



Análise numérica de juntas adesivas em degrau pelo Método de Elementos Finitos Extendido

RUI MANUEL DIAS MACHADO

novembro de 2017

ANÁLISE NUMÉRICA DE JUNTAS ADESIVAS EM DEGRAU PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO

Rui Manuel Dias Machado

1140684

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ANÁLISE NUMÉRICA DE JUNTAS ADESEIVAS EM DEGRAU PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO

Rui Manuel Dias Machado

1140684

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

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Marco Paulo Lages Parente

Investigador Auxiliar, FEUP

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho pelo apoio e disponibilidade durante todo o processo da realização deste trabalho.

Agradeço também ao Instituto Superior de Engenharia do Porto por todos os conhecimentos e disponibilidade, transmitidos para a realização do presente trabalho.

Palavras-chave

Método de Elementos Finitos, Método de Elementos Finitos Extendido, Junta adesiva, Junta em degrau, Adesivo estrutural.

RESUMO

Atualmente, as ligações adesivas têm vindo a ser utilizadas em várias áreas, com mais frequência nos últimos anos. Estas ligações apresentam vantagens em relação a outros métodos como a soldadura. As vantagens que se destacam são obviamente a redução significativa do peso, bem como a redução de concentração de tensões. Para a previsão da resistência das juntas, recorre-se frequentemente a técnicas da Mecânica da Fratura. A tenacidade à tração (G_{IC}) e ao corte (G_{IIC}) são dois dos parâmetros mais importantes para a previsão do comportamento da junta. Em relação aos adesivos, estes dividem-se em dois grupos, os frágeis e os dúcteis. O Método de Elementos Finitos (MEF) tem vindo a ser usado nas últimas décadas, pois este método é bastante mais rápido na análise da resistência da junta. Mais recentemente, surgiu o Método de Elementos Finitos Extendido (MEFX), que também pode ser utilizado para prever o comportamento das juntas, carecendo, no entanto, da validação para este efeito.

Esta dissertação tem como principal objetivo a previsão do comportamento de juntas em degrau usando o MEFX, com diferentes comprimentos de sobreposição (L_0). Para análise foram usados três adesivos, Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, cujas propriedades são bastante diferentes. Para comparação deste trabalho numérico, foram usados os dados experimentais da dissertação de Silva [1]. As tensões de corte e arrancamento dos adesivos foram analisadas, o que possibilita uma análise do comportamento dos diferentes adesivos em diferentes condições. Para a análise usaram-se diferentes critérios de iniciação de dano usando as tensões e deformações. Também se considerou a análise da lei de dano, nomeadamente as leis linear e exponencial de propagação de dano. O MEFX revelou ser adequado para previsão da resistência das juntas utilizando os critérios QUADS e MAXS, onde apresenta resultados bastante precisos.

KEYWORDS

Finite Element Method, Extended Finite Element Method, Adhesive joint, Step joint, Structural Adhesive.

ABSTRACT

Currently, adhesive bonds have been used in several areas, more frequently in recent years. These joints have advantages over other methods such as welding. The advantages that stand out are the significant reduction of weight as well as the reduction of stress concentrations. For the joint strength prediction, Fracture Mechanics techniques are often used. The tensile (G_{IC}) and shear toughness (G_{IIC}) are two of the most important parameters to predict the joint behaviour. In relation to adhesives, these are divided into two groups, brittle and ductile. The Finite Element Method (FEM) has been used in the last decades, because this method is much faster in the analysis of the joint strength. More recently, the Extended Finite Element Method (XFEM) has emerged, which can also be used to predict the joint behaviour, however, lacking validation for this purpose.

This dissertation has as main objective the prediction of the behaviour of step joints using the XFEM, with different overlap lengths (L_0). Three adhesives, Araldite® AV138, Araldite® 2015 and Sikaforce® 7752, whose properties are quite different, were used in the analysis. To compare this numerical work, the experimental data of Silva [1] was used. Peel and shear stresses of the adhesives were analysed, which allows an analysis of the behaviour of the different adhesives under different conditions. For the analysis, different damage initiation criteria were used using stresses and strains. The damage law shape was also evaluated, namely the linear and exponential damage propagation laws. The XFEM was found to be adequate to predict the joint strength using the QUADS and MAXS criteria, where it presents fairly accurate results.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

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
MD	Mecânica do Dano
DCB	Double-Cantilever Beam
CCM	Compliance Calibration Method
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastic
FRP	Fiber Reinforced Plastic
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos Extendido
QUADE	Critério quadrático de deformação
QUADS	Critério quadrático de tensão

Símbolos gregos

\varnothing	Diâmetro
γ_f	Deformação de rotura ao corte
Δ	Deslocamento
E	Deformação
ε_f	Deformação de rotura à tração
N	Coefficiente de Poisson
σ_f	Tensão de rotura à tração
σ_n^0	Tensão coesiva à tração
σ_y	Tensão de cedência à tração
τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte

Outros Símbolos

E	Módulo de Young
E_1	Módulo de Young dos substratos
G_{13}	Módulo de elasticidade ao corte
G_{IC}	Tenacidade à tração
\bar{G}_{IIC}	Tenacidade ao corte
L_0	Comprimento de Sobreposição
L_T	Comprimento da junta
P	Carga

$P_{\text{máx}}$	Carga máxima
t_A	Espessura do adesivo
t_{A1}	Espessura do adesivo vertical
t_n^0	Tensão máxima à tração
t_P	Espessura do substrato
t_s^0	Tensão máxima ao corte

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - COMPONENTES DE UMA JUNTA ADESIVA [5].....	7
FIGURA 2 - UTILIZAÇÃO DE ADESIVOS EM AUTOMÓVEIS [7].....	8
FIGURA 3 - PARTES DE UM AVIÃO ONDE FORAM USADAS LIGAÇÕES ADESIVAS [8].....	8
FIGURA 4 - CONSTRUÇÃO DE UM CONVÉS [10].....	9
FIGURA 5 - TIPOS DE ESFORÇOS A QUE UMA JUNTA PODE ESTAR SUJEITA [11].....	10
FIGURA 6 - ROTURA COESIVA [11].....	11
FIGURA 7 - ROTURA ADESIVA [11].....	11
FIGURA 8 - ROTURA MISTA [11].....	11
FIGURA 9 - ROTURA DO SUBSTRATO [11].....	11
FIGURA 10 – JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES [2].....	12
FIGURA 11 – JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO DUPLA [2].....	12
FIGURA 12 – JUNTA DE CHANFRO INTERIOR (SCARF) [2].....	12
FIGURA 13 – JUNTAS EM DEGRAU [2].....	13
FIGURA 14 - COBRE JUNTA E COBRE JUNTA DUPLA [2].....	13
FIGURA 15 - TOPO A TOPO [2].....	13
FIGURA 16 – TUBULAR [2].....	14
FIGURA 17 - FAMÍLIA DOS ADESIVOS ESTRUTURAIS [17].....	14
FIGURA 18 – GEOMETRIAS POSSÍVEIS DE FILETE [45].....	21
FIGURA 19 - TIPOS DE CHANFROS [48].....	21
FIGURA 20 –GEOMETRIA DE JUNTAS ADESIVAS MISTAS [50].....	22
FIGURA 21 - GEOMETRIA DA VIGA COM DOIS ADESIVOS [51].....	22
FIGURA 22 - GEOMETRIA USADA NO TRABALHO DE ÁVILA E BUENO [52].....	23
FIGURA 23 - VARIAÇÃO DA RIGIDEZ ALTERANDO A ESPESSURA DAS PLACAS [54].....	24
FIGURA 24 - JUNTAS COM UM E TRÊS DEGRAUS [55].....	24
FIGURA 25 - GRÁFICO COMPARATIVO DAS FORÇAS MÁXIMAS DE CADA TIPO DE JUNTA [55].....	25
FIGURA 26 - GEOMETRIA DE JUNTAS SCARF E DEGRAU [56].....	25
FIGURA 27 - JUNTA EM DEGRAU COM PINOS [57].....	26

FIGURA 28 - GEOMETRIA DE JUNTA SCARF E FILETE DE ADESIVO [58]	27
FIGURA 29 - GEOMETRIA DA JUNTA COM ENCAIXES PARALELOS [59]	27
FIGURA 30 - MALHA DA JUNTA COM ENCAIXES PARALELOS [59]	27
FIGURA 31 - JSS DE GEOMETRIA EXTREMA [60]	28
FIGURA 32 - JSS COM FILETE ADESIVO E METAL [61]	28
FIGURA 33 - VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CORTE Á TRAÇÃO [61]	29
FIGURA 34 - CURVAS Σ -E DA LIGA AW6082-T651	34
FIGURA 35 - CURVAS σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [62]	34
FIGURA 36 - CURVAS σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [66]	36
FIGURA 37 - CURVAS Σ -E DE PROVETES MACIÇOS DE SIKAFORCE® 7752 [67]	37
FIGURA 38 – GEOMETRIA E DIMENSÕES DAS JUNTAS EM DEGRAU	38
FIGURA 39 - CORTE DOS PROVETES PARA MAQUINAGEM	39
FIGURA 40 - PROCESSO DE FRESAGEM PARA OBTENÇÃO DOS DEGRAUS NOS SUBSTRATOS USANDO FRESADORA “GAMBIN”	40
FIGURA 41 - ASPETO DOS SUBSTRATOS APÓS PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE E LIMPEZA	40
FIGURA 42 - APLICAÇÃO DO ADESIVO	41
FIGURA 43 - FIXAÇÃO COM GRAMPOS	41
FIGURA 44 - CURVAS P- Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE USANDO ARALDITE® AV138 COM A) $L_0=12,5$ MM, B) $L_0=25$ MM, C) $L_0=37,5$ MM E D) $L_0=50$ MM	42
FIGURA 45 - CURVAS P- Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE USANDO ARALDITE® 2015 COM A) $L_0=12,5$ MM, B) $L_0=25$ MM, C) $L_0=37,5$ MM E D) $L_0=50$ MM	43
FIGURA 46 - CURVAS P- Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE USANDO SIKAFORCE® 7752 COM A) $L_0=12,5$ MM, B) $L_0=25$ MM, C) $L_0=37,5$ MM E D) $L_0=50$ MM	45
FIGURA 47 - MODOS DE ROTURA DAS JUNTAS COM ARALDITE® AV138	46
FIGURA 48 - MODOS DE ROTURA DAS JUNTAS COM ARALDITE® 2015	47
FIGURA 49 - MODOS DE ROTURA DAS JUNTAS COM SIKAFORCE® 7752	48
FIGURA 50 – VALORES MÉDIOS DE $P_{MÁX}$ E RESPECTIVO DESVIO PADRÃO EM FUNÇÃO DE L_0 PARA OS DIFERENTES ADESIVOS	49
FIGURA 51 – CONDIÇÕES DA ANÁLISE NUMÉRICA	51
FIGURA 52 - DEFINIÇÃO DE SEMENTES PARA CRIAÇÃO DA MALHA	51
FIGURA 53 - CONDIÇÕES FRONTEIRA E DE CARREGAMENTO IMPOSTAS NOS MODELOS NUMÉRICOS	52

FIGURA 54 - PROPAGAÇÃO DO DANO NO MEFX UTILIZANDO O CONCEITO DE NÓS FANTASMA: ANTES (A) E APÓS A PARTIÇÃO (B) DE UM ELEMENTO FRATURADO EM SUBELEMENTOS [71].	53
FIGURA 55 - COMPARAÇÃO DAS TENSÕES Σ_Y (A) E T_{XY} (B) ENTRE OS 3 ADESIVOS PARA $L_0=12,5$ MM	54
FIGURA 56 - COMPARAÇÃO DAS TENSÕES Σ_Y (A) E T_{XY} (B) DO ARALDITE® 2015 EM FUNÇÃO DE L_0	54
FIGURA 57 - EXEMPLO DA INICIAÇÃO DA FENDA E RESPECTIVA PROPAGAÇÃO USANDO O CRITÉRIO MAXPS.	56
FIGURA 58 - SELEÇÃO DA DIREÇÃO DE PROPAGAÇÃO DE FENDA.	56
FIGURA 59 - DIREÇÕES DA PROPAGAÇÃO DE FENDA NA JUNTA EM DEGRAU	56
FIGURA 60 - VARIAÇÃO DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA OS DIFERENTES CRITÉRIOS DE INICIAÇÃO DE DANO USANDO O ADESIVO ARALDITE® AV138	58
FIGURA 61 - VARIAÇÃO DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA OS DIFERENTES CRITÉRIOS DE INICIAÇÃO DE DANO USANDO O ADESIVO ARALDITE® 2015.	59
FIGURA 62 - VARIAÇÃO DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA OS DIFERENTES CRITÉRIOS DE INICIAÇÃO DE DANO USANDO O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.	61
FIGURA 63 - PARÂMETROS USADOS PARA O ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE FENDA	62
FIGURA 64 - VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E PREVISÕES NUMÉRICAS DAS LEIS LINEAR E EXPONENCIAL PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 EM FUNÇÃO DE L_0	62
FIGURA 65 - VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E PREVISÕES NUMÉRICAS DAS LEIS LINEAR E EXPONENCIAL PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 EM FUNÇÃO DE L_0	63
FIGURA 66 - VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E PREVISÕES NUMÉRICAS DAS LEIS LINEAR E EXPONENCIAL PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 EM FUNÇÃO DE L_0	64
FIGURA 67 - $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA O ARALDITE® AV138: JSS, JSD E JUNTAS EM DEGRAU	65
FIGURA 68 - $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA O ARALDITE® 2015: JSS, JSD E JUNTAS EM DEGRAU	66
FIGURA 69 - $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA O SIKAFORCE® 7752: JSS, JSD E JUNTAS EM DEGRAU	67

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE LIGAÇÃO DE MATERIAIS [5]	5
TABELA 2 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS LIGAÇÕES ADESIVAS [3].....	6
TABELA 3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [64]	35
TABELA 4 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [63]	36
TABELA 5 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [67].....	38
TABELA 6 - DIMENSÕES DAS JUNTAS EM DEGRAU	39
TABELA 7 - VALORES DE $P_{MÁX}$ [KN] OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA O ARALDITE® AV138.....	43
TABELA 8 - VALORES DE $P_{MÁX}$ OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA O ARALDITE® 2015	44
TABELA 9 - VALORES DE $P_{MÁX}$ OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA SIKAFORCE® 7752.....	45
TABELA 10 - VALORES MÉDIOS DE $P_{MÁX}$ [KN] DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	46
TABELA 11 - ROTURAS OBTIDAS PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015	47
TABELA 12 - ROTURAS OBTIDAS PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752	48
TABELA 13 - $P_{MÁX}$ E AUMENTO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA OS TRÊS ADESIVOS ...	49
TABELA 14 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE MEFX PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138.....	57
TABELA 15 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE MEFX PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015	59
TABELA 16 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE MEFX PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752	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	14
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	16
2.2.1	Modelos analíticos	16
2.2.2	Métodos numéricos	17
2.2.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	17
2.2.2.2	Mecânica da fratura.....	17
2.2.2.3	Modelos de dano coesivo	18
2.2.2.4	Mecânica do dano.....	18
2.2.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido.....	19
2.2.2.5.1	Aplicação do método a juntas adesivas	20
2.3	Juntas adesivas com alterações para aumento de resistência	20
2.3.1	Filetes de adesivo	20
2.3.2	Chanfros interiores e exteriores.....	21
2.3.3	Utilização de dois adesivos.....	21

2.3.4	Gradação de propriedades dos substratos	23
2.3.5	Utilização de degraus na zona de sobreposição.....	24
2.3.6	Outras alterações	26
3	DESENVOLVIMENTO.....	33
3.1	Trabalho experimental	33
3.1.1	Materiais utilizados	33
3.1.1.1	Substratos	33
3.1.1.2	Adesivos	34
3.1.1.2.1	Araldite® AV138	34
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	35
3.1.1.2.3	Sikaforce 7752.....	37
3.1.2	Geometria das juntas	38
3.1.3	Processo de fabrico	39
3.1.4	Resultados obtidos	42
3.1.4.1	Curvas P- δ	42
3.1.4.2	Modos de rotura	46
3.1.4.3	Resistência das juntas	49
3.1.4.4	Análise dos resultados obtidos	50
3.2	Trabalho numérico	50
3.2.1	Condições da análise numérica	50
3.2.2	Modelo de dano utilizado	52
3.2.3	Determinação das propriedades de dano	53
3.2.4	Análise de tensões na junta.....	53
3.2.5	Previsão da resistência	55
3.2.5.1	Estudo do critério de iniciação de dano.....	57
3.2.5.1.1	Araldite® AV138.....	57
3.2.5.1.2	Araldite® 2015	59
3.2.5.1.3	Sikaforce® 7752	60
3.2.5.2	Estudo do critério de propagação de dano.....	61

3.2.5.2.1	Araldite® AV138.....	62
3.2.5.2.2	Araldite® 2015	63
3.2.5.2.3	Sikaforce® 7752	63
3.2.6	Análise dos resultados obtidos.....	64
3.2.7	Comparação da resistência obtida com juntas de sobreposição simples e dupla	65
3.2.7.1	Araldite® AV138.....	65
3.2.7.2	Araldite® 2015	66
3.2.7.3	Sikaforce® 7752	66
4	CONCLUSÕES.....	71
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	75

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As ligações adesivas, comparativamente à soldadura e outros métodos convencionais de ligação, cada vez são mais utilizadas devido às suas vantagens, como a redução significativa de peso e menores concentrações de tensões. Como todas as ligações de materiais, estas também apresentam as suas desvantagens, como o tempo de cura dos adesivos, que por vezes é bastante elevado, e a dificuldade ou impossibilidade de desmontar uma estrutura ligada por adesivos. É importante fazer análises a estas ligações de forma a prever a sua resistência mecânica, bem como o comportamento da junta. O comportamento da junta varia com cada adesivo utilizado, e também com a geometria e o material dos substratos. Um dos parâmetros geométricos com maior influência na resistência das juntas é o comprimento de sobreposição.

Para a previsão da resistência das juntas, recorre-se frequentemente a técnicas da Mecânica da Fratura. A tenacidade à tração (G_{IC}) e ao corte (G_{IIC}) são dois dos parâmetros mais importantes para a previsão do comportamento da junta. Em relação aos adesivos, estes dividem-se em dois grupos, os frágeis e os dúcteis. No grupo dos adesivos frágeis existem por exemplo o Araldite® AV138, enquanto nos dúcteis se encontram o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752. A resistência dos adesivos é muito importante devido aos elevados esforços, já a ductilidade é o fator mais importante para absorver picos de tensões e evitar a rotura prematura das juntas. O Método de Elementos Finitos (MEF) tem vindo a ser usado nas últimas décadas, pois este método é bastante mais rápido na análise da resistência da junta. Mais recentemente, surgiu o Método de Elementos Finitos Extendido (MEFX), que também pode ser utilizado para prever o comportamento das juntas, carecendo, no entanto, da validação para este efeito.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como principal objetivo a previsão do comportamento de juntas em degrau usando o MEFX, com diferentes comprimentos de sobreposição (L_o). Para análise foram usados três adesivos, Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, cujas propriedades são bastante diferentes.

Para comparação deste trabalho numérico, foram usados os dados experimentais da dissertação de Silva [1]. As tensões de corte e arrancamento dos adesivos foram analisadas, o que possibilita uma análise do comportamento dos diferentes adesivos em diferentes condições. Para a análise usaram-se diferentes critérios de iniciação de dano usando as tensões e deformações. Também se considerou a análise da lei de

dano, nomeadamente as leis linear e exponencial de propagação de dano. Pretende-se assim validar o MEFX usando o *software* Abaqus® comparativamente aos resultados experimentais que Silva [1] realizou no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Superior de Engenharia do Porto. Desta maneira pode-se afirmar qual o melhor critério de iniciação de dano e de propagação de dano, para estimar o desempenho e comportamento das JSS em degrau, bem como determinar o melhor adesivo de acordo com o comprimento de sobreposição L_0 .

1.3 Organização do relatório

Este relatório apresenta a seguinte estrutura:

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

No capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica do presente trabalho, onde são abordados diferentes tipos de ligação e aplicações das ligações adesivas, modos de rotura das juntas, tipos de juntas, e os adesivos estruturais. São também relatados os métodos mais comuns de análise da resistência para juntas adesivas, nos quais se inclui o MEFX.

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

No capítulo 3.2, é realizada uma abordagem das condições da análise numérica usadas no *software* Abaqus® para o MEFX. É feita uma análise da distribuição de tensões, comparação da resistência obtida para cada adesivo pelo MEFX com os resultados experimentais do trabalho de Silva [1].

Por último, no capítulo 4 são apresentadas as conclusões finais.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são referidos os tipos de ligações adesivas, tipos de esforços nas juntas, modos de rotura, juntas mais usadas e as diferentes famílias de adesivos estruturais, também se apresenta os métodos analíticos e numéricos mais relevantes na previsão da resistência das ligações adesivas.

2.1 Ligações adesivas

Na Tabela 1 consegue-se comparar os diferentes métodos de ligação com as ligações adesivas.

Tabela 1 – Comparação dos métodos de ligação de materiais [5]

	Rebitagem	Soldadura	Brasagem	Adesivos
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	EE	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	B	S
Nível de competência requerido	E	B	E	E

Nota: E- Excelente; B- Bom; S- Suficiente; M- Mau.

As ligações adesivas comparativamente a outras formas de ligação como a soldadura e outros, apresentam várias vantagens comparativamente as outras. Nos dias de hoje as ligações adesivas são usadas em aplicações para a indústria aeronáutica, naval e automóvel, onde é necessária uma grande responsabilidade. Já no século 20 eram usadas colas, como a resina extraída das árvores, para fazer a ligação entre materiais. Com o passar do tempo, foram-se desenvolvendo novos adesivos com características diferentes. Através da adição de materiais poliméricos ao adesivo, conseguiu-se fazer a ligação entre metais e madeira de forma eficaz [2].

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Uma junta é composta pelos substratos e pelo adesivo. O adesivo é composto de um material polimérico que faz a união dos substratos. A interfase é a zona onde as propriedades da ligação se começam a alterar e variam dependendo do tipo de junta. A interface é onde ocorre o contacto entre o substrato e o adesivo. Pode ainda ser usado um primário para ajudar na ligação como podemos ver na Figura 1.

As juntas adesivas, comparativamente aos outros tipos de ligação, apresentam várias vantagens, mas também algumas desvantagens, como se pode ver na Tabela 2.

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens das ligações adesivas [3]

Vantagens	Desvantagens
Estruturas mais leves e rígidas	Podem ocorrer tensões residuais
Capacidade de ligar diferentes materiais	Sensibilidade a tensões de tração segundo a espessura
Ligar eficientemente materiais de espessura fina	As ligações não podem ser separadas
Melhor resistência à corrosão	Fraca resistência à humidade e temperatura
Melhor distribuição de tensões	Problemas de toxicidade e inflamabilidade
Boa vedação	
Fabrico de formas complexas	

As ligações mecânicas são um tipo de ligação que ainda se usa na atualidade, e são utilizadas quando a aplicação não permite o uso de ligações adesivas, em termos de

funcionamento ou custo. Os métodos de ligação mecânica (ligações aparafusadas, rebitadas e soldadas) têm vindo a ser substituídos pelas juntas adesivas [4].

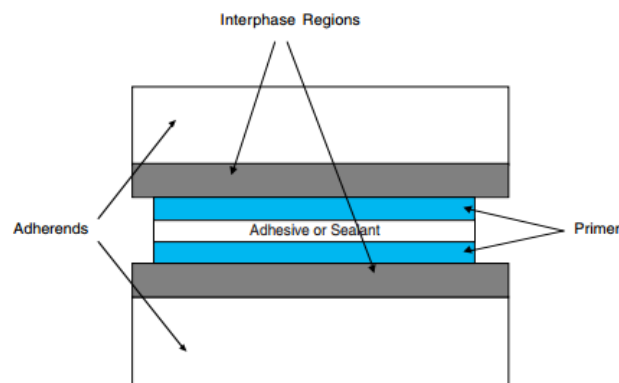


Figura 1 - Componentes de uma junta adesiva [5]

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Os adesivos estão cada vez mais presentes na indústria, principalmente na aeronáutica, naval e automóvel, pois os adesivos estruturais permitem a ligação resistente de componentes do mesmo ou diferentes materiais, o que torna quase perfeito para a construção de veículos e aeronaves.

Indústria automóvel

A utilização dos adesivos na indústria automóvel começou na colagem de para-brisas. Mais tarde os adesivos começaram a ser aplicados noutros componentes, como as janelas traseiras. Também eram aplicados em lacunas de soldadura de forma a evitar a corrosão [6]. Como resultado secundário da aplicação de adesivos para combater a corrosão, a rigidez do corpo do veículo aumentou e, desta forma, começaram a ser utilizados adesivos de alto módulo para otimizar a resistência à torção [6] (Figura 2).

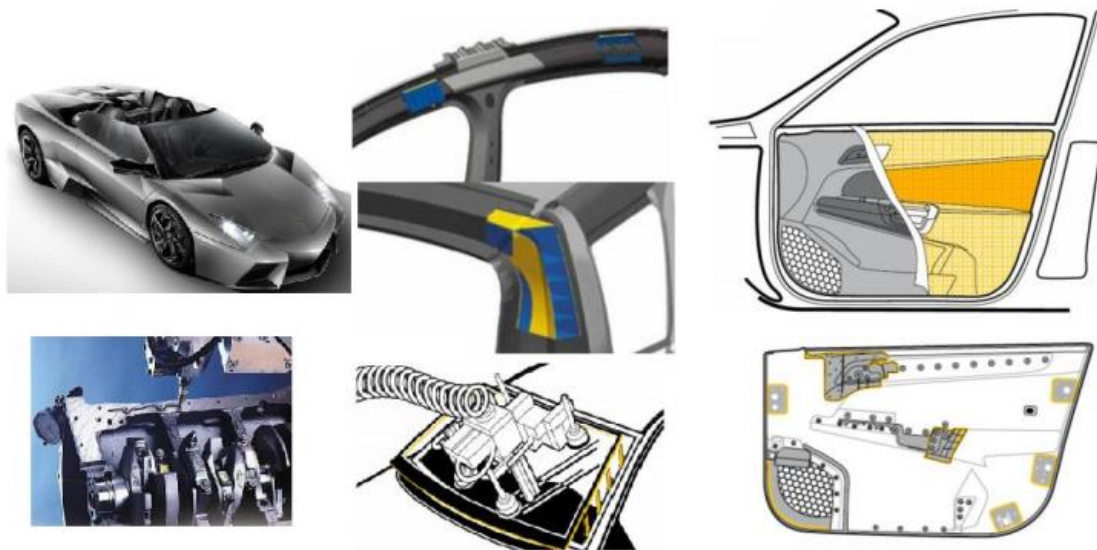


Figura 2 - Utilização de adesivos em automóveis [7]

Indústria aeronáutica

A indústria aeronáutica e espacial tem vindo cada vez mais a utilizar ligações adesivas devido às condições a que as estruturas estão sujeitas em funcionamento bem como o elevado desempenho das ligações adesivas (Figura 3).



Figura 3 - Partes de um avião onde foram usadas ligações adesivas [8]

O uso deste tipo de ligação é muito importante nesta indústria pois permite redução de peso, amortecimento de vibrações e um bom isolamento, e porque oferece uma boa resistência à fadiga [9].

Indústria naval

Na indústria naval, existe uma grande necessidade de utilizar ligações adesivas, pois este tipo de ligação permite ligar partes críticas de uma estrutura ou então atuar como vedante, com uma função estrutural secundária. Na Figura 4 podemos ver como são aplicados os adesivos na construção de um convés.

Os materiais mais utilizados na construção de cascos e pavimentos de navios são normalmente plásticos reforçados com fibras (PRF) [6]. Também se utiliza a ligação de PRF com outros materiais, como PRF - (placa) madeira, PRF - PVC (espuma) ou PRF - metal (alumínio ou aço) [4]. Isto aplica-se por exemplo em objetos de elevado peso como quilhas de lastro, rolamentos do leme, casco ou outras estruturas.



Figura 4 - Construção de um convés [10]

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Os esforços mais comuns que uma junta adesiva é sujeita são a compressão, tração, corte, arrancamento e clivagem. A Figura 5 mostra estes esforços de forma esquemática [2].

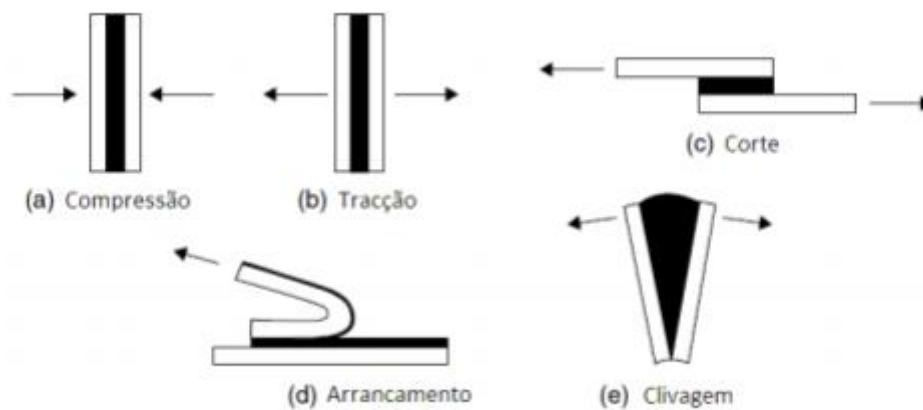


Figura 5 - Tipos de esforços a que uma junta pode estar sujeita [11]

Compressão

As forças são aplicadas de maneira a comprimir um substrato contra o outro, provocando tensões constantes ao longo do adesivo [11, 12].

Tração

Ao inverso da compressão, as forças aplicadas perpendicularmente afastam os substratos um do outro, provocando distribuição de tensões normais ao longo do comprimento da junta [11, 12].

Corte

São aplicadas forças no plano do adesivo provocando o escorregamento entre os dois substratos. As extremidades da junta ficam sujeitas à maior parte da tensão [11, 12].

Arrancamento

Quando um dos substratos é flexível e pode deformar plasticamente devido às forças aplicadas numa extremidade da junta [11, 12].

Clivagem

Os substratos são separados devido à aplicação de forças na extremidade de uma junta rígida [11, 12]. As juntas adesivas, sujeitas a diferentes tipos de carregamento, podem sofrer rotura de várias formas: rotura coesiva, rotura adesiva, rotura mista e rotura do substrato.

O modo rotura mais adequado é o de rotura coesiva no adesivo ou no substrato. A rotura de um dos substratos demonstra que a junta foi bem concedida, desde que a carga de rotura corresponda à resistência nominal do substrato [13].

Rotura coesiva

Este tipo de rotura ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte que a resistência do adesivo. Dando-se esta rotura, verifica-se que ambas as superfícies de rotura estão cobertas por adesivo (Figura 6) [12].



Figura 6 - Rotura coesiva [11]

Rotura adesiva

Acontece na fase da interface de um dos substratos. Após uma rotura adesiva um dos substratos fica com adesivo enquanto o outro substrato fica apenas com vestígios de adesivo (Figura 7) [12].



Figura 7 - Rotura adesiva [11]

Rotura mista

Como o próprio nome indica, é uma mistura do que acontece na rotura adesiva com a rotura coesiva (Figura 8) [12].



Figura 8 - Rotura mista [11]

Rotura do substrato

Acontece quando a rotura se dá no substrato (Figura 9) [12].



Figura 9 - Rotura do substrato [11]

2.1.4 Configurações possíveis de junta

Existem vários tipos de juntas com diferentes combinações. Alguns exemplos são descritos de seguida.

Junta de Sobreposição Simples

Este tipo de juntas é o mais comum pois são de fácil execução e o adesivo é maioritariamente solicitado ao corte. Apresentam algumas desvantagens como o aparecimento de tensões de arrancamento nas extremidades [14] (Figura 10).

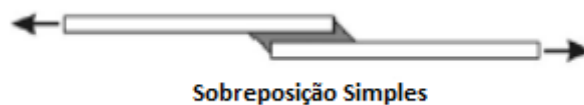


Figura 10 – Junta de Sobreposição Simples [2]

Junta de Sobreposição Dupla

O processo de fabrico deste tipo de juntas é mais complexo comparado com as JSS. Assim como nas juntas de sobreposição simples, as de sobreposição dupla também apresentam o aparecimento de tensões de arrancamento, mas como o efeito de flexão é muito menor faz com que a resistência da JSD seja duas vezes superior da resistência da JSS [13, 15] (Figura 11).



Figura 11 – Junta de Sobreposição Dupla [2]

Junta de Chanfro Interior (*scarf*)

As juntas *scarf* permitem a diminuição dos gradientes de tensões ao longo do adesivo, aumentando então a resistência da junta, mas o processo de fabrico deste tipo de junta é muito caro pois existe bastante dificuldade em maquinar a rampa [13] (Figura 12).

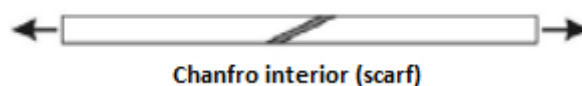


Figura 12 – Junta de Chanfro Interior (SCARF) [2]

Juntas em Degrau

As juntas em degrau permitem obter distribuições de tensões mais uniformes comparativamente às JSS devido ao efeito de redução de espessura dos substratos. Se

forem utilizados substratos em compósito, a execução dos degraus durante o empilhamento antes da cura fica mais económico. Isto faz com que se elimine a maquinação, que danifica as fibras [13] (Figura 13).

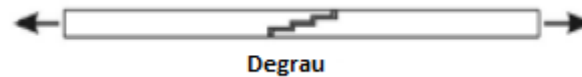


Figura 13 – Juntas em degrau [2]

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 [16]. Assim como na 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 a mais indicada [2, 13, 16] (Figura 14).

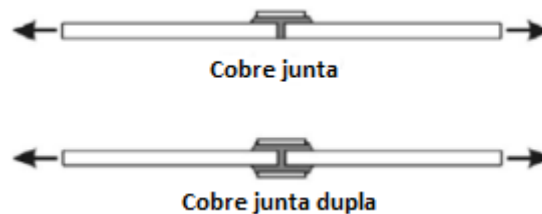


Figura 14 - Cobre junta e cobre junta dupla [2]

Topo a topo

As juntas de topo a topo planas são as mais simples de se produzir, mas não apresentam uma grande eficiência. Apresentam elevadas tensões de arrancamento e de corte nas extremidades. E não suportam esforços de flexão porque o adesivo estaria sujeito a clivagem [2] (Figura 15).



Figura 15 - Topo a topo [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 [16]. Apresenta uma boa resistência a esforços de tração e compressão, sendo uma solução vantajosa relativamente às juntas topo a topo [2] (Figura 16).

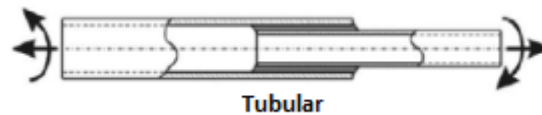


Figura 16 – Tubular [2]

2.1.5 Adesivos estruturais

Uma das maneiras possíveis de classificar os adesivos é distinguir entre um adesivo fabricado a partir de produtos sintéticos ou naturais. No entanto, esta classificação é demasiado ampla para muitas das aplicações e, por isso na indústria usam-se outros métodos para classificar os adesivos. Essas classificações são feitas segundo critérios como a composição química, função, custo, entre outros. Na Figura 17 está apresentada de forma esquemática a grande família dos adesivos estruturais.

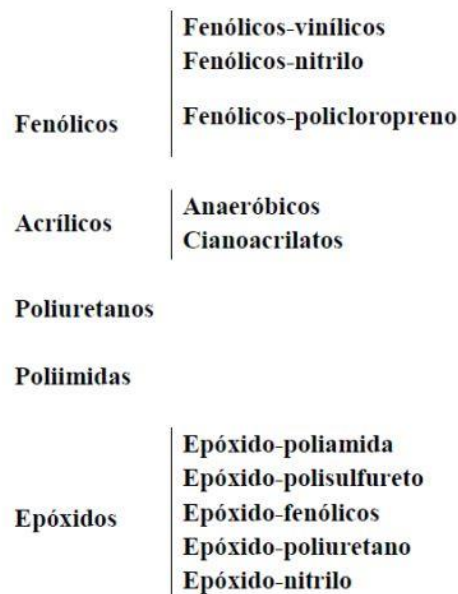


Figura 17 - Família dos adesivos estruturais [17]

Atualmente, a classificação mais utilizada é a classificação segundo a função do adesivo. Os adesivos dividem-se em adesivos estruturais e não estruturais. A principal função dos adesivos estruturais é ligar as estruturas, resistir a cargas elevadas sem deformação elevada. Os adesivos estruturais são materiais de elevada resistência e desempenho. No grupo dos adesivos estruturais, os que mais se destacam são os epóxidos, porque são o grupo de adesivos mais polivalente.

Fenólicos

Adesivos resultantes da condensação de fenol e formaldeído. Inicialmente eram usados principalmente para fazer ligações entre madeira. Depois passaram a ser utilizados em ligações entre metais tendo obtido uma resistência satisfatória. Possuem

boa resistência à temperatura, boa estabilidade dimensional, boa resistência a fungos e são relativamente baratos. Apresentam alguns aspetos negativos, como baixa resistência ao impacto e vibrações, formando assim uma junta frágil [13, 18].

Acrílicos

São divididos em acrílicos anaeróbicos, cianoacrilatos e acrílicos modificados. Os **Acrílicos Anaeróbicos** apresentam uma resistência mecânica próxima de um epóxido, boa resistência a solventes e uma temperatura de utilização até 150°C. São curados à temperatura ambiente de fácil manuseamento. Os **Acrílicos Cianoacrilatos** são denominados por adesivos instantâneos, supercola ou cola tudo, uma vez que permitem colagens muito rápidas. Apresentam uma elevada resistência à tração, embora sejam bastante frágeis e muito fracos ao arrancamento. O processo de cura depende de fatores como humidade, acidez-basicidade (pH) e espessura da junta adesiva. Os **Acrílicos Modificados** são alterados de modo a possuírem boa resistência ao arrancamento e ao impacto, permitindo ligações resistentes mesmo com uma preparação menos cuidada das superfícies de ligação. São muito resistentes à humidade e permitem variadíssimas aplicações, mas são menos resistentes quando sujeitos a temperaturas elevadas [4].

Poliuretanos

Reação de um polioliol (ou poliéter-polioliol) com um isocianato. A sua cura pode-se efetuar à temperatura ambiente ou a altas temperaturas. Possuem uma resistência relativamente alta ao corte e ao arrancamento, são flexíveis, apresentam ligações com boa tenacidade, excelente comportamento a baixas temperaturas e uma boa resistência química [12, 13, 18].

Poliimidas

Foram desenvolvidas pela NASA para a indústria aeroespacial. Possuem uma temperatura de transição vítrea de 100°C acima da dos epóxidos e podem por isso ser utilizadas a temperaturas mais altas. Existem dois tipos de poliimidas distinguidas pela forma como se realiza a cura: por reação de condensação e por reação de adição. Apresentam grande dureza, baixa resistência ao impacto e vibrações, e boa resistência a temperaturas altas [12, 13, 18].

Epóxidos

Têm uma vasta aplicação nas indústrias aeronáutica e automóvel. Os epóxidos comerciais são constituídos por uma resina epóxida e por um endurecedor. O endurecedor pode vir já incorporado na resina ou ser fornecido à parte para ser mais tarde misturado com a resina. Os adesivos epóxidos têm excelente resistência à tração e ao corte e apresentam fraca resistência ao arrancamento. Têm também uma excelente resistência ao óleo, humidade e solventes, têm uma baixa contração na cura e uma elevada resistência à fluência. Aderem bem a diferentes tipos de substratos e

podem ser modificados de forma a atingir uma grande variedade de propriedades [13, 18].

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

No passado, a falta de modelos de materiais precisos e critérios de rotura adequados para a precisão da rotura levaram ao fabrico de juntas adesivas sobredimensionadas, o que resultou em estruturas mais pesadas e mais caras. Com a disponibilidade de metodologias confiáveis, surgiram novas possibilidades para o uso eficiente de juntas adesivas. Existem duas possibilidades para a análise de juntas adesivas: métodos analíticos e métodos numéricos. O estudo de juntas adesivas já se fazia no ano 1930 com o modelo de Volkersen [19], que considera materiais totalmente elásticos e deformação elástica adesiva apenas de corte. No entanto, a formulação analítica de juntas adesivas torna-se mais complexa se o adesivo se deformar plasticamente, se forem utilizados substratos de material compósito, ou utilizando substratos de diferentes materiais. A técnica mais utilizada na análise da resistência de juntas adesivas, é a de EF. Esta técnica aplicada a juntas adesivas apareceu através de Adams e Peppiatt [20]. A rotação da junta, a plasticidade do adesivo e dos substratos e a influência do filete de adesivo foram estudados por Harris e Adams [21]. Inicialmente consideramos a abordagem da mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência de juntas adesivas, exigindo a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado. O MEF também pode ser usado em conjunto com critérios de mecânica da fratura para previsão da resistência da junta, pelo fator de intensidade de tensão ou abordagens energéticas, como a técnica de fecho virtual da fenda. No entanto, esta técnica de modelação é bastante complexa e é necessário voltar a criar a malha sempre que há propagação da fenda, o que requer um maior esforço computacional [22]. Nas ultimas décadas foram feitas importantes evoluções e uma delas é 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.

2.2.1 Modelos analíticos

Inicialmente no estudo das ligações adesivas os métodos de previsão de resistência eram apenas analíticos, e as formulas de Volkersen [19] e Goland e Reissner [23] foram as primeiras numa serie de estudos que tiveram a vantagem de simplificar os campos de tensão nas estruturas, devido a utilização de hipóteses simplificativas em termos da geometria da estrutura, das condições fronteira e carregamento, apresentando

soluções eficientes. Com estes modelos estrutura ligada pode ser analisada rapidamente embora com muitas simplificações [24]. As tensões e deformações podem ser facilmente calculadas juntamente com a distribuição do momento fletor da estrutura, a resistência é quase sempre prevista por critérios baseados em tensões ou deformações. Mais tarde estas soluções foram substituídas por análises numéricas.

2.2.2 Métodos numéricos

2.2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

Na mecânica dos meios contínuos, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos pelos modelos analíticos ou numéricos (EF), são utilizados em critérios de rotura para prever a resistência da junta. Isto é possível quando os valores previstos, determinados por critérios baseados na tensão e na deformação (critério da tensão normal máxima, ou o critério da tensão de corte máxima), atingem a resistência limite dos materiais. Assim este método foi aplicado às juntas adesivas, assim que o MEF foi disponibilizado e programado em computador [21]. Este método tem a vantagem de ser possível fazer uma análise de ligações adesivas com ou sem um dano inicial. No entanto, apresenta uma limitação, uma vez que as estruturas ligadas são sujeitas a tensões localizadas nas extremidades das regiões de sobreposição, devido às arestas vivas. De facto, na análise numérica de uma junta adesiva, as tensões nas extremidades da junta aumentam com o refinamento e não se consegue obter convergência, dando previsões dependentes da malha [24]. Até agora foram introduzidas melhorias a esta técnica de modelação, como a definição critérios mais complexos de tensão e deformação, para diferentes materiais e mecanismos de fratura, ou combinação com modelos de meios contínuos mais realistas, mas ainda assim o problema da malha ainda não se encontra resolvida [12].

2.2.2.2 Mecânica da fratura

Na mecânica dos meios contínuos, assume-se que a estrutura e os materiais são contínuos, o que não é compatível com a existência de defeitos. Consequentemente, a mecânica dos meios contínuos não dá nenhuma solução para o estado de tensão nestes pontos que resultam em singularidades de tensões e/ou deformações. As fendas são os defeitos mais comuns nas estruturas. Assim sendo desenvolveu-se a mecânica da fratura. Na mecânica da fratura, é bem aceite que as tensões calculadas pela 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° . Isto foi descoberto por Williams [25] para as tensões localizadas num entalhe. Este efeito é igualmente aplicável para a singularidade de tensões em dois materiais colados entre si, com um canto reentrante. Muitos estudos relacionados com juntas adesivas usam a taxa de libertação de energia de deformação, e o respetivo valor

crítico ou tenacidade à fratura [26] em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda se propaga numa interface ou perto dela.

2.2.2.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de Modelos de Dano Coesivo foi apresentado no final dos anos 50 e início dos anos 60, através dos estudos desenvolvidos por Barenblatt [27] e Dugdale [28]. Estes investigadores descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito de cargas estáticas. Os MDC foram posteriormente refinados e testados para poderem simular e analisar o início e propagação da fenda no interior ou na interface de materiais, ou na delaminação de compósitos. Os MDC podem ser implementados em elementos de mola ou elementos coesivos, e fazem a ligação entre corpos bidimensionais ou tridimensionais. Uma característica importante dos MDC é que estes podem ser incorporados facilmente em programas de MEF e assim modelar o comportamento à fratura de vários materiais, incluindo juntas adesivas [29]. Os MDC têm por base a suposição que uma ou mais zonas de propagação de dano podem ser inseridas artificialmente nas estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos [12].

2.2.2.4 Mecânica do dano

Atualmente as técnicas de modelação que são usadas, apresentam maior precisão nas previsões de rotura [30]. O MEF utilizando elementos de sólidos contínuos apresenta resultados de forma errada que os elementos sofrem plasticidade generalizada sem evolução do dano. Enquanto os modelos da MD usam a redução de esforços para induzir dano nos elementos. Então torna-se possível a simulação gradual do dano e fratura de uma fenda dentro de uma região finita. Este método só se tornou generalizado a pouco tempo apesar de já existir a mais. Este campo ainda é inovador com um desenvolvimento intenso, que procura técnicas de modelação mais precisas, confiáveis e com métodos de estimação simples dos parâmetros dos materiais, aumentando a eliminação e robustez dos problemas de convergência [30, 31].

Nas metodologias baseadas na mecânica do dano, um parâmetro de dano é estabelecido para modificar a resposta dos materiais pela depreciação da rigidez ou resistência, por exemplo para camadas finas de adesivo [32], de forma a representar a severidade do dano no material durante o carregamento. Esta variável pode ser utilizada numa lei de evolução de dano de forma a modelar a absorção do dano pré-fenda e a propagação da fenda. As variáveis de dano podem ser divididas em dois grupos: (1) variáveis que preveem a quantidade do dano pela redefinição das propriedades dos materiais e (2) variáveis ligadas à definição física de um tipo de dano específico, tais como porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [33]. Em todos

os casos, os diferentes mecanismos de dano que ocorrem simultaneamente num material podem ser considerados neste tipo de modelos, cada um deles por uma variável de dano independente. Na mecânica do dano, o crescimento do dano é definido como uma função do carregamento para modelação estática [34] ou para análises de fadiga [35, 36]. Em comparação com a fadiga dos MDC, as técnicas da mecânica do dano não permitem distinguir claramente as fases de iniciação e de propagação da fadiga, embora providenciem uma base para análises de previsão [37]. De qualquer forma, pode ser simulada a evolução do dano antes do crescimento da fenda.

2.2.2.5 Método de Elementos Finitos Estendido

O MEFX consiste numa modificação da formulação do MEF, cuja finalidade reside na análise do crescimento do dano em meios contínuos. Este método utiliza leis de dano que se baseiam na resistência dos materiais para a iniciação do dano e deformações para previsão da rotura. Comparando o MEFX com os MDC, este apresenta a vantagem de a fenda não ter de seguir um trajeto pré-definido. Então a fenda propaga-se de forma livre no interior do material sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades [16, 38]. Este método é uma extensão dos EF. O MEFX é baseado no conceito de partição de unidade e pode ser implementado nos 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 [16, 39].

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as tensões normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX através de critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós de elementos fraturados [16].

2.2.2.5.1 Aplicação do método a juntas adesivas

Neste capítulo descrevem-se com algum detalhe alguns dos trabalhos científicos mais relevantes relativos à utilização do MEFX para previsão de resistência de juntas adesivas.

No trabalho de Campilho et al. [40], apontando o acesso da viabilidade do MEFX para simular a propagação de fenda e prever o comportamento da junta com uma fina camada de dois adesivos epóxicos sobre diferentes restrições impostas pelos substratos. A determinação dos parâmetros G_{IC} e σ_n^0 , foi inicialmente carregado por fora por DCB. Tendo especial atenção ao parâmetro G_{IC} que evoluiu de duas maneiras diferentes, onde os resultados combinam bastante bem apesar de terem sido encontrados alguns problemas para a curva $C = f(a)$ do CCM. O resultado do DCB foi usado para validar o procedimento MEFX para simular estruturas ligadas introduzindo leis de dano nos modelos numéricos. Em termos de curvas $P-\delta$, os resultados foram bastante precisos com os resultados experimentais. As vantagens e desvantagens desta técnica foram discutidas mostrando que o MEFX pode ser uma alternativa para uma melhor análise de estruturas ligadas.

2.3 Juntas adesivas com alterações para aumento de resistência

As juntas adesivas podem ser aplicadas quase todos os setores da indústria, devido à sua elevada resistência e baixo peso da ligação. Tendo a sua geometria não linear, ocorre uma significativa concentração de tensões nas extremidades das juntas, o que pode provocar fendas e levar à rotura da junta adesiva. Generalizando, existem dois tipos de métodos para reduzir a concentração de tensões: fazer alterações nos próprios materiais ou alterando a geometria da junta [30].

2.3.1 Filetes de adesivo

Os filetes de adesivo permitem a redistribuição das tensões nas regiões das extremidades da sobreposição, aumentando a resistência das juntas adesivas [30, 32, 41]. Estes filetes são aplicados na totalidade da espessura dos substratos, minimizando as tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da junta [42]. Rispler et al. [43] desenvolveram um algoritmo numérico para encontrar a forma ideal de um filete para reforçar a ligação adesiva numa placa reforçada. A solução ideal consiste na utilização de um filete com um ângulo de 45°. Lang e Mallick [44] estudaram através do MEF o efeito da forma do filete nas tensões de corte de arrancamento numa JSS solicitada à tração. Na Figura 18 são apresentados os tipos mais utilizados de filete para alteração da geometria de juntas adesivas[32].

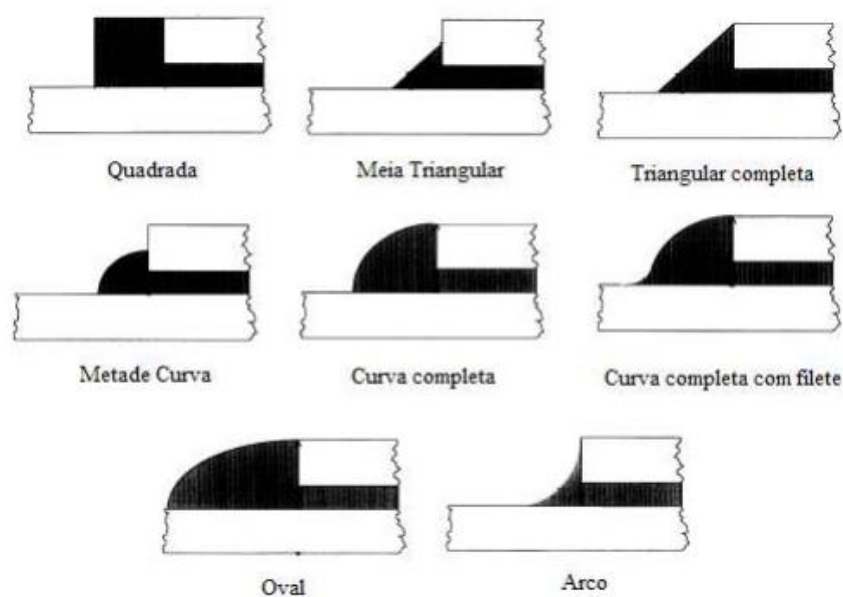


Figura 18 – Geometrias possíveis de filete [45]

2.3.2 Chanfros interiores e exteriores

Os chanfros exteriores e interiores (Figura 19) usados nos substratos também podem ser bastante eficazes na redução dos picos das tensões de arrancamento nas extremidades da junta [42], aumentando a sua resistência. Kaye e Heller [46] concluíram que o chanfro exterior distribui a carga de forma mais uniforme entre os substratos, o que se reflete numa melhoria da resistência das estruturas ligadas [30]. Hu e Soutis [47] mostraram que o pico da tensão de corte pode ser reduzido pelo aumento da t_A nas extremidades da sobreposição do chanfro interior dos substratos. Considerou-se uma junta com chanfros interiores nos substratos para reduzir as concentrações de tensões na camada adesiva e conseqüentemente para aumentar a resistência da junta [30].

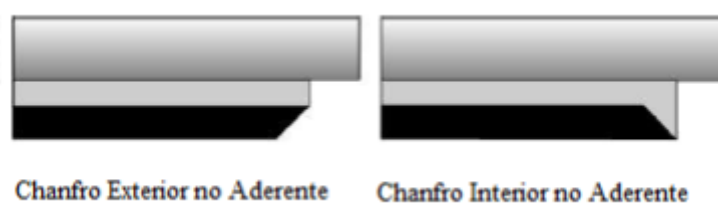


Figura 19 - Tipos de chanfros [48]

2.3.3 Utilização de dois adesivos

Neste capítulo descrevem-se com algum detalhe alguns dos trabalhos científicos mais relevantes relativos à utilização de dois adesivos em juntas adesivas, cuja geometria se apresenta na Figura 20.

Uma junta adesiva ideal é aquela em que a flexibilidade e as propriedades de resistência do adesivo variam ao longo do comprimento de sobreposição. Devido a maiores tensões de corte do adesivo nas bordas da sobreposição, deve ser usado um adesivo flexível e dúctil nas extremidades de sobreposição, enquanto no meio deve ser usado um rígido e menos dúctil. A técnica de adesivo misto proporciona melhorias na resistência das juntas em relação à utilização de apenas um adesivo. Para uma junta adesiva mista ser mais resistente do que a junta com adesivo frágil e do que a junta com adesivo dúctil, a carga carregada pelo adesivo frágil deve ser superior à carregada pelo adesivo dúctil [49].

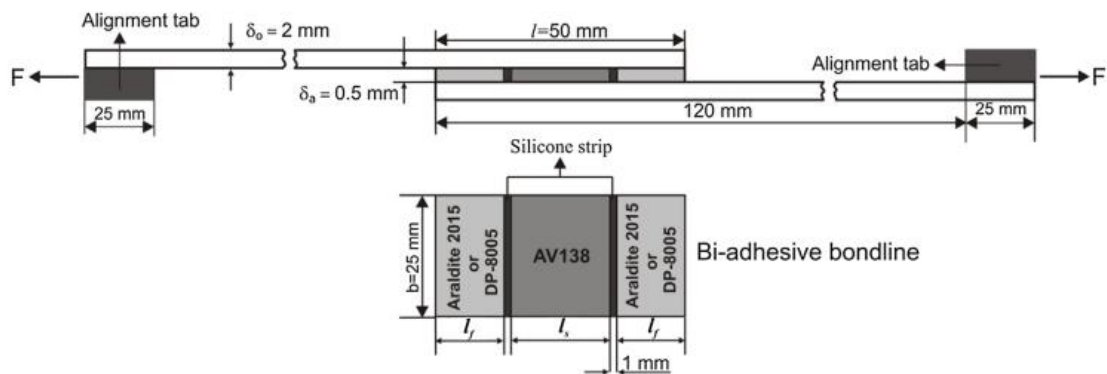


Figura 20 –Geometria de juntas adesivas mistas [50]

A utilização de dois adesivos reduz significativamente as tensões nas juntas adesivas.

Outra maneira de abordar o problema é o *design* da forma final da placa, e usar juntas adesivas mistas. Foi realizado um estudo por Bouchikh et al. [51] de EF para investigar o efeito de juntas adesivas mistas, sobre a distribuição das tensões na camada adesiva, numa viga de aço adaptada com placa de polímero reforçado com fibra como mostra a Figura 21.

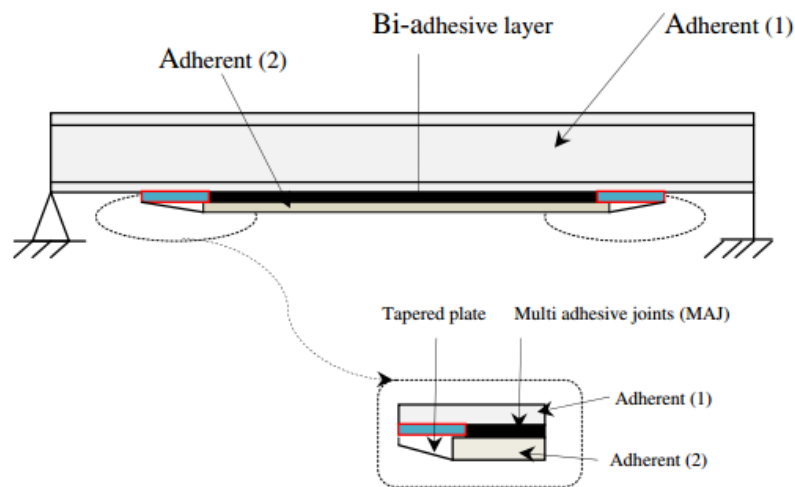


Figura 21 - Geometria da viga com dois adesivos [51]

Conclui-se que a análise EF foi executada para validar os resultados da solução analítica ao longo da interface em juntas adesivas homogêneas, e as diferenças entre os resultados obtidos das diferentes soluções é aceitável, o que demonstra que o procedimento executado é simples, mas exato. Os resultados mostram que existe uma elevada concentração de tensões no ponto final da estrutura reforçada. Foi investigado o efeito de vários parâmetros, para influenciar o valor das tensões interfoliais na ligação. O resultado mostra que o módulo de elasticidade do adesivo e da espessura do prato CFRP tem elevada influencia na tensão interfacial no ponto final do prato. Usando um prato FRP rígido de baixo módulo de elasticidade, a tensão interfacial pode ser reduzida consideravelmente.

2.3.4 Gradação de propriedades dos substratos

No trabalho de Ávila e Bueno [52] considera-se uma junta de sobreposição simples em que na zona de ligação as duas placas apresentam uma geometria ondulada. Este estudo apresentado inclui componente numérica e experimental, chegando-se à conclusão de que é possível aumentar a resistência da junta em cerca de 40% com este tipo de soluções. A junta ondulada (Figura 22) não só evita a excentricidade da carga transmitida, como também permite o aparecimento de tensões compressivas nas extremidades da camada de adesivo. Então, ao alterar o campo de tensões de tração para compressão, é melhorada a eficiência do adesivo e conseqüentemente o rendimento da junta será superior [53].

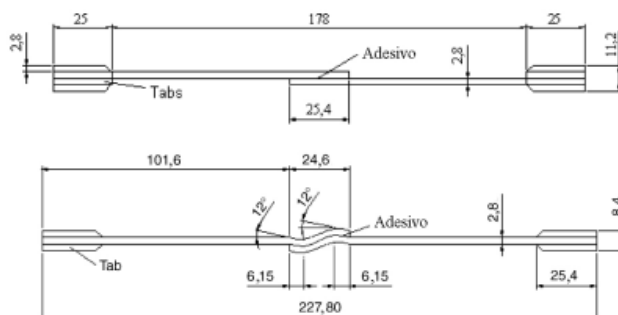


Figura 22 - Geometria usada no trabalho de Ávila e Bueno [52]

No trabalho de Boss et al. [54] é estudado o efeito da utilização de juntas cujas placas, em CFRP, que possuem rigidez variável. Esta rigidez variável é conseguida de duas formas. Na primeira, as placas apresentam um módulo de Young variável ao longo do seu comprimento, ao passo que na segunda a variação de rigidez é obtida variando a própria espessura das placas, como mostra a Figura 23. A primeira solução é conseguida variando o ângulo segundo o qual as fibras se encontram entrelaçadas entre si [53].

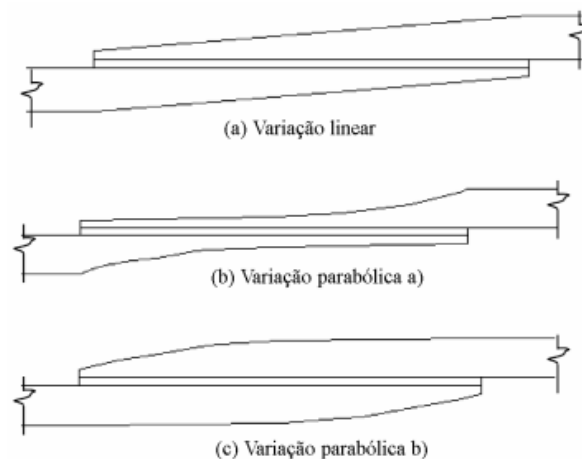


Figura 23 - Variação da rigidez alterando a espessura das placas [54]

Conclui-se que, a gradação de rigidez resulta numa redução das tensões de corte no adesivo mais pronunciada. No entanto, observou-se ser possível combinar as duas soluções propostas para a obtenção de uma junta de características mecânicas superiores.

2.3.5 Utilização de degraus na zona de sobreposição

No trabalho de Akpınar [55] foi estudado o comportamento de juntas adesivas com um e com três degraus. Foram usados substratos de liga de alumínio AA2024-T3 e adesivo flexível SBT9244 e adesivo rígido DP460. A Figura 24 mostra a geometria da junta.

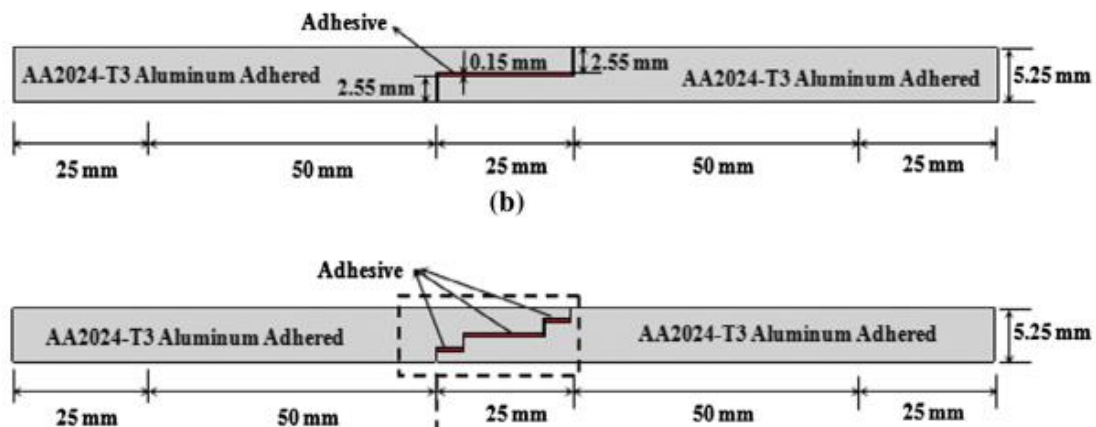


Figura 24 - Juntas com um e três degraus [55]

Foi feito um estudo tridimensional em EF considerando juntas em degrau com determinada geometria, conclui-se que a junta de um degrau reduz a concentração de tensões desenvolvidas nas extremidades da junta, mas a junta com três degraus apresentou uma maior redução destas tensões como podemos ver graficamente na Figura 25.

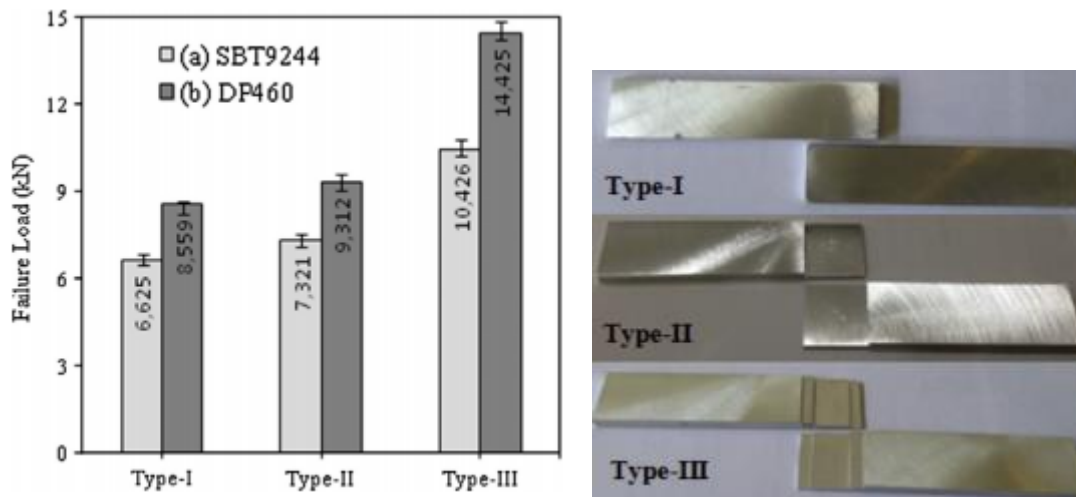


Figura 25 - Gráfico comparativo das forças máximas de cada tipo de junta [55]

Segundo o trabalho de Bendemra et al. [56], a análise por EF foi realizada, usando seis tipos de geometrias de juntas, as juntas em degrau e *scarf* apresentaram uma forte sensibilidade para este estudo. Foi utilizada uma análise por EF, onde se verificou que as juntas em degrau mostraram elevada concentração de tensões, assim como as juntas *scarf*, no entanto este estudo mostrou que isto pode ser moderado com a introdução de mais camadas e as mudanças apropriadas na geometria da junta para reduzir os picos de tensão na junta. O processo de maquinagem para as juntas (Type-III) nas regiões próximas das bordas da área de sobreposição fez diminuir as tensões de arrancamento (σ_y), formadas nas bordas da área de sobreposição, que é muito eficaz para iniciar danos e essa diminuição teve um papel muito significativo no aumento da resistência da junta.

No trabalho de Ichikawa et al. [57], estudaram-se juntas em degrau com pinos (Figura 26), sujeitas a compressão, usando MEF.

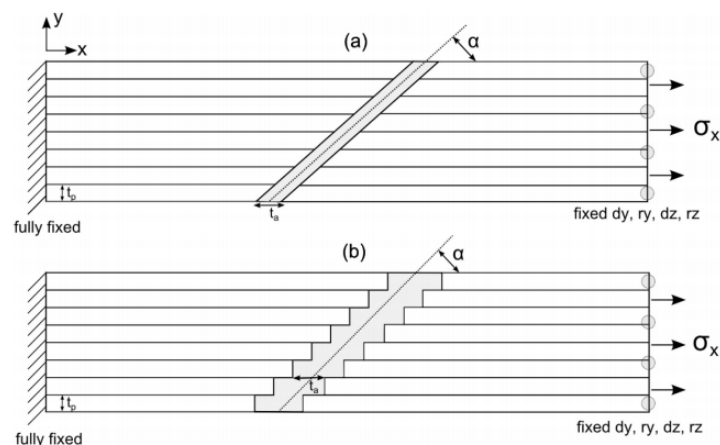


Figura 26 - Geometria de juntas *scarf* e degrau [56]

Foi estudado o número de degraus, a espessura e o módulo de Young do adesivo. Os resultados mostraram que o valor máximo da tensão principal ocorre na extremidade do adesivo, este valor diminui assim como o módulo de Young quando o número de degraus aumenta. Foram feitos trabalhos experimentais como mostra a Figura 27, para medir as tensões das juntas sobre cargas estáticas. Os resultados obtidos tanto numericamente como experimentalmente foram bastantes bons e muito semelhantes.

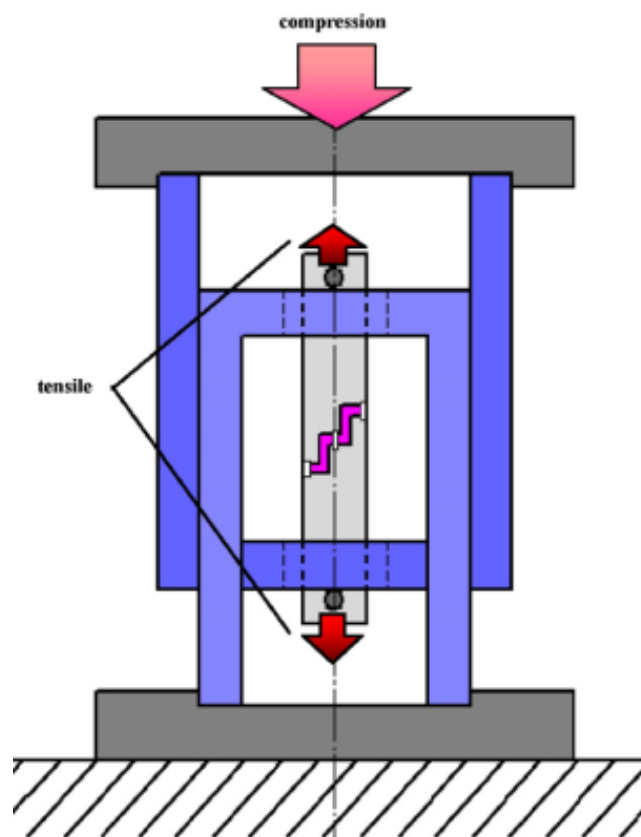


Figura 27 - Junta em degrau com pinos [57]

2.3.6 Outras alterações

Neste capítulo descrevem-se alguns trabalhos que consideram alterações geométricas diferentes das anteriormente apresentadas. You et al. [58] estudaram juntas adesivas *scarf* e juntas com filete de adesivo, a geometria da junta é representada na Figura 28, onde se conclui usando o MEF, que todos os picos de tensão no centro da junta adesiva tendem a diminuir quando se aumenta o ângulo da junta de 0° a 15° . O pico longitudinal, a tensão de corte e tensão equivalente de Von Mises no centro da camada adesiva diminui e move-se da extremidade para o meio da zona de sobreposição consoante o aumento deste ângulo. A carga máxima da junta com 7° aumentou em cerca de 64% comparado com a junta com 0° .

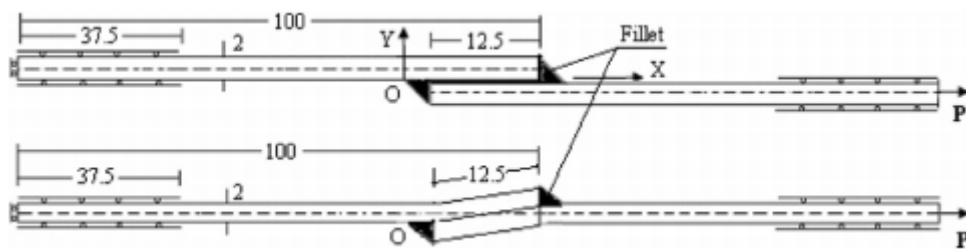


Figura 28 - Geometria de junta scarf e filete de adesivo [58]

No trabalho de Yan et al. [59] são estudadas numericamente juntas adesivas com encaixes paralelos, conforme se apresentam na Figura 29.

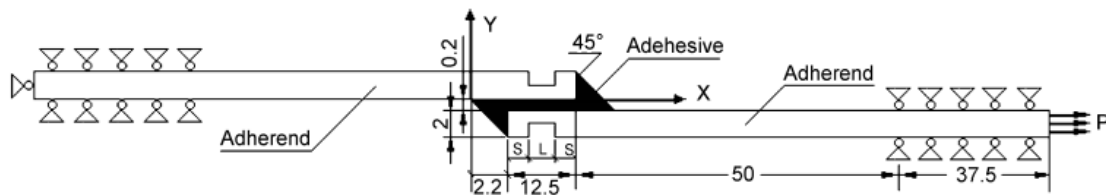


Figura 29 - Geometria da junta com encaixes paralelos [59]



Figura 30 - Malha da junta com encaixes paralelos [59]

Na Figura 30 está representada a malha da junta para análise de EF. Quando se inserem dois encaixes paralelos nos substratos, o pico de tensão longitudinal, tensão de corte, tensão principal e tensão equivalente de Von Mises no centro da junta diminuem notoriamente, e o nível de tensão do centro da sobreposição aumenta. Perto da zona de interface dos substratos o pico de tensão longitudinal, tensão de corte, tensão principal e tensão equivalente de Von Mises é quase a mesma que no ponto perto do final da sobreposição onde existe ou não um encaixe. Se existir encaixe o nível de tensão no centro da sobreposição é maior que numa junta normal. O valor dos picos de tensão no centro da junta é diminuído quando se aumenta o comprimento dos encaixes paralelos.

Já noutro trabalho, são estudadas juntas de sobreposição simples com geometrias extremas (Figura 31). Segundo Haghpanah et al. [60], nos resultados experimentais, as juntas planas com substratos espessos (dente V), têm forças similares para a fenda

inicial, enquanto as juntas com substratos mais finos (dente \wedge) são consideravelmente fracas, as três geometrias apresentam resultados semelhantes.

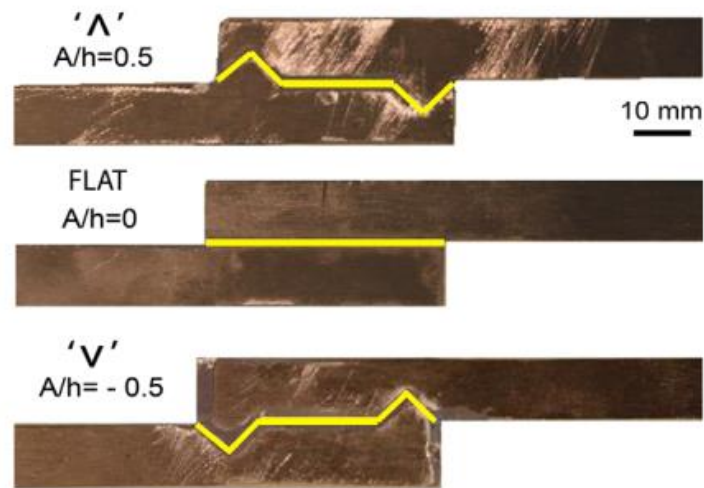


Figura 31 - JSS de geometria extrema [60]

Foi usada uma análise de EF para observar a fenda inicial. Os resultados da análise EF mostrou que a fenda nas juntas com dente negativo forma-se perto do flanco mais externo do dente e quebra quando chega ao pico do dente como foi observado experimentalmente. Um resultado intrigante que surgiu da análise EF foi a previsão de que uma junta com três dentes positivos pode resistir a fenda inicial com $B/L=0,75$ e $A/h=0,5$.

Nutro trabalho, de You et al. [61], estudou-se o efeito da utilização de componentes metálicos como parte do filete de adesivo, na resistência ao corte e à tração, de juntas adesivas de sobreposição simples com filete de adesivo e metal.

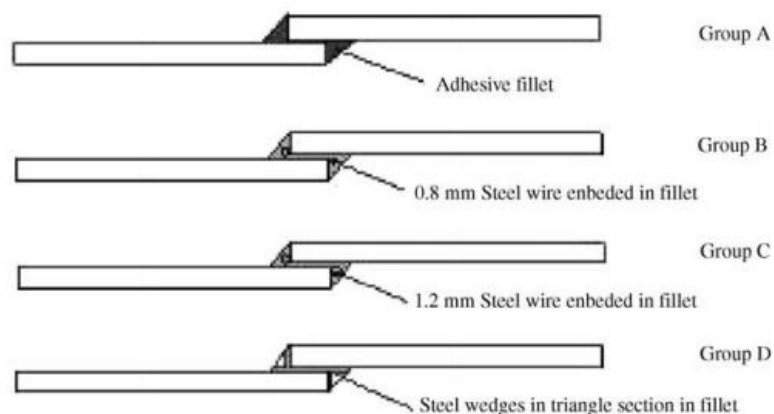


Figura 32 - JSS com filete adesivo e metal [61]

A geometria das juntas esta representada na Figura 32.

Submeter juntas de sobreposição simples com filete de adesivo com componentes metálicos a cargas, leva a uma significativa variação de pontos de fenda. O metal incluído no filete proporciona um aumento da resistência da junta e leva a mudanças dos nodos de fenda, principalmente na fase de interface. O modo de fenda pode variar dependendo das condições do processo de cura e devido as propriedades mecânicas e físicas do adesivo epóxico. Alterando o tempo de cura do adesivo, ou as propriedades da interface, a distribuição de tensões da junta é modificada o que provoca a mudança do modo de fenda. A Figura 33 mostra graficamente a variação da tensão de corte a tração de cada tipo de junta com filete de adesivo e metal.

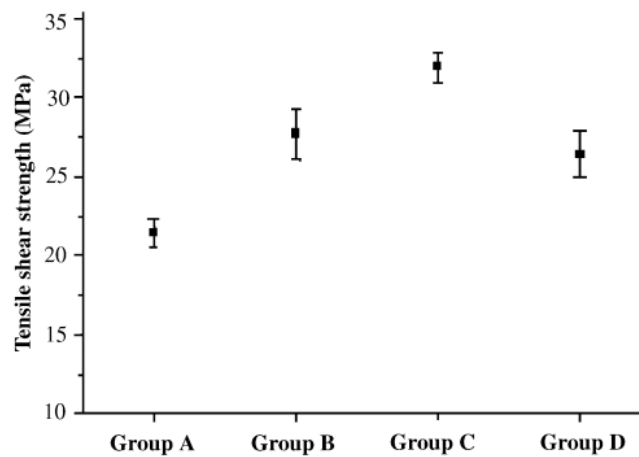


Figura 33 - Variação da tensão de corte á tração [61]

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

Os ensaios descritos neste capítulo foram realizados no trabalho de Silva [1]. O trabalho realizado na presente tese consistiu em todo o tratamento das curvas $P-\delta$ experimentais e numérico, respetivo tratamento e análise. Relativamente ao trabalho experimental, este consistiu no ensaio de juntas em degrau unidas por ligação adesiva, sujeitas a esforços de tração, com o objetivo 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 com os resultados obtidos numericamente, são analisados os diferentes modos de rotura e são discutidos os resultados obtidos em função das características de cada adesivo.

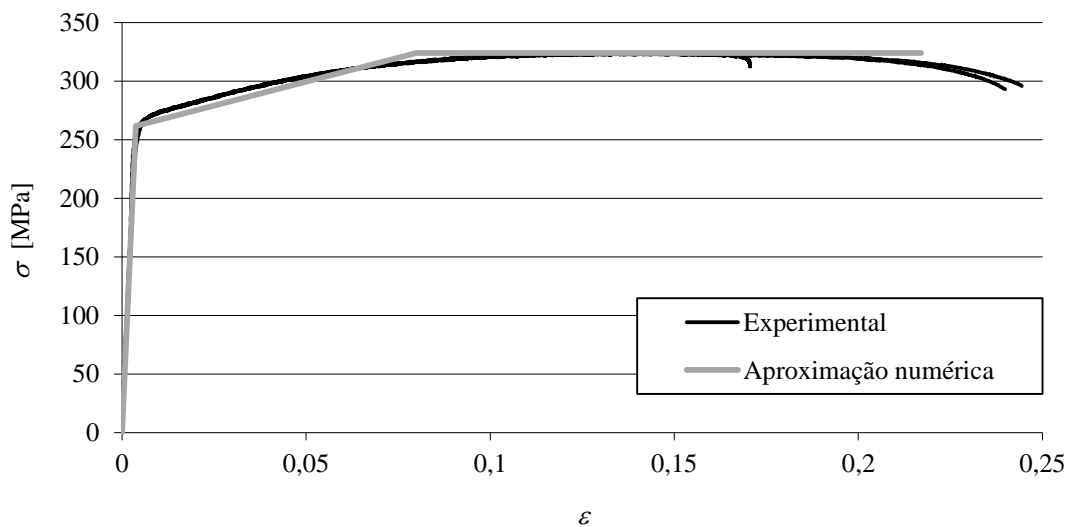
3.1.1 Materiais utilizados

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 às boas propriedades mecânicas, mas também ao amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada. Esta liga de alumínio foi caracterizada em trabalhos anteriores [62], onde foram definidas as seguintes propriedades: resistência à tração de 324,00±0,16 MPa, módulo de Young (E) de 70,07±0,83 GPa, tensão de cedência à tração de 261,67±7,65 MPa e deformação de rotura à tração de 21,70±4,24%.

As curvas tensão-deformação ($\sigma-\epsilon$) dos substratos de alumínio foram obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04. Também está representada a aproximação numérica usada nos MDC.

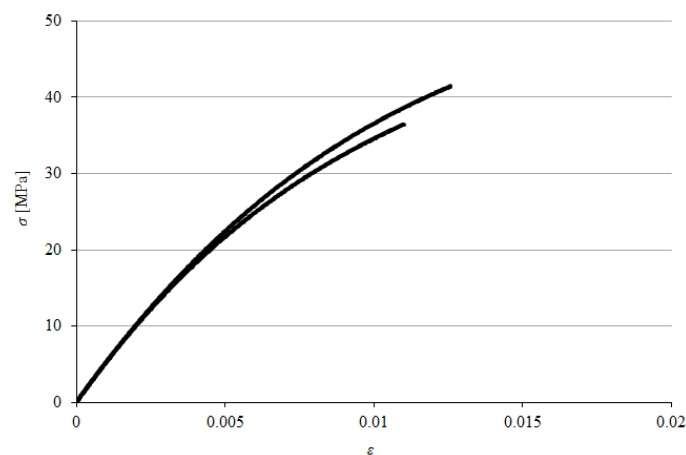
Figura 34 - Curvas σ - ϵ da liga AW6082-T651

3.1.1.2 Adesivos

Neste tópico descrevem-se os adesivos usados no trabalho experimental e suas propriedades. Nos ensaios efetuados 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® 7752, que se caracteriza como um adesivo poliuretano estrutural que combina elevada ductilidade com resistência mecânica moderada.

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 [63]. As curvas σ - ϵ dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 35 [63].

Figura 35 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [62]

Na Tabela 3 visualizam-se as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [64]

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson, ν	0,35 ^b
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 ao corte, G_{13} [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	30,2±0,40
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	7,8±0,7
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	0,20 ^a
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	0,38 ^a
^a valores estimados na referência [65]	
^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, comparando 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 substratos [63].

Na Figura 36 apresentam-se as curvas σ - ϵ dos provetes maciços para este adesivo [66].

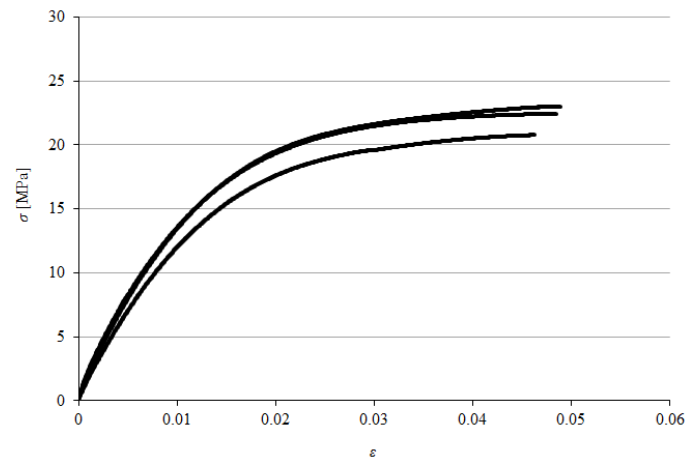


Figura 36 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [66]

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [63]

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	1,85±0,21
Coeficiente de Poisson, ν	0,33 ^a
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 ao corte, G_{13} [GPa]	0,56±0,21
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	14,6±1,3
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	17,9±1,8
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	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.

Na Tabela 4 estão apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo. 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.

3.1.1.2.3 Sikaforce 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 é um adesivo dúctil, conforme se pode observar na curva σ - ϵ da Figura 37 [67]. Comparativamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, o SikaForce® 7752 é o que apresenta a menor resistência ao corte e tração dos três adesivos, no entanto é o mais dúctil do conjunto. Trata-se de um adesivo à base de poliuretano, que se apresenta sob a forma de dois componentes, resina e endurecedor. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100g/20g, respetivamente.

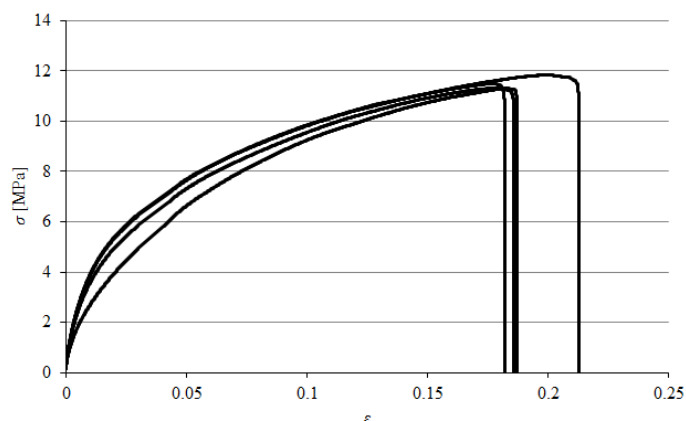


Figura 37 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Sikaforce® 7752 [67]

Na Tabela 5 apresentam-se as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo [67]. Em função das propriedades obtidas, é expectável que a resistência de juntas adesivas coladas com este adesivo seja elevada, pois este adesivo combina uma resistência muito aceitável com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Assim, são permitidas tensões elevadas na camada de adesivo, bem como um efeito acentuado de plastificação sem rotura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência [68].

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce® 7752 [67]

Propriedades	Sikaforce® 7752 L60
Módulo de Young, E [GPa]	493,81 ± 89,6
Coefficiente de Poisson, ν	0,33 ^a
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	3,24 ± 0,5
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	11,49 ± 0,3
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	19,18 ± 1,4
Módulo de elasticidade ao corte, G_{13} [GPa]	187,75 ± 16,4
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	5,16 ± 1,1
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	10,17 ± 0,6
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	54,82 ± 6,4
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	2,36 ± 0,2
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	5,41 ± 0,5

^a valor do fabricante

3.1.2 Geometria das juntas

A geometria da junta está detalhada na Figura 38 bem como as suas dimensões, onde os parâmetros geométricos são a espessura do adesivo (t_A e t_{A1}), a espessura da junta (t_P), o comprimento da junta (L_T), que são apresentados na Tabela 6 para os diferentes comprimentos de sobreposição (L_O).

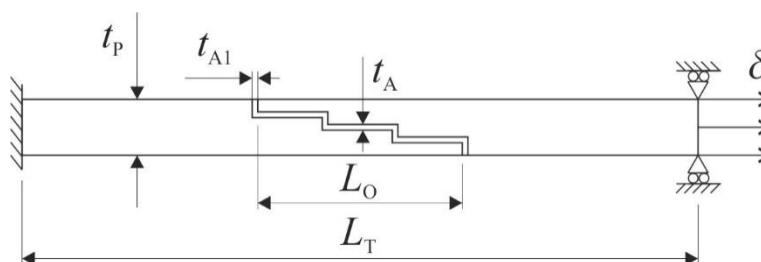


Figura 38 – Geometria e dimensões das juntas em degrau

Apresentam-se na Tabela 6 - Dimensões das juntas em degrau as dimensões das juntas para os quatro comprimentos de sobreposição.

Tabela 6 - Dimensões das juntas em degrau

Parâmetro	Dimensões [mm]			
L_o	12,5	25	37,5	50
L_T	180	180	180	180
t_A/t_{A1}	0,2	0,2	0,2	0,2
t_P	3	3	3	3

3.1.3 Processo de fabrico

O processo de fabrico realizado no trabalho de Silva [1] resume-se da seguinte forma. O fabrico dos provetes foi iniciado pelo corte (Figura 39) e de seguida a maquinagem das juntas iniciando com os substratos nas dimensões 180x25x3 mm³, gerando o formato de escada para os diferentes comprimentos de sobreposição. Foram necessários 60 substratos para garantir 5 provetes para cada configuração de junta.



Figura 39 - Corte dos provetes para maquinagem

Inicialmente os substratos foram submetidos à maquinagem dos degraus numa fresadora para se obter três degraus, como mostra a Figura 40. Estes foram realizados

nas oficinas do Instituto Superior de Engenharia do Porto, através de uma fresadora “Gambin” apresentada na Figura 40 que trabalhou com um avanço de 120 mm/min e uma velocidade de rotação de 1120 rot/min.



Figura 40 - Processo de fresagem para obtenção dos degraus nos substratos usando fresadora “Gambin”

Depois de finalizado o processo de maquinagem, todos os substratos foram submetidos à limpeza e preparação da superfície. A preparação da superfície consistiu na lixagem dos substratos para remover poeiras, óxidos e outras sujidades e dar rugosidade a superfície para melhorar a colagem do adesivo. A limpeza foi efetuada com acetona, que é um tratamento passivo químico.

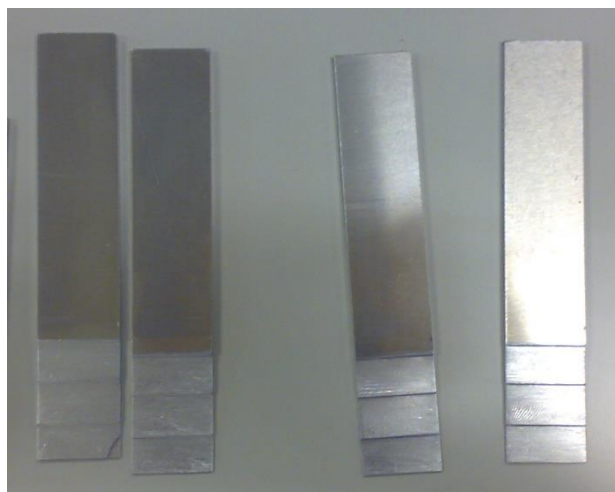


Figura 41 - Aspeto dos substratos após preparação da superfície e limpeza

Depois de concluído o processo de preparação da superfície, procedeu-se à preparação para aplicar o adesivo (Figura 42). Utilizou-se uma barra para suporte dos provetes, que foram presos por grampos de molas na posição certa para se obter um provete completamente alinhado (Figura 43). Utilizou-se também fio de pesca calibrado com $\varnothing 0,2$ mm nas extremidades da zona de sobreposição para garantir uma

espessura de adesivo constante. O excesso de adesivo nas arestas exteriores foi removido com uma mó após cura total, 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.

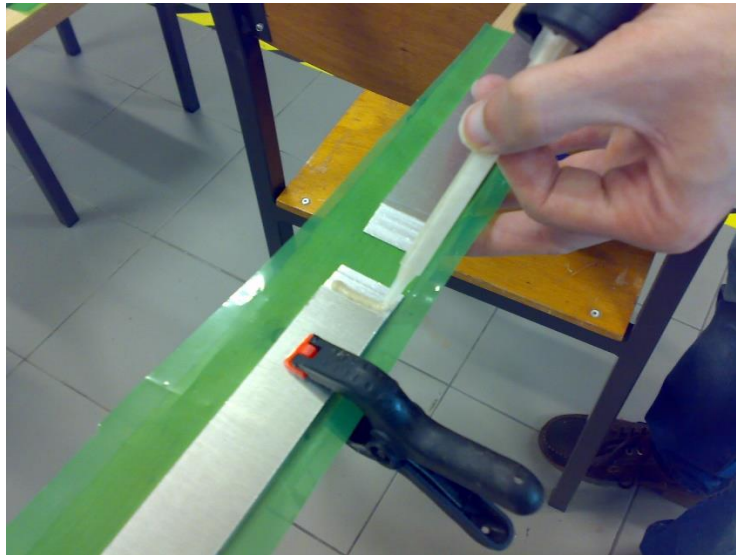


Figura 42 - Aplicação do adesivo



Figura 43 - Fixação com grampos

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. A velocidade de ensaio foi de 1 mm/min para todos os provetes.

3.1.4 Resultados obtidos

Neste subcapítulo são apresentadas as curvas P - δ e os modos de rotura para as juntas em degrau com diferentes comprimentos de sobreposição. É também efetuada uma análise dos dados obtidos experimentalmente na forma de gráficos de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 .

3.1.4.1 Curvas P - δ

Neste subcapítulo são representadas as curvas força-deslocamento (P - δ) para os diferentes adesivos e valores de L_0 , assim como $P_{\text{máx}}$ para cada um dos adesivos.

Araldite® AV138

Na Figura 44 estão representadas as curvas P - δ para as juntas com adesivo Araldite® AV138 para os vários valores de L_0 .

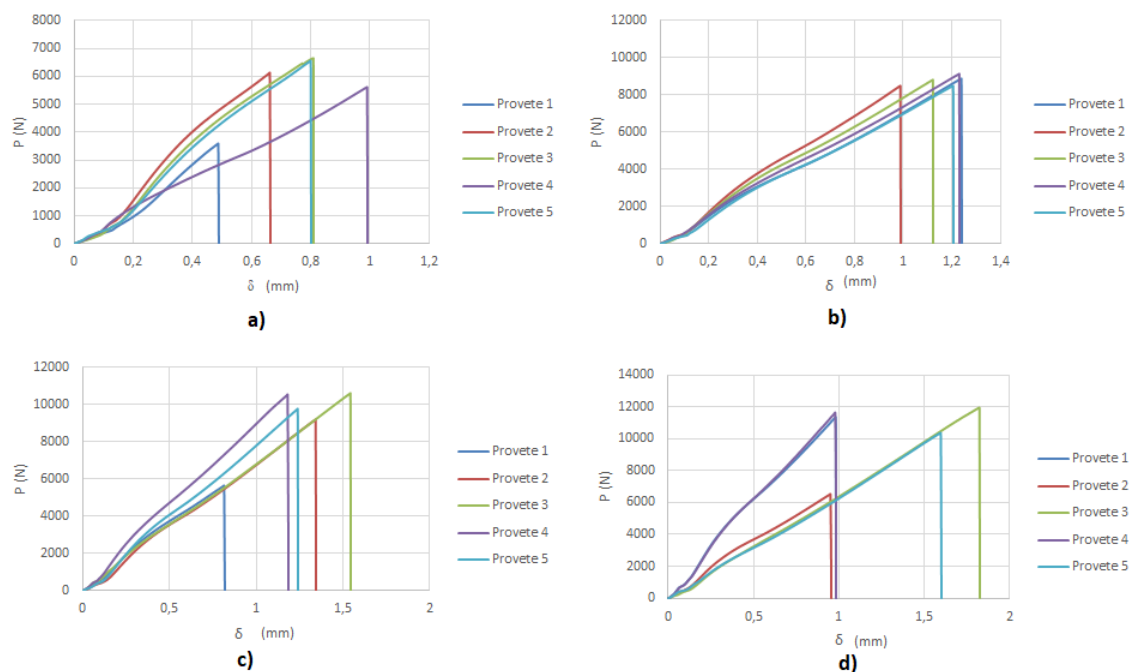


Figura 44 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente usando Araldite® AV138 com a) $L_0=12,5$ mm, b) $L_0=25$ mm, c) $L_0=37,5$ mm e d) $L_0=50$ mm

Na Tabela 7 podem-se visualizar os valores de $P_{\text{máx}}$ [kN] que foram obtidos experimentalmente.

Verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura. Nota-se a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido à flexibilidade da máquina de ensaios e em relação a fixação dos provetes.

Tabela 7 - Valores de $P_{\text{máx}}$ [kN] obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138

Provete \ L_0	12,5	25	37,5	50
1	3,608	8,865	5,628	11,366
2	6,143	8,481	9,222	6,544
3	6,667	8,817	10,610	11,926
4	5,623	9,119	10,573	11,668
5	6,567	8,503	9,805	10,350
Média	6,251	8,750	10,054	11,320
Desvio Padrão	0,411	0,232	0,571	0,591

De notar que os valores do desvio padrão em percentagem encontram-se sempre abaixo dos 10%.

Araldite® 2015

Na Figura 45 estão representadas as curvas $P-\delta$ para as juntas com adesivo Araldite® 2015 para os vários valores de L_0 .

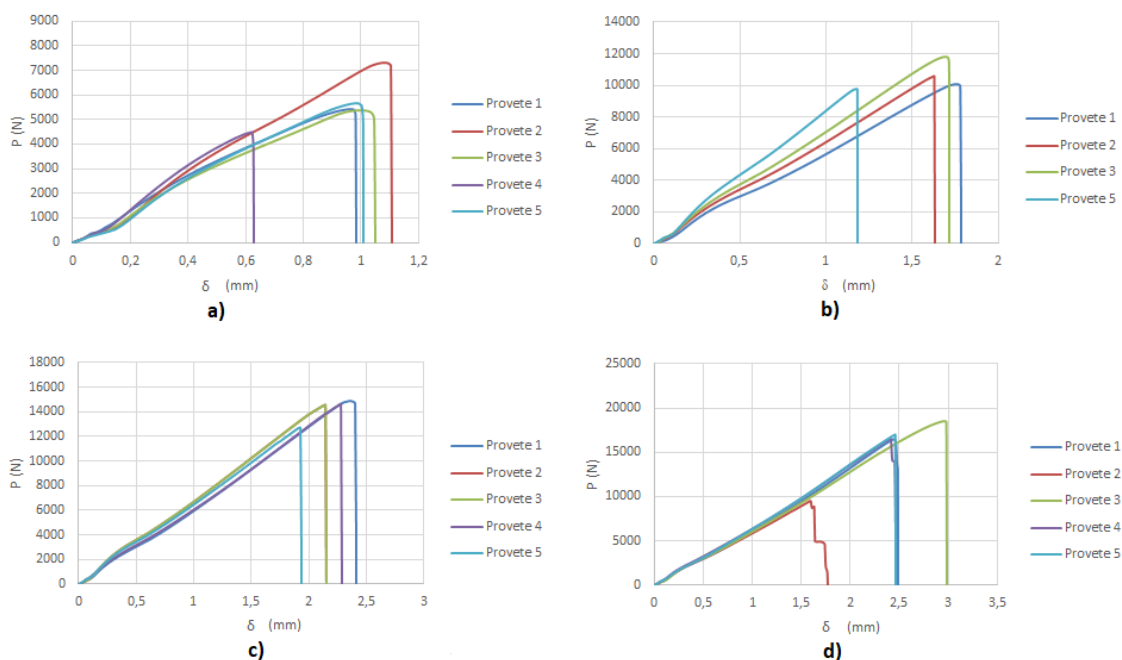


Figura 45 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente usando Araldite® 2015 com a) $L_0=12,5$ mm, b) $L_0=25$ mm, c) $L_0=37,5$ mm e d) $L_0=50$ mm

Na Tabela 8 podem-se visualizar os valores de $P_{\text{máx}}$ [kN] que foram obtidos experimentalmente.

Também se verifica um comportamento linear das juntas até à rotura para $L_0=12,5$ mm. Para os restantes, já se verifica plastificação dos substratos. As oscilações observadas nos outros ensaios também estão presentes nestes ensaios. Os valores não apresentados na tabela correspondem a provetes que foram desprezados.

Tabela 8 - Valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015

Provete \ L_0	12,5	25	37,5	50
1	5,405	10,069	14,869	16,442
2	7,311	10,594	14,530	9,478
3	5,381	11,785	14,530	18,539
4	4,498	-	14,635	16,627
5	5,679	9,748	12,717	17,066
Média	5,241	10,552	14,644	17,176
Desvio Padrão	0,440	0,771	0,143	0,821

Através da Tabela 8 pode-se ver que o aumento percentual dos valores da media são maiores e vão diminuindo com o aumento do valor de L_0 .

Sikaforce® 7752

Na Figura 46 estão representadas as curvas $P-\delta$ para as juntas com adesivo Sikaforce® 7752 para os vários valores de L_0 . Na Tabela 9 podem-se visualizar os valores de $P_{\text{máx}}$ [kN] que foram obtidos experimentalmente.

Devido à plasticidade que o adesivo possui, observou-se plastificação dos substratos para as juntas com $L_0 \geq 25$ mm. Tal como nos adesivos anteriores, e devido à rigidez elástica das juntas e questões de fixação dos provetes, são observadas algumas oscilações.

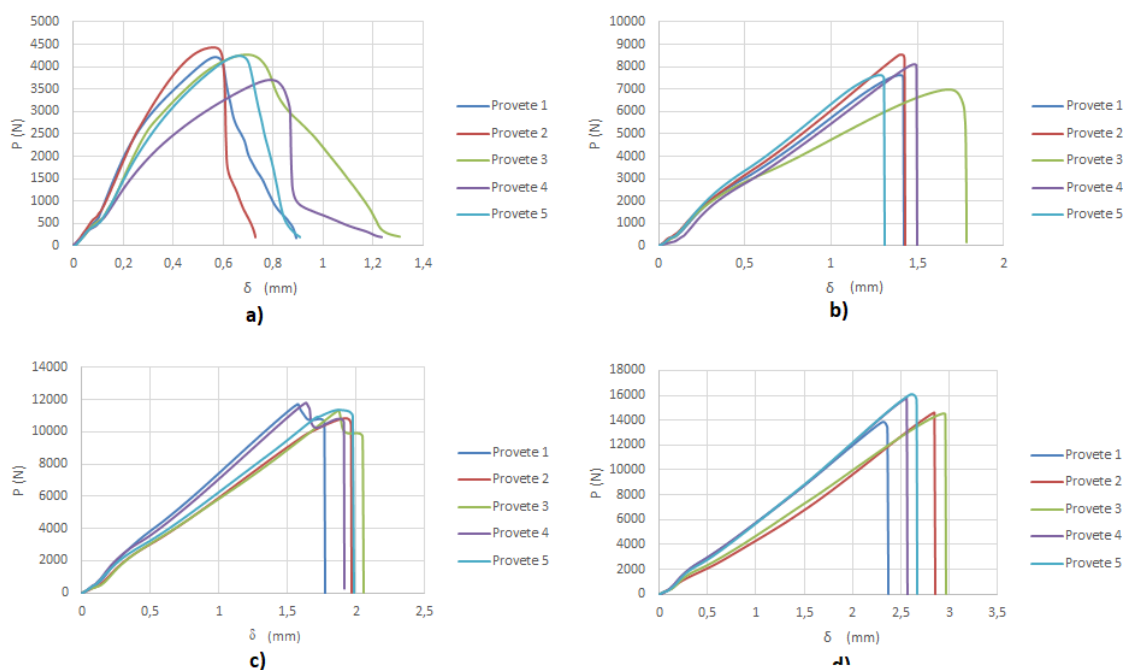


Figura 46 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente usando Sikaforce® 7752 com a) $L_0=12,5$ mm, b) $L_0=25$ mm, c) $L_0=37,5$ mm e d) $L_0=50$ mm

Tabela 9 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente para Sikaforce® 7752

Provete \ L_0	12,5	25	37,5	50
1	4,206	7,629	11,692	13,906
2	4,437	8,555	10,840	14,641
3	4,281	7,000	11,348	14,556
4	3,704	8,106	11,799	15,730
5	4,245	7,638	11,341	16,109
Média	4,185	7,793	11,401	14,992
Desvio Padrão	0,252	0,527	0,340	0,819

Para este adesivo, sendo um adesivo rígido, pode-se ver que o aumento do valor da média é inferior aos outros dois adesivos, que apresentam um crescimento maior na resistência consoante o valor de L_0 .

Na Tabela 10 são apresentados os valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] para os quatro comprimentos de sobreposição com os três tipos de adesivo.

Através da Tabela 10 pode-se verificar que todos os adesivos apresentaram um comportamento linear até a rotura, para todos os valores de L_0 .

Tabela 10 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] dos resultados experimentais

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Araldite® AV138	6,25	8,75	10,05	11,32
Araldite® 2015	5,24	10,54	14,64	17,16
Sikaforce® 7752	4,17	7,78	11,40	14,98

3.1.4.2 Modos de rotura

Neste subcapítulo são representados os modos de rotura obtidos para as juntas em degrau, após ensaio, para os três tipos de adesivos utilizados e para os quatro valores de L_0 . No trabalho experimental de Silva [1], pode-se observar através da Figura 47 que em todos os comprimentos de sobreposição para o adesivo Araldite® AV138, em todos os provetes, obteve-se roturas coesivas.

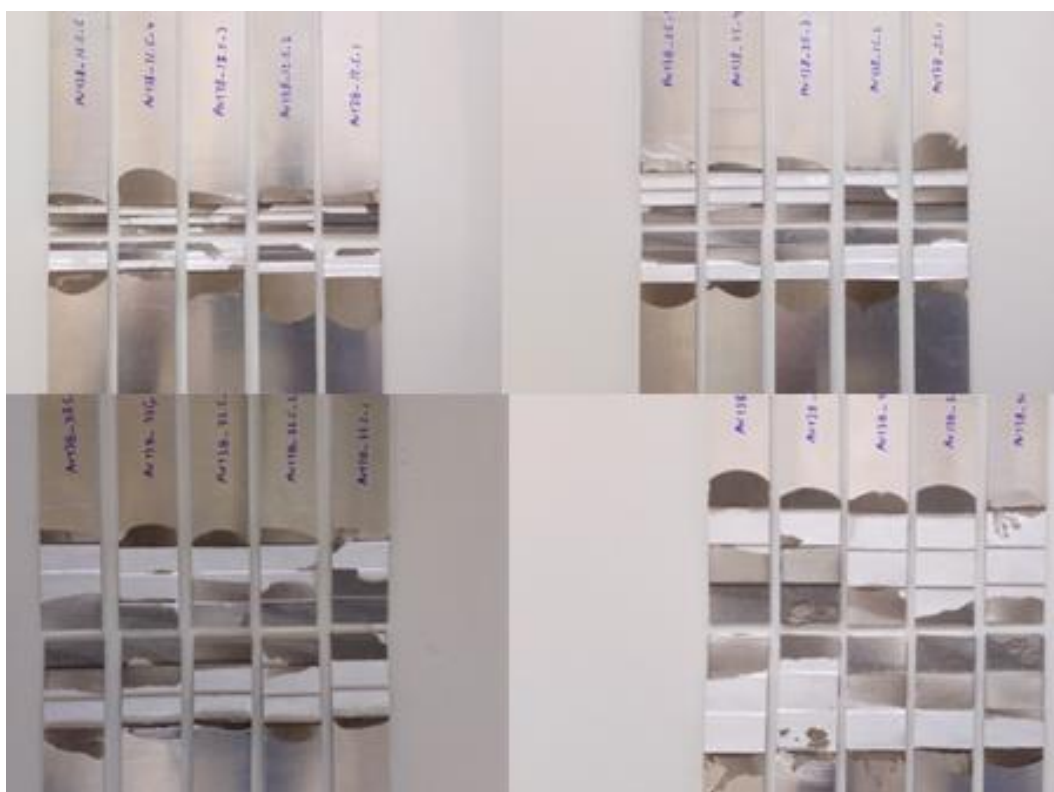


Figura 47 - Modos de rotura das juntas com Araldite® AV138

Nos ensaios com adesivo Araldite® 2015 obtiveram-se roturas coesivas e roturas pelo substrato, como se pode ver na Figura 48.



Figura 48 - Modos de rotura das juntas com Araldite® 2015

Na Tabela 11 estão apresentados os tipos de rotura para cada provete por valores de L_0 .

Tabela 11 - Roturas obtidas para o adesivo Araldite® 2015

Provede \ L_0	12,5	25	37,5	50
1	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva
2	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Substrato
3	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Substrato
4	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva
5	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva

Utilizando o adesivo Sikaforce® 7752 também se observa na Figura 49 que foram obtidas roturas coesivas e roturas pelo substrato.



Figura 49 - Modos de rotura das juntas com Sikaforce® 7752

Na Tabela 12 estão apresentados os modos de rotura para os quatro comprimentos de sobreposição para o adesivo Sikaforce® 7752.

Tabela 12 - Roturas obtidas para o adesivo Sikaforce® 7752

Provete\Lo	12,5	25	37,5	50
1	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva
2	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Substrato
3	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Substrato
4	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva
5	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva

3.1.4.3 Resistência das juntas

Na Figura 50 estão representados os valores médios e respectivos desvios padrão para os quatro comprimentos de sobreposição com os três adesivos, das juntas em degrau.

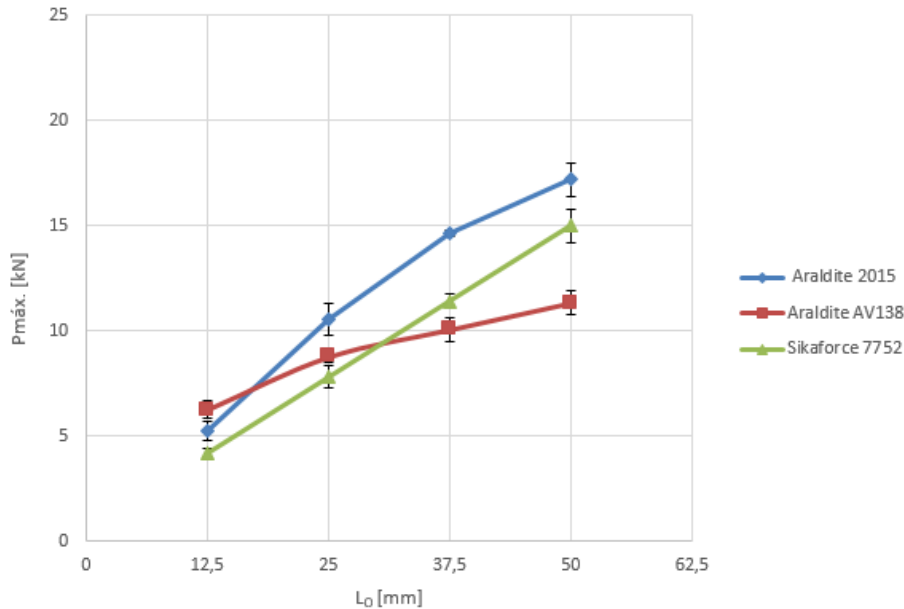


Figura 50 – Valores médios de $P_{máx}$ e respetivo desvio padrão em função de L_0 para os diferentes adesivos

Analisando a Figura 50 pode-se observar que o aumento da resistência das juntas de acordo com L_0 , é linear para o adesivo Sikaforce® 7752. Para o adesivo Araldite® AV138 o aumento da resistência da junta não é muito significativo. O adesivo Araldite® 2015 apresenta um valor intermedio para $L_0=12,5$ mm e valores muito elevados em L_0 superiores.

Tabela 13 - $P_{máx}$ e aumento percentual de $P_{máx}$ em função de L_0 para os três adesivos

	L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Araldite® AV138	$P_{máx}$ médio [kN]	6,25	8,75	10,05	11,32
	Aumento de $P_{máx}$ (%)	-	40	15	13
Araldite® 2015	$P_{máx}$ médio [kN]	5,24	10,55	14,64	17,17
	Aumento de $P_{máx}$ (%)	-	101	39	17
Sikaforce® 7752	$P_{máx}$ médio [kN]	4,17	7,78	11,40	14,98
	Aumento de $P_{máx}$ (%)	-	86	46	31

A Tabela 13 mostra os valores de $P_{m\acute{a}x}$ e o seu aumento em percentagem, por exemplo, para o Araldite® AV138, de $L_0=37,5$ mm para 50 mm, $P_{m\acute{a}x}$ aumentou 13%. O pequeno aumento de $P_{m\acute{a}x}$ no adesivo Araldite® AV138 deve-se à fragilidade do adesivo. Para o adesivo Araldite® 2015, observa-se que este apresenta um aumento percentual de 101% de $L_0=12,5$ mm para 25 mm até um valor nulo devido à plastificação dos substratos para valores de L_0 superiores. Também se observou um grande aumento percentual do adesivo Sikaforce® 7752 de $L_0=12,5$ mm para 25 mm, com cerca de 86%.

3.1.4.4 Análise dos resultados obtidos

A análise dos resultados obtidos mostra que o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ varia de acordo com o adesivo e o aumento de L_0 . O Araldite® AV138 é o adesivo que apresenta um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ menos acentuado. Pode-se observar que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ deste adesivo para $L_0=12,5$ mm é maior que o valor do adesivo Araldite® 2015 para o mesmo L_0 . Dos três adesivos, o Araldite® 2015 é o que apresenta um aumento mais acentuado, apesar de o Sikaforce® 7752, para $L_0=37,5$ mm, apresentar o maior valor de aumento percentual para o mesmo L_0 .

Os adesivos rígidos também apresentam bom desempenho em valores mais baixos de L_0 . Em cargas de arrancamento e clivagem, os adesivos dúcteis oferecem bons resultados. Conclui-se então que para valores baixos de L_0 o Araldite® AV138 é a melhor escolha, quando se pretende valores de L_0 superiores a 12,5 mm a escolha passa pelo Araldite® 2015. O Sikaforce® 7752 também pode ser escolhido pois apresenta um comportamento médio entre o Araldite® AV138 e o Araldite® 2015.

A plastificação ou rotura prematura dos substratos pode colocar um limite superior à resistência da junta, como foi observado neste estudo. A seleção do adesivo para uma junta deve ter em conta estes fatores.

3.2 Trabalho numérico

Neste capítulo pretende-se efetuar a previsão da resistência das juntas adesivas em degrau e comparar com os resultados experimentais. Começa-se por apresentar as condições de análise numérica, qual o modelo de dano utilizado e a análise de tensões nas juntas. Por fim, apresenta-se a comparação dos resultados numéricos com os experimentais.

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 juntas em degrau. Os substratos e os adesivos foram modelados como sólidos, como mostra a Figura 51.

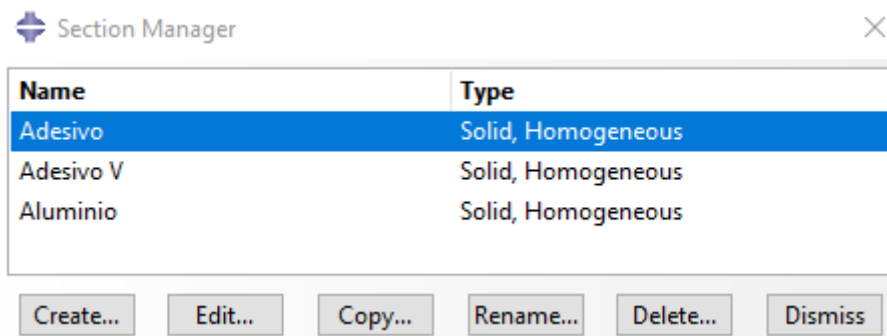


Figura 51 – Condições da análise numérica

A criação da malha, cujas dimensões variam ao longo da junta adesiva, foi uma tarefa que necessitou de uma definição cuidadosa. Como a zona colada está sujeita a concentrações de tensões utilizou-se uma malha mais refinada na camada adesiva. Na camada adesiva, a malha foi construída definindo o número de elementos em cada aresta vertical. Foi ainda aplicado um rácio de *bias* (rácio de refinamento) horizontalmente nos substratos com maior refinamento próximo da zona ligada. Este processo foi realizado no Abaqus® através da criação de sementes com espaçamentos pré-definidos, como se pode ver na Figura 52.

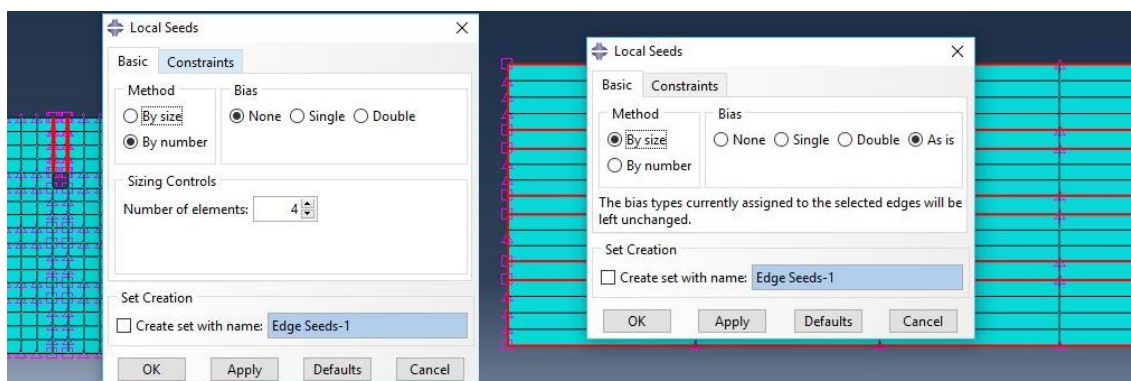


Figura 52 - Definição de sementes para criação da malha

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 [62].

Na Figura 53 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 e restrição aos deslocamentos verticais.



Figura 53 - Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos

3.2.2 Modelo de dano utilizado

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as tensões normais e de corte dos elementos fraturados. O dano e rotura são simulados no MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós reais e nós fantasma de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões máximas principais (MAXPS) ou das deformações máximas principais (MAXPE), enquanto as leis de tração-separação que simulam a degradação do material até à rotura podem ser lineares ou exponenciais. No Abaqus®, a iniciação de dano pode ser avaliada segundo vários critérios que são apresentados posteriormente.

Como extensão do método de EF, o MEFX é baseado na integração de funções de enriquecimento na formulação de EF, o que permite a modelação do salto de deslocamentos entre as faces da fenda que ocorre durante a propagação da mesma [69]. A expressão fundamental do vetor deslocamentos \mathbf{u} , incluindo o enriquecimento dos deslocamentos, é dada por [70]:

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^N N_i(\mathbf{x}) \left[\mathbf{u}_i + H(\mathbf{x}) \mathbf{a}_i + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(\mathbf{x}) \mathbf{b}_i^{\alpha} \right]. \quad (1)$$

$N_i(\mathbf{x})$ e \mathbf{u}_i correspondem às funções de forma nodais e ao vetor de deslocamento nodais, respetivamente. O termo $H(\mathbf{x}) \mathbf{a}_i$ só 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 [69].

Na presença de propagação de dano, o método estabelece nós fantasma que subdividem os elementos fraturados e simulam a separação entre subelementos recém-criados. A propagação da fenda ao longo de um trajeto arbitrário é possível através do uso dos nós fantasma que inicialmente têm as mesmas coordenadas que os nós reais e que estão completamente fixos aos nós reais até à iniciação do dano. A descontinuidade nos elementos é tornada possível pela adição de nós fantasmas

sobrepostos aos nós originais. Quando um elemento fratura, cada um dos dois subelementos será formado pelos nós reais e nós fantasmas. Estes dois subelementos, que têm campos de deslocamentos completamente independentes, substituem o elemento original. A partir deste ponto, cada par de nó real/fantasma do elemento fraturado separa de acordo com uma lei até à rotura e os nós reais e fantasmas ficam livres de se mover sem restrições, simulando o crescimento do dano (Figura 54) [69].

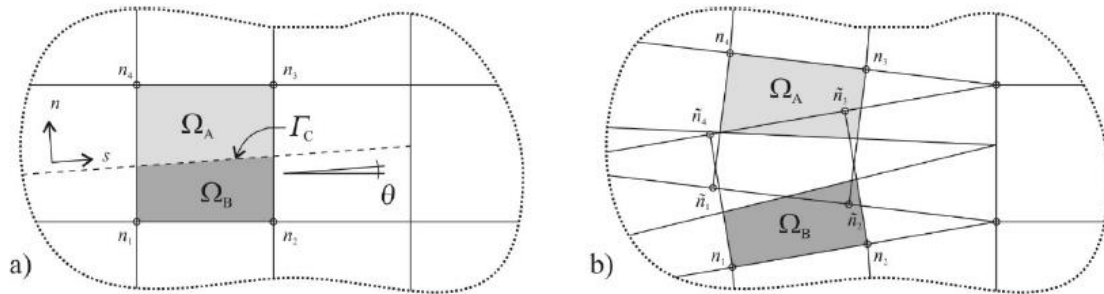


Figura 54 - Propagação do dano no MEFX utilizando o conceito de nós fantasmas: antes (a) e após a partição (b) de um elemento fraturado em subelementos [71].

3.2.3 Determinação das propriedades de dano

Para análise das juntas através do MEFX com recurso ao software Abaqus®, torna-se necessário conhecer os valores de E , G , G_{IC} , G_{IIC} , $\sigma_{m\acute{a}x}$ e $\epsilon_{m\acute{a}x}$, já que os critérios MAXPS e MAXPE utilizam o valor da tensão nominal máxima e deformação nominal máxima, respetivamente. 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 [72].

3.2.4 Análise de tensões na junta

Este subcapítulo apresenta a distribuição das tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) a meio da espessura do adesivo para as juntas em degrau, considerando os vários valores de L_0 , para melhor compreender as variações na resistência para as diferentes configurações de junta. Todas as distribuições de tensões estão normalizadas por τ_{med} , que representa a média dos valores de τ_{xy} na ligação adesiva para cada L_0 . As distribuições de tensões são apresentadas em função de x/L_0 ($0 \leq x \leq L_0$). Inicialmente são mostradas as diferenças na distribuição de tensões entre adesivos, como mostra a Figura 55 para as tensões σ_y (a) e τ_{xy} (b), considerando as juntas com $L_0=12,5$ mm. Não contabilizando a forma específica das curvas, que é abordada após esta análise é claro que maior rigidez aumenta os picos de tensão, especialmente nas arestas dos degraus. É sabido com Adams [73] no seu estudo para juntas de sobreposição simples e dupla, que as deformações começam pelas tensões dos substratos, o que leva ao desenvolvimento de maiores tensões consoante a rigidez do adesivo. Elevados picos

de tensão são propensos a afetar a resistência das juntas especialmente para adesivos frágeis, como o Araldite® AV138, porque estes adesivos não estão acomodados a estes picos [74].

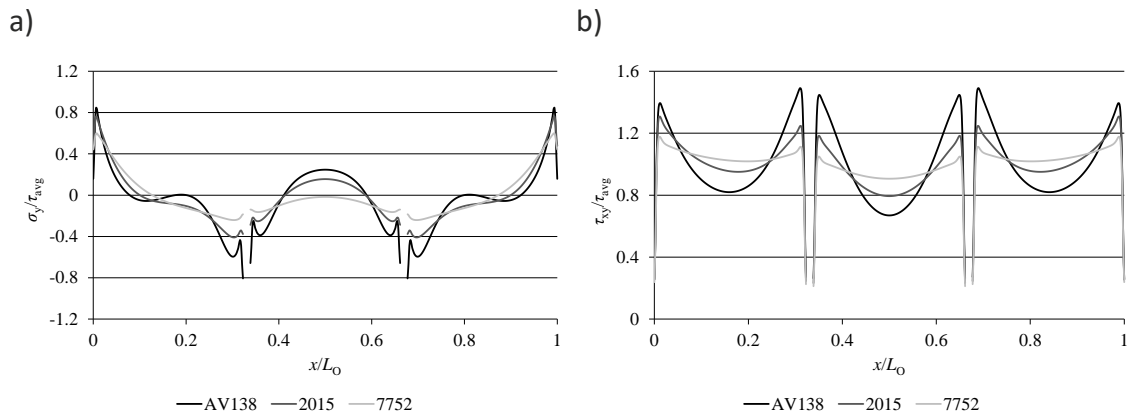


Figura 55 - Comparação das tensões σ_y (a) e τ_{xy} (b) entre os 3 adesivos para $L_0=12,5$ mm

Seguindo esta análise, a distribuição de tensões σ_y e τ_y é avaliada em função de L_0 .

A Figura 56 mostra a distribuição de tensões σ_y (a) e τ_{xy} (b) para o Araldite® 2015 com $12,5 \leq L_0 \leq 50$ mm. Apesar de a diferença nos picos de tensão entre os adesivos ser coerente com o que foi referido anteriormente, os resultados e conclusões que se seguem a respeito do efeito de L_0 nas tensões podem ser extrapolados para os outros dois adesivos neste estudo. Independentemente de L_0 , a tensão σ_y é muito menor que a tensão de corte média τ_{med} , com exceção dos degraus. O maior valor de tensão σ_y deu-se em $x/L_0=0$ e 1, e registaram-se tensões σ_y compressivas nas transições entre degraus em $x/L_0 \approx 0,33$ e $0,67$.

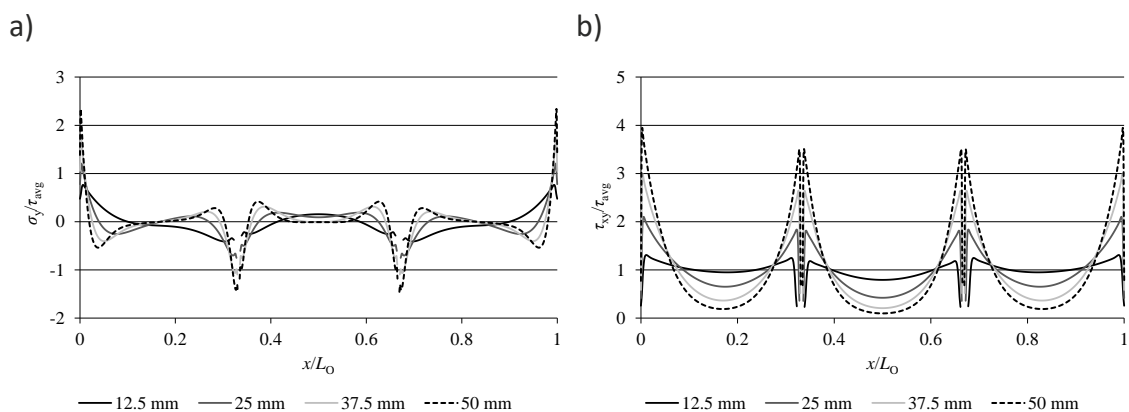


Figura 56 - Comparação das tensões σ_y (a) e τ_{xy} (b) do Araldite® 2015 em função de L_0

Se não forem contabilizadas as variações de tensão nos degraus, está-se perante o fenómeno que acontece nas JSS [75, 76], que é provocado pela rotação dos substratos que causa arrancamento das extremidades da ligação e comprime a zona intermédia

da mesma. A distribuição de tensões τ_{xy} , apresentada na Figura 56 (b), varia bastante entre os três degraus mas, no interior de cada degrau, revelou-se uma variação típica de JSS. De facto, em cada degrau é encontrada uma zona interior com tensão reduzida com picos de tensão nas extremidades [77]. Isto acontece devido à variação da deformação axial do substrato em cada degrau.

Portanto, a sobreposição de dois substratos em degrau e com comportamento oposto de deformação resulta em picos de tensão τ_{xy} em ambas as extremidades dos degraus. Entre os degraus, os degraus de fora têm uma magnitude ligeiramente maior de tensão τ_{xy} do que no degrau interno, embora esta variação não seja significativa [78]. Comparando os diferentes L_0 , é notório que os picos de tensão τ_{xy} aumentam progressivamente com o aumento deste parâmetro, o que é devido ao aumento dos gradientes da deformação axial dos substratos dentro de cada degrau para maiores L_0 .

Esta modificação no perfil de tensão ao longo de L_0 pode afetar severamente a resistência da junta se o adesivo for frágil. Neste caso, ocorre a rotura quando a tensão de rotura do adesivo for atingida no ponto mais carregado da ligação, que tipicamente ocorre nas suas extremidades. Isto não deve ser crítico na presença de adesivos dúcteis, porque estes sofrem plastificação quando é atingido o pico de tensão, e as forças transmitidas continuam a aumentar enquanto o limite de ductilidade do adesivo não for atingido [79]. Então, $P_{m\acute{a}x}$ não deve aumentar proporcionalmente com o aumento de L_0 , dado que tanto a tensão σ_y como a tensão τ_{xy} aumentam com L_0 . Este efeito deve ser mais visível usando adesivos frágeis.

3.2.5 Previsão da resistência

Neste capítulo são analisados e comentados os resultados obtidos pelo MEFX para os vários critérios de iniciação e propagação de dano. É feita também uma comparação dos resultados de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pelo MEFX com os resultados obtidos experimentalmente no trabalho de Silva [1]. Dos critérios de iniciação e propagação de dano utilizados, os critérios MAXPE e MAXPS baseiam-se apenas nas deformações e tensões principais máximas. Segundo estes critérios, a propagação da fenda segue uma direção ortogonal da direção da tensão/deformação principal na extremidade da fenda [16, 80] conforme mostra a Figura 57 - Exemplo da iniciação da fenda e respetiva propagação usando o critério MAXPS. Na impossibilidade de modelar a propagação do dano nestas condições, foi considerado que $P_{m\acute{a}x}$ corresponde ao início da fenda na camada adesiva.

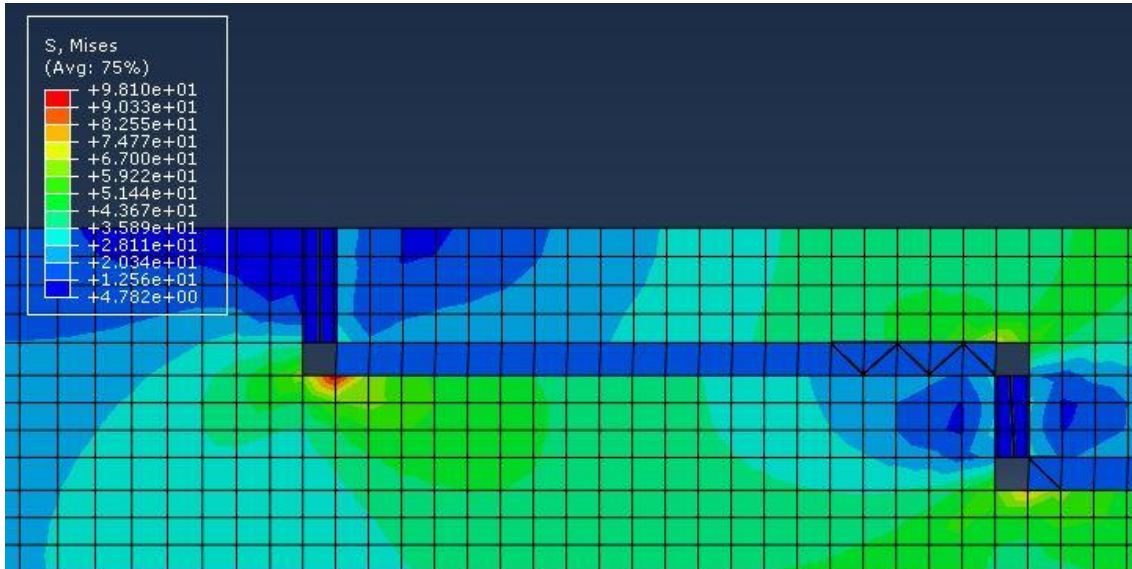


Figura 57 - Exemplo da iniciação da fenda e respetiva propagação usando o critério MAXPS

Os restantes critérios MAXS, QUADS, MAXE, e QUAD E permitem a escolha da direção de crescimento do dano, entre normal e paralela à direção local 1 e 2 dos EF enriquecidos que representam o adesivo, o que nos modelos numéricos corresponde a uma propagação horizontal (no alinhamento da camada adesiva) ou vertical, respetivamente, como consta na Figura 58.



Figura 58 - Seleção da direção de propagação de fenda

Para estes critérios, a direção de propagação da fenda foi definida como paralela à direção da camada do adesivo nas zonas horizontais dos degraus, e normal à direção da camada do adesivo nas zonas verticais do degrau, como se pode ver na Figura 59. Escolheu-se estas direções na tentativa de modelar o crescimento da fenda.

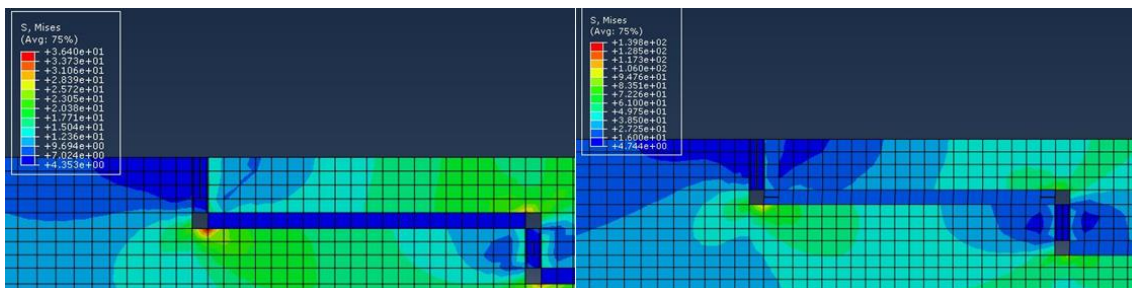


Figura 59 - Direções da propagação de fenda na junta em degrau

Então, os critérios usados no presente trabalho baseados nas tensões são MAXS, QUADS e MAXPS, e baseados nas deformações são MAXE, QUADE e MAXPE, para prever a resistência das juntas adesivas. Nos capítulos seguintes será analisada a viabilidade destes critérios por comparação com os resultados experimentais.

3.2.5.1 Estudo do critério de iniciação de dano

Neste capítulo é feita uma análise dos valores numéricos de $P_{\text{máx}}$ em cada adesivo em comparação com os resultados experimentais para os vários critérios de iniciação de dano.

3.2.5.1.1 Araldite® AV138

Para o estudo do critério de iniciação de fenda usando o Araldite® AV138 foram utilizados os valores de tensão e deformação apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros utilizados na análise MEFX para o adesivo Araldite® AV138

Araldite® AV138			
E [MPa]	4890	t_n^0 [MPa]	39,45
G [MPa]	1560	t_s^0 [MPa]	30,2
G_{IC} [N/mm]	0,2	$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]	1,21
G_{IIC} [N/mm]	0,38	ϵ_n^0 [%]	1,21
$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	39,45	ϵ_s^0 [%]	7,8

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

Na Figura 60 são apresentados os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos pelo MEFX para o adesivo Araldite® AV138, para os diferentes critérios e L_0 .

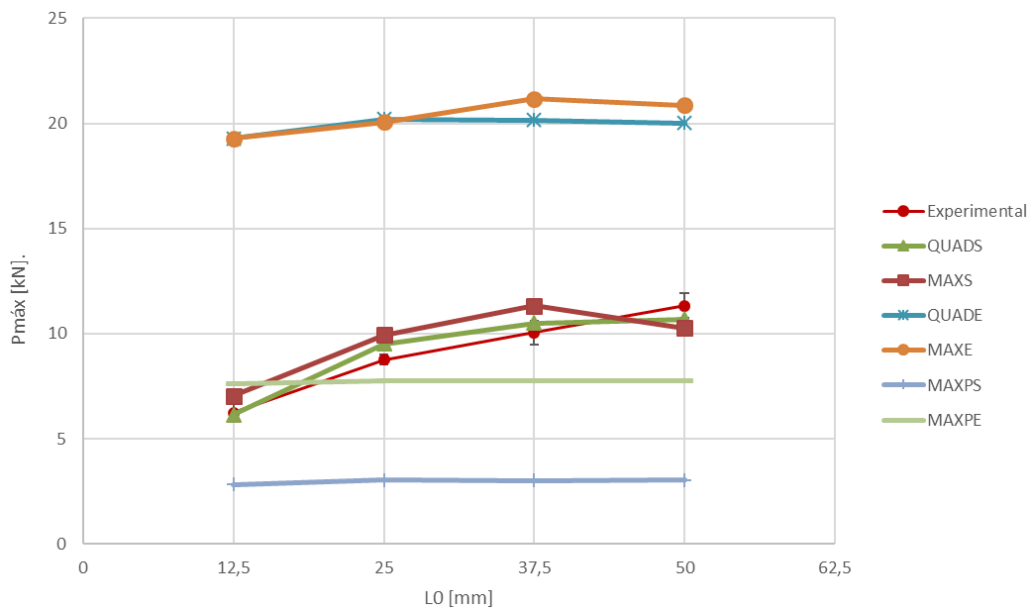


Figura 60 - Variação de $P_{máx}$ em função de L_0 para os diferentes critérios de iniciação de dano usando o adesivo Araldite® AV138

Para este adesivo verifica-se que os critérios baseados na tensão QUADS e MAXS são os que apresentam valores mais próximos dos experimentais. Nos restantes critérios (MAXPS, QUADE, MAXE e MAXPE) a diferença é maior, dos quais os critérios MAXPS e MAXPE apresentam na generalidade das geometrias das juntas resultados muito inferiores ao experimental. Para o critério MAXS, a diferença máxima de $P_{máx}$ entre os resultados experimentais e os resultados obtidos pelo MEFX para o adesivo Araldite® AV138 foi de 13%, para $L_0=12,5$ mm. Para o critério QUADS, a diferença de $P_{máx}$ para o mesmo L_0 foi de -1%. Relativamente aos critérios MAXE e QUADE, a diferença é substancialmente maior, com uma diferença máxima de 209% para ambos, obtida para $L_0=12,5$ mm. Os valores elevados destes critérios estão relacionados com o dano e a rotura serem governados pelas deformações limite dos adesivos em vez das suas tensões. Nos critérios MAXPS e MAXPE verifica-se que os resultados obtidos são tipicamente muito abaixo do esperado, e semelhantes seja qual for o L_0 . Os desvios máximos destes critérios são de -73% e -31%, respetivamente, em ambos os casos para $L_0=50$ mm. Estes critérios apresentam por defeito valores muito baixos porque as tensões e deformações limite são atingidas rapidamente nas zonas de concentração de tensões e deformações, e porque é considerada a carga máxima quando se inicia a propagação da fenda.

3.2.5.1.2 Araldite® 2015

Para o estudo do critério de iniciação de fenda usando o Araldite® 2015 foram utilizados os valores de tensão e deformação apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros utilizados na análise MEFX para o adesivo Araldite® 2015

Araldite® 2015			
E [MPa]	1850	t_n^0 [MPa]	21,63
G [MPa]	650	t_s^0 [MPa]	17,9
G_{IC} [N/mm]	0,43	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ [%]	4,77
G_{IIC} [N/mm]	4,7	ϵ_n^0 [%]	4,77
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	21,63	ϵ_s^0 [%]	43,9

Para o critério de iniciação de fenda na camada adesiva, nos critérios baseados nas tensões (MAXPS, MAXS e QUADS) foram usados valores das propriedades $\sigma_{m\acute{a}x}$, t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} do Araldite® 2015, enquanto para os critérios de deformação (MAXPE, MAXE e QUAE) foram usados os valores de $\epsilon_{m\acute{a}x}$, ϵ_n^0 , ϵ_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} do Araldite® 2015.

Tal como para o adesivo anterior, são apresentados na Figura 61 os resultados obtidos pelo MEFX para o adesivo Araldite® 2015 e para os diferentes critérios, em comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

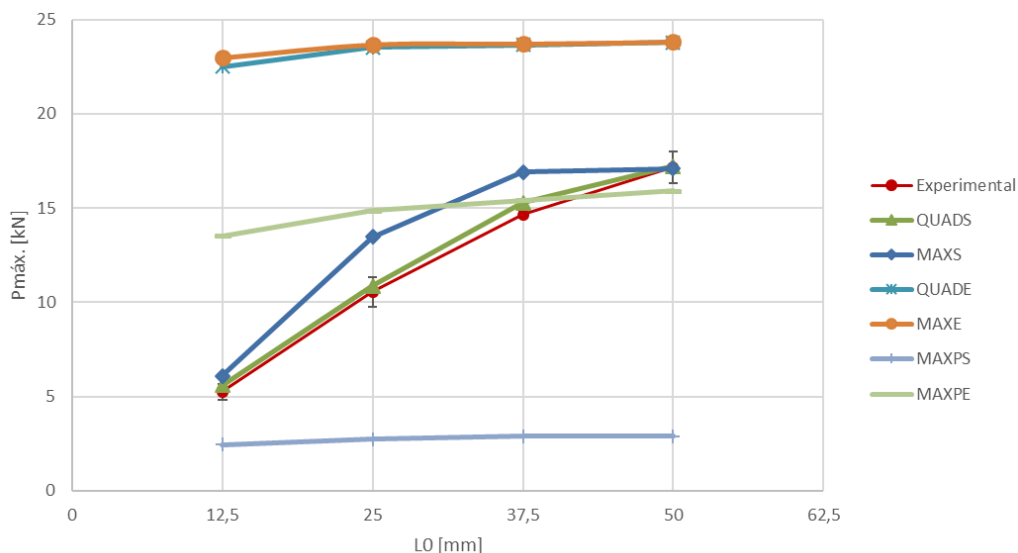


Figura 61 - Variação de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os diferentes critérios de iniciação de dano usando o adesivo Araldite® 2015

Para este adesivo o critério que mais se aproximou dos valores experimentais foi o QUADS. A diferença máxima de $P_{m\acute{a}x}$ entre os resultados experimentais com os resultados obtidos pelo MEFX para o adesivo Araldite® 2015 com $L_0=12,5$ mm foi de apenas 7% para o critério QUADS. Já no critério MAXS a diferença máxima foi de 28% para $L_0=25$ mm. Os critérios MAXE e QUADE apresentam uma diferença máxima de 338% e 329%, respetivamente, em ambos os casos para $L_0=12,5$ mm. Em relação ao critério MAXPS, verifica-se uma vez mais que os valores obtidos são muito inferiores comparativamente com os valores experimentais, sendo que a diferença máxima foi de -83%, para $L_0=50$ mm. 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 MAXPE, a diferença máxima para os resultados experimentais foi de 158%, para $L_0=12,5$ mm.

3.2.5.1.3 Sikaforce® 7752

Para o estudo do critério de iniciação de fenda usando o Sikaforce® 7752 foram utilizados os valores de tensão e deformação os valores apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Parâmetros utilizados na análise MEFX para o adesivo Sikaforce® 7752

Sikaforce® 7752			
E [MPa]	493	t_n^0 [MPa]	11,49
G [MPa]	187	t_s^0 [MPa]	10,17
G_{IC} [N/mm]	2,36	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ [%]	19,18
G_{IIC} [N/mm]	5,41	ϵ_n^0 [%]	19,18
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	11,49	ϵ_s^0 [%]	54,82

Os parâmetros utilizados para os critérios MAXPS, MAXS, QUADS, MAXPE, MAXE e QUADE foram os mesmos, usando os valores da tabela do Sikaforce® 7752.

Na Figura 62 são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pelo MEFX para o adesivo Sikaforce® 7752, para os diferentes critérios e L_0 . De salientar que os valores obtidos pelo critério MAXS estão praticamente sobrepostos com os valores experimentais, já o critério QUADS tem algumas diferenças em L_0 maiores.

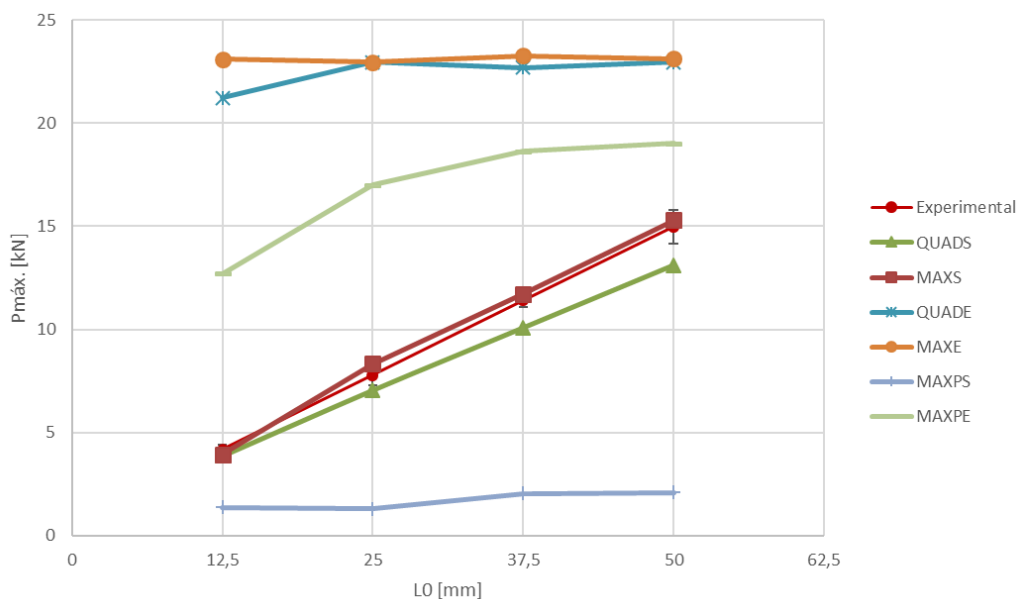


Figura 62 - Variação de $P_{máx}$ em função de L_0 para os diferentes critérios de iniciação de dano usando o adesivo Sikaforce® 7752

O valor máximo da variação de $P_{máx}$ usando o critério MAXS foi obtido para $L_0=25$ mm, com 7% de diferença. Para o critério QUADS a variação máxima foi de -13%, para $L_0=50$ mm. No caso dos critérios MAXE e QUADE verifica-se que $P_{máx}$ praticamente não varia com L_0 e apresenta valores muito superiores aos experimentais (diferenças de 454% e 409%, respetivamente, em ambos os casos para $L_0=12,5$ mm). O critério MAXPS também não varia muito com L_0 mas, contrariamente aos MAXE e QUADE, apresenta valores muito baixos com uma diferença máxima relativamente aos resultados experimentais de -86% ($L_0=50$ mm). O critério MAXPE mostra uma grande variação de $P_{máx}$ entre $L_0=12,5$ mm e 25 mm, mas depois tende a manter valores constantes. Por outro lado, apresenta grandes diferenças para os resultados experimentais, cuja diferença máxima é de 204%, para $L_0=12,5$ mm.

Os resultados obtidos mostram que o MEFX é bastante preciso na previsão de resistência de juntas em degrau utilizando os critérios MAXS e QUADS, tanto para adesivos frágeis como para adesivos dúcteis. Os critérios MAXE e QUADE encontram-se sempre bastante acima dos resultados experimentais, e o critério MAXPS sempre abaixo dos mesmos, independentemente de L_0 . O critério MAXPE apresenta valores de $P_{máx}$ mais próximos dos experimentais, embora com diferenças ainda significativas para os mesmos, uma vez que a evolução de $P_{máx}$ com L_0 não é coerente com a observada experimentalmente.

3.2.5.2 Estudo do critério de propagação de dano

Relativamente ao estudo do efeito da lei de propagação de dano foram considerados três expoentes diferentes do critério de energia *power law* (0,5;1 e 2) como se pode

ver na Figura 63 em modo linear e exponencial. Para o efeito foi utilizado o critério QUADS, por este ter apresentado valores mais próximos dos experimentais no estudo anterior.

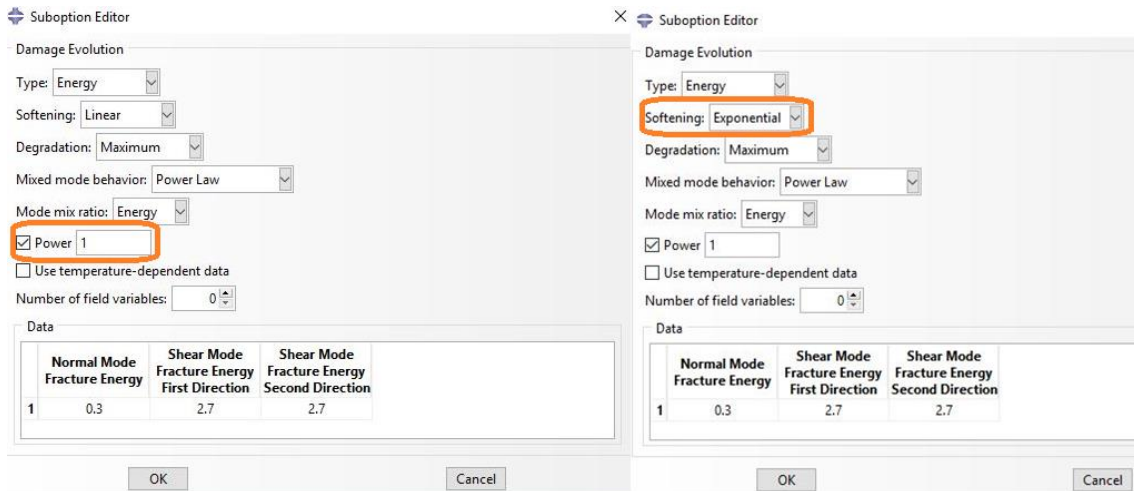


Figura 63 - Parâmetros usados para o estudo da propagação de fenda

3.2.5.2.1 Araldite® AV138

Na Figura 64 são apresentados os resultados do MEFX e diferenças de $P_{m\acute{a}x}$ para os diferentes critérios de propagação de fenda para o adesivo Araldite® AV138.

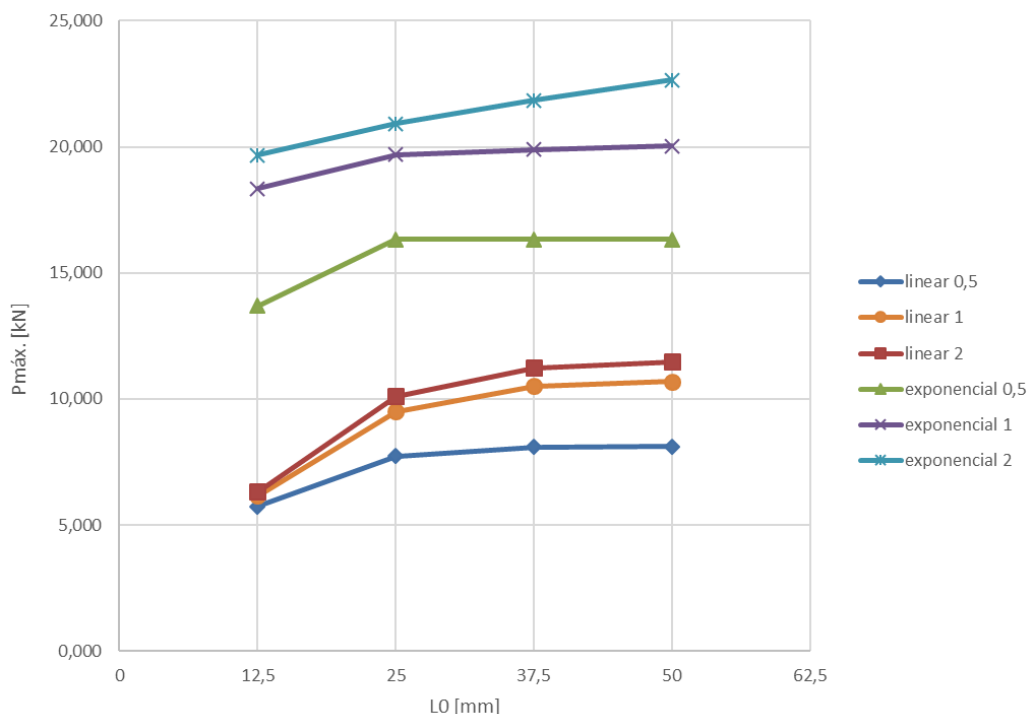


Figura 64 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e previsões numéricas das leis linear e exponencial para as juntas com o adesivo Araldite® AV138 em função de L_0

Pode-se verificar que a lei de propagação exponencial sobrestima os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os três valores de *power*. Foi registado o maior valor de $P_{m\acute{a}x}$ para exponencial *power*=2 com um aumento percentual de 219% relativamente ao modelo linear com *power*=1. Os valores da propagação linear têm tendência a aumentar de acordo com o *power* tendo praticamente o mesmo valor em $L_0=12,5$ mm.

3.2.5.2.2 Araldite® 2015

O mesmo acontece neste adesivo, já que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ são sobrestimados pela lei de propagação exponencial para os três valores de *power*, como se pode ver na Figura 65.

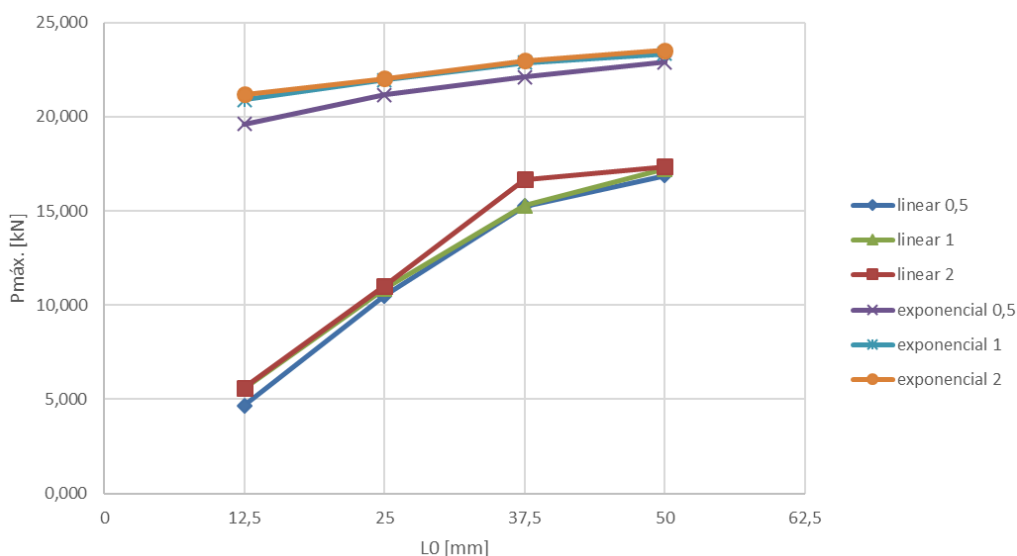


Figura 65 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e previsões numéricas das leis linear e exponencial para as juntas com o adesivo Araldite® 2015 em função de L_0

Os valores da propagação linear neste adesivo já são mais coerentes mantendo-se praticamente sem variar nos três valores de *power* para os vários L_0 . Como já foi observado para o Araldite® AV138, com o Araldite® 2015 a lei de propagação exponencial apresenta uma diferença percentual máxima de 251%, 274% e 279% para *power*=0,5, *power*=1 e *power*=2, respetivamente.

3.2.5.2.3 Sikaforce® 7752

No que diz respeito ao Sikaforce® 7752 pode-se ver na Figura 66 que os valores das leis de propagação de fenda neste adesivo são equilibrados.

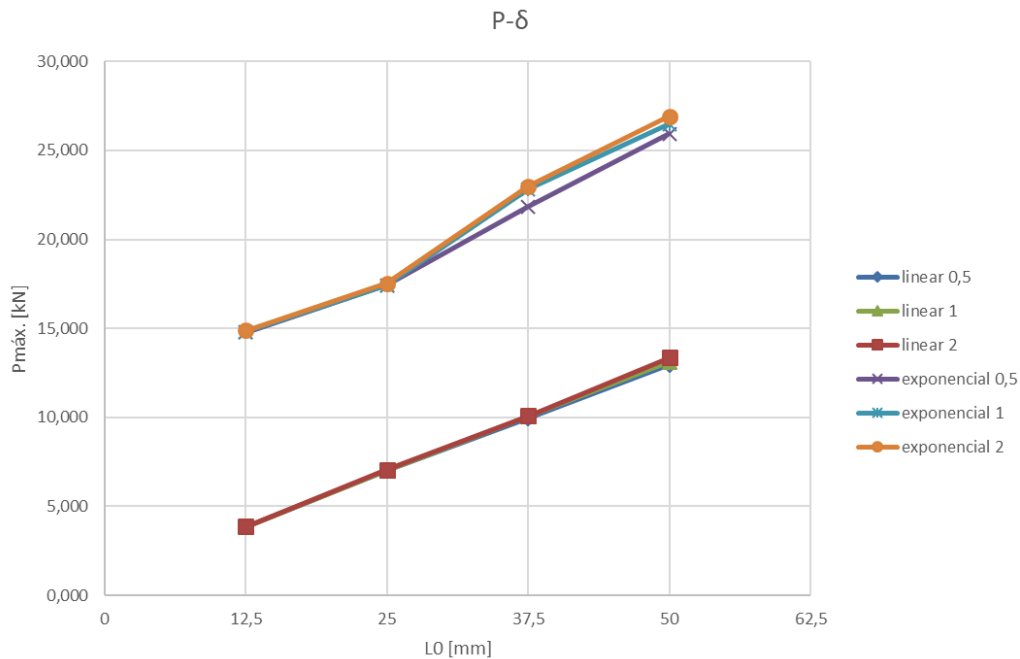


Figura 66 - Valores de $P_{máx}$ experimentais e previsões numéricas das leis linear e exponencial para as juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 em função de L_0

Em relação aos valores apresentados no gráfico, observa-se que os valores de $P_{máx}$ para os três valores, 0,5, 1 e 2 são praticamente os mesmos, ou seja, a variação é quase nula. Isto acontece devido à ductilidade do adesivo, já que nestas condições a zona de dano estende-se por um comprimento maior na camada de adesivo. O mesmo acontece na lei exponencial, apesar desta lei sobrestimar os valores de $P_{máx}$, registando-se uma diferença percentual máxima de 284% para $power=0,5$ e $power=1$, e 287% para $power=2$.

3.2.6 Análise dos resultados obtidos

Como foi visível em todos os gráficos de comparação das leis linear e exponencial, pode-se afirmar que a lei de propagação de dano exponencial apresenta sempre valores muito superiores aos valores reais, enquanto a lei linear apresenta valores muito mais próximos. Foi analisado também que a resistência varia de acordo com o valor do $power$. Resumindo, para uma melhor análise e mais aproximada dos valores reais de resistência das juntas em degrau, deve-se utilizar a lei linear de propagação de dano. Em termos do critério de iniciação de dano, já referido anteriormente, conclui-se que os critérios que aparentam ser mais viáveis são o QUADS e MAXS.

3.2.7 Comparação da resistência obtida com juntas de sobreposição simples e dupla

Neste capítulo é feita uma análise gráfica comparando os valores de resistência obtidos experimentalmente em juntas sobreposição simples e dupla, com os valores obtidos experimentalmente na presente dissertação para as juntas em degrau.

3.2.7.1 Araldite® AV138

Na Figura 67 são apresentados os valores obtidos de P_{\max} em função de L_0 para o adesivo Araldite® AV138.

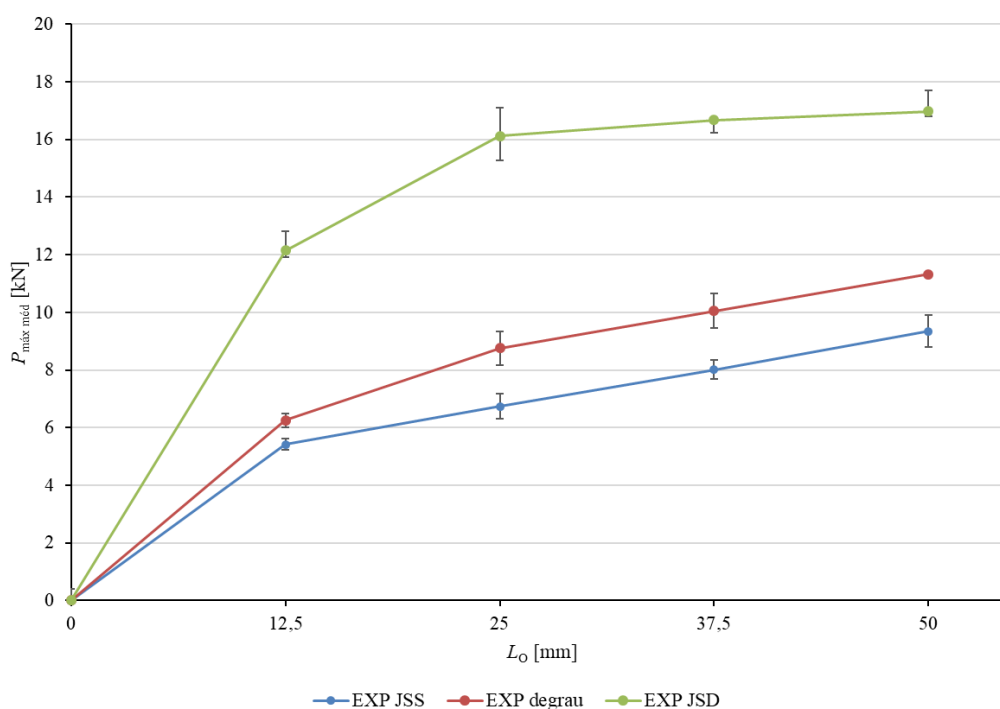


Figura 67 - P_{\max} em função de L_0 para o Araldite® AV138: JSS, JSD e juntas em degrau

Ao observar o gráfico pode-se ver que os resultados para as juntas em degrau encontram-se entre os resultados das JSS e JSD obtidos experimentalmente, ou seja, as juntas em degrau com Araldite® AV138 apresentam uma resistência superior às JSS e inferior às JSD. Em termos de percentagem, para $L_0=12,5$ mm a junta em degrau apresenta 15% mais de resistência em relação à JSS e -49% à JSD. Com o aumento de L_0 , a diferença entre a JSS e as juntas em degrau mantém-se com valores próximos (diferença de 21% para $L_0=50$ mm). Por outro lado, a diferença para a JSD tende a diminuir, e chega a uma redução de 33% para $L_0=50$ mm. O comportamento superior das juntas em degrau relativamente às JSS é notório, e ocorre uma vez que as distribuições de tensões das juntas em degrau são mais favoráveis na medida em que há menos gradientes de tensões. Como o adesivo Araldite® AV138 é frágil, a resistência da junta é bastante afetada pelos picos de tensões.

3.2.7.2 Araldite® 2015

Na Figura 68 são apresentados os valores obtidos de $P_{\text{máx}}$ para as juntas em degrau em função de L_0 para o adesivo Araldite® 2015 e respetiva comparação com as JSS e JSD.

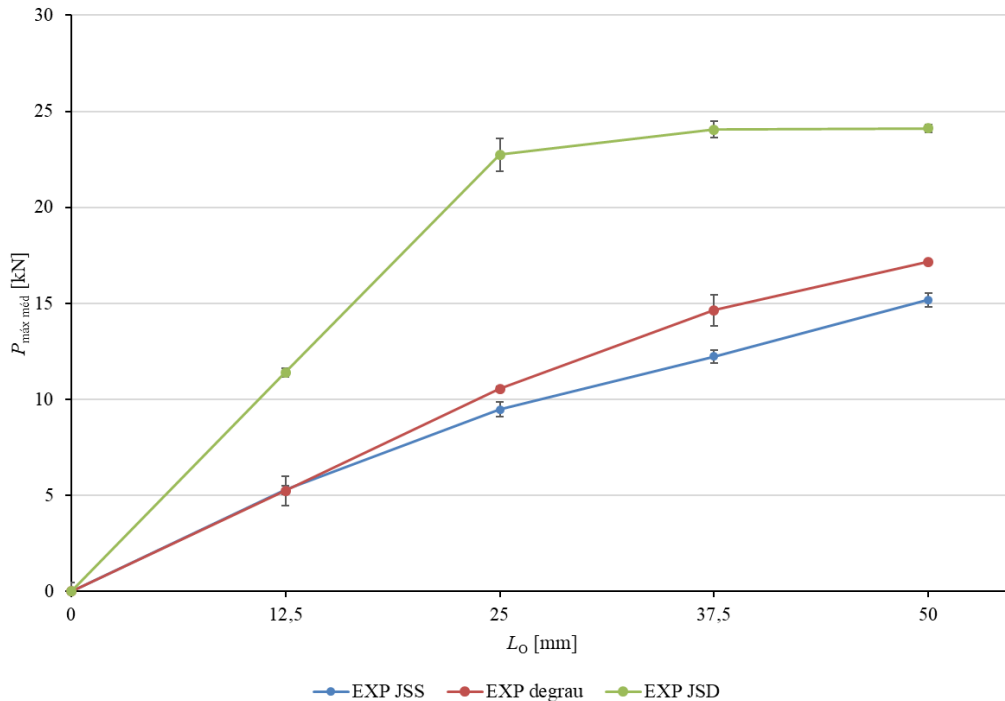


Figura 68 - $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 para o Araldite® 2015: JSS, JSD e juntas em degrau

Através do gráfico pode-se dizer que, para o adesivo Araldite® 2015, observou-se um comportamento mais linear em função de L_0 para as JSS e juntas em degrau. No entanto, para este adesivo a diferença entre estas duas configurações de junta não é tão significativa como para o adesivo anterior, uma vez que este adesivo, devido à sua ductilidade moderada, já não é tao afetado pelos picos de tensões das JSS. A diferença de $P_{\text{máx}}$ das juntas em degrau para a JSS para $L_0=12,5$ mm é de apenas 1% e de -54% para as JSD. À medida que aumenta L_0 , a diferença para a JSD aumenta gradualmente, e atinge 13% para $L_0=50$ mm. A comparação com a JSD mostra também um ligeiro aumento, que atinge -59% para $L_0=50$ mm.

3.2.7.3 Sikaforce® 7752

Como nos outros adesivos, a Figura 69 apresenta os resultados obtidos de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 para o adesivo Sikaforce® 7752 para juntas em degrau e comparação com os resultados experimentais de JSS e JSD.

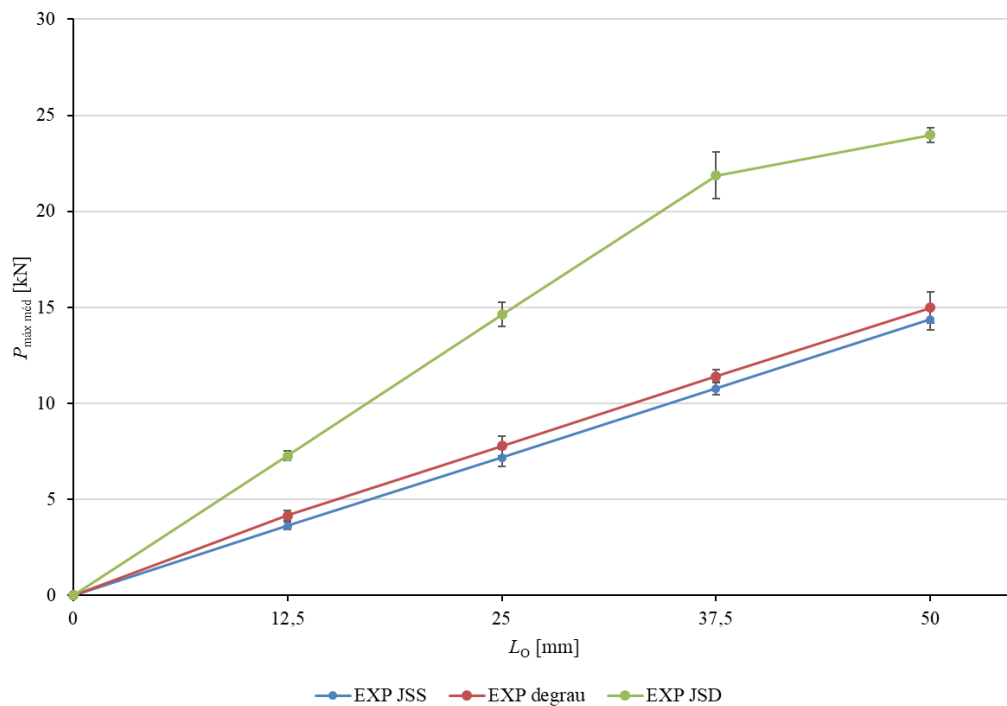


Figura 69 - P_{\max} em função de L_0 para o Sikaforce® 7752: JSS, JSD e juntas em degrau

Para este adesivo verifica-se que os resultados são diferentes dos outros dois adesivos, na medida em que os resultados das juntas em degrau se encontram bastante próximos das JSS, o que se justifica devido a este ser um adesivo de grande ductilidade, pelo que as distribuições de tensões mais favoráveis para as juntas em degrau não têm tanto efeito na resistência das juntas. Fazendo uma análise ao gráfico observa-se que para $L_0=12,5$ mm a diferença de P_{\max} é de 15% para as JSS e de -43% para as JSD. Já para $L_0=50$ mm a diferença é de 4% e -37% para JSS e JSD, respetivamente.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho passou por realizar um estudo numérico usando o MEFX no *software* Abaqus® para prever a resistência de juntas em degrau utilizando vários L_0 e três tipos de adesivos, tanto rígidos e frágeis como flexíveis e dúcteis. Os adesivos utilizados foram o Araldite® AV138, o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752. Foi feita uma comparação dos resultados obtidos por MEFX com os resultados experimentais obtidos no trabalho de Silva [1] e também foi feita uma comparação com JSS e JSD. Como se viu anteriormente, os resultados obtidos experimentalmente 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 fragilidade o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ é reduzido. Nos resultados obtidos consta que o adesivo Araldite® AV138 apresentou um valor de $P_{m\acute{a}x}$ superior ao do adesivo Araldite® 2015 para $L_0=12,5$ mm. Isto acontece porque, para valores baixos de L_0 , as distribuições de tensões são constantes ao longo da camada adesiva. Desta forma, um adesivo frágil pode apresentar um valor de resistência próximo a um adesivo dúctil. O adesivo Araldite® 2015 apresentou um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ superior ao Araldite® AV138 pois, para L_0 maiores que 25 mm, as distribuições de tensões apresentam maiores gradientes de tensão. Em relação ao adesivo Sikaforce® 7752, este apresentou maior resistência do que o Araldite® AV138 para $L_0>25$ mm, mas mesmo assim abaixo dos valores do Araldite® 2015. Resumindo, o adesivo com melhor comportamento geral foi o Araldite® 2015 mas, para $L_0<25$ mm a escolha deveria passar pelo Araldite® AV138 e, para $L_0\geq 25$ mm, devia ser utilizado o Sikaforce® 7752.

Em relação ao trabalho numérico realizado pelo MEFX, inicialmente foi feito um estudo das distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} na camada adesiva por EF, que permitiu uma justificação do comportamento das juntas em degrau. Os resultados mostraram que é possível prever a resistência das juntas com precisão usando os critérios QUADS e MAXS. Pôde-se verificar isto com os valores da diferença de $P_{m\acute{a}x}$, onde a diferença máxima obtida foi de 15% para o adesivo Sikaforce® 7752 com $L_0=12,5$ mm em comparação às JSS. Os critérios MAXE e QUAD E sobrestimaram muito os valores experimentais e numéricos de $P_{m\acute{a}x}$ nos três adesivos.

Os critérios MAXPS e MAXPE mostraram não ser adequados, devido à diferença máxima de $P_{m\acute{a}x}$ entre os resultados obtidos por MEFX e os experimentais, sendo -80% independentemente do adesivo e de L_0 usando o MAXPS. Este critério apresenta

valores muito baixos devido às tensões limite serem atingidas muito rapidamente, uma vez que se considerou que a carga máxima é atingida quando se inicia a propagação de fenda. Para o critério MAXPE, a diferença maior foi de 204% para $L_0=12,5$ mm no Sikaforce® 7752. 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 expoente $power=1$ é o que apresenta melhores resultados, quando utilizado em adesivos frágeis. Para os adesivos dúcteis, a influência do parâmetro do critério energético de propagação de dano é menor, pelo que os três valores (0,5; 1 e 2) apresentam previsões idênticas de $P_{m\acute{a}x}$.

Em comparação com as juntas de sobreposição simples e dupla, observou-se que $P_{m\acute{a}x}$ das juntas em degrau é ligeiramente superior comparativamente às JSS e bastante inferior às JSD.

O MEFX revelou ser adequado para previsão da resistência das juntas utilizando os critérios QUADS e MAXS, onde apresenta resultados bastante precisos. Concluindo, foi possível determinar e avaliar as potencialidades do MEFX na previsão da resistência de juntas em degrau e proporcionar uma indicação sobre o comportamento dos diferentes tipos de adesivos.

Para trabalhos futuros poderia ser estudado o comportamento de juntas em degrau pelo MEFX considerando uma análise tridimensional, com adesivos de propriedades marcadamente distintas e a consideração de outras geometrias de juntas.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Silva, J.O.S., *Estudo de juntas adesivas em degrau: análise experimental e numérica por modelos de dano coesivo*. N.A., Tese de mestrado em Engenharia Mecânica, ramo de Construções mecânicas, tese em curso. Instituto Superior de Engenharia do Porto.: Porto.
2. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto: Publindústria.
3. Tong, L. and G.P. Steven, *Analysis and design of structural bonded joints*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
4. Carneiro, M.A.S., *Estudo experimental e numérico de juntas adesivas em T com aderentes de alumínio*. 2016, ISEP.
5. Petrie, E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2000, New York: McGraw-Hill.
6. Adams, R.D., *Adhesive bonding*. Ciencia, technology and applications, 2005.
7. Neto C, S.J., Moreira J, da Silva M, Afonso R, Veiga V. , *Projecto FEUP: Adesivos estruturais em automóveis*. 2010.
8. Worlton, D.C., *Experimental Confirmation of Lamb Waves at Megacycle Frequencies*. Journal of Applied Physics, 1961. **32**: p. 967-971.
9. Hart-Smith, L.J., *Aerospace*. Adhesive bonding: Science, technology and applications. 2005, Woohed Publishing Limited: Cambridge England.
10. da Silva, L.F.M., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*. 2011: Springer.
11. Andrade, B.C.P., *Modos de Carregamento. Modos de Rotura. Tipos de Junta*. ISEP.
12. Teixeira, J.M.D., *Modelação numérica dos ensaios DCB e TDCB para determinação da tenacidade em tração de adesivos estruturais*, in *Tese de Mestrado*. 2016, ISEP: Porto.
13. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*, in *Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial*. 2007, Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia do Porto.
14. Xará, J.T.S., *Previsão da resistência de juntas adesivas em L entre alumínio e material compósito pelo Método de Elementos Finitos Extendido (mefx)*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2016, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
15. Ebnesajjad, S., *Adhesive Technology Handbook*, ed. W. Andrew. 2008.
16. Santos, T.F., *Aplicação do Método de Elementos Finitos Extendido (MEFX) para a previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição dupla*. 2016, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.

17. Constante, C.J., *Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais*. 2014, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
18. Lucas F.M. da Silva, A.G.d.M., Marcelo F. S. F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007: Publindústria.
19. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. 1938. **15**: p. 41-47.
20. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of Strain Analysis 1974. **9**: p. 185-196.
21. Harris, J.A. and R.D. Adams, *Strength prediction of bonded single-lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion & Adhesives 1984. **4**: p. 65-78.
22. Sosa, J.L.C. and K. N., *Delamination modeling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology 2012. **72**: p. 788-791.
23. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics, 1944. **66**: p. 17-27.
24. Panigrahi, S.K. and B. Pradhan, *Free 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.
25. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bull Seism Soc of America, 1959. **49**: p. 199-204.
26. 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.
27. I., B.G., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics 23, 1959: p. 622-636.
28. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 8, 1960: p. 100-104.
29. Campilho, R.D.S.G., M.C. Guilherme Viana, and F.M. da Silva, *Parameter identification in Cohesive Zone Modelling*.
30. Ribeiro, N.F.Q.R., *Efeito de alterações geométricas na resistência de juntas de sobreposição*. 2012, ISEP.
31. C.D.M., L., C. A.D., and W. M.A. A. I.A, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. Int. J. Fract 2006. **141**: p. 147-161.
32. Tsai, M.Y. and J. Morton, *The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints*. Composite Structures, 1995. **32(1)**: p. 123-131.
33. Kattan, P.I.a.G.Z.V., *Damage mechanics with finite elements: practical applications with computer tools*. Springer Science & Business Media, 2012.
34. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**: p. 955-979.
35. Wahab, M.M.A., et al., *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**: p. 763-781.

36. 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**: p. 981-994.
37. 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**: p. 1146-1158.
38. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method for Fracture Analysis of Structures*. 2008, New Jersey: Blackwell Publishing.
39. 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.
40. Campilho, R.D.S.G., et al., *extended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**: p. 1543-1549.
41. Chaves, F.J.P., L.F.M. da Silva, and P.M.S.T. de Castro, *Adhesively bonded T-joints in polyvinyl chloride windows*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2008. **222**(3): p. 159-174.
42. Cheuk, P.T. and L. Tong, *Failure of adhesive bonded composite lap shear joints with embedded precrack*. Composites Science and Technology, 2002. **62**(7): p. 1079-1095.
43. Rispler, A.R., et al., *Shape optimisation of adhesive fillets*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2000. **20**(3): p. 221-231.
44. Lang, T.P. and P.K. Mallick, *Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1998. **18**(3): p. 167-177.
45. Mortensen, F. and O.T. Thomsen, *Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach*. Composites Science and Technology, 2002. **62**(7): p. 1011-1031.
46. Kaye, R.H. and M. Heller, *Through-thickness shape optimisation of bonded repairs and lap-joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2002. **22**(1): p. 7-21.
47. Hu, F.Z. and C. Soutis, *Strength prediction of patch-repaired CFRP laminates loaded in compression*. Composites Science and Technology, 2000. **60**(7): p. 1103-1114.
48. Haghani R., A.-E.M., Kliger R., *Effects of geometrical modifications on behavior of adhesive joints used to bond CFRP laminates to steel members - experimental investigation*. 2009: p. 280-282.
49. Lucas F.M. da Silva, M.J.C.Q.L., *Joint strength optimization by the mixed-adhesive technique*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009.
50. Özer, Ö.Ö.H., *An experimental investigation on the failure loads of the mono and bi-adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2016.
51. A.S. Bouchikhi, A.M., S. Gouasmi, F.B. Boukoulda, *Effect of mixed adhesive joints and tapered plate on stresses in retrofitted beams bonded with a fiber-reinforced polymer plate*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013.
52. Ávila AF, B.P., *An experimental and numerical study on adhesive joints for composites*. Composite Structures, 2004. **64**: p. 531-537.

53. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da Execução de Reparações em Materiais Compósitos*. 2005, ISEP.
54. Boss JN, G.V., Lim CT, *Modulus grading versus geometrical grading of composite adherends in single-lap bonded joints*. *Composite Structures*, 2003. **62**: p. 113-121.
55. Akpınar, S., *The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers*. *Composites: Part B*, 2014. **67**: p. 170-178.
56. Hamza Bendemra, P.C., Phillip J. Crothers, *Optimisation study of tapered scarf and stepped-lap joints in composite repair patches*. *Composite Structures*, 2015. **130**: p. 1-8.
57. Kohei Ichikawa, Y.S., Toshiyuki Sawa, *A three-dimensional finite-element stress analysis and strength evaluation of stepped-lap adhesive joints subjected to static tensile loadings*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2008. **28**: p. 464-470.
58. Min You, Z.L., Xiao-ling Zheng, Shan Yu, Gang-yan Li, De-xin Sun *A numerical and experimental study of preformed angle in the lap zone on adhesively bonded steel single lap joint*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009. **29**: p. 280-285.
59. Zhan-Mou Yan, M.Y., Xiao-Su Yi, Xiao-Ling Zheng, Zhi Li, *A numerical study of parallel slot in adherend on the stress distribution in adhesively bonded aluminum single lap joint*. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2007. **27**: p. 687-695.
60. Babak Haghpanah, S.C., Ashkan Vaziri, *Adhesively bonded lap joints with extreme interface geometry*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2014. **48**: p. 130-138.
61. Min You, Y.Z., Xiao-Ling Zheng, Wen-Jun Liu, *Effect of metal as part of fillet on the tensile shear strength of adhesively bonded single lap joints*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2003. **23**: p. 365-369.
62. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength prediction of single and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2011. **31**: p. 362-372.
63. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2013. **88**: p. 513-533.
64. 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.
65. Neto, J.A.B.P., *Estudo paramétrico de juntas Adesivas em Material Compósito*, in *Tese de Mestrado*. 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
66. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2011. **25**: p. 2351-2368.
67. Faneco, T.M.S., *Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*, in *Ramo de Materiais e Tecnologias de Fabrico*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.

68. Fernandes, T.A.B., et al., *Adhesive selection for single lap bonded joints: experimentation and advanced techniques for strength prediction*. The Journal of Adhesion. , 2015. **91**: p. 841-862.
69. Campilho, R.D.S.G. and L.F.M. da Silva, *Advances in numerical modelling in adhesive joints*. 2012: Springer.
70. *Abaqus Documentation*. 2013, Dassault Systèmes: Vélizy-Villacoublay.
71. Campilho, R.D.S.G., et al., *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
72. Campilho, R.D.S.G., et al., *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.
73. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
74. Ribeiro, T.E.A., et al., *Damage analysis of composite–aluminium adhesively-bonded single-lap joints*. Composite Structures, 2016. **136**: p. 25-33.
75. Zhao, B., Z.-H. Lu, and Y.-N. Lu, *Two-dimensional analytical solution of elastic stresses for balanced single-lap joints—Variational method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **49**: p. 115-126.
76. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics, 1944. **66**: p. A17–A27.
77. Mortensen, F. and O.T. Thomsen, *Simplified linear and non-linear analysis of stepped and scarfed adhesive-bonded lap-joints between composite laminates*. Composite Structures, 1997. **38**(1–4): p. 281-294.
78. Ichikawa, K., Y. Shin, and T. Sawa, *A three-dimensional finite-element stress analysis and strength evaluation of stepped-lap adhesive joints subjected to static tensile loadings*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(8): p. 464-470.
79. Nunes, S.L.S., et al., *Comparative failure assessment of single and double-lap joints with varying adhesive systems*. The Journal of Adhesion, 2016. **92**: p. 610-634.
80. Moës, N. and T. Belytschko, *Extended finite element method for cohesive crack growth*. Engineering Fracture Mechanics, 2002. **69**: p. 813-833.