso de estudo foi utilizada uma abordagem por segmentos coesivos. No *software* ABAQUS®, no módulo MEFX, existem três critérios de iniciação de dano baseados na tensão e três critérios baseados na deformação.

Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas (MAXPS) ou das deformações principais máximas (MAXPE), enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais. A iniciação do dano é assumida por um critério da mecânica dos meios contínuos, calculado a partir do estado de tensão ou de deformação em cada ponto de integração dos EF. A iniciação do dano pode ser avaliada por diferentes critérios. Os critérios MAXPS e MAXPE baseiam-se nas seguintes funções de dano, respetivamente [112]:

$$f = \left\langle \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{max}^0} \right\rangle \quad e \quad f = \left\langle \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_{max}^0} \right\rangle, \quad (3)$$

onde σ_{max} é a tensão principal máxima atual num dado ponto de integração e σ_{max}^0 é a resistência de um material à tração. A interpretação dos parêntesis de Macaulay é usada para especificar que uma tensão compressiva não induz dano. O critério MAXS e o critério de deformação nominal máxima (MAXE) são dados, por esta ordem, por [112]:

$$f = \max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0} \right\} \quad e \quad f = \max \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0}, \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}, \quad (4)$$

onde t_n e t_s são as componentes de tensão normal e ao corte da superfície fraturada, e t_n^0 e t_s^0 são os respetivos valores limite. Os parâmetros referentes ao critério MAXE têm o mesmo significado, onde ε_n e ε_s são as componentes de deformação normal e ao corte, e ε_n^0 e ε_s^0 são os devidos valores limites. Outros dois critérios de elevada importância são o critério QUADS e o critério quadrático de deformação (QUADE).

Os critérios são dados, respetivamente, pelas seguintes funções [112]:

$$f = \left\langle \frac{t_n}{t_n^0} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{t_s}{t_s^0} \right\rangle^2 \quad e \quad f = \left\langle \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_n^0} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\rangle^2. \quad (5)$$

Todos os critérios referidos são satisfeitos quando o valor de f atingir a unidade. O crescimento do dano é baseado na incorporação de funções de enriquecimento na formulação convencional de EF, que permitem modelar o salto dos deslocamentos que existe entre as faces da fenda durante a propagação do dano.

3.1.7 Formulação do MDC

Como falado anteriormente, os MDC baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos que ligam nós homólogos dos elementos coesivos, de forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima e, subsequentemente, degradação das propriedades dos materiais até à rotura.

A lei de dano triangular (Figura 33) assume inicialmente um comportamento linear elástico, seguido de degradação linear. O comportamento elástico é definido por uma matriz constitutiva (\mathbf{K}), que contém os parâmetros de rigidez, e relaciona as tensões e deformações em tração e corte ao longo dos elementos coesivos (subscritos n e s, respetivamente).

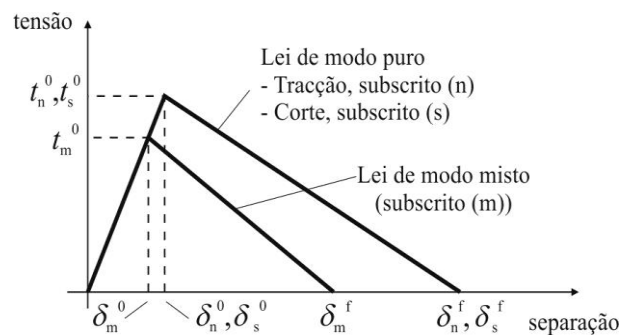


Figura 33 - MDC triangular implementado no *software* ABAQUS®.

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}\boldsymbol{\varepsilon}. \quad (6)$$

Para camadas finas de adesivo, uma aproximação viável é dada por $K_{nn}=E$, $K_{ss}=G$ e $K_{ns}=0$. A iniciação do dano pode ser especificada por diferentes critérios. Neste trabalho, foi considerado o critério quadrático de tensões para iniciação do dano que se segue, por já ter sido provada a sua fiabilidade [113], sendo dado por:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (7)$$

$\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_m^0 na Figura 33), através da equação anterior, a rigidez do material é degradada. A separação completa é prevista por um critério linear energético da forma:

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (8)$$

3.1.8 Determinação das propriedades de MEFX e MDC

De modo a caracterizar as leis em tração e corte, é necessário conhecer t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} (Figura 33). No passado, foram publicados alguns estudos que, por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios em adesivo maciço [114, 115]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos aderentes neste tipo de geometrias, e propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [116, 117]. Assim sendo, é necessária a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

Para a determinação das leis para o adesivo Araldite® AV138, foi utilizado um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [118]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente do habitual. Foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios em adesivo maciço e ensaio de corte (TAST - *Thick adherend shear test*) para a definição de t_n^0 e t_s^0 , respetivamente. Estes valores foram utilizados para a construção de leis aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a junta de sobreposição simples com L_0 de 20 mm), e as leis do adesivo foram estimadas de forma idêntica ao caso anterior, por ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas, com resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST). Noutro trabalho [119] concluiu-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades dos adesivos. A Tabela 8 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada adesiva Araldite® AV138, numa lei coesiva em modo misto (MDC) e lei de dano (MEFX).

Tabela 8 - Parâmetros em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm.

E [MPa]	4890	G [MPa]	1560
t_n^0 [MPa]	39,45	t_s^0 [MPa]	30,2
G_{IC} [N/mm]	0,2	G_{IIC} [N/mm]	0,38

Para o adesivo Araldite® 2015, as leis da camada adesiva foram determinadas em trabalhos anteriores [120, 121], por um método inverso para a determinação de t_n^0 e t_s^0 . Nestes trabalhos é apresentada uma descrição mais detalhada desta metodologia, que basicamente consiste na determinação de G_{IC} e G_{IIC} através de ensaios DCB e ENF, respetivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de G_{IC} ou G_{IIC} é então utilizado para construção de uma lei no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de t_n^0 ou t_s^0 , estimado em função das características do adesivo. A lei obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de t_n^0 ou t_s^0 é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas P - δ numéricas e experimentais do teste respetivo de caracterização à fratura, para que a lei estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada adesiva. A Tabela 9 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada adesiva Araldite® 2015 numa lei coesiva em modo misto (MDC) e lei de dano (MEFX). Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST), respetivamente [122].

Tabela 9 - Parâmetros em tração e corte para uma camada adesiva Araldite® 2015 com uma espessura de 0,2 mm.

E [MPa]	1850	G [MPa]	650
t_n^0 [MPa]	23,0	t_s^0 [MPa]	22,8
G_{IC} [N/mm]	0,43	G_{IIC} [N/mm]	4,7

O processo de obtenção de propriedades para o adesivo Sikaforce® 7752 seguiu um processo algo idêntico ao utilizado para o Araldite® 2015. De facto, para a determinação da lei ao corte, foi seguido um método inverso idêntico, correspondente à determinação

do valor de G_{IIC} por ensaio de fratura ENF, seguido de ajuste iterativo manual para a estimativa de t_s^0 [123]. Os valores utilizados neste trabalho são os valores médios de t_s^0 e G_{IIC} obtidos na referência [123], cujo desvio entre provetes foi bastante reduzido, traduzindo a repetibilidade dos ensaios efetuados. Por outro lado, para a lei em tração, devido à inexistência, até à data, de procedimento inverso, foi seguido um processo distinto. O valor de G_{IC} foi obtido por ensaios de fratura DCB [124], nomeadamente o valor médio de uma série de ensaios. O valor de t_n^0 foi aproximado ao valor médio de resistência à tração de provetes maciços, ensaiados no mesmo trabalho [120]. Como foi definido em trabalhos anteriores que, no caso particular de solitação à tração, o valor de t_n^0 não tem influência digna de registo para variações de t_n^0 até 25% do valor obtido por método inverso (variação nos dois sentidos) [120], não foi considerado relevante neste trabalho a realização do dito procedimento. Os valores de E e G foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST) [124]. A Tabela 10 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada adesiva Sikaforce® 7752, numa lei coesiva em modo misto (MDC) e lei de dano (MEFX).

Tabela 10 - Parâmetros em tração e corte para uma camada adesiva Sikaforce® 7752 com uma espessura de 0,2 mm.

E [MPa]	493,81	G [MPa]	37,49
t_n^0 [MPa]	12,25	t_s^0 [MPa]	10,50
G_{IC} [N/mm]	2,36	G_{IIC} [N/mm]	5,56

3.2 Resultados experimentais

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos experimentalmente.

3.2.1 Modos de rotura

Foi possível verificar que, para as juntas de chanfro interior com o Araldite® AV138, a rotura ocorreu por falha coesiva do adesivo. O mesmo aconteceu para as juntas adesivas com o adesivo Araldite® 2015 e com o adesivo Sikaforce® 7752, para as quais a totalidade dos provetes sofreu rotura coesiva no adesivo. Na Figura 34 é possível observar os cinco provetes testados e o seu modo de rotura.

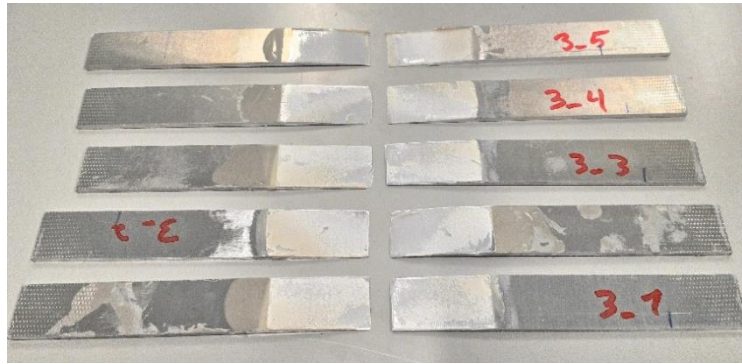


Figura 34 - Modos de rotura dos provetes de junta de chanfro interior com o adesivo Sikaforce® 7752 e com $\alpha=3,43^\circ$ [1].

3.2.2 Curvas $P-\delta$

Na Figura 35 estão representados exemplos de curvas $P-\delta$, obtidas experimentalmente, para diversos valores de α e para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente. No caso das juntas com os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 é possível verificar o comportamento linear da junta até à rotura. Para a junta com o adesivo Araldite® 2015, o comportamento não é completamente linear, pois ocorre uma ligeira plastificação dos aderentes na aproximação do $P_{\text{máx}}$.

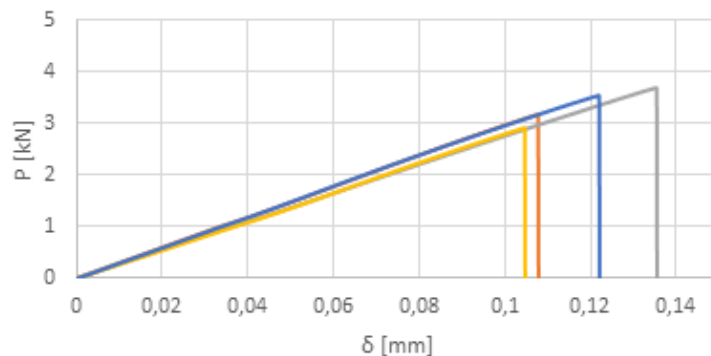


Figura 35 - Curvas $P-\delta$, dos provetes, obtidas experimentalmente - Araldite® AV138 $\alpha=45^\circ$ [1].

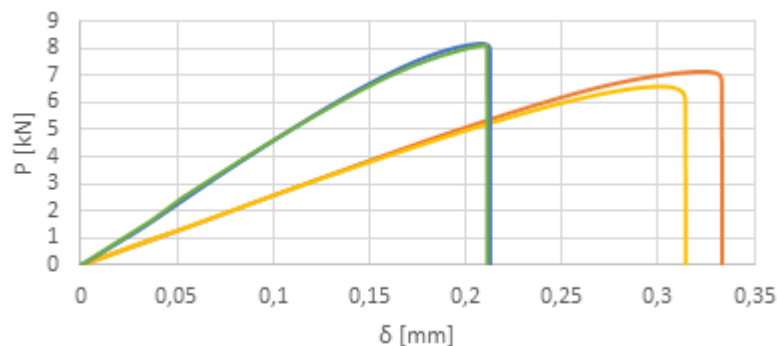


Figura 36 - Curvas $P-\delta$, dos provetes, obtidas experimentalmente - Araldite® 2015 $\alpha=10^\circ$ [1].

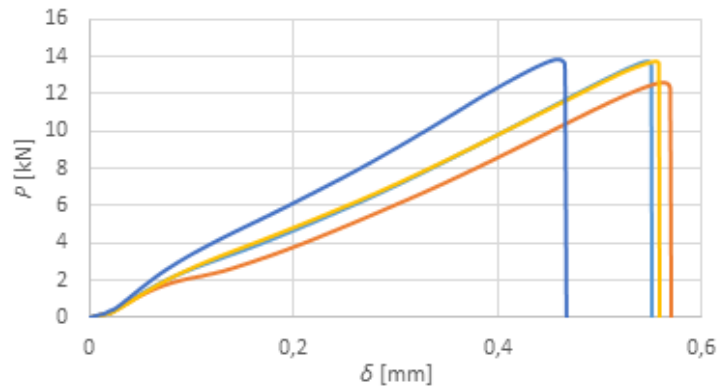


Figura 37 - Curvas P - δ , dos provetes, obtidas experimentalmente - Sikaforce® 7752 $\alpha=3,43^\circ$ [1].

3.2.3 Resistência das juntas

Na Figura 38 estão representados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ médio, correspondentes à média dos valores de força máxima obtidos nos ensaios, e os respectivos desvios padrão. Através da análise dos dados obtidos é possível constatar um comportamento semelhante relativamente ao valor de $P_{m\acute{a}x}$, entre os três adesivos estudados. A força máxima dos três adesivos é atingida na configuração com $\alpha=3,43^\circ$, enquanto nos restantes ângulos de inclinação os valores de $P_{m\acute{a}x}$ diminuem, sendo que a maior diminuição ocorre entre o ângulo $\alpha=3,43^\circ$ e $\alpha=10^\circ$. Quando comparado com os restantes adesivos, o Araldite® AV138 é aquele que possui o melhor comportamento, obtendo um valor de $P_{m\acute{a}x}$ significativamente superior.

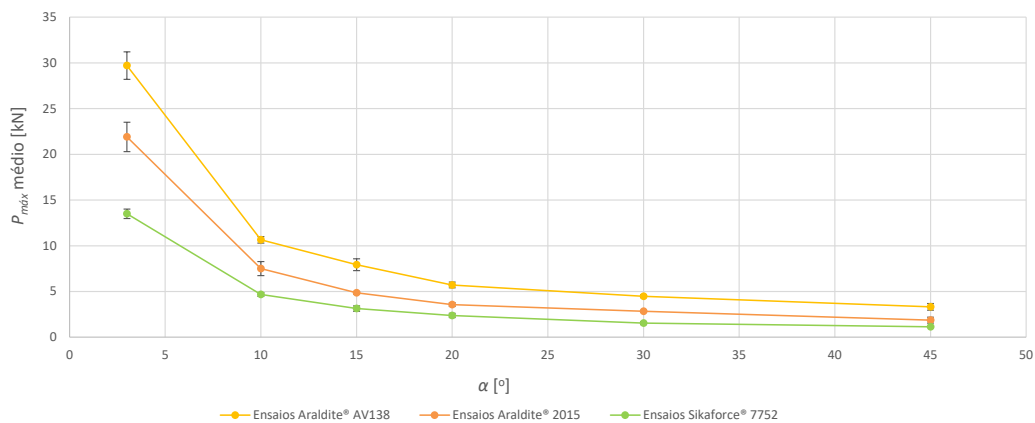


Figura 38 - Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ e desvio padrão em função de α para os diferentes adesivos em junta de chanfro.

Na Tabela 11 são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ médio e os respectivos desvios padrão em termos numéricos e percentuais. Relativamente ao desvio padrão percentual, verifica-se um desvio superior nas juntas com $\alpha=45^\circ$ com o Araldite® 2015 e com o Araldite® AV138, de 17,43% e 11,03%, respetivamente. Estes valores podem estar associados à fabricação dos provetes ou procedimento de ensaios. O adesivo Sikaforce®

7752 obtém as maiores dispersões nas configurações com $\alpha=15^\circ$, $\alpha=20^\circ$ e $\alpha=30^\circ$. Os restantes valores são aceitáveis.

Tabela 11 - Valores obtidos para as juntas de chanfro interior e para os diferentes adesivos.

α [°]	3,43	10	15	20	30	45
Araldite® AV138	29700	10648	7926	5715	4480	3325
Desvio Padrão [N]	1500	346,63	642,49	310,02	150,89	366,66
Desvio Padrão [%]	5,05	3,26	8,11	5,42	3,37	11,03
Araldite® 2015	21903	7509	4858	3567	2832	1868
Desvio Padrão [N]	1600	772,04	141,92	205,56	101,03	325,56
Desvio Padrão [%]	7,30	10,28	2,92	5,76	3,57	17,43
Sikaforce® 7752	13500	4677	3132	2378	1543	1142
Desvio Padrão [N]	510,90	195,40	286,25	229,38	167,86	63,51
Desvio Padrão [%]	3,78	4,18	9,14	9,65	10,88	5,56

3.2.4 Discussão dos resultados

Ao analisar os dados obtidos para os diferentes ângulos de inclinação e adesivos, percebe-se que a diminuição do valor de α resulta num aumento do valor de $P_{m\acute{a}x}$. Nas configurações com $\alpha=45^\circ$, 30° , 20° , 15° e 10° os valores de $P_{m\acute{a}x}$ aumentam gradualmente, enquanto entre o ângulo $\alpha=10^\circ$ e $\alpha=3,43^\circ$ ocorre um aumento mais acentuado. O Araldite® AV138 é o adesivo com melhor comportamento, obtendo os maiores valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os diferentes ângulos testados. Comparando os três adesivos utilizados verifica-se que o adesivo Sikaforce® 7752 é aquele que possui o pior desempenho. Tendo como exemplo a configuração com $\alpha=3,43^\circ$ observa-se que o adesivo frágil Araldite® AV138 assume um valor de $P_{m\acute{a}x}$ de 29,7 kN, enquanto o adesivo dúctil Araldite® 2015 tem um $P_{m\acute{a}x}$ de 21,9 kN. O Sikaforce® 7752 apresenta o pior desempenho, obtendo um $P_{m\acute{a}x}$ de apenas 13,5 kN. A maior resistência foi obtida na junta ligada com o Araldite® AV138 e $\alpha=3,43^\circ$. Tendo em conta os valores obtidos conclui-se que o adesivo mais adequado para esta configuração de junta é o Araldite® AV138. O Araldite® 2015 é uma segunda opção bastante viável, conseguindo resultados bastante razoáveis. No que diz respeito aos valores de desvio padrão verifica-se uma heterogeneidade nos valores obtidos. Porém, os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 são aqueles que possuem uma menor dispersão dos resultados obtidos nos ensaios.

3.3 Resultados numéricos

Este capítulo é reservado à análise dos resultados através do *software* ABAQUS®.

3.3.1 Modos de rotura

Neste subcapítulo são descritos os modos de rotura obtidos nas simulações numéricas. Na Figura 39 são apresentados os modos de rotura obtidos no *software* ABAQUS®, considerando um valor de α de exemplo para cada adesivo.

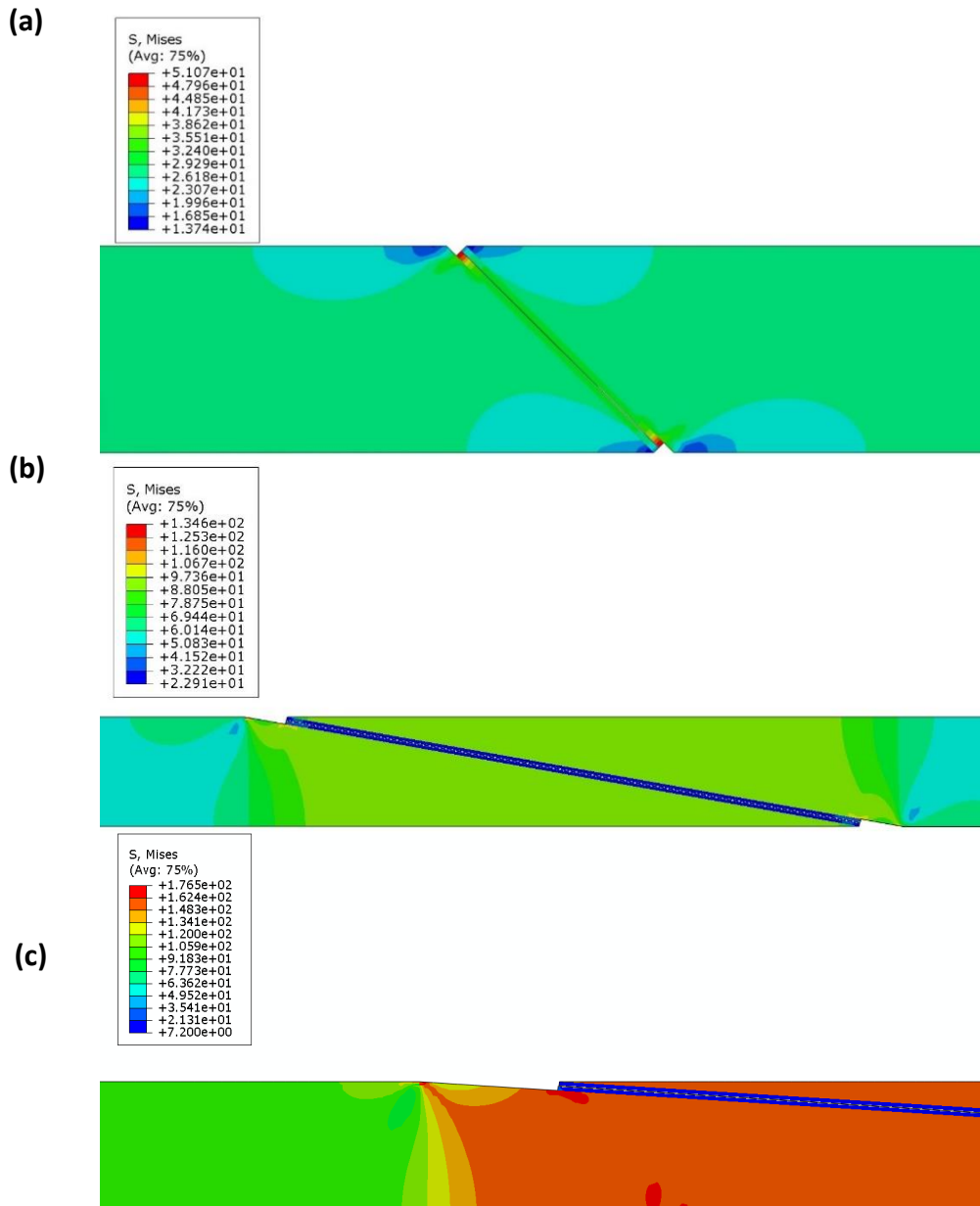


Figura 39 - Modos de rotura obtidos na simulação: (a) $\alpha=45^\circ$ - Araldite® AV138; (b) $\alpha=10^\circ$ - Araldite® 2015; (c) $\alpha=3,43^\circ$ - Sikaforce® 7752.

Todas as imagens correspondem ao momento que $P_{m\acute{a}x}$ foi atingido. Verificou-se que as roturas das juntas ocorreram de forma coesiva na camada adesiva. As Figura 39a, Figura 39b e Figura 39c ilustram os modos de rotura observados para cada um dos adesivos em estudo o Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente.

A rotura coesiva indica que a resist\encia da liga\c3o\ entre o aderente e adesivo \e superior \a resist\encia interna do adesivo, e assume-se como a rotura plaus\ivel neste tipo de junta. No entanto, \e de referir que, em fun\c3o da constru\c3o dos modelos num\ericos, esta e a plastifica\c3o dos aderentes s\ao as \unicas possibilidades de dano.

Ao analisar as imagens percebe-se que a junta com $\alpha=3,43^\circ$ \e aquela onde existem maiores concentra\c3o\es de tens\o\es.

Na Figura 40, correspondente a uma junta com $\alpha=3,43^\circ$ ligada com Araldite® 2015, observa-se que existiu plastifica\c3o do aderente. O mesmo n\ao se verifica nos restantes adesivos e valores de α . As zonas onde se verificam plastifica\c3o\ s\ao zonas superiores a 261,67 MPa, que corresponde ao limite de ced\encia do alum\iniu.

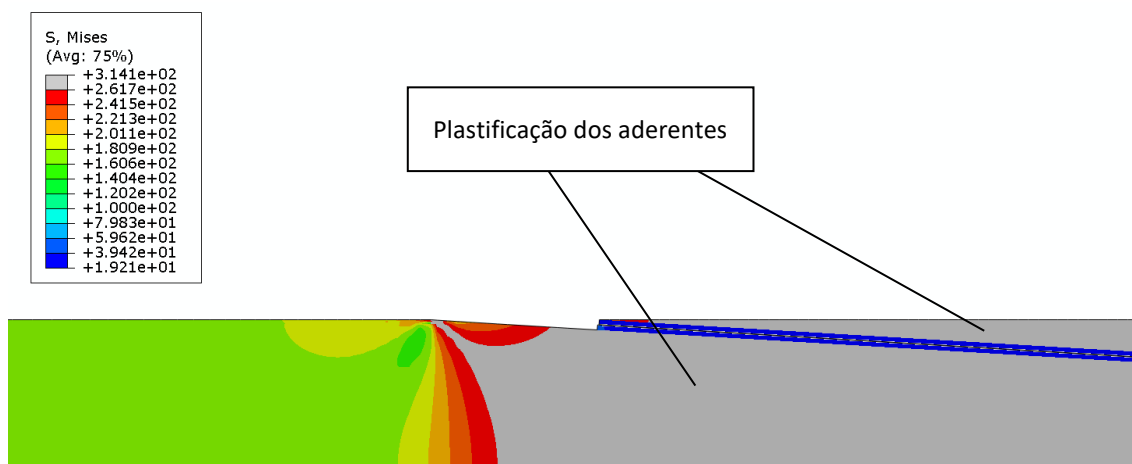


Figura 40 - Plastifica\c3o dos aderentes nas juntas de chanfro interior com $\alpha=3,43^\circ$ ligada com o adesivo Araldite® 2015.

3.3.2 Curvas $P-\delta$

Neste subcap\itulo s\ao analisadas as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para cada um dos adesivos utilizados em fun\c3o dos diferentes valores de α . Posteriormente, s\ao feitas previs\o\es dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ pelo MEFX. Por fim, \e feita uma compara\c3o das curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para cada um dos adesivos em estudo. Na Figura 41 s\ao apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para o adesivo Araldite® AV138. Ao analisar as curvas constata-se que o comportamento do adesivo \e semelhante nos diferentes valores de α . Todas as curvas apresentam um comportamento linear at\e \a rotura e, a partir deste ponto, uma descida abrupta. Este

comportamento justifica-se devido à fragilidade do adesivo, o que faz com que o adesivo não sofra plastificação e perda de rigidez na proximidade de $P_{m\acute{a}x}$.

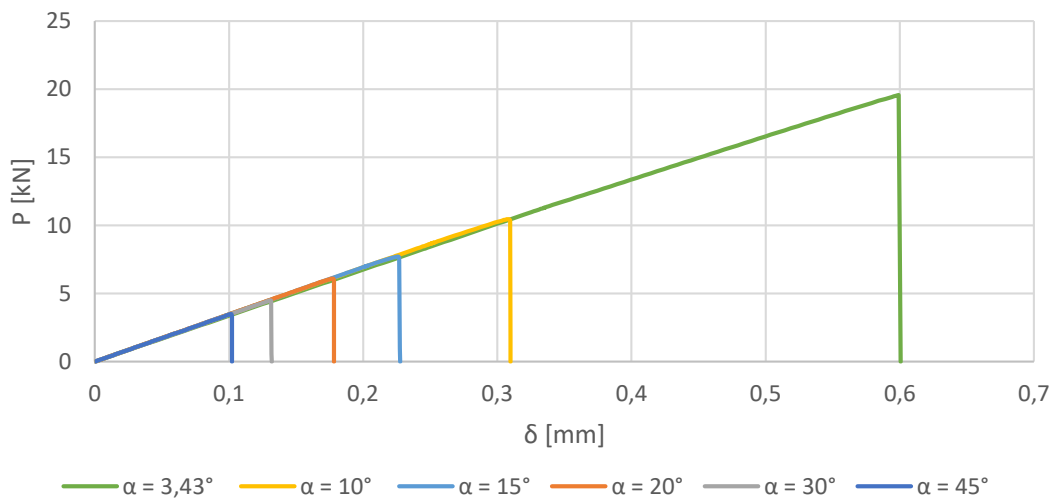


Figura 41 - Curvas P - δ obtidas numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138.

As curvas P - δ obtidas para as juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 são apresentadas na Figura 42. Nestas curvas é possível observar uma ligeira perda de linearidade da curva antes da rotura devido à deformação plástica do adesivo, uma vez que se trata de um adesivo dúctil. Este fator é mais preponderante à medida que o ângulo diminui. Na configuração com $\alpha=3,43^\circ$ é possível observar nos resultados numéricos, mesmo que de forma reduzida, a plastificação do aderente antes da rotura.

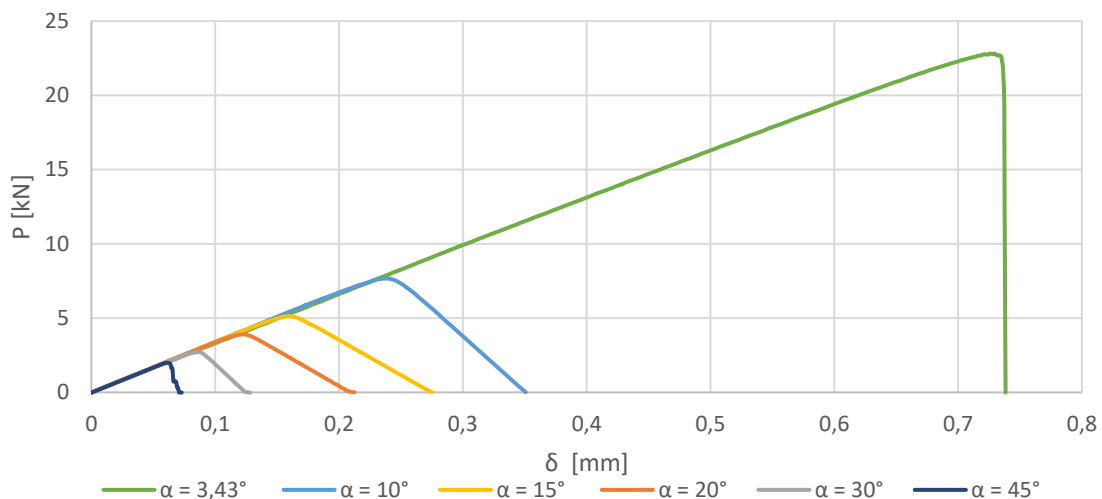


Figura 42 - Curvas P - δ obtidas numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015.

Na Figura 43 é apresentada a evolução das curvas P - δ obtidas numericamente para as juntas adesivas ligadas com o Sikaforce® 7752. Através das representações gráficas é possível observar a sua ductilidade, uma vez que, quando comparado com os restantes

adesivos, este é aquele que possui um maior deslocamento até à rotura, em conjunto com uma rotura gradual da camada adesiva. Independentemente do valor de α , o comportamento do adesivo permanece o mesmo.

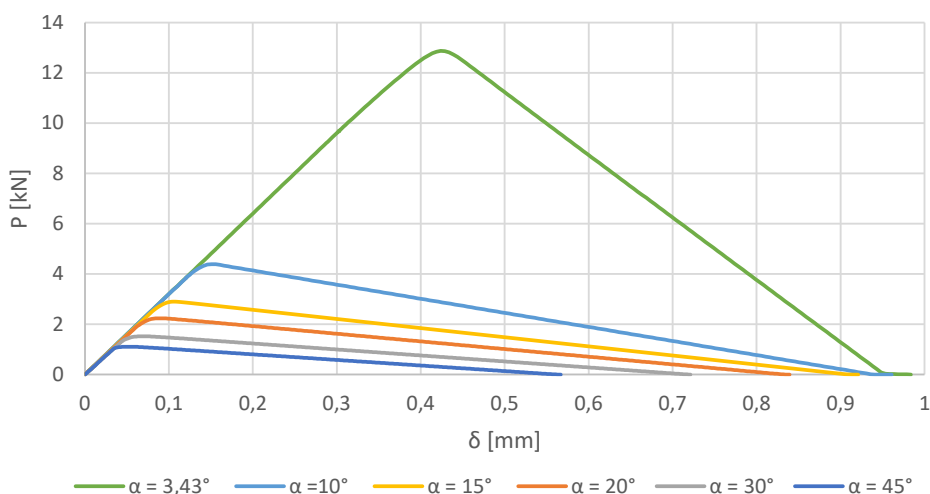


Figura 43 - Curvas P - δ obtidas numericamente para as juntas com o adesivo Sikaforce® 7752.

Na Tabela 12 são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função do tipo de adesivo e valor de α . Observa-se que a resistência na junta de chanfro interior é tanto maior, quanto menor for α , uma vez que a diminuição deste parâmetro favorece a distribuição de tensões e provoca um aumento da área de transferência de esforços entre os aderentes. O aumento mais significativo de $P_{m\acute{a}x}$ dá-se entre $\alpha=10^\circ$ e $\alpha=3,43^\circ$. Ao comparar os resultados obtidos numericamente verifica-se que o adesivo com maior resistência é o Araldite® AV138, apesar deste ser um adesivo frágil. A inexistência de grandes variações de tensão ao longo da camada adesiva faz com que um adesivo mais frágil apresente melhores resultados e, por isso, se torne mais resistente que os adesivos dúcteis [14].

Tabela 12 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos pelo MEFX para os diferentes adesivos e valores de α e respetivas variações.

α [°]	3,43	10	15	20	30	45
Araldite® AV138	23685	10467	7701	6090	4488	3487
$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]	126	36	26	36	29	-
Araldite® 2015	22823	7676	5144	3909	2718	1997
$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]	197	49	32	44	36	-
Sikaforce® 7752	12868	4396	2900	2240	1526	1111
$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]	193	52	29	47	37	-

Em todos os adesivos, constata-se que o maior aumento percentual de $P_{m\acute{a}x}$ ocorre entre a configuração de junta com 10° e $3,43^\circ$, sendo que o aumento mais significativo se verifica nos adesivos mais dúcteis.

Na Figura 44, Figura 45 e Figura 46 são apresentados de curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente pelo MEFX para o Araldite® AV138, o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752, respetivamente, para diferentes valores de α . Observou-se uma conformidade entre as curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente. Existe também uma concordância em relação aos valores de rigidez e de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos. No caso do adesivo Araldite® 2015 (Figura 45) e Sikaforce® 7752 (Figura 46), uma vez que se trata de adesivos dúcteis, o comportamento das curvas $P-\delta$ obtidas numericamente após $P_{m\acute{a}x}$ é distinto do registado experimentalmente, o que é justificado com a uniformidade de tensões no adesivo, resultando na transposição da forma de lei coesiva para as curvas $P-\delta$ das juntas.

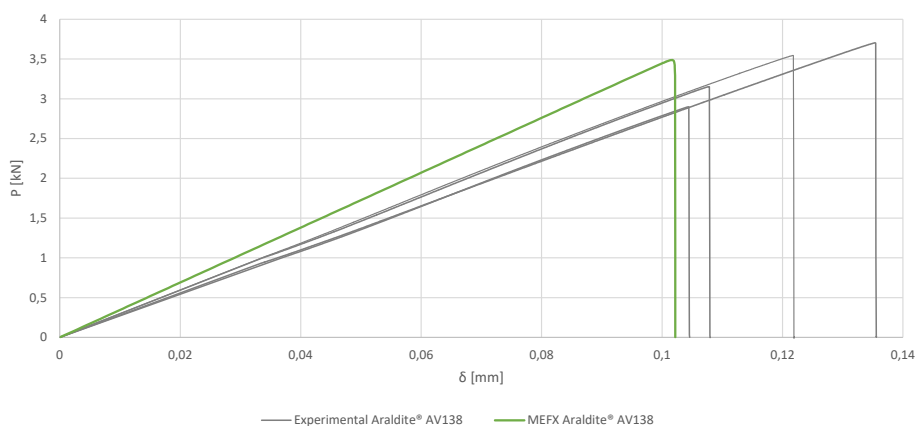


Figura 44 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente e experimentalmente para a junta ligada com o adesivo Araldite® AV138 e $\alpha=45^\circ$.

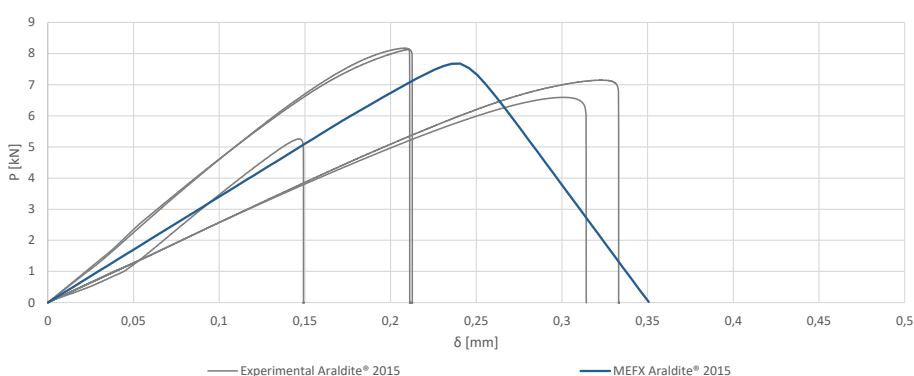


Figura 45 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente e experimentalmente para a junta com o adesivo Araldite® 2015 e $\alpha=10^\circ$.

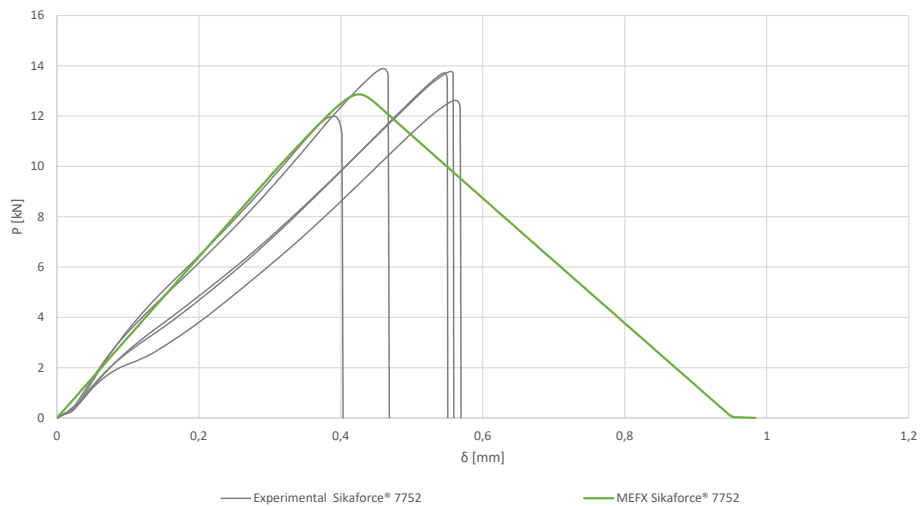


Figura 46 - Curvas P - δ obtidas numericamente e experimentalmente para a junta com o adesivo Sikaforce® 7752 e $\alpha=3,43^\circ$.

3.3.3 Análise de tensões

Neste subcapítulo é feita uma análise às tensões de corte e arrancamento existentes nas juntas de chanfro interior testadas com os três adesivos, através de gráficos que relacionam a evolução da tensão com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), que está compreendido entre os valores de 0 e 1. Estes dados são obtidos pelo ABAQUS® e, posteriormente, tratados no Microsoft Excel® com o objetivo de serem analisados na forma de tensão normalizada - posição na junta. As tensões σ_y e τ_{xy} são apresentadas normalizadas pela tensão de corte média ($\tau_{méd}$), para cada valor de α [125]. De modo a obter a distribuição das tensões e a efetuar a comparação entre os valores obtidos para as várias juntas de chanfro interior considerou-se, para todos os casos de estudo, o primeiro incremento (ou seja, valores idênticos de deslocamento aplicado) dos resultados obtidos pelo *software* ABAQUS® e as tensões a meio da camada adesiva (o *path* definido na modelação das juntas foi a meio da camada do adesivo).

3.3.3.1 Tensões de arrancamento

De seguida, são apresentadas figuras que mostram a evolução das tensões σ_y normalizadas em função do adesivo para $\alpha=3,43^\circ$ (Figura 47) e $\alpha=45^\circ$ (Figura 48).

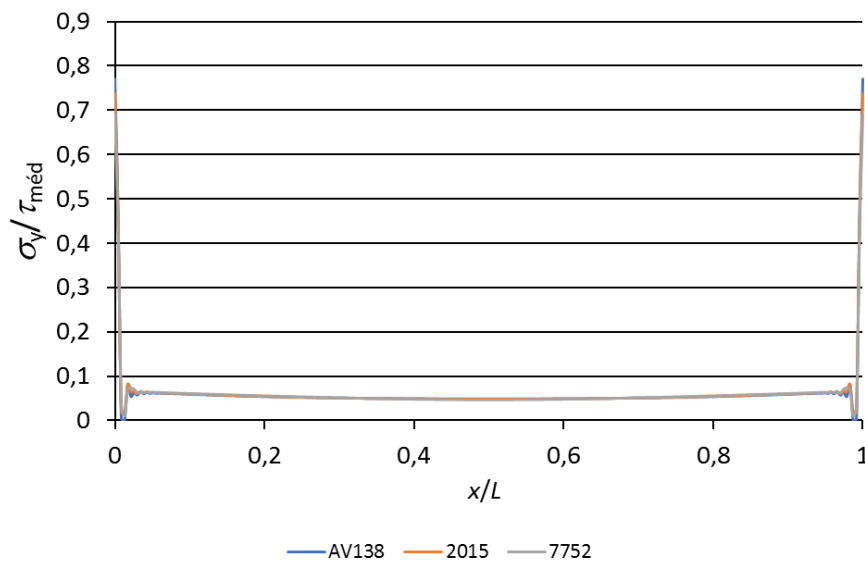


Figura 47 - Comparação da tensão normalizada de arrancamento entre adesivos, para $\alpha=3,43^\circ$.

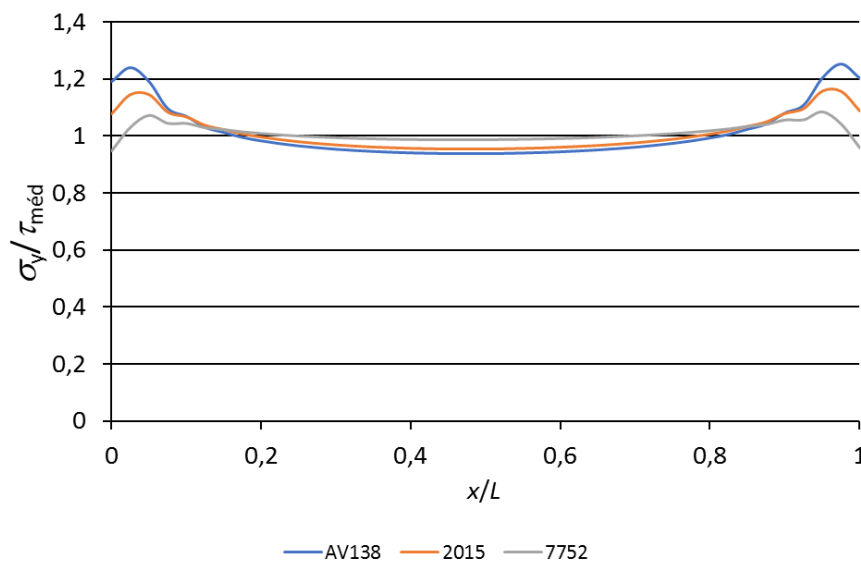


Figura 48 - Comparação da tensão normalizada de arrancamento entre adesivos, para $\alpha=45^\circ$.

É possível observar que as tensões σ_y crescem (mais acentuadamente em forma de picos) com o aumento da rigidez do adesivo, ou seja, as curvas de tensões para o adesivo Araldite® AV138 apresentam os picos de tensões mais elevados e o adesivo Sikaforce® 7752 apresenta o comportamento mais uniforme. Este comportamento está diretamente relacionado com a rigidez do adesivo e vai de encontro a análises semelhantes com outras configurações de juntas, nomeadamente juntas de sobreposição simples e dupla [126], e é particularmente crítico no caso de adesivos que combinem elevada rigidez e fragilidade [127]. Neste caso, a camada adesiva não

consegue acomodar os picos de tensão que se geram na camada adesiva, o que afeta negativamente a resistência da junta. Comparando as curvas da Figura 47 e Figura 48 é possível verificar que existe uma aproximação da tensão de arrancamento à de corte, com o aumento de σ_y independentemente do adesivo testado. No entanto, esta variação é abordada em mais detalhe nos capítulos seguintes.

A Figura 49, Figura 50 e Figura 51 apresentam as tensões σ_y normalizadas para cada adesivo nas várias juntas de chanfro interior em função de α . É possível observar que, com o aumento de α , as tensões σ_y normalizadas aumentam de forma significativa, tendendo para valores próximos da tensão de corte média, o que pode ser explicado pelo facto de a junta com $\alpha=45^\circ$ proporcionar uma preponderância idêntica destas tensões [96]. A alteração de $\alpha=3,43^\circ$ para $\alpha=45^\circ$ corresponde a um aumento de σ_y em mais de dez vezes na zona intermédia da camada do adesivo, o que mostra que a diminuição do ângulo nestas juntas diminui consideravelmente o esforço de arrancamento. Esta modificação pode ser explicada pela orientação dos esforços na junta de chanfro interior na zona de ligação, que se aproximam de uma solitação de corte da camada adesiva. O efeito da redução de espessura do aderente, particularmente para valores de α reduzidos, traduz-se em tensões σ_y de magnitude insignificante, o que é bastante benéfico para o comportamento à rotura da junta adesiva, especialmente para adesivos rígidos que não conseguem acomodar este tipo de tensões. Este comportamento contrasta com o observado numa junta de sobreposição simples, na qual a espessura do aderente se mantém constante, o que conduz a tensões σ_y significativas nas extremidades do adesivo [128]. A comparação entre os três adesivos mostra uma tendência semelhante, embora o aumento da rigidez do adesivo conduza a maiores gradientes e picos de tensão nas extremidades da ligação.

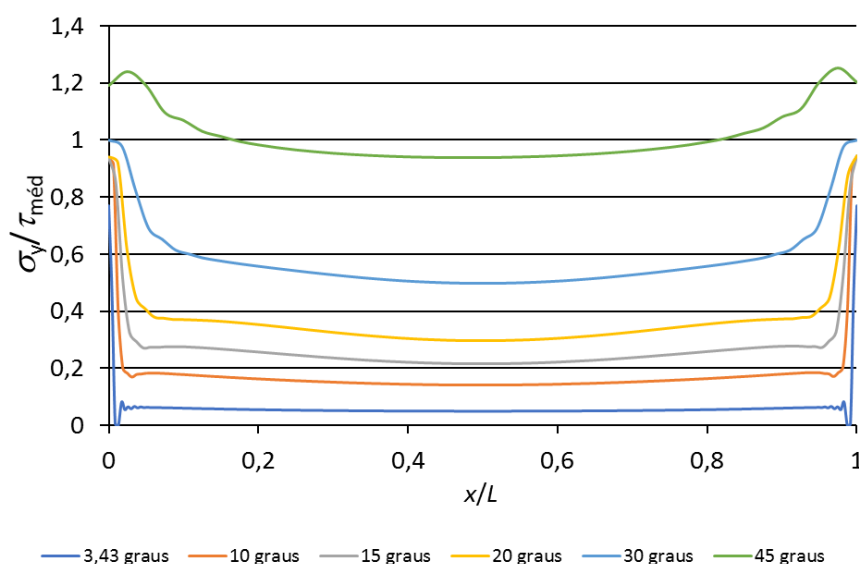


Figura 49 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® AV138.

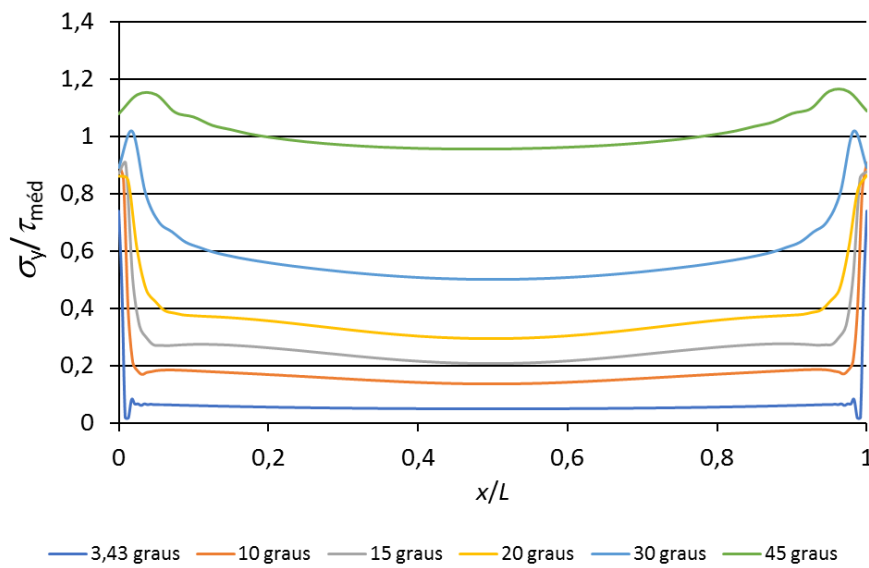


Figura 50 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® 2015.

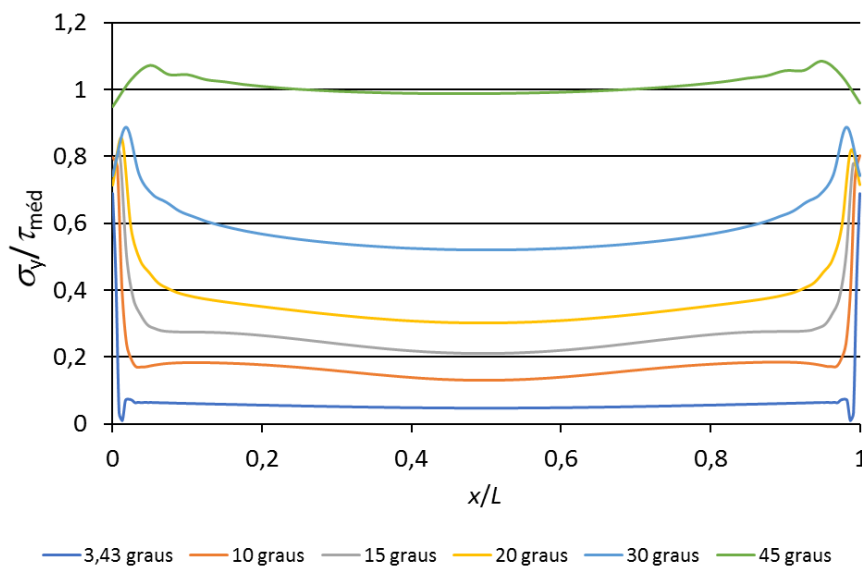


Figura 51 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos, para o adesivo Sikaforce® 7752.

3.3.3.2 Tensões de corte

Apresentam-se de seguida as várias figuras que mostram a evolução da tensão normalizada de corte em função de α para os vários adesivos. A Figura 52 e Figura 53 mostram a evolução das tensões τ_{xy} normalizadas em função do adesivo para $\alpha=3,43^\circ$ e $\alpha=45^\circ$, respetivamente.

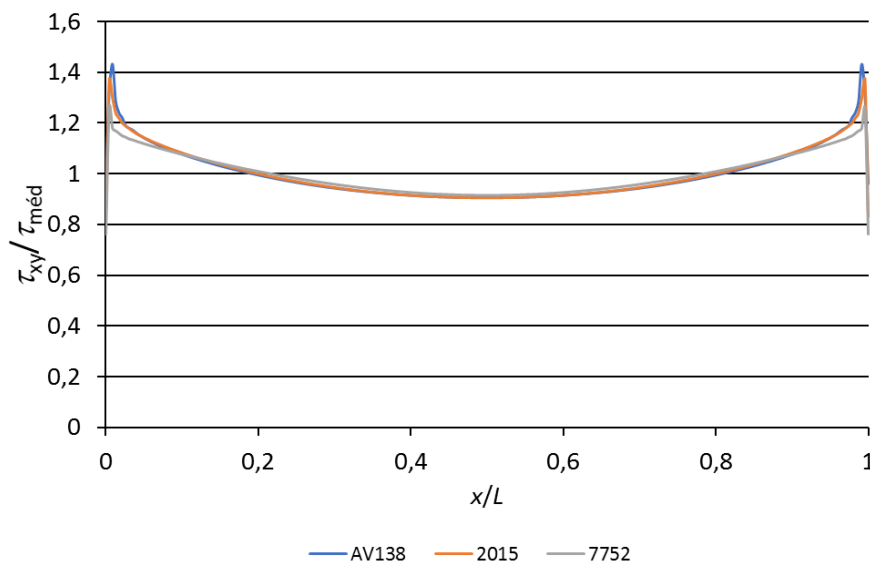


Figura 52 - Comparação da tensão normalizada de corte entre adesivos, para $\alpha=3,43^\circ$.

Analisando a Figura 52 e Figura 53 verifica-se que, quanto maior a rigidez do adesivo, maior serão os picos de tensão obtidos, o que é prejudicial para as juntas, na medida em que o adesivo poderá não ter ductilidade suficiente para acomodar estas tensões, o que por sua vez pode provocar rotura. A magnitude dos picos de tensões τ_{xy} diminui com o aumento de α , o que será, no entanto, mais detalhado no estudo que se segue.

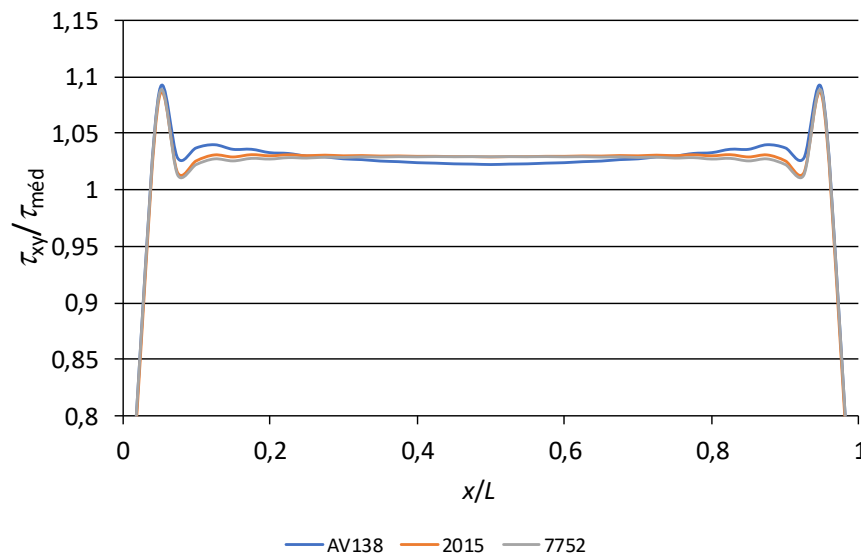


Figura 53 - Comparação da tensão normalizada de corte entre adesivos, para $\alpha=45^\circ$.

A Figura 54, Figura 55 e Figura 56 apresentam as curvas obtidas para o comportamento de cada adesivo em várias juntas de chanfro interior, em função de α .

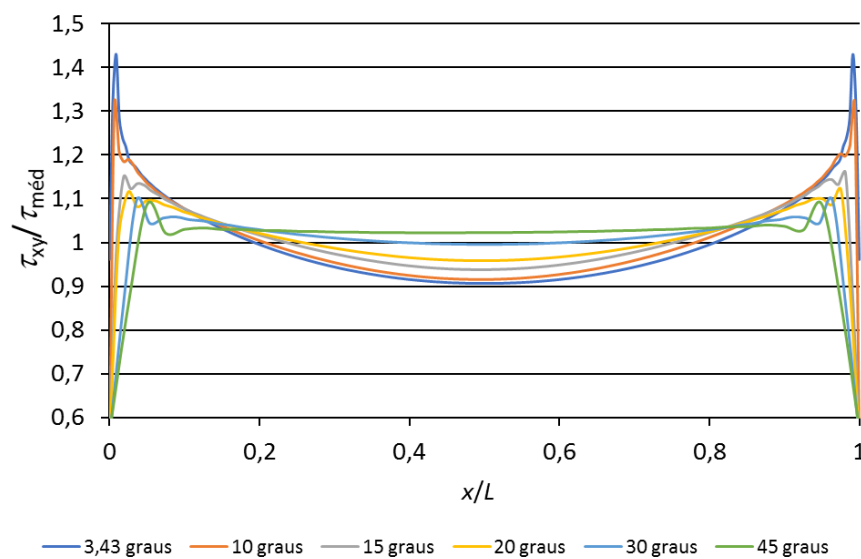


Figura 54 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® AV138.

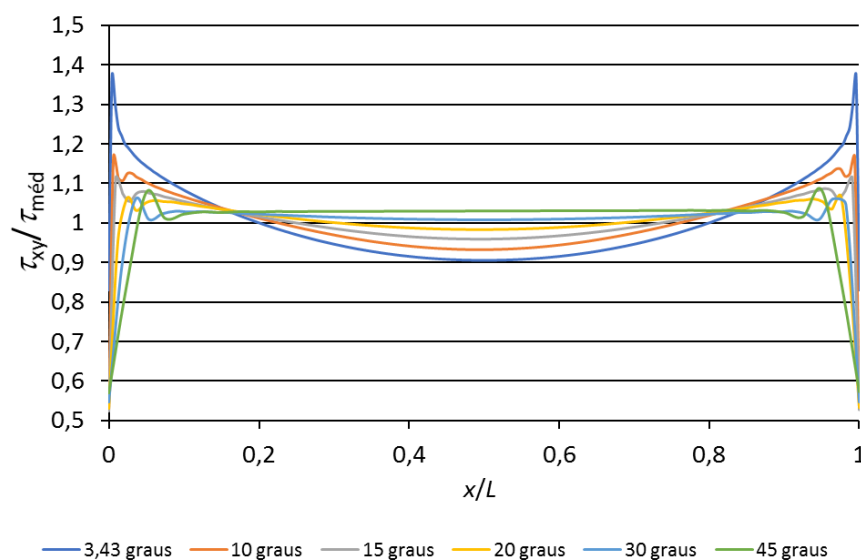


Figura 55 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® 2015.

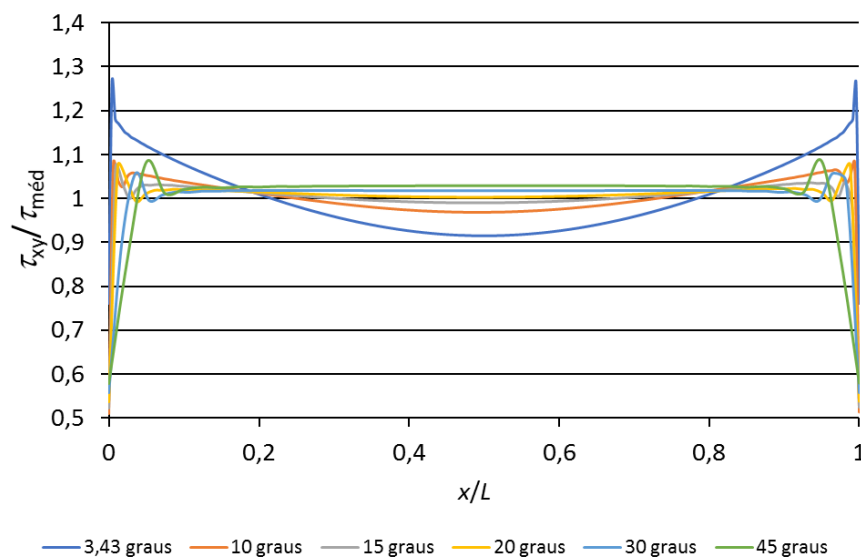


Figura 56 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos, para o adesivo Sikaforce® 7752.

Observando a Figura 54, a Figura 55 e a Figura 56 pode-se afirmar que as tensões τ_{xy} normalizadas se caracterizam pela existência de picos nas extremidades e um comportamento mais uniforme na zona interior da ligação, independentemente do valor de α . Pela comparação de diferentes valores de α , verifica-se que os picos de tensão tendem a aumentar com a redução de α . Esta variação é particularmente significativa para $\alpha=3,43^\circ$, principalmente para os adesivos Araldite®. Isto pode ser explicado pelo facto de a variação da geometria da junta de chanfro interior aumentar o efeito de esforço diferencial dos aderentes nas extremidades da ligação [129] e que se pode encontrar frequentemente, por exemplo, em juntas de sobreposição [130]. O comportamento observado para valores de α reduzidos pressupõe uma degradação do estado de tensão na camada adesiva, que por si só tenderia a diminuir a resistência da junta. No entanto, a diminuição de α também aumenta exponencialmente o comprimento da zona ligada, o que tipicamente se sobrepõe ao efeito das tensões e permite um grande aumento da resistência da junta [131]. O adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta picos de valores mais elevados e o Sikaforce® 7752 é o que apresenta o comportamento mais uniforme. Esta modificação deve-se essencialmente à rigidez dos adesivos, já que, à medida que existe mais rigidez no adesivo, maior é a influência da deformação diferencial dos aderentes nas extremidades da ligação [96].

3.3.4 Análise da variável de dano

Neste subcapítulo são apresentados os estudos da variável de dano SDEG para as várias configurações de junta. O estudo da variável de dano SDEG dos elementos coesivos da camada adesiva, ao longo de x/L_0 , é uma das ferramentas que ajuda a comparação entre as várias configurações de junta para os diferentes adesivos. Esta variável possui valores

compreendidos entre 0 (material não danificado) e 1 (rotura completa), fornecendo a degradação da rigidez da lei coesiva em modo misto do MDC.

A Figura 57, Figura 58 e Figura 59 mostram a extensão do dano (SDEG) com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), em juntas com diferentes α , para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente. O tratamento dos gráficos obtidos foi efetuado por da Silva [125]. Da análise da Figura 57, Figura 58 e Figura 59 pode-se constatar que a maior incidência de dano neste tipo de junta se dá nas extremidades, de forma coerente com a distribuição de tensões que foi apresentada no capítulo anterior. Na zona intermédia da ligação, o dano é tipicamente nulo no instante em que $P_{máx}$ é atingida. Analisando os vários α , observa-se que, com o seu aumento, se obtém menor magnitude localizada nas extremidades e uma maior uniformidade no dano ao longo da camada adesiva, também no seguimento da variação da distribuição de tensões em função de α , na medida em que as tensões também se tornam mais uniformes para valores de α superiores. Entre adesivos, verifica-se que, com o aumento da sua rigidez, a magnitude do dano nos vários α aumenta e concentra-se em zonas mais reduzidas nas extremidades da ligação, apresentando mais oscilações. Por outro lado, o aumento da ductilidade do adesivo permite uma distribuição do dano mais uniforme no instante de $P_{máx}$, o que conduz a uma melhor utilização da resistência do adesivo em toda a extensão da ligação.

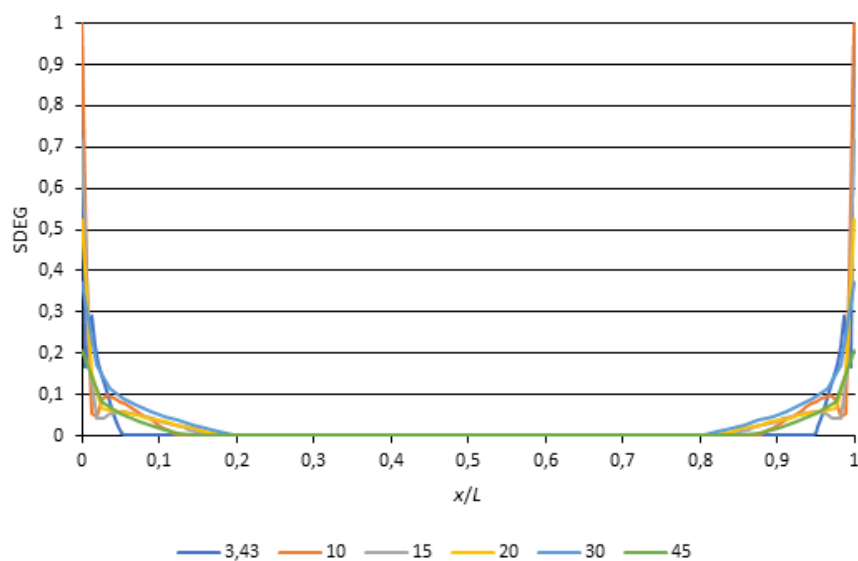


Figura 57 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para o adesivo Araldite® AV138 em juntas com diferentes α .

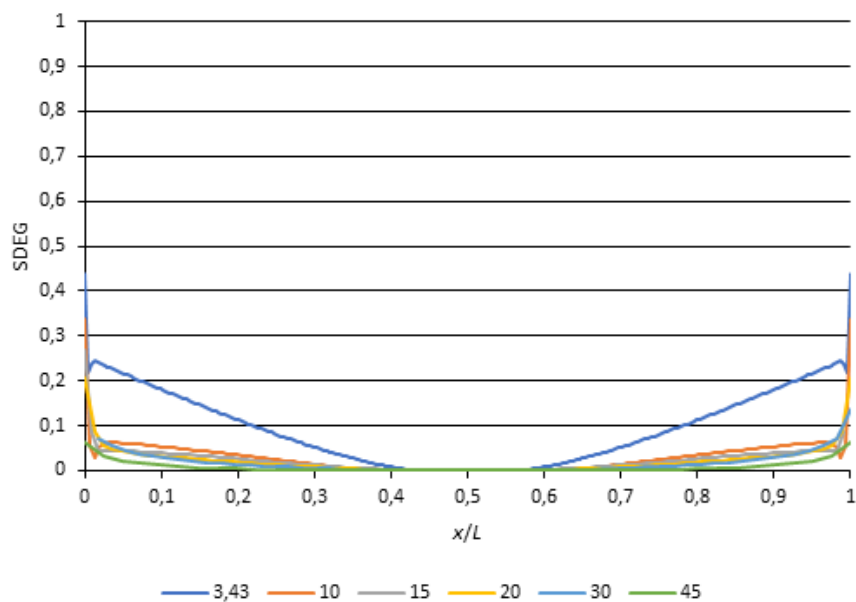


Figura 58 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para o adesivo Araldite® 2015 em juntas com diferentes α .

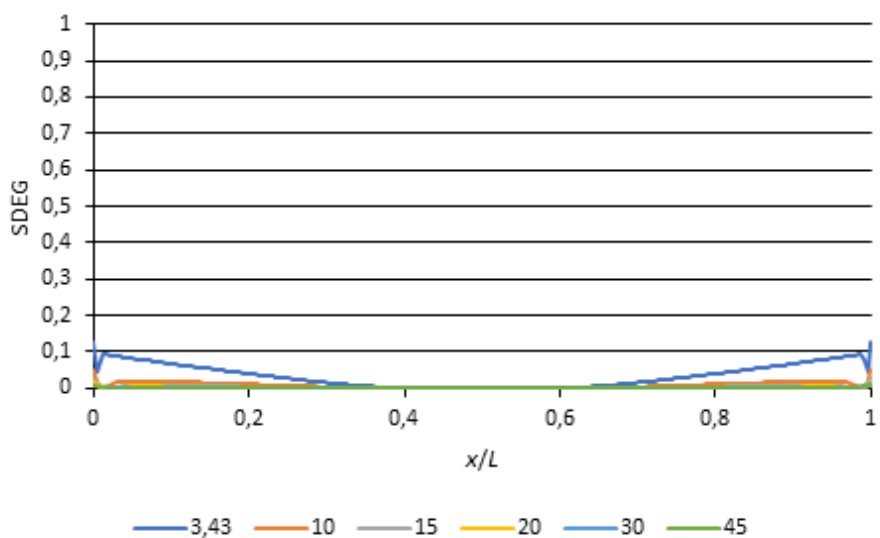


Figura 59 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para o adesivo Sikaforce® 7752 em juntas com diferentes α .

De seguida, são apresentadas representações gráficas que relacionam a evolução do dano (SDEG) em vários pontos de carga em função do comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para as condições extremas de rigidez, em termos de adesivos e valores de α utilizados. A variável de dano é representada para valores crescentes de $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}\times 100$ [74], onde $\delta_{P_{\text{máx}}}$ é o deslocamento em $P_{\text{máx}}$ (como resultado, um valor de $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}$ de 100% corresponde a $P_{\text{máx}}$). A Figura 60 e Figura 61 apresentam a evolução do

dano (SDEG) com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para o adesivo Araldite® AV138 com $\alpha=3,43^\circ$ e $\alpha=45^\circ$, respetivamente.

A Figura 60 e Figura 61 reforçam o previamente concluído, no que diz respeito aos elevados gradientes de dano na extremidade da junta. Por outro lado, observa-se que o dano tem um processo de evolução extremamente rápido até à rotura final, em virtude de o adesivo Araldite® AV138 ser frágil. De facto, para $\alpha=3,43^\circ$, a rotura completa ocorre para $\delta/\delta_{p\text{máx}}\approx 100,02\%$, enquanto para $\alpha=45^\circ$, este valor sobe marginalmente para $\approx 100,05\%$. No seguimento da discussão apresentada anteriormente, relativa à distribuição de tensões, as curvas de dano para $\alpha=45^\circ$ são bastante mais uniformes durante todo o processo de dano, comparativamente às registadas para $\alpha=3,43^\circ$.

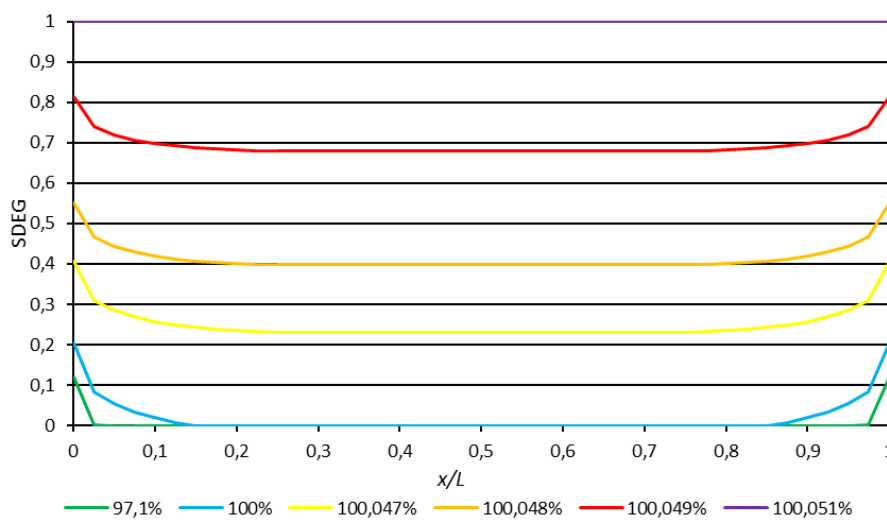


Figura 60 - Evolução do dano (SDEG) com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para o adesivo Araldite® AV138 com $\alpha=3,43^\circ$.

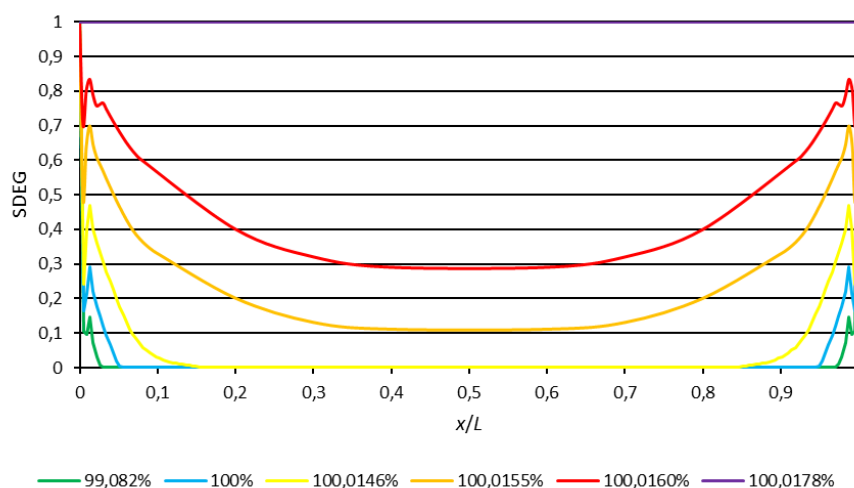


Figura 61 - Evolução do dano (SDEG) percentual com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para o adesivo Araldite® AV138 com $\alpha=45^\circ$.

A Figura 62 e Figura 63 apresentam um estudo idêntico, embora neste caso para o adesivo Sikaforce® 7752, para o qual se pode afirmar que o dano tem um comportamento muito mais uniforme ao longo de todo o processo de dano, o que resulta da combinação de dois fatores: a menor rigidez do adesivo, que por si só já proporciona distribuições de dano mais uniformes ao longo da camada adesiva, e a ductilidade do adesivo, que resulta numa grande extensão da zona plástica, no instante em que $P_{m\acute{a}x}$ é atingido.

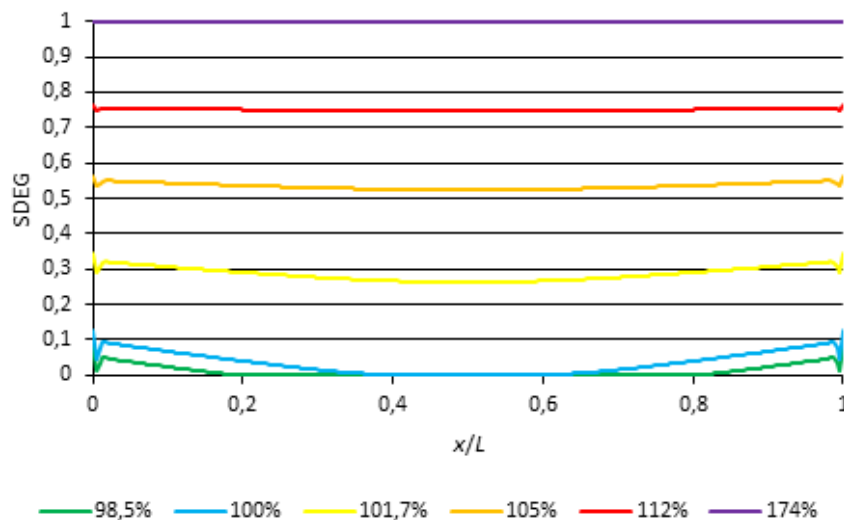


Figura 62 - Evolução do dano (SDEG) percentual com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para o adesivo Sikaforce® 7752 com $\alpha=3,43^\circ$.

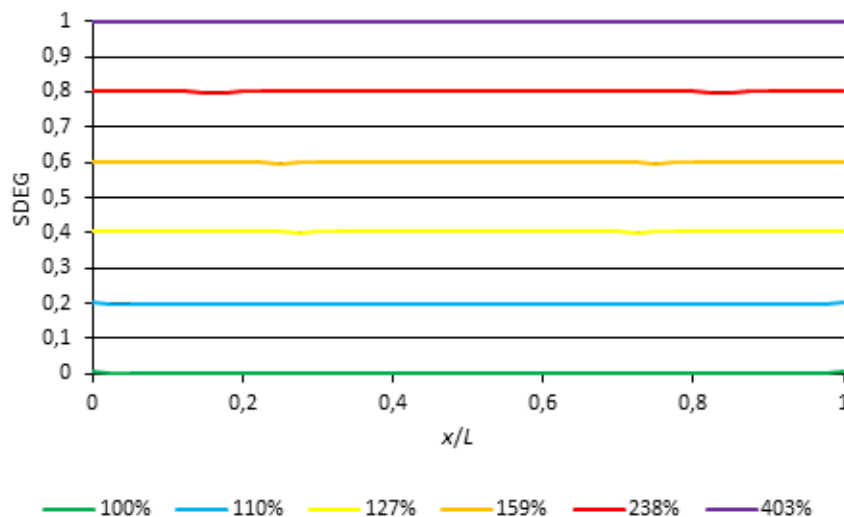


Figura 63 - Evolução do dano (SDEG) percentual com o comprimento normalizado da camada adesiva (x/L), para o adesivo Sikaforce® 7752 com $\alpha=45^\circ$.

Devido a estes fatores, $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ também apresenta valores bastante elevados, o que significa que a rotura da junta não ocorre de forma abrupta, como no adesivo Araldite®

AV138, mas ao invés disso, ocorre para um deslocamento bastante superior ao correspondente a $P_{máx}$. Mais especificamente, para $\alpha=3,43^\circ$ registou-se $\delta/\delta_{Pmáx}=174\%$ e para $\alpha=45^\circ$ obteve-se $\delta/\delta_{Pmáx}=403\%$. A comparação entre $\alpha=3,43^\circ$ e $\alpha=45^\circ$, tal como no caso do adesivo Araldite® AV138, mostra que valores de α mais elevados tendem a promover curvas de dano mais uniformes ao longo de todo o processo de rotura.

3.3.5 Energia dissipada

Nesto subcapítulo será apresentado o estudo da dissipação de energia registadas nas juntas adesivas de chanfro interior com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 com os diferentes valores de α .

Os valores de E_{diss} foram calculados através das curvas $P-\delta$ obtidas numericamente através do *software* ABAQUS®. A E_{diss} é calculada de forma aproximada através da área abaixo das curvas $P-\delta$ obtidas. Para este efeito, cada uma das áreas é dividida em pequenos retângulos. A E_{diss} é dada pela seguinte equação:

$$E_{diss} = \sum_{i=1}^n ((\delta_i - \delta_{i-1}) \times P_i),$$

onde $(\delta_i - \delta_{i-1})$ corresponde à largura do retângulo (eixo horizontal) e P_i ao comprimento (eixo vertical).

Na Figura 64 são representados graficamente os resultados obtidos da energia máxima dissipada pelas juntas adesivas de chanfro interior com os três adesivos em estudo e com todos os valores de α .

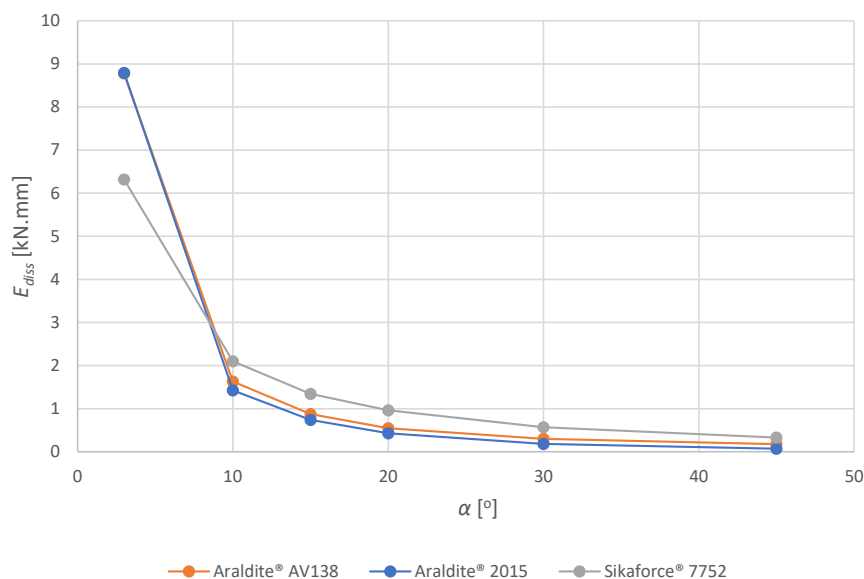


Figura 64 - Valores de E_{diss} obtidos para os três adesivos em estudo diferentes e diferentes α .

Através da análise do gráfico obtido é possível observar que, para $\alpha=3,43^\circ$, é o adesivo Araldite® 2015 que possui o maior valor de E_{diss} (8791,28 N.mm). O adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta o segundo maior de E_{diss} (8778,51 N.mm). Por fim, o adesivo Sikaforce® 7752 é o que possui o menor valor de E_{diss} (6316,73 N.mm). Posto isto, é possível concluir que as juntas com o adesivo Araldite® 2015 e com $\alpha=3,43^\circ$ são aquelas que possuem a capacidade de absorver maior quantidade de energia. Nos restantes valores de α , verifica-se que é o adesivo Sikaforce® 7752 que possui maiores valores de E_{diss} , enquanto em segundo lugar se encontra o adesivo Araldite® AV138 e, por último, o adesivo Araldite® 2015.

Da análise dos resultados, conclui-se que a junta ligada com o adesivo Araldite® 2015 e com $\alpha=3,43^\circ$ possui a maior capacidade de absorção de energia. Nos restantes valores de α é o adesivo com maior ductilidade (Sikaforce® 7752) que apresenta os melhores resultados. Na Tabela 13 são apresentados os resultados obtidos de E_{diss} para os diferentes adesivos e valores de α .

Tabela 13 - Valores de E_{diss} [N.mm] obtidos para os três adesivos em estudo e para os diferentes α .

α [°]	3,43	10	15	20	30	45
Araldite® AV138	8778,51	1631,56	876,60	547,49	297,13	178,78
Araldite® 2015	8791,28	1423,95	741,35	430,86	179,89	73,74
Sikaforce® 7752	6316,73	2097,67	1344,2	961,21	569,81	326,49

3.3.6 Resistência das juntas

Este subcapítulo é destinado à comparação dos resultados experimentais com os resultados numéricos. Na Figura 65 estão representados graficamente os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente através do MEFX para as juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138. Ao analisar os resultados obtidos verifica-se que a previsão efetuada pelo MEFX para as juntas de chanfro interior com $\alpha=3,43^\circ$ (23,69 kN) não corresponde com o resultado obtido experimentalmente (29,7 kN). No entanto, os restantes valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pelo MEFX são próximos dos resultados experimentais.

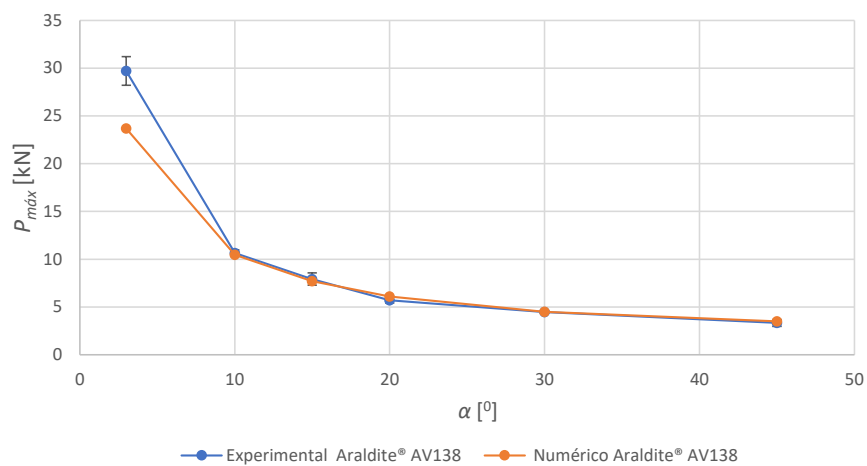


Figura 65- Evolução de $P_{máx}$ em função de α para as juntas com adesivo Araldite® AV138.

Relativamente ao adesivo Araldite® 2015 (Figura 66) e ao Sikaforce® 7752 (Figura 67) é possível observar que, de maneira geral, a previsão efetuada pelo MEFX reproduziu de forma próxima os valores experimentais de $P_{máx}$.

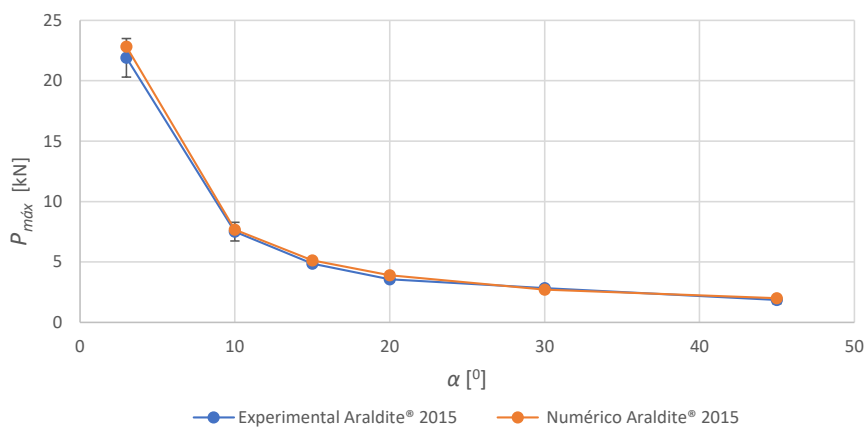


Figura 66 - Evolução de $P_{máx}$ em função de α para as juntas com adesivo Araldite® 2015.

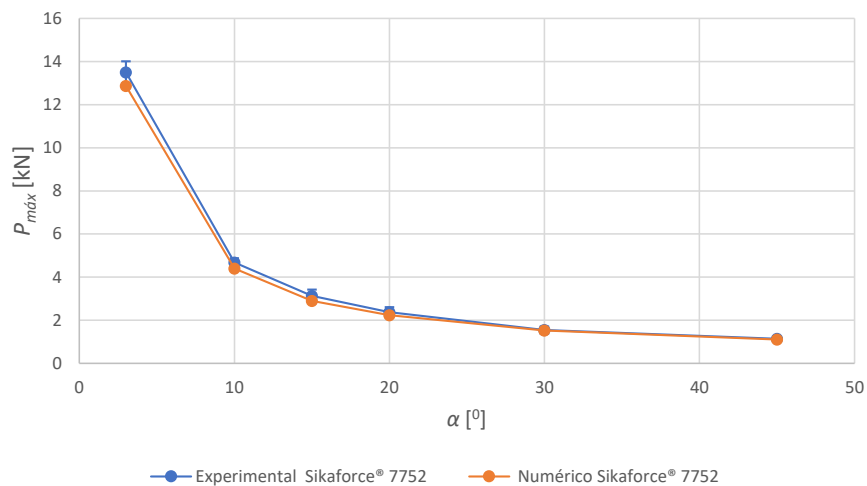


Figura 67 - Evolução de $P_{máx}$ em função de α para as juntas com adesivo Sikaforce® 7752.

Através da análise da Figura 68 é possível observar as diferenças existentes entre os resultados experimentais e numéricos de $P_{máx}$ considerando os três adesivos - Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

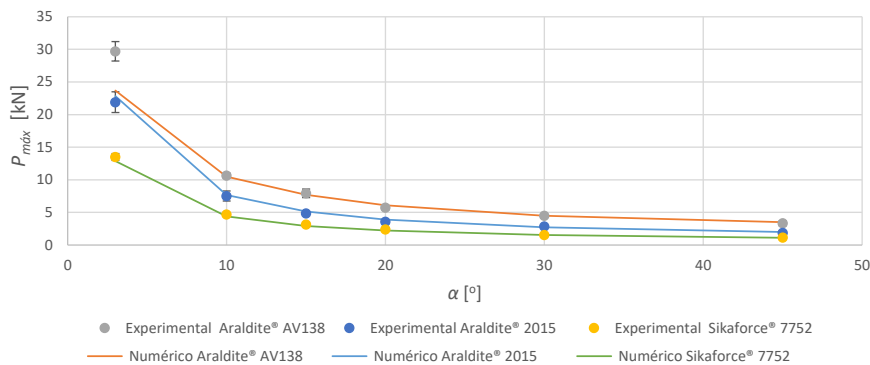


Figura 68 - $P_{máx}$ em função de α para os três adesivos - resultados experimentais e previsão por MEFX para as juntas de chanfro interior.

Na Tabela 14 são apresentados os valores de $P_{máx}$ obtidos experimentalmente e numericamente pelo MEFX em função de α , para os três adesivos estudados. Para facilitar a comparação e interpretação dos resultados são apresentadas as diferenças relativas entre os resultados do MEFX e experimentais, relativamente aos resultados experimentais. Ao analisar os dados obtidos constata-se que a previsão efetuada pelo MEFX produziu valores próximos dos experimentais.

Na junta ligada com o adesivo Araldite® AV138 e com $\alpha=3,43^\circ$ existe uma diferença notória entre o valor de $P_{máx}$ numérico e experimental. A diferença relativa para é de 20,25%, com o valor numérico inferior. No entanto, é de salientar que, apesar da discrepância entre valores, em termos numéricos, esta configuração é aquela com o $P_{máx}$ mais elevado e, conseqüentemente, com uma maior resistência. Ao analisar as

diferenças relativas dos restantes valores de α para o Araldite® AV138, verifica-se que os valores são bastante aceitáveis, sendo que a maior diferença relativa (6,56%) se observa para $\alpha=20^\circ$ e a menor diferença relativa (0,18%) se verifica para $\alpha=30^\circ$.

No adesivo Araldite® 2015 apenas na configuração com $\alpha=30^\circ$ o valor numérico é inferior ao experimental, nas restantes configurações os valores numéricos são superiores aos experimentais. Visto que se trata de uma diferença reduzida os resultados são considerados adequados. A maior diferença relativa é de 9,59% para $\alpha=20^\circ$ e a menor é de 2,22% para $\alpha=10^\circ$.

Relativamente ao adesivo Sikaforce® 7752, o MEFX foi capaz de prever de forma aproximada os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para este adesivo, ainda que os valores numéricos obtidos sejam inferiores aos resultados experimentais. A maior diferença relativa é de 7,41% para $\alpha=15^\circ$, mas esta disparidade é aceitável dado que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é aproximadamente 31 kN e o valor de $P_{m\acute{a}x}$ numérico é aproximadamente 29 kN.

É possível inferir, através da comparação dos resultados, que o MEFX foi capaz de prever a resistência de forma aceitável. O adesivo Araldite® AV138 continua a ser o adesivo com maior resistência para este tipo de junta, seguido do adesivo dúctil Araldite® 2015 e, por último, com pior prestação o adesivo Sikaforce® 7752.

Tabela 14 - Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função do tipo de adesivo e α .

α [°]		3	10	15	20	30	45
Araldite® AV138	Experimental	29700	10648	7926	5715	4480	3325
	MEFX	23685	10467	7701	6090	4488	3487
Desvio Percentual [%]		-20,25	-1,70	-2,84	6,56	0,18	4,87
Araldite® 2015	Experimental	21903	7509	4858	3567	2832	1868
	MEFX	22823	7676	5144	3909	2718	1997
Desvio Percentual [%]		4,20	2,22	5,89	9,59	-4,03	6,91
Sikaforce® 7752	Experimental	13500	4677	3132	2378	1543	1142
	MEFX	12868	4396	2900	2240	1526	1111
Desvio Percentual [%]		-4,68	-6,01	-7,41	-5,80	-1,10	-2,71

3.3.7 Comparação com MDC

Neste subcapítulo é realizada uma comparação entre os resultados obtidos nas previsões numéricas por MDC para as juntas de chanfro interior do trabalho realizado por Barbosa [1] e os resultados numéricos obtidos pelo MEFX neste trabalho. Esta

análise será realizada tendo em consideração o comportamento das juntas adesivas com os três adesivos em estudo para os diferentes valores de α . Será feita uma comparação entre as diferentes curvas P - δ obtidas em ambos os estudos, como também serão analisados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos.

As curvas P - δ obtidas numericamente para o adesivo Araldite® AV138 (Figura 69) apresentam diferenças no seu comportamento. É possível observar que o declive da reta até $P_{m\acute{a}x}$ é superior no estudo numérico MEFX. Também se verifica uma diferença nos deslocamentos obtidos, sendo que a rotura da camada adesiva ocorre em primeiro lugar no MEFX. Em termos de valores de $P_{m\acute{a}x}$, os dois estudos foram capazes de prever resultados próximos, já que a previsão do MEFX foi de 3487 N, enquanto a do MDC foi de 3303 N.

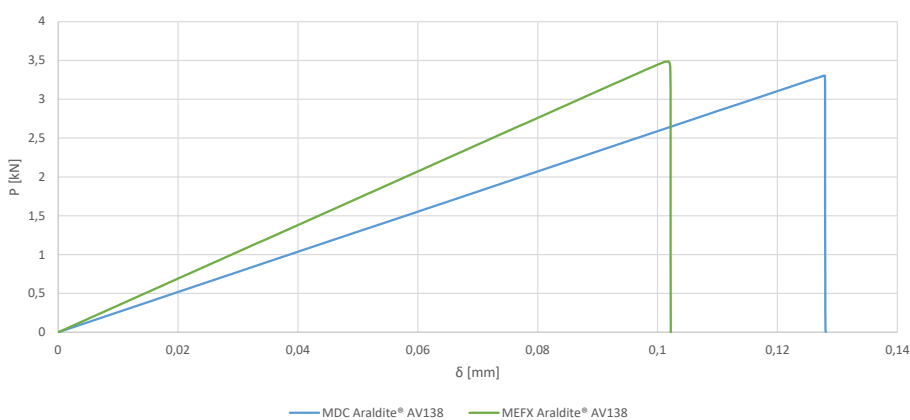


Figura 69 - Curvas P - δ obtidas numericamente para as juntas com $\alpha=45^\circ$ coladas com o adesivo Araldite® AV138.

Tal como no adesivo Araldite® AV138, as curvas P - δ obtidas para as juntas ligadas com Araldite® 2015 também apresentam diferenças no seu comportamento. A curva P - δ obtida pela análise MEFX apresenta perda de linearidade antes de $P_{m\acute{a}x}$, o que não se verifica na curva P - δ obtida pelo estudo numérico MDC, para a qual se verifica linearidade até atingir o valor de $P_{m\acute{a}x}$. A curva obtida pelo MEFX apresenta um declive mais significativo quando comparada com a curva obtida pelo MDC. Relativamente ao deslocamento até rotura, este é maior no MDC, logo a rotura dá-se primeiro na análise MEFX. Ambos os métodos obtiveram valores próximos de $P_{m\acute{a}x}$, sendo que a análise MDC previu valores inferiores.

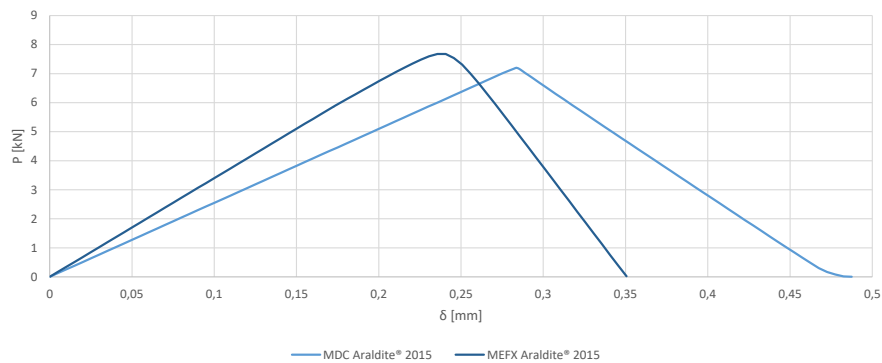


Figura 70 - Curvas P - δ obtidas numericamente para as juntas com $\alpha=10^\circ$ coladas com o adesivo Araldite® 2015.

No caso do Sikaforce® 7752 (Figura 71), existe uma boa correlação das curvas obtidas pelo MDC e pelo MEFX. Semelhante ao que se verifica nos restantes adesivos, nas curvas calculadas pelo MEFX o valor de $P_{m\acute{a}x}$ e o declive são superiores. A rotura da camada adesiva acontece primeiro na previsão efetuada pelo MEFX e, por isso, o deslocamento até à rotura é superior na previsão realizada pelo MDC.

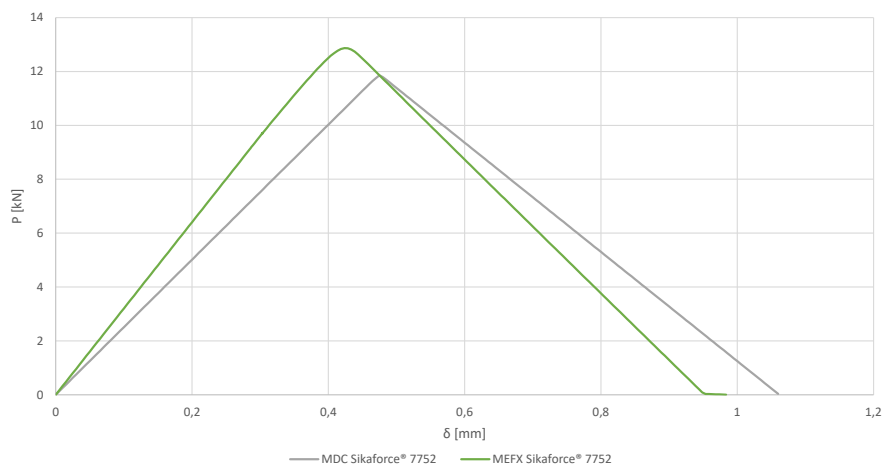


Figura 71 - Curvas P - δ obtidas numericamente para as juntas com $\alpha=3,43^\circ$ coladas com o adesivo Sikaforce® 7752.

Ao analisar as curvas P - δ verificou-se uma semelhança de comportamentos entre os três adesivos. Na análise MEFX todos os adesivos apresentaram declive superior e a rotura da camada adesiva acontece em primeiro. Relativamente aos valores de $P_{m\acute{a}x}$, no caso das curvas analisadas, as previsões efetuadas pelo MDC são inferiores aos valores previstos pelo MEFX, no entanto, isto não se verifica para todos os valores de α (Tabela 15 e Tabela 16).

Na Figura 72 é possível observar a evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função de α para os adesivos em estudo. Através da análise dos resultados obtidos constata-se uma boa aproximação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pelo MEFX e pelo MDC. A maior discrepância de valores ocorre na junta ligada com Araldite® AV138 e com $\alpha=3,43^\circ$ (Figura 72a), caso em que o estudo numérico MDC prevê com maior sucesso o valor de $P_{m\acute{a}x}$. No Araldite® 2015 (Figura 72b),

e Sikaforce® 7752 (Figura 72c), a maior diferença entre valores verifica-se na configuração com $\alpha=3,43^\circ$.

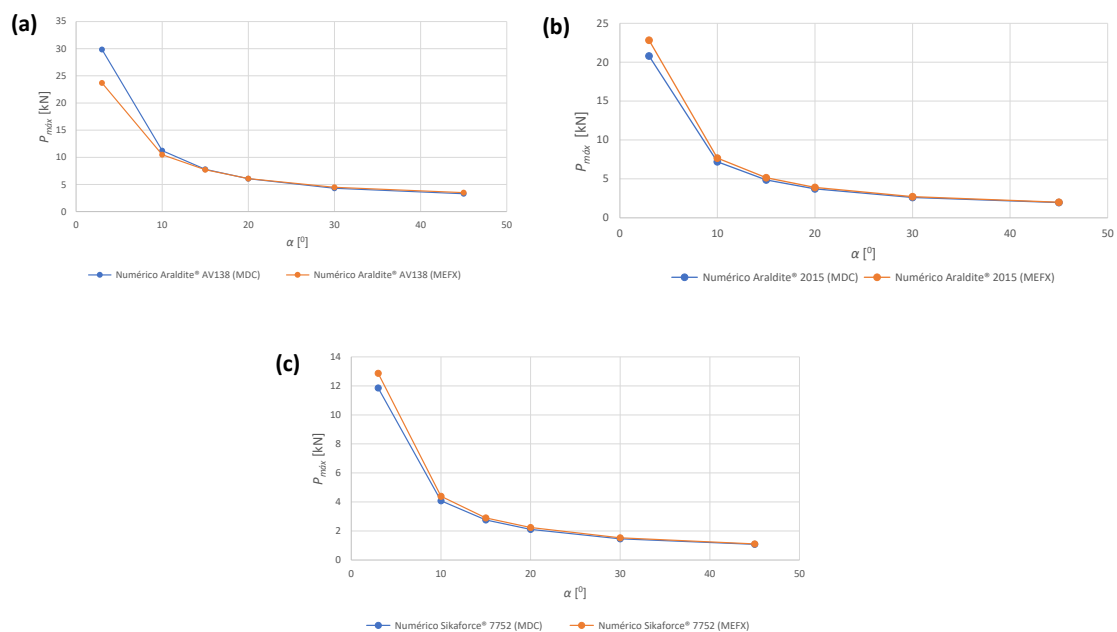


Figura 72 - Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função de α com os diferentes adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) Sikaforce® 7752.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados numéricos e experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ para o adesivo Araldite® AV138, bem como as diferenças relativas entre o MDC e o MEFX.

Como mencionado no capítulo 3.3.6, existe uma diferença considerável entre o valor de $P_{m\acute{a}x}$ experimental e numérico, previsto pelo MEFX. A previsão realizada pelo MDC obtém um valor de $P_{m\acute{a}x}$ mais próximo do experimental, com uma diferença relativa de apenas 0,51%. Posto isto, é expectável que exista uma maior diferença entre os valores obtidos pelo MEFX e pelo MDC. Nos restantes valores de α as diferenças relativas entre MEFX e MDC são aceitáveis.

Tabela 15 - Resultados numéricos e experimentais de $P_{\text{máx}}$ [N] e respetivo desvio percentual entre os métodos MDC e MEFX para as juntas com chanfro interior ligadas com Araldite® AV138.

α [°]		3,43	10	15	20	30	45
Araldite® AV138	Experimental	29700	10648	7926	5715	4480	3325
	MEFX	23685	10467	7701	6090	4488	3487
	MDC	29852	11219	7798	6047	4293	3303
Desvio percentual MEFX e MDC [%]		-20,7	-6,7	-1,2	0,7	4,5	5,6

No Araldite® 2015 as diferenças relativas são bastante aceitáveis e os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos são próximos dos valores experimentais. Isto significa que ambos os modelos são capazes de prever, de forma satisfatória, a resistência do adesivo Araldite® 2015. A maior diferença relativa (9,7%), semelhante ao Araldite® AV138, ocorre na configuração com $\alpha=3,43^\circ$.

Tabela 16 - Resultados numéricos e experimentais de $P_{\text{máx}}$ [N] e respetivo desvio percentual entre os métodos MDC e MEFX para as juntas com chanfro interior ligadas com Araldite® 2015.

α [°]		3,43	10	15	20	30	45
Araldite® 2015	Experimental	21903	7509	4858	3567	2832	1868
	MEFX	22823	7676	5144	3909	2718	1997
	MDC	20796	7199	4860	3724	2604	1948
Desvio percentual MEFX e MDC [%]		9,7	6,6	5,8	5,0	4,4	2,5

Na Tabela 17 são apresentados os valores relativos ao adesivo o Sikaforce® 7752. Neste caso o MEFX obteve valores de $P_{\text{máx}}$ inferiores aos experimentais. No entanto,

comparativamente ao MDC, o MEFX obteve valores mais próximos dos experimentais. O Sikaforce® 7752 é um adesivo muito dúctil e, por isso, as leis triangulares do MDC subestimam os resultados experimentais, quer em termos de $P_{m\acute{a}x}$, quer em termos de deslocamento. De forma análoga aos restantes adesivos, a maior diferença relativa (8,5%) ocorre na configuração com $\alpha=3,43^\circ$.

Tabela 17 - Resultados numéricos e experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ [N] e respetivo desvio percentual entre os métodos MDC e MEFX para as juntas com chanfro interior ligadas com Sikaforce® 7552.

α [°]		3,43	10	15	20	30	45
Sikaforce® 7752	Experimental	13500	4677	3132	2378	1543	1142
	MEFX	12868	4396	2900	2240	1526	1111
	MDC	11855	4084	2758	2108	1461	1077
Desvio percentual MEFX e MDC [%]		8,5	7,6	5,1	6,3	4,4	3,2

Experimentalmente foi possível concluir que, para as juntas de chanfro interior, o adesivo Araldite® AV138 é o que possui uma maior resistência. Em segundo lugar encontra-se o Araldite® 2015, com uma resistência bastante aceitável para este tipo de juntas. O Sikaforce® 7752 demonstra ser o menos resistente dos adesivos estudados nesta configuração de junta. Numericamente, através de ambas as análises (MEFX e MDC), é possível auferir as mesmas conclusões.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Propostas de trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo a realização de um estudo numérico pelo MEFX para a previsão da resistência de juntas adesivas de chanfro interior quanto ao seu desempenho à tração. Para tal, foram considerados três adesivos com diferentes propriedades de resistência e ductilidade e diferentes valores de α . Os três adesivos utilizados foram o Araldite® AV138, um epóxido frágil, o Araldite® 2015, um epóxido dúctil, e o Sikaforce®7752, um poliuretano que combina alta ductilidade e resistência moderada. O estudo numérico incidiu na análise das distribuições de tensão σ_y e τ_{xy} , na análise da variável de dano e no estudo da energia dissipada. Para verificar a capacidade de previsão de resistência do MEFX para juntas de chanfro interior, os resultados obtidos numericamente foram comparados com os resultados experimentais e numéricos pelo MDC, obtidos num trabalho anterior [86].

Os resultados experimentais demonstraram que $P_{m\acute{a}x}$ varia com o tipo de adesivo utilizado e com o valor de α . Observou-se que, experimentalmente, a diminuição de α provoca um aumento de $P_{m\acute{a}x}$, uma vez que a diminuição deste parâmetro favorece a distribuição de tensões e provoca um aumento da área de transferência de esforços entre os aderentes. Entre os adesivos estudados, o Araldite® AV138 foi o que apresentou os maiores valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os diferentes valores de α . Isto deve-se à inexistência de grandes variações de tensão ao longo da camada adesiva, o que faz com que um adesivo resistente, mas frágil obtenha melhores resultados, conduzindo as juntas adesivas mais resistentes do que as obtidas com adesivos menos resistentes, mas dúcteis. O adesivo com pior prestação foi o Sikaforce® 7752. Por fim, verificou-se que a junta adesiva ligada com o adesivo Araldite® AV138 e com $\alpha=3,43^\circ$ é a configuração que possui maior resistência ($P_{m\acute{a}x}=29,70$ kN).

Relativamente ao trabalho numérico realizado, foi utilizado o MEFX. Inicialmente foi feito um estudo das distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} na camada adesiva. Na análise σ_y conclui-se que as tensões σ_y aumentam com a rigidez do adesivo e, por isso, o adesivo frágil Araldite® AV138 é o que apresenta os maiores picos de tensão. Contrariamente, o adesivo dúctil Sikaforce® 7752 apresenta um comportamento mais uniforme. Verificou-se também que a diminuição de α diminui, de forma considerável, o esforço de arrancamento ao longo da camada adesiva. Na análise τ_{xy} constatou-se que o aumento da rigidez do adesivo, resulta no aumento dos picos de tensão obtidos. Este aumento

também se verifica com a redução de α . A magnitude dos picos de tensões τ_{xy} , diminui com o aumento de α .

Na análise da variável de dano para $P_{m\acute{a}x}$ observou-se que o aumento de α obtém uma maior uniformidade do dano ao longo da camada adesiva. Entre os adesivos, constatou-se que o aumento da rigidez aumenta a magnitude do dano, que se concentra em zonas mais reduzidas nas extremidades da ligação. De outro modo, o aumento da ductilidade do adesivo permite uma distribuição de dano mais uniforme no instante em que $P_{m\acute{a}x}$ é atingida.

No estudo da E_{diss} foi possível observar que, para $\alpha=3,43^\circ$, o adesivo dúctil Araldite® 2015 é aquele que possui maior capacidade para absorver uma maior quantidade de energia. No entanto, para os restantes valores de α , é o adesivo Sikaforce® 7752 que apresenta maiores valores de E_{diss} e, por isso, uma boa capacidade de suportar solicitações elevadas.

A comparação com os valores experimentais revelou resultados satisfatórios uma vez que, de forma geral, o MEFX foi capaz de prever valores de $P_{m\acute{a}x}$ próximos dos obtidos experimentalmente. No entanto, na junta adesiva com $\alpha=3,43^\circ$ existe uma diferença superior, de -20,25%, entre a previsão feita pelo MEFX e o valor obtido experimentalmente. Os restantes valores foram obtidos com precisão satisfatória, sendo que a máxima diferença obtida foi de 9,59% para o Araldite® 2015 e $\alpha=20^\circ$ e a diferença mínima foi de 0,18% para o adesivo Araldite® AV138 e $\alpha=30^\circ$. Ao comparar as curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente pelo MEFX verifica-se conformidade, embora o comportamento das curvas $P-\delta$ dos adesivos dúcteis difira do registado experimentalmente, o que se justifica com a uniformidade de tensões no adesivo, resultando na transposição da forma de lei coesiva para as curvas $P-\delta$ das juntas.

A comparação dos resultados obtidos numericamente pelo MEFX e MDC revelou que a previsão efetuada de $P_{m\acute{a}x}$ pelo MEFX é próxima da efetuada pelo MDC. De uma forma geral, o MEFX obteve valores mais próximos dos experimentais. Por fim, conclui-se que foi possível avaliar a capacidade de previsão do MEFX na previsão da resistência das juntas de chanfro interior, e que esta técnica pode ser usada com confiança no projeto de ligações adesivas com geometria complexa que solicitam o adesivo em modo-misto, no sentido de obter estruturas de elevada eficiência.

4.2 Propostas de trabalhos futuros

Como sugestões de trabalhos futuros apresentam-se as seguintes:

- Estudo de diferentes materiais de aderentes;
- Estudo de diferentes carregamentos;
- Variação de parâmetros geométricos.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Barbosa, N.G.d.C., *Comparação experimental e numérica por modelos de dano coesivo de diversos tipos de juntas adesivas* in *Engenharia Mecânica* 2017, Instituto Superior de Engenharia do Porto p. 130
2. Walter Brockmann, P.L.G., Jürgen Klingen, Bernhard Schröder, *Adhesive Bonding Materials, Applications and Technology*. 2009.
3. Silva, L.F.M.d., A.G.d. Magalhães, e M.F.d.S.F.d. Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Publindústria, Edições Técnicas: Porto.
4. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. McGraw-Hill handbooks. 2000, New York: McGraw-Hill. 880.
5. *Handbook of adhesion technology*. Springer reference. 2011, Heidelberg: Springer. 2.
6. Pinto, A.M.G. *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007.
7. Eduardo A. S. Marques, A.A.-S., A. Francisco G. Tenreiro, Lucas Martins da Silva, Ricardo J. C. Carbas *Structural Adhesive Bonding in Aerospace Applications* 2022. 164.
8. Mishnaevsky, L., K. Branner, H.N. Petersen, J. Beauson, M. McGugan, e B.F. Sørensen, *Materials for Wind Turbine Blades: An Overview*. *Materials*, 2017. **10**(11).
9. Omar, M.A., *The automotive body manufacturing systems and processes*. 2011, Chichester, West Sussex, United Kingdom ; Hoboken, N.J.: Wiley. 372.
10. Lewis, A., *Making Composite Repairs to the 787*, in *AERO*. 2014, Chris Villers.
11. Yacobi, B., S. Martin, K. Davis, A. Hudson, e M. Hubert, *Adhesive bonding in microelectronics and photonics*. *Journal of Applied Physics*, 2002. **91**: p. 6227-6262.
12. Silva, D.F.O., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. Silva, e U.T.F. Carvalho, *Experimental and numerical analysis of scarf aluminum adhesive joints*. *Procedia Manufacturing*, 2018. **17**: p. 705-712.
13. Kumar, S.B., S. Sivashanker, A. Bag, e I. Sridhar, *Failure of aerospace composite scarf-joints subjected to uniaxial compression*. *Materials Science and Engineering: A*, 2005. **412**(1): p. 117-122.

14. Barbosa, N.G.C., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. Silva, e R.D.F. Moreira, *Comparison of different adhesively-bonded joint types for mechanical structures*. Applied Adhesion Science, 2018. **6**(1): p. 15.
15. Maggiore, S., M.D. Banea, P. Stagnaro, e G. Luciano, *A Review of Structural Adhesive Joints in Hybrid Joining Processes*. Polymers (Basel), 2021. **13**(22).
16. Xu, Y., L. Guo, H. Zhang, H. Zhai, e H. Ren, *Research status, industrial application demand and prospects of phenolic resin*. RSC Advances, 2019. **9**(50): p. 28924-28935.
17. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung 15, 1938: p. 41-47.
18. Adams, R.D. e N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. **9**(3): p. 185-196.
19. Harris, J.A. e R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
20. Curiel Sosa, J.L. e N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
21. Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London, United Kingdom: Chapman & Hall.
22. Panigrahi, S.K. e B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
23. Campilho, R.D., *Strength Prediction of Adhesively-bonded Joints*. 2017: CRC Press.
24. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
25. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
26. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(5): p. 337-342.
27. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.
28. Fernlund, G. e J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.

29. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. **23**(3): p. 622-636.
30. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
31. Duan, K., X. Hu, e Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
32. da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011: Springer.
33. Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, e S.-S. Pang, *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18–19): p. 2445-2458.
34. Turon, A., J. Costa, P.P. Camanho, e C.G. Dávila, *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
35. Carvalho, U.T.F. e R.D.S.G. Campilho, *Validation of pure tensile and shear cohesive laws obtained by the direct method with single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **77**(Supplement C): p. 41-50.
36. Yang, Q.D. e M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
37. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, e R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
38. Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
39. Alfano, G. e M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
40. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
41. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and repaired sandwich panel by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.

42. Kafkalidis, M.S. e M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
43. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, e L.F.M. da Silva, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
44. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
45. Rocha, R.J.B. e R.D.S.G. Campilho, *Evaluation of different modelling conditions in the cohesive zone analysis of single-lap bonded joints*. The Journal of Adhesion, 2018. **94**(7): p. 562-582.
46. Fernandes, R.L. e R.D.S.G. Campilho, *Testing different cohesive law shapes to predict damage growth in bonded joints loaded in pure tension*. The Journal of Adhesion, 2017. **93**(1-2): p. 57-76.
47. Fernandes, R.L. e R.D.S.G. Campilho, *Accuracy of cohesive laws with different shape for the shear behaviour prediction of bonded joints*. The Journal of Adhesion, 2019. **95**(4): p. 325-347.
48. Carlberger, T. e U. Stigh, *Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(8): p. 816-835.
49. Jung Lee, M., T. Min Cho, W. Seock Kim, B. Chai Lee, e J. Ju Lee, *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
50. Zhu, Y., K.M. Liechti, e K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(1): p. 31-51.
51. Nunes, S.L.S., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. da Silva, C.C.R.G. de Sousa, T.A.B. Fernandes, M.D. Banea, e L.F.M. da Silva, *Comparative failure assessment of single and double-lap joints with varying adhesive systems*. The Journal of Adhesion, 2016. **92**: p. 610-634.
52. Pandya, K.C. e J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
53. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. Experimental Mechanics, 1992. **32**(4): p. 296-303.
54. Campilho, R.D.S.G., D.C. Moura, M.D. Banea, e L.F.M. da Silva, *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **53**: p. 15-22.

55. Stigh, U., K.S. Alfredsson, T. Andersson, A. Biel, T. Carlberger, e K. Salomonsson, *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. International Journal of Fracture, 2010. **165**(2): p. 149-162.
56. Constante, C.J., R.D.S.G. Campilho, e D.C. Moura, *Tensile fracture characterization of adhesive joints by standard and optical techniques*. Engineering Fracture Mechanics, 2015. **136**: p. 292-304.
57. ASTM D3433-99, *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
58. Gustafson, P.A. e A.M. Waas, *The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(10): p. 2201-2215.
59. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13-14): p. 2065-2077.
60. Leal, A.J.S. e R.D.S.G. Campilho, *Numerical evaluation of the ENF and 4ENF tests for the shear toughness estimation of adhesive joints*. Composite Structures, 2018. **202**: p. 333-343.
61. Daudeville, L. e P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
62. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, e I.A. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
63. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
64. Raghavan, P. e S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
65. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, e S.J. Shaw, *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
66. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, e M. Kimoto, *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.
67. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, e A.D. Crocombe, *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.

68. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
69. Chen, Z., R.D. Adams, e L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
70. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008: Wiley.
71. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
72. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
73. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
74. Gwinner, J., E.J.T. Stephan, e d.o.b. Contact Problems, *Advanced Boundary Element Methods—Treatment of Boundary Value*. 2017.
75. Wang, H. e Q.-H. Qin, *Methods of fundamental solutions in solid mechanics*. 2019, Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
76. Lucy, L.B., *A numerical approach to the testing of the fission hypothesis*. The Astronomical Journal, 1977. **82**: p. 1013-1024.
77. Gingold, R.A. e J. Monaghan, *Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977. **181**(3): p. 375-389.
78. Belytschko, T., Y.Y. Lu, e L. Gu, *Element-free Galerkin methods*. International journal for numerical methods in engineering, 1994. **37**(2): p. 229-256.
79. Chen, J.-S., C. Pan, C.-T. Wu, e W.K. Liu, *Reproducing kernel particle methods for large deformation analysis of non-linear structures*. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering, 1996. **139**(1-4): p. 195-227.
80. Liu, W.K., S. Jun, e Y.F. Zhang, *Reproducing kernel particle methods*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1995. **20**(8-9): p. 1081-1106.
81. Wang, J. e G. Liu, *A point interpolation meshless method based on radial basis functions*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2002. **54**(11): p. 1623-1648.
82. Wang, J., G. Liu, e Y. Wu, *A point interpolation method for simulating dissipation process of consolidation*. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering, 2001. **190**(45): p. 5907-5922.

83. Liu, G., *A point assembly method for stress analysis for two-dimensional solids*. International journal of solids and structures, 2002. **39**(1): p. 261-276.
84. Tsai, C., Y. Guan, D. Ohanehi, J. Dillard, D. Dillard, e R. Batra, *Analysis of cohesive failure in adhesively bonded joints with the SSPH meshless method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **51**: p. 67-80.
85. Bodjona, K. e L. Lessard, *Nonlinear static analysis of a composite bonded/bolted single-lap joint using the meshfree radial point interpolation method*. Composite Structures, 2015. **134**: p. 1024-1035.
86. Machado, R.M.D., R.D.S.G. Campilho, e R.J.B. Rocha, *Numerical modelling and experimental validation of step bonded joints*. Procedia Structural Integrity, 2020. **25**: p. 71-78.
87. Eusébio, S.M.L. e R.D.S.G. Campilho, *Modelling of tubular adhesively-bonded joints by the Extended Finite Element Method*. Procedia Manufacturing, 2019. **41**: p. 484-491.
88. Santos, T.F. e R.D.S.G. Campilho, *Numerical modelling of adhesively-bonded double-lap joints by the eXtended Finite Element Method*. Finite Elements in Analysis and Design, 2017. **133**: p. 1-9.
89. Stuparu, F.A., D.A. Apostol, D.M. Constantinescu, C.R. Picu, M. Sandu, e S. Soroohan, *Cohesive and XFEM evaluation of adhesive failure for dissimilar single-lap joints*. Procedia Structural Integrity, 2016. **2**: p. 316-325.
90. Faria, R.V.F., R.D.S.G. Campilho, P.J.A. Gonçalves, R.J.B. Rocha, I.J. Sánchez-Arce, e F.J.G. Silva, *Numerical analysis by XFEM of hybrid T-peel joints*. Procedia Structural Integrity, 2021. **33**: p. 673-684.
91. Alves, D.L., R.D.S.G. Campilho, R.D.F. Moreira, F.J.G. Silva, e M.G. Cardoso, *Effect of material hybridization on the strength of scarf adhesive joints*. Procedia Manufacturing, 2019. **38**: p. 1244-1251.
92. Alyousef, J., A. Yudhanto, R. Tao, e G. Lubineau, *Laser ablation of CFRP surfaces for improving the strength of bonded scarf composite joints*. Composite Structures, 2022. **296**: p. 115881.
93. Soutis, C., *Fibre reinforced composites in aircraft construction*. Progress in Aerospace Sciences, 2005. **41**(2): p. 143-151.
94. Katnam, K.B., L.F.M. Da Silva, e T.M. Young, *Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities*. Progress in Aerospace Sciences, 2013. **61**: p. 26-42.
95. Caminero, M.A., S. Pavlopoulou, M. Lopez-Pedrosa, B.G. Nicolaisson, C. Pinna, e C. Soutis, *Analysis of adhesively bonded repairs in composites: Damage detection and prognosis*. Composite Structures, 2013. **95**: p. 500-517.

96. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.
97. Masmanidis, I.T. e T.P. Philippidis, *Modeling the progressive failure of scarf joints for wind turbine blade repair*. Journal of Composite Materials, 2017. **52**(16): p. 2243-2254.
98. Santhanakrishnan Balakrishnan, V. e H. Seidlitz, *Potential repair techniques for automotive composites: A review*. Composites Part B: Engineering, 2018. **145**: p. 28-38.
99. Sun, L., Y. Tie, Y. Hou, X. Lu, e C. Li, *Prediction of failure behavior of adhesively bonded CFRP scarf joints using a cohesive zone model*. Engineering Fracture Mechanics, 2020. **228**: p. 106897.
100. Khashaba, U.A. e I.M.R. Najjar, *Adhesive layer analysis for scarf bonded joint in CFRE composites modified with MWCNTs under tensile and fatigue loads*. Composite Structures, 2018. **184**: p. 411-427.
101. Alves, D.L., R.D.S.G. Campilho, R.D.F. Moreira, F.J.G. Silva, e L.F.M. da Silva, *Experimental and numerical analysis of hybrid adhesively-bonded scarf joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018. **83**: p. 87-95.
102. Afendi, M., T. Teramoto, e H.B. Bakri, *Strength prediction of epoxy adhesively bonded scarf joints of dissimilar adherends*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(6): p. 402-411.
103. Jen, Y.-M., *Fatigue life evaluation of adhesively bonded scarf joints*. International Journal of Fatigue, 2012. **36**(1): p. 30-39.
104. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, A.M.G. Pinto, L.F.M. da Silva, e A.M.P. de Jesus, *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
105. *ASTM E8 / E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. 2016, ASTM International: West Conshohocken, PA.
106. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, e L.F.M. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
107. Campilho, R., *Adhesive, welded and weld-bonded single-lap joints: Numerical technique for strength prediction*. Vol. 24. 2012. 35-42.
108. Campilho, R.D.S.G., A.M.G. Pinto, M.D. Banea, e L.F.M. da Silva, *Optimization study of hybrid spot-welded/bonded single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 86-95.
109. Faneco, T.M.S., *Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica

- Ramo de Materiais e Tecnologias de Fabrico. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
110. da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints*, in *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2012, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 1-93.
 111. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, e L.F.M.d. Silva, *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
 112. *Abaqus® Documentation*. 2013, Dassault Systèmes: Vélizy-Villacoublay.
 113. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
 114. Pocius, A., *Adhesion and Adhesives Technology, An introduction: The chemistry and physical properties of elastomer-based adhesives*. 2002, Hansen Gardner Publications, Inc., Maplewood.
 115. Gonçalves, J., M. De Moura, A. Magalhães, e P. De Castro, *Application of interface finite elements to three-dimensional progressive failure analysis of adhesive joints*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2003. **26**(5): p. 479-486.
 116. Andersson, T. e U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41**(2): p. 413-434.
 117. Högberg, J.L. e U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
 118. Campilho, R., A. Pinto, M.D. Banea, R. Silva, e L.F. da Silva, *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
 119. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, A.M.G. Pinto, L.F.M. da Silva, e A.M.P. de Jesus, *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
 120. De Moura, M., R. Campilho, e J. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10): p. 2224-2230.
 121. De Moura, M., R. Campilho, e J. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
 122. Marques, E. e L.F. da Silva, *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. The Journal of Adhesion, 2008. **84**(11): p. 915-934.

123. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014, ISEP: Porto.
124. Darwish, S. e A. Ghanya, *Critical assessment of weld-bonded technologies*. Journal of Materials Processing Technology, 2000. **105**(3): p. 221-229.
125. da Silva, D.F.O., *Utilização do método directo de obtenção de leis coesivas para previsão de resistência de juntas com chanfro interior*. 2017, Tese de Mestrado, em curso. Departamento de Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
126. Nunes, S.L.S., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. da Silva, C.C.R.G. de Sousa, T.A.B. Fernandes, M.D. Banea, e L.F.M. da Silva, *Comparative Failure Assessment of Single and Double Lap Joints with Varying Adhesive Systems*. The Journal of Adhesion, 2016. **92**(7-9): p. 610-634.
127. Alves, D.L., *Ligações adesivas com chanfro interior entre aderentes distintos, in Engenharia Mecânica*. 2016, ISEP: Porto.
128. Davis, M. e D. Bond, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1999. **19**(2-3): p. 91-105.
129. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, A.M.G. Pinto, J.J.L. Morais, e J.J.M.S. Domingues, *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering 2009a. **40**: p. 149-157.
130. Odi, R.A. e C.M. Friend, *An improved 2D model for bonded composite joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004. **24**(5): p. 389-405.
131. Moreira, R.D.F. e R.D.S.G. Campilho, *Strength improvement of adhesively-bonded scarf repairs in aluminium structures with external reinforcements*. Engineering Structures, 2015. **101**(Supplement C): p. 99-110.