



Aplicação do método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX) para a previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição dupla

TELMO FERREIRA SANTOS

Junho de 2016

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO (MEFX) PARA A PREVISÃO DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS DE SOBREPOSIÇÃO DUPLA

Telmo Ferreira Santos

1110845

2015/2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO (MEFX) PARA A PREVISÃO DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS DE SOBREPOSIÇÃO DUPLA

Telmo Ferreira Santos

1110845

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

2015/2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

A definir

Orientador

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

A definir

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento em especial ao meu orientador, Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho pelo precioso apoio fornecido na parte de simulação numérica, pela sua disponibilidade e informação partilhada que foi muito útil para a realização deste trabalho.

À minha família e amigos pelo apoio e compreensão.

PALAVRAS CHAVE

Junta adesiva, adesivos estruturais, junta de sobreposição dupla, ensaios experimentais, Método de Elementos Finitos eXtendido, Modelos de Dano Coesivo.

RESUMO

As ligações adesivas têm sido utilizadas em diversas áreas de aplicação. A utilização das juntas adesivas em aplicações industriais tem vindo a aumentar nos últimos anos, por causa das vantagens significativas que apresentam comparativamente com os métodos tradicionais de ligação tais como soldadura, ligações aparafusadas e rebitadas. A redução de peso, redução de concentrações de tensões e facilidade de fabrico são algumas das principais vantagens das ligações adesivas. Devido à crescente utilização das ligações adesivas, torna-se necessário a existência de ferramentas que permitam prever a resistência das juntas com elevada precisão. Assim, para a análise de juntas adesivas, está a ser cada vez mais utilizado o método de Elementos Finitos. Neste âmbito o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX) perfila-se como um método capaz de prever o comportamento da junta, embora este ainda não esteja convenientemente estudado no que diz respeito à aplicação a juntas adesivas.

Neste trabalho é apresentado um estudo experimental e numérico pelo MEFX de juntas de sobreposição dupla, nas quais são aplicados adesivos que variam desde frágeis e rígidos, como o caso do Araldite® AV138, até adesivos mais dúcteis, como o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7888. Foram considerados substratos de alumínio (AW6082-T651) em juntas com diferentes comprimentos de sobreposição, sendo sujeitos a esforços de tração de forma a avaliar o seu desempenho. Na análise numérica foi realizada uma análise da distribuição de tensões na camada adesiva, a previsão da resistência das juntas pelo MEFX segundo critérios de iniciação de dano baseados em tensões e deformações, e ainda um estudo sobre o critério energético de propagação de dano. A análise por MEFX revelou que este método é bastante preciso quando usados os critérios de iniciação de dano MAXS e QUADS, e parâmetro com valor de 1 no critério energético de propagação de dano. Apesar de ser um método pouco estudado na literatura comparativamente com outros, o MEFX apresentou resultados muito satisfatórios.

KEYWORDS

Adhesive joint, structural adhesives, double-lap joint, experimental tests, eXtended Finite Element Method, Cohesive Zone Models.

ABSTRACT

Adhesive joints have been used in various application fields. The use of adhesive joints in industrial applications has been increasing in recent years because of the significant advantages offered compared to traditional joining methods such as welding, fastening and riveting. The weight reduction, reduced stress concentrations and ease of manufacture are some of the advantages of adhesive bonding. The existence of design tools is necessary to predict the strength of joints with high accuracy due to the increasing use of adhesive bonding. For the analysis of adhesively-bonded joints, the Finite Element Method is being increasingly used. In this context, the eXtended Finite Element Method (XFEM) is emerging as a method to predict the joints' behaviour, although this has not yet been adequately studied for the application to adhesive joints.

This work presents an experimental and numerical study by XFEM of double-lap joints, in which adhesives ranging from brittle and strong, as the case of the Araldite® AV138, to more ductile adhesives, as the Araldite® 2015 and the Sikaforce® 7888, are applied. Aluminium substrates were considered (AW6082-T651) in joints with different overlap lengths, subjected to a tensile load, in order to evaluate their performance. In the numerical study, an analysis of the stress distributions in the adhesive layer, a strength prediction by XFEM considering damage initiation criteria based on stresses and strains, and also a study on the energy criterion for damage propagation, were carried out. The XFEM analysis revealed that this method is very accurate when the MAXS and QUADS damage initiation criteria, and a parameter of 1 in the damage propagation criterion, are considered. Despite this method is not conveniently studied in the literature compared to others, it provided very satisfactory results.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
EF	Elementos Finitos
JSD	Junta de sobreposição dupla
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
MEFX	Método de Elementos Finitos eXtendido
PS	<i>Polystyrene</i>
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i>
QUADE	Critério quadrático de deformação
QUADS	Critério quadrático de tensão

Lista de Símbolos

τ_{xy}	Tensão de corte
E	Módulo de <i>Young</i>
G	Módulo de corte
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
L_O	Comprimento de sobreposição
L_T	Comprimento total da JSD
$P_{m\acute{a}x}$	Força máxima
t_A	Espessura da camada de adesivo
t_n^0	Resistência coesiva à tração
t_p	Espessura dos substratos
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
ν	Coefficiente de <i>Poisson</i>
δ_n^0	Deslocamento correspondente à resistência coesiva à tração
δ_s^0	Deslocamento correspondente à resistência coesiva ao corte
ϵ	Deformação
$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Deformação principal máxima
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão principal máxima
σ_y	Tensão de arrancamento
τ_{avg}	Tensão de corte média

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – COMPONENTES DE UMA JUNTA ADESIVA [4]	6
FIGURA 2 – COMPARAÇÃO DE UMA SUPERFÍCIE REBITADA COM JUNTAS UNIDAS POR ADESIVOS [6]	7
FIGURA 3 – PARTES CONSTITUINTES DE UM AVIÃO FIXADAS ATRAVÉS DO PROCESSO DE COLAGEM [7] ..	8
FIGURA 4 – DIVERSOS PONTOS DE APLICAÇÃO DE ADESIVOS NO VEÍCULO [8]	8
FIGURA 5 – ALGUMAS APLICAÇÕES DE JUNTAS ADESIVAS, A) - RAQUETE DE TÊNIS, (B) - ESTRUTURA SANDWICH [9]	9
FIGURA 6 – TIPOS DE SOLICITAÇÃO QUE PODEM ESTAR SUJEITAS AS JUNTAS ADESIVAS [2]	9
FIGURA 7 – DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE CORTE [10]	10
FIGURA 8 – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE CLIVAGEM E ARRANCAMENTO [10]	11
FIGURA 9 – COMPORTAMENTO DE UM ADESIVO RÍGIDO E DE UM ADESIVO DÚCTIL AO ARRANCAMENTO [9]	11
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS DIFERENTES MODOS DE ROTURA [11]	12
FIGURA 11 – TIPOS DE CONFIGURAÇÕES DE JUNTAS [2]	12
FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE CORTE EM JSS COM E SEM FILETE DE ADESIVO [12]	13
FIGURA 13 – TENSÕES DE ARRANCAMENTO NO ADESIVO NUMA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO DUPLA [12]	14
FIGURA 14 – UNIÕES EM TUBOS PARA CARGAS AXIAIS E TORSIONAIS [12]	15
FIGURA 15 – GRUPOS DE ADESIVOS ESTRUTURAIS MAIS REPRESENTATIVOS [16]	16
FIGURA 16 – JSS COM ÂNGULOS DIFERENTES DE ARREDONDAMENTO [26]	20
FIGURA 17 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM FUNÇÃO DO GRAU DE ARREDONDAMENTO DOS SUBSTRATOS [26]	21
FIGURA 18 – PROCESSO DE ROTURA DAS JSS; (A) ESQUEMA DE ROTURA OBTIDA NUMERICAMENTE; (B) ROTURA NO	25
FIGURA 19 – PROPAGAÇÃO DO DANO NO MEFX USANDO O CONCEITO DE NÓS FANTASMAS ANTES (A) E DEPOIS (B) DA REPARTIÇÃO DE ELEMENTOS FRATURADOS EM SUBELEMENTOS [58]	27
FIGURA 20 – PROPAGAÇÃO DO DANO PELO ALGORITMO MEFX, INICIANDO NA EXTREMIDADE DA JUNTA (A) E CRESCENDO HORIZONTALMENTE AO LONGO DA CAMADA ADESIVA (B) PARA A CONFIGURAÇÃO A [58]	28

FIGURA 21 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS $P-\delta$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS (MEFX) PARA A CONFIGURAÇÃO A [58]	29
FIGURA 22 – PROPAGAÇÃO DA FENDA NUMA JSS COM $L_0=20$ MM USANDO O MEFX (AS SETAS REPRESENTAM AS DIREÇÕES DE TENSÃO PRINCIPAL MÁXIMA): INICIAÇÃO DE DANO DENTRO DO ADESIVO NA EXTREMIDADE DO L_0 (A) E PROPAGAÇÃO DA FENDA SUBSTRATO DE ALUMÍNIO (B) [61]	29
FIGURA 23 – COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA OBTIDA EXPERIMENTAL E NUMERICAMENTE (MEFX) EM FUNÇÃO DE L_0 [61]	30
FIGURA 24 – GEOMETRIA E DIMENSÕES DA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES [62]	31
FIGURA 25 – REPRESENTAÇÃO DA MALHA PARA ANÁLISE DO DANO POR MDC E MEFX [62]	31
FIGURA 26 - CURVAS $P-\delta$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS À TEMPERATURA AMBIENTE(A) E 100°C (B) [62]	31
FIGURA 27 – MODELO HÍBRIDO MDC/MEFX (A) INICIAÇÃO DA FENDA NA REGIÃO POR MEFX (B) E CURVAS DE TENSÃO DE CARGA PARA OS MODELOS EXPERIMENTAIS E PELO MEF [64]	32
FIGURA 28 – CONFIGURAÇÃO DO MODELO HÍBRIDO [19]	34
FIGURA 29 – COMPARAÇÃO DAS PREVISÕES OBTIDAS PELOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS, MEFX E MDC [19]	34
FIGURA 30 – REPRESENTAÇÃO DA MALHA PARA ANÁLISE POR MDC E MEFX [67]	35
FIGURA 31 – CURVAS $P-l$ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE E NUMERICAMENTE PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $L_0=37,5$ MM (A) E PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7888 E $L_0=50$ MM (B) [67]	35
FIGURA 32 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM OS RESULTADOS OBTIDOS PELO MEFX PARA AS JUNTAS COLADAS COM OS ADESIVOS ARALDITE® AV138 E ARALDITE® 2015 [67] .	36
FIGURA 33 – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO (σ -E) DO ALUMÍNIO AW6082-T651 [69]	40
FIGURA 34 – CURVAS σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [69]	40
FIGURA 35 – CURVAS σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [70].....	42
FIGURA 36 – CURVA σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7888 [72]	43
FIGURA 37 – CONFIGURAÇÃO DA GEOMETRIA DO PROVETE DA JSD [1].....	44
FIGURA 38 – PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE POR LIXAGEM (A) E LIMPEZA DOS SUBSTRATOS (B) [1]	45
FIGURA 39 – ASPETO DOS SUBSTRATOS APÓS PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE [1]	45
FIGURA 40 – FIXAÇÃO E ALINHAMENTO DOS SUBSTRATOS [1]	45
FIGURA 41 – SUBSTRATO COM FIO DE PESCA CALIBRADO DE 0,2 MM [1]	46
FIGURA 42 – APLICAÇÃO DO ADESIVO SIKAFORCE® 7888 E FIXAÇÃO DA JUNTA [1]	46

FIGURA 43 – REMOÇÃO DO EXCESSO DE ADESIVO [1].....	47
FIGURA 44 – FIXAÇÃO DE UMA JUNTA ADESIVA NA MÁQUINA DE ENSAIOS SHIMADZU [1]	47
FIGURA 45 – CURVAS P - δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (JSD) PARA O ARALDITE® AV138, COM $L_0=12,5$ MM (A), $L_0=25$ MM (B), $L_0=37,5$ MM (C), $L_0=50$ MM (D) [1].....	48
FIGURA 46 – CURVAS P - δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (JSD) PARA O ARALDITE® 2015, COM $L_0=12,5$ MM (A), $L_0=25$ MM (B), $L_0=37,5$ MM (C), $L_0=50$ MM (D) [1].....	49
FIGURA 47 – CURVAS P - δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (JSD) PARA O SIKAFORCE® 7888, COM $L_0=12,5$ MM (A), $L_0=25$ MM (B), $L_0=37,5$ MM (C), $L_0=50$ MM (D) [1].....	50
FIGURA 48 – MODOS DE ROTURA (JSD): ARALDITE® AV138 COM $L_0=12,5$ MM (A), $L_0=25$ MM (B), $L_0=37,5$ MM (C), $L_0=50$ MM (D) [1].....	51
FIGURA 49 – MODOS DE ROTURA (JSD): ARALDITE® 2015 COM $L_0=12,5$ MM (A), $L_0=25$ MM (B), $L_0=37,5$ MM (C), $L_0=50$ MM (D) [1].....	52
FIGURA 50 – MODOS DE ROTURA (JSD): SIKAFORCE® 7888 COM $L_0=12,5$ MM (A), $L_0=25$ MM (B), $L_0=37,5$ MM (C), $L_0=50$ MM (D)	53
FIGURA 51 – VALORES MÉDIOS DE $P_{MÁX}$ E DESVIO-PADRÃO EM FUNÇÃO DE L_0 PARA OS DIFERENTES ADESIVOS EM JSD [1]	54
FIGURA 52 – ATRIBUIÇÃO DE SECÇÃO SÓLIDAS PARA MODELAÇÃO DOS ADERENTES E ADESIVO	55
FIGURA 53 – DISPOSIÇÃO DO NÚMERO DE ELEMENTOS DA MALHA NA REGIÃO DA SOBREPOSIÇÃO	57
FIGURA 54 – SENTIDO DO EFEITO <i>BIAS</i> NA REGIÃO DOS SUBSTRATOS	57
FIGURA 55 – REPRESENTAÇÃO DA MALHA DE UMA JSD COM $L_0=12,5$ MM	57
FIGURA 56 – CONDIÇÕES FRONTEIRA IMPOSTAS NOS MODELOS NUMÉRICOS	58
FIGURA 57 – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES σ_Y EM JSD: ARALDITE® AV138 (A); ARALDITE® 2015 (B) E SIKAFORCE® 7888 (C).....	61
FIGURA 58 – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES τ_{XY} EM JSD: ARALDITE® AV138 (A), ARALDITE® 2015 (B) E SIKAFORCE® 7888 (C).....	62
FIGURA 59 – EXEMPLO DA INICIAÇÃO DA FENDA E RESPECTIVA PROPAGAÇÃO PARA O SUBSTRATO USANDO O CRITÉRIO MAXPS	64
FIGURA 60 –SELEÇÃO DA DIREÇÃO DE PROPAGAÇÃO DA FENDA PARA O CRITÉRIO MAXS.....	64
FIGURA 61 –DIREÇÃO DE PROPAGAÇÃO DA FENDA NUMA JUNTA ADESIVA	64
FIGURA 62 – CURVAS P - Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE E NUMERICAMENTE PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 COM $L_0=12,5$ MM (A), PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015 COM $L_0=37,5$ MM (B) E PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7888 COM $L_0=25$ MM (C)	65

FIGURA 63 – VARIAÇÃO DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA OS DIFERENTES CRITÉRIOS DE INICIAÇÃO DE DANO USANDO O ADESIVO ARALDITE® AV138	66
FIGURA 64 – VARIAÇÃO DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA OS DIFERENTES CRITÉRIOS DE INICIAÇÃO DE DANO USANDO O ADESIVO ARALDITE® 2015.....	67
FIGURA 65 – VARIAÇÃO DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA OS DIFERENTES CRITÉRIOS DE INICIAÇÃO DE DANO USANDO O ADESIVO SIKAFORCE® 7888.....	68
FIGURA 66 – PARÂMETRO UTILIZADO PARA O ESTUDO DO EFEITO DA LEI DE PROPAGAÇÃO.....	69
FIGURA 67 – VARIAÇÃO DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA O CRITÉRIO ENERGÉTICO DE <i>POWER LAW</i> USANDO O ADESIVO ARALDITE® AV138	70
FIGURA 68 – VARIAÇÃO DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA O CRITÉRIO ENERGÉTICO DE <i>POWER LAW</i> USANDO O ADESIVO ARALDITE® 2015.....	70
FIGURA 69 – VARIAÇÃO DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA O CRITÉRIO ENERGÉTICO DE <i>POWER LAW</i> USANDO O ADESIVO SIKAFORCE® 7888	71
FIGURA 70 – $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA O ARALDITE® AV138: RESULTADOS EXPERIMENTAIS, PREVISÃO POR MDC E PELO MEFX	72
FIGURA 71 – $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA O ARALDITE® 2015: RESULTADOS EXPERIMENTAIS, PREVISÃO POR MDC E PELO MEFX	72
FIGURA 72 – $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA O SIKAFORCE® 7888: RESULTADOS EXPERIMENTAIS, PREVISÃO POR MDC E PELO MEFX	73

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – COMPARAÇÃO ENTRE OS DIVERSOS PROCESSOS DE LIGAÇÃO [3]	5
TABELA 2 – VANTAGENS E LIMITAÇÕES DAS JUNTAS ADESIVAS [5]	7
TABELA 3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [71].....	41
TABELA 4 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [70].....	42
TABELA 5 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7888 [72].....	43
TABELA 6 – DIMENSÕES DAS JSD [1]	44
TABELA 7 – ROTURAS OBTIDAS PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015 [1].....	52
TABELA 8 – ROTURAS OBTIDAS PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7888 [1].....	53
TABELA 9 – $P_{MÁX}$ MÉDIOS E AUMENTO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 , PARA OS TRÊS ADESIVOS EM ESTUDO [1]	54
TABELA 10 – VARIAÇÃO DAS DIMENSÕES DA MALHA EM FUNÇÃO DE L_0	56
TABELA 11 – PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DO MEFX PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138	59
TABELA 12 – PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DO MEFX PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015.....	59
TABELA 13 – PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DO MEFX PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7888.....	60

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Organização do relatório	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Ligações adesivas	5
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	6
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	7
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	9
2.1.4	Configurações possíveis de junta	12
2.1.5	Adesivos estruturais	15
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	17
2.2.1	Mecânica dos meios contínuos	19
2.2.1.1	Modelos analíticos	19
2.2.1.2	Modelos de Elementos Finitos.....	19
2.2.1.3	Critérios de rotura.....	21
2.2.2	Mecânica da fratura	22
2.2.3	Modelos de dano coesivo.....	23
2.2.4	Mecânica do dano	23
2.2.5	Método de Elementos Finitos eXtendido.....	25
2.2.5.1	Formulação	26
2.2.5.2	Critérios de início e propagação do dano	27
2.2.5.3	Aplicação a juntas adesivas.....	28
3	DESENVOLVIMENTO	39

3.1 Trabalho experimental	39
3.1.1 Materiais utilizados	39
3.1.1.1 Substratos	39
3.1.1.2 Adesivos	40
3.1.1.2.1 Araldite® AV138	40
3.1.1.2.2 Araldite® 2015.....	41
3.1.1.2.3 Sikaforce® 7888.....	42
3.1.2 Geometria das juntas	44
3.1.3 Processo de fabrico	44
3.1.4 Ensaio das juntas	47
3.1.5 Resultados obtidos	48
3.1.5.1 Curvas P- δ	48
3.1.5.2 Modos de rotura	50
3.1.5.3 Resistência das juntas	54
3.2 Trabalho numérico	55
3.2.1 Condições da análise numérica	55
3.2.2 Modelo de dano utilizado	58
3.2.2.1 Determinação das propriedades de dano.....	58
3.2.2.1.1 Araldite® AV138	59
3.2.2.1.2 Araldite® 2015.....	59
3.2.2.1.3 Sikaforce® 7888.....	60
3.2.3 Análise de tensões na junta.....	60
3.2.3.1 Tensões de arrancamento	60
3.2.3.2 Tensões de corte.....	61
3.2.4 Análise dos resultados obtidos.....	62
3.2.5 Previsão da resistência	63
3.2.5.1 Estudo do efeito do critério de iniciação	65
3.2.5.2 Estudo do efeito da lei de propagação	69
3.2.5.3 Comparação dos resultados obtidos com modelos de dano coesivo	71

4	CONCLUSÕES.....	77
5	BIBLIOGRAFIA	81

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

1.2 Objetivos

1.3 Organização do relatório

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As juntas adesivas têm vindo a ter um crescimento bastante significativo na indústria (aeronáutica, automóvel, naval, entre outras), e um papel importante enquanto processo de ligação. Devido às suas potencialidades na ligação de materiais, as ligações adesivas apresentam muitas vantagens em comparação com as ligações mecânicas mais tradicionais, como o baixo peso, maior resistência, fiabilidade, facilidade de unir materiais diferentes, melhor comportamento à fadiga, resistência à corrosão, possibilidade de automatização e distribuição mais uniforme das tensões (aumento da área de contacto). Contudo, na maior parte dos casos, a impossibilidade de desmontagem e baixa resistência ao arrancamento apresentam-se como principais desvantagens. A resistência de uma ligação adesiva depende de vários fatores, tais como as propriedades do adesivo e substrato, geometria da junta, o comprimento de sobreposição (L_0), a espessura dos substratos (t_p) e a espessura da camada de adesivo (t_A).

Relativamente aos adesivos, estes variam desde um comportamento rígido e frágil como por exemplo o Araldite® AV138, adesivos de ductilidade moderada como o caso do Araldite® 2015, até adesivos de alta resistência e ductilidade tal como o Sikaforce® 7888. A resistência mecânica do adesivo é importante para a transmissão de esforços elevados entre os aderentes, enquanto a ductilidade é essencial para absorver as tensões de pico situadas nas extremidades das juntas, evitando a rotura prematura destas.

Devido à crescente utilização das ligações adesivas, torna-se necessário a existência de ferramentas que permitam prever a resistência das juntas com elevada precisão. Assim, para a análise de juntas adesivas, está a ser cada vez mais utilizado o método de Elementos Finitos (EF), uma vez que permite uma redução no tempo de análise da resistência e na seleção do adesivo mais adequado para uma dada aplicação. Neste âmbito o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX) perfila-se como um método capaz de prever o comportamento da junta, embora este ainda não esteja convenientemente estudado no que diz respeito à aplicação a juntas adesivas. Como tal, considera-se que a validação deste método para a previsão de juntas adesivas é de grande relevância.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é a avaliação do método MEFX em juntas de sobreposição dupla (JSD), para que esta ferramenta possa ser validada e utilizada para prever com precisão a resistência das juntas em estudo. Para isso, foram considerados os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888 com diferentes características, e diferentes valores de L_0 . Foram considerados os resultados

experimentais obtidos no trabalho de Nunes [1], posteriormente comparados com a análise numérica pelo MEFX. 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. Para além disso, a previsão da resistência das juntas com os três adesivos é avaliada segundo critérios diferentes de iniciação de dano baseados em tensões e deformações. Também se consideraram diferentes expoentes para o critério energético de propagação de dano. A precisão destes critérios será analisada ao detalhe posteriormente. A validação deste método é realizada por comparação direta dos resultados experimentais obtidos nos ensaios, realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Superior de Engenharia do Porto, com os valores numéricos obtidos com recurso ao *software* Abaqus®. Com a realização desta análise vai ser possível estimar qual o melhor critério de iniciação e propagação de dano a utilizar para avaliar o desempenho das juntas adesivas, e ainda averiguar qual o adesivo mais adequado em função de L_0 .

1.3 Organização do relatório

No capítulo 1 é realizada uma introdução ao tema, descritos os objetivos da presente dissertação e apresentada a organização global do relatório.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica do trabalho em estudo, onde são abordados diferentes tipos de ligação e aplicações das ligações adesivas, os diferentes tipos de juntas, modos de rotura e os adesivos estruturais. Além disso, são descritos os métodos mais comuns de análise da resistência para juntas adesivas, com maior ênfase no método MEFX.

No capítulo 3.1 é realizada uma abordagem dos procedimentos e materiais usados nos ensaios experimentais realizados num trabalho anterior [1] e feita uma análise dos resultados obtidos.

No capítulo 3.2, referente ao trabalho numérico, é efetuada uma abordagem das condições da análise numérica impostas no *software* Abaqus® para o MEFX. Neste capítulo é feita uma análise da distribuição de tensões, uma comparação da resistência obtida para cada adesivo pelo MEFX com os resultados experimentais, e ainda uma comparação com os resultados obtidos pelo MDC.

Por último, no capítulo 4 são apresentadas as conclusões retiradas ao longo de todo o trabalho e feita referência a possíveis trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

- 2.1.1 Caracterização das juntas adesivas
- 2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas
- 2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas
- 2.1.4 Configurações possíveis de junta
- 2.1.5 Adesivos estruturais

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

- 2.2.1 Mecânica dos meios contínuos
- 2.2.2 Mecânica da fratura
- 2.2.3 Modelos de dano coesivo
- 2.2.4 Mecânica do dano
- 2.2.5 Método de Elementos Finitos eXtendido

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é efetuada uma revisão bibliográfica sobre ligações adesivas. São referidas vantagens e desvantagens deste tipo de ligações bem como os esforços a que as juntas ficam sujeitas, tipos de rotura, tipos de juntas adesivas mais utilizadas, juntas mais comuns e os diversos tipos de adesivos estruturais. Além disso, apresentam-se neste capítulo os principais métodos analíticos e numéricos de previsão da resistência em ligações adesivas, com especial ênfase para o MEFX.

2.1 Ligações adesivas

A utilização dos adesivos tem vindo a crescer desde a década de 40, fazendo com que a investigação neste campo se torne cada vez mais importante, dado que o seu uso tem vindo a subir de forma significativa para ligações com fins estruturais e outros. Inicialmente, os adesivos eram baseados em caseína (material polimérico natural derivado do leite). Estes adesivos naturais funcionavam bem exceto quando sujeitos a ambientes húmidos, situação em que se tornavam muito frágeis e fraturavam com facilidade. Mais tarde, ainda nessa época, o problema da fragilidade foi ultrapassado com a introdução de polímeros com uma boa tenacidade, permitindo modificar a química dos adesivos. Assim, foi possível a ligação de materiais metálicos e de madeira com sucesso [2].

Tabela 1 – Comparação entre os diversos processos de ligação [3]

	Rebitagem	Soldadura	Brasagem	Ligação
Maquinagem preliminar	M	E	M	E
Aplicável a chapas finas	M	M	S	E
Limite na combinação de materiais	S	M	M	E
Preparação de superfícies	E	B	S	M
Utilização de ferramentas	E	S	S	S
Necessidade de acesso à junta	M	M	E	E
Requer aquecimento	E	M	M	S-B
Distribuição de tensão	M	S-B	E	E
Função de selagem	M	S	E	B
Taxa de obtenção da resistência	E	E	E	M
Distorção do conjunto	S	M	S	E
Maquinagem final	B-E	S	E	E
Tratamento térmico final	E	S	S	E
Resistência a solventes	E	E	E	S
Efeito da temperatura	E	E	E	M
Facilidade de reparação	B	M	M	S
Nível de competência requerido	E	B	E	E

Notas: E – Excelente, B – Bom, S – Suficiente, M – Mau

As indústrias aeronáuticas e navais foram as que mais contribuíram para o desenvolvimento das juntas adesivas. Atualmente, a aplicação deste tipo de ligação é cada vez mais comum noutras indústrias, já que estas têm vindo a substituir as ligações convencionais, tais como ligações aparafusadas, ligações rebitadas, brasagem e soldadura. Este é um processo de ligação que consegue conferir vantagens significativas se a junta adesiva for projetada e fabricada corretamente. Na Tabela 1 apresenta-se uma comparação entre as técnicas convencionais (rebitagem, soldadura, brasagem) e as ligações adesivas.

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Apresenta-se na Figura 1 as diferentes componentes de uma junta adesiva. O adesivo é um material polimérico capaz de promover a ligação entre dois componentes, a interfase é uma zona onde as propriedades da ligação já começam a ser alteradas e são muito influenciadas pelo tipo de ligação utilizado, a interface é o plano de contacto entre o substrato e o adesivo, o primário é um revestimento que por vezes se utiliza de modo a promover a ligação, e por fim o aderente ou substrato é o componente utilizado na ligação do adesivo.

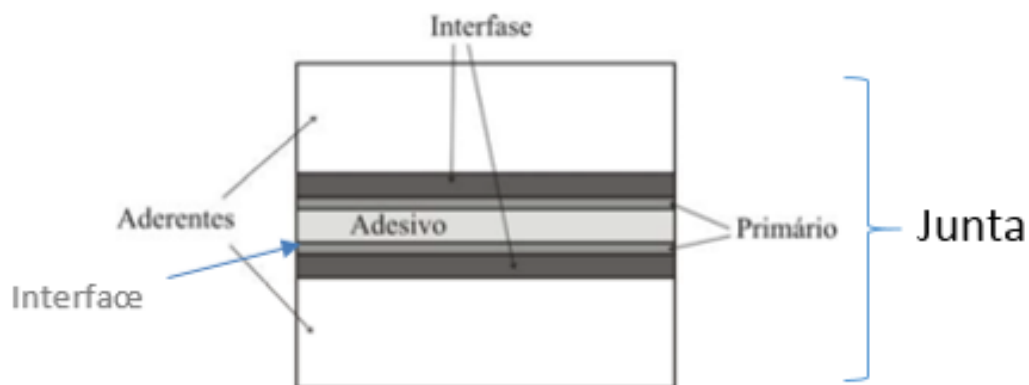


Figura 1 – Componentes de uma junta adesiva [4]

As juntas adesivas apresentam inúmeras vantagens comparativamente com outros métodos. Contudo, é essencial uma boa preparação das superfícies dos substratos pois, caso tal não aconteça, pode ocorrer uma diminuição da resistência relativamente à esperada devido a falta de adesão. As principais vantagens e limitações das juntas adesivas estão representadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Vantagens e limitações das juntas adesivas [5]

Vantagens	Limitações
Capacidade de obter estruturas mais leves e rígidas	As peças não podem ser separadas posteriormente
Capacidade de unir materiais distintos (por exemplo, metais com compósitos)	Podem ocorrer tensões residuais resultantes dos diferentes coeficientes de expansão térmica
Capacidade de unir eficientemente materiais de espessuras finas	Sensibilidade a tensões de tracção segundo a espessura
Melhor distribuição das tensões	Fraca resistência à temperatura e à humidade
Melhores propriedades à fadiga devido à melhor distribuição de tensões	Susceptíveis a degradação ambiental e incerteza relativamente à sua durabilidade a longo prazo em condições de serviço severas
Melhor resistência à corrosão	Problemas de toxicidade e inflamabilidade
Melhor aparência superficial (sem cabeças de parafusos, sem marcas de soldadura, etc)	Dificuldade ao nível das inspecções
Fabrico de formas complexas	-
Boa capacidade de vedação	-

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Atualmente os adesivos são utilizados em diversas indústrias, tais como aeroespacial, naval, automóvel, construção civil, equipamentos desportivos, entre outras. Os adesivos estruturais têm a capacidade de proporcionar ligações resistentes em diversos materiais, como por exemplo vidro, metal, cerâmica, madeira ou plástico, o que os torna quase perfeitos na construção de vários meios de transporte como automóveis, aeronaves e embarcações.

Na indústria aeronáutica, os adesivos são muito usados no fabrico das pás dos helicópteros devido à sua boa resistência à fadiga. A pá é constituída por várias secções de aço inoxidável para a parte frontal e uma estrutura em ninho de abelha para a parte de trás (baseada numa estrutura interna de plástico colada a folhas de compósito reforçado com fibra de vidro), cujas ligações são realizadas através de adesivos. De facto, os adesivos são uma excelente alternativa aos fixadores mecânicos como os rebites, tornando o avião mais leve e mais resistente (Figura 2 e Figura 3).



Figura 2 – Comparação de uma superfície rebitada com juntas unidas por adesivos [6]



Figura 3 – Partes constituintes de um avião fixadas através do processo de colagem [7]

O uso de adesivos na indústria automóvel tem crescido exponencialmente ao longo dos últimos anos devido às inúmeras vantagens que estes oferecem. Inicialmente, os adesivos eram apenas aplicados em alguns componentes, como por exemplo colagem de emblemas, vidros traseiros, para-brisas, entre outros. Porém, dado o desenvolvimento deste tipo de ligação, o seu uso estendeu-se também às ligações da estrutura do veículo, o que permitiu otimizar a rigidez à torção (Figura 4). Para além disso, as ligações adesivas tornaram os automóveis mais leves e seguros.

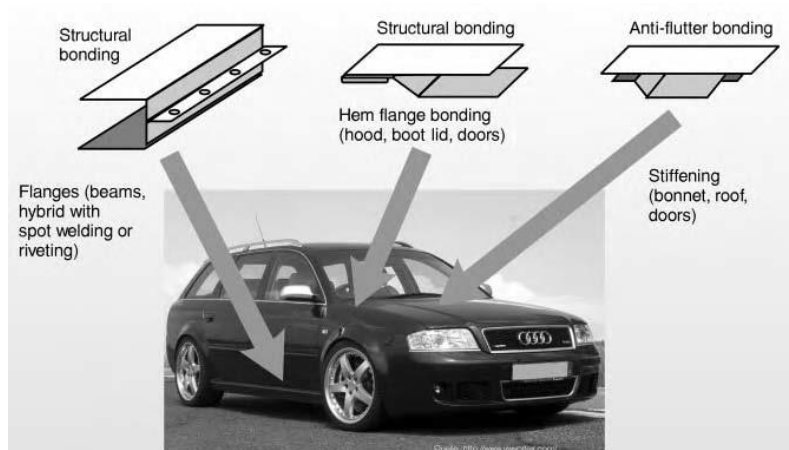


Figura 4 – Diversos pontos de aplicação de adesivos no veículo [8]

Outros exemplos de aplicação crescente de adesivos é a indústria naval, que utiliza cada vez mais plásticos e compósitos devido ao baixo peso, à resistência à corrosão e à facilidade de fabricação. Para além disso, os materiais compósitos têm vindo a tornar-

se populares em algumas aplicações para o desporto pela rigidez específica e elevada capacidade de absorção de vibrações que apresenta. Dá-se como exemplos as raquetes de ténis (Figura 5 a) e as bicicletas fabricadas em compósito reforçado com fibras de carbono. Os compósitos e os adesivos são duas tecnologias muito associadas entre si e a melhor forma de ligar compósitos é através de adesivos como por exemplo nas estruturas sandwich (Figura 5 b).

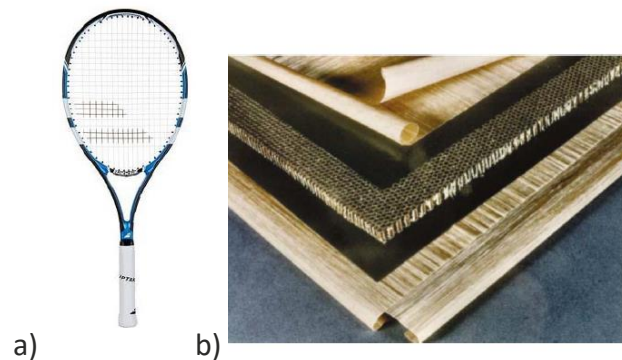


Figura 5 – Algumas aplicações de juntas adesivas, a) - raquete de ténis, (b) - estrutura sandwich [9]

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Na Figura 6 são apresentados os esforços mais comuns a que uma junta adesiva é solicitada.

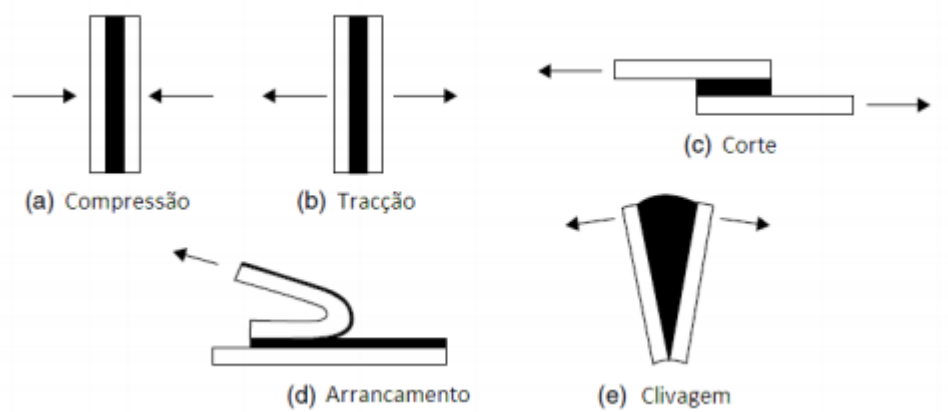


Figura 6 – Tipos de solicitação que podem estar sujeitas as juntas adesivas [2]

Esforços de tração e compressão

As tensões de tração e compressão desenvolvem-se quando as forças atuam perpendicularmente ao plano da junta e são uniformemente distribuídas ao longo da área colada. Contudo, na prática a espessura do adesivo é difícil de controlar e as forças raramente são axiais, levando ao aparecimento de tensões de clivagem e arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição. No caso da junta estar sujeita à compressão,

apenas é invertido o sentido das forças aplicadas, e estas devem manter-se alinhadas de modo a que o adesivo esteja em compressão pura. Uma junta em compressão pura quase não precisa de adesivo [2].

Corte

Neste caso, a força aplicada é paralela ao plano da junta. As juntas que dependem da resistência ao corte são relativamente fáceis de fabricar. Por outro lado, as ligações adesivas são mais resistentes quando solicitadas ao corte, porque toda a área colada contribui para a resistência da junta. De salientar que existem grandes concentrações de tensões nas extremidades da sobreposição, enquanto que a região central pouco contribui para a sustentação da carga, conforme se verifica na Figura 7 [2].

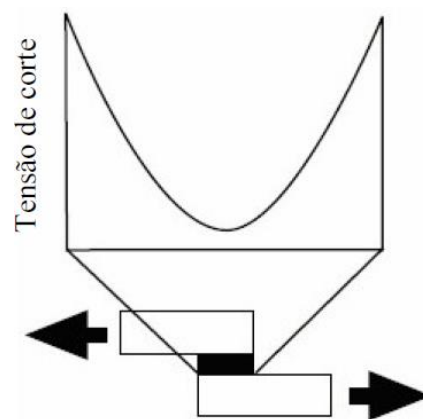


Figura 7 – Distribuição da tensão de corte [10]

Clivagem

A clivagem é definida como um carregamento de tração numa das extremidades de uma junta com adrentes rígidos, que promove a separação em tração dos substratos. Assim, existe uma forte concentração de tensões na extremidade da junta [2].

Arrancamento

O arrancamento ocorre de forma semelhante à clivagem, mas tem lugar quando um ou ambos os substratos são flexíveis, levando a uma deformação plástica destes [3].

Assim, as juntas sujeitas a esforços de clivagem e arrancamento são muito menos resistentes do que aquelas sujeitas ao corte porque a tensão está concentrada numa área muito reduzida. Conforme ilustrado na Figura 8, toda a tensão está localizada na extremidade da junta, enquanto que a restante porção da ligação pouco contribui para a resistência da junta. Deste modo, uma junta adesiva deve ser sempre projetada para estar sujeita maioritariamente ao corte.

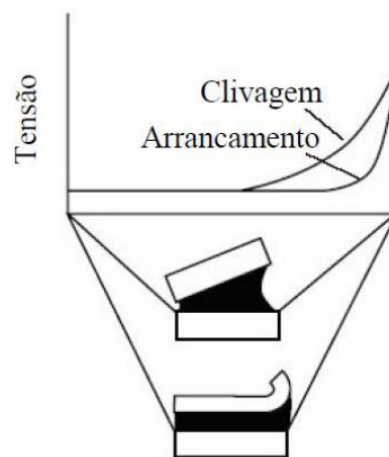


Figura 8 – Distribuição das tensões de clivagem e arrancamento [10]

Os adesivos mais rígidos e frágeis são mais sensíveis aos esforços de clivagem e arrancamento, comparativamente aos adesivos mais dúcteis, que conseguem ter uma melhor distribuição de tensões (Figura 9). Segundo da Silva et al. [2] a diferença de resistência entre estes dois tipos de adesivos pode chegar até às 22 vezes.

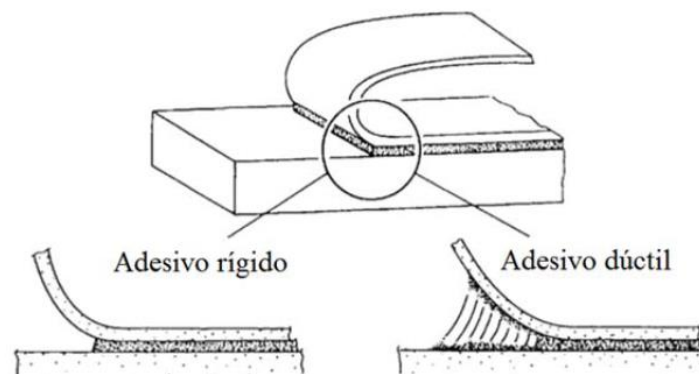


Figura 9 – Comportamento de um adesivo rígido e de um adesivo dúctil ao arrancamento [9]

No que diz respeito aos modos de rotura, na Figura 10 são apresentados os tipos de rotura que podem ocorrer em juntas adesivas.

Rotura adesiva: ocorre na interface entre o substrato e o adesivo;

Rotura coesiva: ocorre no interior do adesivo;

Rotura pelo aderente: ocorre no interior do substrato;

Rotura mista: combinação entre a rotura no interior do adesivo e na interface.

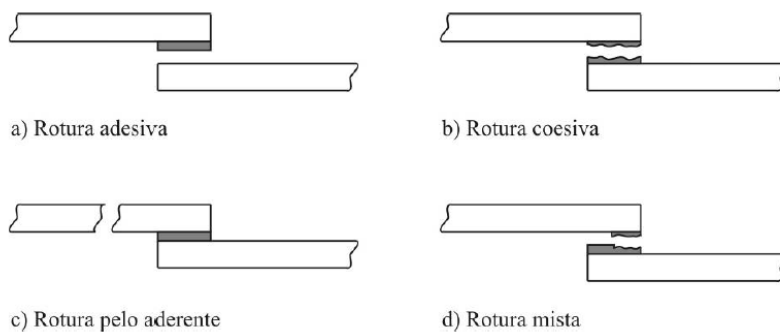


Figura 10 – Representação esquemática dos diferentes modos de rotura [11]

O tipo de rotura ideal seria a rotura pelo aderente, que ocorre quando a resistência da ligação adesiva é superior à resistência do aderente à tração e que deve ser sempre o objetivo final de uma ligação adesiva. A rotura adesiva (interfacial) é a menos desejada, pois indica que houve uma má preparação da superfície ou o adesivo não se adapta à aplicação. Por outro lado, a rotura coesiva no adesivo indica que a preparação da superfície foi efetuada corretamente, apenas o adesivo não possui resistência suficiente para que a zona da ligação iguale a resistência dos aderentes. Neste caso, as superfícies de rotura estão ambas cobertas por adesivo. A rotura mista consiste numa combinação de rotura adesiva e rotura coesiva. Este tipo de rotura é bastante usual e as causas que levam ao seu aparecimento podem ser a preparação superficial não uniforme, processo de cura não adequado e concentrações de tensões em determinadas zonas.

2.1.4 Configurações possíveis de junta

As juntas adesivas podem ter diversas configurações, tal demonstrado na Figura 11. As juntas mais comuns são as de sobreposição simples, sobreposição dupla, chanfro e juntas de degrau.

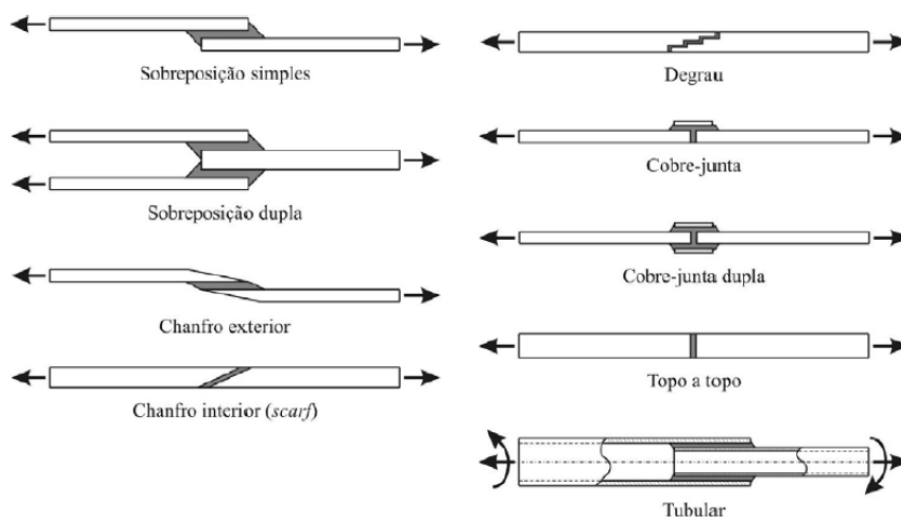


Figura 11 – Tipos de configurações de juntas [2]

Sobreposição simples

As juntas de sobreposição simples (JSS) são as mais comuns e as mais estudadas devido à facilidade de fabricação. Porém, a aplicação descentrada da carga provoca efeitos de flexão nos substratos, fazendo com que o adesivo fique também sujeito a esforços de tração (arrancamento) nas extremidades da ligação [2]. Também é comum neste tipo de junta a inclusão de um filete de adesivo nestas zonas. Este filete de adesivo, provocado pelo excesso de adesivo, reduz significativamente a concentração de tensões. Conforme ilustrado na Figura 12, verifica-se que uma junta com filete apresenta uma distribuição mais uniforme das tensões ao longo de toda a ligação adesiva.

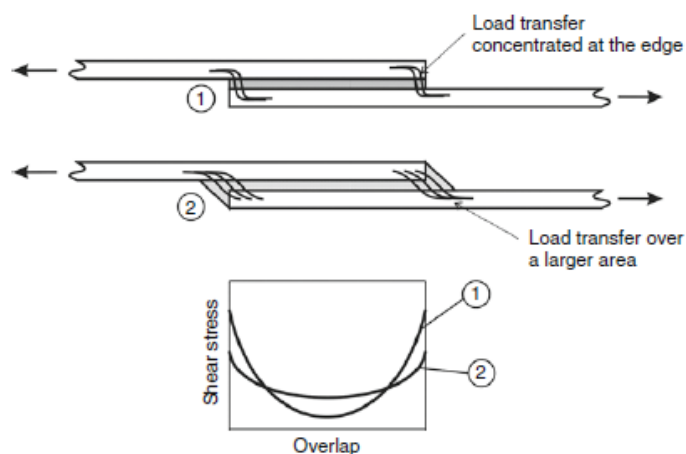


Figura 12 – Distribuição das tensões de corte em JSS com e sem filete de adesivo [12]

Sobreposição dupla

As JSD são utilizadas para aumentar a resistência da junta. Esta junta apresenta uma eliminação da excentricidade na aplicação de cargas o que diminui significativamente a flexão. No entanto, a JSD também tem flexão interna. Embora o substrato do meio não esteja sujeito a flexão, os substratos exteriores fletam dando origem a tensões de tração na extremidade direita e de compressão na extremidade esquerda (Figura 13). Além disso, o processo de fabrico é mais demorado relativamente às JSS.

Chanfro exterior

As juntas com chanfro exterior permitem reduzir as tensões de arrancamento que ocorrem nas extremidades das juntas de sobreposição simples [2]. Quanto maior for a extensão do chanfro, maior será a resistência das juntas (embora limitada pela resistência dos aderentes, fragilizados devido à diminuição da sua área de secção reta). Além disso, o processo de fabrico destas juntas tem custos superiores às restantes juntas, devido à dificuldade de maquinar as rampas [10].

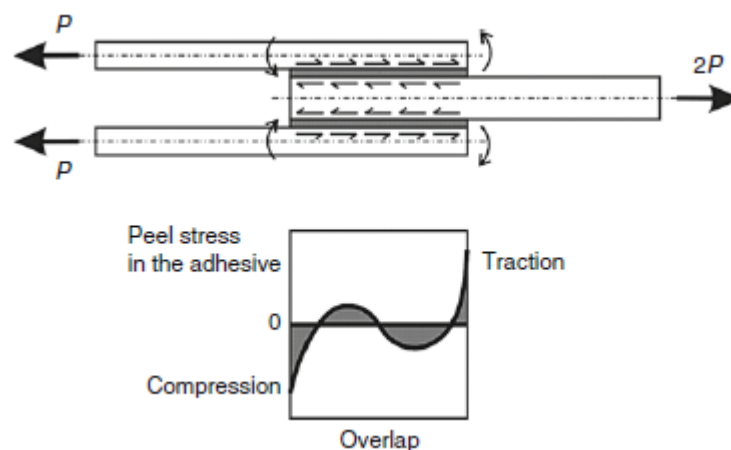


Figura 13 – Tensões de arrancamento no adesivo numa junta de sobreposição dupla [12]

Chanfro interior (*scarf*) e Degrau

As juntas com chanfro e as juntas em degrau são projetadas especificamente para reduzir as tensões de arrancamento [2]. Contudo, a dificuldade em maquinar os degraus ou rampas faz com que os custos de fabricação destas juntas sejam muito superiores aos custos das juntas de sobreposição [13]. Devido a este fator, sempre que os substratos são em material compósito, é comum realizar os degraus durante o empilhamento antes da cura, evitando a danificação das fibras [14].

Cobre junta e cobre-junta dupla

As juntas com reforço simples ou reforço duplo apresentam uma resistência superior em relação às JSS devido à redução da excentricidade das cargas transmitidas. Assim como a JSS, a junta de reforço simples também está sujeita a esforços de arrancamento. Por outro lado, a junta de reforço duplo apresenta um momento fletor menor, sendo por isso preferível [10].

Topo a topo

As juntas de topo a topo planas são as mais simples de fabricar, mas não apresentam uma grande eficiência. Estas juntas apresentam elevadas tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da ligação. Além disso, não suportam esforços de flexão porque o adesivo estaria sujeito a clivagem [2].

Tubular

A junta tubular é aplicada na união de tubos de secção cilíndrica, e pode apresentar a zona de ligação plana ou em chanfro. Tem boa resistência a esforços de tração e compressão, sendo uma solução vantajosa relativamente às juntas topo a topo, pois consegue-se uma maior área resistente e uma diminuição do efeito de arrancamento. Para isso, utilizam-se normalmente chanfros, canais e ressaltos, facilitando assim a montagem de componentes (Figura 14). Porém, a inacessibilidade ao seu interior

impossibilita a sua inspeção. A utilização de orifícios para a injeção do adesivo e a abertura de canais para facilitar a saída do ar são algumas das soluções para assegurar que o adesivo preencha toda a cavidade [15].

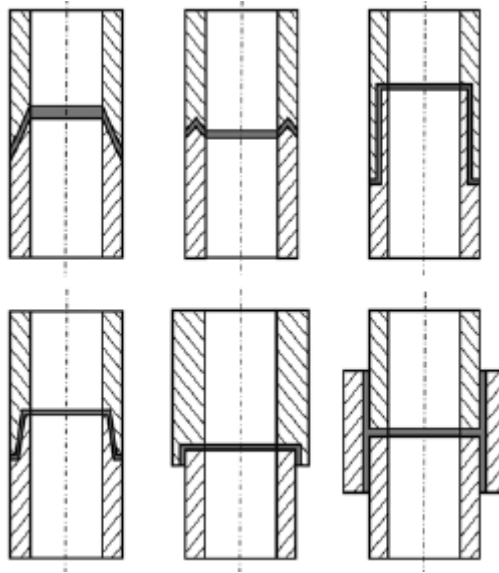


Figura 14 – Uniões em tubos para cargas axiais e torsionais [12]

2.1.5 Adesivos estruturais

As juntas adesivas tornaram-se muito importantes enquanto processo de ligação, pois possuem características vantajosas relativamente a outros processos mecânicos. Os adesivos estruturais são normalmente fabricados com base em resinas termoendurecíveis modificadas. Alguns elastómeros termoendurecíveis resistentes, tais como poliuretanos, podem também ser classificados como adesivos estruturais. Além disso, os adesivos estruturais são materiais de elevada resistência capazes de conferir à ligação adesiva uma resistência ao corte superior a 6,9 MPa [3]. A sua principal função é manter ligadas as estruturas e serem capazes de resistir a cargas elevadas sem grande deformação nos mais variados ambientes, necessitando de uma cuidada preparação superficial [3]. Assim, distinguem-se as seguintes famílias de adesivos estruturais: fenólicos, acrílicos, poliuretanos, poliimidas e epóxidos (Figura 15), que são descritos a seguir.

Adesivos Fenólicos

Os adesivos fenólicos eram utilizados inicialmente para a ligação de madeira a madeira. Mais tarde passaram a ser usados para a ligação de metal a metal, visto que apresentavam uma resistência satisfatória. A cura é feita aproximadamente a 140°C durante alguns minutos [2]. Em geral, os adesivos fenólicos apresentam um baixo custo, possuem boa resistência mecânica, e boa resistência a temperaturas elevadas e aos agentes ambientais. No entanto, têm como desvantagens a baixa resistência à corrosão

por solventes, e a baixa resistência ao impacto e vibração. Para a resolução destes problemas têm sido desenvolvidos adesivos que combinam a resina fenólica com uma resina vinílica ou um elastómero (nitrilo ou policloropreno).

Fenólicos	Fenólicos-vinílicos
	Fenólicos-nitrilo
	Fenólicos-policloropreno
Acrílicos	Anaeróbicos
	Cianoacrilatos
Poliuretanos	
Poliimidas	
Epóxidos	Epóxido-poliamida
	Epóxido-polisulfureto
	Epóxido-fenólicos
	Epóxido-poliuretano
	Epóxido-nitrilo

Figura 15 – Grupos de adesivos estruturais mais representativos [16]

Adesivos Acrílicos

Os adesivos acrílicos foram desenvolvidos na década de 70. Estes adesivos são geralmente utilizados na ligação de termoplásticos como *Polystyrene* (PS), *Polyvinyl Chloride* (PVC), *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) e borrachas, além de proporcionarem boa adesão em aço e alumínio. Nos adesivos acrílicos incluem-se os adesivos anaeróbicos, os cianoacrilatos e os acrílicos modificados.

Acrílicos Anaeróbicos: São geralmente apresentados sob forma líquida, em monocomponentes. Podem ser curados à temperatura ambiente e são bastante fáceis de usar. Em geral, apresentam boa resistência à humidade e solventes, e a sua temperatura máxima de utilização situa-se próximo dos 150°C.

Acrílicos Cianoacrilatos: à semelhança dos anaeróbicos, são líquidos de um só componente e têm uma cura rápida. Apresentam excelente resistência ao corte, mas baixa resistência ao arrancamento, ao impacto, ao calor e à humidade [2].

Acrílicos modificados: A modificação faz-se com a introdução de polimetilmetacrilato e uma borracha de nitrilo. Apresentam elevada resistência à humidade, boa resistência ao arrancamento e ao impacto. Como desvantagem cita-se a baixa resistência mecânica a altas temperaturas.

Adesivos Poliuretanos

Estes adesivos apresentam-se geralmente sob a forma de dois componentes. A cura processa-se lentamente à temperatura ambiente podendo ir até às 24 horas. Apresentam boa flexibilidade, bom comportamento a baixas temperaturas, boa resistência ao arrancamento, a choques e vibrações, boa resistência ao arrancamento e bom comportamento a condições ambientais adversas. Estes adesivos podem apresentar uma resistência ao corte na ordem dos 20 MPa, possibilitando a utilização em aplicações estruturais.

Adesivos de Poliimidas

Os adesivos de poliimida estão disponíveis sob forma de líquidos e filmes. A sua utilização apresenta um grande interesse para temperaturas de serviço superiores a 150°C, em virtude de estes adesivos conservarem as suas propriedades sem grandes alterações até uma temperatura máxima de utilização da ordem dos 300°C. Contudo, o seu custo é elevado e requer longos tempos de cura com ciclos de pressão e temperatura elevada. Além disso, são frágeis e resistem mal a vibrações.

Adesivos Epóxidos

Os adesivos epóxidos são muito utilizados para a colagem de metal, devido à sua alta resistência mecânica e fácil aplicação. Além disso, podem ser modificados para atingir uma grande variedade de propriedades, sendo os adesivos que apresentam uma maior diversidade de aplicações, nomeadamente na indústria de construção mecânica. Uma grande desvantagem é o facto de provocarem doenças no tecido humano (pele).

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

No passado, a inexistência de modelos de materiais precisos e critérios de rotura adequados conduziu ao fabrico de juntas adesivas sobredimensionadas, que invariavelmente resultam em estruturas mais pesadas e mais caras. Com a disponibilidade de metodologias de previsão fiáveis, surgiram novas possibilidades para o uso eficiente de juntas adesivas. Existem duas alternativas para análise de juntas adesivas: análises de forma fechada (métodos analíticos) e métodos numéricos (Elementos Finitos). O estudo de juntas adesivas remonta a 1930 com o modelo em forma fechada de Volkersen [17] que considera os materiais totalmente elásticos e deformação do adesivo apenas em corte. No entanto, a análise de juntas adesivas torna-se mais complexa se o adesivo deformar plasticamente, se forem utilizados substratos em compósito, ou se os aderentes forem constituídos por materiais diferentes. A técnica mais utilizada para juntas adesivas é o método de EF, e Adams e Peppiatt [13] foram os pioneiros nesta técnica. A rotação da junta, a plasticidade dos aderentes e do adesivo, e a influência do excesso de adesivo (filete) foram inicialmente estudados por Harris e Adams [18]. Inicialmente utilizou-se a abordagem dos meios contínuos para a previsão

da resistência, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado. O método EF também pode ser usado em conjunto com critérios de mecânica da fratura para previsão da resistência, pelo fator de intensidade de tensão ou abordagens energéticas, como a técnica de fecho virtual da fenda. No entanto, esta técnica de modelação é complexa porque é necessário voltar a criar a malha sempre que há propagação da fenda, o que requer um maior esforço computacional [19].

Atualmente estão disponíveis técnicas avançadas de modelação que garantem previsões precisas de rotura, superando as limitações das abordagens anteriores. De um modo geral, os danos estruturais podem ocorrer por microfissuras ao longo de um volume finito ou região interfacial, reduzindo a transferência de carga. Uma simulação de EF com base na modelação sólida contínua origina erradamente plastificação generalizada nos elementos sem evolução do dano, enquanto um modelo de mecânica do dano pode realmente simular dano nos elementos pela redução das cargas transferidas. Como resultado, torna-se possível a simulação de dano passo-a-passo e fratura num caminho pré-definido ou arbitrariamente dentro de uma região finita [20]. Contudo, este é ainda um campo inovador sob intenso desenvolvimento, no que diz respeito a obter técnicas mais precisas de modelação, métodos de estimativa de parâmetros materiais fiáveis e simples, aumento de robustez e eliminação de problemas de convergência [21]. As técnicas de modelação dano podem ser locais ou contínuas. Dentro da modelação de dano local, o dano ocorre numa linha ou uma superfície (análise 2D ou 3D, respetivamente), que simula uma rotura interfacial entre os materiais, por exemplo entre a ligação adesiva e o aderente, a fratura interlaminar de compósitos laminados ou a interface entre as fases sólidas de materiais. Pela modelação contínua, o dano estende-se por uma área ou volume (análise 2D ou 3D, respetivamente), para simular a rotura ou para modelar uma fratura coesiva do adesivo.

Enquadra-se neste âmbito a modelação do dano em materiais por combinação de EF com modelos de dano coesivo. Esta técnica combina a modelação por EF convencional para as regiões em que não é esperado dano e uma abordagem da mecânica da fratura através dos elementos coesivos para simular o crescimento da fenda. Uma alternativa muito recente para modelar a propagação de fendas dentro dos materiais é o MEFX, que utiliza funções enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

Desta forma, a previsão da resistência das juntas pode ser feita com recurso às seguintes técnicas:

- Mecânica dos meios contínuos;
- Mecânica da fratura;
- Modelos de dano coesivo;
- Mecânica do dano;
- Método dos Elementos Finitos eXtendido.

2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

Na abordagem da mecânica dos meios contínuos, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previsto pelos modelos analíticos ou EF, são normalmente utilizados em critérios de rotura para estimar a resistência da junta. Isto é conseguido quando os valores previstos, obtidos por critérios baseados em tensão e deformação (por exemplo, o critério da tensão normal máxima, ou o critério da tensão de corte máxima), atingem a resistência limite dos materiais. Esta abordagem foi rapidamente aplicada a juntas adesivas, assim que o método EF foi disponibilizado e programado em computador [18]. Além disso, esta técnica tem como vantagem de ser possível fazer uma análise de ligações adesivas com ou sem um dano inicial, e sob uma carga arbitrária. Porém, este método apresenta uma limitação intrínseca, uma vez que as estruturas ligadas são propensas a tensões localizadas nas extremidades das regiões de sobreposição, devido às arestas vivas. Como resultado, na análise de uma estrutura colada em EF, as tensões nas extremidades da junta aumentam e não se consegue obter convergência, dando previsões dependentes da malha [22]. Ao longo dos anos, foram introduzidas melhorias a esta técnica de modelação, tais como a definição critérios mais complexos de tensão ou deformação, para diferentes materiais e mecanismos de fratura, ou combinação com modelos de meios contínuos mais realistas, mas ainda assim a dependência da malha não se encontra resolvida.

2.2.1.1 Modelos analíticos

No início do estudo das juntas adesivas os métodos de previsão consistiam em técnicas analíticas, e as formulações de Volkersen [17] e Goland e Reissner [23] foram pioneiras numa série de estudos teóricos que tiveram a vantagem de simplificar os campos de tensão nas estruturas ligadas devido ao uso de hipóteses simplificativas em termos de geometria da estrutura, carregamento e condições fronteiras, dando soluções eficientes em forma fechada. Assim, cada estrutura ligada poderia ser analisada rapidamente, embora com muitas simplificações incorporadas [22]. Com estes modelos, as tensões e deformações podem ser facilmente calculadas, juntamente com a distribuição do momento de fletor na estrutura. A resistência é tipicamente prevista por critérios baseados em tensões ou deformações. Mais tarde, estes estudos foram progressivamente substituídos por análises numéricas, embora os estudos teóricos também foram melhorados ao longo dos anos em termos de capacidades de modelação, tais como possibilidade de adesivos com comportamento não-linear material [24] ou análises geométricas não-lineares [25].

2.2.1.2 Modelos de Elementos Finitos

Ao contrário dos métodos analíticos anteriormente referidos, os modelos de elementos finitos são usados para estimar os campos de tensões nas juntas adesivas e na camada de adesivo. Uma das vantagens da utilização desta técnica é a possibilidade de análise de qualquer geometria de junta adesiva. Adams et al. [8] usaram o critério da tensão

principal máxima com sucesso para a previsão da resistência das juntas adesivas. Inicialmente, usaram este critério para estimar a rotura de materiais muito frágeis cuja rotura ocorre perpendicularmente em relação à direção da tensão principal máxima. No entanto, devido à singularidade de tensões nas extremidades da sobreposição das juntas, as tensões dependem do tamanho e da malha utilizada e do quão perto são tomadas as tensões dos pontos singulares. No sentido de ultrapassar esta limitação, foram utilizados os valores das tensões nos pontos de Gauss ou extrapolados os valores em pontos de Gauss para as zonas de singularidade.

No entanto, deve-se notar que na realidade as extremidades dos substratos geralmente não apresentam uma aresta viva. Devido ao processo produtivo, os cantos são ligeiramente arredondados. Isto pode afetar a distribuição de tensões nos cantos dos substratos e, por conseguinte, a resistência da junta, já que as tensões nesta zona são muito sensíveis à variação da geometria. Uma forma de aumentar substancialmente a resistência de JSS e diminuir a variação das tensões e deformações estimadas numericamente é através de um arredondamento dessas extremidades, conforme demonstrado na Figura 16 [26].

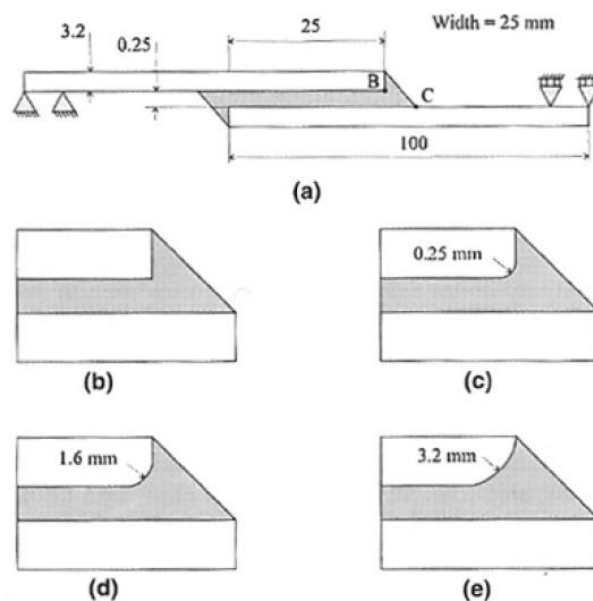


Figura 16 – JSS com ângulos diferentes de arredondamento [26]

Uma consequência do arredondamento dos substratos é a não existência da singularidade, o que facilita a aplicação de um critério de tensão ou deformação limites. Adams e Harris [27] demonstraram teórica e experimentalmente que a resistência das JSS com substratos arredondados e um adesivo dúctil aumenta substancialmente em relação às juntas com arestas vivas. Posteriormente, Zhao et al. [26, 28] também estudaram o efeito do arredondamento dos substratos, como se pode constatar na

Figura 17, em que se observa que a singularidade de tensões desaparece com um pequeno grau de arredondamento.

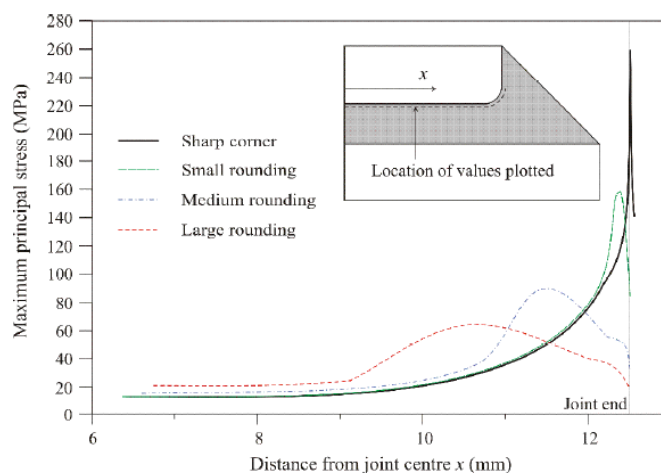


Figura 17 – Distribuição de tensões em função do grau de arredondamento dos substratos [26]

2.2.1.3 Critérios de rotura

Neste subcapítulo são abordados alguns critérios de rotura que podem ser considerados para a análise da resistência das juntas. von Mises propôs um critério de cedência que afirma que os materiais cedem sob tensões multi-axiais, quando a sua energia de distorção atinge um valor crítico,

$$\sigma_{VM}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = \text{constante} \quad (1)$$

onde σ_i ($i=1, 2, 3$) são as tensões principais. Este critério foi utilizado por Ikegami et al. [29] para estudar a resistência de juntas em chanfro entre compósitos de fibra de vidro e metais.

As tensões de corte têm sido muito utilizadas para prever a resistência das juntas de sobreposição, especialmente em análises de forma fechada, considerando uma tensão máxima de corte igual à resistência ao corte do adesivo maciço. Greenwood [30] usou a tensão máxima de corte calculada pela análise de Goland e Reissner [23] para prever a resistência da junta. A *Engineering Sciences Data Unit* [31] implementou este critério num *software* comercial. Mais recentemente, John et al. [32] utilizaram as tensões de corte em juntas com uma distância crítica para prever a resistência das JSD. Lee e Lee [33] também usaram o critério da tensão de corte máxima em juntas tubulares. da Silva et al. [34, 35] demonstraram que este critério aplicado a JSS só é válido para adesivos frágeis e comprimentos de sobreposição reduzidos. De facto, esta abordagem ignora as tensões normais existentes em juntas de sobreposição e, portanto, sobrestima a resistência da junta.

Por outro lado, quando são utilizados adesivos dúcteis, os critérios baseados em tensões não são apropriados, porque as juntas ainda podem suportar grandes esforços após o adesivo atingir os valores limite. Para adesivos dúcteis, Harris e Adams [18] usaram a deformação principal máxima como critério de rotura para prever a resistência da junta. Este critério também pode prever o modo de rotura. No entanto, é igualmente sensível ao tamanho de malha, tal como previamente discutido para o critério da tensão principal máxima.

Hart-Smith [36] propôs que a deformação máxima de corte pode ser usada como um critério de rotura quando deformação plástica era evidente. A *Engineering Sciences Data Unit* [31] também implementou o critério da máxima deformação de corte no seu *software* comercial. da Silva et al. [34, 35] têm mostrado que, para JSS, a deformação máxima de corte é um critério muito preciso para adesivos dúcteis.

Clark e McGregor [37] verificaram que é possível prever a rotura de um adesivo maciço quando a tensão principal máxima excede a tensão máxima uniaxial ao longo de um determinado comprimento perpendicular à direção da tensão principal máxima. Além disso, verificaram que a variação da resistência estimada para a junta não é significativa com a mudança da geometria da junta, como por exemplo com o arredondamento da extremidade do aderente em contacto com o adesivo.

2.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos assume que a estrutura e os materiais são contínuos, o que não é coerente com a existência de defeitos ou dois materiais com cantos reentrantes. Consequentemente, mecânica dos meios contínuos não dá nenhuma solução para o estado de tensão nestes pontos singulares que resultam em singularidades de tensões ou deformações. As fendas são os defeitos mais comuns em estruturas, para as quais se desenvolveu a mecânica da fratura. Na mecânica da fratura, é bem aceite que tensões calculadas usando mecânica dos meios contínuos são singulares (infinitas) na extremidade da fenda. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo da fenda é inferior a 180° . Este resultado foi descoberto por Williams [38] para as tensões localizadas num entalhe. Este efeito é igualmente aplicável para singularidade de tensões em dois materiais colados entre si com um canto reentrante. A mecânica da fratura tem sido aplicada com sucesso em muitos problemas de engenharia nos últimos anos. Muitos estudos relacionados com juntas adesivas usam a taxa de libertação de energia de deformação, e o respetivo valor crítico ou tenacidade à fratura Fernlund e Spelt [39] em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda se propaga numa interface ou perto dela. No entanto, a fratura de juntas adesivas ocorre geralmente em modo misto por causa das variações das propriedades entre diferentes materiais e do campo de tensões complexo. Os critérios de rotura em modo misto podem ser desenvolvidos de uma forma similar aos critérios de rotura clássicos, embora deva ser introduzido o conceito

superfície ou envelope de fratura, que fornece uma função para a rotura em função das componentes de tenacidade em tração e corte.

2.2.3 Modelos de dano coesivo

A implementação em computador dos métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica teve um grande sucesso há algumas décadas, mas estes encontravam-se limitados a plastificação reduzida na extremidade da fenda. Além disso, os adesivos dúcteis atuais podem desenvolver zonas plásticas que podem ser maiores do que a espessura dos aderentes. Os modelos de dano coesivo (MDC) foram desenvolvidos no final de 1950 / início de 1960 [40] para descrever o dano sob cargas estáticas na zona de processo coesiva à frente da extremidade da fenda, dando uma solução promissora para prever danos em estruturas coladas. Os MDC foram desde então testados e otimizados para simular a iniciação e propagação de fendas em problemas de rotura coesiva e interfacial ou delaminação em compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [41]. Estes elementos podem ser facilmente incorporados numa análise de EF para modelação do comportamento de rotura em vários materiais, incluindo juntas adesivas [42]. Os MDC são baseados no pressuposto de que podem ser introduzidas artificialmente em estruturas uma ou mais regiões ou interface de fratura, em que o crescimento do dano seja permitido através introdução de uma possível descontinuidade no campo de deslocamentos. Isto é possível pela definição de leis de tração-separação para a modelação de interfaces ou regiões finitas. As leis do MDC são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos, e estas podem ligar os nós de elementos que representam diferentes materiais ou diferentes camadas em compósitos, ou podem ser aplicadas diretamente entre dois materiais sem contato para simular uma camada fina, como por exemplo para simular uma ligação adesiva. Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um dado percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação de leis de tração-deslocamento relativo. Para além disso, estes modelos são usados para simular a evolução da força e conseqüentemente enfraquecimento de uma ligação até à propagação da fenda, permitindo desta forma simular a deterioração das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são tipicamente construídas por relações lineares em cada uma das fases de carregamento [43], embora uma ou mais fases possa ser definida de forma diferente para uma representação mais precisa do comportamento dos materiais.

2.2.4 Mecânica do dano

Nos métodos da mecânica do dano estabelece-se um parâmetro de dano para modificar a resposta constitutiva dos materiais através da redução de rigidez ou resistência. Como exemplo prático apresentam-se ligações adesivas finas [44], delaminação de compósitos ou ainda rotura da matriz [45]. Esta variável de dano pode ser utilizada numa

lei de evolução de dano para modelar a degradação dos materiais antes da iniciação da fenda e durante o crescimento da mesma. 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 tipo específico de dano, tais como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [46]. Por estes métodos, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [47] ou do número de ciclos para análises de fadiga [48, 49]. Os modelos de dano têm sido usados para cenários de fadiga de amplitude constante e variável [50]. Comparativamente à modelação de fadiga por MDC, estas técnicas não proporcionam uma distinção clara entre as fases de início e propagação da fadiga, embora possam dar uma base para a previsão [44]. No entanto, é possível modelar a evolução do dano antes do crescimento de uma macro-fenda. Em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada se o dano for generalizado ou se o caminho de propagação da fenda não for conhecido, enquanto pelo MDC a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [51].

Hua et al. [52] propôs um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão da resistência de juntas adesivas sujeitas a degradação ambiental. Foram consideradas juntas coladas com um adesivo dúctil (Hysol® EA9321) sujeitas a diferentes condições de degradação ambiental. Na modelação numérica, isto foi realizado através da introdução de um parâmetro de dano com base em deslocamentos na equação constitutiva dos materiais que era dependente do grau de humidade. Este parâmetro foi calibrado utilizando o teste *Mixed-Mode Flexure* (MMF) em amostras envelhecidas artificialmente. O parâmetro de dano permitiu obter uma função linear da resposta do material na ausência de dano, proporcionando uma redução das tensões em função do deslocamento plástico equivalente em vez da deformação, para garantir resultados independentes da malha. A implementação deste conceito permitiu a definição de um comprimento equivalente, ligado a cada ponto de integração dos elementos sólidos. O deslocamento plástico equivalente foi calculado a partir da energia de rotura como sendo o trabalho de fratura da tensão de cedência após o início do dano.

Chen et al. [53] previram o início e propagação da rotura (Figura 18), bem como a carga de rotura em JSS, através de uma técnica da mecânica do dano baseada na energia de deformação plástica média. Nesta técnica aplicaram-se dois adesivos, Ciba® MY750 com endurecedores HY906, e o mesmo adesivo modificado com *carboxyl-terminated butadiene acrylonitrile* (CTBN). Através de uma análise por EF, foi possível executar uma simulação do processo de rotura da seguinte forma. Quando era obtida uma solução convergente após cada incremento de carga, era realizada uma verificação para averiguar se a condição de rotura tinha sido atingida em qualquer região da junta.

Perante estas condições, os valores do módulo de *Young* (E) e do coeficiente de *Poisson* (ν) do material no interior da região eram repostos a zero ou muito próximo de zero, de tal modo que o elemento ou elementos correspondentes podem deformar-se quase livremente sem transferir qualquer carga. A comparação entre os resultados experimentais e por EF mostrou que o critério de energia específico utilizado foi bastante bem sucedido para a previsão da fratura. Todas as análises realizadas foram baseadas em condições bastante realistas: todas consideraram a teoria de grandes deslocamentos e todos os materiais foram tratados elasto-plasticamente com base nos seus resultados experimentais, com ou sem um filete de adesivo.

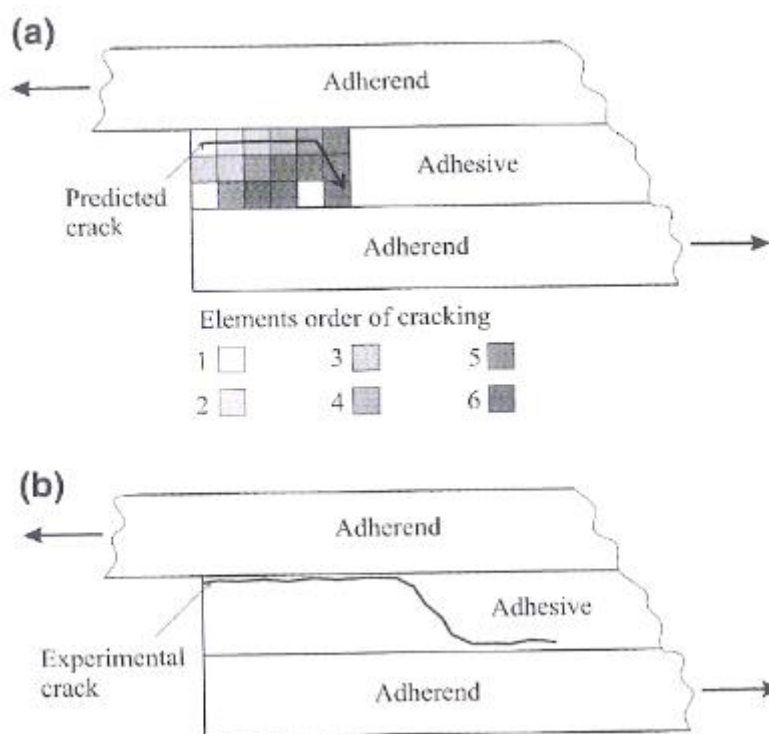


Figura 18 – Processo de rotura das JSS; (a) esquema de rotura obtida numericamente; (b) rotura no adesivo obtida experimentalmente por Chen et al. [53]

2.2.5 Método de Elementos Finitos eXtendido

De uma forma geral, o MEFX consiste numa modificação da formulação do método de EF cuja finalidade reside na análise do crescimento do dano em meios contínuos. O método utiliza leis de dano que se baseiam na resistência em bruto dos materiais para a iniciação do dano e deformações para previsão da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 usados nos MDC. Comparativamente com os MDC, o MEFX apresenta a vantagem de a fenda não ter de seguir um trajeto pré-definido. De facto, a fenda propaga-se de forma livre no interior do material sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das discontinuidades ou que haja a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda durante a análise [54]. Este método é uma extensão dos

EF, cujas características fundamentais foram referenciadas na década de 90 [55]. O MEFX é baseado no conceito de partição de unidade e pode ser implementado no método de EF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto da extremidade da fenda, para permitir o crescimento do dano e separação entre as faces da fenda [56]. Devido ao crescimento do dano, a extremidade da fenda modifica constantemente a sua posição e orientação conforme as condições de carga e a geometria da estrutura, simultaneamente à criação das funções de enriquecimento necessárias para os nós dos EF na proximidade da extremidade da fenda. O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados.

2.2.5.1 Formulação

A expressão fundamental do vetor de deslocamentos \mathbf{u} , incluindo o enriquecimento dos deslocamentos, é dada por [57]:

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

$N_i(\mathbf{x})$ 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 19). 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.

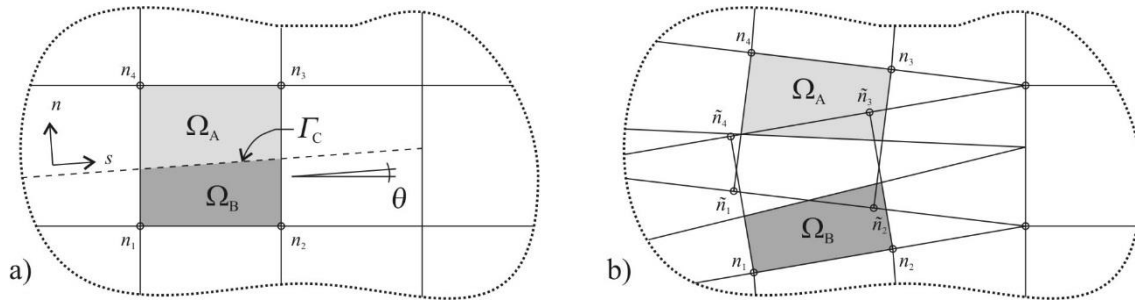


Figura 19 – Propagação do dano no MEFX usando o conceito de nós fantasmas antes (a) e depois (b) da repartição de elementos fraturados em subelementos [58]

2.2.5.2 Critérios de início e propagação do dano

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 [59]:

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

onde σ_{max} é a tensão principal máxima atual num dado ponto de integração e σ_{max}^0 é a resistência de um material à tração. A interpretação dos parêntesis de Macaulay é usada para especificar que uma tensão compressiva não induz dano. O critério de tensão nominal máxima (MAXS) e o critério de deformação nominal máxima (MAXE) são dados, por esta ordem, por [59]:

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

onde t_n e t_s são as componentes de tensão normal e ao corte da superfície fraturada, e t_n^0 e t_s^0 são os respetivos valores limite. Os parâmetros referentes ao critério MAXE têm o mesmo significado, onde ε_n e ε_s são as componentes de deformação normal e ao corte, e ε_n^0 e ε_s^0 são os devidos valores limites. Outros dois critérios de elevada importância são o critério quadrático de tensão (QUADS) e o critério quadrático de deformação (QUADE). Os critérios são dados, respetivamente, pelas seguintes funções [59]:

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

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

2.2.5.3 Aplicação a juntas adesivas

O MEFX tem sido cada vez mais aplicado para o estudo de juntas coladas. Apesar de ser um método extremamente recente na literatura, apresenta resultados muito fiáveis e precisos em casos específicos [60]. Desta forma, passam-se a descrever alguns estudos que foram realizados com recurso a este método.

Campilho et al. [58] avaliaram a viabilidade do MEFX para modelar a propagação de fendas e prever o comportamento de rotura numa junta adesiva sujeita à tração. Para isso foram considerados dois tipos de adesivos estruturais, em ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e diferentes graus de restrição às deformações no adesivo: aderentes rígidos e flexíveis. As leis de dano do MEFX foram estabelecidas de acordo com os dados determinados experimentalmente G_{IC} e t_n^0 , por testes DCB e ensaios de tração, respetivamente. Foram testadas duas configurações DCB para verificar a fiabilidade do MEFX na simulação da rotura em juntas adesivas. A configuração A corresponde a um adesivo epóxico frágil (XN1244 por Nagase Chemtex) entre substratos de aço rígidos, enquanto que a configuração B é composta por um adesivo dúctil (Araldite 2015) com substratos em compósito (carbono-epóxico). A análise 2D MEFX foi feita no *software* Abaqus® e as leis de dano foram assumidas como triangulares (Figura 20).

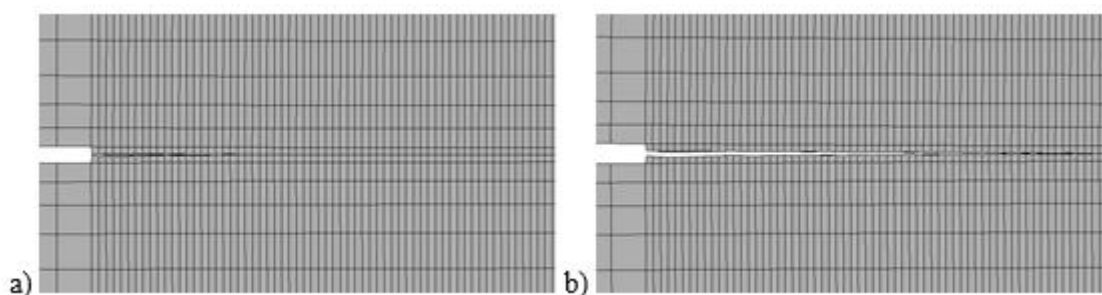


Figura 20 – Propagação do dano pelo algoritmo MEFX, iniciando na extremidade da junta (a) e crescendo horizontalmente ao longo da camada adesiva (b) para a configuração A [58]

Na Figura 21 observam-se as curvas P - δ experimentais e numéricas para a configuração A em ensaios DCB, apresentando a forma côncava clássica após ser atingida a força máxima correspondente.

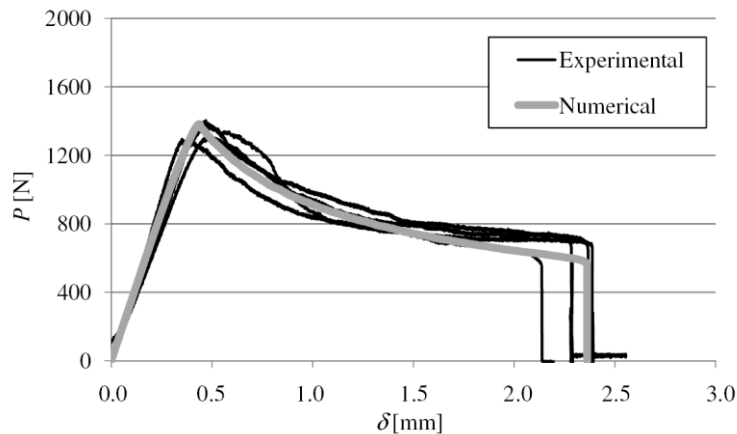


Figura 21 – Comparação das curvas P - δ experimentais e numéricas (MEFX) para a configuração A [58]

Para todas as configurações de juntas testadas, observou-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais no que concerne à rigidez elástica, tensão máxima e a tensão durante a propagação, demonstrando que o MEFX é adequado para prever a resistência de juntas adesivas sujeitas à tração pura.

Campilho et al. [61] testaram as formulações de MDC e MEFX incorporadas no Abaqus® para a simulação de juntas de sobreposição simples e dupla, utilizando substratos de alumínio e um adesivo frágil (Araldite AV138). Os valores de L_0 testados estão compreendidos entre 5 e 20 mm. O adesivo foi caracterizado sob tração e corte, o que permitiu a determinação dos parâmetros de dano do MEFX. Na análise 2D foram consideradas não-linearidades geométricas, com elementos sólidos de estado plano de deformação. A Figura 22 mostra a propagação da fenda para uma JSS com $L_0=20$ mm, utilizando o critério da tensão principal máxima para o início de dano e estimativa da direção do crescimento da fenda. Nestas condições, a direção da tensão máxima levou à propagação do dano no sentido do substrato de alumínio.

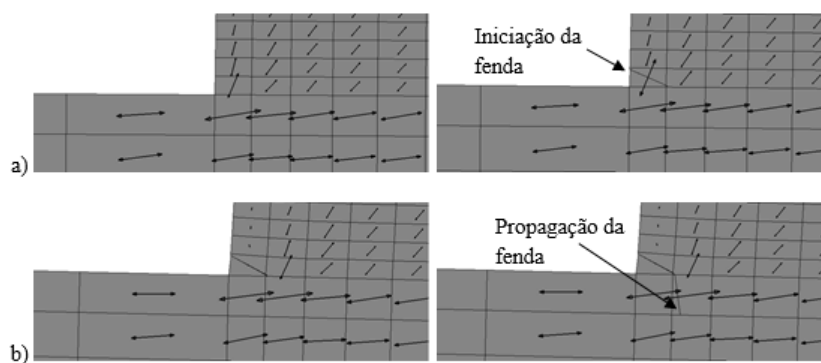


Figura 22 – Propagação da fenda numa JSS com $L_0=20$ mm usando o MEFX (as setas representam as direções de tensão principal máxima): iniciação de dano dentro do adesivo na extremidade do L_0 (a) e propagação da fenda substrato de alumínio (b) [61]

Quando a frente da fenda chegou ao aderente, o dano propagou quase verticalmente devido à direção das tensões principais na extremidade da junta (Figura 22), o que claramente não reflete o comportamento real das JSS. Os autores concluíram que a propagação de danos ao longo da ligação adesiva é assim inviável com este método, tal como está atualmente implementado no Abaqus®, uma vez que o algoritmo do MEFX procura sempre as tensões máximas na extremidade da fenda, o que resulta no crescimento da fenda para os aderentes, ignorando o que acontece dentro da camada adesiva e evitando assim a propagação de dano ao longo da linha de adesão. Como tal, foi proposta uma nova solução para estimar a força máxima ($P_{máx}$): foi considerado que este valor é atingido quando ocorre a iniciação da propagação da fenda nas extremidades da ligação, utilizando o critério da deformação principal máxima, já que este demonstrou ser menos sensível ao tamanho da malha do que o critério da tensão principal máxima.

Na Figura 23 são apresentados os dados experimentais e do MEFX considerando o critério da deformação principal máxima, que mostra que o MEFX é moderadamente preciso em simular estas estruturas com adesivos frágeis, que incorrem numa rotura catastrófica quando a deformação máxima do adesivo. No entanto, esta metodologia escolhida só é aceitável devido à fragilidade do adesivo.

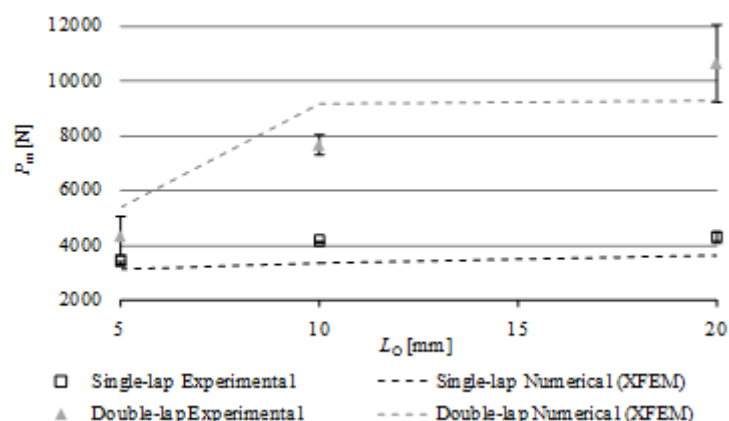


Figura 23 – Comparação da resistência obtida experimental e numericamente (MEFX) em função de L_0 [61]

Como conclusão, comparando os dados experimentais e os obtidos pelo MEFX, verifica-se que as previsões são aceitáveis usando a técnica descrita para a avaliação de $P_{máx}$. No entanto, o MEFX não é adequado para a propagação de danos em juntas coladas como é atualmente implementado no Abaqus®, uma vez que a direção do crescimento da fenda é orientada pelas tensões máximas principais na extremidade da junta.

No trabalho de Campilho et al. [62] o MEFX foi aplicado à previsão de resistência de juntas adesivas em modo puro de carregamento (tração) e sujeitas a diferentes temperaturas. Este estudo é constituído por uma análise experimental e MEFX sobre o

comportamento à tração do adesivo XN1244 de alta temperatura da Nagase Chemtex a 4 temperaturas diferentes, até 200°C, usando dados experimentais obtidos a partir de um trabalho previamente publicado pelos mesmos autores aplicado no contexto de modelação por MDC [63]. Para a caracterização da rotura à tração foi considerada a geometria DCB (Figura 24).

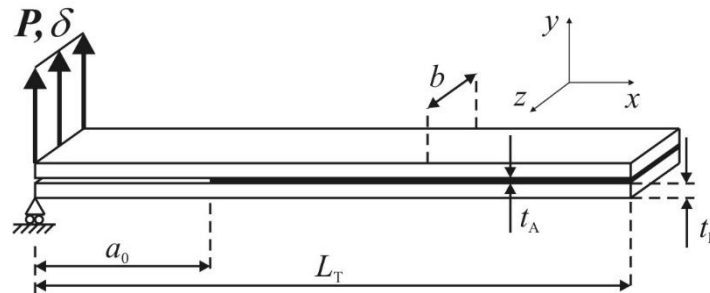


Figura 24 – Geometria e dimensões da junta de sobreposição simples [62]

O *software* utilizado foi o Abaqus®, com o principal objetivo de estimar uma lei de dano para a camada de adesivo de XN1244 a diferentes temperaturas. Além disso, foram consideradas leis de dano triangulares.

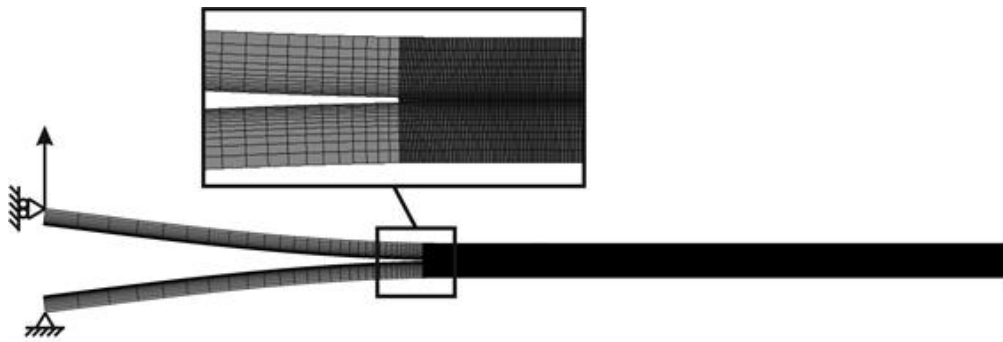


Figura 25 – Representação da malha para análise do dano por MDC e MEFX [62]

Na Figura 25 observa-se as condições fronteira e de carregamento, e o refinamento da malha. A validação das leis MEFX para o adesivo é realizada se houver uma boa correlação entre as curvas $P-\delta$ dos testes de DCB e os resultados obtidos pelo MEFX.

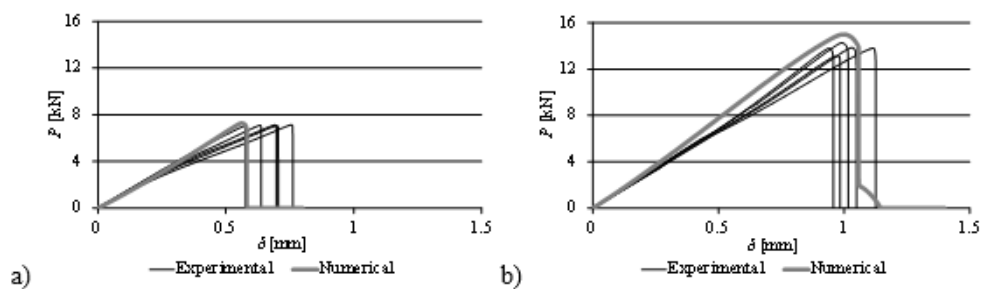


Figura 26 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas à temperatura ambiente(a) e 100°C (b) [62]

Neste estudo numérico verificou-se que, para as várias temperaturas testadas, se obteve elevada precisão em comparação com resultados experimentais (Figura 26), nomeadamente no que diz respeito à rigidez elástica, tensão máxima suportada, cargas transmitidas durante o crescimento da fenda e propagação da fenda. Como resultado, o MEFX foi validado numericamente para a previsão do comportamento de juntas adesivas à tração pura.

No trabalho de Sugiman et al. [64] foram utilizados MDC para simular a propagação de dano na camada adesiva em JSS. Numa fase inicial, os autores utilizaram a técnica de deformação na superfície exterior para seguir a propagação de dano na camada adesiva, e também para efetuar a calibração da lei coesiva do adesivo. Após a obtenção dos parâmetros MDC calibrados, estes foram utilizados para a previsão da resistência de juntas de reforço sob cargas de flexão. Uma característica importante deste trabalho é que, para as simulações das JSS com um filete de adesivo, utilizou-se o MEFX em conjunto com a modelação por MDC para prever iniciação de dano no filete. Assim, foi considerada uma região enriquecida pelo MEFX para o filete, e a rotura da ligação adesiva foi avaliada por MDC (Figura 27 a).

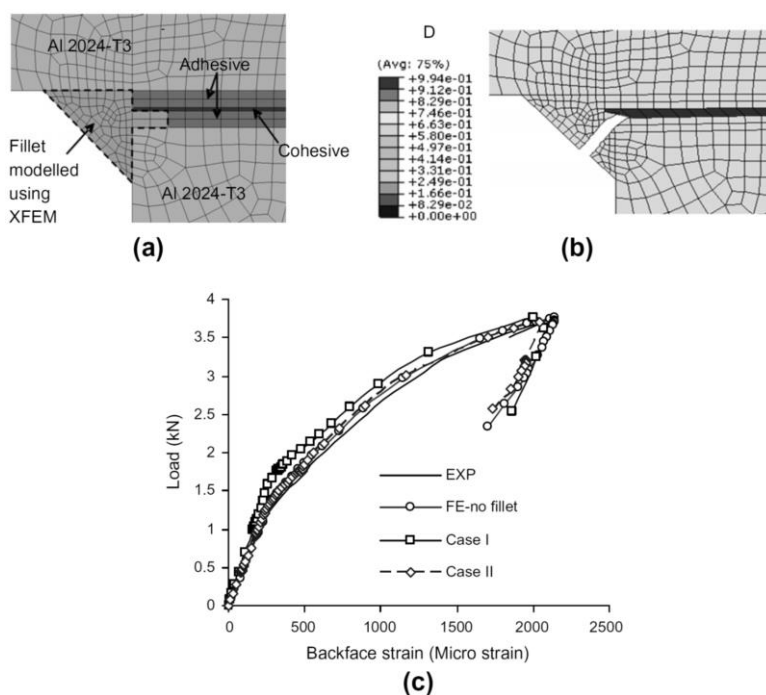


Figura 27 – Modelo híbrido MDC/MEFX (a) iniciação da fenda na região por MEFX (b) e curvas de tensão de carga para os modelos experimentais e pelo MEF [64]

Como pode ser observado na Figura 27 a), o filete foi considerado como um triângulo retângulo com comprimento lateral de 0,5 mm (compreendendo a altura total dos aderentes). O tamanho do elemento dentro do filete foi de aproximadamente 0,05 mm \times 0,05 mm. A propagação da fenda por esta técnica de modelação é mostrada na Figura 27 b). Observou-se experimentalmente que a zona ligada entre a extremidade vertical

da aderente e o filete eram mal coladas, uma vez que a superfície do aderente em particular não foi bem preparada. Assim, foram criados dois modelos: um considerando uma boa ligação entre a superfície do substrato e a face vertical (Processo I), e outro em que a ligação entre estes dois materiais era fraca (Processo II). No primeiro cenário, a tensão principal e de resistência à fratura foram consideradas como sendo iguais às da camada adesiva, enquanto que no segundo, o módulo de Young, tensão principal máxima, e os valores normais e de corte de tenacidade à fratura foram degradados artificialmente pela mesma quantidade. Esta quantidade foi numericamente definida como a melhor correspondência para os testes, resultando em 69% de degradação.

Os resultados mostram que a simulação com propriedades do caso I preveem a deformação experimental para uma determinada carga. A simulação com propriedades do caso II dá uma curva de tensão de carga semelhante à dos resultados experimentais e à de simulação sem filete de adesivo. No final, a abordagem híbrida MDC/MEFX foi considerada como válida, mas descartada nas simulações posteriores uma vez que fornece resultados idênticos para a simulação sem qualquer filete.

Uma abordagem idêntica foi realizada por Mubashar et al. [65], considerando a abordagem híbrida MDC/MEFX para modelar JSS entre aderentes de alumínio, com bons resultados. Consideraram-se modelos bidimensionais em Abaqus®. As malhas foram construídas com elementos quadriláteros de modos incompatíveis para melhorar a resposta da malha na presença de rotação dos sólidos. Os aderentes foram modelados como puramente elásticos devido à ausência de deformação plástica nos testes. A camada adesiva foi modelada por uma combinação de elementos contínuos com propriedades elasto-plásticas, elementos coesivos e regiões enriquecidas pelo MEFX. Apesar deste facto, a metodologia híbrida foi um pouco diferente do trabalho de Sugiman et al. [64]. Neste trabalho, a camada adesiva incluindo filetes nas extremidades de sobreposição foi modelada com elementos sólidos enriquecidos MEFX, ao passo que o adesivo / interface do aderente foram modelados com elementos MDC para ter em conta o crescimento do dano na direção longitudinalmente da junta adesiva. Verificou-se que a carga máxima prevista estava muito próxima dos valores experimentais. Concluiu-se assim que é possível prever com precisão a carga máxima e a propagação da fenda por esta abordagem híbrida.

No trabalho de Curiel Sosa e Karapurath [19] foi aplicado o MEFX para simular danos de delaminação em laminados de fibra-metal. A estrutura foi testada em modo puro de carregamento (tração). Os modelos híbridos foram compostos por substratos de alumínio com espessura de 4,1 mm e um laminado composto por fibra de vidro/epóxico com 1,25 mm de espessura, conforme demonstrado na Figura 28.

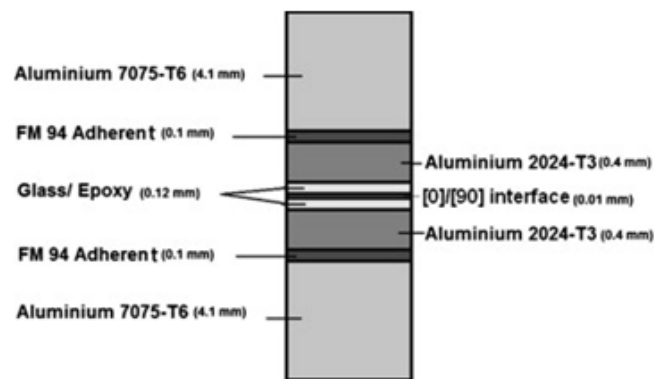


Figura 28 – Configuração do modelo híbrido [19]

O comprimento da fenda inicial, que é necessária nos testes DCB, foi introduzido nos modelos numéricos através de um componente adicional feito de elementos de casca para criar a descontinuidade permitindo, assim, a iniciação da fenda e propagação em qualquer uma das interfaces. O carregamento foi aplicado a uma velocidade constante de 10 mm/s. Na Figura 29 observam-se as curvas $P-\delta$ resultantes dos ensaios experimentais e simulação através do MEFX e MDC. Os dados das simulações com MDC foram adquiridos num trabalho anterior [66]. No caso das simulações por MDC, foram testadas resistências interfaciais de 25 e 35 MPa, e verificou-se que o valor de 35 MPa proporcionou uma melhor correspondência quando comparado com os ensaios experimentais. As simulações pelo MEFX subestimaram ligeiramente a área debaixo da curva, ao contrário da abordagem por MDC, que excedeu os valores experimentais. Além disso, verificou-se que o MEFX poderia produzir bons resultados mesmo com uma malha menos refinada. Assim, concluiu-se que o MEFX é uma técnica promissora na previsão de rotura em compósitos.

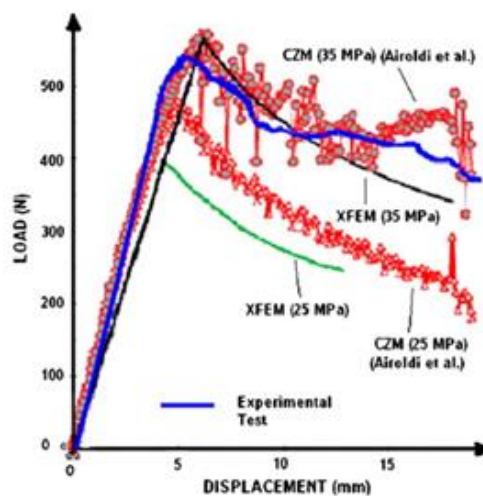


Figura 29 – Comparação das previsões obtidas pelos ensaios experimentais, MEFX e MDC [19]

Fernandes et al. [67] aplicou os métodos MDC e MEFX para prever a resistência das JSS. Para isso, foram utilizados três tipos de adesivos: um adesivo frágil (Araldite® AV138), um moderadamente dúctil (Araldite® 2015) e um adesivo dúctil (Sikaforce® 7888), substratos de alumínio e diferentes comprimentos de sobreposição. A análise numérica foi realizada no Abaqus®. Os aderentes foram modelados como sólidos elasto-plásticos e o adesivo com elementos MDC. A modelação das juntas foi feita em duas dimensões, com elementos sólidos de estado plano de deformação para a modelação dos aderentes. Para a análise de rotura por MDC foram consideradas não linearidades geométricas. A Figura 30 mostra uma malha representativa para análise da rotura por MDC e pelo MEFX. As malhas para modelos de análise de tensões são bastante refinadas, com elementos na camada adesiva de dimensões 0,02 mm por 0,02 mm. Com este refinamento de malha é possível obter com alguma precisão as tensões de pico nas extremidades das zonas de sobreposição.

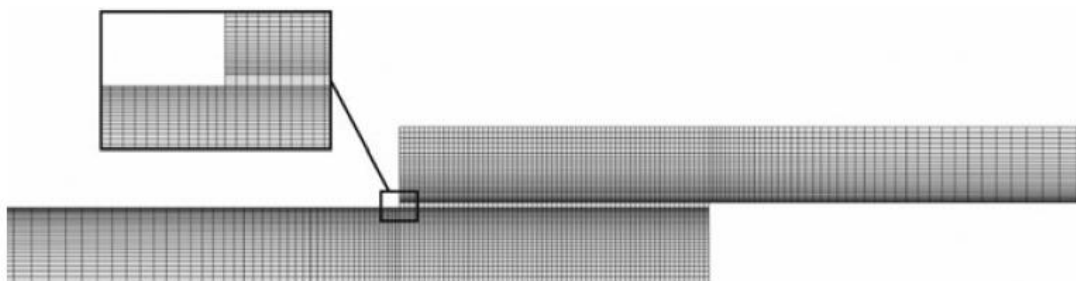


Figura 30 – Representação da malha para análise por MDC e MEFX [67]

Na análise numérica por MDC a camada adesiva foi modelada por uma abordagem contínua, e os aderentes foram considerados materiais elástico-plásticos. Em todas as simulações, a iniciação de dano ocorreu nas extremidades de sobreposição da junta propagando-se para a região interior da ligação adesiva. Na Figura 31 observam-se as curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente pelo MDC para as juntas em que se empregou o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm (Figura 31 a) e para as juntas em que se empregou o Sikaforce® 7888 e $L_0=50$ mm (Figura 31 b).

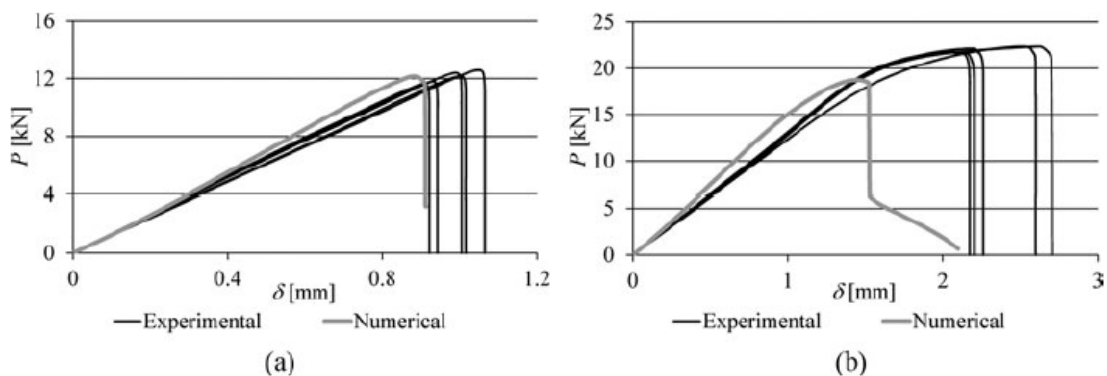


Figura 31 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm (a) e para o adesivo Sikaforce® 7888 e $L_0=50$ mm (b) [67]

A correlação geral é bastante aceitável, especialmente para as juntas adesivas em que se emprega os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, em relação a $P_{máx}$, rigidez ou deslocamento de rotura. Para o Sikaforce® 7888, os resultados experimentais superaram os numéricos, sendo este facto abordado mais à frente nesta tese.

O MEFX também foi utilizado para estudar o comportamento das juntas. Neste trabalho, apenas foram usados critérios baseados nas deformações (MAXE, MAXPE e QUADE) para prever a resistência das juntas adesivas. Na Figura 32 é feita uma comparação dos resultados obtidos pelo MEFX com os experimentais pelos critérios MAXPE, MAXE e QUADE para as juntas coladas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

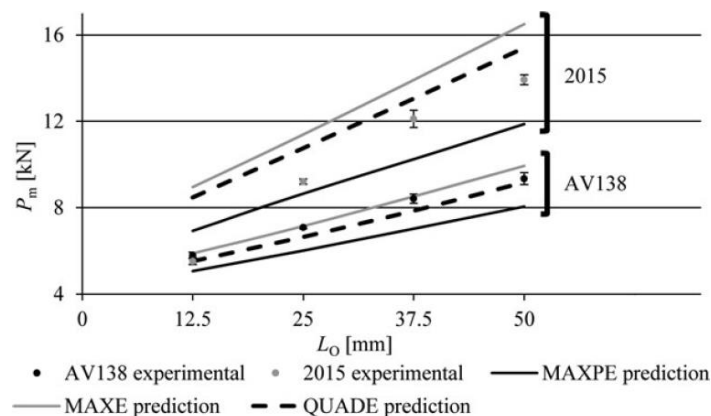


Figura 32 – Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos pelo MEFX para as juntas coladas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 [67]

Para o adesivo Sikaforce® 7888, os resultados obtidos por estes critérios diferiram largamente dos obtidos experimentalmente, isto porque em situações em que se empreguem adesivos muito dúcteis os critérios não são viáveis. De facto, os valores dos resultados obtidos superaram até cinco vezes os resultados obtidos experimentalmente. Para adesivos frágeis como o Araldite® AV138, a técnica adotada é bastante precisa para simular o comportamento real das juntas adesivas. Para adesivos que possuem alguma ductilidade, como o Araldite® 2015, o MEFX apresenta alguma precisão.

Desta forma, concluiu-se que a modelação por MDC com uma lei de dano triangular é bastante precisa para juntas onde se empreguem adesivos frágeis e moderadamente dúcteis. Para o adesivo Sikaforce® 7888, a lei de dano triangular não revelou ser a mais adequada devido à grande ductilidade do adesivo, o que resultou numa subestimação da resistência das juntas. Por sua vez, a análise pelo MEFX revelou que a modelação da propagação do dano não é possível por causa de a rotura ocorrer predominante em modo de corte, o que faz com problemas numéricos de convergência impossibilitem a propagação de dano. Os resultados obtidos mostraram que os critérios baseados em tensões subestimaram em larga medida os valores experimentais de $P_{máx}$, o que mostra que estes não são adequados na previsão da resistência pelo MEFX.

DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

- 3.1.1 Materiais utilizados
- 3.1.2 Geometria das juntas
- 3.1.3 Processo de fabrico
- 3.1.4 Ensaio das juntas
- 3.1.5 Resultados obtidos

3.2 Trabalho numérico

- 3.2.1 Condições da análise numérica
- 3.2.2 Modelo de dano utilizado
- 3.2.3 Análise de tensões na junta
- 3.2.4 Análise dos resultados obtidos
- 3.2.5 Previsão da resistência

3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo é dividido em duas partes: experimental e numérica. Na parte experimental é feita uma descrição dos procedimentos efetuados, nomeadamente a preparação das juntas, colagem dos substratos e obtenção dos provetes, e ensaios de tração. Para finalizar, são apresentados e analisados os resultados obtidos experimentalmente realizados no trabalho de Nunes [1]. No que diz respeito à parte numérica, esta foi realizada no *software* Abaqus® utilizando o MEFX. Neste subcapítulo é feita uma análise da distribuição de tensões, uma comparação da resistência obtida para cada adesivo pelo MEFX com os resultados experimentais, e ainda uma comparação com os resultados obtidos pelo MDC.

3.1 Trabalho experimental

Os ensaios descritos nesta secção foram realizados num trabalho anterior [1]. O trabalho realizado na presente tese consistiu em todo o tratamento das curvas $P-\delta$ experimentais, respetivo tratamento e análise. Relativamente ao trabalho experimental, este consistiu no ensaio de JSD unidas por ligação adesiva, sujeitas a esforços de tração, com o intuito de determinar a resistência que estas oferecem a esta sollicitação e de estudar a variação da resistência máxima em função de L_0 . Neste capítulo é feita uma comparação dos resultados obtidos experimentalmente entre juntas com diferentes adesivos para cada L_0 , são analisados os diferentes modos de rotura e são discutidos os resultados obtidos em função das características de cada adesivo.

3.1.1 Materiais utilizados

Neste subcapítulo são descritos todos os materiais usados no trabalho experimental, mais propriamente os substratos e os adesivos, e é feita uma análise detalhada das suas propriedades mecânicas mais relevantes para a análise numérica a realizar.

3.1.1.1 Substratos

O material usado como substrato em todas as juntas consiste na liga de alumínio AW6082-T651. Esta liga de alumínio é obtida através de envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C. A sua seleção deveu-se não só pelas 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 [68], onde foram definidas as seguintes propriedades: resistência à tração de $324,00 \pm 0,16$ MPa, módulo de *Young* (E) de $70,07 \pm 0,83$ GPa, tensão de cedência de $261,67 \pm 7,65$ MPa e deformação de rotura à tração de $21,70 \pm 4,24\%$. As curvas tensão-deformação ($\sigma-\epsilon$) dos substratos de alumínio foram obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [68], e encontram-se representadas na Figura 33. Também está representada a aproximação numérica usada nos modelos MDC e MEFX.

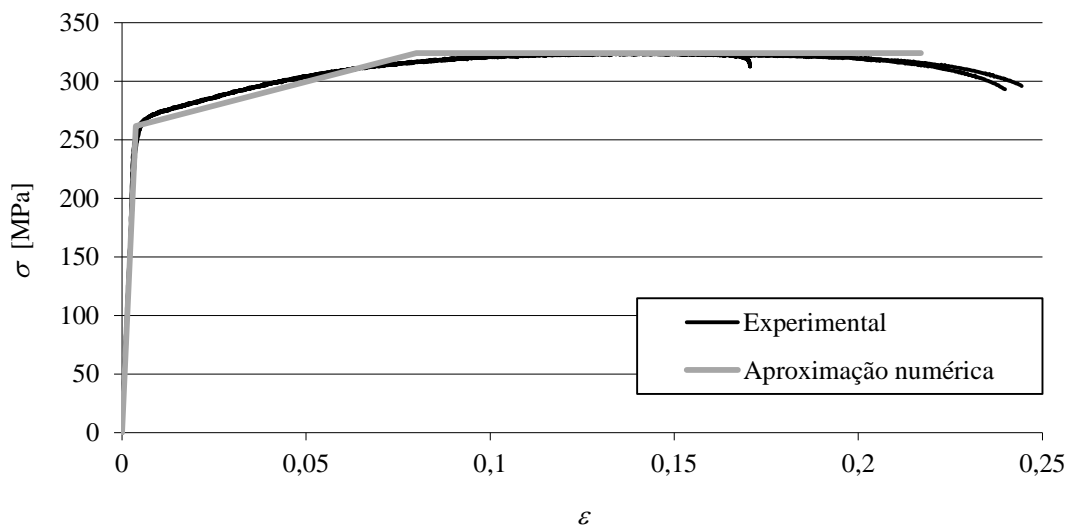


Figura 33 – Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) do alumínio AW6082-T651 [69]

3.1.1.2 Adesivos

Neste tópico mencionam-se os adesivos usados no trabalho experimental e suas propriedades. Nas JSS usaram-se três tipos de adesivos: o Araldite® AV138, que se caracteriza por ser um adesivo epóxico frágil, o Araldite® 2015, definido como sendo um adesivo epóxico dúctil, e o adesivo Sikaforce® 7888, que se caracteriza como um adesivo poliuretano estrutural que combina alta ductilidade com resistência mecânica elevada.

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 descreve-se como um adesivo epóxico frágil, mas de elevada resistência, adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [70]. As curvas σ - ϵ dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 34. Estas foram obtidas experimentalmente na referência [70]. Na Tabela 3 visualizam-se as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

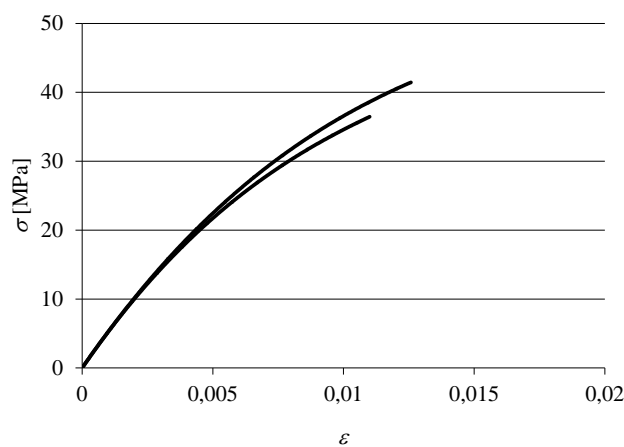


Figura 34 – Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [69]

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [71]

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de <i>Young</i> , E [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de <i>Poisson</i> , ν^b	0,35
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	1,21±0,10
Módulo de elasticidade transversal, 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 tração, G_{IC} [N/mm]	0,20 ^a
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	0,38 ^a

^a valores estimados na referência [72]

^b valor do fabricante

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 define-se como um adesivo epóxico estrutural de duas partes, de ductilidade moderada e que, quando comparado com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração tipicamente nas extremidades das juntas, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes [70].

Apresentam-se as curvas σ - ϵ (Figura 35) dos provetes maciços para este adesivo, obtidas experimentalmente na referência [70]. Na Tabela 4 estão apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo e, 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 praticamente o dobro da do Araldite® 2015.

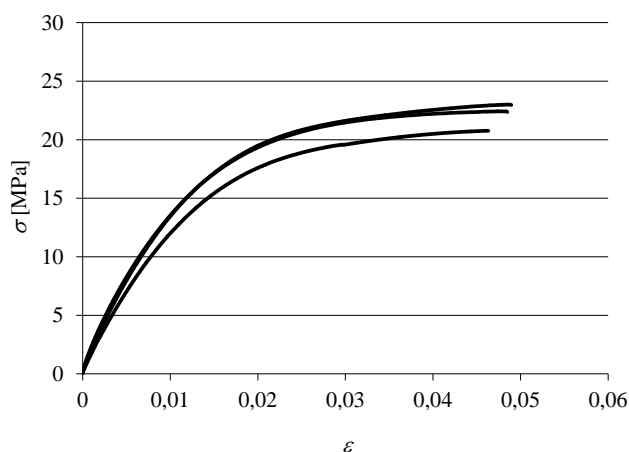


Figura 35 – Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [70]

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [70]

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de <i>Young</i> , E [GPa]	1,85±0,21
Coefficiente de <i>Poisson</i> , ν^a	0,33
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	12,63±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 elasticidade transversal, 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]	4,70±0,34

^a valor do fabricante

3.1.1.2.3 Sikaforce® 7888

O Sikaforce® 7888 é um adesivo estrutural de base poliuretano de alta resistência e ductilidade. Este adesivo é composto por dois componentes, o seu processo de cura ocorre à temperatura ambiente durante cerca de 24 horas e é sobretudo aplicado na indústria automóvel. Faz parte de uma nova geração de adesivos que combinam a elevada resistência dos epóxidos com a capacidade de deformação dos elastómeros. Apresenta

uma elevada resistência e capacidade de alongamento, e ainda uma elevada resistência a esforços dinâmicos, o que beneficia a sua resistência à fadiga [73]. Na Figura 36 está apresentada uma curva σ - ϵ representativa de ensaio de provetes maciços para este adesivo [72].

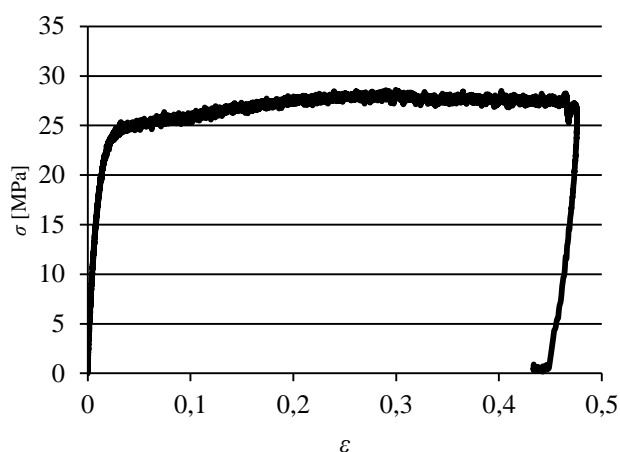


Figura 36 – Curva σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Sikaforce® 7888 [72]

Os valores das principais propriedades deste adesivo estão presentes na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce® 7888 [72]

Propriedades	Sikaforce® 7888
Módulo de <i>Young</i> , E [GPa]	1,89±0,81
Coefficiente de <i>Poisson</i> , ν^*	0,33*
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	13,20±4,83
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	28,60±2,0
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	43,0±0,6
Módulo de elasticidade transversal, G	0,727 ^a
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	-
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	20*
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	100*
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	1,18±0,22
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	8,72±1,22
*valor do fabricante	
^a estimado pela Lei de Hooke	

3.1.2 Geometria das juntas

A Figura 37 representa a geometria da respetiva junta. As dimensões da JSD são apresentadas na Tabela 6, cujos parâmetros geométricos são: L_0 , comprimento total da JSD (L_T), t_p e t_A . Foi efetuado um estudo paramétrico do valor de L_0 , considerando os valores de 12,5 mm, 25 mm, 37,5 mm e 50 mm.

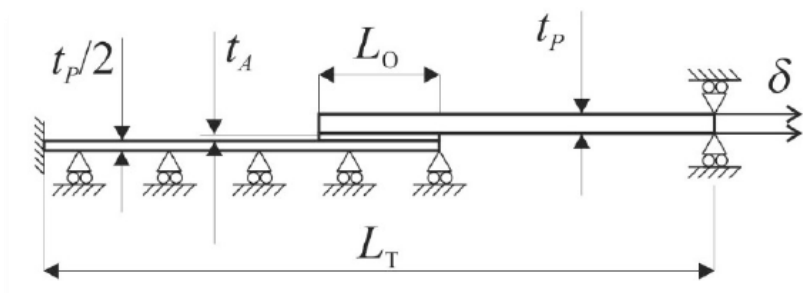


Figura 37 – Configuração da geometria do provete da JSD [1]

Tabela 6 – Dimensões das JSD [1]

Designação	Valores (mm)
Comprimento de sobreposição (L_0)	12,5 25 37,5 50
Comprimento total da JSD (L_T)	170
Espessura dos substratos (t_p)	3
Espessura do adesivo (t_A)	0,2

3.1.3 Processo de fabrico

Seguidamente, apresenta-se o processo de fabrico das JSD realizado no trabalho de Nunes [1]. Os substratos foram fornecidos já nas suas dimensões finais, ou seja, 140x25x3 mm³. Foram necessários 60 substratos para garantir 5 provetes para cada configuração de junta. O primeiro processo consistiu na lixagem dos substratos (Figura 38 a) de modo a remover camadas de óxidos e dar rugosidade à superfície, com o objetivo de melhorar o processo de colagem e ancoragem do adesivo. A limpeza superficial dos substratos foi feita com acetona (Figura 38 b). Na Figura 39 apresenta-se o aspeto final dos substratos após o processo de limpeza.



Figura 38 – Preparação da superfície por lixagem (a) e limpeza dos substratos (b) [1]

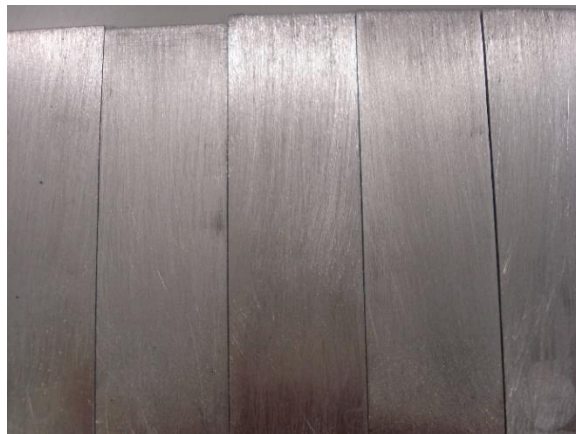


Figura 39 – Aspetto dos substratos após preparação da superfície [1]

Seguidamente, procedeu-se à preparação para aplicação do adesivo. Foi necessária a utilização de barras de apoio para fixar e alinhar os substratos (Figura 40), assim como colocar fio de pesca calibrado com diâmetro de 0,2 mm nas extremidades da zona de sobreposição de forma a garantir uma espessura de adesivo constante (Figura 41).



Figura 40 – Fixação e alinhamento dos substratos [1]

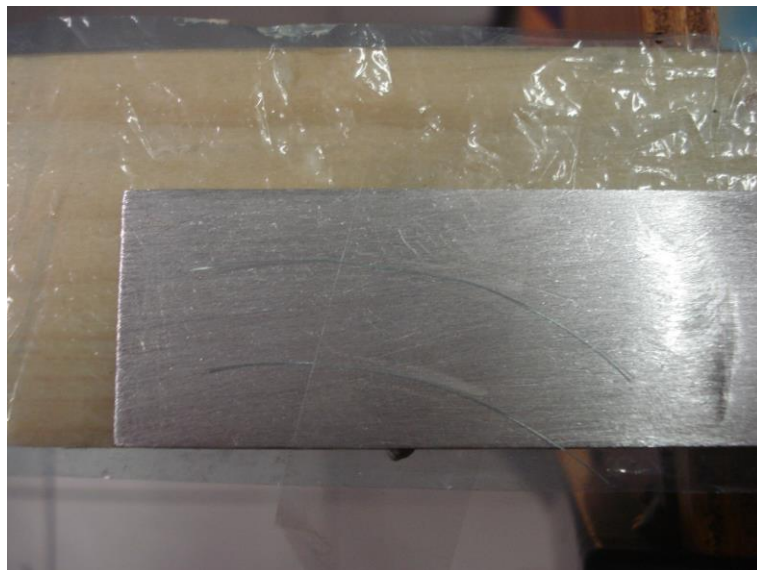


Figura 41 – Substrato com fio de pesca calibrado de 0,2 mm [1]

Com os substratos alinhados e fixos à barra de apoio, procedeu-se à aplicação do adesivo na face de colagem de um dos substratos (Figura 42). Este processo foi sempre efetuado de forma cuidada para manter o alinhamento dos substratos. Seguidamente foram colocados grampos na zona de sobreposição para, através de pressão, se garantir o valor de t_a desejado, o que resultou na expulsão do excesso do adesivo (Figura 42). Devido à dificuldade de remoção do excesso de adesivo entre os substratos exteriores dos provetes, ao fim de poucos minutos do processo de colagem, com o auxílio de um x-ato, procedeu-se à remoção do mesmo nesta zona. Finalizado todo este processo, os provetes ficaram em processo de cura, à temperatura ambiente, durante uma semana.



Figura 42 – Aplicação do adesivo Sikaforce® 7888 e fixação da junta [1]

O excesso de adesivo nas arestas exteriores foi removido com uma mó após cura total (Figura 43). Este procedimento torna-se necessário dado que estes excessos influenciam a resistência da junta relativamente à geometria teórica, em que apenas existe uma camada de adesivo com t_A constante na zona da sobreposição.



Figura 43 – Remoção do excesso de adesivo [1]

3.1.4 Ensaio das juntas

Os ensaios de tração foram realizados numa máquina de ensaios Shimadzu®, modelo AG-X 100, equipada com uma célula de carga de 100 kN e com uma distância entre maxilas de 170 mm, à temperatura ambiente (Figura 44). A velocidade de ensaio foi de 1 mm/min para todos os provetes.



Figura 44 – Fixação de uma junta adesiva na máquina de ensaios Shimadzu [1]

3.1.5 Resultados obtidos

Neste subcapítulo são apresentadas as curvas P - δ e os modos de rotura para as diferentes configurações de JSD. É também efetuada uma análise dos dados obtidos experimentalmente na forma de gráficos de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 .

3.1.5.1 Curvas P - δ

Araldite® AV138

Na Figura 45 são apresentadas as curvas P - δ obtidas experimentalmente para as JSD coladas com o adesivo Araldite® AV138 e para os diferentes valores de L_0 .

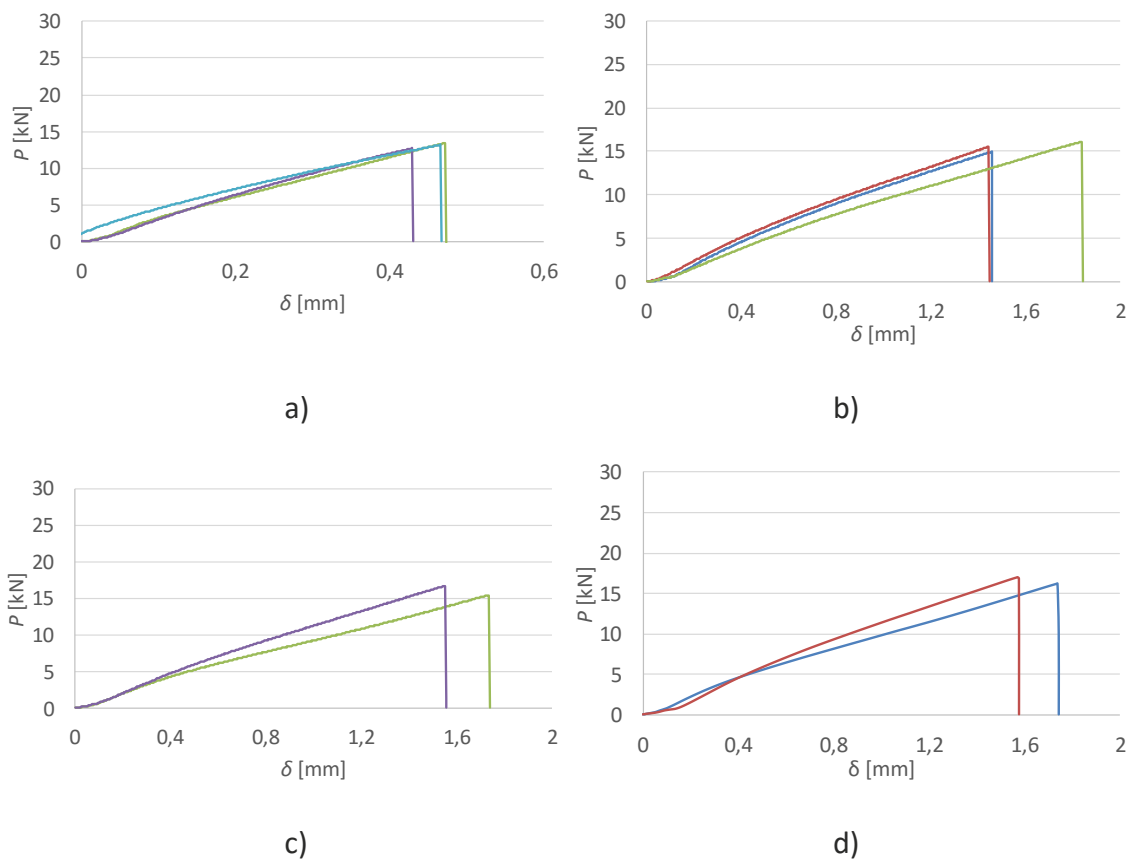


Figura 45 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente (JSD) para o Araldite® AV138, com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d) [1]

Verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura. Apenas se regista a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido à flexibilidade da máquina de ensaios e questões de amarração de provetes. De referir que os provetes cujas curvas não são apresentadas foram considerados inválidos.

Araldite® 2015

Tal como para o adesivo anterior, são apresentadas as curvas P - δ obtidas experimentalmente (Figura 46), para as JSD coladas com o adesivo Araldite® 2015 e para os diferentes valores de L_0 .

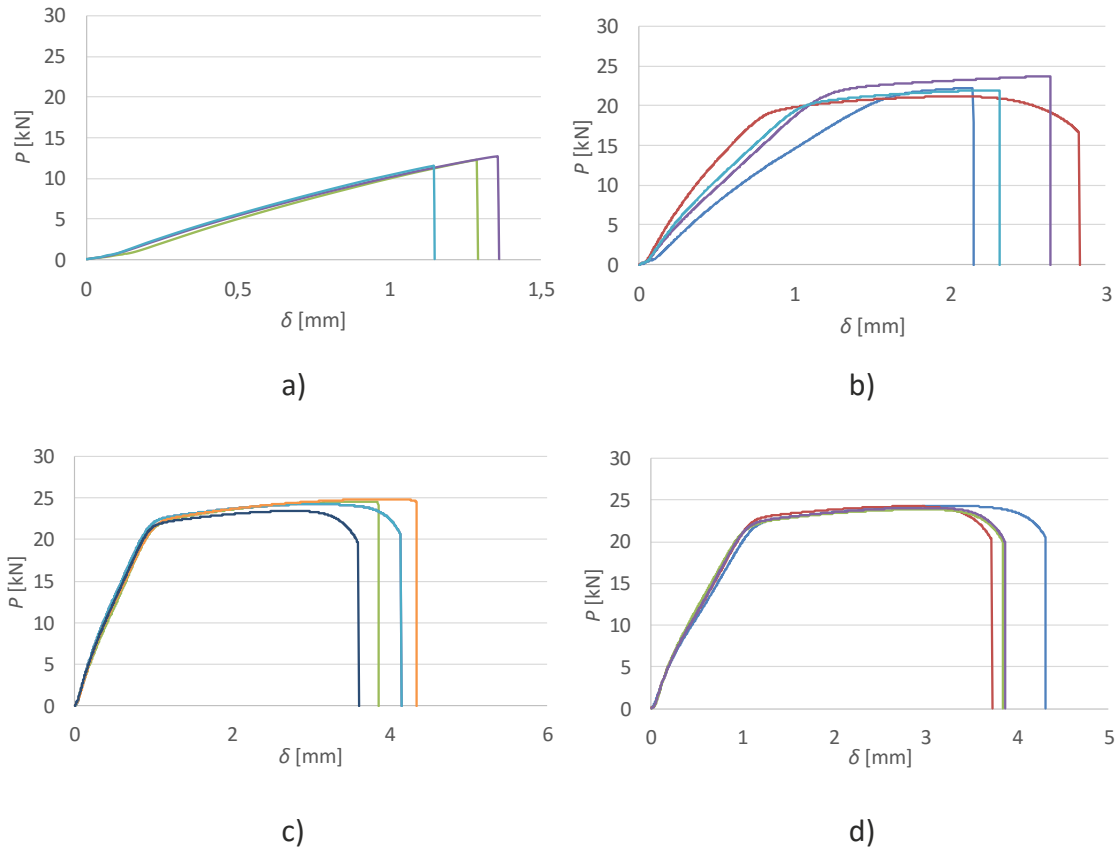


Figura 46 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente (JSD) para o Araldite® 2015, com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d) [1]

Também se verifica um comportamento linear das juntas até à rotura para $L_0=12,5$ mm. Para os restantes valores de L_0 , já se verifica a plastificação dos substratos. As pequenas oscilações observadas para o Araldite® AV138 também são visíveis nestes ensaios. De salientar que existe uma boa repetibilidade das curvas no que concerne à rigidez, $P_{\text{máx}}$ e respetivo deslocamento.

Sikaforce® 7888

Na Figura 47 são apresentadas as curvas P - δ obtidas experimentalmente para as JSD coladas com o adesivo Sikaforce® 7888 e para os diferentes valores de L_0 .

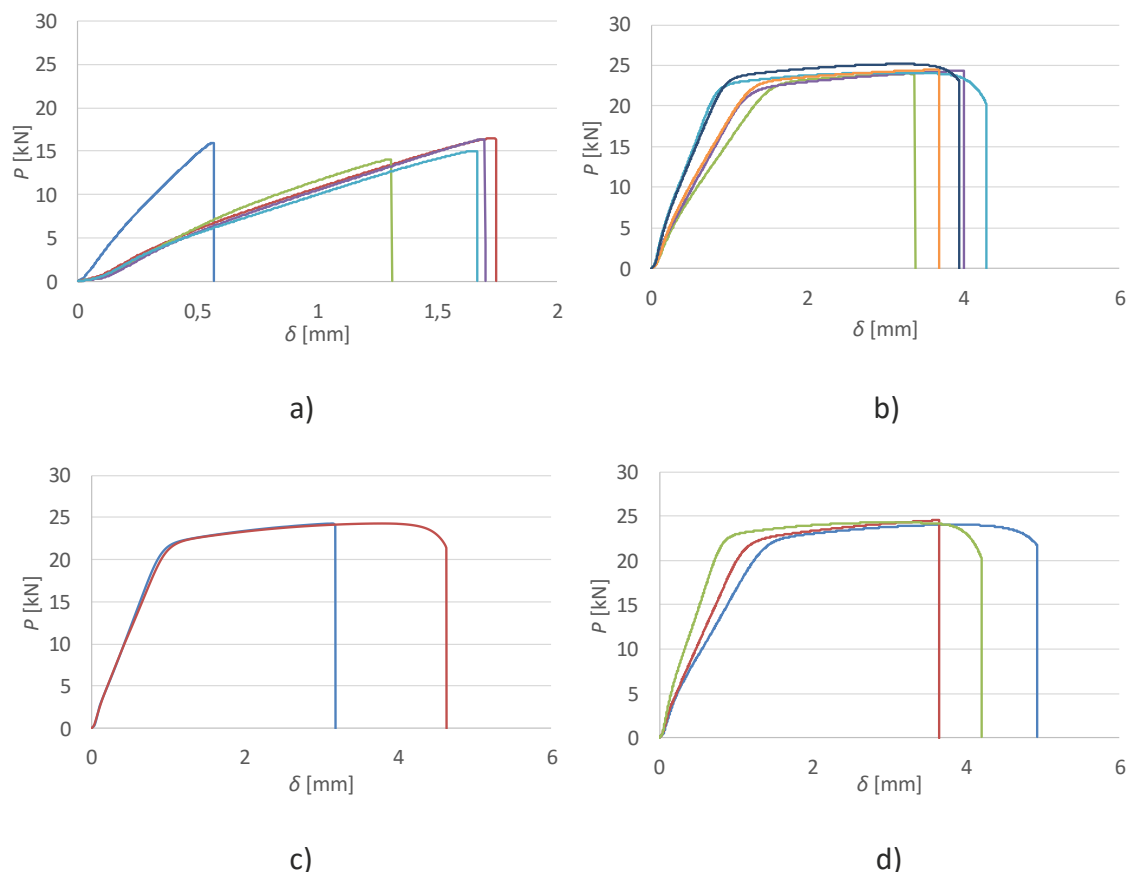


Figura 47 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente (JSD) para o Sikaforce® 7888, com $L_o=12,5$ mm (a), $L_o=25$ mm (b), $L_o=37,5$ mm (c), $L_o=50$ mm (d) [1]

Devido à plasticidade que o adesivo possui, observou-se plastificação dos substratos para as juntas com $L_o \geq 25$ mm. Tal como nos adesivos anteriores, e devido à rigidez elástica das juntas e questões de amarração dos provetes, são observadas pequenas oscilações e também se regista boa repetibilidade das curvas para cada configuração de junta.

3.1.5.2 Modos de rotura

Neste subcapítulo são apresentados os modos de rotura obtidos para as JSD, após ensaio, para os três tipos de adesivos utilizados.

Araldite® AV138

Nos ensaios com o adesivo Araldite® AV138 obtiveram-se roturas coesivas, embora por vezes próximas da interface, tal como é visível na Figura 48.

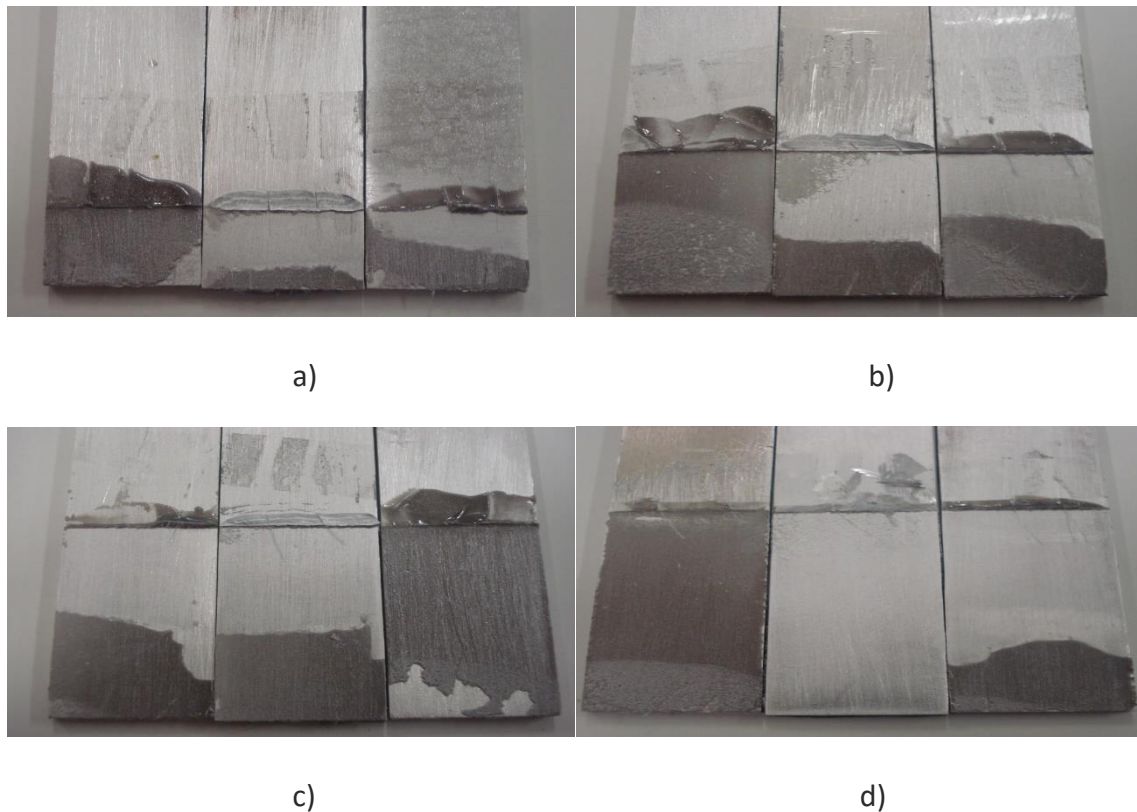


Figura 48 – Modos de rotura (JSD): Araldite® AV138 com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d) [1]

Araldite® 2015

Nos ensaios com o adesivo Araldite® 2015 obtiveram-se roturas coesivas e roturas pelo aderente, tal como demonstrado na Figura 49. Na Tabela 7 apresenta-se os tipos de rotura obtidos em função de L_0 , para as JSD ensaiadas neste trabalho. Observou-se que para $L_0=12,5$ mm se obtiveram roturas coesivas, enquanto para $L_0 \geq 25$ mm ocorreram roturas coesivas e roturas pelo aderente alternadamente. Para $L_0=50$ mm apenas se obtiveram roturas pelo aderente.

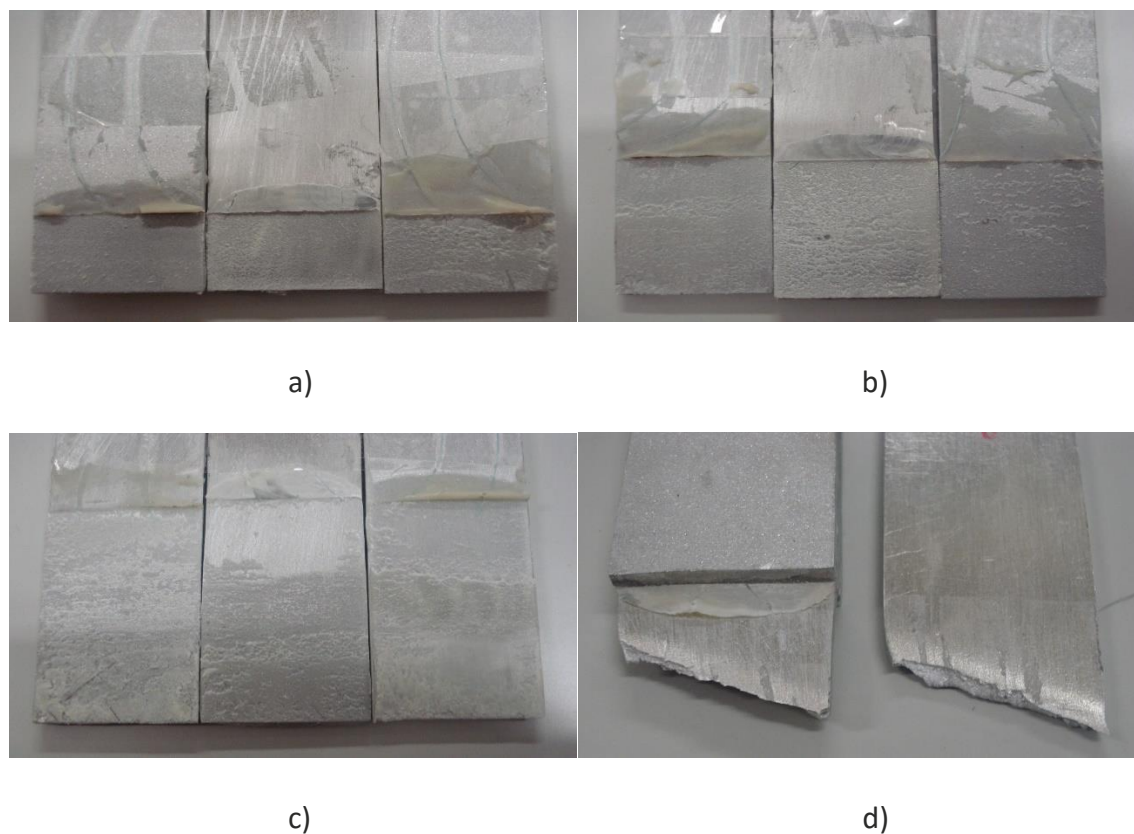


Figura 49 – Modos de rotura (JSD): Araldite® 2015 com $L_o=12,5$ mm (a), $L_o=25$ mm (b), $L_o=37,5$ mm (c), $L_o=50$ mm (d) [1]

Tabela 7 – Roturas obtidas para o adesivo Araldite® 2015 [1]

Provete	12,5	25	37,5	50
1	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente
2	Coesiva	Aderente	Aderente	Aderente
3	Coesiva	Aderente	Coesiva	Aderente
4	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente
5	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente

Sikaforce® 7888

Nos ensaios com o adesivo Sikaforce® 7888 obtiveram-se roturas coesivas e roturas pelo aderente, tal como indicado na Figura 50.

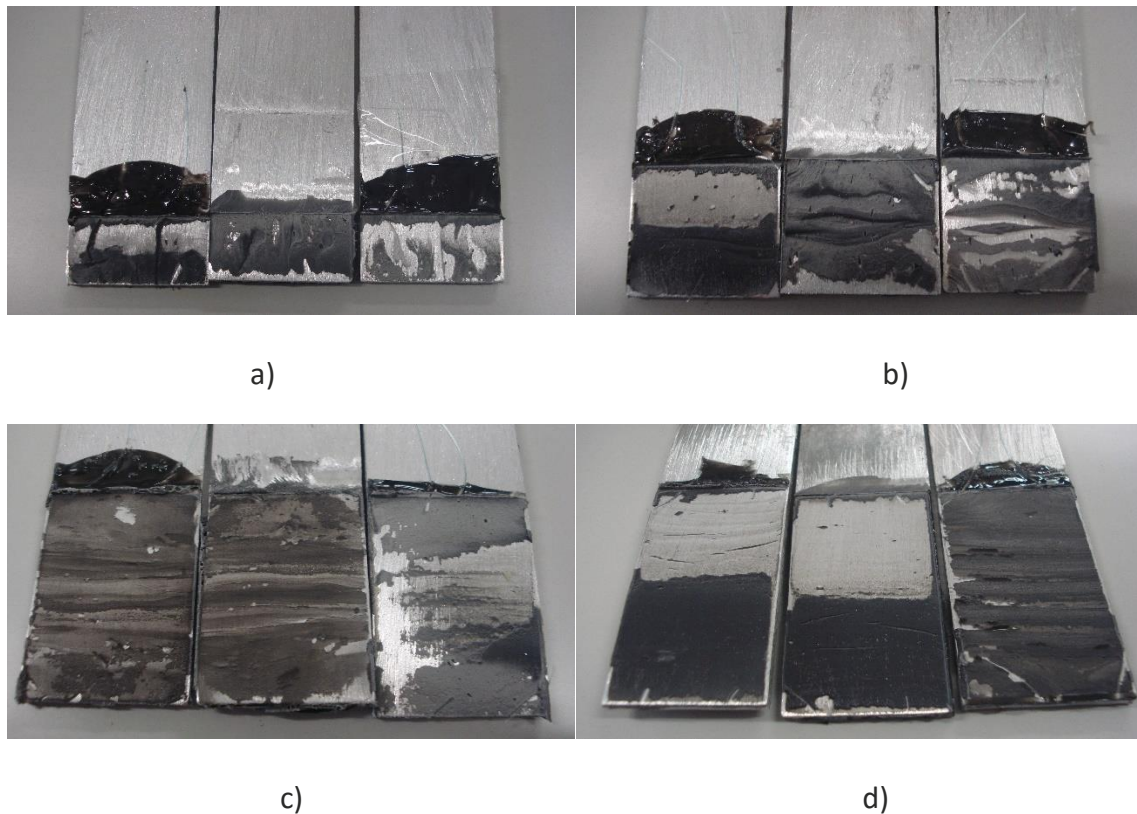


Figura 50 – Modos de rotura (JSD): Sikaforce® 7888 com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d)

A Tabela 8 mostra os tipos de rotura obtidas em função do valor de L_0 para as JSD testadas neste trabalho. Verificou-se que para $L_0=12,5$ mm apenas se obtiveram roturas coesivas. Para $L_0 \geq 25$ mm, dependendo do provete ensaiado, observaram-se roturas coesivas ou roturas pelo aderente.

Tabela 8 – Roturas obtidas para o adesivo Sikaforce® 7888 [1]

Provete	12,5	25	37,5	50
1	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente
2	Coesiva	Aderente	Aderente	Coesiva
3	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva
4	Coesiva	Coesiva	Aderente	Coesiva
5	Coesiva	Aderente	Coesiva	Coesiva

3.1.5.3 Resistência das juntas

Na Figura 51 apresenta-se os valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ e os respectivos desvios-padrão para os três adesivos utilizados.

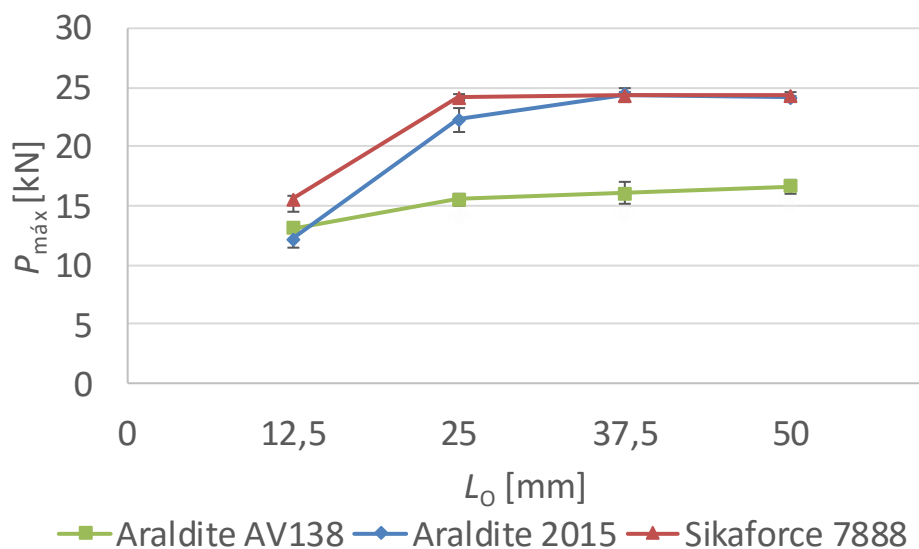


Figura 51 – Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ e desvio-padrão em função de L_0 para os diferentes adesivos em JSD [1]

Da Figura 51 pode-se concluir que houve um aumento de resistência significativo nas juntas com os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888 em função de L_0 e que o aumento da resistência no Araldite® AV138 com este parâmetro não é muito significativo.

Tabela 9 – $P_{m\acute{a}x}$ médios e aumento percentual de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 , para os três adesivos em estudo [1]

L_0 [mm]		12,5	25	37,5	50
Araldite® AV138	$P_{m\acute{a}x}$ médio [N]	13122,7	15518,3	16064,7	16630,2
	Aumento de $P_{m\acute{a}x}$ [%]	-	18,3	3,5	3,5
Araldite® 2015	$P_{m\acute{a}x}$ médio [N]	12154,0	22255,7	24349,2	24104,4
	Aumento de $P_{m\acute{a}x}$ [%]	-	83,1	9,4	-1,0
Sikaforce® 7888	$P_{m\acute{a}x}$ médio [N]	15595,4	24159,6	24286,4	24303,0
	Aumento de $P_{m\acute{a}x}$ [%]	-	54,9	0,5	0,1

A Tabela 9 mostra os valores de $P_{m\acute{a}x}$ médios para cada adesivo em função do L_0 , assim como os respectivos aumentos percentuais de $P_{m\acute{a}x}$ para a configuração de junta com um

dado valor de L_0 relativamente ao valor imediatamente inferior. O aumento percentual no Araldite® AV138 varia desde $\approx 18,3\%$ entre valores de L_0 de 12,5 mm e 25 mm, até $\approx 3,5\%$ entre valores de L_0 de 37,5 mm e 50 mm. O aumento reduzido de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 para este adesivo está relacionado com a sua fragilidade. Observa-se que, para o Araldite® 2015 e $L_0=12,5$ mm, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é muito próximo do Araldite® AV138. Contudo, o Araldite® 2015 apresenta um aumento percentual de $\approx 83,1\%$ entre valores de L_0 de 12,5 mm e 25 mm, até um valor nulo para L_0 mais elevados devido à plastificação dos substratos. Esta ocorrência também se observou para o Sikaforce® 7888, pelo mesmo motivo. Como tal, para estes dois adesivos e entre valores de L_0 de 37,5 mm e 50 mm, a resistência tende a manter-se constante.

3.2 Trabalho numérico

Neste capítulo é feita uma descrição das condições da análise numérica impostas no *software* Abaqus® para modelação pelo MEFX, como por exemplo o refinamento da malha e as condições fronteira utilizadas. Após esta descrição, procedeu-se à explicação do método utilizado na análise numérica, e quais as propriedades utilizadas para efetuar a previsão da resistência da junta. Posteriormente, é feita uma comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente com os obtidos experimentalmente e respetiva discussão de resultados no que diz respeito à aplicabilidade de utilização MEFX para modelação das juntas de sobreposição dupla.

3.2.1 Condições da análise numérica

A análise numérica foi realizada no *software* Abaqus®. Este *software* baseia-se no método de EF e a sua escolha deve-se à possibilidade de utilização do módulo integrado de MEFX para prever a resistência das JSD. Os aderentes e os adesivos foram modelados como sólidos, tal demonstrado na Figura 52. De referir que para o adesivo se usou uma formulação sólida enriquecida para simulação do início e propagação do dano.

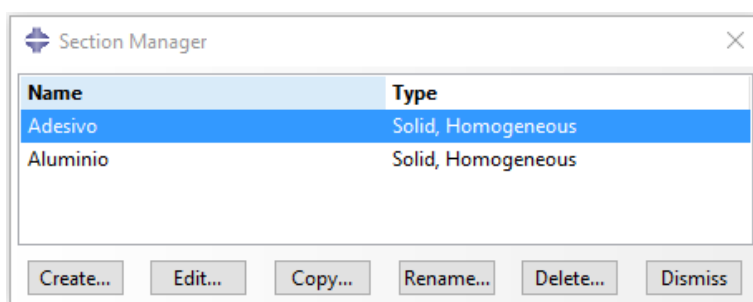


Figura 52 – Atribuição de secção sólidas para modelação dos aderentes e adesivo

Outro passo de grande relevância na construção deste modelo numérico foi a definição da malha, cujas dimensões variam ao longo da junta adesiva. Como as extremidades da junta estão sujeitas a concentrações de tensões utilizou-se uma malha mais refinada na camada adesiva, especialmente nas suas extremidades, para obter com precisão os valores de

tensão esperados nessas regiões. Na camada adesiva, a malha foi construída por elementos de dimensões 0,02 mm por 0,02 mm. Na Tabela 10 é apresentada a variação das dimensões da malha ao longo da junta, onde as linhas a vermelho são referentes às arestas nas quais foi definido um controlo de malha. O número de elementos e rácio de *bias* (rácio de refinamento) de cada aresta da junta foram escolhidos por forma a garantir um maior refinamento nas zonas críticas da junta. Este processo foi realizado no Abaqus® através da criação de sementes com espaçamentos pré-definidos.

Tabela 10 – Variação das dimensões da malha em função de L_0

	12,5	25	37,5	50
Zona de sobreposição				
Número de Elementos	625	1250	1875	2500
Zona de sobreposição				
Número de Elementos	20	20	20	20
Rácio de <i>bias</i>	18	18	18	18
Zona de sobreposição				
Número de Elementos	300	300	300	300
Rácio de <i>bias</i>	45	45	45	45
Zona de sobreposição				
Número de Elementos	300	300	300	300
Rácio de <i>bias</i>	45	45	45	45
Zona de sobreposição				
Número de Elementos	10	10	10	10
Rácio de <i>bias</i>	18	18	18	18

Na região relativa ao comprimento do substrato que não tem contacto com o adesivo utilizou-se o efeito *bias*, em que há um aumento crescente do número de elementos no sentido da camada adesiva, tal como se verifica na Figura 53.



Figura 53 – Disposição do número de elementos da malha na região da sobreposição

Por fim, foi também aplicado um refinamento crescente da malha ao longo da espessura dos substratos e no sentido da camada de adesivo, tal como demonstrado na Figura 54.



Figura 54 – Sentido do efeito *bias* na região dos substratos

Esta variação do número de elementos e do efeito *bias* tem como objetivo reduzir o esforço computacional e o tempo na obtenção de resultados, não interferindo com a precisão dos resultados [68].

A Figura 55 exemplifica um detalhe da malha na extremidade da sobreposição, onde se pode visualizar a modelação da camada de adesivo por 10 elementos ao longo da sua espessura.

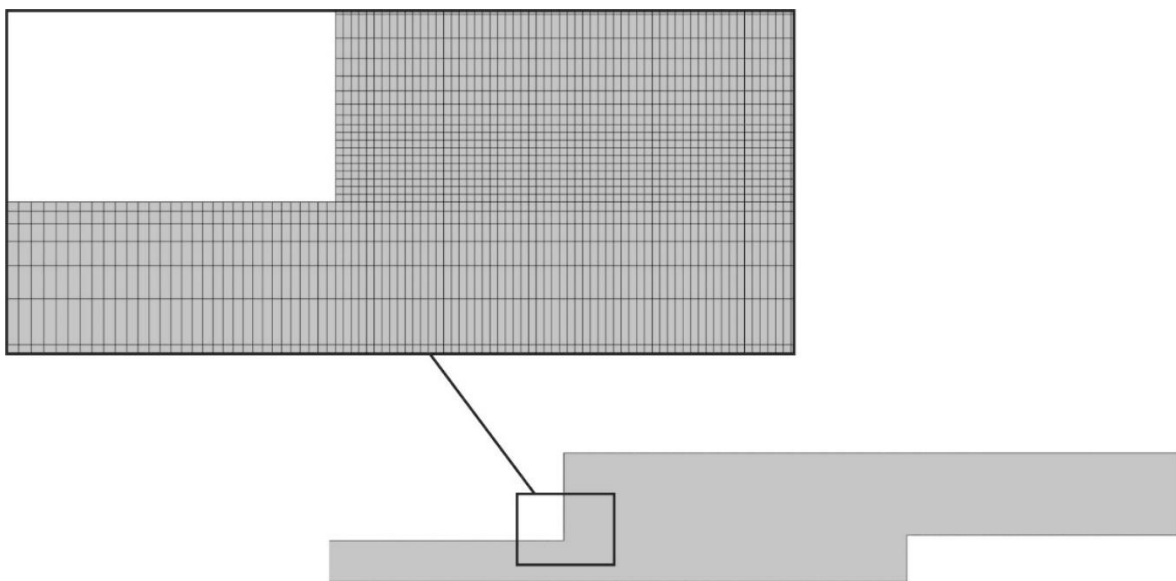


Figura 55 – Representação da malha de uma JSD com $L_0=12,5$ mm

Na Figura 56 observam-se as condições fronteira aplicadas aos modelos no *software* Abaqus®, em que uma das extremidades da junta foi encastrada e na extremidade oposta foi aplicada um deslocamento de tração. Além disso, usou-se simetria no modelo segundo um eixo horizontal considerando apenas metade da espessura do aderente interior, o que permitiu reduzir o modelo para metade do original.



Figura 56 – Condições fronteira impostas nos modelos numéricos

3.2.2 Modelo de dano utilizado

Enquanto a formulação teórica do MEFX utilizada neste trabalho foi definida anteriormente no capítulo 2.2.5, no presente ponto pretende-se descrever o modelo de dano utilizado e as propriedades dos adesivos utilizadas para o estudo de MEFX. O MEFX considera que os materiais assumem um comportamento inicial linear elástico. O início da degradação é simulado através de critérios de iniciação de dano. Os critérios de iniciação de dano podem ser baseados nas tensões e deformações principais máximas (critério MAXPS e MAXPE, respetivamente), que são comparados com os respetivos valores limite dos adesivos. Conforme apresentado no capítulo 2.2.5, existe a possibilidade de considerar critérios distintos: nos critérios MAXS e MAXE a iniciação do dano tem lugar quando os valores de tensões ou deformações (normal ou de corte) atingem os valores limite, respetivamente, e nos critérios QUADS e QUADE o dano inicia quando o valor de f no critério respetivo atingir a unidade. Neste trabalho, foram testados estes seis critérios de iniciação de dano. As leis de tração-separação simulam a degradação do material e podem ser lineares ou exponenciais. Neste trabalho foi escolhida uma lei de degradação linear entre as tensões ou deformações (dependendo do critério utilizado) e deslocamentos, com uma redução proporcional das tensões transmitidas em função dos deslocamentos, até se dar a rotura completa. No caso dos critérios MAXPS e MAXPE, a propagação do dano tem lugar perpendicularmente às tensões ou deformações principais máximas, respetivamente. Para os restantes critérios, como será detalhado posteriormente, será possível escolher a direção de propagação de dano entre as duas direções principais locais dos elementos enriquecidos [62].

3.2.2.1 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 $\epsilon_{m\acute{a}x}$ para os diferentes critérios. O valor de $\sigma_{m\acute{a}x}$ foi igualado à tensão de rotura à tração e $\epsilon_{m\acute{a}x}$ foi igualado à deformação de rotura à tração, pela proximidade das suas características. As restantes propriedades foram todas determinadas experimentalmente à exceção do G_{IC} e G_{IIC} para o adesivo Araldite® AV138, que foram estimadas na referência [68].

3.2.2.1.1 Araldite® AV138

No caso do adesivo Araldite® AV138 foram utilizados nos critérios de tensão e deformação os valores que constam na Tabela 11, para a lei de degradação linear da camada de adesivo.

Tabela 11 – Parâmetros utilizados na análise do MEFX para o adesivo Araldite® AV138

E [MPa]	4890	G_{IC} [N/mm]	0,2
G [MPa]	1560	G_{IIC} [N/mm]	0,38
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	39,45	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ [%]	1,21
t_n^0 [MPa]	39,45	ϵ_n^0 [%]	1,21
t_s^0 [MPa]	30,2	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 $\sigma_{m\acute{a}x}$, 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 $\epsilon_{m\acute{a}x}$, ϵ_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} .

3.2.2.1.2 Araldite® 2015

Tal como no caso anterior, 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 12, conforme o critério a usar. Os valores das propriedades usadas nos critérios de tensão ($\sigma_{m\acute{a}x}$ e t_s^0) são inferiores aos do Araldite® 2015, enquanto para os critérios de deformação os valores das propriedades ($\epsilon_{m\acute{a}x}$ e ϵ_s^0) são superiores, o que é indicativo de um adesivo menos resistente, mas mais dúctil do que o anterior.

Tabela 12 – Parâmetros utilizados na análise do MEFX para o adesivo Araldite® 2015

E [MPa]	1850	G_{IC} [N/mm]	0,43
G [MPa]	650	G_{IIC} [N/mm]	4,7
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	21,63	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ [%]	4,77
t_n^0 [MPa]	21,63	ϵ_n^0 [%]	4,77
t_s^0 [MPa]	17,9	ϵ_s^0 [%]	43,9

3.2.2.1.3 Sikaforce® 7888

No caso do adesivo Sikaforce® 7888 verifica-se que os valores das propriedades usadas nos critérios de tensão diminuem, mas para os critérios de deformação os valores são bem mais elevados. Estas propriedades e respetivos valores estão presentes na Tabela 13.

Tabela 13 – Parâmetros utilizados na análise do MEFX para o adesivo Sikaforce® 7888

E [MPa]	1890	G_{IC} [N/mm]	1,18
G [MPa]	710	G_{IIC} [N/mm]	8,72
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	28,60	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ [%]	43,0
t_n^0 [MPa]	28,60	ϵ_n^0 [%]	43,0
t_s^0 [MPa]	20	ϵ_s^0 [%]	100

3.2.3 Análise de tensões na junta

Este capítulo compara a distribuição das tensões σ_y e τ_{xy} para as JSD, considerando os diferentes valores de L_0 e a meio da espessura do adesivo, de forma a compreender as variações de resistência para as diferentes configurações de junta, conforme se irá discutir posteriormente. Todas as distribuições de tensões estão normalizadas por τ_{avg} , representando a média de valores de τ_{xy} na ligação adesiva para cada valor de L_0 . As distribuições de tensões dizem respeito ao adesivo Araldite® 2015, embora também sejam representativas dos outros dois adesivos. De facto, observa-se que as distribuições de tensões são similares entre adesivos, embora tenham sido encontradas pequenas diferenças dependendo da rigidez dos adesivos (uma maior rigidez aumenta os picos de tensão nas extremidades da sobreposição [74]). As figuras seguintes mostram as distribuições das tensões σ_y e τ_{xy} em função de x/L_0 ($0 \leq x \leq L_0$).

3.2.3.1 Tensões de arrancamento

As distribuições das tensões σ_y para as JSD com os três adesivos utilizados são apresentadas na Figura 57. Verifica-se que o adesivo Araldite® AV138, comparativamente com os outros dois adesivos, possui gradientes mais elevados na proximidade de $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$, que correspondem às extremidades de L_0 na junta da camada de adesivo. O valor de rigidez que este adesivo apresenta é bastante elevado, o que origina picos mais elevados de concentração de tensões que podem levar a uma rotura prematura da junta. O valor máximo de σ_y/τ_{avg} para $L_0=50$ mm e para o adesivo Araldite® AV138 é de 10,1 enquanto para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888 é de 5,5 e 5,7, respetivamente. Verifica-se que as tensões σ_y possuem uma magnitude inferior às tensões τ_{xy} , exceto em zonas muito localizadas nas extremidades da ligação da junta, nas quais existem singularidades

de tensões devido à geometria das extremidades da junta [75, 76]. As JSD eliminam a flexão transversal dos substratos que nas JSS surgem devido à transmissão assimétrica de cargas entre os substratos [77]. Isto pode ser justificado com a simetria de cargas aplicadas nas JSD. Todavia, os substratos continuam com flexão, o que se reflete nas tensões σ_y através da camada do adesivo. O perfil das tensões σ_y (Figura 57) na extremidade exterior da sobreposição apresenta concentrações de tensão de tração perto de $x/L_0=0$ [78]. Ao contrário do que acontece em JSS [67], na extremidade interior da sobreposição ($x/L_0=1$), os picos de tensão σ_y são de compressão [79]. As tensões σ_y na região central da sobreposição são aproximadamente nulas, com gradientes crescentes ao longo da sobreposição com o aumento de L_0 .

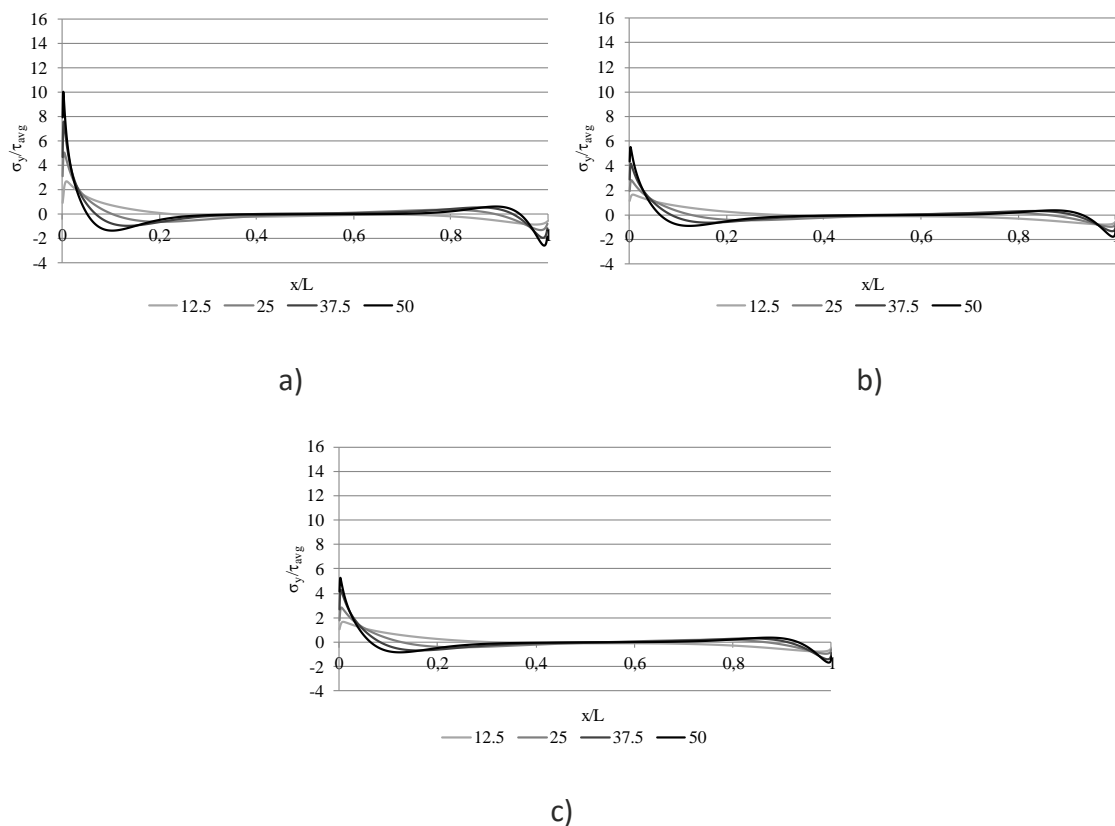


Figura 57 – Distribuição das tensões σ_y em JSD: Araldite® AV138 (a); Araldite® 2015 (b) e Sikaforce® 7888 (c)

3.2.3.2 Tensões de corte

Na Figura 58 estão representadas as tensões τ_{xy} para as JSD com os três adesivos em estudo. Estas apresentam uma maior magnitude na extremidade exterior da sobreposição do que no lado oposto devido às elevadas cargas induzidas no substrato interior na proximidade de $x/L_0=1$. O valor máximo de τ_{xy} / τ_{avg} para $L_0=50$ mm e para o adesivo Araldite® AV138 é de 8,7, enquanto para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888 é de 6,1 e 5,7, respetivamente. Comparativamente com as distribuições de tensões τ_{xy} de JSS [67], observa-se a redução do gradiente das tensões τ_{xy} na extremidade interior da

sobreposição, é causada pela menor variação das deformações longitudinais entre os dois substratos exteriores e o substrato interior, o que reduz o efeito da deformação diferencial [79]. Deve-se salientar que $P_{m\acute{a}x}$ não deve aumentar na mesma proporção de L_0 , já que os picos das tensões σ_y e τ_{xy} nas arestas da sobreposição aumentam com L_0 . Além disso, isto deve ser mais visível nas juntas coladas com adesivos frágeis, que não permitem a plastificação da camada do adesivo quando as tensões limite são atingidas nas extremidades da sobreposição [80].

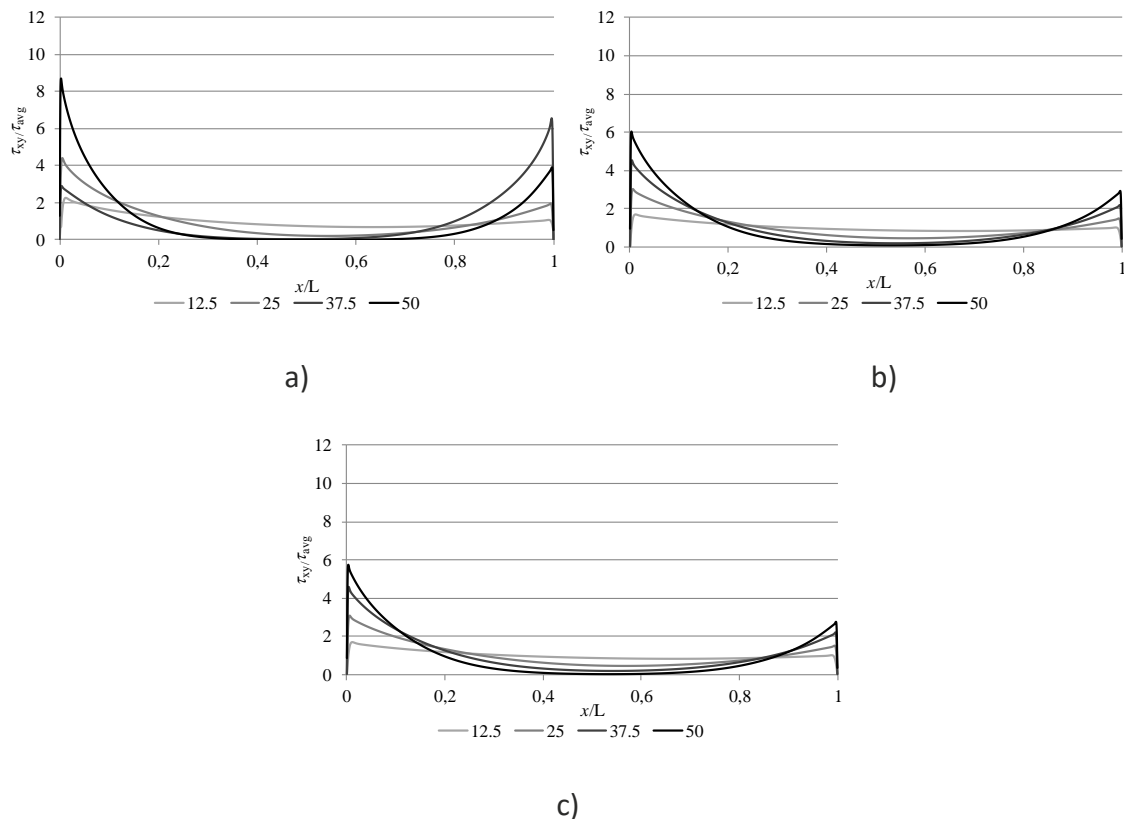


Figura 58 – Distribuição das tensões τ_{xy} em JSD: Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e Sikaforce® 7888 (c)

3.2.4 Análise dos resultados obtidos

É apresentada de seguida uma discussão detalhada do comportamento das juntas da Figura 51 do capítulo 3.1.5.3, auxiliada pela análise de tensões anteriormente apresentada. Verifica-se que o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ varia com L_0 e tipo de adesivo aplicado. No caso do adesivo Araldite® AV138 não se verifica um aumento muito significativo de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 devido à fragilidade que este apresenta. Como consequência desta característica, quando as tensões limites do adesivo são atingidas nas extremidades de sobreposição, dá-se a rotura catastrófica da junta, devido à ausência de capacidade de plastificação do adesivo [68]. Porém, para $L_0=12,5$ mm, este adesivo apresenta um valor de $P_{m\acute{a}x}$ muito próximo do Araldite® 2015. De facto, para valores de L_0 pequenos, as distribuições das tensões são quase constantes (Figura 57 e Figura 58) [81], o que faz com que um adesivo frágil possa

apresentar uma resistência muito similar a um adesivo dúctil. Por outro lado, a rigidez superior deste adesivo (Tabela 3) comparativamente aos restantes (Tabela 4 e Tabela 5) também propicia gradientes e picos de tensão mais elevados (Figura 57 e Figura 58) apesar do adesivo Araldite® 2015 apresentar propriedades mecânicas inferiores às do adesivo Araldite® AV138, este tem uma tenacidade que o define como um adesivo dúctil. Como tal, observa-se um aumento significativo de $P_{máx}$ para valores de L_0 superiores a 12,5 mm porque nestas condições as distribuições de tensões passam a ter um maior gradiente de tensões [82]. Um adesivo dúctil tem a capacidade de distribuir a carga de forma mais uniforme através do uso das regiões em que as tensões são tipicamente mais baixas. Por outro lado, num adesivo frágil a carga concentra-se nas extremidades da sobreposição sem que haja possibilidade de existir plastificação do adesivo, resultando numa tensão de corte média reduzida no momento da rotura [13]. Os valores de $P_{máx}$ para o Sikaforce® 7888 são bastante superiores aos restantes. De facto, o adesivo Sikaforce® 7888 combina propriedades de resistência do epóxido e ductilidade dos poliuretanos, o que é favorável para qualquer valor de L_0 . Para além da capacidade de plastificação, os menores gradientes de tensões (Figura 57 e Figura 58) decorrentes de este se tratar de um adesivo menos rígido (Tabela 5) também ajudam a um melhor comportamento da junta. No entanto, para $L_0 \geq 25$ mm os valores do Araldite® 2015 apresentam-se muito próximos, porque a rotura foi governada pela rotura do substrato interior. Face ao Araldite® AV138, para $L_0 = 12,5$ mm o valor de $P_{máx}$ do Sikaforce® 7888 é superior em 15,86%, e para $L_0 = 50$ mm, é superior em cerca de 31,6%. Tanto para o adesivo Sikaforce® 7888 como para o Araldite® 2015 observa-se que, para $L_0 \geq 25$ mm, $P_{máx}$ tende a ser constante. Isto deve-se ao facto de a resistência da junta passar a ser limitada pelo aderente e não pelo adesivo.

Com base nestes resultados, a seleção do adesivo deve incidir em adesivos que combinem uma menor rigidez e uma maior ductilidade, à exceção de valores de L_0 baixos, onde os adesivos rígidos também apresentam bom desempenho. Para cargas não uniformes, tais como o arrancamento e clivagem, os adesivos dúcteis também apresentam melhores resultados [8]. Desta forma, conclui-se que, para valores de L_0 baixos, o Araldite® AV138 é uma opção viável. Quando se pretende valores de L_0 superiores a 12,5 mm, a escolha deve incidir no Araldite® 2015. Quando são pretendidos valores de $P_{máx}$ muito elevados deve ser escolhido o adesivo Sikaforce® 7888. Contudo, refere-se que a plastificação ou rotura prematura dos substratos pode colocar um limite superior à resistência da junta, tal como foi observado neste trabalho. De salientar que a seleção do adesivo para uma determinada junta deve ter em consideração todos estes fatores. Além disso, os valores obtidos na Figura 51 estão de acordo com o esperado, em função das características que os adesivos apresentam.

3.2.5 Previsão da resistência

Neste capítulo são abordados os resultados obtidos pelo MEFX para os diferentes critérios de iniciação de dano e expoentes do critério linear de propagação de dano, e ainda é feita uma comparação das previsões de $P_{máx}$ pelo MEFX com os resultados obtidos por MDC,

obtidos num trabalho anterior [1]. Em relação aos critérios de iniciação de dano, conforme já referido, estes baseiam-se em tensões ou deformações para a sua avaliação. Os critérios MAXPE e MAXPS baseiam-se apenas na utilização de um parâmetro (deformações e tensões principais máximas, respetivamente), o que não é representativo do processo de fratura de camadas adesivas finas, devido ao efeito condicionante imposto pelos aderentes rígidos na proximidade da fenda [70]. Segundo estes dois critérios, a propagação da fenda segue uma direção ortogonal da direção de tensão/deformação principal na extremidade da fenda [83], conforme demonstrado na Figura 59. Como tal, e na impossibilidade de modelar a propagação do dano nestas condições, foi considerado que a carga máxima corresponde ao início da fenda na camada adesiva.

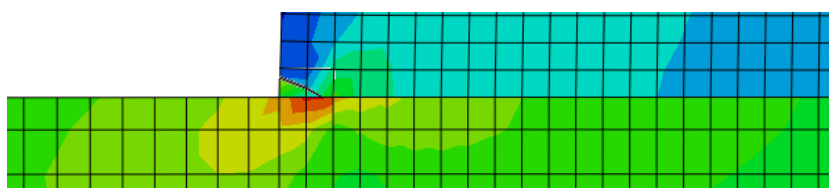


Figura 59 – Exemplo da iniciação da fenda e respetiva propagação para o substrato usando o critério MAXPS

No que diz respeito aos critérios MAXS, QUADS, MAXE, e QUADE, estes permitem a escolha da direção de crescimento do dano, entre normal e paralela à direção local 1 e 2 dos elementos finitos enriquecidos que compreendem o adesivo, o que nos modelos numéricos corresponde a uma propagação horizontal (no alinhamento da camada adesiva) ou vertical, como consta na Figura 60.

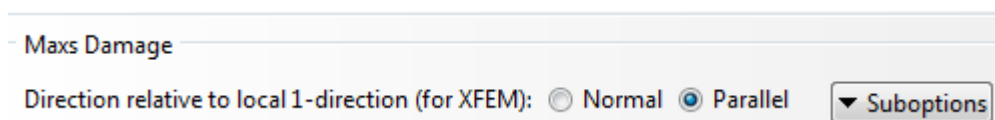


Figura 60 – Seleção da direção de propagação da fenda para o critério MAXS

Para estes 4 critérios, a direção de propagação da fenda escolhida é paralela à direção da camada do adesivo, como se visualiza na Figura 61. Escolheu-se esta direção numa tentativa de modelar o crescimento da fenda ao longo da camada adesiva.

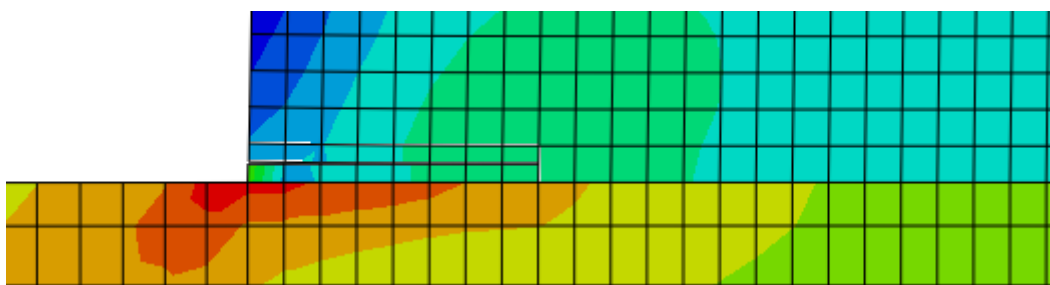


Figura 61 – Direção de propagação da fenda numa junta adesiva

Desta forma, são usados neste trabalho os critérios baseados nas tensões (MAXS, QUADS e MAXPS) e nas deformações (MAXE, QUADE e MAXPE) para prever a resistência das juntas adesivas. Posteriormente será feita uma análise sobre a viabilidade desses mesmos critérios em função dos resultados obtidos.

3.2.5.1 Estudo do efeito do critério de iniciação

Neste capítulo é feita uma análise dos valores numéricos de $P_{máx}$ em comparação com os experimentais para os diferentes critérios em estudo. Inicialmente apresentam-se alguns exemplos de curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente pelo MEFX. Na Figura 62 apresentam-se as curvas $P-\delta$ para as juntas em que se empregou o adesivo Araldite® AV 138 e $L_0=12,5$ mm (Figura 62 a), para as juntas com o Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm (Figura 62 b) e para as juntas com o Sikaforce® 7888 e $L_0=25$ mm (Figura 62 c). De referir que para esta análise apenas foram considerados os critérios MAXS e QUADS já que os restantes não permitiram obter resultados satisfatórios, conforme será descrito posteriormente.

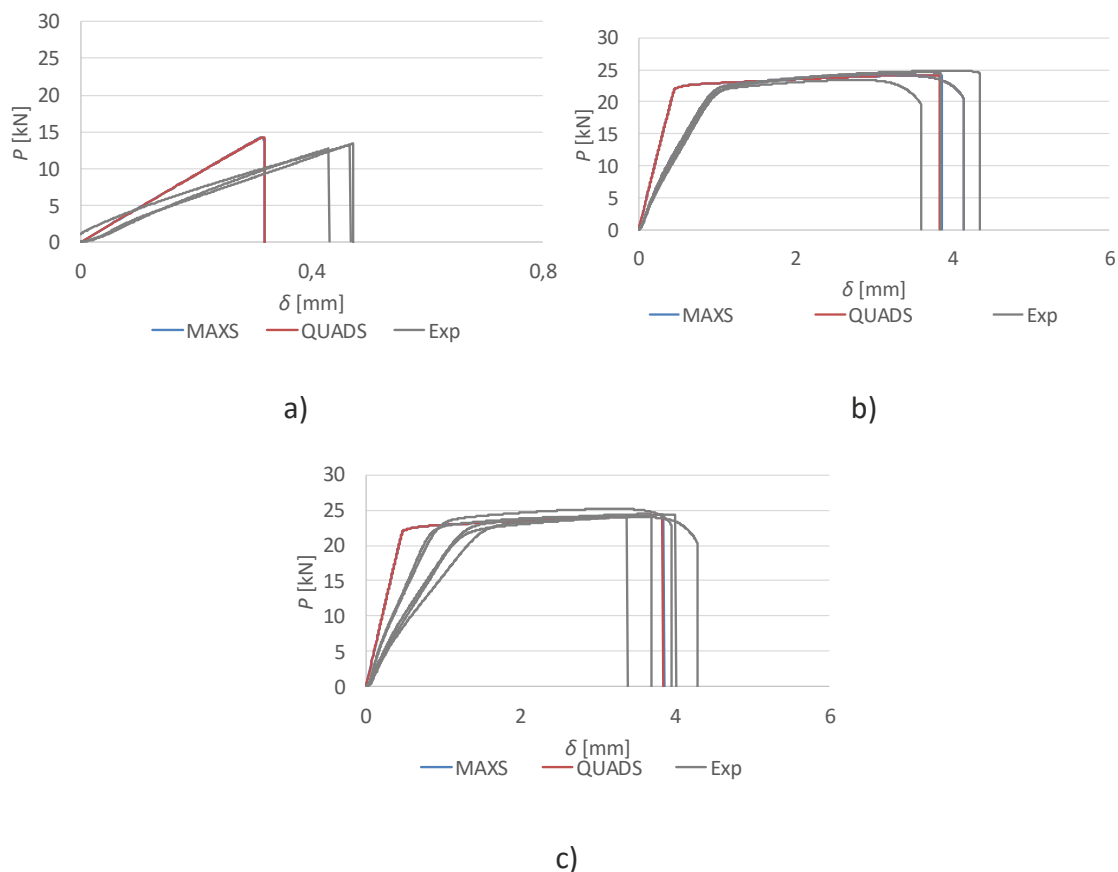


Figura 62 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 com $L_0=12,5$ mm (a), para o adesivo Araldite® 2015 com $L_0=37,5$ mm (b) e para o adesivo Sikaforce® 7888 com $L_0=25$ mm (c)

A correlação geral para as JSD foi bastante aceitável em relação à $P_{\text{máx}}$ e à rigidez para todos adesivos. De referir que só foram apresentadas curvas de três e quatro provetes para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, respetivamente, dado que os outros foram considerados inválidos.

Na Figura 63 são apresentados, para os diferentes critérios e L_0 , os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos pelo MEFX para o adesivo Araldite® AV138. De referir que as curvas dos critérios QUADS e MAXS estão praticamente sobrepostas.

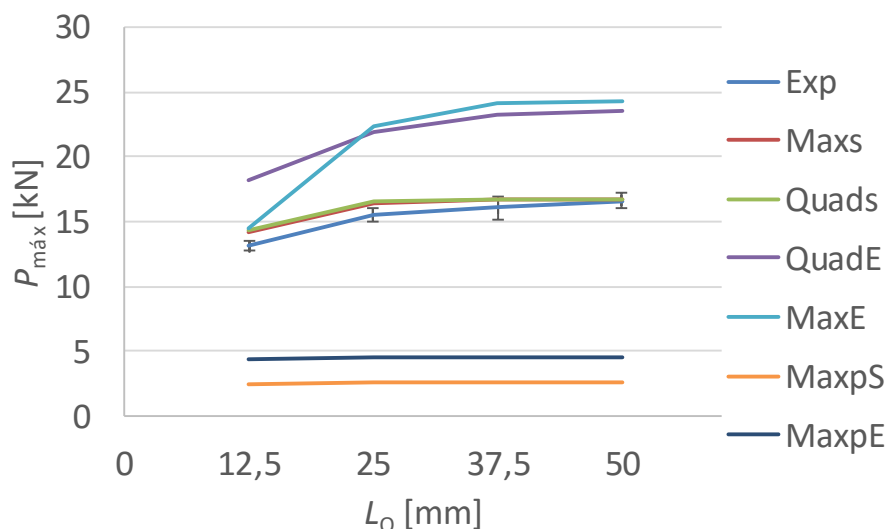


Figura 63 – Variação de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 para os diferentes critérios de iniciação de dano usando o adesivo Araldite® AV138

Para este adesivo verifica-se que os dois critérios baseados em tensão (QUADS e MAXS) são os que apresentam valores mais próximos dos experimentais, enquanto para os restantes critérios (MAXPS, QUADE, MAXE e MAXPE) a diferença é mais acentuada. A diferença máxima de $P_{\text{máx}}$ entre os resultados experimentais com os obtidos pelo MEFX para o adesivo Araldite® AV138 foi de 8,5% para o critério MAXS e de 9,0% para o critério QUADS, sendo que esta diferença foi verificada para $L_0=12,5$ mm. Relativamente aos critérios MAXE e QUADE, a diferença é mais acentuada cerca de 50,1% ($L_0=37,5$ mm) e 45,2% ($L_0=37,5$ mm), respetivamente. A inadequação destes critérios está relacionada com o dano e rotura serem governados pelas tensões limite dos adesivos ao invés das suas deformações. Nos critérios MAXPS e MAXPE verifica-se que os resultados obtidos são muito abaixo do esperado, e semelhantes seja qual for o L_0 , cuja diferença obtida foi cerca de -84,2% para o critério MAXPS ($L_0=50$ mm) e -72,5% para o MAXPE ($L_0=50$ mm). Estes critérios apresentam por defeito valores muito baixos porque as tensões limite são atingidas rapidamente, já que é considerada a carga máxima quando se inicia a propagação da fenda.

Tal como para o adesivo anterior, são apresentados na Figura 64 para o adesivo Araldite® 2015 os resultados obtidos pelo MEFX para os diferentes critérios em comparação com os

dados experimentais respetivos. De salientar que, tanto os critérios MAXE e QUADE, como os critérios QUADS e MAXS, estão sobrepostos.

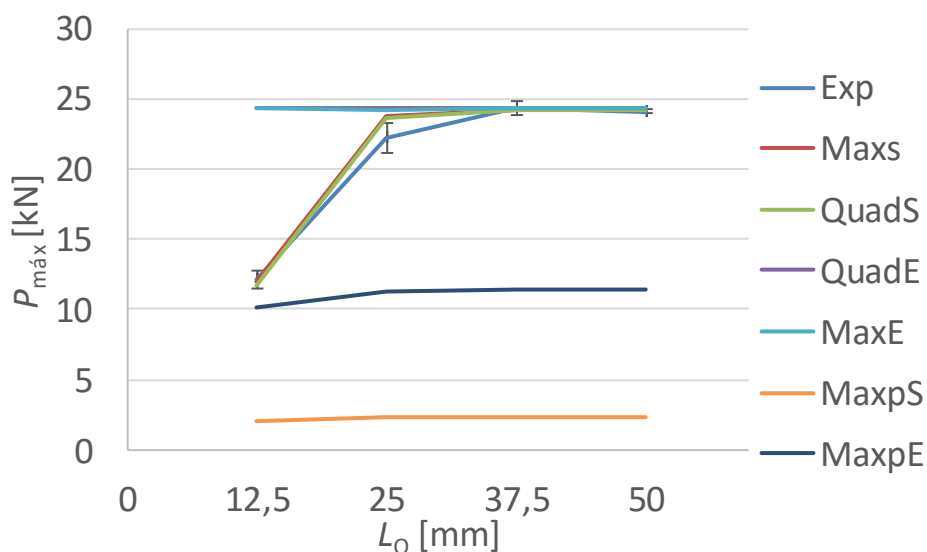


Figura 64 – Variação de $P_{máx}$ em função de L_0 para os diferentes critérios de iniciação de dano usando o adesivo Araldite® 2015

Para este adesivo, os critérios MAXS E QUADS foram os que apresentaram valores mais próximos dos valores experimentais. A diferença máxima de $P_{máx}$ entre os resultados experimentais com os obtidos pelo MEFX foi de 6,9% para o critério MAXS ($L_0=25$ mm) e 6,3% para o critério QUADS ($L_0=25$ mm), enquanto para as restantes configurações de junta as diferenças obtidas foram inferiores a 1,0%. No entanto, esta diferença reduzida explica-se pelo facto de a rotura ter ocorrido nos aderentes. Em relação aos critérios MAXE e QUADE observa-se que os valores obtidos são acima do esperado, com uma diferença máxima de cerca de 100% para $L_0=12,5$ mm. Esta diferença é justificada de forma idêntica ao que foi discutido para o adesivo Araldite® AV138. Em relação ao critério MAXPS verifica-se mais uma vez que os valores obtidos são muito inferiores comparativamente com os valores experimentais, sendo que a diferença foi cerca de -90,0% independentemente do valor de L_0 . Isto deve-se mais uma vez ao facto de as tensões limite serem atingidas rapidamente, já que a carga máxima corresponde por aproximação ao início da propagação da fenda. Para o critério MAXPE a diferença máxima obtida foi de 53,2% para $L_0=37,5$ mm.

Na Figura 65 são apresentados, para os diferentes critérios de iniciação de dano, os valores de $P_{máx}$ obtidos pelo MEFX para o adesivo Sikaforce® 7888. De referir que os critérios MAXE, QUADE e MAXPE estão sobrepostos, tal como acontece com os critérios QUADS e MAXS.

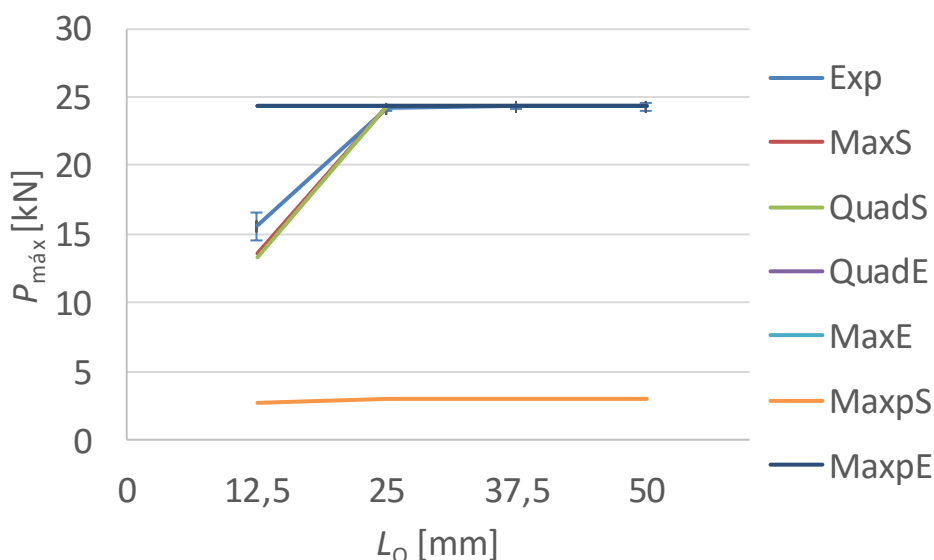


Figura 65 – Variação de $P_{máx}$ em função de L_0 para os diferentes critérios de iniciação de dano usando o adesivo Sikaforce® 7888

Os resultados obtidos mostram que os critérios MAXS e QUADS são os que apresentam valores mais próximos dos experimentais. A diferença máxima de $P_{máx}$ entre os resultados experimentais com os obtidos pelo MEFX foi de 12,9% para o critério MAXS e 15,0% para o critério QUADS, o que em ambos os casos ocorreu para $L_0=12,5$ mm. Para $L_0 \geq 25$ mm a diferença máxima obtida foi inferior a 0,6%. No entanto, nestas circunstâncias a ruptura teve lugar no aderente interior, o que justifica o erro reduzido observado. Os critérios MAXE, QUADE e MAXPE apresentaram valores idênticos para todas as configurações de junta em estudo, cuja diferença máxima foi de 55,8% para $L_0=12,5$ mm. O critério MAXPS apresenta valores muito abaixo do previsto, tal como aconteceu nos outros adesivos, apresentando uma diferença de cerca de -87,6% para qualquer valor de L_0 . Isto acontece porque as tensões limite do adesivo são atingidas rapidamente, tal como referido anteriormente.

Os resultados obtidos mostram que MEFX é bastante preciso utilizando os critérios MAXS e QUADS, tanto para adesivos frágeis como dúcteis e para todas as configurações de junta estudadas. No caso dos critérios MAXE e QUADE conclui-se que estes subestimam os valores de $P_{máx}$ para o Araldite® AV138, à exceção do valor obtido no critério MAXE para $L_0=12,5$ mm, que foi muito próximo do valor médio experimental. Nos adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, para $L_0 \geq 25$ mm verifica-se que os valores são mais próximos dos experimentais para estes critérios devido à ruptura ter ocorrido pelo aderente interior. No caso do critério MAXPS verifica-se que $P_{máx}$ praticamente não varia com L_0 . O mesmo se observa para o critério MAXPE em que $P_{máx}$ não varia com L_0 . De salientar que o critério MAXPE apresenta resultados que variam entre a previsão por defeito para adesivos frágeis até previsão por excesso para adesivos dúcteis.

3.2.5.2 Estudo do efeito da lei de propagação

Relativamente ao estudo do efeito da lei de propagação foram considerados três parâmetros diferentes do critério energético de *power law* (0,5;1 e 2). Para o efeito foi utilizado o critério QUADS, por este ter apresentado valores mais próximos dos experimentais no estudo anterior. Na Figura 66 é exemplificado qual o parâmetro a ser selecionado no *software* Abaqus® para este estudo.

Damage Evolution

Type: Energy

Softening: Linear

Degradation: Maximum

Mixed mode behavior: Power Law

Mode mix ratio: Energy

Power 1

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

	Normal Mode Fracture Energy	Shear Mode Fracture Energy First Direction	Shear Mode Fracture Energy Second Direction
1	0.43	4.7	4.7

OK Cancel

Figura 66 – Parâmetro utilizado para o estudo do efeito da lei de propagação

Na Figura 67 são apresentados os valores obtidos para os diferentes valores do parâmetro do critério de propagação para o adesivo Araldite® AV138. Observando os resultados obtidos, constata-se que para um parâmetro de 1 os resultados obtidos são mais próximos dos obtidos experimentalmente, cuja diferença máxima obtida foi de aproximadamente 9% ($L_0=12,5$ mm). Para 0,5 a diferença máxima varia entre -17% ($L_0=12,5$ mm) e -25% ($L_0=50$ mm) em relação aos resultados experimentais. Esta diferença ocorre porque quando o envelope de fratura toma o valor de 0,5 a rotura ocorre prematuramente, dado que esta acontece com valores de G_{IC} e G_{IIC} mais baixos. Para o parâmetro de 2 observa-se um comportamento oposto, em que os valores foram sobrestimados entre 17% ($L_0=50$ mm) e 24% ($L_0=25$ mm). Neste caso, os valores de G_{IC} e G_{IIC} na superfície do envelope de fratura tomam valores superiores, o que resulta na diferença obtida.

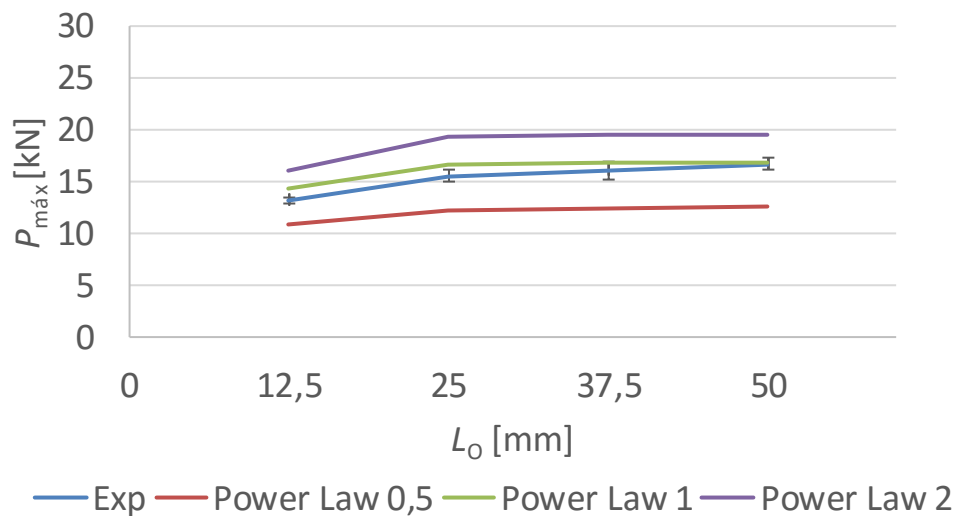


Figura 67 – Variação de $P_{máx}$ em função de L_0 para o critério energético de *power law* usando o adesivo Araldite® AV138

Tal como sucedeu para o adesivo anterior, na Figura 68 é apresentada a variação de $P_{máx}$ em função de L_0 para o adesivo Araldite® 2015, para os diferentes parâmetros do critério energético de propagação do dano.

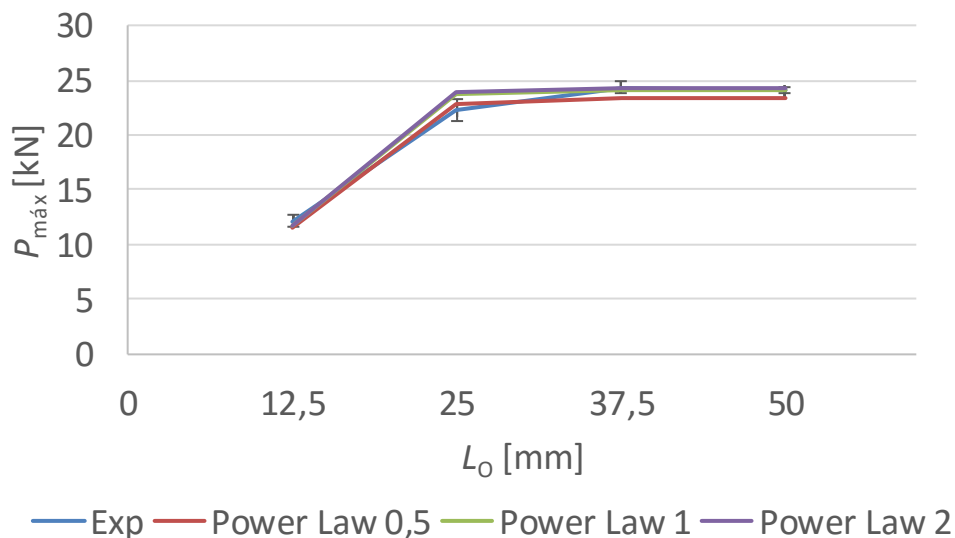


Figura 68 – Variação de $P_{máx}$ em função de L_0 para o critério energético de *power law* usando o adesivo Araldite® 2015

Para este adesivo observa-se que para um parâmetro de 1 a diferença máxima obtida foi de 6,3% ($L_0=25$ mm) em relação aos resultados experimentais. Para um parâmetro igual a 0,5 a diferença máxima foi de 5,4 % ($L_0=12,5$ mm). Para um parâmetro de 2 a diferença máxima de $P_{máx}$ foi de 7,3% ($L_0=25$ mm). Desta forma, conclui-se que para este adesivo diferença dos valores de *power law* não é significativa, tendo em conta que a diferença

máxima obtida foi inferior a 8% independentemente do valor do parâmetro em estudo e do L_0 . No entanto, de referir que, para $L_0 \geq 25$ mm, a rotura ocorreu pelo aderente.

Relativamente ao adesivo Sikaforce® 7888, na Figura 69 são apresentados os resultados obtidos para os diferentes parâmetros. De referir que os valores obtidos para os diferentes parâmetros estão sobrepostos.

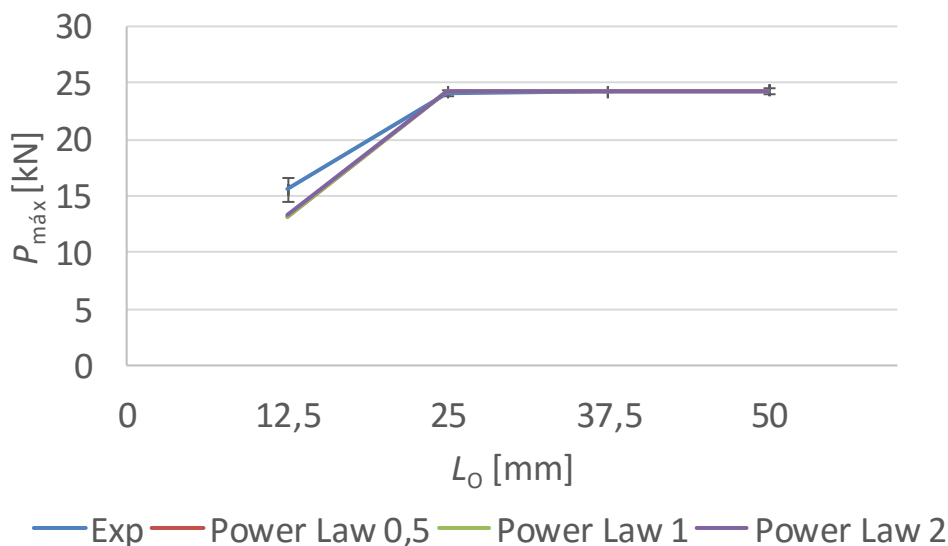


Figura 69 – Variação de $P_{máx}$ em função de L_0 para o critério energético de *power law* usando o adesivo Sikaforce® 7888

No caso do adesivo Sikaforce® 7888, a diferença máxima obtida foi de 15% para $L_0=12,5$ mm. Isto foi verificado para todos os valores de parâmetro em estudo. Para as restantes configurações de junta, a diferença máxima de $P_{máx}$ entre os resultados experimentais com os obtidos por este critério foi inferior a 0,6%. No entanto, esta diferença deve-se ao facto de a rotura ter ocorrido no aderente interior.

Tanto para o adesivo Araldite®2015 como para o Sikaforce® 7888 observa-se que seja qual for o valor escolhido para este critério, a diferença obtida entre os valores experimentais e previstos por este método não é significativa. Desta forma, conclui-se que quanto maior a ductilidade menor a influência do parâmetro do critério energético de propagação do dano. Refere-se que esta conclusão não é invalidada pelo facto da plastificação pelo aderente interior da junta ter influenciado o modo de rotura de algumas configurações de junta.

3.2.5.3 Comparação dos resultados obtidos com modelos de dano coesivo

Neste capítulo é feita uma comparação entre os valores experimentais médios, as previsões numéricas por MDC e pelo MEFX para os três adesivos em análise. Também é apresentado o desvio padrão dos resultados experimentais. A análise numérica por MDC foi realizada por uma abordagem contínua num trabalho anterior [1]. Nesta análise, o dano inicia sempre na extremidade exterior da sobreposição propagando-se para o interior da camada adesiva [1]. Relativamente à previsão por MEFX, o critério de iniciação escolhido para

efetuar a comparação com os resultados obtidos por MDC foi o QUADS por apresentar resultados mais próximos dos experimentais. Para efeitos de propagação considerou-se um parâmetro característico de 1. Na Figura 70 são apresentados os valores obtidos de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para o adesivo Araldite® AV138.

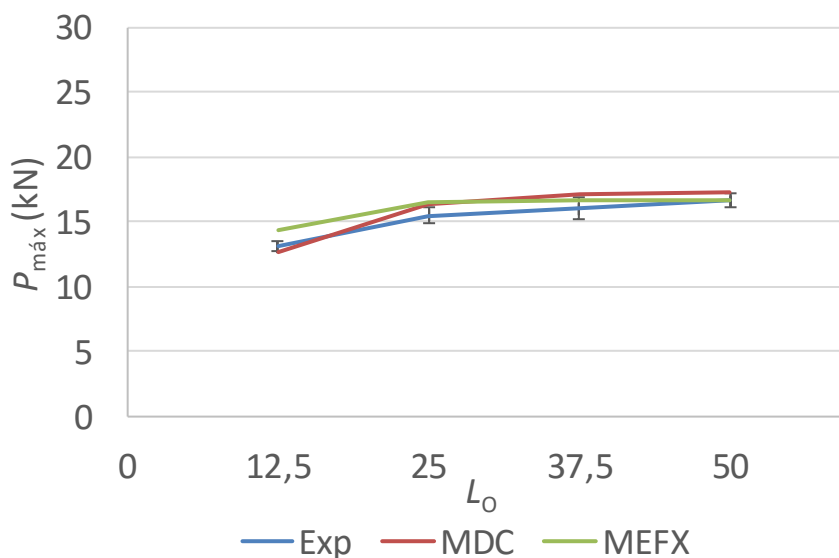


Figura 70 – $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para o Araldite® AV138: resultados experimentais, previsão por MDC e pelo MEFX

Ao analisar a previsão por MDC, observa-se que os resultados foram muito próximos para as juntas coladas com o Araldite® AV138 relativamente aos valores obtidos experimentalmente, dado que a diferença máxima obtida de $P_{m\acute{a}x}$ entre os resultados experimentais foi de 6,5% ($L_0=37,5$ mm). No que diz respeito à previsão pelo MEFX verifica-se que a diferença máxima obtida foi de 9% para $L_0=12,5$ mm.

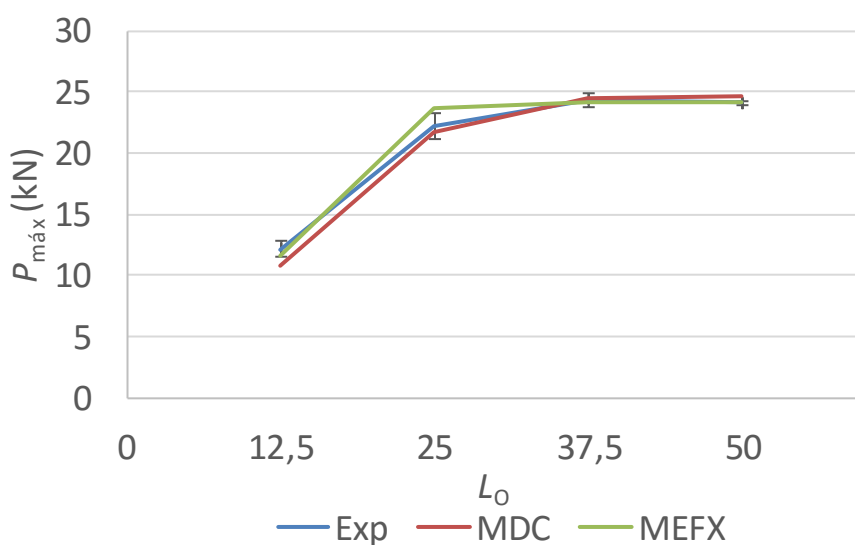


Figura 71 – $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para o Araldite® 2015: resultados experimentais, previsão por MDC e pelo MEFX

Para o adesivo Araldite® 2015, os resultados experimentais e respetivas previsões por MDC e MEFX são apresentados na Figura 71. Na previsão por MDC verifica-se a diferença máxima obtida de $P_{m\acute{a}x}$ entre os resultados experimentais foi de -11,5% ($L_0=37,5$ mm), enquanto na previsão pelo MEFX a diferença máxima obtida foi de 6,3% para $L_0=25$ mm.

Por último são apresentados na Figura 72 os valores experimentais e numéricos (MDC e MEFX) de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 , para o adesivo Sikaforce® 7888.

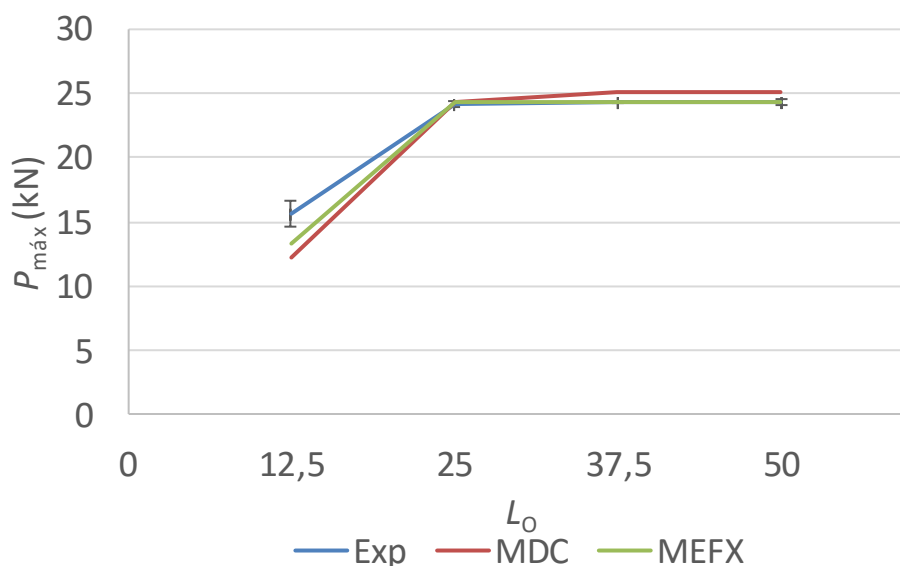


Figura 72 – $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para o Sikaforce® 7888: resultados experimentais, previsão por MDC e pelo MEFX

As previsões numéricas por MDC para o Sikaforce® 7888, subestimaram os valores de $P_{m\acute{a}x}$ até 22,0% ($L_0=12,5$ mm), enquanto para as restantes configurações de junta a diferença obtida foi inferior a 3,8%. Na previsão pelo MEFX a diferença máxima de $P_{m\acute{a}x}$ comparativamente com os resultados experimentais foi de 15% ($L_0=12,5$ mm). Para $L_0 \geq 25$ mm as diferenças obtidas entre os valores experimentais e os previstos pelo MEFX foram inferiores a 0,6%, o que está relacionado com a alteração do modo de rotura, que se passou a registar no aderente interior da junta. Desta forma, conclui-se que tanto o método MDC como o MEFX apresentam resultados muito próximos e precisos comparativamente com os experimentais. Ao contrário do método MDC, o MEFX ainda é pouco estudado na literatura, mas verifica-se que utilizando os critérios MAXS e QUADS este método é viável para a previsão da resistência de JSD.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo realizar um estudo numérico pelo MEFX para a previsão da resistência de JSD, e posterior comparação com resultados experimentais obtidos num trabalho anterior [1]. Para o efeito foram considerados três adesivos com diferentes características de resistência e ductilidade, e diferentes valores de L_0 . Os três adesivos considerados variam desde um comportamento rígido e frágil (Araldite® AV138), até um adesivo de alta resistência e ductilidade (Sikaforce® 7888). O Araldite® 2015 apresenta uma ductilidade moderada.

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais mostraram que o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ varia com L_0 e tipo de adesivo aplicado. Porém, verificou-se que a variação de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 nas juntas adesivas era mais notória para os adesivos mais dúcteis devido à sua plasticidade e capacidade de suportar maiores deformações, enquanto para adesivos com maior rigidez o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ é reduzido, devido à sua fragilidade. Para $L_0=12,5$ mm, o adesivo Araldite® AV138 apresentou um valor de $P_{m\acute{a}x}$ ligeiramente superior ao do Araldite® 2015 porque, para valores de L_0 pequenos, as distribuições de tensões são quase constantes ao longo da camada adesiva, o que faz com que um adesivo frágil possa apresentar uma resistência muito similar a um adesivo dúctil. Por outro lado, o adesivo Araldite® 2015 apresentou um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ mais significativo comparativamente com o Araldite® AV138, uma vez que para $L_0 \geq 25$ mm as distribuições de tensões passam a apresentar maiores gradientes de tensões. O adesivo Sikaforce® 7888 apresentou valores de $P_{m\acute{a}x}$ superiores aos restantes adesivos para todas as configurações de junta, uma vez que consegue combinar a alta resistência com ductilidade. Em geral, o adesivo Sikaforce® 7888 é recomendado para todas as configurações de junta testadas e para os valores de L_0 . Para valores de L_0 pequenos, o Araldite® AV138 consegue apresentar bons resultados comparativamente com os adesivos dúcteis. Contudo, com o aumento de L_0 passa a apresentar uma resistência bastante inferior.

Relativamente ao trabalho numérico realizado, foi testado o MEFX. Inicialmente foi feito um estudo das distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} na camada adesiva por elementos finitos, que permitiu uma justificação detalhada do comportamento das juntas. A análise numérica pelo MEFX revelou que é possível prever a resistência da junta com precisão, usando os critérios de iniciação de dano MAXS e QUADS. Os resultados obtidos mostraram que estes critérios são os mais adequados tanto para adesivos frágeis como dúcteis, e cuja diferença máxima obtida foi de -15,0% para o adesivo Sikaforce® 7888 e $L_0=12,5$ mm. No caso do adesivo Araldite® AV138, os critérios MAXE e QUADE sobrestimaram em larga medida os valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$. As variações percentuais relativamente aos valores experimentais são muito elevadas, atingindo uma variação máxima de 50,2% para o MAXE e 45,1% para o QUADE. Estes critérios também

apresentaram um desvio máximo de cerca de 100% e 55,8% para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, respetivamente ($L_0=12,5$ mm). No entanto, para $L_0 \geq 25$ mm os valores obtidos para estes critérios são próximos dos obtidos experimentalmente, pelo facto de a rotura ter ocorrido pelo aderente interior. Os critérios MAXPS e MAXPE também não mostraram ser adequados. A diferença máxima de $P_{m\acute{a}x}$ entre os resultados experimentais e os obtidos numericamente foi de cerca de -85% usando o critério MAXPS, independentemente do valor de L_0 e do tipo de adesivo. O critério MAXPS apresenta valores muito baixos porque as tensões limite são atingidas rapidamente, uma vez que se considerou que a carga máxima é atingida quando se inicia a propagação da fenda. No caso do critério MAXPE, a diferença máxima mais acentuada foi de -72,5% para o adesivo Araldite® AV138, de -53,2% para o Araldite® 2015 e de 55,8% para o Sikaforce® 7888. Além disso, verificou-se que este critério prevê $P_{m\acute{a}x}$ por defeito para adesivos frágeis e por excesso para adesivos dúcteis.

O estudo do efeito da lei de propagação permitiu concluir que o parâmetro de 1 é o que apresenta melhores resultados, quando utilizado em adesivos frágeis. Para adesivos dúcteis, a influência do parâmetro do critério energético de propagação do dano é menor, pelo que os três valores testados (0,5; 1 e 2) apresentam previsões idênticas de $P_{m\acute{a}x}$.

Na comparação feita entre o método MDC e MEFX observou-se que ambos são viáveis, apresentando valores muitos próximos dos obtidos experimentalmente. Contrariamente ao MDC, que é um método já amplamente estudado, o MEFX revelou ser adequado para previsão da resistência das juntas, utilizando os critérios QUADS e MAXS, situação em que apresenta resultados muito precisos. Por fim, conclui-se 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 JSD.

Como sugestões para trabalhos futuros, sugerem-se os seguintes tópicos:

- Estudo da influência do filete de adesivo nas extremidades da JSD;
- Consideração de aderentes de alumínio de maior resistência para evitar a plastificação dos mesmos antes da rotura do adesivo;
- Validação do MEFX para outras geometrias de junta para além de JSD;
- Estudo comparativo entre os MDC e o MEFX no que diz respeito ao tamanho da malha na precisão dos resultados.

BIBLIOGRAFIA

5 BIBLIOGRAFIA

1. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*. 2015, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
2. da Silva, L.F.M., A.G. Magalhães, and M.F.S.F. Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007, Porto: Publindústria.
3. Petrie, E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2000, New York: McGraw-Hill.
4. Chaves, F., *Ligação Adesiva. Workshop: Técnicas avançadas nos processos de ligação e consolidação*. 2013, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
5. Tong, L. and G.P. Steven, *Analysis and design of structural bonded joints*. 1999, Boston: Kluwer Academic Publishers.
6. Louro, A., I. Vicente, D. Santos, L. Máximo, J. Amorim, and R. Carvalho, *Adesivos estruturais na construção de aviões*, in *Relatório da unidade curricular Projeto FEUP do Mestrado em Engenharia Mecânica*. 2011, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
7. Worlton, D.C., *Experimental Confirmation of Lamb Waves at Megacycle Frequencies*. *Journal of Applied Physics*, 1961. **32**(6): p. 967-971.
8. Adams, R.D., J. Comyn, and W. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2ª ed. 1997, London: Chapman & Hall.
9. Soares, A.P.O.A.L., *Determinação da tenacidade à fratura de adesivos estruturais em modo misto pelo ensaio Single-Leg Bending*. 2015, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
10. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
11. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
12. da Silva, L.F.M., *Design rules and methods to improve joint strength*, in *Handbook of Adhesion Technology*, L.F.M. da Silva, A. Ochsner, and R.D. Adams, Editors. 2011, Springer: Heidelberg.
13. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1974. **9**(3): p. 185-196.
14. Das, M.D.R., E. Madenci, and D.R. Ambur, *Three-dimensional nonlinear analyses of scarf repairs in composite laminates and sandwich panels*. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2008. **3**: p. 1641-1658.
15. Montes, J.R., C.M. Lucas, and J.C.R. Romero, *Procesos industriales para materiales no metálicos*. 2ª ed., Madrid España: Edutirial Vision Net.
16. Constante, C.J., *Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fratura de adesivos estruturais*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
17. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen. konstanten loschonquerschnitten*, 1938. **15**: p. 41-47.

18. Harris, J.A. and 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.
19. Curiel Sosa, J.L. and N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
20. Duan, K., X. Hu, and 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.
21. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, and I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1): p. 147-161.
22. Panigrahi, S.K. and B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
23. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics, 1944. **66**: p. 17-27.
24. Hart-Smith, L.J., *Stress analysis: a continuum mechanics approach*, in *Developments in Adhesives 2*, A.J. Kinloch, Editor. 1981, Applied Science Publishers: London.
25. Penado, F.E., *A Simplified Method for the Geometrically Nonlinear Analysis of the Single Lap Joint*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1998. **11**(3): p. 272-287.
26. Zhao, X., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Experimental Results and Strength Prediction*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(8): p. 837-856.
27. Adams, R.D. and J.A. Harris, *The influence of local geometry on the strength of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1987. **7**(2): p. 69-80.
28. Zhao, X., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Stress and Strain Analysis*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(8): p. 819-836.
29. Ikegami, K., T. Takeshita, K. Matsuo, and T. Sugibayashi, *Strength of adhesively bonded scarf joints between glass fibre-reinforced plastics and metals*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1990. **10**(3): p. 199-206.
30. Greenwood, L., *The Strength of a Lap Joint*, in *Aspects of Adhesion*, D. Alner, Editor. 1969, University of London Press: London.
31. *Engineering Sciences Data Unit - Inelastic shear stresses and strains in adhesive bonding lap joints loaded in tension or shear (Computer Program)*. 1979, Engineering Sciences Data Item Number 79016.
32. John, S.J., A.J. Kinloch, and F.L. Matthews, *Measuring and predicting the durability of bonded carbon fibre/epoxy composite joints*. Composites, 1991. **22**(2): p. 121-127.
33. Lee, S.J. and D.G. Lee, *Development of a Failure Model for the Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joint*. The Journal of Adhesion, 1992. **40**(1): p. 1-14.

34. da Silva, L.F.M., R.J.C. Carbas, G.W. Critchlow, M.A.V. Figueiredo, and K. Brown, *Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(6): p. 621-632.
35. da Silva, L.F.M., P.J.C. das Neves, R.D. Adams, and J.K. Spelt, *Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: Literature survey*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(3): p. 319-330.
36. Hart-Smith, L.J., *Adhesive-bonded single-lap joints*. 1973, NASA Contract Report, NASA CR-112236.
37. Clark, J.D. and I.J. McGregor, *Ultimate Tensile Stress over a Zone: A New Failure Criterion for Adhesive Joints*. The Journal of Adhesion, 1993. **42**(4): p. 227-245.
38. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bull Seism Soc of America, 1959. **49**: p. 199–204.
39. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 213-220.
40. 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.
41. Feraren, P. and H.M. Jensen, *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(15): p. 2125-2142.
42. Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, and 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.
43. Yang, Q.D. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
44. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, and 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.
45. Daudeville, L. and P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1): p. 547-555.
46. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements*. 2005, Heidelberg: Springer.
47. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
48. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, and 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.
49. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, and 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.
50. Bhattacharya, B. and B. Ellingwood, *Continuum damage mechanics analysis of fatigue crack initiation*. International Journal of Fatigue, 1998. **20**(9): p. 631-639.

51. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, and 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.
52. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, and 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.
53. Chen, Z., R.D. Adams, and 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.
54. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method for Fracture Analysis of Structures*. 2008, New Jersey: Blackwell Publishing.
55. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. 1999, Mech. 45: Int. J. Fract.
56. Moës, N., J. Dolbow, and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. Int. J. Numer. Meth. Eng. , 1999. **46**: p. 131–150.
57. da Silva, L.F.M. and 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.
58. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, and 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.
59. *Abaqus® Documentation*. 2013, Dassault Systèmes: Vélizy-Villacoublay.
60. Sukumar, N., N. Moës, B. Moran, and T. Belytschko, *Extended finite element method for three-dimensional crack modelling*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000. **48**(11): p. 1549-1570.
61. Campilho, R.D.S.G., A.M.G. Pinto, M.D. Banea, and 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.
62. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, and L.F.M. da Silva, *Tensile Behaviour of a Structural Adhesive at High Temperatures by the eXtended Finite Element Method*. The Journal of Adhesion, 2013. **89**(7): p. 529-547.
63. Banea, M.D., L.F.M. da Silva, and R.D.S.G. Campilho, *Mode I fracture toughness of adhesively bonded joints as a function of temperature: Experimental and numerical study*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 273-279.
64. Sugiman, S., A.D. Crocombe, and I.A. Ashcroft, *Modelling the static response of unaged adhesively bonded structures*. Engineering Fracture Mechanics, 2013. **98**: p. 296-314.
65. Mubashar, A., I.A. Ashcroft, and A.D. Crocombe, *Modelling Damage and Failure in Adhesive Joints Using A Combined XFEM-Cohesive Element Methodology*. The Journal of Adhesion, 2014. **90**(8): p. 682-697.
66. Airoidi, A., M. Vesco, S. van der Zwaag, A. Baldi, and G. Sala. *Damage in GLARE laminates under indentation loads: experimental and numerical results*. in *17th international conference on composite materials*. 2009. Edinburgh, UK.

67. Fernandes, T.A.B., R.D.S.G. Campilho, M.D. Banea, and L.F.M. da Silva, *Adhesive Selection for Single Lap Bonded Joints: Experimentation and Advanced Techniques for Strength Prediction*. The Journal of Adhesion, 2015. **91**(10-11): p. 841-862.
68. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, A.M.G. Pinto, L.F.M. da Silva, and 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.
69. Moreira, R.D.F., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remedo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência*. 2013, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
70. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, and 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.
71. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, and L.F.M. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
72. Neto, J.A.B.P., *Estudo paramétrico de juntas Adesivas em Material Compósito*. 2011, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
73. Loureiro, A.L.C.D., *Determination of the strain distribution on the adhesive joints using Fiber Bragg Grating (FBG)*. 2011, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
74. Adams, R.D., *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications*. 2005, Bristol: Woodhead Publishing Ltd.
75. Radice, J. and J. Vinson, *On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structures: Analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation*. Composites Science and Technology, 2006. **66**(14): p. 2528-2547.
76. Taib, A.A., R. Boukhili, S. Achiou, and H. Boukehili, *Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006. **26**(4): p. 237-248.
77. de Castro, J. and T. Keller, *Ductile double-lap joints from brittle GFRP laminates and ductile adhesives, Part I: Experimental investigation*. Composites Part B: Engineering, 2008. **39**(2): p. 271-281.
78. Jiang, W. and P. Qiao, *An improved four-parameter model with consideration of Poisson's effect on stress analysis of adhesive joints*. Engineering Structures, 2015. **88**: p. 203-215.
79. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, J.J.M.S. Domingues, and J.J.L. Morais, *Computational Modelling of the Residual Strength of Repaired Composite Laminates Using a Cohesive Damage Model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2008. **22**(13): p. 1565-1591.
80. Grant, L.D.R., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(4): p. 405-413.
81. 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, and 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.
82. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
83. Moës, N. and T. Belytschko, *Extended finite element method for cohesive crack growth*. Engineering Fracture Mechanics, 2002. **69**(7): p. 813-833.