



Estudo de diferentes critérios de iniciação e propagação de dano na modelação de juntas adesivas de chanfro interior pelo método de elementos finitos extendido

GUILHERME JOSÉ COSTA PINHEIRO

novembro de 2022

ESTUDO DE DIFERENTES CRITÉRIOS DE INICIAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE DANO NA MODELAÇÃO DE JUNTAS ADESIVAS DE CHANFRO INTERIOR PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO

Guilherme José Costa Pinheiro

1130440

2021/2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO DE DIFERENTES CRITÉRIOS DE INICIAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE DANO NA MODELAÇÃO DE JUNTAS ADESIVAS DE CHANFRO INTERIOR PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO

Guilherme José Costa Pinheiro

1130440

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 do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Doutor Raul Domingues Ferreira Moreira.

2021/2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor António Gonçalves de Magalhães

Professor Coordenador, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Doutor Raul Domingues Ferreira Moreira

Investigador, FEUP

Arguente

Doutor Ricardo João Camilo Carbas

Investigador, FEUP

PALAVRAS-CHAVE

Junta adesiva, Adesivos estruturais, Junta de chanfro interior, Modelo de dano coesivo, Método de elementos finitos estendido.

RESUMO

Existem inúmeras aplicações para ligações adesivas que são utilizados em vários setores da indústria, desde a aeroespacial à do calçado. No setor aeroespacial e aeronáutico a sua utilização é de extrema importância, já que é possível obter ligações resistentes, leves e capazes de resistir à corrosão. Existem diversos fatores que condicionam o comportamento de uma junta adesiva. Assim, há necessidade de avaliar o impacto desses principais fatores na resistência da ligação, como o tipo de adesivo (frágil, dúctil ou na transição de ambos) e o comprimento de sobreposição (L_0). Por outro lado, as juntas de chanfro interior encontram aplicação em estruturas de alta responsabilidade, incluindo estruturas compósitas, devido à sua grande eficiência. Neste caso, um dos parâmetros geométricos mais relevantes é o ângulo de inclinação do chanfro (α).

O principal objetivo desta dissertação é realizar um estudo para estimar o comportamento mecânico de juntas adesivas com chanfro interior em função de α e do tipo de adesivo. Desta forma, foi realizado um estudo experimental e numérico de juntas de chanfro interior pelo Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), nas quais são aplicados diferentes adesivos como o Araldite® AV138, o Araldite® 2015 e o SikaForce® 7888. Foram utilizados substratos de alumínio (AW6082-T651) em juntas com diferentes valores de α , sendo sujeitas a esforços de tração, de forma a avaliar o seu desempenho e validar a aplicabilidade do MEFX para efeitos de previsão de resistência. Assim sendo, os valores obtidos experimentalmente e numericamente foram comparados para cada um dos adesivos e α no sentido de validar o método numérico MEFX para determinação do comportamento mecânico das juntas adesivas.

Os resultados obtidos no âmbito deste trabalho permitiram de forma clara validar que o método numérico MEFX devolve resultados muito próximos dos obtidos experimentalmente.

KEYWORDS

Adhesive joint, Structural adhesives, Scarf joint, Cohesive zone models, eXtended finite element method.

ABSTRACT

There are numerous applications for adhesive bonds, which are used in various industry sectors, from aerospace to footwear. In the aerospace and aeronautics sector, its use is extremely important, as it is possible to obtain strong and light connections, capable of resisting corrosion. There are several factors that affect the behavior of an adhesive joint. Thus, there is a need to assess the impact of these main factors on the bond strength, such as the type of adhesive (brittle, ductile or transition of both) and the overlap length (L_0). On the other hand, scarf joints find application in high-responsibility structures, including composite structures, due to their high efficiency. In this case, one of the most relevant geometric parameters is the scarf angle (α).

The main objective of this dissertation is to carry out a study to estimate the mechanical behavior of scarf adhesive joints as a function of α and the type of adhesive. Thus, an experimental and numerical study of scarf joints was carried out using the Extended Finite Element Method (XFEM), in which different adhesives such as the Araldite® AV138, the Araldite® 2015 and the SikaForce® 7888 were applied. Aluminum (AW6082-T651) adherends were used in joints with different α , being subjected to a tensile load, in order to evaluate their performance and validate the applicability of the XFEM for the purposes of strength prediction. Therefore, the values obtained experimentally and numerically were compared for each of the adhesives and α in order to validate the XFEM numerical method for determining the mechanical behavior of adhesive joints.

The results obtained in the scope of this work allowed to clearly validate that the XFEM numerical method returns results very close to those obtained experimentally.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
JSS	Junta de sobreposição simples
MAXE	Deformação nominal máxima
MAXPE	Deformação principal máxima
MAXPS	Tensão principal máxima
MAXS	Tensão nominal máxima
MDC	Modelo de dano coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos eXtendido
MFLE	Mecânica da fratura linear elástica
QUADE	Critério quadrático de deformação
QUADS	Critério quadrático de tensão
VVCT	<i>Virtual crack closure technique</i>

Lista de Unidades

°	Grau
°C	Grau Celsius

g	Grama
----------	-------

J	Joule
----------	-------

mm	Milímetro
-----------	-----------

N	Newton
----------	--------

Pa	Pascal
-----------	--------

Lista de Símbolos

E	Módulo de Young
-----------------------	-----------------

G	Módulo de corte
-----------------------	-----------------

G_C	Taxa crítica de libertação de energia de deformação
-------------------------	---

G_I	Taxa de libertação de energia em modo I
-------------------------	---

G_{IC}	Tenacidade à tração
----------------------------	---------------------

G_{II}	Taxa de libertação de energia em modo II
----------------------------	--

G_{IIC}	Tenacidade ao corte
-----------------------------	---------------------

L_0	Comprimento de sobreposição
-------------------------	-----------------------------

L_t	Comprimento do provete
-------------------------	------------------------

P	Força/Carga aplicada
-----------------------	----------------------

$P_{máx}$	Força/Carga máxima aplicada
-----------------------------	-----------------------------

$P_{méd}$	Força/Carga média aplicada
-----------------------------	----------------------------

t_a	Espessura da camada adesiva
-------------------------	-----------------------------

t_n	Tensão coesiva normal
-------------------------	-----------------------

t_n	Tensão coesiva normal
-------------------------	-----------------------

t_n^0	Tensão coesiva máxima
---------------------------	-----------------------

t_p	Espessura do substrato
t_s	Tensão coesiva ao corte
t_s^0	Tensão de corte máxima
U	Energia de rotura
α	Ângulo de sobreposição
δ	Deslocamento
ε	Deformação
ε_f	Deformação de rotura
$\varepsilon_{máx}$	Deformação máxima
ε_n	Deformação normal
ε_s	Deformação de corte
γ_f	Deformação de rotura ao corte
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão normal
σ_f	Tensão de rotura à tração
$\sigma_{máx}$	Tensão máxima
σ_y	Tensão de cedência à tração
τ_f	Tensão de rotura ao corte
$\tau_{méd}$	Tensão de corte média
τ_y	Tensão de cedência ao corte
τ, τ_{xy}	Tensão de corte

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Junta adesiva.	7
Figura 2 - Materiais utilizados na construção da cauda da aeronave Boeing 777 [2].	8
Figura 3 - Utilização de ligações adesivas na aeronave FOKKER F27-FRIENDSHIP [3].	8
Figura 4 - Esforço de corte numa junta adesiva [4].	9
Figura 5 - Esforço de arrancamento numa junta adesiva [4].	9
Figura 6 - Esforço de clivagem numa junta adesiva [4].	10
Figura 7 - Esforço de tração numa junta adesiva [4].	10
Figura 8 - Esforço de compressão numa junta adesiva [4].	10
Figura 9 - Rotura coesiva [4].	11
Figura 10 - Rotura adesiva [4].	11
Figura 11 - Rotura mista [4].	11
Figura 12 - Rotura do substrato [4].	11
Figura 13 - Exemplo de tipos de junta mais utilizados [5].	12
Figura 14 - Exemplo de juntas topo a topo [2].	12
Figura 15 - Exemplo de juntas de sobreposição [2].	13
Figura 16 - Exemplo de juntas de tira [2].	13
Figura 17 - Exemplo de juntas de reforço ao arrancamento [2].	14
Figura 18 - Exemplo de juntas de reforço à clivagem [2].	14
Figura 19 - Exemplo de juntas cilíndricas: a) tubulares e b) de varão [2].	14
Figura 20 - Exemplo de juntas em T [2].	15
Figura 21 - Exemplo de juntas de canto [2].	15
Figura 22 – 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 [21]).	22
Figura 23 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [37].	25
Figura 24 - Geometria típica utilizada em ensaios de compressão de juntas adesivas de chanfro interior (dimensões em mm) [38].	26

Figura 25 - Resultados experimentais para diferentes α [38].	26
Figura 26 - Geometria e dimensões características das reparações de chanfro interior com configuração C1(a), C2 (b) e C3 (c) [39].	27
Figura 27 – Comparação entre valores experimentais e numéricos de $P_{m\acute{a}x}$ em função de α [39].	27
Figura 28 - Resultados experimentais e numéricos para o começo de microfissuras (F_{iw}) e rotura total (F_u) em a) junta de chanfro interior e b) chanfro interior dupla [40].	28
Figura 29 - Geometria da junta de reparação com chanfro interior [41].	29
Figura 30 - Força máxima em função do ângulo da junta de chanfro interior [41].	29
Figura 31 - Curvas experimentais, analíticas e numéricas de P_m - α considerando o modelo triangular misto e modelos independentes triangular, trapezoidal e linear-exponencial para o Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e SikaForce® 7752 (c) [42].	30
Figura 32– Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio Al 6082-T651 [43].	34
Figura 33 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Araldite® AV138 [45].	34
Figura 34 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Araldite® 2015 [47].	36
Figura 35 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de SikaForce® 7752.	37
Figura 36 – Caracterização de uma junta de chanfro interior.	38
Figura 37 – Maquinação de junta de chanfro interior de 3,43°.	39
Figura 38 – Configuração utilizada para colagem das juntas.	39
Figura 39 – Grampo de fixação.	40
Figura 40 – Grampos para garantir fixação da junta durante a cura.	40
Figura 41 - Máquina de ensaio de tração Shimadzu AG-X.	41
Figura 42 - Curvas P - δ , obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138 e $\alpha=45^0$.	41
Figura 43 - Curvas P - δ , obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015 e $\alpha=10^0$.	42
Figura 44 - Curvas P - δ , obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752 e $\alpha=3,43^0$.	42
Figura 45 – Modos de rotura das juntas de chanfro interior para o SikaForce® 7752 e $\alpha=3,43^0$.	43
Figura 46 - Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ e desvio padrão em função de α para os diferentes adesivos em junta de chanfro interior.	44
Figura 47 - Junta de chanfro interior a 3,43°.	45
Figura 48 - Junta de chanfro interior a 10°.	45
Figura 49 - Junta de chanfro interior a 15°.	45
Figura 50 - Junta de chanfro interior a 20°.	45

Figura 51 - Junta de chanfro interior a 30°	46
Figura 52 - Junta de chanfro interior a 45°	46
Figura 53 - Propriedades utilizadas para o adesivo Araldite® 2015.	46
Figura 54 - Propriedades utilizadas na evolução de dano para o adesivo Araldite® 2015.	47
Figura 55 - Atribuição de secção sólida para a modelação dos adesivos e aderente.....	47
Figura 56 – Detalhe da malha para junta de chanfro interior a 45°	48
Figura 57 – Propagação do dano no MEFX usando o conceito de nós fantasmas antes (a) e depois (b) da repartição de elementos fraturados em subelementos [37].	49
Figura 58 - Comparação da tensão normalizada de arrancamento entre adesivos, para 3,43°	53
Figura 59 - Comparação da tensão normalizada de arrancamento entre adesivos, para 45°	53
Figura 60 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® AV138.....	54
Figura 61 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® 2015.	54
Figura 62 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos, para o adesivo SikaForce® 7752.	55
Figura 63 - Comparação da tensão normalizada de corte entre adesivos, para 3,43°	56
Figura 64 - Comparação da tensão normalizada de corte entre adesivos, para 45°	56
Figura 65 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® AV138.	57
Figura 66 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® 2015.	57
Figura 67 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos, para o adesivo SikaForce® 7752.	58
Figura 68 – Curvas P - δ obtidas numericamente com o critério QUADS para junta <i>scarf</i> unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45°	59
Figura 69 - Curvas P - δ obtidas numericamente com o critério MAXS para junta <i>scarf</i> unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45°	60
Figura 70 - Curvas P - δ obtidas numericamente com o critério MAXPS para junta <i>scarf</i> unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45°	60
Figura 71 - Curvas P - δ obtidas numericamente com o critério QUADE para junta <i>scarf</i> unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45°	61
Figura 72 - Curvas P - δ obtidas numericamente com o critério MAXE para junta <i>scarf</i> unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45°	61

Figura 73 - Curvas P - δ obtidas numericamente com o critério MAXPE para junta <i>scarf</i> unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45° .	62
Figura 74 – Variação de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente com os critérios de iniciação QUADS e MAXS e experimentalmente para juntas <i>scarf</i> unidas com o adesivo Araldite® AV138 em função de α .	62
Figura 75 - Variação de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente com os critérios de iniciação QUADS e MAXS e experimentalmente para juntas <i>scarf</i> unidas com o adesivo Araldite® AV138 em função de α .	63
Figura 76 - Variação de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente com os critérios de iniciação QUADS e MAXS e experimentalmente para juntas <i>scarf</i> unidas com o adesivo SikaForce® 7752 em função de α .	63
Figura 77 – Variação de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente e experimentalmente para juntas <i>scarf</i> unidas com o adesivo Araldite® AV138 em função de α .	64
Figura 78 - Variação de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente e experimentalmente para juntas <i>scarf</i> unidas com o adesivo Araldite® 2015 em função de α .	65
Figura 79 - Variação de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente e experimentalmente para juntas <i>scarf</i> unidas com o adesivo SikaForce® 7752 em função de α .	65
Figura 80 - Variação de U para os diferentes critérios de iniciação em função de α para juntas unidas com o adesivo Araldite® AV138 simuladas numericamente.	66
Figura 81 - Variação de U para os diferentes critérios de iniciação em função de α para juntas unidas com o adesivo Araldite® 2015 simuladas numericamente.	67
Figura 82 – Variação de U para os diferentes critérios de iniciação em função de α para juntas unidas com o adesivo SikaForce® 7752 simuladas numericamente.	67
Figura 83 – Exemplo dos parâmetros utilizados para a lei triangular com <i>power law</i> 1 e exponencial com <i>power law</i> 2.	68
Figura 84 - Curvas P - δ obtidas numericamente com a lei triangular e <i>power law</i> 0,5 para junta <i>scarf</i> unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45° .	68
Figura 85 - Curvas P - δ obtidas numericamente com a lei triangular e <i>power law</i> 1 para junta <i>scarf</i> unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45° .	69
Figura 86 - Curvas P - δ obtidas numericamente com a lei triangular e <i>power law</i> 2 para junta <i>scarf</i> unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45° .	69
Figura 87 - Curvas P - δ obtidas numericamente com a lei exponencial e <i>power law</i> 0,5 para junta <i>scarf</i> unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45° .	70
Figura 88 - Curvas P - δ obtidas numericamente com a lei exponencial e <i>power law</i> 1 para junta <i>scarf</i> unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45° .	70
Figura 89 - Curvas P - δ obtidas numericamente com a lei exponencial e <i>power law</i> 2 para junta <i>scarf</i> unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45° .	71

Figura 90 - Variação de $P_{máx}$ experimentais e obtidos numericamente com a lei de propagação triangular com $power\ law=0,5, 1$ e 2 para juntas <i>scarf</i> unidas com o adesivo Araldite® AV138 em função de α	71
Figura 91 - Variação de $P_{máx}$ experimentais e obtidos numericamente com a lei de propagação exponencial com $power\ law=0,5, 1$ e 2 para juntas <i>scarf</i> unidas com o adesivo Araldite® AV138 em função de α	72
Figura 92 – Variação de $P_{máx}$ experimentais e obtidos numericamente com a lei de propagação triangular com $power\ law=0,5, 1$ e 2 para juntas <i>scarf</i> unidas com o adesivo Araldite® 2015 em função de α	72
Figura 93 – Variação de $P_{máx}$ experimentais e obtidos numericamente com a lei de propagação exponencial com $power\ law=0,5, 1$ e 2 para juntas <i>scarf</i> unidas com o adesivo Araldite® 2015 em função de α	73
Figura 94 - Variação de $P_{máx}$ experimentais e obtidos numericamente com a lei de propagação triangular com $power\ law=0,5, 1$ e 2 para juntas <i>scarf</i> unidas com o adesivo SikaForce® 7752 em função de α	73
Figura 95 - Variação de $P_{máx}$ experimentais e obtidos numericamente com a lei de propagação exponencial com $power\ law=0,5, 1$ e 2 para juntas <i>scarf</i> unidas com o adesivo SikaForce® 7752 em função de α	74
Figura 96 - Variação de U obtida numericamente utilizando a lei de propagação triangular com diferentes valores de $power\ law$ em função de α para juntas unidas com o adesivo Araldite® AV138.	74
Figura 97 - Variação de U obtida numericamente utilizando a lei de propagação exponencial com diferentes valores de $power\ law$ em função de α para juntas unidas com o adesivo Araldite® AV138.	75
Figura 98 - Variação de U obtida numericamente utilizando a lei de propagação triangular com diferentes valores de $power\ law$ em função de α para juntas unidas com o adesivo Araldite® 2015.	75
Figura 99 - Variação de U obtida numericamente utilizando a lei de propagação exponencial com diferentes valores de $power\ law$ em função de α para juntas unidas com o adesivo Araldite® 2015.	76
Figura 100 - Variação de U obtida numericamente utilizando a lei de propagação triangular com diferentes valores de $power\ law$ em função de α para juntas unidas com o adesivo SikaForce® 7752.	76
Figura 101 - Variação de U obtida numericamente utilizando a lei de propagação exponencial com diferentes valores de $power\ law$ em função de α para juntas unidas com o adesivo SikaForce® 7752.	77
Figura 102 - Comparação entre os valores de $P_{máx}$ obtidos experimentalmente com os obtidos numericamente com o MEFX e MDC para o adesivo Araldite® AV138 em função de α	78

-
- Figura 103 - Comparação entre os valores de $P_{máx}$ obtidos experimentalmente com os obtidos numericamente com o MEFX e MDC para o adesivo Araldite® 2015 em função de α 78
- Figura 104 - Comparação entre os valores de $P_{máx}$ obtidos experimentalmente com os obtidos numericamente com o MEFX e MDC para o adesivo SikaForce® 7752 em função de α 79
- Figura 105 – Comparação dos valores de $P_{máx}$ em função de α obtidos numericamente com MEFX e experimentalmente para os três adesivos..... 80

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de vários adesivos estruturais	16
Tabela 2 - Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [45].....	35
Tabela 3 - Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [47, 48].	36
Tabela 4 - Propriedades do adesivo SikaForce® 7752 [49].	37
Tabela 5 -Dimensões de junta de chanfro interior.....	38
Tabela 6 - Valores médios de $P_{\text{máx méd}}$ [N] para as juntas de chanfro interior e para os diferentes adesivos.	43
Tabela 7 - Parâmetros utilizados na análise de MEFX para o adesivo Araldite® AV138.....	51
Tabela 8 - Parâmetros utilizados na análise de MEFX para o adesivo Araldite® 2015.	51
Tabela 9 - Parâmetros utilizados na análise do MEFX para o adesivo Sikaforce® 7752.	52

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização do trabalho	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	7
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	8
2.1.4	Configurações possíveis de junta	11
2.1.5	Adesivos estruturais	15
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	19
2.2.1	Modelos analíticos	19
2.2.2	Modelos numéricos.....	20
2.2.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	20
2.2.2.2	Mecânica da fratura.....	20
2.2.2.3	Modelos de dano coesivo	21
2.2.2.4	Mecânica do dano.....	22
2.2.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido.....	24
2.3	Juntas adesivas de chanfro interior	25
2.3.1	Avaliação experimental do comportamento.....	25
2.3.2	Previsão numérica da resistência	28
3	DESENVOLVIMENTO	33

3.1	Trabalho experimental.....	33
3.1.1	Materiais utilizados	33
3.1.2	Aderentes	33
3.1.3	Adesivos	34
3.1.3.1	Araldite® AV138.....	34
3.1.3.2	Araldite® 2015	35
3.1.3.3	SikaForce® 7752.....	37
3.1.4	Geometria das juntas	38
3.1.5	Processo de fabrico	38
3.1.6	Resultados obtidos	40
3.1.6.1	Curvas P- δ	41
3.1.6.2	Modos de rotura.....	42
3.1.6.3	Resistência das juntas.....	43
3.1.7	Análise de resultados	44
3.2	Trabalho numérico.....	45
3.2.1	Condições da análise numérica	45
3.2.2	Modelo de dano utilizado	48
3.2.3	Determinação das propriedades de dano	50
3.2.3.1	Araldite® AV138.....	50
3.2.3.2	Araldite® 2015	51
3.2.3.3	SikaForce® 7752.....	51
3.2.4	Análise de tensões na junta.....	52
3.2.4.1	Tensões de arrancamento	52
3.2.4.2	Tensões de corte.....	55
3.2.5	Previsão do comportamento.....	58
3.2.5.1	Estudo do efeito do critério de iniciação	59
3.2.5.2	Estudo do efeito da lei de propagação	67
3.2.5.3	Comparação dos resultados obtidos com modelos de dano coesivo.....	77
3.2.6	Análise de resultados	79

4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	83
5	REFERÊNCIAS.....	87

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização do trabalho

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Juntas adesivas constituem uma tecnologia de ligação que utiliza adesivos como alternativa às técnicas convencionais (soldadura e fixações mecânicas) de modo a mitigar algumas das desvantagens destas. Atualmente existem inúmeras aplicações práticas de juntas adesivas em vários setores da indústria (automóvel, aeronáutica, calçado, entre outros).

Dada a elevada importância das ligações adesivas, é cada vez mais necessária a existência de ferramentas que facilitem a previsão do comportamento das juntas, em função das suas características e aplicação, com alta precisão. Atualmente, a indústria dá preferência ao Método de Elementos Finitos (MEF), uma vez que permite esta uma triagem das juntas mais adequadas para as aplicações pretendidas. Contudo, existem novas metodologias que pretendem melhorar a precisão do MEF, nomeadamente o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX). O MEFX, comparativamente ao MEF, permite ainda a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, e é baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e na mecânica da fratura para a avaliação da rotura.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a utilização do método MEFX em juntas de chanfro interior solicitadas à tração, no sentido de validar a sua utilização para previsão com precisão da resistência das juntas em estudo. Assim, foram selecionados para efeito deste estudo os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 com diferentes características, e diferentes valores de α (3,43°, 10°, 15°, 20°, 30° e 45°) para o chanfro interior.

No sentido de avaliar a precisão desta metodologia os resultados obtidos pelo MEFX foram comparados com os resultados experimentais obtidos por Barbosa [1]. Na análise numérica estudaram-se as distribuições das tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) na camada adesiva, permitindo analisar o comportamento dos adesivos nas diversas condições. Foi também simulada a previsão da resistência das juntas com os três adesivos utilizando diferentes critérios de iniciação de dano, diferentes leis de

propagação de dano e ainda diferentes expoentes para o critério energético de propagação de dano.

Pretende-se assim estimar qual o critério de iniciação e lei de propagação de dano que permitem avaliar com maior precisão o desempenho das juntas adesivas e averiguar qual o adesivo mais adequado em função de α .

1.3 Organização do trabalho

O trabalho elaborado encontra-se repartido em quatro capítulos, sendo que no primeiro capítulo é realizada uma introdução ao tema abordado, seguida dos objetivos propostos e apresentação da organização do relatório.

No segundo capítulo é elaborada uma revisão bibliográfica do trabalho em estudo. Nesta, são abordados diversos aspetos relacionados com juntas adesivas e adesivos. São enumeradas vantagens e desvantagens, configurações, aplicações, modos de rotura e esforços nas ligações de juntas adesivas, bem como os diversos tipos de adesivos utilizados neste tipo de ligações. São ainda referenciados os principais métodos analíticos e numéricos utilizados na previsão de resistência de juntas adesivas, com ênfase no MEFX. Assim como uma avaliação do estado da arte.

O terceiro capítulo apresenta todos os aspetos relacionados com as componentes experimental e numérica deste trabalho. A primeira parte deste capítulo, o subcapítulo 3.1, é focado no trabalho experimental, e inclui a configuração, dimensões, materiais e respetivas propriedades, bem como o processo de fabrico das juntas adesivas utilizadas. São ainda apresentadas as curvas $P-\delta$, modos de rotura e resultados de resistência obtidos.

O subcapítulo 3.2 consiste no estudo numérico por MEFX, são apresentadas as condições de análise utilizadas no *software* Abaqus®, o método utilizado na previsão de resistência das juntas, os critérios de iniciação, as leis de propagação e expoentes para o critério energético. É também feita uma comparação com os resultados obtidos pelo MDC.

No quarto e último capítulo são apresentadas as 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

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Uma junta adesiva (Figura 1) é composta por um adesivo, primários (quando aplicável ou necessário), interfases e os substratos ou aderentes. De modo a proteger a superfície até que seja efetuada a aplicação do adesivo ou promover a adesão entre o mesmo e o substrato, o primário é a substância utilizada para esses fins. Designada como interfase, a região entre o aderente e o adesivo apresenta características físicas e químicas distintas das partes densas do aderente e adesivo. A natureza da interfase é crucial para determinar a qualidade e propriedades de uma ligação adesiva. Distinta da interfase, a interface, ou camada limite, trata-se do plano de contacto entre as superfícies de dois materiais. Contida na interfase, a interface não se limita necessariamente a uma só, podendo existir várias interfaces na mesma interfase. Aderente trata-se da designação que se dá ao substrato após terminado o processo de ligação, é o material que se pretende ligar.

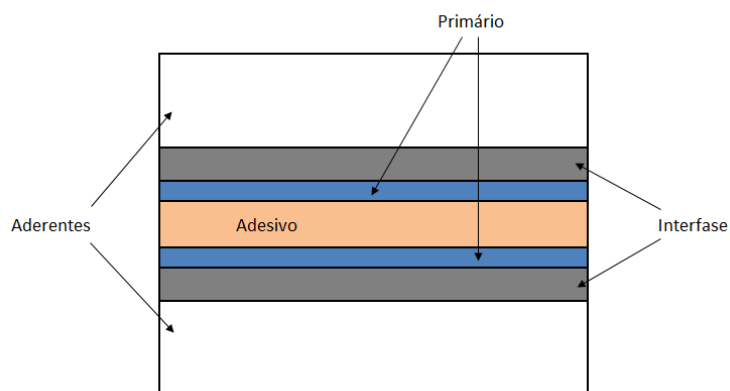


Figura 1 - Junta adesiva.

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Existem inúmeras aplicações para ligações adesivas, são utilizados em vários setores da indústria, desde a aeroespacial à do calçado. No setor aeroespacial e aeronáutico (Figura 2 e Figura 3) a sua utilização é de extrema importância, pois é possível obter ligações resistentes, leves e capazes de resistir à corrosão. No setor automóvel também se

utilizam ligações adesivas em conjunto com métodos de fixação mecânicos. A junção dos dois permite uma união resistente e duradoura, com uma melhor distribuição de tensões.

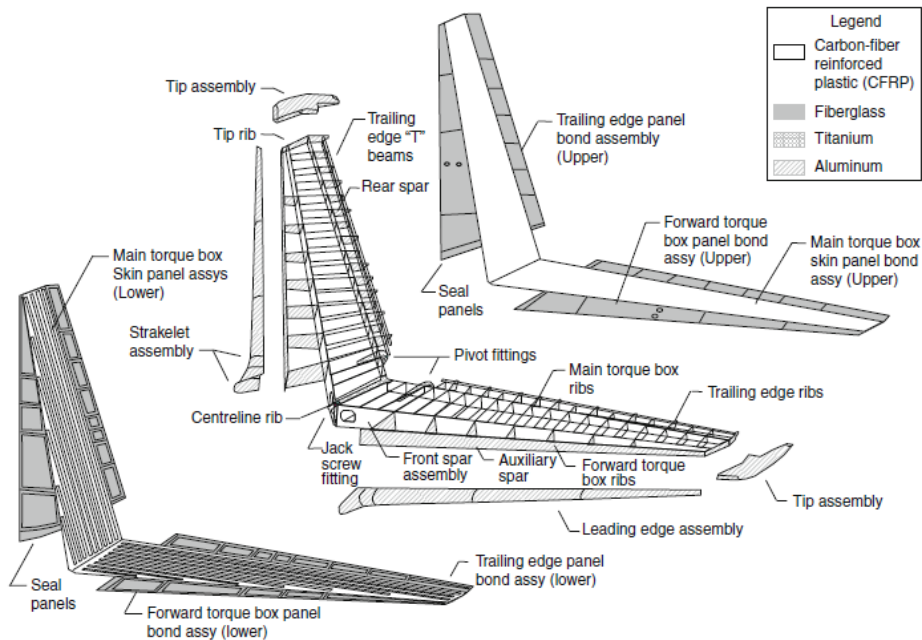


Figura 2 - Materiais utilizados na construção da cauda da aeronave Boeing 777 [2].

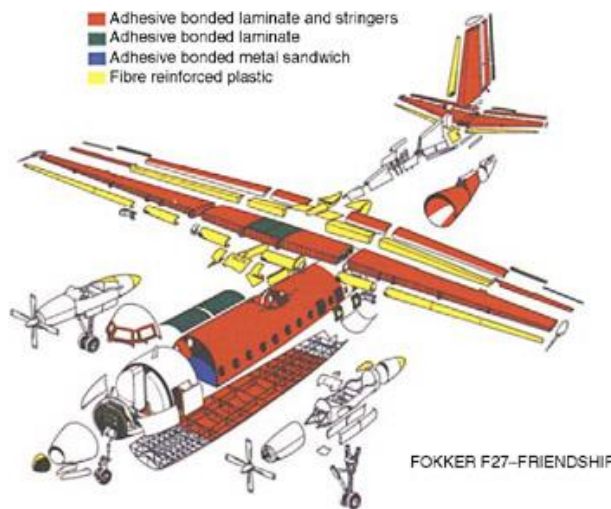


Figura 3 - Utilização de ligações adesivas na aeronave FOKKER F27-FRIENDSHIP [3].

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Sempre que é aplicada uma solicitação externa a elementos unidos através de ligações adesivas, estas ficam sujeitas a uma combinação de esforços que podem incluir corte, arrancamento, clivagem, tração e compressão.

Quando sujeita ao corte, as forças são paralelas ao plano de colagem, sendo este tipo de solicitação aquele ao qual os adesivos apresentam maior resistência. Este tipo de esforços é responsável por um escorregamento entre os substratos. A resistência acrescida deve-se ao facto que toda a zona de ligação contribui para a resistência da junta. Contudo, esta distribuição não é uniforme, sendo as extremidades zonas onde ocorre uma maior concentração de tensões, isto deve-se a uma taxa de deformação local dos substratos de diferente valor desde a extremidade onde esta aplicada a força até a extremidade da ligação. Assim sendo é possível concluir que a largura de sobreposição é mais importante que o seu comprimento.

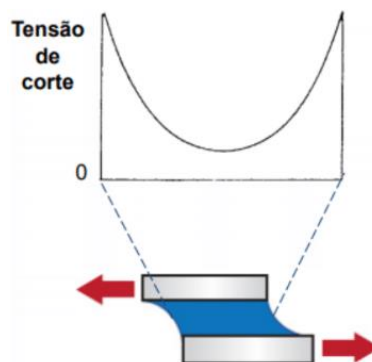


Figura 4 - Esforço de corte numa junta adesiva [4].

O arrancamento (Figura 5) ocorre quando atua uma força na extremidade de um substrato como se pretendesse a sua descolagem ou separação. Em conjunto com o esforço de clivagem são os tipos de esforços mais prejudiciais para uma junta adesiva. Quanto maior rigidez apresentar um adesivo, pior a resistência ao arrancamento, devendo-se isto à sua fraca capacidade de sustentar grandes deformações.

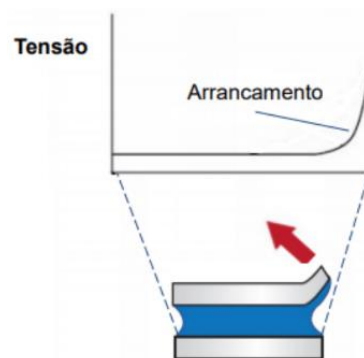


Figura 5 - Esforço de arrancamento numa junta adesiva [4].

A clivagem (Figura 6) é um tipo de esforço que ocorre quando as forças atuam nas extremidades dos dois componentes, como se pretendesse a sua descolagem ou separação. Tal como no esforço de arrancamento, quanto maior rigidez apresentar um dado adesivo, mais prejudicial será para a junta quando sujeita a este esforço.

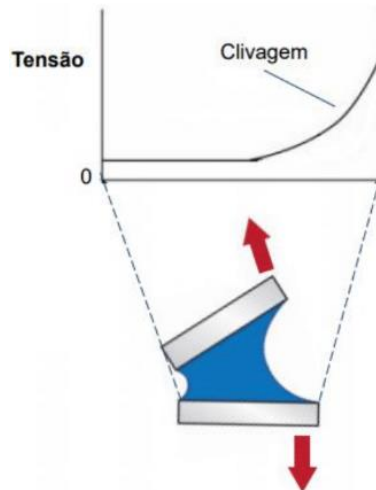


Figura 6 - Esforço de clivagem numa junta adesiva [4].

No caso de solicitações de tração (Figura 7) e compressão (Figura 8) as forças envolvidas são perpendiculares ao plano de colagem. Apesar de em teoria a distribuição das tensões normais serem uniformes na prática o mesmo não se verifica. Isto deve-se a desalinhamentos nas cargas aplicadas, que originam tensões de arrancamento ou clivagem. Uma solicitação pura à tração ou compressão, apenas pode ocorrer quando as tensões são uniformes em toda a junta, para que tal aconteça é necessário que os substratos sejam razoavelmente rígidos. Verifica-se rotura em esforços à tração quando a distribuição de tensões é não uniforme, no caso de juntas em esforço de compressão dificilmente ocorre rotura.

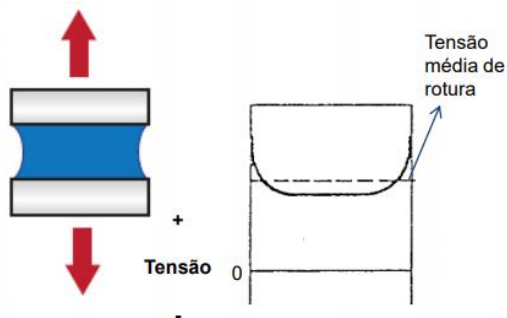


Figura 7 - Esforço de tração numa junta adesiva [4].

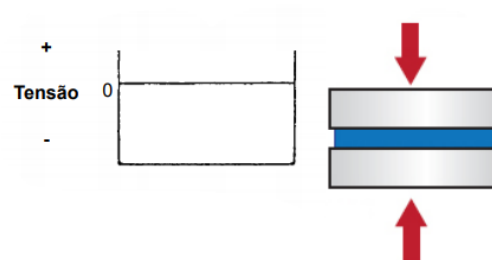


Figura 8 - Esforço de compressão numa junta adesiva [4].

A rotura ocorre quando os esforços sofridos pelas juntas superam a sua resistência. Assim, é necessário assegurar que o adesivo não é o elemento mais fraco na ligação, garantindo que esta seja eficiente durante as transmissões de cargas entre os dois componentes ligados, mantendo a sua integridade estrutural. De um modo geral, distinguem-se quatro modos de rotura diferentes: rotura coesiva, rotura adesiva, rotura mista e rotura do substrato.

Uma rotura coesiva (Figura 9) ocorre quando o adesivo rompe no seu interior. Este tipo de rotura deve-se à superior resistência da ligação entre substrato e adesivo, face à resistência interna do adesivo em si. Assim, quando ocorre rotura coesiva a superfície da junta adesiva dos substratos permanece repleta de adesivo.

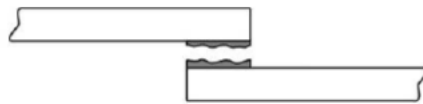


Figura 9 - Rotura coesiva [4].

Verifica-se uma rotura adesiva (Figura 10) quando se observa um dos substratos isento de adesivo e o par do mesmo repleto de adesivo. Este tipo de rotura ocorre na interface entre substrato e adesivo e deve-se usualmente à má preparação das superfícies.



Figura 10 - Rotura adesiva [4].

Aquando da ocorrência de uma rotura mista (Figura 11) partes da junta remanescem com sinais de rotura adesiva e outras com sinais de rotura coesiva. Este modo de rotura surge devido a uma limpeza ineficaz de uma dada região das superfícies aligar.



Figura 11 - Rotura mista [4].

A rotura do substrato (Figura 12) trata-se do modo de rotura pelo qual as juntas adesivas devem falhar. Indica que a junta adesiva resistiu a todos os esforços solicitados, sendo que nenhum dos mesmos provocaram a falha. Não obstante que em casos de substratos metálicos com espessura considerável a rotura dificilmente ocorrerá no mesmo.



Figura 12 - Rotura do substrato [4].

2.1.4 Configurações possíveis de junta

Existem variadas configurações de junta para ligações adesivas. Esta grande variedade deve-se à necessidade de combater os diferentes obstáculos impostos pelos esforços que originam a rotura destas ligações. Entre os vários tipos de juntas encontram-se indicados na Figura 13 os mais comuns.

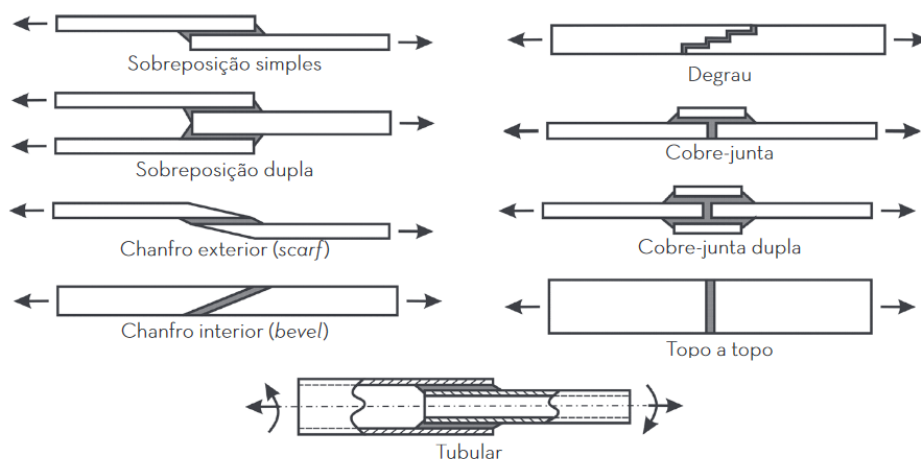


Figura 13 - Exemplo de tipos de junta mais utilizados [5].

As juntas topo a topo são um dos tipos de junta mais fácil de conceber, no entanto são muito pouco resistentes à flexão. Esta fraqueza deve-se à ocorrência de esforços de clivagem na junta, levando assim a uma rotura prematura da junta. Contudo, as modificações da junta simples topo a topo apresentadas na Figura 14, aquando da utilização de substratos espessos, reduzem os esforços de clivagem, aumentando consequentemente a resistência da junta.

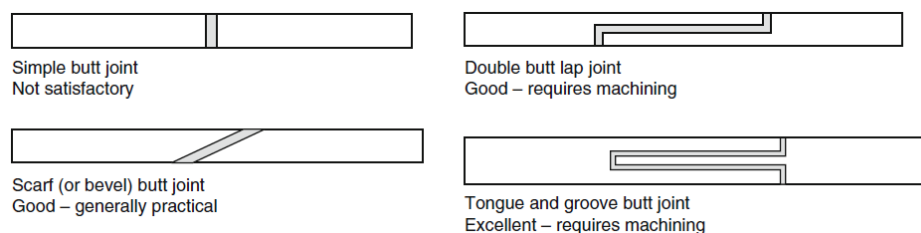


Figura 14 - Exemplo de juntas topo a topo [2].

Também um dos tipos de juntas mais comuns e fáceis de fabricar, as juntas de sobreposição são primariamente utilizadas para resistir a esforços de corte. Apesar disto, as forças envolvidas não são colineares, dando origem a concentrações de tensões nas extremidades da sobreposição. Torna-se então necessário diminuir este efeito através da utilização de juntas como as indicadas na Figura 15.

Juntas de tira são primariamente utilizadas para reparações de fuselagem. No caso de juntas de tira simples, esta, tal como a de sobreposição simples, está sujeita a esforços de arrancamento derivados da não colinearidade das forças envolvidas. Já no caso de juntas de tira dupla, estas apresentam uma maior resistência à flexão sendo consequentemente superiores.

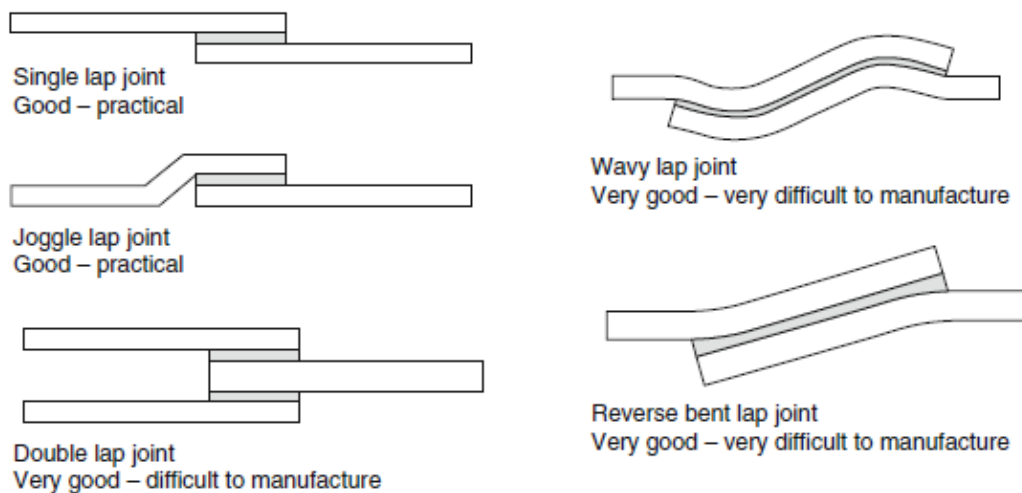


Figura 15 - Exemplo de juntas de sobreposição [2].

As juntas de tira dupla *recessed* são das mais eficientes entre as apresentadas na Figura 16, em contrapartida necessitam de acesso aos dois lados da estrutura e pode ser necessário a maquinação dos dois substratos.

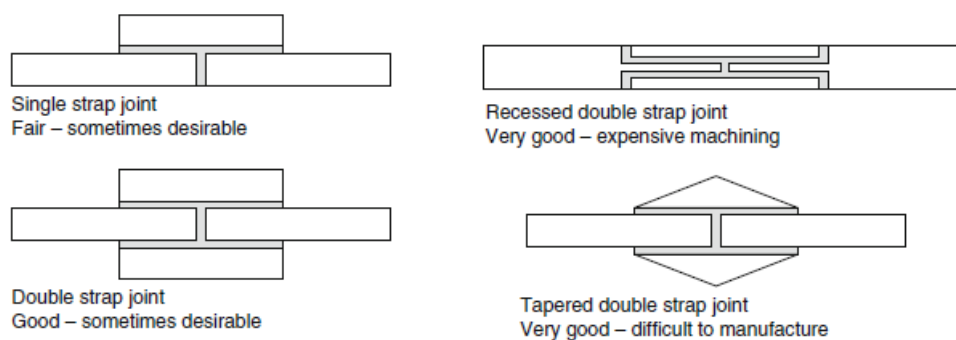


Figura 16 - Exemplo de juntas de tira [2].

Aquando da utilização de substratos de pouca espessura unidos a componentes espessos, a sollicitação dos mesmos origina usualmente esforços de arrancamento. De modo a contornar e melhorar a resistência nestes casos, encontram-se na Figura 17 soluções possíveis de juntas adesivas. De modo a aumentar a rigidez de aderentes finos é usual fazer a colagem de reforços nos mesmos. Contudo é possível que a colagem destes dê origem a esforços de clivagem. Constam na Figura 18 possíveis soluções para que se reduza a clivagem. Com o aumento da flexibilidade do rebordo, área colada e rigidez da base é possível melhorar a resistência à flexão.

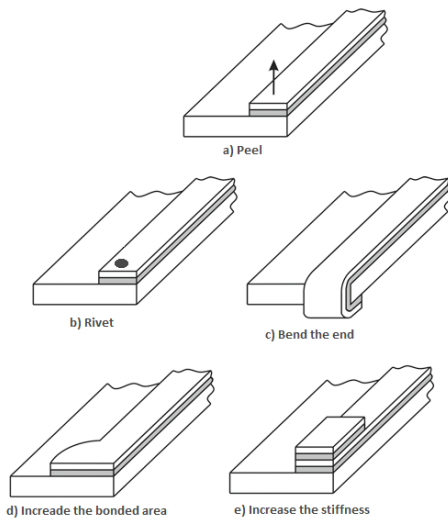


Figura 17 - Exemplo de juntas de reforço ao arrancamento [2].

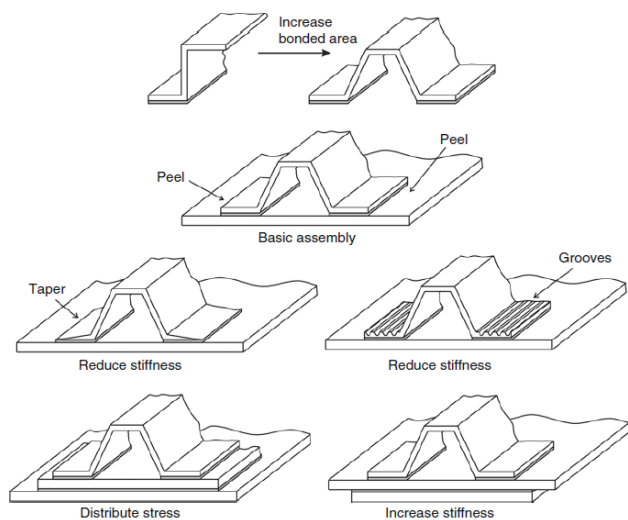


Figura 18 - Exemplo de juntas de reforço à clivagem [2].

As juntas cilíndricas (Figura 19) são normalmente utilizadas para unir tubos e varões. Estas juntas são mais benéficas que as juntas topo a topo dado que é possível obter uma área de sobreposição muito superior e diminuição do esforço de arrancamento. Em contrapartida este tipo de junta torna-se consideravelmente dispendioso face à necessidade de maquinaria na grande maioria dos casos.

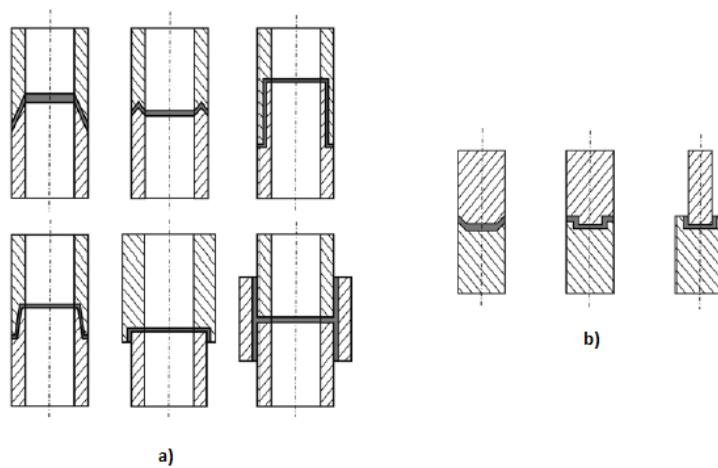


Figura 19 - Exemplo de juntas cilíndricas: a) tubulares e b) de varão [2].

Caraterizadas pela orientação perpendicular dos dois elementos unidos ($\theta=90^\circ$), as juntas em T (Figura 20) têm como objetivo principal maximizar as solicitações ao corte e minimizar as forças de arrancamento no adesivo. A carga pode ser aplicada normalmente ou transversalmente.

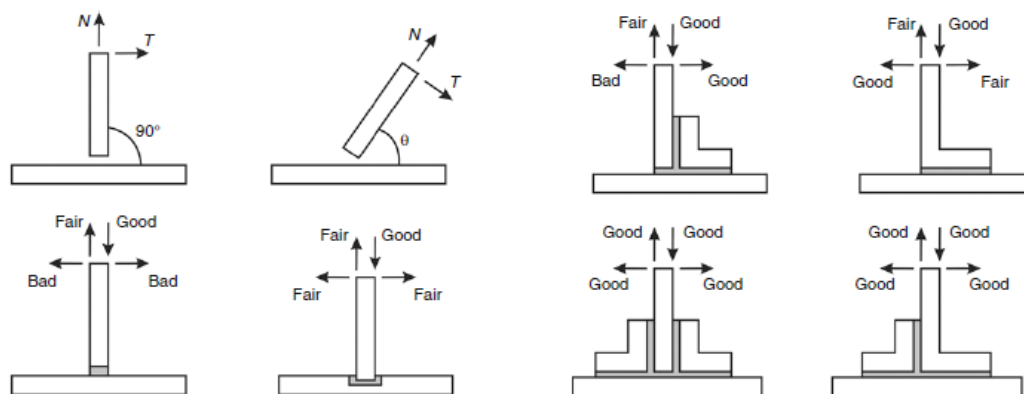


Figura 20 - Exemplo de juntas em T [2].

Semelhante e com o mesmo intuito que as juntas em T, as configurações de juntas de canto indicadas Figura 21 preveem soluções para diminuição do efeito de arrancamento.

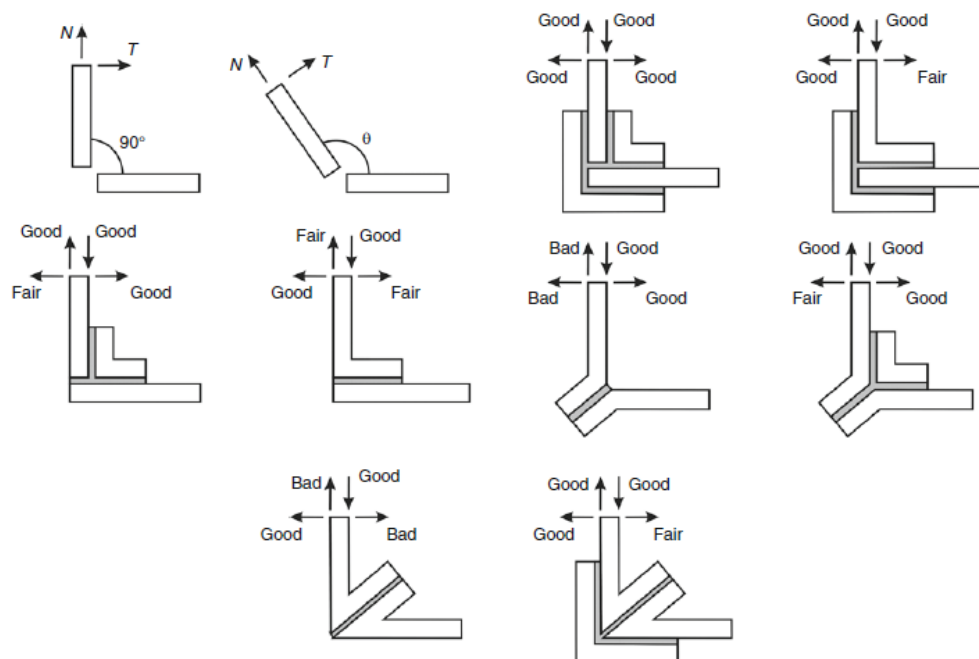


Figura 21 - Exemplo de juntas de canto [2].

2.1.5 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais são normalmente fabricados utilizando como base resinas termoendurecíveis modificadas por resinas termoplásticas ou por elastômeros. Necessitam de reticulação química por meio de adição de endurecedor e/ou aumento de temperatura, de modo a suportarem transmissões de esforços de grandeza considerável. A Tabela 1 sumariza algumas propriedades de vários adesivos estruturais.

Tabela 1 - Propriedades de vários adesivos estruturais.

Tipo	Apresentação	Temp. máxima de utilização em contínuo [°C]	Resistência				
			Corte [MPa]	Fluência	Arrancamento	Choques	Solventes
Fenólico-Vinílico	Líquido monocomponente	100 a 130	17 a 35	Boa	Média	Boa	Medíocre
	Líquido + pó						
	Filme						
Fenólico-Nitrílico	Líquido monocomponente	140 a 170	15 a 30	Boa	Média	Boa	Boa
	Filme						
Anaeróbicos (acrílicos)	Líquido monocomponente	120 a 150	10 a 40	Média	Boa	Boa	Média
Cianoacrilato	Líquido monocomponente	80	80	Má	Medíocre	Má	Má
Poliuretano	Líquido de dois componentes	90	90	Boa	Média	Boa	Boa
Poliimida	Filme	250 a 300	10 a 15	Má	Boa	Medíocre	Boa
Epóxido	Diversa	80 a 150	15 a 45	Medíocre	Boa	Má	Boa
Epóxido-Poliamida	Líquido de dois componentes	80	15 a 25	Boa	Medíocre	Boa	Medíocre
Epóxido-Polisulfido	Líquido de dois componentes	80	15 a 25	Boa	Medíocre	Boa	Boa
Epóxido-Fenólico	Líquido monocomponente	200 a 250	20	Medíocre	Boa	Má	Boa
	Filme						
Epóxido-Nitrilo	Filme	100 a 120	10 a 46	Média	Boa	Boa	Boa

- Adesivos Fenólicos

Inicialmente, este tipo de adesivo era utilizado para a colagem madeira-madeira, passando a ser também utilizado em colagens metal-metal e madeira-metal, visto que apresenta boa resistência à temperatura, durabilidade, resistência a fungos e a água a altas temperaturas. Uma vez que apresenta boa estabilidade dimensional também é utilizado em calços de travão, lixas e moldes. Dado que as suas características de adesão ficam aquém, quando se refere à sua resistência a vibrações e choques, existem adesivos fenólicos híbridos que combinam a resina fenólica com elastómeros ou resinas vinílicas.

Para aplicações em metais, os adesivos fenólico-vinílicos, são os adesivos com maior sucesso. Isto deve-se à sua muito elevada resistência ao corte e arrancamento, como também à sua boa resistência à fadiga. São limitados pela sua temperatura máxima de funcionamento, visto que aos 95°C os constituintes termoplásticos dos mesmos amaciam.

Apresentando propriedades mecânicas ligeiramente inferiores às dos adesivos fenólico-vinílicos, os adesivos fenólico-nitrilo apresentam, no entanto, uma temperatura máxima de funcionamento superior (160°C) e uma elevada resistência à degradação por agentes químicos. Contudo o seu processo de cura requer pressões até 1,4 MPa e temperaturas de 150-260°C.

- Adesivos Acrílicos

Dentro dos adesivos acrílicos são principalmente utilizados os adesivos anaeróbicos e os adesivos cianoacrilatos.

Os adesivos anaeróbicos obtêm o seu nome do facto do processo de cura iniciar aquando da ausência de ar na resina e são adesivos normalmente apresentados sob a forma líquida, podendo ser curados à temperatura ambiente. No entanto, a cura pode ser acelerada com a utilização de um primário e/ou aumento da temperatura. A sua aplicação é muito versátil, visto que é capaz de unir inúmeros materiais diferentes em colagens dissimilares. São utilizados como adesivos estruturais, nomeadamente em juntas planas, conjuntos roscados e superfícies cilíndricas.

Os adesivos cianoacrilatos, que são bastante conhecidos como “supercola”, são também apresentados em estado líquido e são igualmente capazes de aderir a uma grande variedade de superfícies. Apresentam elevada resistência ao corte, mas são sensíveis a choques, vibrações, humidade, variações de temperatura e agentes químicos. A cura ocorre rapidamente pela presença de grupos aniónicos, sendo promovida pela presença de humidade no meio envolvente.

- Adesivos de Poliuretano

Distinguem-se pelo bom comportamento a baixas temperaturas e pelas boas características de adesão, apesar de apresentarem resistências ao corte e tração

inferiores aos restantes adesivos. Dentro dos adesivos de borracha sintética podem ser utilizados em aplicações estruturais dada a sua resistência ao corte que ronda os 20MPa. Curam à temperatura ambiente e são primariamente utilizados em aplicações que não necessitem de resistências a cargas altas, aplicações criogénicas e na indústria automóvel.

- Adesivos Poliimida

Quando comparados com os adesivos de poliuretano, os adesivos de poliimida apresentam resistência ao corte e à tração inferiores. Compensam, no entanto, com a sua elevada temperatura de serviço. Apresentam elevada dureza e são frágeis, sendo mais suscetíveis à quebra por vibrações e choques.

- Adesivos de Epóxido

Este tipo de adesivo apresenta uma a maior variedade de aplicações, isto deve-se à sua capacidade de aderência a variadas superfícies e a facilidade com que se pode alterar os mesmos, modificando as suas propriedades para que sejam mais prestáveis para uma dada aplicação. Possuem boa resistência a degradação química e boas propriedades mecânicas, sendo frequentemente utilizados na indústria automóvel e aeronáutica.

São comercializados sob duas formas, na forma de um componente ou então a mais comum de dois componentes. Os adesivos epóxidos de um só componente são compostos por resina e endurecedor num só formato, como líquido, gel, pó, pastilha, filme ou barra. Já os de dois componentes, no qual o endurecedor é posteriormente adicionado, estes surgem como líquidos ou gel.

O processo de cura dos adesivos de um só componente ocorre quando introduzido calor, enquanto para os de dois componentes esta pode ocorrer tanto à temperatura ambiente como a alta temperatura. Os que curam a alta temperatura apresentam melhor resistência ao corte e a fatores ambientais, tendo, no entanto, menor tenacidade e resistência ao arrancamento. Há que ter em conta que o processo de cura dos adesivos epóxidos é uma reação que liberta calor, sendo necessário controlar a mesma de modo a evitar o sobreaquecimento e consequentemente a combustão.

Como referido, os adesivos epóxidos podem ser modificados de modo a favorecer certas propriedades mecânicas. No caso de adição de resinas são obtidos, por exemplo, adesivos epóxido-fenólicos, epóxido-polisulfitos, epóxido-vinilos e epóxido-nylons. Quando se misturam elastómeros na resina de epóxido o mais utilizado trata-se do adesivo epóxido-nitrilo. São adições que favorecem a tenacidade e a resistência ao arrancamento do adesivo.

Os adesivos epóxido-fenólicos melhoram as propriedades base do adesivo, favorecem o mesmo com uma elevada estabilidade e resistência ao corte quando sujeitos a temperaturas elevadas e apresentam uma muito boa resistência aos efeitos ambientais.

Contudo, dada a sua elevada rigidez, estes são frágeis, apresentando baixa resistência ao impacto e arrancamento.

Com excelente resistência química e flexibilidade, os adesivos epóxico-polisulfetos, são primariamente utilizados quando necessário um adesivo com elevada capacidade de deformação ou para aplicações sujeitas a vibrações e choques.

Com o intuito de melhorar a resistência ao arrancamento e ao impacto são adicionados polímeros de vinilo à resina de epóxico, formando assim os adesivos epóxico-vinilos. Devido à baixa temperatura de transição vítrea das resinas de vinilo, a maior adição destas reduz a resistência a altas temperaturas do adesivo.

Comercialmente conhecidos como adesivos epóxico-nylon, os adesivos epóxico-poliamida têm como principal função melhorar a tenacidade e resistência à tração. São normalmente utilizados sob a forma de filmes e são dos mais indicados para aplicações onde a junta não está exposta a um meio ambiente severo.

- Adesivos poliaromáticos de alta temperatura

Graças à sua estrutura de anel fechado, estes polímeros aromáticos, quando polymerizados formam uma estrutura que se assemelha a uma escada. Com isto, antes da molécula romper na totalidade, é necessário quebrar pelo menos duas outras ligações o que proporciona a sua elevada resistência a altas temperaturas. Todavia é muito difícil de processar, elevando assim o seu custo de fabrico/aplicação, é também muito propício ao aparecimento de vazios e bolhas no adesivo e os solventes utilizados não só são agressivos como não é sempre possível removê-los na totalidade durante a cura.

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. Desta forma, é possível ultrapassar o paradigma das juntas adesivas sobredimensionadas que resultavam em estruturas mais dispendiosas e mais pesadas, devido à falta de modelos materiais precisos e de critérios de rotura adequados que se faziam notar há algumas décadas atrás. 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.

2.2.1 Modelos analíticos

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [6], 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 substratos de compósito ou de materiais diferentes.

2.2.2 Modelos numéricos

2.2.2.1 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 [6], 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. [7] 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 aspeto 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 comprimento de sobreposição (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 [8]. 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 [9], 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.

2.2.2.2 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 [5]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [10] 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 [11]. 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 [12] e por Rice [13] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, modo I (G_I) ou modo II (G_{II}), e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [14], 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 substratos, 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 solitação.

2.2.2.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de Modelos de Dano Coesivo (MDC) teve início com estudos de Barenblatt [15] e Dugdale [16], 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 caracterizar 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 [17].

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [18]. 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 22), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [19], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [20].

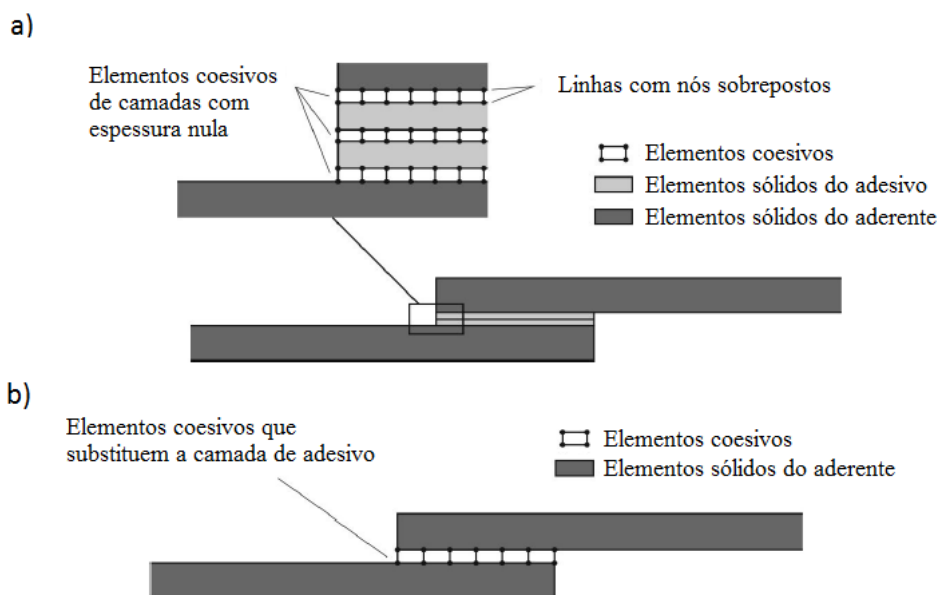


Figura 22 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [21]).

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos 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 [22]. Este modelo está implementado em *software*, 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 [23].

2.2.2.4 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 [24] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramshad et al. [25] 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 [17].

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 [26]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [27] ou do número de ciclos para análises de fadiga [28, 29]. 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 trajetos pré-definidos [30].

Hua et al. [31] 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. [32] usaram uma técnica da mecânica do dano em Junta de Sobreposição Simples (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 nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de módulo de Young (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.

2.2.2.5 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 discontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [33]. Belytschko e Black [34], 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 [35]. 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 que sofreram dano. 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 [36].

Campilho et al. [37] utilizaram o MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, coladas com um adesivo dúctil, onde se comparou resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 23). Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

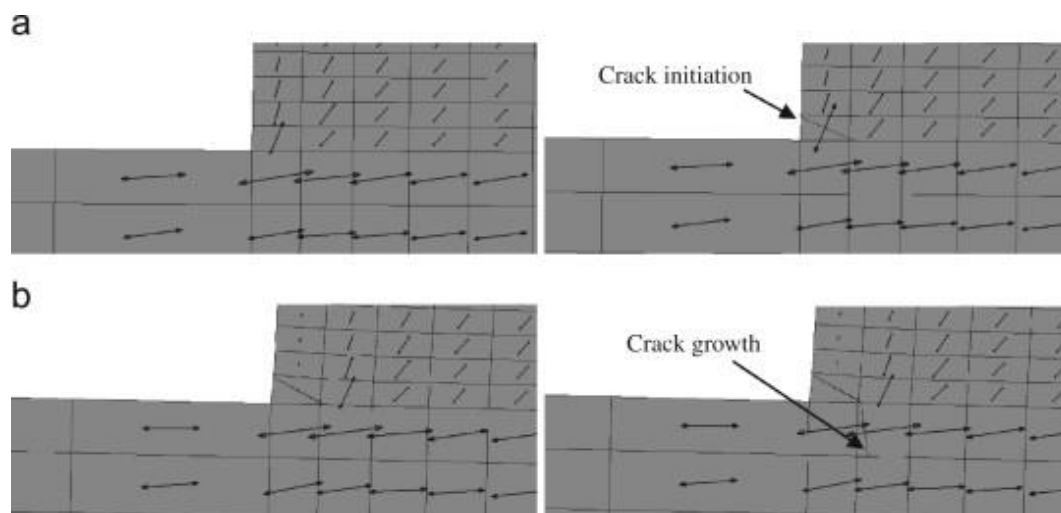


Figura 23 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [37].

2.3 Juntas adesivas de chanfro interior

As juntas adesivas de chanfro interior (*scarf*) são caracterizadas pelo facto de que a ligação dos aderentes é feita pelo intermédio de chanfros cujo ângulo com a perpendicular está compreendido entre 0° e 90° . Estas juntas são maioritariamente utilizadas em aplicações aeronáuticas e aeroespaciais, e servem tanto como meio de ligação estrutural como de reparação de estruturas danificadas em compósito.

2.3.1 Avaliação experimental do comportamento

Com o intuito de avaliar o modo de falha em juntas de chanfro interior e resistência à compressão uniaxial, Kumar et al. [38] realizaram um estudo experimental, no qual utilizaram substratos reforçados com laminados de fibra de carbono (Figura 24). Para que a transferência de carga fosse mais suave, foram coladas aos provetes abas de alumínio. Os modos de falha que observados foram classificados como microencurvadura predominantemente das fibras, ou rotura coesiva do adesivo também com microencurvadura. A rotura nas fibras ocorreu em juntas de chanfro interior cujo ângulo era inferior a 3° , enquanto em juntas nas quais o ângulo é superior a 3° ocorre a rotura coesiva.

Com a observação dos resultados experimentais verificou-se que as juntas de chanfro interior utilizadas neste estudo beneficiam de uma maior resistência à compressão uniaxial quanto menor for o ângulo da mesma (Figura 25).

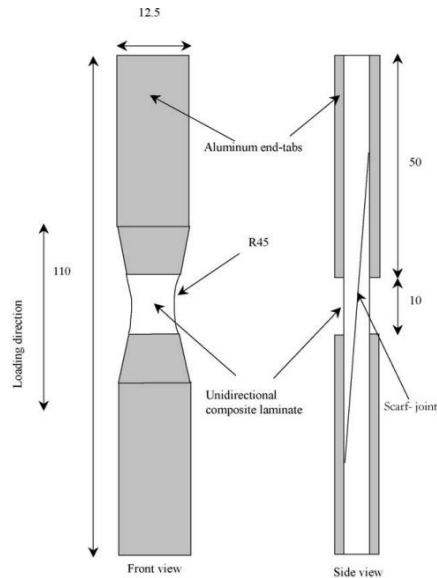


Figura 24 - Geometria típica utilizada em ensaios de compressão de juntas adesivas de chanfro interior (dimensões em mm) [38].

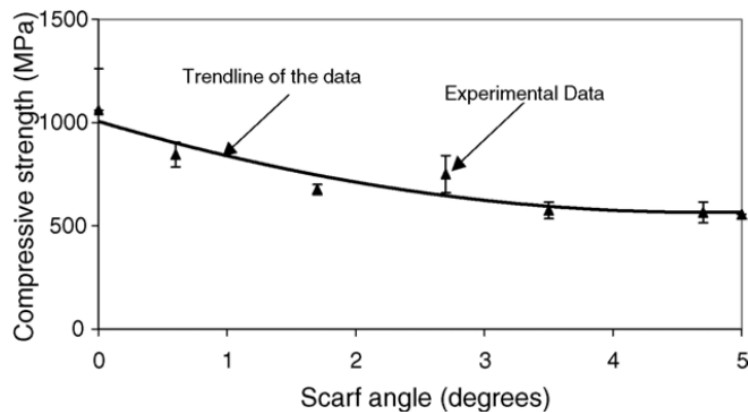


Figura 25 - Resultados experimentais para diferentes α [38].

Foi concluído que a resistência à compressão das juntas *scarf* sofrem uma perda de entre 20% a 50% da sua resistência face à curva de resposta de colapso em compressão. Isto deve-se à presença de eventuais falhas no fabrico das juntas.

Moreira e Campilho [39] realizaram um estudo sobre a melhoria da resistência de reparações adesivas de chanfro interior em estruturas de alumínio com reforços externos. As juntas ensaiadas foram fabricadas com aderentes de alumínio de liga AW6082 T651 e com o adesivo Araldite® 2015. Para o substrato das estruturas reparadas utilizaram-se barras de alumínio com 3mm de espessura e para os reforços com barras com 1mm de espessura. Foram testadas juntas de chanfro interior com $\alpha=10^\circ$, 15° , 20° , 30° e 45° . Neste trabalho foram ensaiadas juntas de reparação de chanfro interior sem reforço (C1), com reforço externo (C2) e tanto reforço externo como interno (C3), encontram-se representadas na Figura 26.

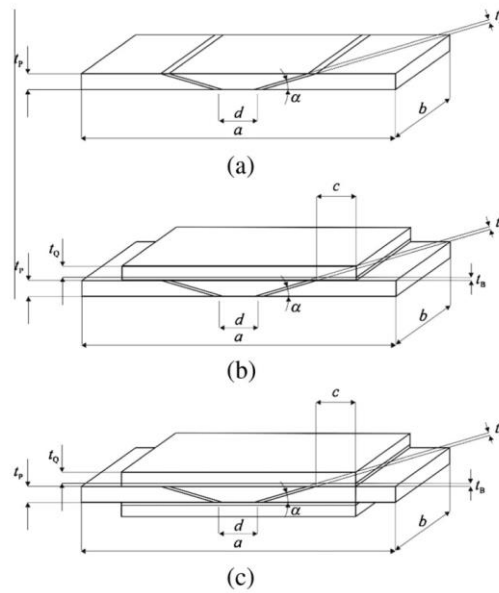


Figura 26 - Geometria e dimensões características das reparações de chanfro interior com configuração C1(a), C2 (b) e C3 (c) [39].

Na Figura 27 estão apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função de α para os resultados experimentais e numéricos deste estudo.

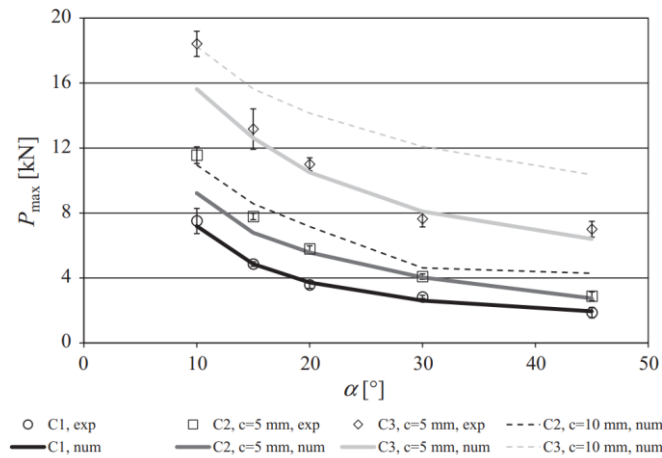


Figura 27 – Comparação entre valores experimentais e numéricos de $P_{m\acute{a}x}$ em função de α [39].

Após análise dos resultados obtidos foi observado que ocorre um aumento significativo da resistência das reparações de chanfro interior com a utilização da configuração C2 e ainda mais no caso da configuração C3. Verificou-se também, para todos os casos analisados, um aumento exponencial da resistência das reparações com a diminuição de α .

2.3.2 Previsão numérica da resistência

Um estudo de Gacoin [40] teve como objetivo investigar a influência da geometria de uma junta de chanfro interior dupla, no que diz respeito à evolução do dano dessa junta adesiva. Com essa finalidade, foram realizados minuciosos testes, por forma a caracterizar o processo do dano. A abordagem tomada, começou por comparar o comportamento micromecânico de juntas adesivas de chanfro interior duplo e chanfro interior simples com o mesmo ângulo. O estudo experimental revelou que a resistência da junta é superior para a junta de chanfro interior dupla quando α maior que 18° . O oposto verifica-se quando $\alpha < 18^\circ$, devido a picos de tensão no topo da junta de chanfro interior dupla, que originam as primeiras microfissuras. Para $\alpha = 6^\circ$, o início do dano surge na singularidade criada pela geometria da junta de chanfro interior dupla. O que leva a que esta configuração se torne menos resistente, quando comparada com a junta de chanfro interior simples para o mesmo α . A comparação dos dados teóricos (obtidos pelo método de elementos finitos) com os dados experimentais (Figura 28), revela a viabilidade do modelo numérico para ter em conta os efeitos das tensões singulares, que são criadas pela geometria da junta de chanfro interior dupla.

Os resultados numéricos preveem também com precisão a evolução real do dano das juntas de chanfro interior. Os resultados obtidos revelam que o melhor comportamento da junta de chanfro interior ocorre quando $\alpha < 18^\circ$.

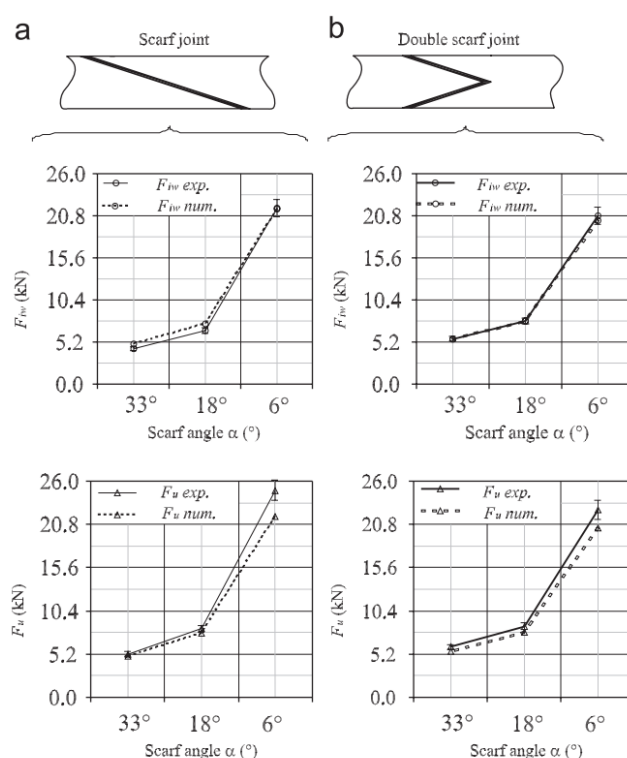


Figura 28 - Resultados experimentais e numéricos para o começo de microfissuras (F_{iw}) e rotura total (F_u) em a) junta de chanfro interior e b) chanfro interior dupla [40].

Campilho et al. [41] apresentam um estudo experimental e numérico do comportamento à tração de reparações adesivas de chanfro interior, de compósito de fibra de carbono e matriz de epóxico, usando ângulos que variam entre os 2° e 5° (Figura 29). De modo a simular a camada adesiva foi utilizado um MDC misto I+II adequado para adesivos dúcteis. Visto que foi observada experimentalmente uma rotura coesiva mista, interlaminar-intralaminar nas amostras com ângulo mais reduzido, por forma a simular a rotura interlaminar, intralaminar e transversa da fibra foram utilizadas diferentes leis coesivas e que foram obtidas através do método inverso.

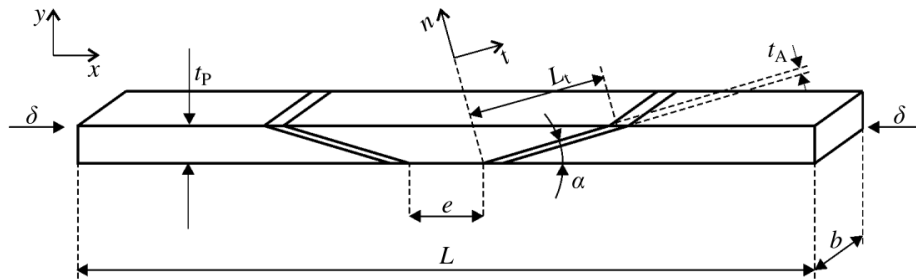


Figura 29 - Geometria da junta de reparação com chanfro interior [41].

Com base na comparação entre os resultados experimentais e numéricos obtidos (Figura 30), em termos de resistência da junta, pode-se constatar uma boa convergência entre os mesmos, e conclui-se que a metodologia utilizada pode ser aplicada com sucesso de modo a prever o comportamento destas ligações estruturais.

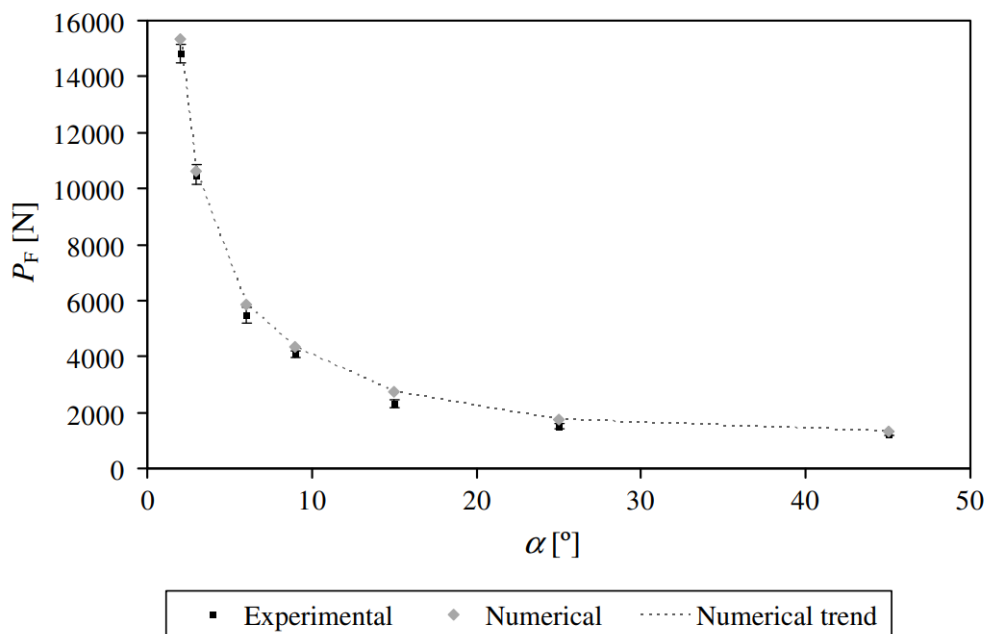


Figura 30 - Força máxima em função do ângulo da junta de chanfro interior [41].

Silva et al. [42] realizaram um estudo experimental e numérico do comportamento à tração de juntas adesivas de chanfro interior com diferentes formulações de MDC. As juntas utilizadas foram concebidas utilizando aderentes de liga de alumínio AW6082-T651 com ângulos compreendidos entre $3,43^\circ$ e 45° . Para os MDC foram considerados os modelos coesivos triangular de modo misto, e modelos de modos independentes com forma triangular, trapezoidal e exponencial, em que as leis foram determinadas pelo método direto. A fiabilidade do modelo foi atestada pela comparação entre os resultados experimentais com os numéricos, no qual se verificou uma boa convergência (Figura 31).

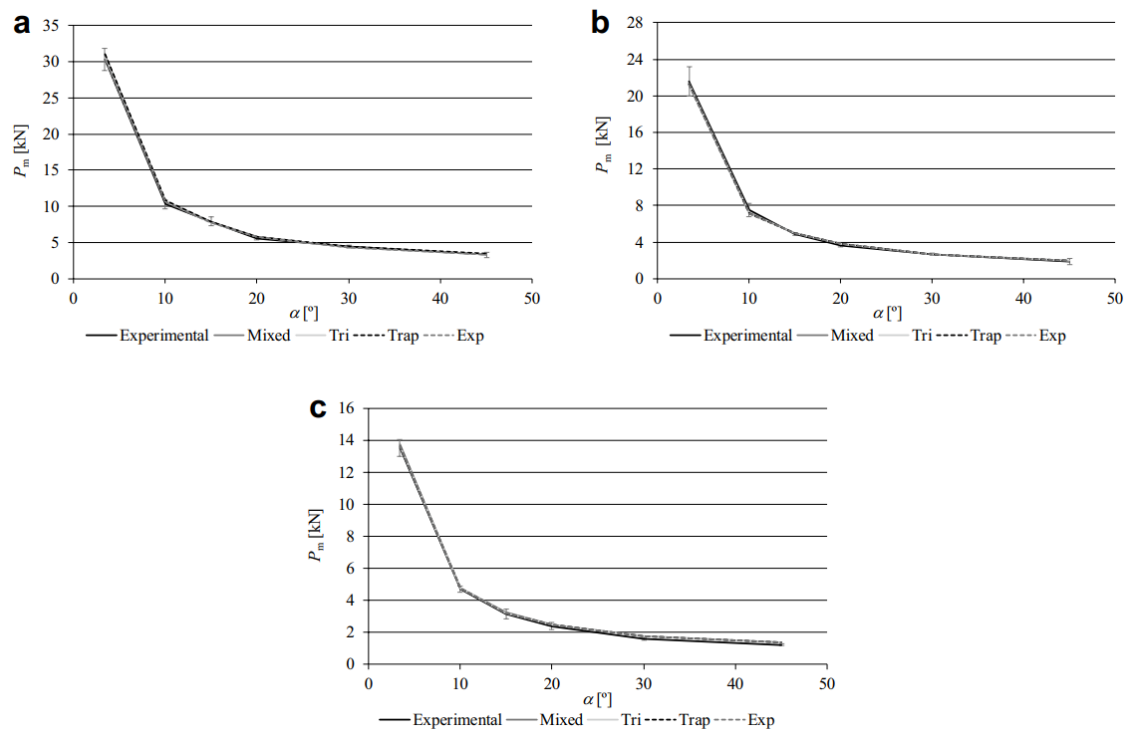


Figura 31 - Curvas experimentais, analíticas e numéricas de P_m - α considerando o modelo triangular misto e modelos independentes triangular, trapezoidal e linear-exponencial para o Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e SikaForce® 7752 (c) [42].

Também se pode concluir que a utilização do método direto, independentemente da lei coesiva, permite obter resultados muito próximos dos resultados experimentais com erros muito reduzidos.

DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

3.2 Trabalho numérico

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

No presente capítulo será descrito na sua totalidade o processo experimental, materiais, técnicas e métodos de ensaio utilizados bem como os diferentes resultados para as diversas configurações de chanfro interior. De referir que o trabalho experimental descrito foi desenvolvido num trabalho anterior [1], e os respetivos resultados serão relevantes para a comparação com os dados obtidos por MEFX neste trabalho e aferição das diferentes condições de análise testadas.

3.1.1 Materiais utilizados

Considerando os materiais utilizados no trabalho experimental, nomeadamente os aderentes e adesivos, o presente subcapítulo destina-se à descrição e análise detalhada das propriedades dos mesmos.

3.1.2 Aderentes

O material utilizado como aderente em todas as juntas consiste na liga de alumínio AW6082-T651. Esta liga de alumínio é conseguida através do envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C. A sua seleção deveu-se não só às boas propriedades mecânicas, mas também ao amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada. Esta liga de alumínio foi caracterizada em trabalhos anteriores [43], nos quais foram definidas as seguintes propriedades: resistência à tração de 324,00±0,16 MPa, módulo de Young (E) de 70,07±0,83 GPa, tensão de cedência à tração de 261,67±7,65 MPa e deformação de rotura à tração de 21,70%±4,24%. As curvas tensão-deformação (σ - ϵ) dos substratos de alumínio foram obtidas experimentalmente, de acordo com a norma ASTM E8 / E8M [44], e encontram-se representadas na Figura 32. Também se encontra representada a aproximação numérica usada no *software* Abaqus®.

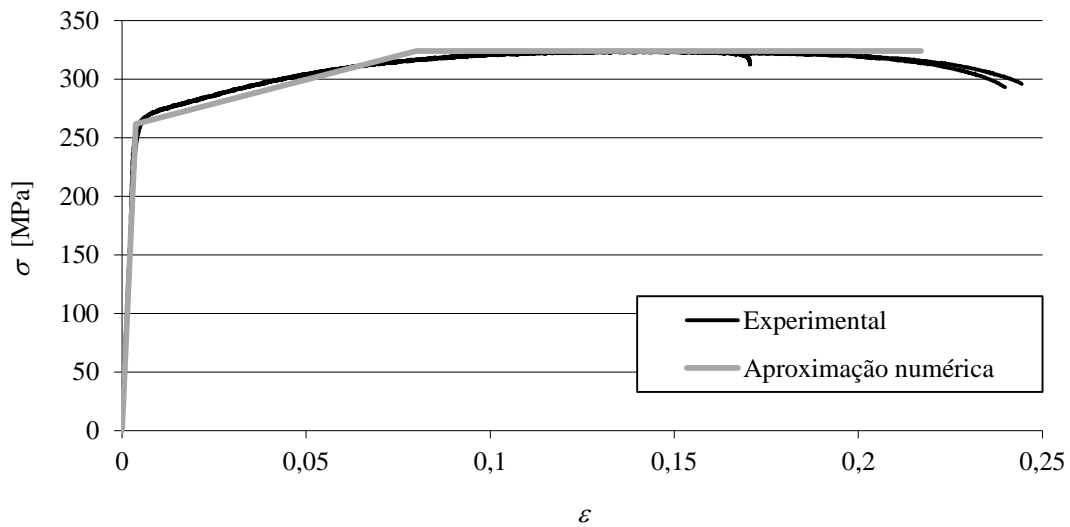


Figura 32– Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio Al 6082-T651 [43].

3.1.3 Adesivos

De modo a abranger diferentes comportamentos materiais, os adesivos selecionados para este trabalho foram os que se seguem: com um comportamento frágil, o adesivo epóxico Araldite® AV138, moderadamente dúctil o adesivo epóxico Araldite® 2015, e dúctil o adesivo poliuretano SikaForce® 7752.

3.1.3.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138/HV988 é um adesivo frágil, conforme se pode observar nas curvas σ - ϵ da Figura 33. Trata-se de um adesivo epóxico, que se apresenta sob a forma de líquido 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. Estas informações foram retiradas da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante. Na Tabela 2 apresentam-se as propriedades relevantes do adesivo.

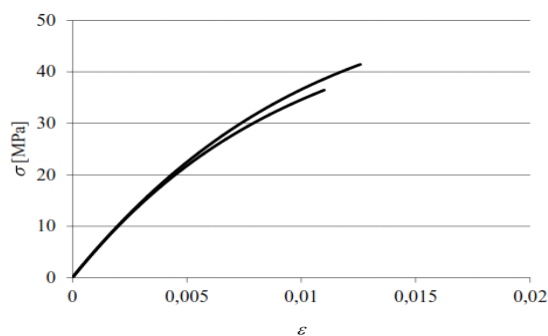


Figura 33 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Araldite® AV138 [45].

Tabela 2 - Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [45].

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson, ν	0,35 ^a
Tensão de cedência à tracção, σ_y [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura à tracção, σ_f [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura à tracção, ϵ_f [%]	1,21±0,10
Módulo de corte, G [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 tracção, 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 [46]

3.1.3.2 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. Como se trata de um adesivo dúctil, em junta adesiva permite alguma redistribuição das concentrações de tensões nas extremidades da camada de adesivo, o que se traduz numa resistência da junta muito aceitável. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 1:1 em peso.

A Figura 34 mostra um exemplo das curvas σ - ϵ de provetes maciços (*bulk*) para este adesivo, que foram obtidas na referência [47]. Na Tabela 3 estão apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

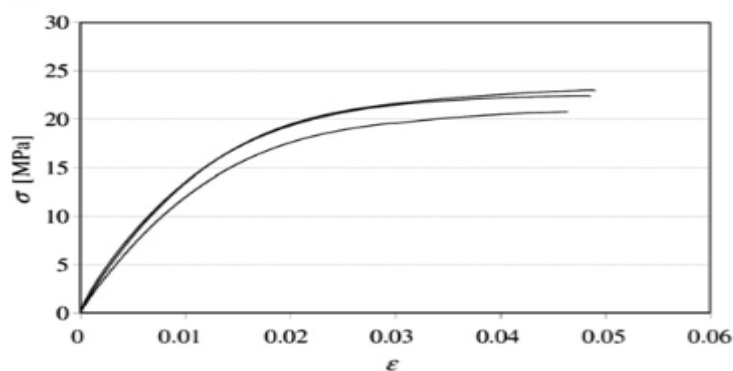


Figura 34 - Curvas σ - ε de provetes maciços de Araldite® 2015 [47].

Tabela 3 - Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [47, 48].

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 [%]	4,77±0,15
Módulo de corte, G [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 [%]	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

Comparando os valores deste adesivo com o Araldite® AV138, verifica-se que a deformação de rotura ao corte é quase seis vezes superior. Por outro lado, a tensão de rotura ao corte e à tração do Araldite® AV138 é quase o dobro das que caracterizam o Araldite® 2015.

3.1.3.3 SikaForce® 7752

O adesivo SikaForce® 7752 é um adesivo dúctil, conforme se pode observar nas curvas σ - ϵ da Figura 35. Trata-se de um adesivo à base de poliuretano, que se apresenta sob a forma de dois componentes, resina e endurecedor. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100 g/20 g, respetivamente. Estas informações foram retiradas da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante. Na Tabela 4 apresentam-se as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo [49].

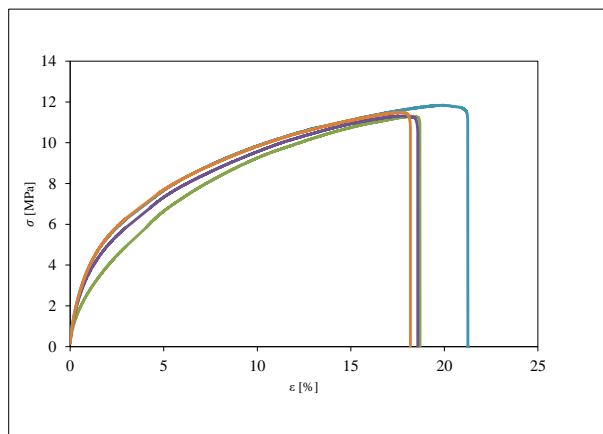


Figura 35 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de SikaForce® 7752.

Tabela 4 - Propriedades do adesivo SikaForce® 7752 [49].

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 [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 fabricadas com este adesivo seja elevada, pois este combina uma resistência muito aceitável com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Assim, são permitidas tensões elevadas na camada de adesivo, 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.

3.1.4 Geometria das juntas

Neste subcapítulo, é demonstrada a geometria (Figura 36) das configurações de juntas tratadas neste trabalho.

Tabela 5 -Dimensões de junta de chanfro interior.

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

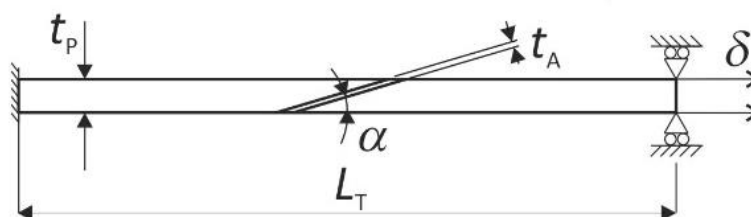


Figura 36 – Caracterização de uma junta de chanfro interior.

3.1.5 Processo de fabrico

O material dos aderentes foi fornecido em forma de barras com aproximadamente 1 m de comprimento cada. As barras foram depois cortadas, usando um serrote mecânico, conforme as dimensões necessárias (Tabela 5).

Após corte, os substratos foram preparados para serem maquinados. Esta preparação consistiu na limpeza com acetona das secções cortadas, para remover o óleo de corte proveniente do serrote, tendo sido depois utilizada uma esmeriladora para remover a rebarba resultante do corte. Os substratos foram depois conduzidos para uma fresadora convencional (Figura 37), e foi maquinada a zona de adesão, conforme o ângulo pretendido para cada uma das configurações. Depois de maquinados, o acabamento dos substratos foi realizado numa esmeriladora para se proceder à remoção de rebarba

resultante do processo de maquinação. O processo de preparação de superfície, limpeza e ligação adesiva segue as boas práticas para o fabrico destas juntas e é descrito de seguida.

Após obtenção dos substratos, estes têm de ser submetidos a um tratamento de preparação da superfície e limpeza. A preparação da superfície consiste em usar o método de lixagem dos substratos na região a ser colada, de forma a remover eventual acumulação de camada de óxidos e também criar uma superfície mais rugosa, melhorando assim a adesão deste ao substrato. Após esta preparação é efetuada a limpeza da região de colagem dos substratos com acetona, para remover toda a sujidade.



Figura 37 – Maquinação de junta de chanfro interior de $3,43^\circ$.

Após o processo de obtenção dos substratos, tratamento superficial e limpeza, segue-se a preparação para a aplicação do adesivo. Para tal, foram utilizados grampos e barras para facilitar o alinhamento e fixação dos substratos (Figura 38), e usando fita adesiva foi colocado fio de pesca calibrado com 0,2 mm de diâmetro na zona de colagem dos substratos, com o objetivo de garantir uma espessura constante da camada de adesivo em toda a zona de sobreposição (Figura 39).

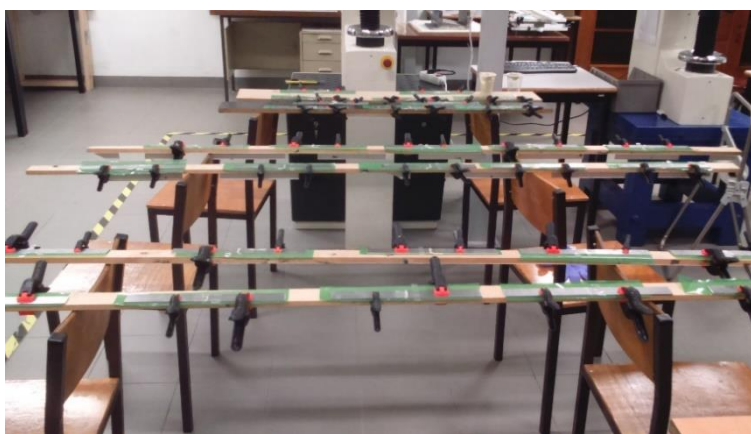


Figura 38 – Configuração utilizada para colagem das juntas.

Depois de concluído todo o processo preparatório, é efetuada a colagem dos substratos. O adesivo é aplicado no substrato previamente fixado utilizando um grampo, e de seguida é colocada cuidadosamente a outra metade, para garantir um alinhamento correto, assim como uma distribuição uniforme do adesivo. Logo de seguida, é colocado um outro grampo para finalizar a fixação e, através da pressão exercida por este, expulsar o adesivo em excesso e garantir a espessura pretendida de 0,2 mm de camada adesiva (Figura 40). Após todo este processo procedeu-se à cura dos provetes à temperatura ambiente, tendo esta demorado aproximadamente sete dias. Após curados os provetes, estes foram levados ao esmeril, para remover o adesivo em excesso nos topos e nas laterais das juntas.



Figura 39 – Grampo de fixação.



Figura 40 – Grampos para garantir fixação da junta durante a cura.

3.1.6 Resultados obtidos

Para a realização dos ensaios de tração, foi usada uma máquina de ensaios Shimadzu®, modelo AG-X 100 (Figura 41), 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 velocidade escolhida foi de 1 mm/min. Todos os provetes foram tracionados até à

rotura, foram obtidas as curvas $P-\delta$ e registados os respetivos modos de rotura para posterior análise.



Figura 41 - Máquina de ensaio de tração Shimadzu AG-X.

3.1.6.1 Curvas $P-\delta$

Na Figura 42, Figura 43 e Figura 44 estão representados exemplos de curvas $P-\delta$ para diferentes comprimentos de sobreposição de juntas de chanfro interior, 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 substratos na aproximação de $P_{\text{máx}}$.

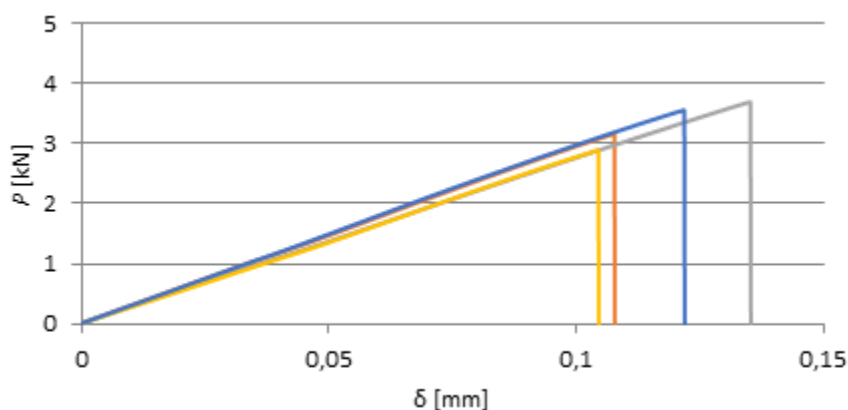


Figura 42 - Curvas $P-\delta$, obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138 e $\alpha=45^\circ$.

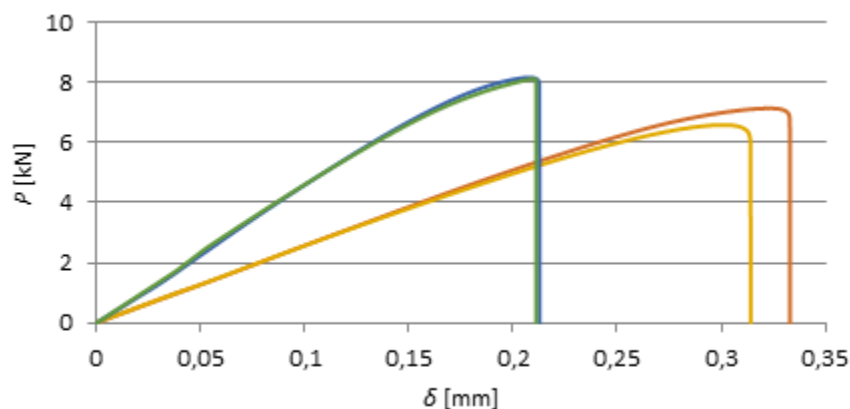


Figura 43 - Curvas P - δ , obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015 e $\alpha=10^\circ$.

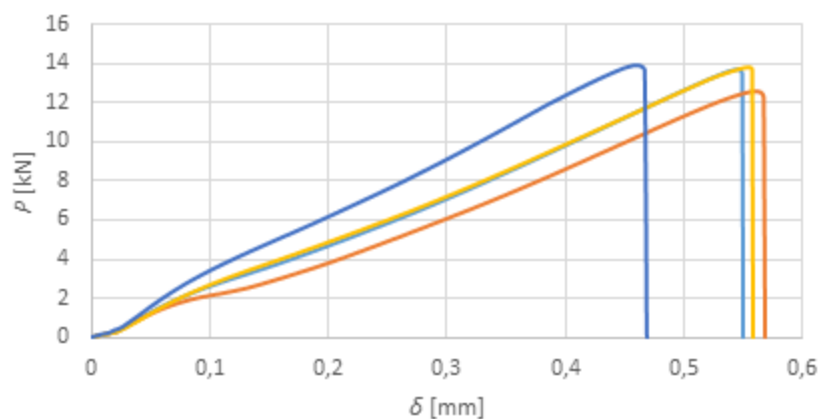


Figura 44 - Curvas P - δ , obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752 e $\alpha=3,43^\circ$.

3.1.6.2 Modos de rotura

Nas juntas de chanfro interior coladas com o Araldite® AV138, verificou-se que a rotura nos ensaios ocorreu por falha coesiva do adesivo.

No caso das juntas de chanfro interior com o adesivo Araldite® 2015, através de inspeção visual, conclui-se que a rotura ocorreu por falha coesiva do adesivo.

Para as juntas de chanfro interior ensaiadas com o SikaForce® 7752, através da análise da Figura 45, é possível verificar que a totalidade dos provetes sofreu rotura coesiva no adesivo.

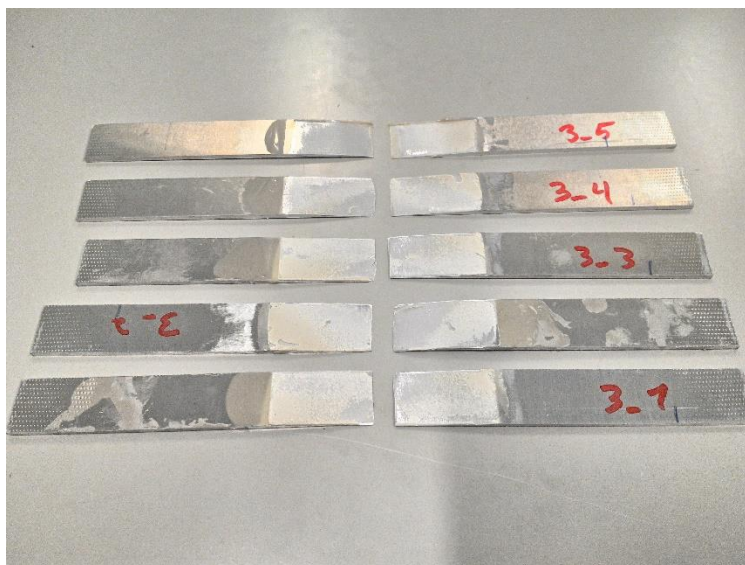


Figura 45 – Modos de rotura das juntas de chanfro interior para o SikaForce® 7752 e $\alpha=3,43^\circ$.

3.1.6.3 Resistência das juntas

Na Tabela 6 e Figura 46 estão representados os valores médios de $P_{m\acute{a}x}$, juntamente com os respetivos desvios padrão, referentes às juntas de chanfro interior para os três adesivos testados.

Tabela 6 - Valores médios de $P_{m\acute{a}x\ m\acute{e}d}$ [N] para as juntas de chanfro interior e para os diferentes adesivos.

α [°]	3,43	10	15	20	30	45
Araldite® AV138	26730	10648	7926	5715	4480	3325
Desvio Padrão	1500	346,63	642,49	310,02	150,89	366,66
Araldite® 2015	21903	7509	4858	3567	2832	1868
Desvio Padrão	1600,03	772,04	141,92	205,56	101,03	325,56
SikaForce® 7752	13500	4677	3132	2378	1543	1142
Desvio Padrão	510,90	195,40	286,25	229,38	167,86	63,51

Feita uma análise dos dados obtidos, é desde logo possível verificar que quanto menor o ângulo α , maior é $P_{m\acute{a}x}$ [50]. Para esta configuração de junta, os três adesivos têm um comportamento bastante semelhante entre eles. Ambos sofrem uma descida acentuada de $P_{m\acute{a}x}$ quando se passa de $\alpha=3,43^\circ$ para $\alpha=10^\circ$. Para os restantes valores de α , essa descida é mais suave. Nesta configuração de junta, o Araldite® AV138 é o que tem um

melhor comportamento [42], obtendo um valor de $P_{m\acute{a}x}$ bastante superior ao dos outros adesivos testados. Neste caso, a resist\encia do Araldite® AV138 \xe9 uma vantagem, uma vez que esta configura\c\ao \xe9 a que retira mais partido desta caracter\xedstica devido \xe0 distribui\c\ao de tens\c\oes praticamente uniforme.

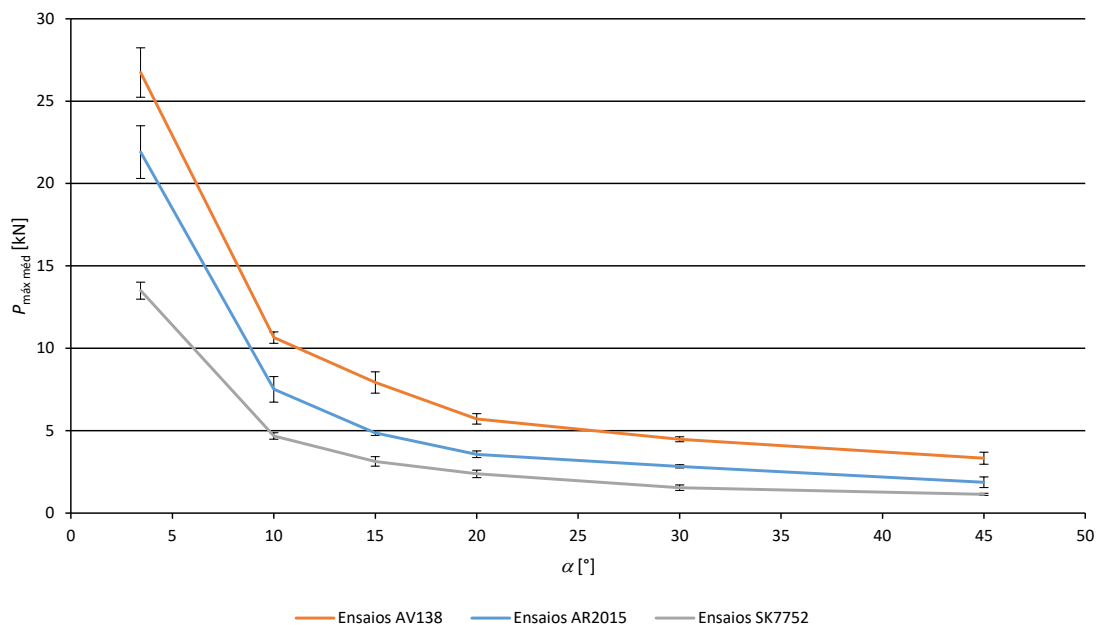


Figura 46 - Valores m\edios de $P_{m\acute{a}x}$ e desvio padr\ao em fun\c\ao de α para os diferentes adesivos em junta de chanfro interior.

3.1.7 An\lise de resultados

De acordo com os dados obtidos, os tr\es adesivos apresentam uma tend\encia muito semelhante, \xe0 medida que se diminui α . Os incrementos de $P_{m\acute{a}x}$ s\ao relativamente reduzidos para as configura\c\oes de 45° a 10°, sendo que $P_{m\acute{a}x}$ sofre um aumento muito acentuado quando o \xc2ngulo α muda para 3,43°. Nesta configura\c\ao, o Araldite® AV138 \xe9 o adesivo com a melhor *performance*, obtendo sempre os maiores valores de $P_{m\acute{a}x}$ para todos os \xc2ngulos testados. Por exemplo, para $\alpha=3,43^\circ$, $P_{m\acute{a}x}$ assume um valor de 29,7 kN, enquanto o Araldite® 2015 tem um $P_{m\acute{a}x}$ de 21,9 kN. Aqui, o SikaForce® 7752 fica em \xfaltimo lugar, obtendo apenas $P_{m\acute{a}x}$ de 13,5 kN. A escolha clara recai no Araldite® AV138, como sendo o adesivo mais adequado para esta configura\c\ao. O Araldite® 2015 \xe9 uma segunda op\c\ao bastante vi\avel, obtendo resultados bastante razo\aveis. O SikaForce® 7752 \xe9 o adesivo com a pior *performance* nesta configura\c\ao, n\ao conseguindo manter a sua posi\c\ao interm\edia entre o Araldite® 2015 e o Araldite® AV138. No que diz respeito aos valores de desvio padr\ao m\aximos para cada adesivo, existem valores razo\aveis e outros um pouco elevados. No Araldite® AV138, para 45° foi obtido um valor de 11%. No Araldite® 2015, obteve-se um valor de 17,4%, para 45°. No SikaForce® 7752, o valor mais alto foi para um α de 30°, com 10,9%.

3.2 Trabalho numérico

3.2.1 Condições da análise numérica

A análise numérica foi executada no *software* Abaqus®. Este *software* baseia-se no método de Elementos Finitos, e foi escolhido pela possibilidade de utilização de um módulo integrado de MEFX, permitindo assim simular o dano e prever a resistência das juntas. Foram criadas as geometrias das juntas, representando as mesmas em 2D e definindo as respetivas dimensões.



Figura 47 - Junta de chanfro interior a 3,43°.

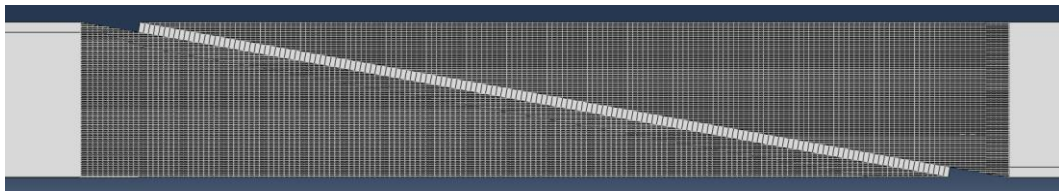


Figura 48 - Junta de chanfro interior a 10°.

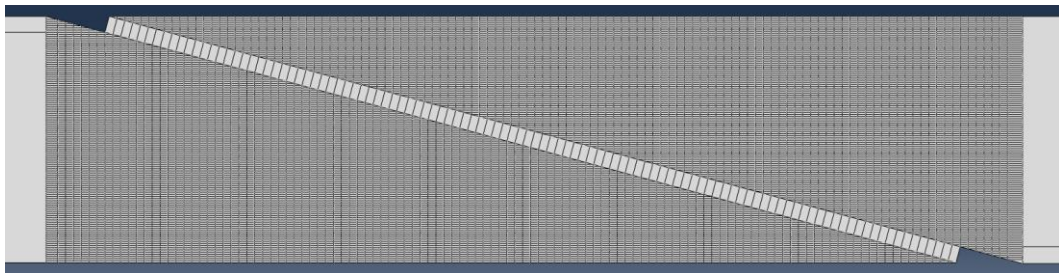


Figura 49 - Junta de chanfro interior a 15°.

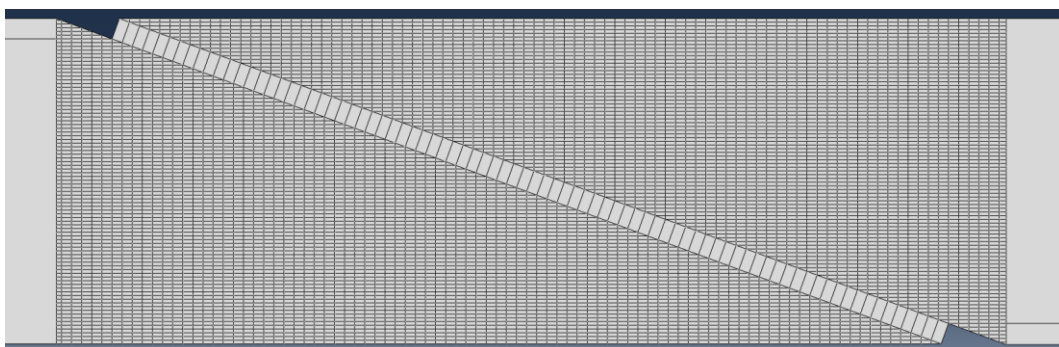


Figura 50 - Junta de chanfro interior a 20°.

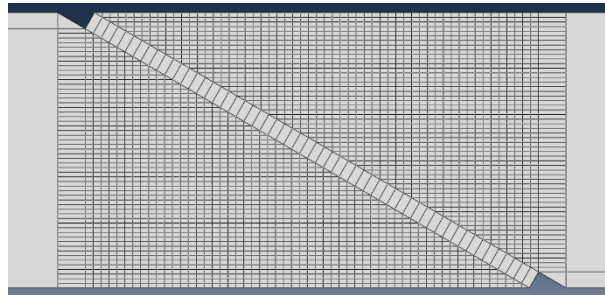


Figura 51 - Junta de chanfro interior a 30°.

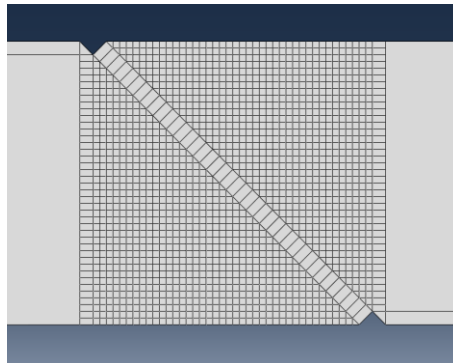


Figura 52 - Junta de chanfro interior a 45°.

De seguida foram atribuídas as propriedades dos materiais a simular no Abaqus®. Na Figura 53 e Figura 54 podem ser observadas as propriedades utilizadas no caso do adesivo Araldite® 2015.

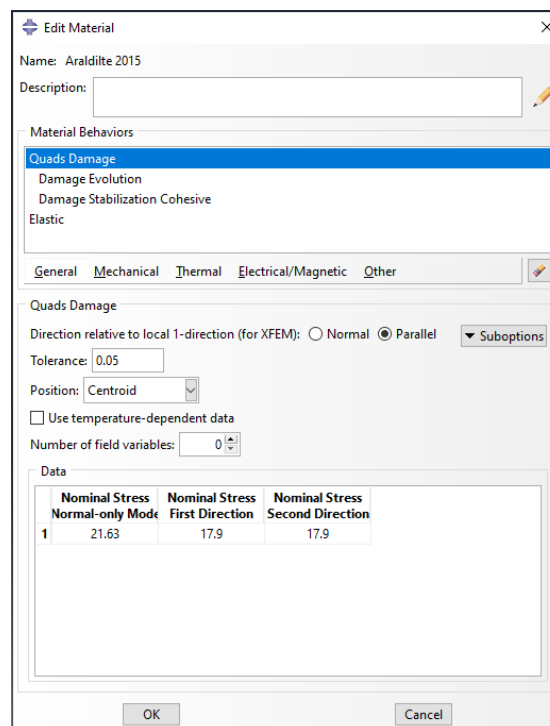


Figura 53 - Propriedades utilizadas para o adesivo Araldite® 2015.

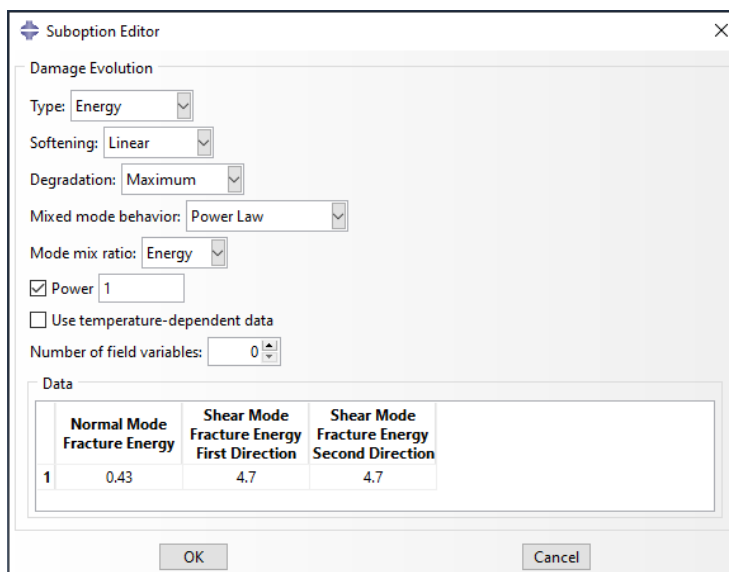


Figura 54 - Propriedades utilizadas na evolução de dano para o adesivo Araldite® 2015.

Tanto os adesivos como o aderente foram modelados como sólidos, como apresentado na Figura 55.

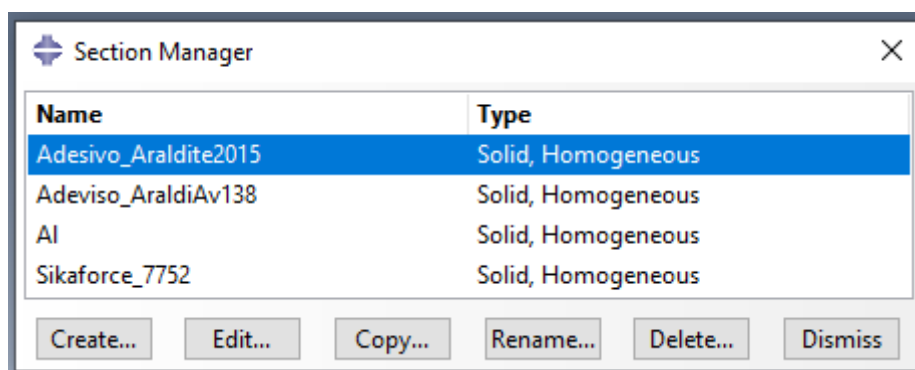


Figura 55 - Atribuição de secção sólida para a modelação dos adesivos e aderente.

Os modelos foram elaborados em 2D com recurso a elementos sólidos do estado plano de deformação CPE3 para os elementos triangulares e CPE4 para os elementos retangulares. Na direção do comprimento dos substratos das juntas, foi considerado um refinamento crescente de malha, através do *bias ratio*, desde as extremidades da junta até à camada de adesivo. O detalhe da mesma pode ser observado na Figura 56.

De modo a simular as condições reais dos ensaios experimentais, as condições fronteira e de carregamento foram aplicadas da seguinte forma: as juntas foram encastradas numa das extremidades (esquerda), e restringidas na direção transversal da junta, na extremidade oposta. Foi também aplicado um deslocamento de tração, nesta última extremidade.

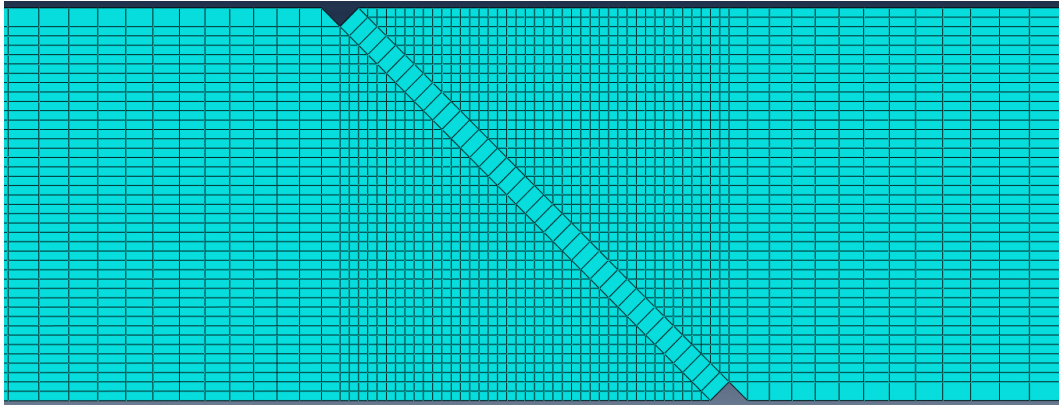


Figura 56 – Detalhe da malha para junta de chanfro interior a 45°.

3.2.2 Modelo de dano utilizado

O MEFX considera que os materiais assumem um comportamento inicial elástico, sendo o princípio da degradação simulado através de critérios de iniciação de dano.

A expressão fundamental do vetor de deslocamentos \mathbf{u} , incluindo o enriquecimento dos deslocamentos, é dada por [51]:

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

$N_i(\mathbf{x})$ 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 57). 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.

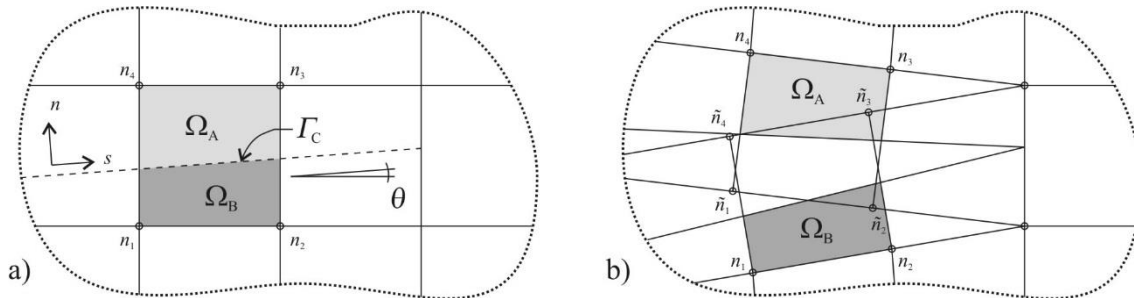


Figura 57 – Propagação do dano no MEFX usando o conceito de nós fantasmas antes (a) e depois (b) da repartição de elementos fraturados em subelementos [37].

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. Mecânica da fratura linear elástica (MFLE) - utiliza a técnica de fenda virtual (VCCT), 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 3 critérios de iniciação de dano baseados na tensão e 3 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 [52]:

$$f = \left\{ \frac{\langle \sigma_{max} \rangle}{\sigma_{max}^0} \right\} \quad e \quad f = \left\{ \frac{\langle \varepsilon_{max} \rangle}{\varepsilon_{max}^0} \right\}, \quad (2)$$

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 de tensão

nominal máxima (MAXS) e o critério de deformação nominal máxima (MAXE) são dados, por esta ordem, por [52]:

$$f = \max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0} \right\} \quad e \quad f = \max \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0}, \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}, \quad (3)$$

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 respectivos 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 quadrático de tensão (QUADS) e o critério quadrático de deformação (QUADE).

Os critérios são dados, respetivamente, pelas seguintes funções [52]:

$$f = \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 \quad e \quad f = \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}^2. \quad (4)$$

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, e que permitem modelar o salto dos deslocamentos que existe entre as faces da fenda durante a propagação do dano.

3.2.3 Determinação das propriedades de dano

Para análise das juntas através do MEFX com recurso ao *software* Abaqus®, torna-se necessário conhecer os valores de E , G , G_{IC} , G_{IIC} , $\sigma_{m\acute{a}x}$ e $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ para os diferentes critérios. O valor de $\sigma_{m\acute{a}x}$ foi igualado à tensão de rotura à tração e $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ foi igualado à deformação de rotura à tração, pela proximidade das suas características. As leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas P - δ numéricas e experimentais, até obter valores de G_{IC} e G_{IIC} que reproduzam os resultados experimentais. Os valores obtidos foram então aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. As restantes propriedades encontram-se descritas no trabalho de Ferreira [53].

3.2.3.1 Araldite® AV138

Para simular a junta adesiva com Araldite® AV138 foram utilizados nos critérios de tensão e deformação os valores que constam na Tabela 7, para as leis de degradação da camada adesiva.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados na análise de MEFX para o adesivo Araldite® AV138.

E [MPa]	4890
ν	0,35
t_n^0 [MPa]	39,45
t_s^0 [MPa]	25
G_{IC} [N/mm]	0,2
G_{IIC} [N/mm]	0,38
$\epsilon_{máx}$ [%]	1,21
ϵ_n^0 [%]	1,21
ϵ_s^0 [%]	7,8

Para a iniciação da fenda na camada adesiva, nos critérios baseados nas tensões (MAXPS, MAXS e QUADS) usaram-se os valores das propriedades $\sigma_{máx}$, t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} do Araldite® AV138, enquanto para os critérios de deformação (MAXPE, MAXE e QUADE) foram usados os valores de $\epsilon_{máx}$, ϵ_n^0 , ϵ_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} .

3.2.3.2 Araldite® 2015

Para a lei de degradação linear com o adesivo Araldite® 2015 foram utilizados nos critérios de tensão e deformação os valores das propriedades presentes na Tabela 8, conforme o critério a usar. Os valores das propriedades usadas nos critérios de tensão ($\sigma_{máx}$, t_n^0 e t_s^0) são inferiores aos do Araldite® AV138, enquanto para os critérios de deformação os valores das propriedades ($\epsilon_{máx}$, ϵ_n^0 e ϵ_s^0) são superiores, o que é indicativo de um adesivo menos resistente, mas mais dúctil do que o anterior.

Tabela 8 - Parâmetros utilizados na análise de MEFX para o adesivo Araldite® 2015.

E [MPa]	1850
ν	0,33
t_n^0 [MPa]	21,5
t_s^0 [MPa]	20,8
G_{IC} [N/mm]	0,43
G_{IIC} [N/mm]	4,5
$\epsilon_{máx}$ [%]	4,77
ϵ_n^0 [%]	4,77
ϵ_s^0 [%]	43,9

3.2.3.3 SikaForce® 7752

No caso do adesivo Sikaforce® 7752 verifica-se que os valores das propriedades usadas nos critérios de tensão ($\sigma_{máx}$, t_n^0 e t_s^0) diminuem, mas para os critérios de deformação ($\epsilon_{máx}$, ϵ_n^0 e ϵ_s^0) os valores são bem mais elevados quando comparados com os outros adesivos em estudo. Isto indica que o adesivo Sikaforce® 7752 é o mais dúctil dos três adesivos. Estas propriedades e respetivos valores estão presentes na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros utilizados na análise do MEFX para o adesivo Sikaforce® 7752.

E [MPa]	490
ν	0,30
t_n^0 [MPa]	11,49
t_s^0 [MPa]	14
G_{IC} [N/mm]	2,36
G_{IIC} [N/mm]	5,41
$\epsilon_{m\acute{a}x}$ [%]	13,92
ϵ_n^0 [%]	13,92
ϵ_s^0 [%]	54,82

3.2.4 Análise de tensões na junta

Neste capítulo é elaborada uma análise às tensões de arrancamento e às tensões de corte existentes nas juntas *scarf* testadas com os três adesivos. Esta análise é possível através de gráficos que relacionam a evolução da tensão com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L), que está compreendido entre os valores de 0 e 1. Estes dados foram obtidos pelo Abaqus®, e posteriormente tratados em MS Excel® com o objetivo de possibilitar a análise na forma de tensão normalizada contra a 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 . De modo a obter-se a distribuição das tensões e a efetuar-se a comparação entre os valores obtidos para as várias juntas *scarf*, considerou-se para todos os casos de estudo o primeiro incremento (ou seja, foram considerados valores idênticos de deslocamento aplicado) dos resultados obtidos pelo *software* Abaqus®, e as tensões a meio da camada de adesivo (o caminho definido na modelação das juntas foi a meio da camada do adesivo).

3.2.4.1 Tensões de arrancamento

De seguida, apresentam-se várias figuras que mostram a evolução das tensões σ_y normalizadas em função do adesivo, e para $\alpha=3,43^\circ$ (Figura 58) e $\alpha=45^\circ$ (Figura 59).

Pode-se observar que as tensões σ_y crescem (mais acentuadamente em forma de picos) com o aumento da rigidez do adesivo, isto é, as curvas de tensões para o adesivo Araldite® AV138 apresentam os picos de tensões mais altos e o adesivo SikaForce® 7752 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 [54], e é particularmente crítico no caso de adesivos que combinem elevada rigidez e fragilidade [55]. Neste caso, a camada de adesivo não consegue acomodar os picos de tensão que se geram na camada de adesivo, o que afeta negativamente a resistência da junta. Comparando as curvas da Figura 58 e Figura 59, é possível verificar que existe uma

aproximação da tensão de arrancamento à de corte, com o aumento de α , independentemente do adesivo testado. No entanto, esta variação é abordada em mais detalhe nos capítulos seguintes.

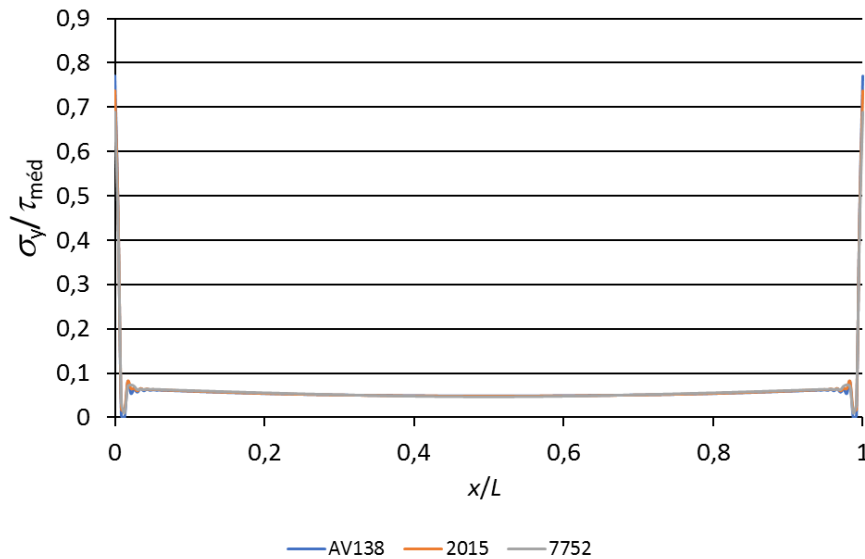


Figura 58 - Comparação da tensão normalizada de arrancamento entre adesivos, para 3,43°.

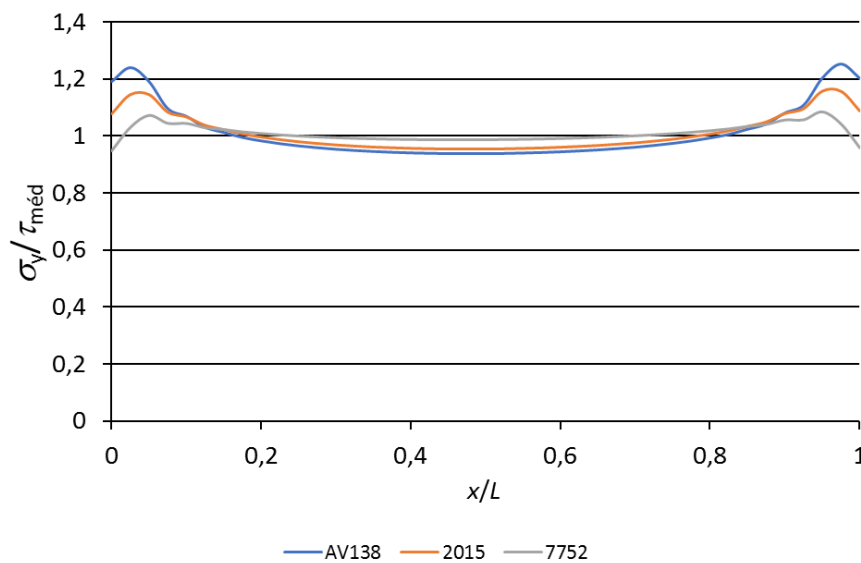


Figura 59 - Comparação da tensão normalizada de arrancamento entre adesivos, para 45°.

As Figura 60, Figura 61 e Figura 62, apresentam as tensões σ_y normalizadas para cada adesivo em várias juntas de chanfro interior em função de α .

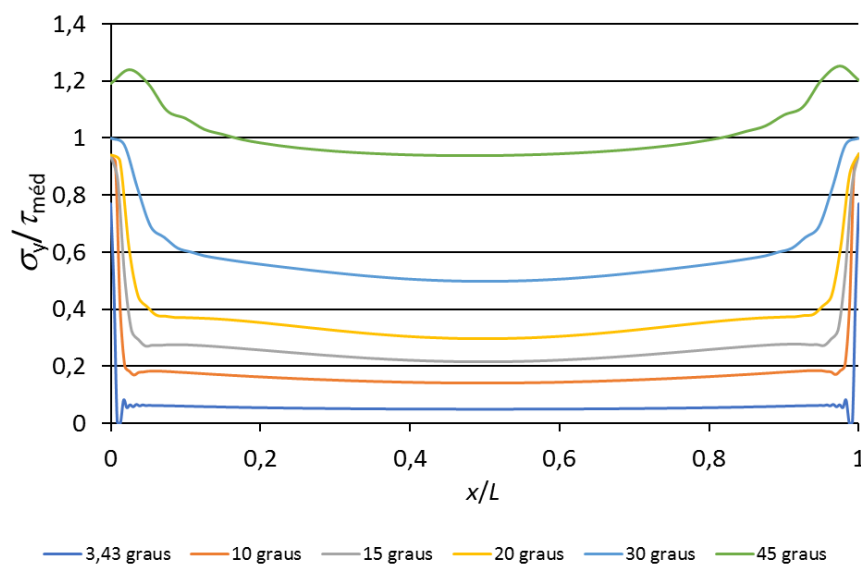


Figura 60 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® AV138.

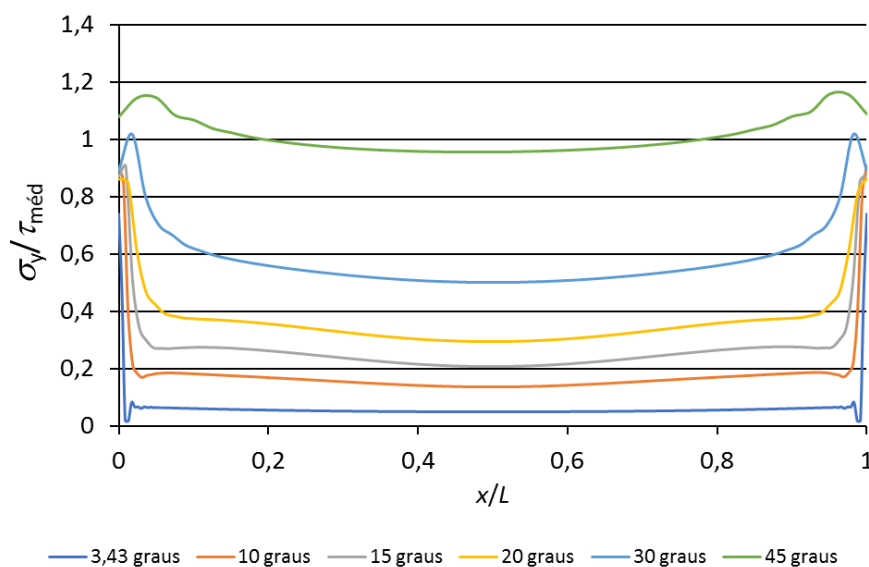


Figura 61 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® 2015.

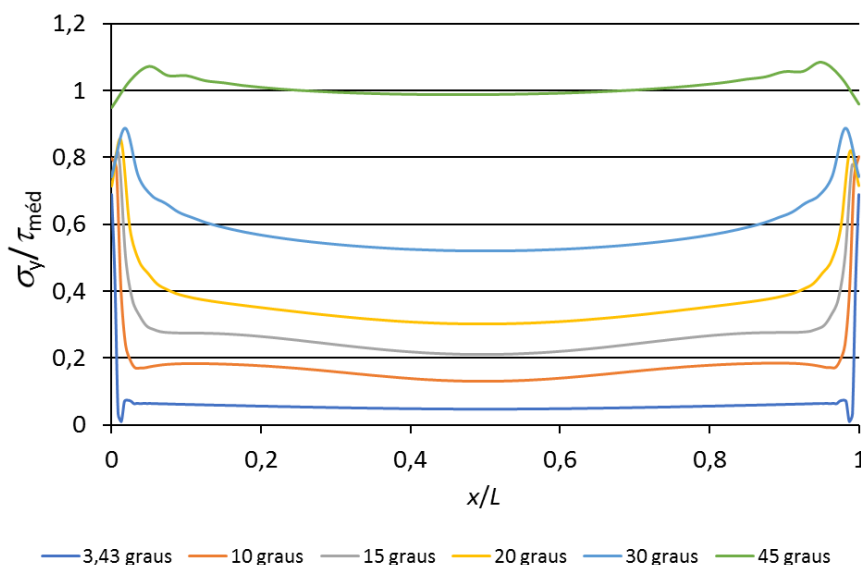


Figura 62 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos, para o adesivo SikaForce® 7752.

O que se observa é 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 o ângulo de chanfro interior de 45° proporcionar uma preponderância idêntica destas tensões [56]. A variação de α de $3,43^\circ$ para 45° , corresponde a um aumento de mais de dez vezes σ_y 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 sollicitação de corte da camada adesiva. O efeito da redução de espessura do substrato, 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, em que a espessura de substrato se mantém constante, o que conduz a tensões σ_y significativas nas extremidades do adesivo [57]. 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.

3.2.4.2 Tensões de corte

Apresentam-se de seguida várias figuras que mostram a evolução da tensão normalizada de corte em função de α para os vários adesivos. A Figura 63 e Figura 64 mostram a evolução das tensões τ_{xy} normalizadas em função do adesivo e para $\alpha=3,43^\circ$ e $\alpha=45^\circ$, respetivamente.

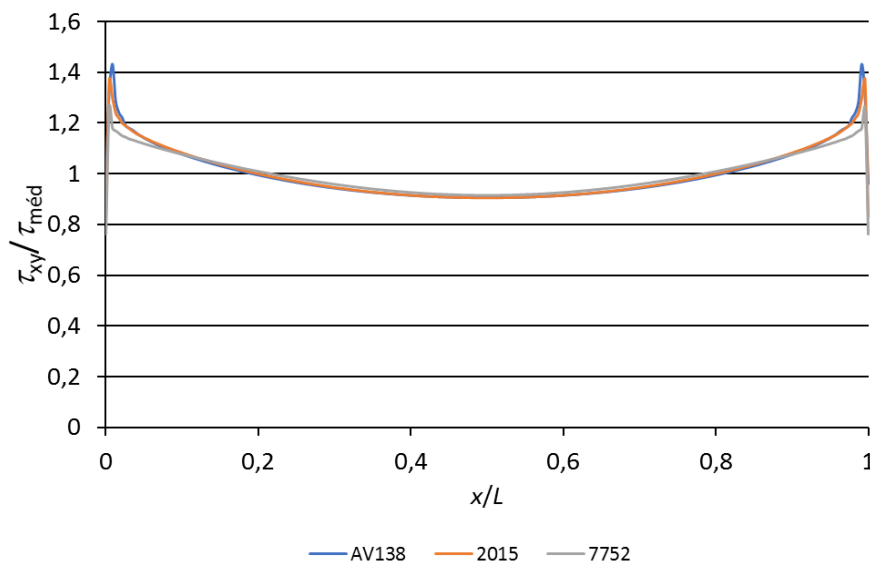


Figura 63 - Comparação da tensão normalizada de corte entre adesivos, para 3,43°.

Analisando a Figura 63 e Figura 64, 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.

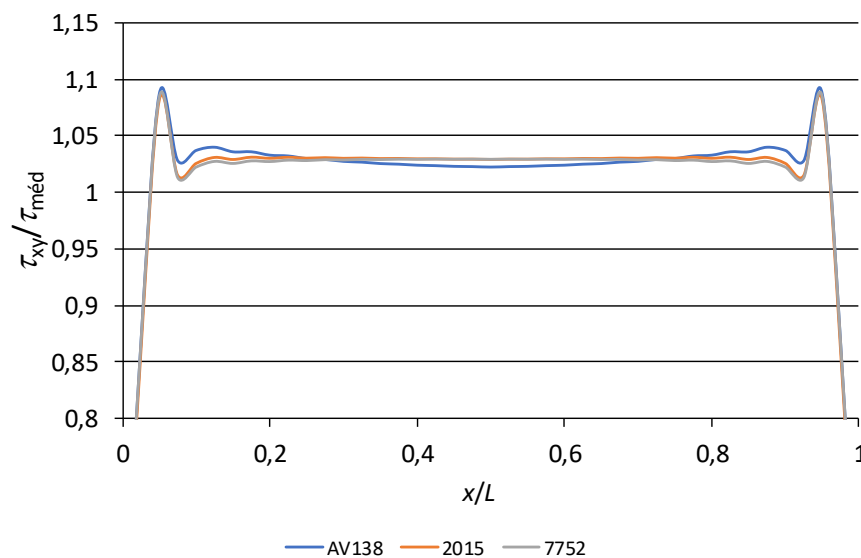


Figura 64 - Comparação da tensão normalizada de corte entre adesivos, para 45°.

As Figura 65, Figura 66 e Figura 67, apresentam as curvas obtidas para o comportamento de cada adesivo em várias juntas de chanfro interior, em função de α .

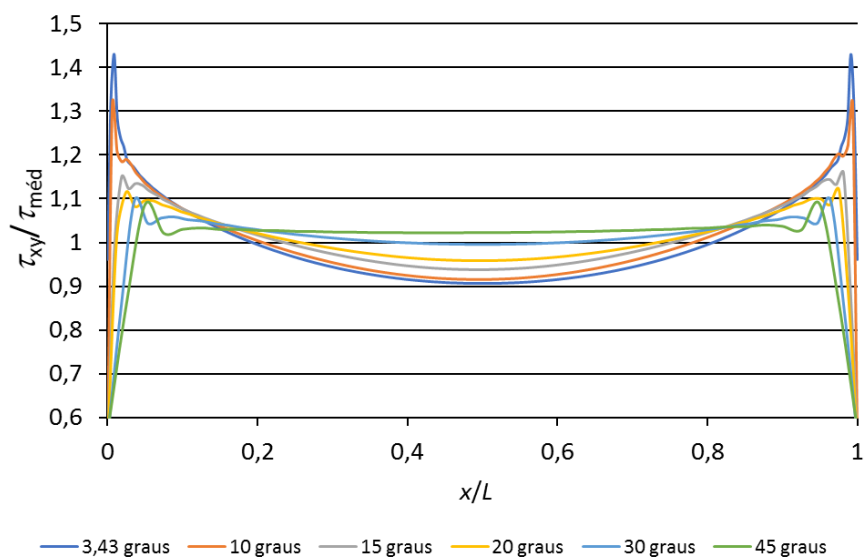


Figura 65 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® AV138.

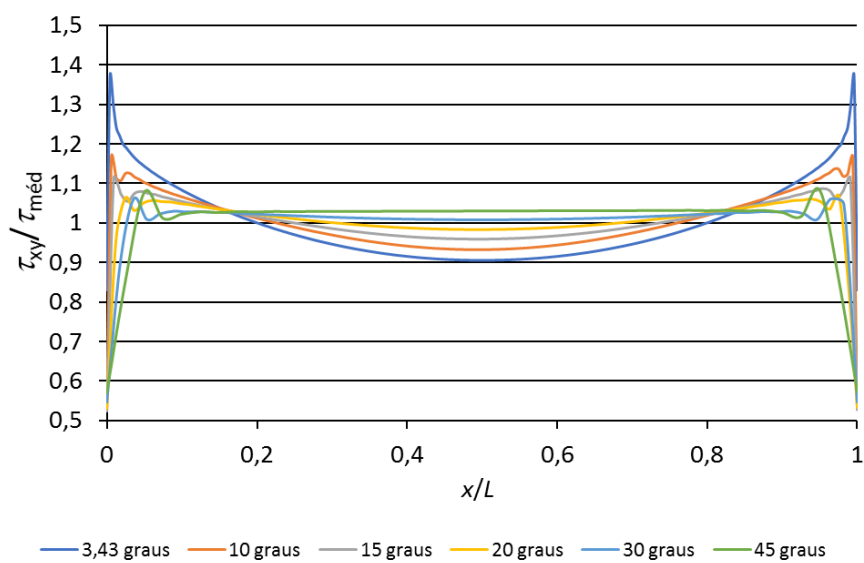


Figura 66 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® 2015.

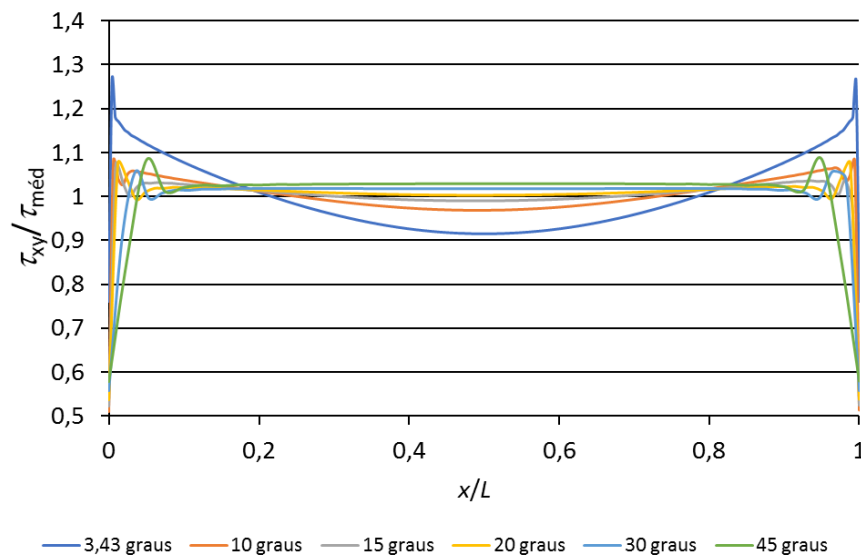


Figura 67 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos, para o adesivo SikaForce® 7752.

Observando as Figura 65, Figura 66 e Figura 67, pode-se dizer que as tensões τ_{xy} normalizadas caracterizam-se 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 α inferior a 10° , 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 substratos nas extremidades da ligação [58], e que se pode encontrar frequentemente, por exemplo, em juntas de sobreposição [59]. 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 [60]. O adesivo Araldite® AV138, é aquele que apresenta picos de valores mais altos, 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 substratos nas extremidades da ligação [56].

3.2.5 Previsão do comportamento

O presente subcapítulo tem como objetivo a avaliação da capacidade do MEFX na previsão da resistência das juntas adesivas *scarf* estudadas. Consideraram-se as juntas com os diferentes valores de α ($3,43^\circ$, 10° , 15° , 20° , 30° e 45°) e os três adesivos em estudo. De modo a realizar uma avaliação da previsão da resistência das juntas adesivas

utilizando o MEFX, foi realizado um estudo do efeito do critério de iniciação bem como um estudo do efeito da lei de propagação. Para o estudo do efeito do critério de iniciação é necessária a aplicação dos seis critérios de dano do MEFX (QUADS, MAXS, MAXPS, QUADE, MAXE e MAXPE) e a comparação entre estes e os resultados experimentais. No caso do estudo do efeito da lei de propagação o objetivo é comparar a lei de propagação triangular com *power law* 1, utilizada no estudo do efeito do critério de iniciação com as leis de propagação triangular com *power law* 0,5 e 2, bem como as leis de propagação exponencial com *power law* 0,5, 1 e 2 e os resultados obtidos experimentalmente.

3.2.5.1 Estudo do efeito do critério de iniciação

Neste subcapítulo o foco principal reside numa análise dos valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos numericamente em Abaqus® em comparação com os obtidos experimentalmente para os seis critérios de iniciação em estudo.

Nos gráficos presentes desde a Figura 68 à Figura 73 é possível verificar que nos extremos de α ($3,43^\circ$ e 45°) simulados com o adesivo Araldite® 2015, independentemente do critério de iniciação, o comportamento das curvas P - δ é linear até à rotura. O deslocamento aumenta com a redução de α devido ao aumento das forças atingidas e a maior deformação tanto do adesivo como do alumínio.

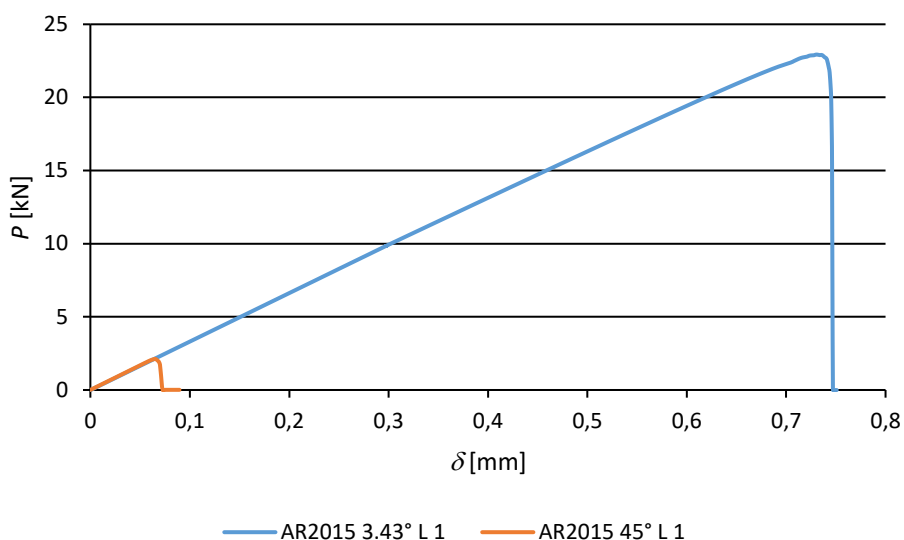


Figura 68 – Curvas P - δ obtidas numericamente com o critério QUADS para junta *scarf* unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de $3,43^\circ$ e 45° .

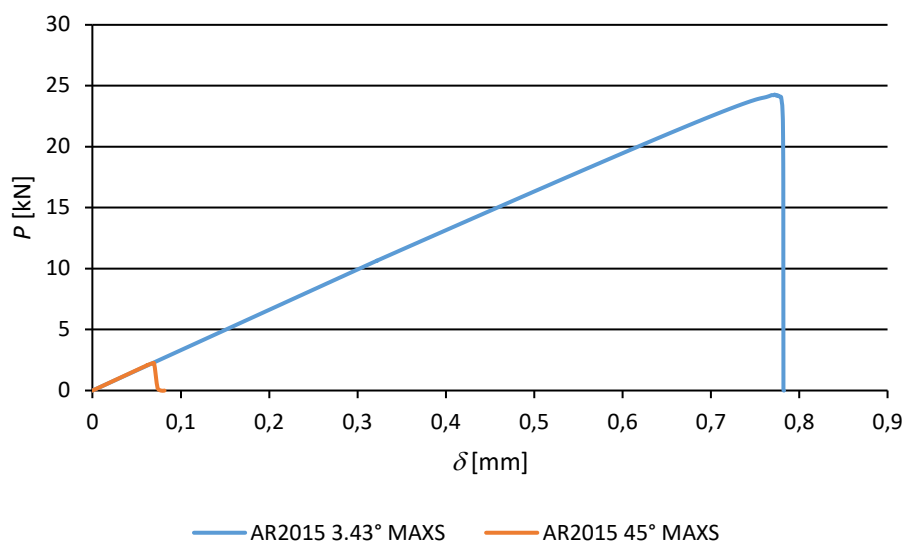


Figura 69 - Curvas P - δ obtidas numericamente com o critério MAXS para junta *scarf* unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45°.

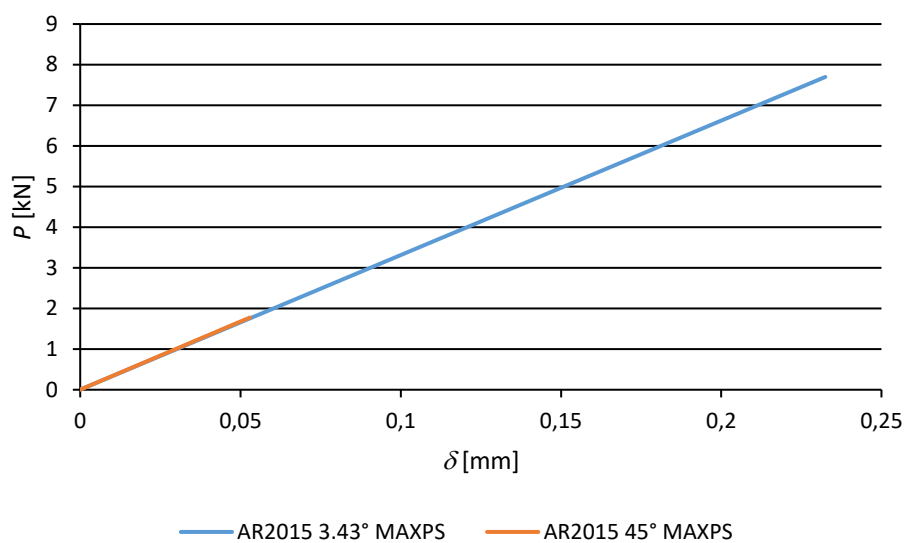


Figura 70 - Curvas P - δ obtidas numericamente com o critério MAXPS para junta *scarf* unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45°.

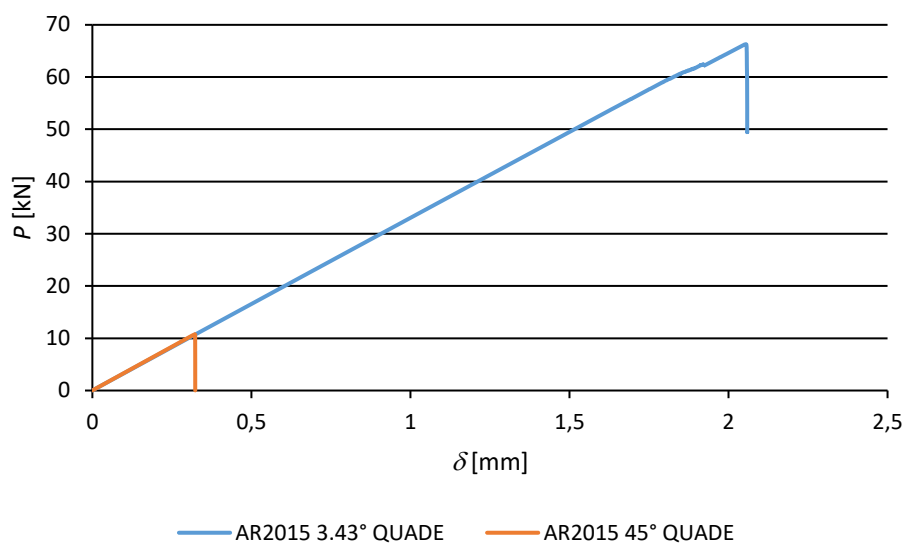


Figura 71 - Curvas P - δ obtidas numericamente com o critério QUADE para junta *scarf* unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45°.

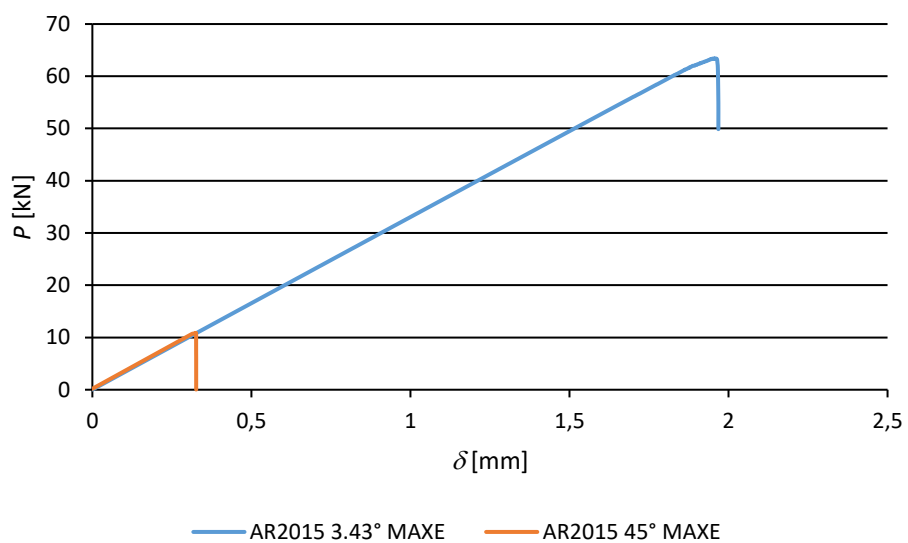


Figura 72 - Curvas P - δ obtidas numericamente com o critério MAXE para junta *scarf* unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45°.

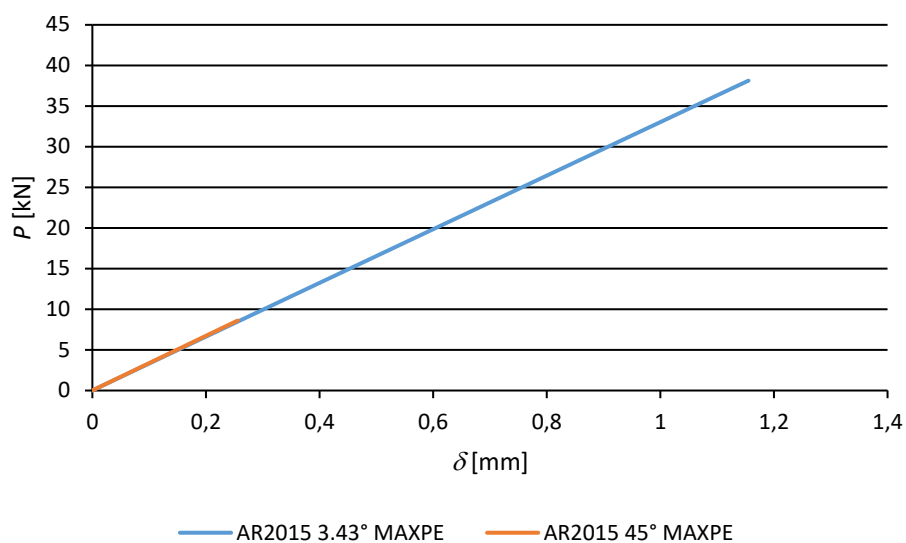


Figura 73 - Curvas P - δ obtidas numericamente com o critério MAXPE para junta *scarf* unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45°.

Seguem-se os gráficos onde é apresentada a força máxima em função de α experimental e com os critérios de iniciação QUADS e MAXS por adesivo utilizado (Figura 74, Figura 75 e Figura 76).

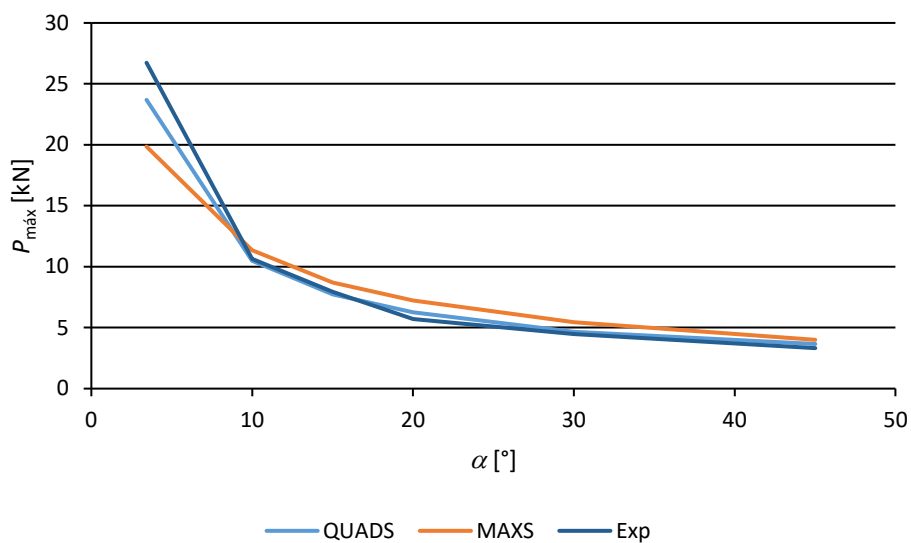


Figura 74 – Variação de $P_{\text{máx}}$ obtidos numericamente com os critérios de iniciação QUADS e MAXS e experimentalmente para juntas *scarf* unidas com o adesivo Araldite® AV138 em função de α .

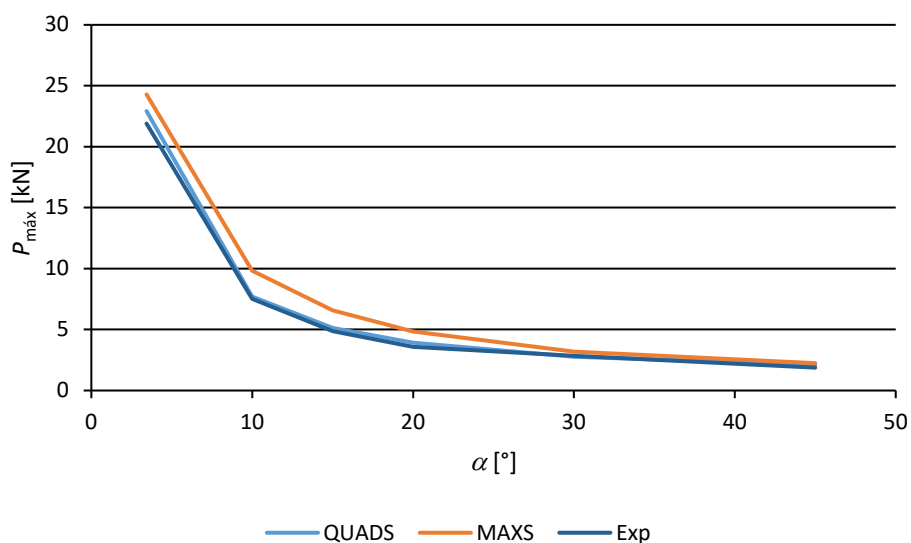


Figura 75 - Variação de $P_{máx}$ obtidos numericamente com os critérios de iniciação QUADS e MAXS e experimentalmente para juntas *scarf* unidas com o adesivo Araldite® AV138 em função de α .

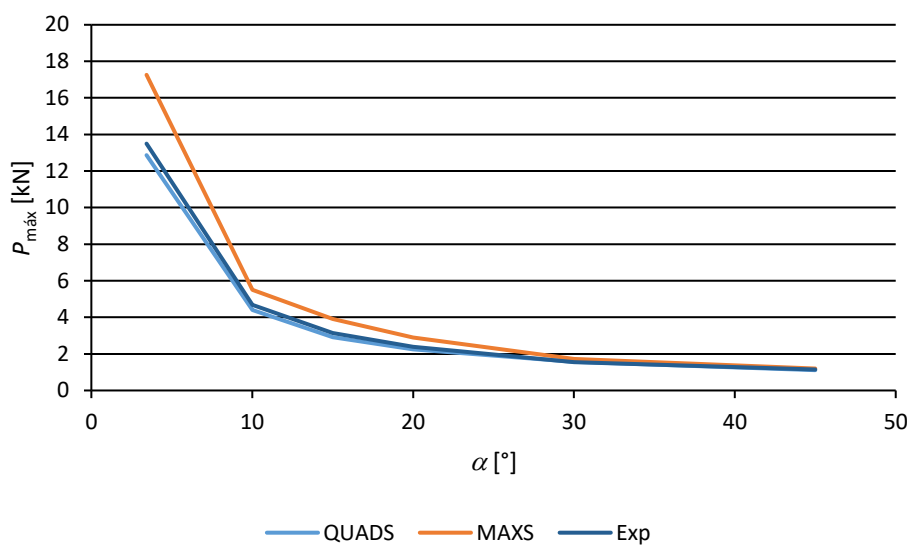


Figura 76 - Variação de $P_{máx}$ obtidos numericamente com os critérios de iniciação QUADS e MAXS e experimentalmente para juntas *scarf* unidas com o adesivo SikaForce® 7752 em função de α .

Nos seguintes gráficos encontram-se os valores da força máxima em função de todos os critérios de iniciação e α para os três adesivos utilizados (Figura 77, Figura 78 e Figura 79).

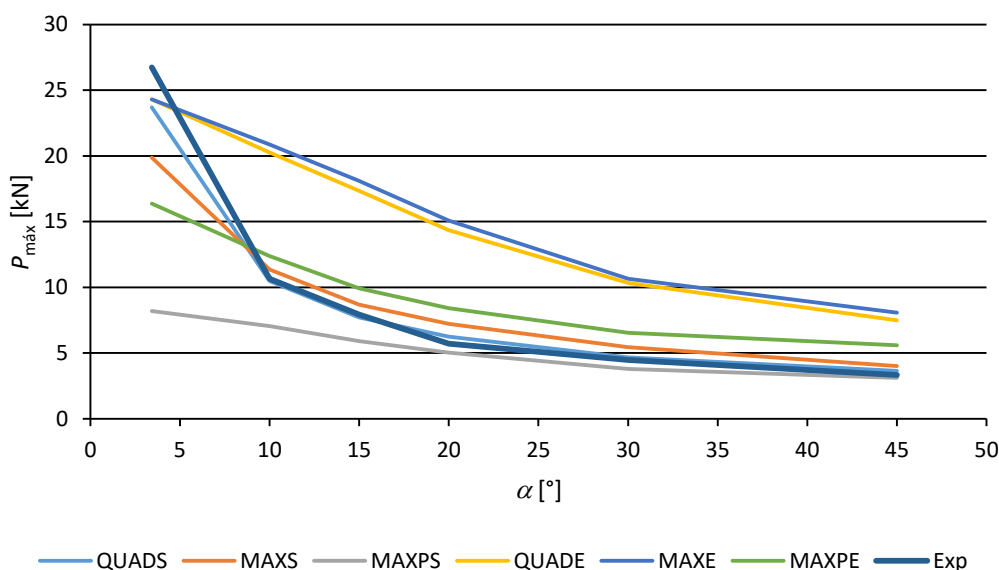


Figura 77 – Variação de $P_{máx}$ obtidos numericamente e experimentalmente para juntas *scarf* unidas com o adesivo Araldite® AV138 em função de α .

Nas juntas unidas com o adesivo Araldite® AV138 os valores obtidos numericamente utilizando o critério de iniciação QUADS praticamente que sobrepõem aos valores obtidos experimentalmente, com a exceção em que $\alpha=3,43^\circ$. A variação percentual para este critério foi de 11,4%, 1,7%, 2,7%, 9,3%, 4,2% e 9,8% para os valores de $\alpha=3,43^\circ$, 10° , 15° , 20° , 30° e 45° , respetivamente. O segundo critério que mais se aproxima dos valores experimentais trata-se do critério de iniciação MAXS, cuja variação percentual foi de 25,7%, 6,5%, 9,6%, 26,5%, 21,5% e 20,2% para os valores de α compreendidos entre $3,43^\circ$ e 45° . Utilizando o critério MAXPS, os valores de força máxima encontram-se relativamente próximos dos valores experimentais para as juntas com α entre 20° e 45° . Para os restantes valores de α os valores das forças máximas encontram-se muito abaixo do expectável porque as tensões limite são atingidas rapidamente, já que é considerada a carga máxima quando se inicia a propagação da fenda. No caso dos critérios de iniciação QUADE e MAXE, ambos ultrapassam consideravelmente os valores experimentais de $P_{máx}$ para todos os α com a exceção de $\alpha=3,43^\circ$. A inadequação destes critérios está relacionada com o dano e rotura serem governados pelas tensões limite dos adesivos em vez das suas deformações. Por fim, no caso do critério MAXPE, este obtém valores que, apesar de mais próximos que os dois últimos critérios mencionados, continuam muito mais distantes que os obtidos com QUADS e MAXS.

Para o adesivo Araldite® 2015 o critério de iniciação QUADS praticamente que sobrepõe todos os valores de $P_{máx}$ experimentais, apresentando uma variação percentual de 4,6%, 2,5%, 5,8%, 10,1%, 2,0% e 12,5% para os valores de α compreendidos entre $3,43^\circ$ e 45° , respetivamente. Segue-se o critério MAXS, em proximidade de valores com uma variação percentual máxima de 35,6% face aos valores experimentais. O critério MAXPS encontra-se mais distante, com uma variação máxima percentual de -64,9%

comparativamente aos valores experimentais. Novamente os critérios cujos valores substancialmente distantes dos valores experimentais são os critérios de iniciação QUADE e MAXE, que se encontram sobrepostos, e MAXPE.

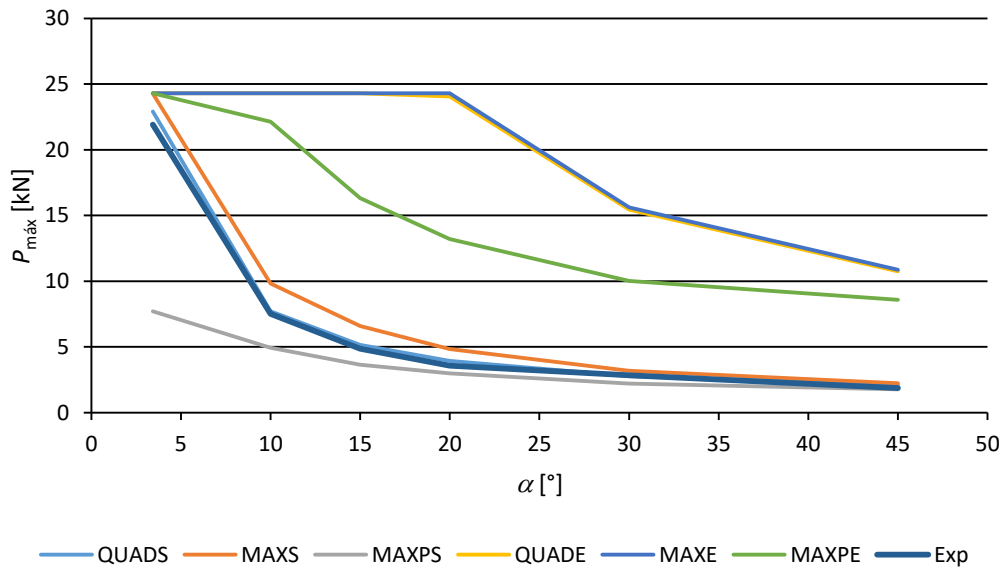


Figura 78 - Variação de $P_{máx}$ obtidos numericamente e experimentalmente para juntas *scarf* unidas com o adesivo Araldite® 2015 em função de α .

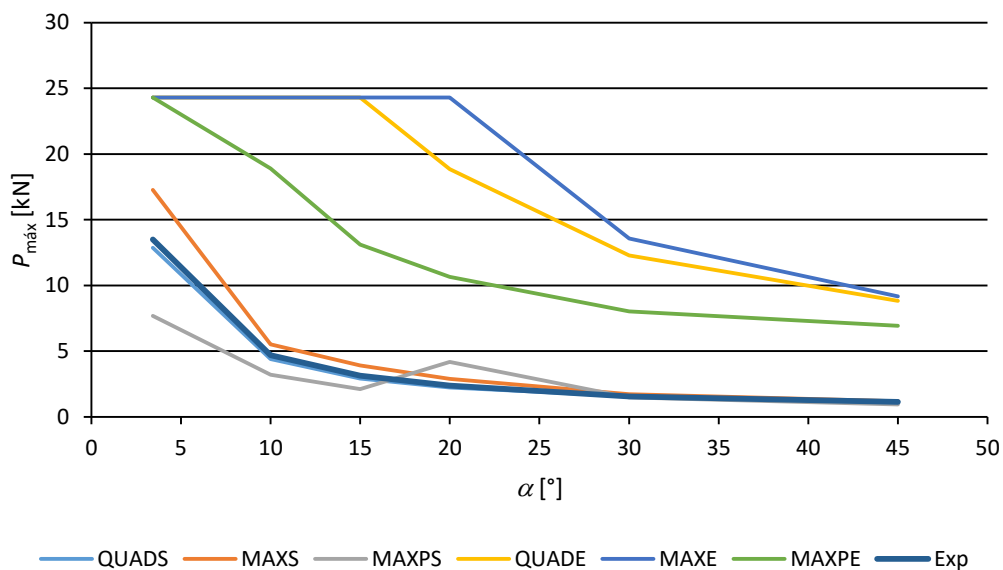


Figura 79 - Variação de $P_{máx}$ obtidos numericamente e experimentalmente para juntas *scarf* unidas com o adesivo SikaForce® 7752 em função de α .

No caso do adesivo SikaForce® 7752 os valores obtidos com o critério QUADS apresentam uma grande proximidade com os valores experimentais. Com este critério, a variação percentual foi de 4,7%, 5,8%, 7,2%, 5,8%, 1,5% e 2,5% para os valores de $\alpha=3,43^\circ$, 10° , 15° , 20° , 30° e 45° , respetivamente. Em proximidade de valores segue-se

o critério MAXS. Os valores obtidos pelo critério MAXPS estes apresentam uma discrepância com os experimentais. Os critérios QUADE, MAXE e MAXPE apresentam valores distantes dos valores experimentais.

Observando os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente verifica-se que os critérios de iniciação que resultam nos valores mais próximos dos experimentais são os critérios QUADS e MAXS. No caso dos adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 o critério QUADS permite obter valores extremamente próximos dos valores experimentais.

Na Figura 80 é possível comparar os valores de energia de rotura (U) em função do critério de iniciação e α para as simulações em que se utilizou o adesivo Araldite® AV138. Verifica-se um aumento acentuado do valor de U com a diminuição de α em todos os critérios com a exceção do caso do critério MAXPS. Com os critérios QUADS, MAXS e MAXPE os valores de U estão em linha com as forças máximas obtidas. Já com os critérios QUADE e MAXE, especificamente no caso em que $\alpha=3,43^\circ$, apesar de se observarem valores de forças muito próximos do obtido com o critério QUADS, têm valores de U muito superiores a este. Isto deve-se ao facto de que para este ângulo o adesivo é capaz de absorver uma maior deformação.

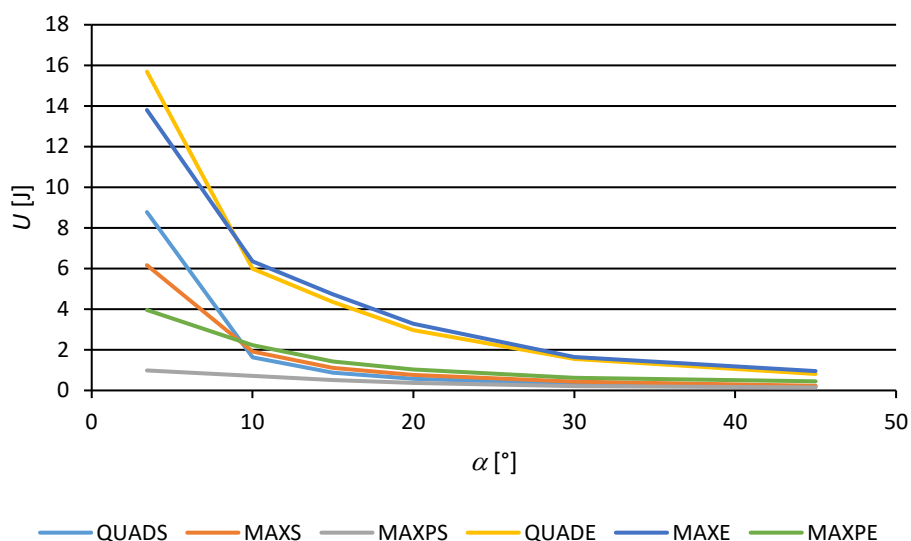


Figura 80 - Variação de U para os diferentes critérios de iniciação em função de α para juntas unidas com o adesivo Araldite® AV138 simuladas numericamente.

Realizando a análise dos valores de U para as juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 (Figura 81) é possível verificar, tal como no caso anterior, que a redução do valor de α conduz ao aumento da capacidade da junta em sustentar deformações. Uma vez mais, no caso dos critérios QUADS e MAXS os valores de U estão extremamente próximos entre ambos. Os critérios QUADE, MAXE e MAXPE resultam em juntas capazes de sustentar deformações muito superiores aos restantes critérios.

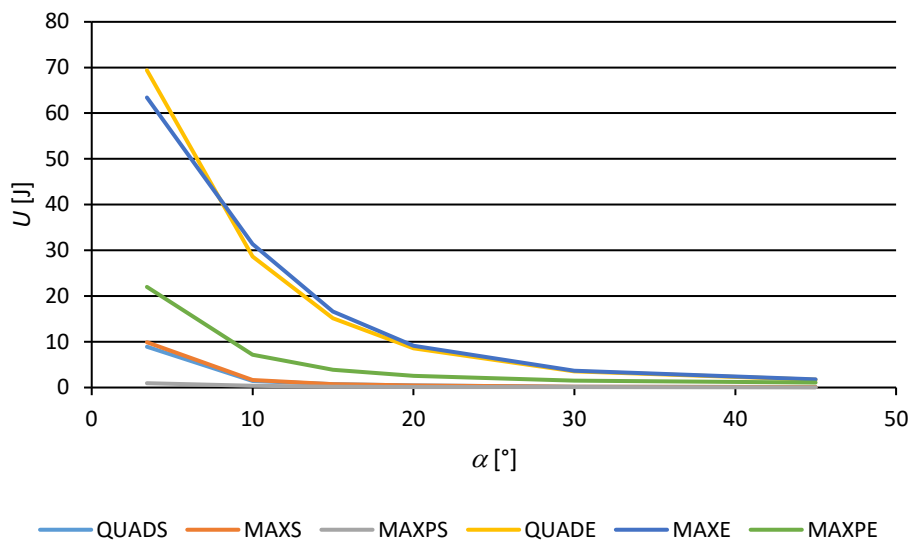


Figura 81 - Variação de U para os diferentes critérios de iniciação em função de α para juntas unidas com o adesivo Araldite® 2015 simuladas numericamente.

No caso das juntas ligadas recorrendo ao adesivo SikaForce® 7752 (Figura 82) os critérios QUADE e MAXE destacam-se pela notória diferença de U . Estes critérios fazem com que, comparativamente aos restantes, a capacidade do adesivo em suportar deformações seja extremamente superior quando $\alpha=3,43^\circ$.

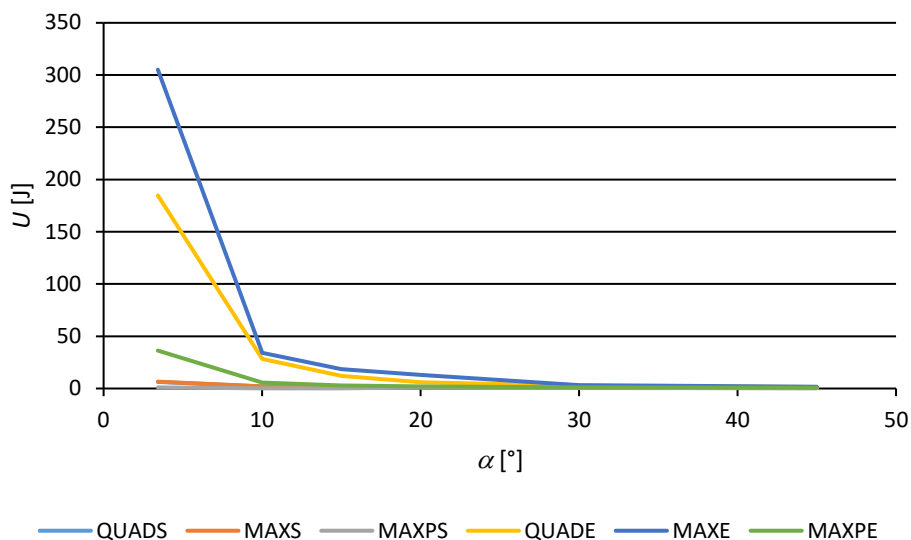


Figura 82 – Variação de U para os diferentes critérios de iniciação em função de α para juntas unidas com o adesivo SikaForce® 7752 simuladas numericamente.

3.2.5.2 Estudo do efeito da lei de propagação

De modo a analisar a previsão de resistência utilizando as diferentes leis de efeito de propagação (triangular e exponencial) foram também considerados três diferentes

parâmetros do critério energético de *power law* (0,5, 1 e 2). Assim, o critério de iniciação utilizado para este estudo foi o QUADS, visto que no estudo anterior este ter apresentado os valores mais próximos dos obtidos experimentalmente. Na Figura 83 estão apresentados dois exemplos dos parâmetros utilizados no *software* Abaqus® neste estudo.

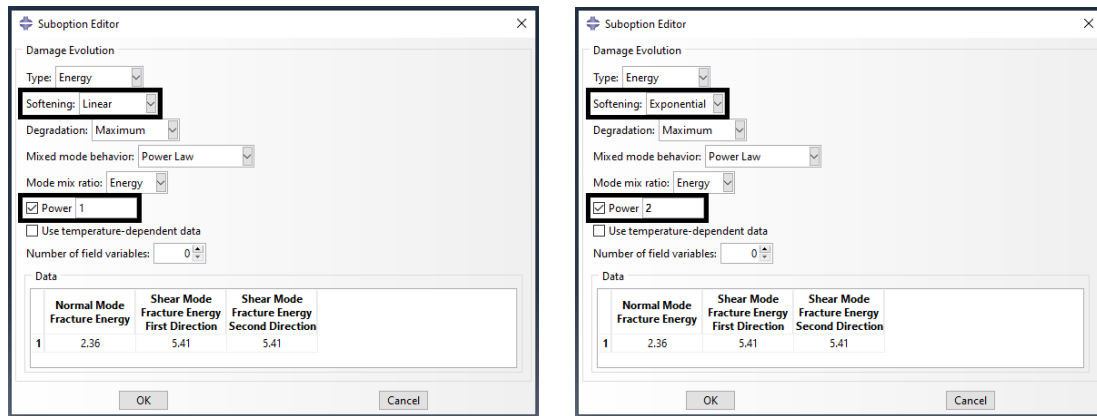


Figura 83 – Exemplo dos parâmetros utilizados para a lei triangular com *power law* 1 e exponencial com *power law* 2.

Nos gráficos presentes desde a Figura 84 à Figura 89 é possível verificar os extremos de α (3,43° e 45°) simulados com o adesivo Araldite® 2015 com as diferentes leis de propagação. À semelhança do que se observou com o estudo do critério de iniciação, o comportamento das curvas P - δ é linear até à rotura. Novamente, o deslocamento de rotura aumenta com a redução de α devido ao aumento das forças atingidas e maior deformação tanto do adesivo como do alumínio.

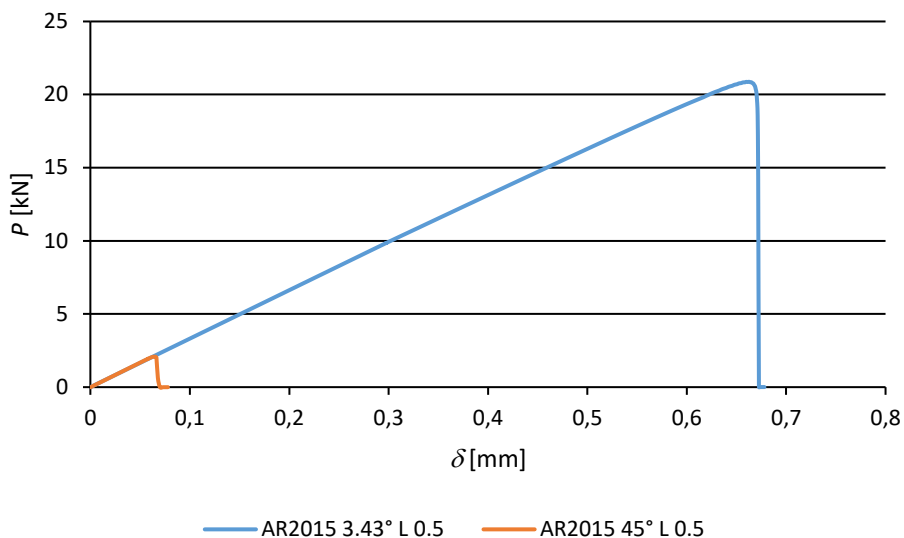


Figura 84 - Curvas P - δ obtidas numericamente com a lei triangular e *power law* 0,5 para junta *scarf* unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45°.

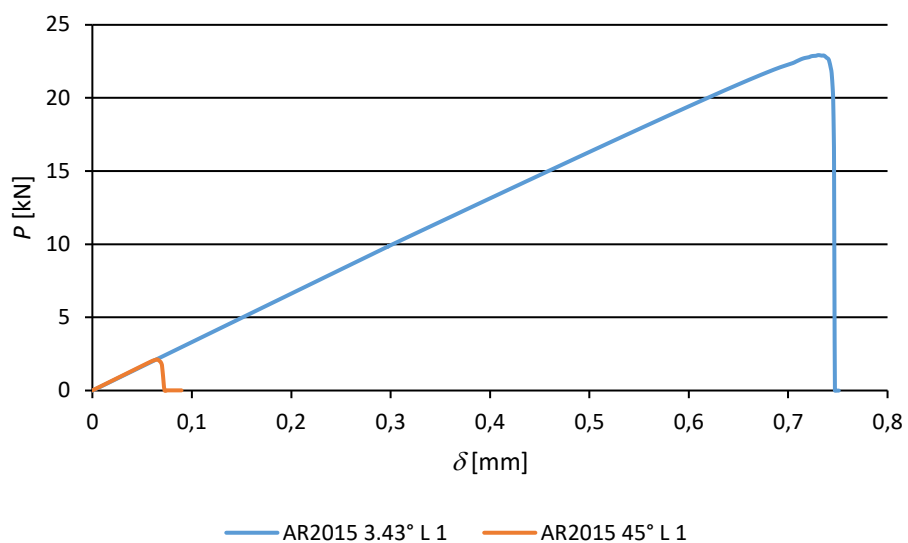


Figura 85 - Curvas P - δ obtidas numericamente com a lei triangular e *power law* 1 para junta scarf unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de $3,43^\circ$ e 45° .

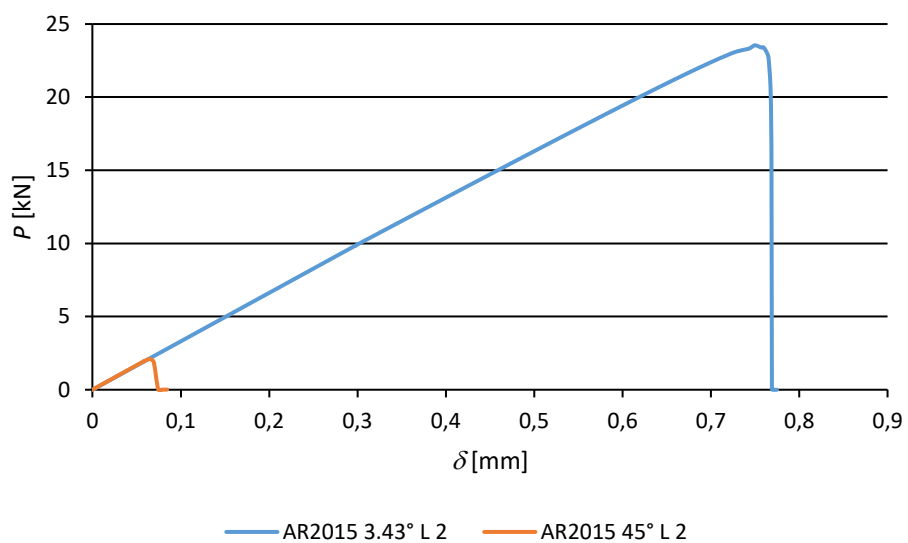


Figura 86 - Curvas P - δ obtidas numericamente com a lei triangular e *power law* 2 para junta scarf unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de $3,43^\circ$ e 45° .

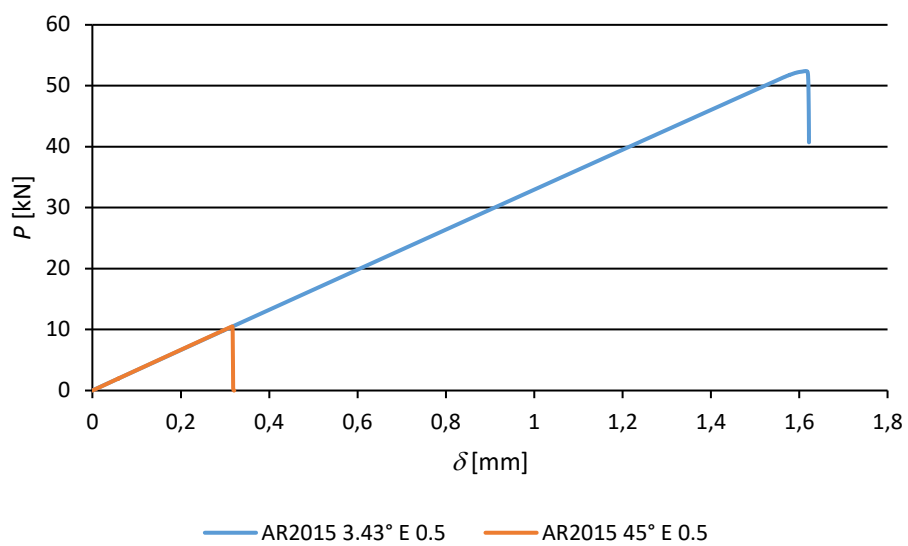


Figura 87 - Curvas P - δ obtidas numericamente com a lei exponencial e *power law* 0,5 para junta *scarf* unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45°.

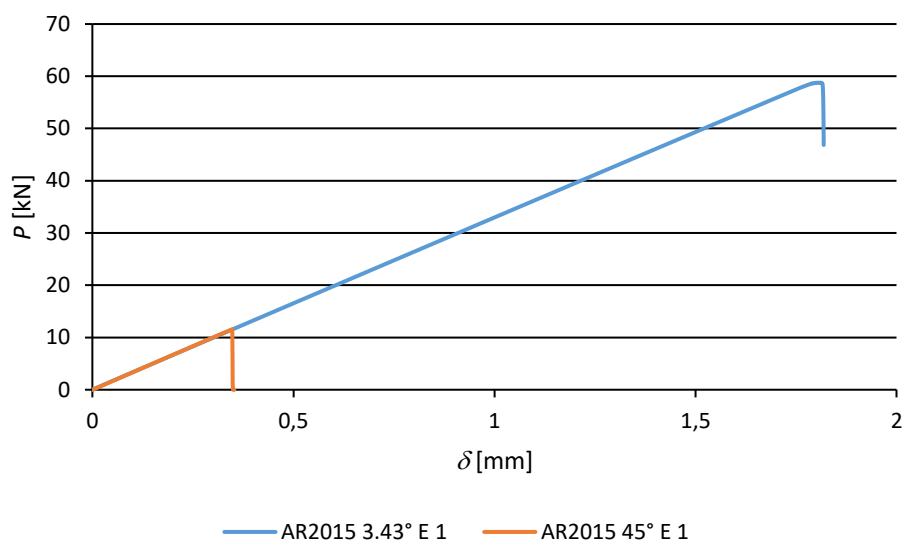


Figura 88 - Curvas P - δ obtidas numericamente com a lei exponencial e *power law* 1 para junta *scarf* unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45°.

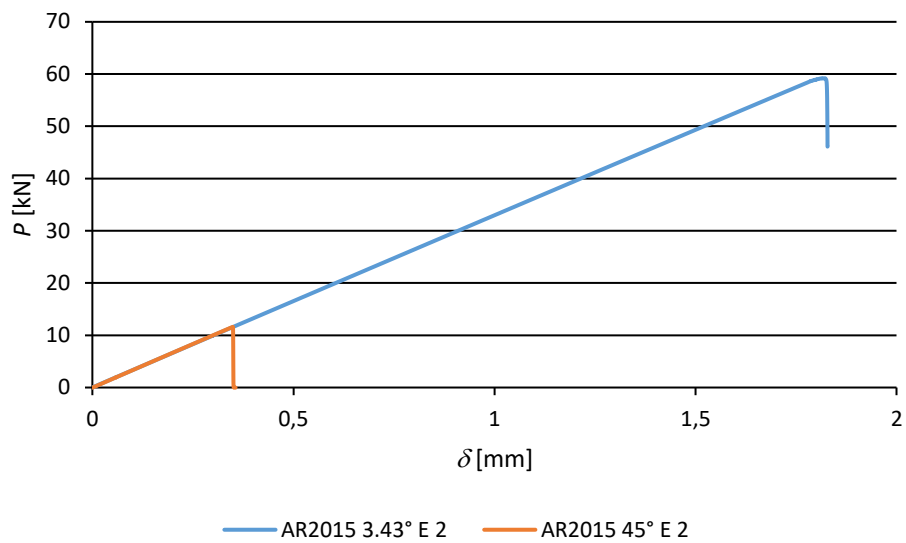


Figura 89 - Curvas P - δ obtidas numericamente com a lei exponencial e *power law* 2 para junta *scarf* unida com o adesivo Araldite® 2015 e valores de α de 3,43° e 45°.

Da Figura 90 à Figura 95 estão presentes comparações entre os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos experimentalmente e utilizando as leis de propagação triangular e exponencial com diferentes valores de *power law* e em função de α , para juntas unidas com os três adesivos.

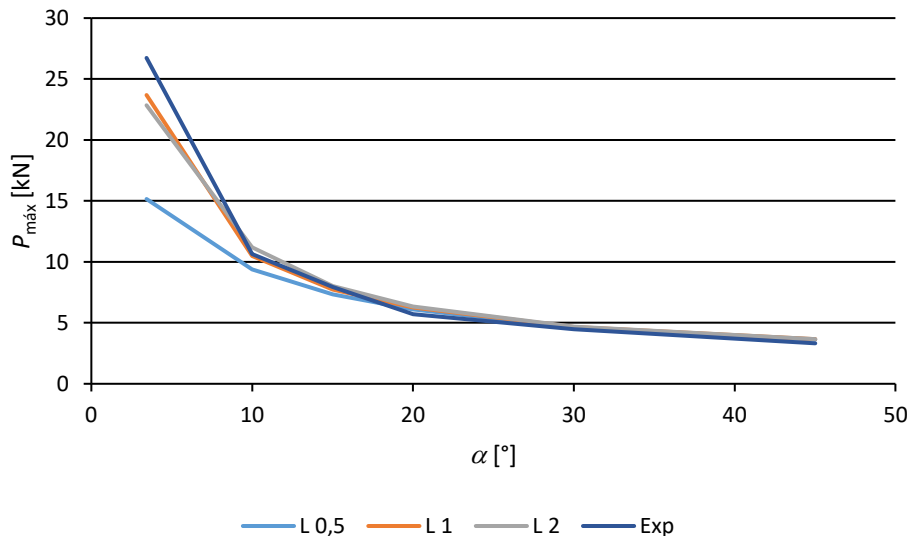


Figura 90 - Variação de $P_{\text{máx}}$ experimentais e obtidos numericamente com a lei de propagação triangular com *power law*=0,5, 1 e 2 para juntas *scarf* unidas com o adesivo Araldite® AV138 em função de α .

Analisando o efeito da alteração dos valores de *power law* no caso da lei de propagação triangular nas juntas coladas com Araldite® AV138 verifica-se que quando o valor de *power law* utilizado foi de 1 ou 2, os valores de $P_{\text{máx}}$ estão muito próximos dos experimentais com uma variação percentual máxima de 11,4% e 14,5% respetivamente

para o caso específico da junta em que $\alpha=3,43^\circ$. Já no caso em que foi utilizado *power law*=0,5 estes já se distanciam dos experimentais com um desvio percentual máximo de -43,4%.

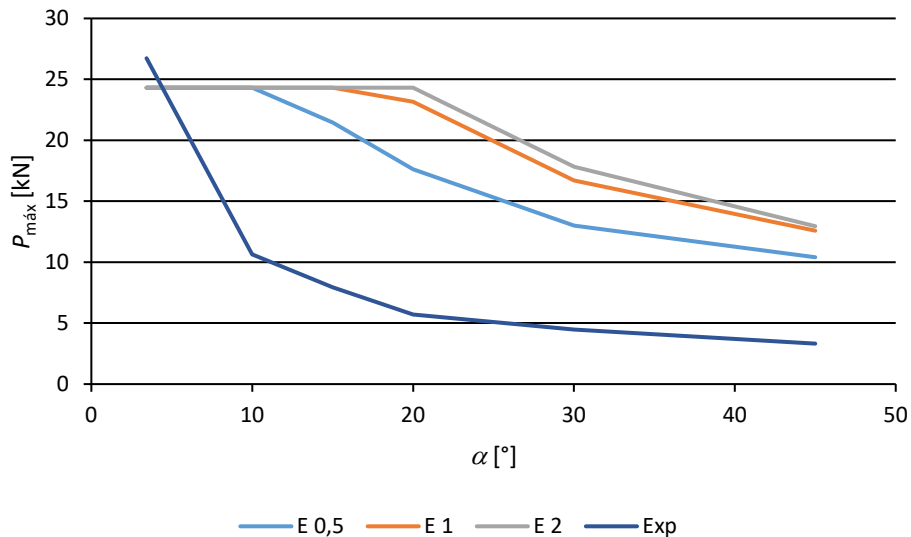


Figura 91 - Variação de $P_{máx}$ experimentais e obtidos numericamente com a lei de propagação exponencial com *power law*=0,5, 1 e 2 para juntas scarf unidas com o adesivo Araldite® AV138 em função de α .

Com a seleção da lei de propagação exponencial, apesar de se ter a percepção de que à medida que se utiliza um *power law* de valor maior os valores se afastam cada vez mais dos experimentais, os valores obtidos com esta lei estão muito distantes dos experimentais. Isto deve-se ao facto de que a utilização desta lei resulta em que o adesivo simulado seja capaz de sustentar forças muito superiores ao real.

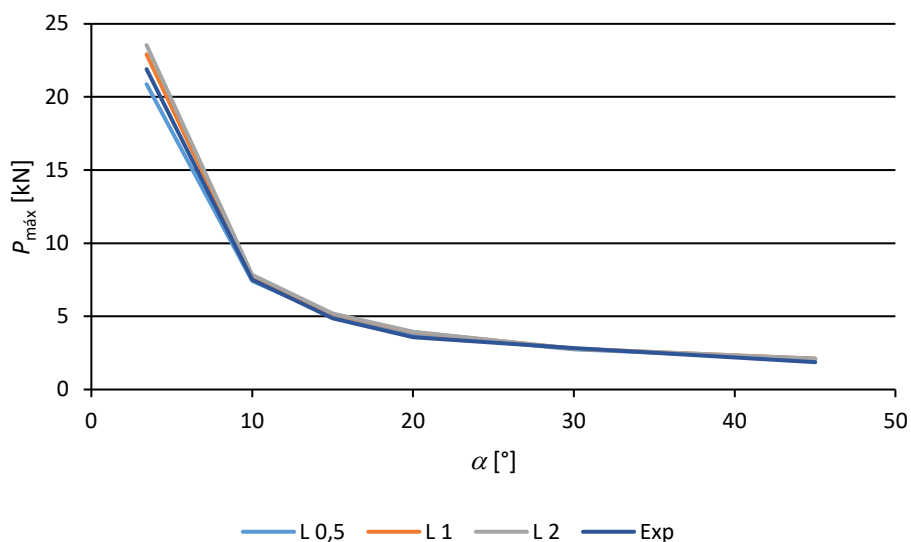


Figura 92 – Variação de $P_{máx}$ experimentais e obtidos numericamente com a lei de propagação triangular com *power law*=0,5, 1 e 2 para juntas scarf unidas com o adesivo Araldite® 2015 em função de α .

No caso do adesivo Araldite® 2015 com a utilização da lei de propagação triangular, diferentes valores de *power law* encontram-se praticamente que sobrepostos com os valores experimentais. Verifica-se uma variação percentual máxima de 11,6%, 12,5% e 12,5% para os valores de *power law*=0,5, 1 e 2, respetivamente.

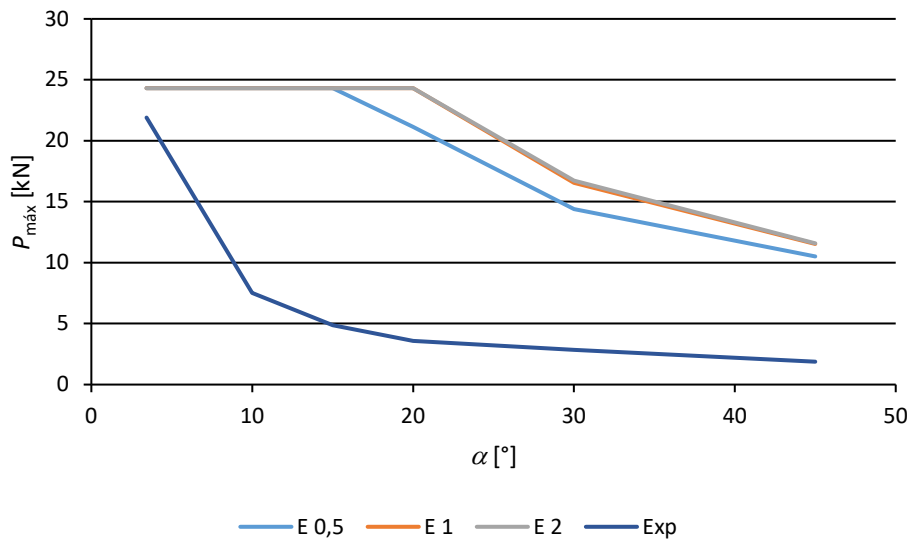


Figura 93 – Variação de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e obtidos numericamente com a lei de propagação exponencial com *power law*=0,5, 1 e 2 para juntas *scarf* unidas com o adesivo Araldite® 2015 em função de α .

Já no caso da utilização da lei de propagação exponencial, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente sobrestimam consideravelmente os experimentais.

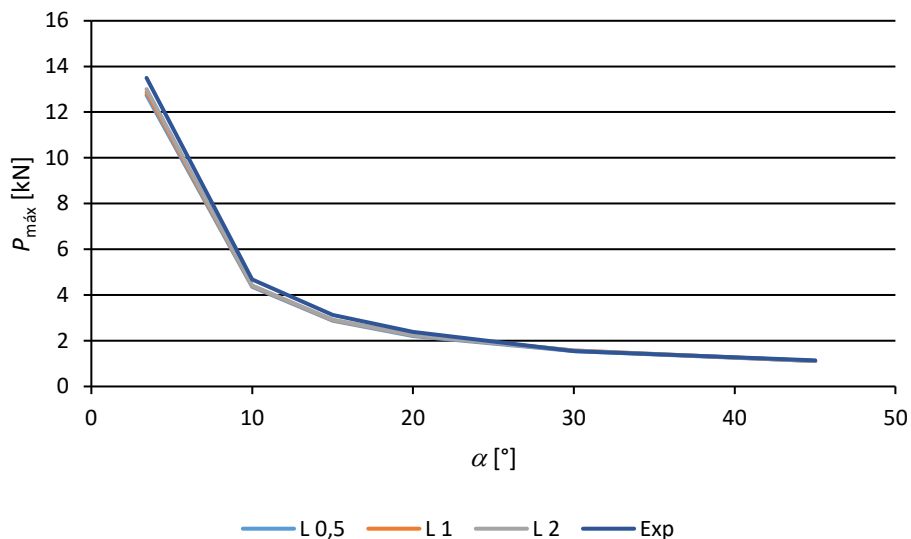


Figura 94 - Variação de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e obtidos numericamente com a lei de propagação triangular com *power law*=0,5, 1 e 2 para juntas *scarf* unidas com o adesivo SikaForce® 7752 em função de α .

Tal como em ambos os casos anteriores, a previsão numérica utilizando a lei de propagação triangular praticamente que sobrepõe os valores experimentais nas juntas

unidas com o adesivo SikaForce® 7752. Observando a variação máxima percentual neste caso verifica-se que, para os valores de *power law* utilizados entre 0,5 e 2, esta é de 8,3%, 7,2% e 6,9%, respetivamente.

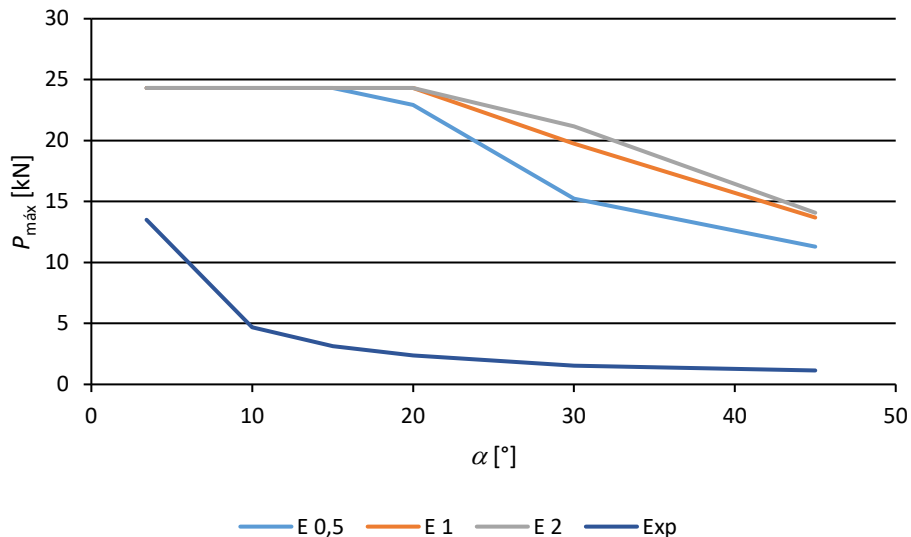


Figura 95 - Variação de $P_{máx}$ experimentais e obtidos numericamente com a lei de propagação exponencial com *power law*=0,5, 1 e 2 para juntas scarf unidas com o adesivo SikaForce® 7752 em função de α .

Com a lei de propagação exponencial verifica-se novamente que, também para o adesivo SikaForce® 7752, independentemente do *power law*, as forças obtidas numericamente são em tudo superiores aos valores obtidos experimentalmente.

Os gráficos nas seguintes figuras (Figura 96 a Figura 101) remetem aos valores obtidos de U nos três adesivos em função das diferentes leis de propagação, *power law* e α .

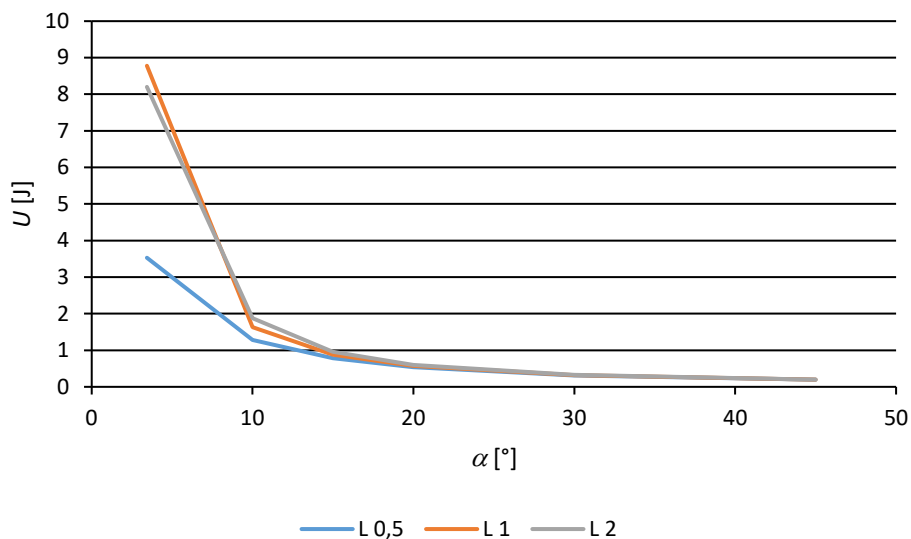


Figura 96 - Variação de U obtida numericamente utilizando a lei de propagação triangular com diferentes valores de *power law* em função de α para juntas unidas com o adesivo Araldite® AV138.

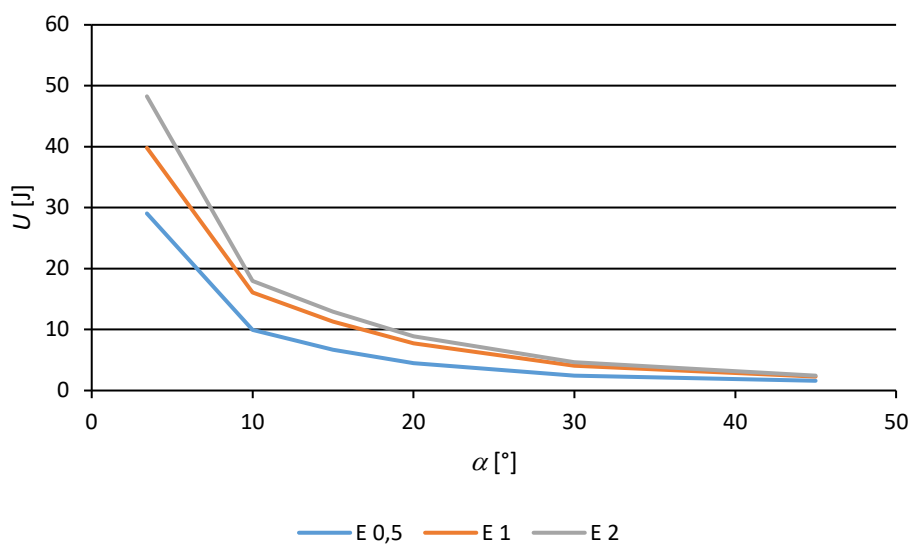


Figura 97 - Variação de U obtida numericamente utilizando a lei de propagação exponencial com diferentes valores de *power law* em função de α para juntas unidas com o adesivo Araldite® AV138.

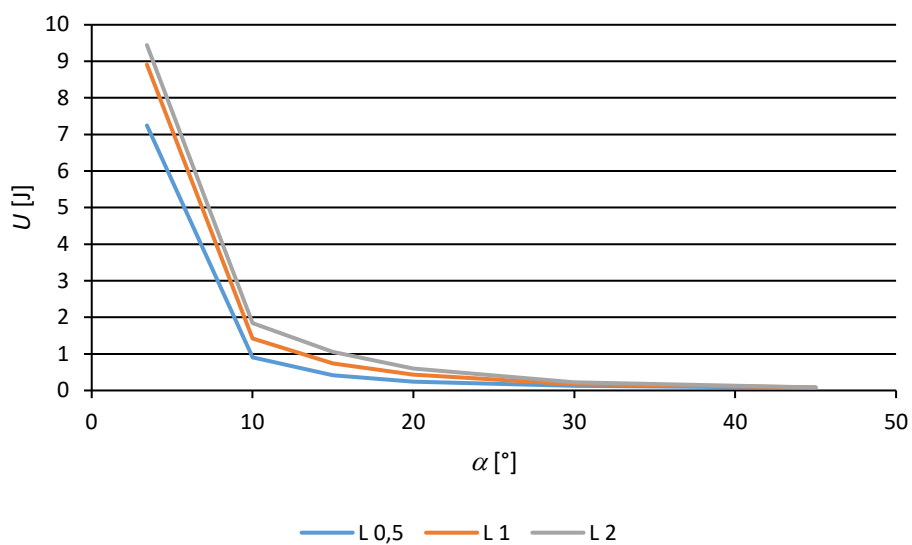


Figura 98 - Variação de U obtida numericamente utilizando a lei de propagação triangular com diferentes valores de *power law* em função de α para juntas unidas com o adesivo Araldite® 2015.

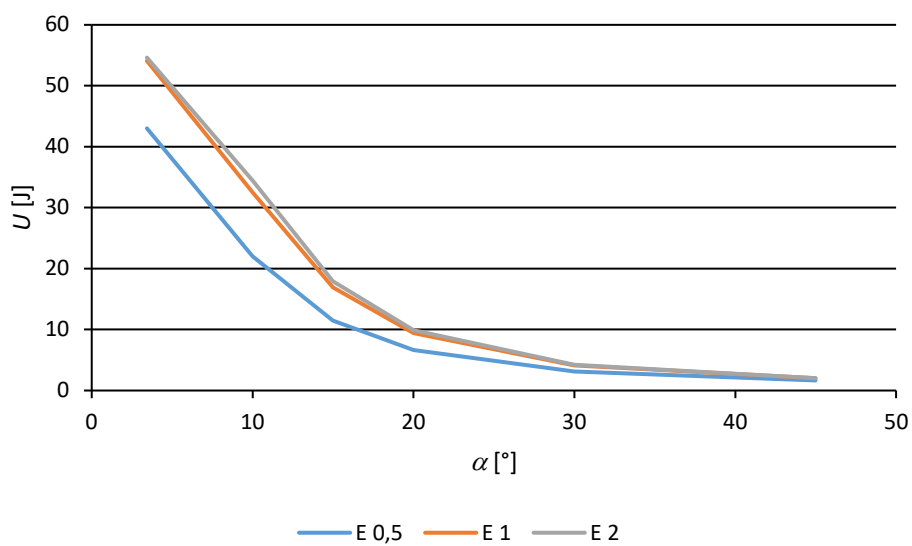


Figura 99 - Variação de U obtida numericamente utilizando a lei de propagação exponencial com diferentes valores de *power law* em função de α para juntas unidas com o adesivo Araldite® 2015.

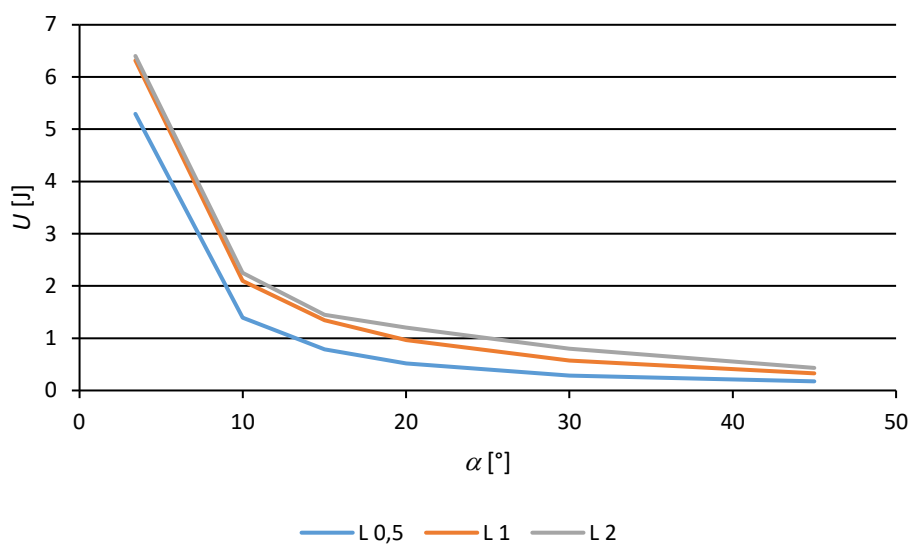


Figura 100 - Variação de U obtida numericamente utilizando a lei de propagação triangular com diferentes valores de *power law* em função de α para juntas unidas com o adesivo SikaForce® 7752.

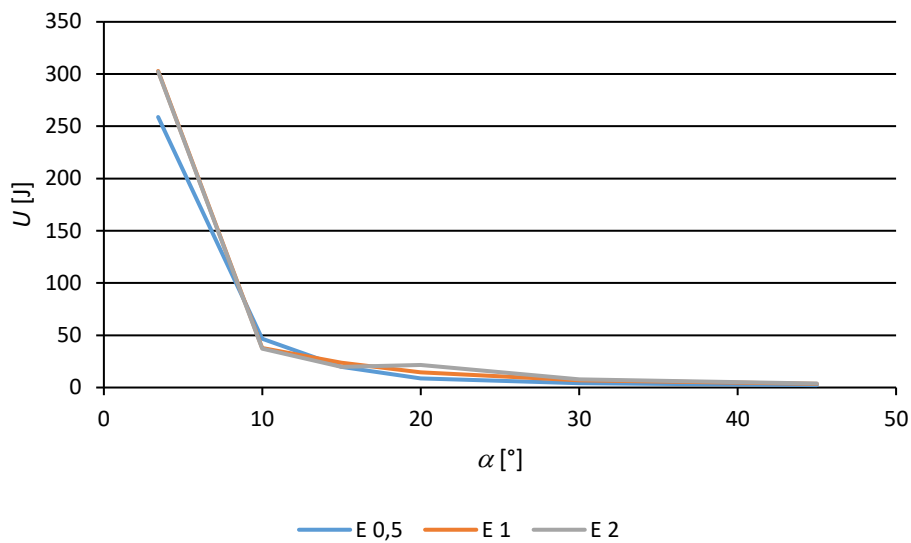


Figura 101 - Variação de U obtida numericamente utilizando a lei de propagação exponencial com diferentes valores de $power\ law$ em função de α para juntas unidas com o adesivo SikaForce® 7752.

Tal como se verificou anteriormente no caso da análise de U para os diferentes critérios de iniciação, nos três adesivos verifica-se que, com a lei triangular, os valores obtidos estão de em proporção com os de $P_{m\acute{a}x}$. Verifica-se novamente que, no caso da lei de propagação exponencial, o valor obtido para U é muito maior que no caso da lei de propagação triangular, estando de acordo com os valores das forças máximas atingidas.

3.2.5.3 Comparação dos resultados obtidos com modelos de dano coesivo

Com o intuito de estimar a capacidade e previsão do MEFX em prever a resistência de juntas adesivas de chanfro interior, foram comparados os resultados numéricos obtidos pelo MEFX com os resultados obtidos utilizando o MDC de um trabalho anterior [61].

A Figura 102, Figura 103 e Figura 104 mostra a evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função de α , para as juntas ligadas com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 respetivamente. Conforme se pode observar, para juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 o MEFX, para valores de α superiores a 15° sobrestima os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em comparação ao MDC, e para valores de α iguais ou inferiores a 15° subestima os mesmos. A variação percentual entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pelo MEFX em relação aos do MDC é de -26,0%, -7,2%, -1,1%, 3,2%, 8,0% e 9,5% para $\alpha=3,43^\circ$, 10°, 15°, 20°, 30° e 45°, respetivamente. Salvo o caso em que $\alpha=3,43^\circ$, verifica-se que o MEFX é capaz de prever a resistência de forma consideravelmente aproximada relativamente ao MDC.

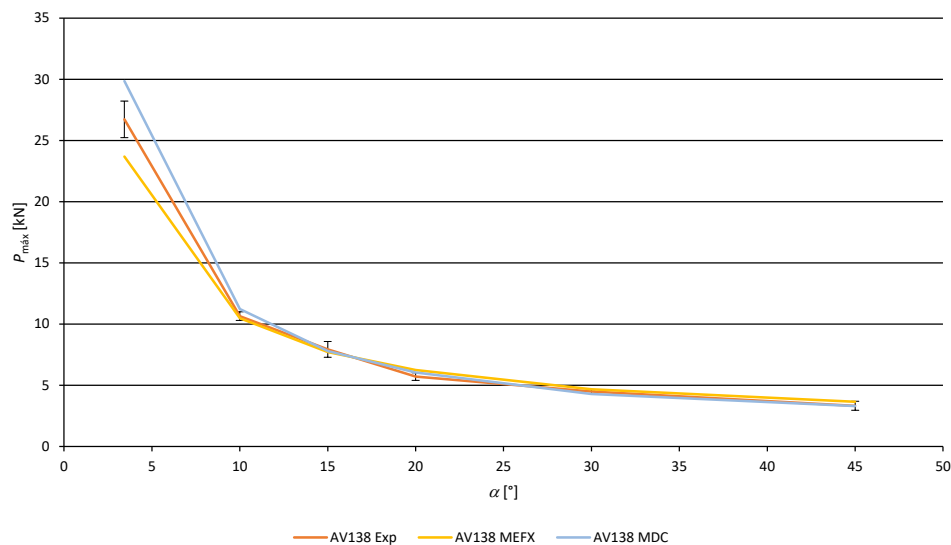


Figura 102 - Comparação entre os valores de $P_{máx}$ obtidos experimentalmente com os obtidos numericamente com o MEFX e MDC para o adesivo Araldite® AV138 em função de α .

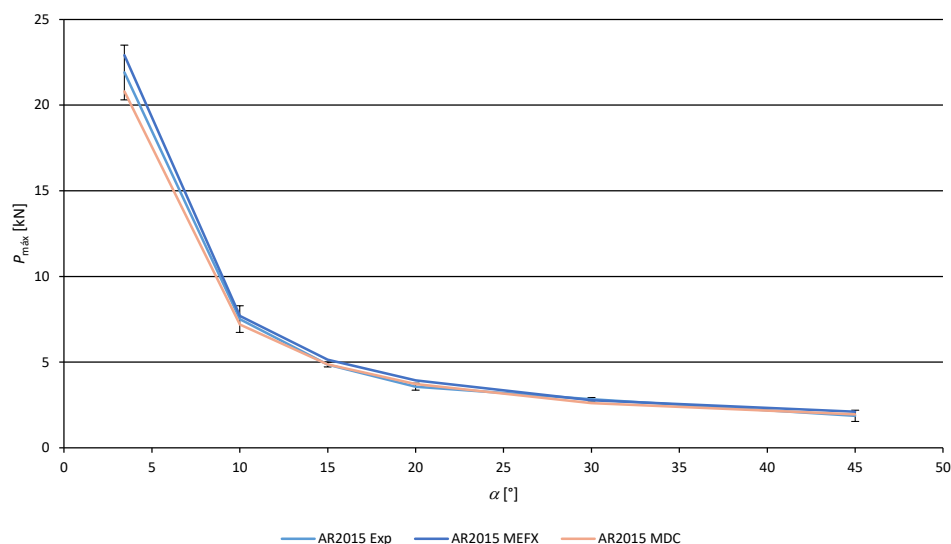


Figura 103 - Comparação entre os valores de $P_{máx}$ obtidos experimentalmente com os obtidos numericamente com o MEFX e MDC para o adesivo Araldite® 2015 em função de α .

Observando os resultados obtidos para juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015, verifica-se que o MEFX sobrestima os valores de $P_{máx}$ em comparação ao MDC. A variação percentual entre os valores de $P_{máx}$ obtidos pelo MEFX em relação aos do MDC é de 9,2%, 6,5%, 5,4%, 5,2%, 6,2% e 7,3% para $\alpha=3,43^\circ$, 10° , 15° , 20° , 30° e 45° , respetivamente. Verifica-se que para as juntas de chanfro interior que utilizam o adesivo Araldite® 2015 o MEFX é capaz de prever a resistência de forma muito aproximada relativamente ao MDC.

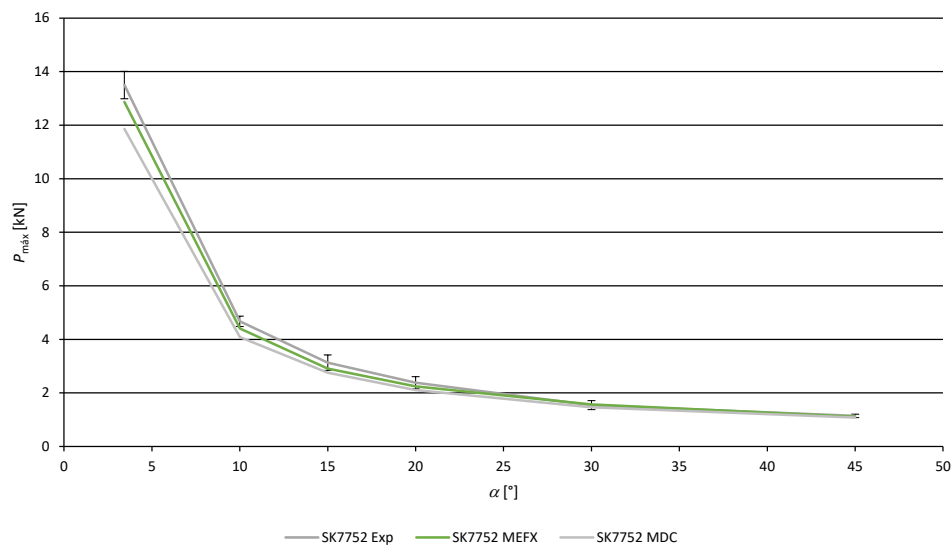


Figura 104 - Comparação entre os valores de $P_{máx}$ obtidos experimentalmente com os obtidos numericamente com o MEFX e MDC para o adesivo SikaForce® 7752 em função de α .

No caso das juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752 o MEFX sobrestima os valores de $P_{máx}$ em comparação ao MDC. A variação percentual entre os valores de $P_{máx}$ obtidos pelo MEFX em relação aos do MDC é de 7,9%, 7,3%, 5,1%, 5,9%, 6,7% e 3,3% para os valores de α compreendidos entre 3,43° e 45°, respectivamente. Assim é possível verificar que para as juntas de chanfro interior que utilizam o adesivo SikaForce® 7752 o MEFX é capaz de prever a resistência de forma mais aproximada ao MDC do que nos dois casos anteriores.

Analisando os gráficos da evolução de $P_{máx}$ é possível afirmar que as previsões realizadas numericamente estão próximas das realizadas experimentalmente e das obtidas por MDC. Verifica-se que a resistência neste tipo de junta aumenta com a redução de α , cuja evolução é tipicamente exponencial. Isto deve-se ao aumento da área de adesivo presente na junta, mesmo tendo em conta a não tão favorável distribuição de tensões, com a redução de α . Nos casos em que as juntas têm ângulos inferiores a 20°, há um aumento significativo da resistência das mesmas comparativamente às que têm α superiores a 20°. Deve-se este comportamento à inexistência de grandes variações de tensão ao longo da camada de adesivo aliado ao aumento exponencial da área de ligação, o que faz com que um adesivo frágil, mas mais resistente, apresente resultados superiores aos de adesivos dúcteis menos resistentes.

3.2.6 Análise de resultados

Com os resultados obtidos nos estudos realizados nesta dissertação é possível concluir que as tensões de arrancamento aumentam com a rigidez do adesivo, conduzindo a maiores gradientes e picos de tensão nas extremidades da ligação. Com o aumento de α as tensões de arrancamento normalizadas aumentam significativamente, tendendo

para valores próximos da tensão de corte média. A diminuição do ângulo nestas juntas diminui consideravelmente o esforço de arrancamento. Com a observação dos três adesivos verifica-se que o aumento da rigidez do adesivo conduz a maiores gradientes e picos de tensão, nas extremidades da ligação

Quanto às tensões de corte, denota-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 e que por sua vez pode provocar rotura. As tensões de corte normalizadas caracterizam-se 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 .

Em relação à previsão de resistência, a resistência prevista para os três adesivos aproxima-se consideravelmente da experimental (Figura 105).

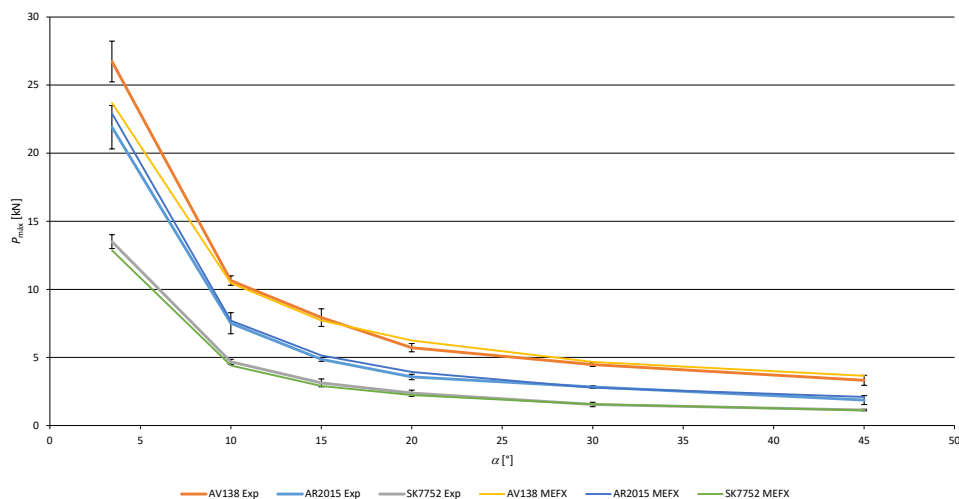


Figura 105 – Comparação dos valores de $P_{máx}$ em função de α obtidos numericamente com MEFX e experimentalmente para os três adesivos.

De todos os cenários equacionados, os resultados de previsão de resistência que apresentaram o menor desvio face aos valores experimentais foram obtidos pelo MEFX com o critério de iniciação QUADS, lei de propagação triangular e *power law* 1. Deste modo, pode-se afirmar que utilizando o MEFX, com a devida parametrização, verifica-se a convergência entre os valores de previsão de resistência e os obtidos experimentalmente. Salvo no caso específico em que $\alpha=3,43^\circ$ e utilizado o adesivo Araldite® AV138, em que a previsão se destaca por um maior desvio face ao alto valor de $P_{máx}$ experimental.

**CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE
TRABALHOS FUTUROS**

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo teve como principal objetivo a validação de diferentes parametrizações de MEFX para a previsão da resistência mecânica de juntas adesivas de chanfro interior. Foram considerados os critérios de iniciação QUADS, MAXS, MAXPS, QUADE, MAXE e MAXPE, as leis de propagação triangular e exponencial e ainda *power law* de 0,5, 1 e 2. Com essa finalidade, foram considerados três adesivos, um dúctil, um frágil e um moderadamente dúctil.

Os resultados obtidos mostraram que o comportamento mecânico das juntas é dependente do tipo de adesivo e do ângulo α . Um adesivo mais rígido e frágil, leva a picos de tensões de arrancamento na junta, enquanto um adesivo mais flexível e dúctil, apresenta maior estabilidade de tensões. O aumento de α resulta no aumento significativo das tensões de arrancamento normalizadas. Já a diminuição de α resulta numa redução de mais de dez vezes da tensão de arrancamento na zona intermédia da camada do adesivo, mostrando que quanto menor for α , menor é a tensão de arrancamento a que a junta está sujeita. O efeito da redução de espessura do substrato, particularmente para valores de α reduzidos, traduz-se em tensões de arrancamento 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. As tensões de corte normalizadas caracterizam-se pelo facto de que independentemente do valor de α , estas apresentam picos nas extremidades e um comportamento mais uniforme na zona interior da ligação. Com a diminuição de α verifica-se que estes picos tendem a aumentar, sendo particularmente significativa para $\alpha < 10^\circ$, principalmente nos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. A diminuição de α aumenta também exponencialmente o comprimento da zona ligada, o que usualmente resulta na sobreposição do efeito das tensões e permite um grande aumento da resistência da junta.

A análise numérica pelo MEFX mostrou que é possível, com precisão, prever a resistência das juntas de chanfro interior utilizando os critérios de iniciação QUADS e MAXS. Os resultados obtidos pelo MEFX com o critério de iniciação QUADS foram os mais próximos dos resultados experimentais. Já os critérios de iniciação QUADE, MAXE, MAXPE e MAXPS não permitem obter resultados satisfatórios para todos os ângulos das juntas e adesivos utilizados. O estudo do efeito da lei de propagação permitiu concluir que no caso de adesivos frágeis, a lei de propagação triangular com *power law* 1 apresenta melhores resultados. Quanto mais dúctil o adesivo, menor a influência do

parâmetro do critério energético de propagação, observando-se que os três valores testados (0,5; 1 e 2) apresentam previsões idênticas de $P_{máx}$. A lei de propagação exponencial, independentemente do valor de *power law* não permite realizar uma previsão precisa da resistência das juntas estudadas. Na comparação feita entre o método MDC e MEFX observou-se que ambos são viáveis, apresentando valores muito próximos dos obtidos experimentalmente. O MEFX revelou ser adequado para previsão da resistência das juntas, utilizando os critérios QUADS e MAXS, situação em que apresenta resultados muito precisos. Desta forma é possível concluir que foi possível avaliar as potencialidades do MEFX na previsão da resistência das juntas e proporcionar assim uma indicação sobre o comportamento de diferentes adesivos em juntas de chanfro interior.

Na sequência deste estudo, podem ser desenvolvidos trabalhos utilizando substratos de maior resistência por forma a evitar a plastificação dos mesmos antes da rotura do adesivo. Recorrendo a adesivos com propriedades diferentes de modo a aprofundar a validação do método. Focar os ângulos inferiores a 20° visto estes apresentarem comportamentos distintos dos maiores a estes.

REFERÊNCIAS

5 REFERÊNCIAS

1. Barbosa, N.G.d.C., *Comparação experimental e numérica por modelos de dano coesivo de diversos tipos de juntas adesivas*. 2017.
2. da Silva, L.F.M., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. Vol. 1. 2011: Springer.
3. Cognard, P., *Handbook of Adhesives and Sealants, Volume 2*. Vol. 2. 2006: ELSEVIER Ltd.
4. Pinto, A.M.G., *Apontamentos da unidade curricular de Processos de Ligação: Modos de carregamento, modos de rotura e tipos de juntas adesivas*. 2018, Mestrado de Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
5. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, e M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Vol. Edições Técnicas. 2007, Porto: Publindústria.
6. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschouerschnitten*. Luftfahrtforschung 15, 1938: p. 41-47.
7. Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.

16. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011: Springer.
22. 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.
23. 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.
24. Daudeville, L. e P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1–4): p. 547-555.
25. 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.
26. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. 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.

32. 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.
33. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008: Wiley.
34. 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.
35. 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.
36. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
37. 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.
38. 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**(1-2): p. 117-122.
39. 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**: p. 99-110.
40. Gacoin, A., P. Lestriez, J. Assih, A. Objois, e Y. Delmas, *Comparison between experimental and numerical study of the adhesively bonded scarf joint and double scarf joint: Influence of internal singularity created by geometry of the double scarf joint on the damage evolution*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(5): p. 572-579.
41. 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, 2009. **40**(2): p. 149-157.
42. Silva, D., R. Campilho, F. Silva, e U. Carvalho, *Application a direct/cohesive zone method for the evaluation of scarf adhesive joints*. Applied Adhesion Science, 2018. **6**(1): p. 1-20.
43. 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.
44. *ASTM E8 / E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. 2016, ASTM International: West Conshohocken, PA.
45. 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.
46. Campilho, R., *Adhesive, welded and weld-bonded single-lap joints: Numerical technique for strength prediction*. Vol. 24. 2012. 35-42.
47. 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.

48. 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.
49. 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.
50. Alves, D., R. Campilho, R. Moreira, F. Silva, L.J.I.J.o.A. Da Silva, e Adhesives, *Experimental and numerical analysis of hybrid adhesively-bonded scarf joints*. 2018. **83**: p. 87-95.
51. 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.
52. *Abaqus® Documentation*. 2013, Dassault Systèmes: Vélizy-Villacoublay.
53. Ferreira, L.R.F., *Estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração*. 2017, Tese de Mestrado de Engenharia Mecânica. Instituto Superior Engenharia do Porto: Porto.
54. 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.
55. Alves, D.L., *Ligações adesivas com chanfro interior entre aderentes distintos*, in *Engenharia Mecânica*. 2016, ISEP: Porto.
56. 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.
57. 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.
58. 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.
59. 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.
60. 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.
61. da Silva, D.F.O., *Utilização do método direto de obtenção de leis coesivas para previsão de resistência de juntas com chanfro interior*. 2017, Instituto Politecnico do Porto (Portugal).