



Estudo da resistência e mecanismos de dano em juntas adesivas entre materiais compósitos com defeitos de adesão

FILIPE MANUEL FERREIRA RIBEIRO

Outubro de 2015

Estudo da resistência e mecanismos de dano em juntas
adesivas entre materiais compósitos com defeitos de
adesão

Filipe Manuel Ferreira Ribeiro

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



16 de outubro de 2015

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação do 2º ano do Mestrado em Engenharia
Mecânica

Candidato: Filipe Manuel Ferreira Ribeiro, N°1101532, 1101532@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, rds@isep.ipp.pt

Coorientação Científica: Ricardo João Camilo Carbas, rcarbas@fe.up.pt

Coorientação Científica: Lucas Filipe Martins da Silva, lucas@fe.up.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



16 de outubro de 2015

Aos meus pais e ao meu irmão,

Agradecimentos

Gostaria de fazer um agradecimento especial ao meu orientador Doutor Raul Campilho pela oportunidade de fazer este trabalho e, pela sua dedicação e apoio durante a execução do mesmo. Ao Doutor Ricardo Carbas pela disponibilidade e apoio durante a parte experimental do trabalho. Ao Doutor Lucas da Silva por disponibilizar os meios para a realização da parte experimental.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), por todos os ensinamentos que me foram transmitidos ao longo dos anos.

À minha família e amigos, pelo apoio e compreensão em todos os momentos.

Resumo

A necessidade de utilizar métodos de ligação entre componentes de forma mais rápida, eficaz e com melhores resultados tem causado a crescente utilização das juntas adesivas, em detrimento dos métodos tradicionais de ligação. A utilização das juntas adesivas tem vindo a aumentar em diversas aplicações industriais por estas apresentarem vantagens, das quais se destacam a redução de peso, redução de concentrações de tensões e facilidade de fabrico. No entanto, uma das limitações das juntas adesivas é a dificuldade em prever a resistência da junta após fabrico e durante a sua vida útil devido à presença de defeitos no adesivo. Os defeitos são normalmente gerados pela preparação inadequada das juntas ou degradação do adesivo devido ao ambiente (por exemplo, humidade), reduzindo a qualidade da ligação e influenciando a resistência da junta.

Neste trabalho é apresentado um estudo experimental e numérico de juntas de sobreposição simples (JSS) com a inclusão de defeitos centrados na camada de adesivo para comprimentos de sobreposição (L_0) diferentes. Os adesivos utilizados foram o Araldite® AV138, apresentado como sendo frágil, e o adesivo Sikaforce® 7752, intitulado como adesivo dúctil. A parte experimental consistiu no ensaio à tração das diferentes JSS permitindo a obtenção das curvas força-deslocamento ($P-\delta$). A análise numérica por modelos de dano coesivo (MDC) foi realizada para analisar as tensões de arrancamento (σ_y) e as tensões de corte (τ_{xy}) na camada adesiva, para estudar a variável de dano do MDC durante o processo de rotura e para avaliar a capacidade dos MDC na previsão da resistência da junta. Constatou-se um efeito significativo dos defeitos de diferentes dimensões na resistência das juntas, que também depende do tipo de adesivo utilizado e do valor de L_0 . Os modelos numéricos permitiram a descrição detalhada do comportamento das juntas e previsão de resistência, embora para o adesivo dúctil a utilização de uma lei coesiva triangular tenha provocado alguma discrepância relativamente aos resultados experimentais.

Palavras-Chave

Junta adesiva, adesivo estrutural, defeito, modelos de dano coesivo, previsão de resistência.

Abstract

The need to use joining methods between components more quickly, efficiently and with better results has caused the increased use of adhesive joints at the expense of joining traditional methods. The use of adhesive joints is increasing in various industrial applications because of their advantages such as weight reduction, reduction of stress concentrations and ease of manufacture. However, one of the limitations of adhesive joints is the difficulty in predicting the joint strength after manufacture and during their lifetime due to the presence of defects in the adhesive. Defects are typically generated by inadequate joint preparation or degradation due to the environment (e.g. humidity), reducing the joint quality and influencing joint strength.

This paper presents an experimental and numerical study of single-lap joints (SLJ) with defects centered in the adhesive layer for different overlap lengths (L_0). The adhesives used were the Araldite[®] AV138, presented as brittle, and the Sikaforce[®] 7752, considered as ductile. The experimental part consisted of tensile testing different SLJ allowing to obtain the load-displacement (P - δ) curves. The numerical analysis by cohesive zone models (CZM) included the analysis of the peel (σ_y) and shear (τ_{xy}) stress distributions in the adhesive layer, the CZM damage variable study during the failure process and the CZM evaluation to predict the joint strength.

A significant effect of defects of different sizes was found in the joints' strength, which also depends on the type of adhesive and value of L_0 . The numerical models allowed the detailed description of the joints behavior and strength prediction although, for the ductile adhesive, the use of triangular cohesive laws has caused some discrepancy in relation to the experimental results.

Keywords

Adhesive joint, structural adhesive, defect, cohesive zone models, strength prediction.

Índice

AGRADECIMENTOS.....	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE TABELAS	XXIII
NOMENCLATURA	XXV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 LIGAÇÕES ADESIVAS.....	5
2.1.1 <i>Caraterização das juntas adesivas</i>	5
2.1.2 <i>Aplicações comuns das juntas adesivas</i>	7
2.1.3 <i>Esforços típicos em juntas adesivas</i>	10
2.1.4 <i>Tipos de rotura</i>	11
2.1.5 <i>Configurações possíveis de junta</i>	11
2.1.6 <i>Efeito das propriedades do adesivo</i>	12
2.1.7 <i>Efeito do comprimento de sobreposição</i>	13
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ADESIVOS	14
2.2.1 <i>Caraterização dos adesivos estruturais</i>	15
2.2.2 <i>Tipos de adesivos estruturais</i>	15
2.2.2.1 Adesivos epóxicos	15
2.2.2.2 Adesivos fenólicos	16
2.2.2.3 Adesivos de poliuretano	16
2.2.2.4 Adesivos acrílicos	16
2.2.2.5 Adesivos de poliimida.....	17
2.3 PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DAS JUNTAS	17
2.3.1 <i>Modelos analíticos</i>	18
2.3.2 <i>Métodos numéricos</i>	18
2.3.2.1 Modelação contínua	18
2.3.2.2 Mecânica da fratura	19
2.3.2.3 Mecânica do dano	20
2.3.2.3.1 Modelos de dano coesivo	21

2.3.2.3.2	Abordagem alternativa aos modelos de dano coesivo.....	23
2.3.2.4	Método de elementos finitos estendido	23
2.4	JUNTAS COM DEFEITOS INTERNOS NA ZONA DE LIGAÇÃO	24
3	TRABALHO EXPERIMENTAL.....	33
3.1	MATERIAIS	33
3.1.1	<i>Substratos</i>	33
3.1.2	<i>Adesivos</i>	33
3.1.2.1	Adesivo Araldite® AV138.....	34
3.1.2.2	Adesivo Sikaforce® 7752	35
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	36
3.2.1	<i>Geometria das juntas</i>	36
3.2.2	<i>Processo de fabrico</i>	37
3.2.2.1	Fabrico das placas de compósito	37
3.2.2.2	Curas das placas	41
3.2.2.3	Corte das placas.....	42
3.2.2.4	Preparação das superfícies dos provetes.....	43
3.2.2.5	Colocação do Teflon® nos provetes.....	43
3.2.2.6	Preparação do molde	44
3.2.2.7	Preparação dos espaçadores.....	45
3.2.2.8	Preparação do adesivo e colagem dos substratos.....	46
3.2.2.9	Remoção do excesso de adesivo.....	47
3.2.2.10	Colagem dos calços	47
3.2.3	<i>Ensaio das juntas</i>	48
3.3	RESULTADOS.....	49
3.3.1	<i>Curvas P-δ</i>	49
3.3.2	<i>Modos de rotura</i>	52
3.4	RESISTÊNCIA DAS JUNTAS	54
4	TRABALHO NUMÉRICO	57
4.1	CONDIÇÕES DA ANÁLISE NUMÉRICA.....	57
4.2	MODELO DE DANO COESIVO	60
4.2.1	<i>Modelo de dano triangular</i>	60
4.2.2	<i>Determinação das propriedades coesivas</i>	61
4.3	ANÁLISE DE TENSÕES NA JUNTA.....	63
4.3.1	<i>Tensões de corte</i>	64
4.3.2	<i>Tensões de arrancamento</i>	66
4.4	ANÁLISE DO PARÂMETRO DE DANO NO ADESIVO	69
4.4.1	<i>Análise da variável do dano para $P_{máx}$</i>	70
4.4.2	<i>Análise da variável de dano quando o 1º elemento coesivo atinge a rotura</i>	72
4.4.3	<i>Evolução da variável do dano com $\delta/\delta P_{máx}$</i>	73
4.5	PREVISÃO DE RESISTÊNCIA.....	78

5 CONCLUSÕES.....	85
REFERÊNCIAS	89

Índice de Figuras

Figura 1 – Comparação entre a distribuição de tensão de uma junta rebitada e uma junta adesiva (da Silva et al. 2007).	6
Figura 2 – Ligação de reforços à fuselagem e às asas de chapa fina (da Silva et al. 2007).	7
Figura 3 – Construção de estruturas em ninho de abelha (da Silva et al. 2007).....	8
Figura 4 – Lotus Elise em que a estrutura de alumínio tem ligações adesivas (2015).	8
Figura 5 – A carroçaria e piso do autocarro CIVITAS foram produzidos em material compósito numa estrutura do tipo sanduíche (Aguiar et al. 2011).	9
Figura 6 – Vigas moldadas com reforço em fibra de carbono/vidro (Correia et al. 2011).....	9
Figura 7 – Bicicleta feita em fibra de carbono (2015).	10
Figura 8 – Quatro modos fundamentais de carregamento.....	10
Figura 9 – Representação dos tipos de rotura (Azevedo 2014).....	11
Figura 10 – Tipos de configurações de juntas adesivas (da Silva et al. 2007).	12
Figura 11 – Influência do valor de E do adesivo na distribuição de τ_{xy} ao longo da camada de adesivo (Campilho e da Silva In press).	13
Figura 12 – Rotura devido à deformação de corte do adesivo (esquerda) e devido à cedência generalizada (direita) (Campilho e da Silva In press).	14
Figura 13 – Descontinuidades de tensões na (a) ponta da fissura e (b) no canto reentrante (da Silva e Campilho 2012).	20
Figura 14 – Resposta uniaxial σ - ε típica de um material ou estrutura dúctil (da Silva e Campilho 2012).	21
Figura 15 – Utilização de elementos coesivos para modelação da camada de adesivo numa JSS (Neto 2011).	22
Figura 16 – Falha progressiva de uma JSS usando o MEFX (as setas representam as direções da deformação máxima principal): início do dano dentro do adesivo nas arestas da sobreposição (a) e o crescimento do dano no aderente (b) (Campilho et al. 2011).	24
Figura 17 – Geometria e dimensões da junta (de Moura et al. 2006).	25

Figura 18 – Comparação entre as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente e experimentalmente para as juntas sem defeito (a) e para as juntas com defeitos de 1 mm (b), 2 mm (c) e 4 mm (d) (de Moura et al. 2006).	25
Figura 19 – τ_{xy} normalizadas ao longo do L_O para as juntas com defeito de 2 mm (de Moura et al. 2006).....	26
Figura 20 – σ_y normalizadas ao longo do L_O para as juntas com defeito de 2mm (de Moura et al. 2006).....	26
Figura 21 – Os dois modos de rotura observados (de Moura et al. 2006).....	27
Figura 22 – Geometria da junta e os vários tipos de defeitos aplicados (Xu e Wei 2012).....	27
Figura 23 – Curvas de força normalizada em função do deslocamento normalizado para os tamanhos de defeitos d/l (Xu e Wei 2012).	28
Figura 24 – Desenho e dimensões da junta (Karachalios et al. 2013).....	29
Figura 25 – Localização do defeito retangular (Karachalios et al. 2013).....	29
Figura 26 – Localização do defeito circular (Karachalios et al. 2013).....	29
Figura 27 – Variação da resistência em ordem ao tamanho de defeito para JSS coladas com os dois adesivos, com $L_O = 25$ mm, para os substratos de aço de alta resistência (a), aço intermédio (b) e aço macio (c).	30
Figura 28 – Curvas $\sigma-\varepsilon$ de provetes maciços de Araldite® AV138 (Neto et al. 2012).	34
Figura 29 – Curvas $\sigma-\varepsilon$ de provetes maciços de Sikaforce® 7752 (Faneco 2014).....	35
Figura 30 – Geometria e dimensões das juntas de L_O de 25 mm.	36
Figura 31 – Geometria e dimensões das juntas de L_O de 50 mm.	37
Figura 32 – Localização e dimensões do defeito utilizado na junta de L_O de 25 mm.	37
Figura 33 – Localização e dimensões do defeito utilizado na junta de L_O de 25 mm.	37
Figura 34 – Posicionamento correto da régua (a) e corte das tiras de carbono-epóxico com auxílio do x-ato (b).	38
Figura 35 – Aplicação de calor nas folhas de carbono-epóxico através da pistola de calor.	39
Figura 36 – Remoção da folha de revestimento com o x-ato.	39
Figura 37 – Aspeto final depois do empilhamento.....	40
Figura 38 – Mesa de trabalho com as partes do molde para a aplicação do desmoldante.....	40
Figura 39 – Posicionamento da placa de carbono-epóxico no molde.	41

Figura 40 – Prensa de pratos quentes INTOCO (Neto 2011).....	41
Figura 41 – Ciclo térmico para a cura das placas de carbono-epóxico.....	42
Figura 42 – Máquina de corte BATISTI MECCANICA s.r.l DV25 (Neto 2011).	42
Figura 43 – Provetes após a utilização da lixa grossa.	43
Figura 44 – Método de fixação do Teflon® nos provetes.....	44
Figura 45 – Blocos inferior e superior do molde, respetivamente.	44
Figura 46 – Desmoldante FREKOTE® 770-NC da LOCTITE.	45
Figura 47 – Posicionamento das tiras metálicas e dos espaçadores em carbono.	46
Figura 48 – Posicionamento dos substratos, espaçadores e tiras metálicas na parte inferior do molde, antes da colagem.	46
Figura 49 – Remoção do filete das juntas na furadora vertical OPTIMUM BF 20 Vario (Neto 2011).	47
Figura 50 – Juntas adesivas com os calços colados.	48
Figura 51 – Máquina de testes INSTRON® 3367 (a) e fixação das JSS (b).....	49
Figura 52 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite® AV138 para $L_0 = 25$ mm para as JSS a) sem defeito, b) com 25% de defeito, c) 50% de defeito e d) 75% de defeito.....	50
Figura 53 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite® AV138 para $L_0 = 50$ mm para as JSS a) sem defeito, b) com 25% de defeito, c) 50% de defeito e d) 75% de defeito.....	50
Figura 54 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Sikaforce® 7752 para $L_0 = 25$ mm para as JSS a) sem defeito, b) com 25% de defeito, c) 50% de defeito e d) 75% de defeito.....	51
Figura 55 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Sikaforce® 7752 para $L_0 = 50$ mm para as JSS a) sem defeito, b) com 25% de defeito, c) 50% de defeito e d) 75% de defeito.....	52
Figura 56 – Rotura das juntas coladas com Araldite® AV138, através do ensaio de tração, para $L_0 = 25$ mm, sem defeito (a), com 25% de defeito (b), 50% de defeito (c) e 75% de defeito (d)...	52
Figura 57 – Rotura das juntas coladas com Araldite® AV138, através do ensaio de tração, para $L_0 = 50$ mm, sem defeito (a), com 25% de defeito (b), 50% de defeito (c) e 75% de defeito (d)...	53

Figura 58 – Rotura das juntas coladas com Sikaforce® 7752, através do ensaio de tração, para $L_O = 25$ mm, sem defeito (a), com 25% de defeito (b), 50% de defeito (c) e 75% de defeito (d)....	53
Figura 59 – Rotura das juntas coladas com Sikaforce® 7752, através do ensaio de tração, para $L_O = 50$ mm, sem defeito (a), com 25% de defeito (b), 50% de defeito (c) e 75% de defeito (d)....	53
Figura 60 – $P_{máx}$ em função da percentagem de defeito para as JSS coladas com Araldite® AV138 para o $L_O = 25$ mm e $L_O = 50$ mm.	55
Figura 61 – $P_{máx}$ em função da percentagem de defeito para as JSS coladas com Sikaforce® 7752 para o $L_O = 25$ mm e $L_O = 50$ mm.	56
Figura 62 – Modelo do ABAQUS® utilizado para simular uma JSS com $L_O = 50$ mm e com 50% de defeito.....	57
Figura 63 – Refinamento de malha utilizado no modelo do ABAQUS®.	59
Figura 64 – Simulação do modelo de $L_O = 25$ mm e 25% de defeito quando o adesivo entra em rotura.	59
Figura 65 – Pormenor da malha utilizada nos modelos do ABAQUS® para obtenção dos gráficos referentes às τ_{xy} e σ_y	60
Figura 66 – MDC triangular.....	61
Figura 67 – Distribuição de tensões τ_{xy} para JSS coladas com Araldite® AV138 e $L_O = 25$ mm.....	64
Figura 68 – Distribuição de tensões τ_{xy} para JSS coladas com Araldite® AV138 e $L_O = 50$ mm.....	65
Figura 69 – Distribuição de tensões τ_{xy} para JSS coladas com Sikaforce® 7752 e $L_O = 25$ mm	66
Figura 70 – Distribuição de tensões τ_{xy} para JSS coladas com Sikaforce® 7752 e $L_O = 50$ mm.	66
Figura 71 – Distribuição de tensões σ_y para JSS coladas com Araldite® AV138 e $L_O = 25$ mm.	67
Figura 72 – Distribuição de tensões σ_y para JSS coladas com Araldite® AV138 e $L_O = 50$ mm.	68
Figura 73 – Distribuição de tensões σ_y para JSS coladas com Sikaforce® 7752 e $L_O = 25$ mm.	69
Figura 74 – Distribuição de tensões σ_y para JSS coladas com Sikaforce® 7752 e $L_O = 50$ mm.	69
Figura 75 – Variável de dano quando aplicada a $P_{máx}$ para JSS com o adesivo Araldite® AV138 com e sem defeitos, com $L_O = 25$ mm.....	70
Figura 76 – Variável de dano quando aplicada a $P_{máx}$ para JSS com o adesivo Araldite® AV138 com e sem defeitos, com $L_O = 50$ mm.....	71
Figura 77 – Variável de dano quando aplicada a $P_{máx}$ para JSS com o adesivo Sikaforce® 7752 com e sem defeitos, com $L_O = 25$ mm.....	71

Figura 78 – Variável de dano quando aplicada a $P_{\text{máx}}$ para JSS com o adesivo Sikaforce® 7752 com e sem defeitos, com $L_0 = 50$ mm.....	72
Figura 79 – Variável de dano quando o 1º elemento coesivo atinge a rotura completa, para JSS com o adesivo Araldite® AV138 com e sem defeitos, com $L_0 = 25$ mm.....	72
Figura 80 – Variável de dano quando o 1º elemento coesivo atinge a rotura completa, para JSS com o adesivo Araldite® AV138 com e sem defeitos, com $L_0 = 50$ mm.....	73
Figura 81 – Variável de dano quando o 1º elemento coesivo atinge a rotura completa, para JSS com o adesivo Sikaforce® 7752 com e sem defeitos, com os $L_0 = 25$ e 50 mm.	73
Figura 82 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138 sem defeito, com a) $L_0 = 25$ mm e b) $L_0 = 50$ mm.	74
Figura 83 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138 com 25% de defeito, com a) $L_0 = 25$ mm e b) $L_0 = 50$ mm.....	75
Figura 84 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138 com 50% de defeito, com a) $L_0 = 25$ mm e b) $L_0 = 50$ mm.....	75
Figura 85 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138 com 75% de defeito, com a) $L_0 = 25$ mm e b) $L_0 = 50$ mm.....	75
Figura 86 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 sem defeito, com a) $L_0 = 25$ mm e b) $L_0 = 50$ mm.	76
Figura 87 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 com 25% de defeito, com a) $L_0 = 25$ mm e b) $L_0 = 50$ mm.....	77
Figura 88 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 com 50% de defeito, com a) $L_0 = 25$ mm e b) $L_0 = 50$ mm.....	77
Figura 89 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 com 75% de defeito, com a) $L_0 = 25$ mm e b) $L_0 = 50$ mm.....	78
Figura 90 – Curvas P - δ obtidas numericamente e experimentalmente para as JSS coladas com Araldite® AV138 com $L_0 = 25$ mm (a) e $L_0 = 50$ mm (b) e para as JSS coladas com Sikaforce® 7752 com $L_0 = 25$ mm (c) e $L_0 = 50$ mm (d), todas sem defeito.	79
Figura 91 – Curvas P - δ obtidas numericamente e experimentalmente para as JSS coladas com Araldite® AV138 com $L_0 = 25$ mm (a) e $L_0 = 50$ mm (b) e para as JSS coladas com Sikaforce® 7752 com $L_0 = 25$ mm (c) e $L_0 = 50$ mm (d), todas com 75% de defeito.....	80
Figura 92 – Comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais e numéricos em função da percentagem de defeito para as JSS coladas com Araldite® AV138.	82

Figura 93 – Comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais e numéricos em função da percentagem de defeito para as JSS coladas com Sikaforce® 7752..... 82

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Classificação dos adesivos segundo a sua função (de Moura et al. 2011).	15
Tabela 2 – Propriedades elásticas ortotrópicas do CFRP, com as fibras alinhadas unidirecionalmente (Campilho et al. 2005).	33
Tabela 3 – Propriedades do adesivo Araldite® AV138 (Neto et al. 2012, Campilho et al. 2013)....	34
Tabela 4 – Propriedades do adesivo Sikaforce 7752® (Azevedo 2014).	36
Tabela 5 – Propriedades utilizadas no ABAQUS®	58
Tabela 6 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo de Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm (Azevedo et al. , Campilho et al. 2011, Constante et al. 2015).	62
Tabela 7 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo de Sikaforce® 7752 com uma espessura de 0,2 mm (Faneco 2014, Fernandes 2015).	63

Nomenclatura

Caracteres Romanos

E – Módulo de *Young*

G – Módulo de corte, taxa de libertação de energia de deformação

G_c – Tenacidade à fratura

G_I – Taxa de libertação de energia à tração

G_{IC} – Tenacidade à tração

G_{II} – Taxa de libertação de energia ao corte

G_{IIC} – Tenacidade ao corte

\mathbf{K} – Matriz de rigidez

K_{nn}, K_{ss}, K_{ns} – Parâmetros da matriz \mathbf{K}

L_o – Comprimento de sobreposição

P – Força

$P_{\text{máx}}$ – Força máxima

\mathbf{t} – Vetor de tração

t_A – Espessura de adesivo

t_n – Tensão coesiva à tração

t_n^0 – Resistência coesiva à tração

t_P – Espessura de substrato

t_s – Tensão coesiva ao corte

t_s^0 – Resistência coesiva ao corte

x – Distância desde a extremidade esquerda da camada do adesivo

Caracteres Gregos

δ_I – Deslocamento em tração para a extremidade da fenda

δ_{II} – Deslocamento em corte para extremidade da fenda

δ_n^0 – Deslocamento correspondente a t_n^0

$\delta P_{\text{máx}}$ – Deslocamento para o qual ocorre a força máxima

δ_s^0 – Deslocamento correspondente a t_s^0

δ – Deslocamento

$\boldsymbol{\varepsilon}$ – Vetor de deformação

ε_f – Deformação de rotura à tração

ε_n – Deformação à tração

ε_s – Deformação ao corte

ε – Deformação

γ_f – Deformação de rotura ao corte

σ – Tensão

σ_f – Tensão de rotura à tração

σ_y – Tensão de arrancamento, Tensão de cedência à tração

τ_f – Tensão de rotura ao corte

$\tau_{\text{méd}}$ – Tensão de corte média

τ_{xy} – Tensão de corte

τ_y – Tensão de cedência ao corte

ν – Coeficiente de *Poisson*

Abreviaturas

2D – Duas Dimensões

3D – Três Dimensões

AMDC – Alternativa aos Modelos de Dano Coesivo

CDCM - Critério de Deformação Normal Máxima

CFRP – *Carbon-Fiber Reinforced Plastic*

CTNM – Critério de Tensão Normal Máxima

CZM – *Cohesive zone model*

DCB – *Double-Cantilever Beam*

EF – Elementos Finitos

ENF – *End-Notched Flexure*

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

GTN - Gurson–Tvergaard–Needleman

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

JSS – Juntas de sobreposição simples

LVDT - *Linear Variable Differential Transducers*

MDC – Modelo de Dano Coesivo

MEFX – Método de Elementos Finitos Extendido

MFLE - Mecânica da Fratura Linear Elástica

SDEG – *Stiffness degradation*

SLJ – *Single lap joints*

TAST - *Thick Adherent Shear Test*

TFVF - Técnica de Fecho Virtual da Fenda

1 Introdução

1.1 Contextualização

As juntas adesivas, devido às suas potencialidades na ligação de materiais, têm vindo a ter um crescimento bastante significativo na indústria. Esta técnica de ligação apresenta inúmeras vantagens em comparação com as ligações mecânicas mais tradicionais, como o baixo peso, maior resistência, fiabilidade, possibilidade de unir diferentes materiais, rapidez de fabrico, possibilidade de automatização e distribuição mais uniforme das tensões. O comportamento de uma ligação adesiva é condicionado por diferentes variáveis, tais como o tipo de adesivo, o tipo de substrato e aspetos dimensionais como por exemplo o comprimento de sobreposição (L_o), a espessura dos substratos e a espessura da camada de adesivo. No que diz respeito aos adesivos, estes variam de frágeis a rígidos, como por exemplo o epóxico Araldite[®] AV138, até dúcteis e flexíveis, como é o caso do poliuretano Sikaforce[®] 7752. Para além destes, existem outros adesivos que combinam uma elevada resistência e ductilidade. A resistência e ductilidade do adesivo são dois dos principais fatores que influenciam a resistência de uma junta adesiva, em conjunto com a geometria da junta.

Apesar das vantagens das juntas adesivas inumeradas anteriormente, qualquer processo de fabrico irá, inevitavelmente, introduzir defeitos no produto final. É praticamente impossível produzir uma junta sem defeitos, mesmo sobre controlos rigorosos. Diferentes elementos podem contribuir para uma falha de adesão na junta como bolhas de ar, corpos estranhos, gordura ou poeira, pelo que se torna importante estudar como a presença destes defeitos influencia o comportamento das juntas com diferentes geometrias e adesivos. A existência de ferramentas que permitam o projeto expedito de ligações com estes defeitos é também de extrema relevância. Assim, o método de Elementos Finitos (EF), combinado com critérios ou modelos de dano, pode revelar-se como uma ferramenta fundamental para

o projeto destas ligações adesivas. No âmbito das técnicas disponíveis, os modelos de dano coesivo (MDC) são uma ferramenta de grande importância, por combinar os parâmetros de resistência e tenacidade dos adesivos para previsão do desempenho das juntas adesivas.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é o estudo de juntas adesivas à tração com aderentes de materiais compósitos e diferentes dimensões de defeitos na camada de adesivo. Para este efeito, foram testadas juntas de sobreposição simples (JSS) com os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 para diferentes comprimentos de sobreposição (L_0) e diferentes comprimentos de defeito na zona central da camada de adesivo.

Neste trabalho, procedeu-se experimentalmente à preparação e ensaio de provetes de JSS à tração, com diferentes L_0 , diferentes comprimentos de defeito e os referidos adesivos. Numericamente estudaram-se as distribuições das tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) na camada adesiva. No estudo por MDC, é avaliada a variável de dano SDEG (*stiffness degradation*), o que permite verificar a degradação do adesivo desde o início da aplicação da carga até à rotura completa, dada em função de L_0 , e como tal explicar os resultados obtidos. A validação foi realizada por comparação direta dos resultados experimentais obtidos nos ensaios, com os valores numéricos obtidos com recurso ao *software* ABAQUS®.

1.3 Organização do relatório

Para uma melhor interpretação e análise do trabalho desenvolvido, esta dissertação foi dividida em 5 capítulos distintos.

No capítulo 1 foi enquadrado o trabalho realizado, definidos os objetivos propostos para esta tese e descritos de forma sucinta os diferentes capítulos.

O capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica, que aborda os temas mais importantes referentes às ligações adesivas, faz uma revisão à classificação dos adesivos, aos métodos de previsão de resistência e, por último, uma descrição dos estudos feitos sobre juntas com defeitos internos na zona de ligação.

O capítulo 3 corresponde ao trabalho experimental realizado, onde se começa por descrever os materiais utilizados para os substratos e adesivos, depois segue-se para uma descrição detalhada do procedimento experimental e ensaios das juntas, mostra-se os resultados obtidos e por fim faz-se uma análise à resistência das juntas.

O trabalho numérico realizado no *software* ABAQUS® é apresentado no capítulo 4, incluindo condições da análise numérica e descrição do MDC utilizado, passando para a análise das tensões nas juntas e do parâmetro de dano SDEG. Conclui-se o capítulo com a previsão de resistência das juntas e descrição detalhada dos comportamentos observados em função das informações recolhidas na análise de tensões e parâmetro de dano SDEG.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas, assim como é realizada referência a possíveis trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Ligações adesivas

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

A tecnologia de ligação por adesivos estruturais é uma tecnologia emergente que permite solucionar muitos problemas associados às tecnologias tradicionais (parafusos, rebites, soldadura, etc.). A comunidade científica que investiga este tema está em franca expansão e contam-se inúmeras aplicações práticas desde as indústrias de ponta (aeronáutica, automóvel, etc.) até as indústrias mais tradicionais (calçado, móveis, etc.) (da Silva et al. 2007). A indústria aeronáutica tem sido a principal responsável pelo desenvolvimento de juntas adesivas estruturais. Até ao século XX não se verificaram avanços significativos na tecnologia de adesão. Os adesivos usados nas aeronaves do início do século XX eram adesivos baseados na caseína, substância derivada do leite. Estes adesivos naturais apresentavam problemas quando submetidos a ambientes húmidos. A absorção de água faz com que o adesivo se deteriore (Neto 2011). Os adesivos atuais são todos baseados em polímeros sintéticos tais como os epóxidos, os fenólicos, os acrílicos e os uretanos. São geralmente modificados de modo a melhorar a sua tenacidade.

As principais vantagens apontadas às ligações adesivas estruturais são (da Silva et al. 2007):

1. Distribuição mais uniforme das tensões ao longo da área ligada, o que permite uma maior rigidez e transmissão de carga, possibilitando assim uma redução de peso, ou seja, um menor custo. A Figura 1 compara as distribuições de tensão teóricas numa junta rebitada e numa junta colada. A distribuição de tensão é mais uniforme na junta colada, em detrimento da concentração de tensões observada na junta rebitada, permite ter uma melhor resistência à fadiga.

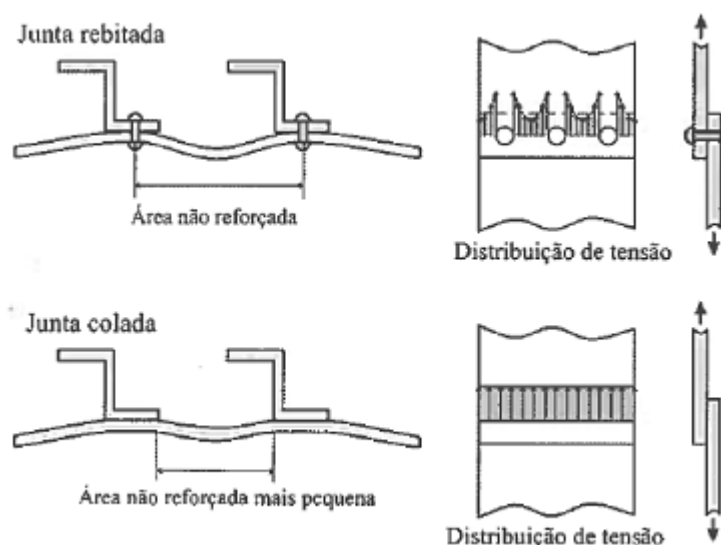


Figura 1 – Comparação entre a distribuição de tensão de uma junta rebitada e uma junta adesiva (da Silva et al. 2007).

2. Amortecimentos de vibrações, o que permite que as tensões sejam parcialmente absorvidas, melhorando assim a resistência à fadiga dos próprios componentes ligados.
3. Ligação de materiais diferentes em composição e com distintos coeficientes de expansão.
4. Ligação de chapas eficientemente, o que pode constituir uma aplicação importante dos adesivos para ligar materiais metálicos ou não.
5. São geralmente o método mais conveniente e efetivo de ligar dois materiais, uma vez que pode ser automatizado.
6. Tornam o projeto mais flexível permitindo o uso de conceitos e materiais.
7. Permitem ter estruturas com contornos regulares porque evitam furos (rebites, parafusos) e marcas devidas à soldadura.
8. Criam um contacto contínuo entre as superfícies ligadas.

As principais desvantagens inerentes às ligações com adesivos são:

1. É necessário um projeto da ligação que elimine ao máximo as forças de arrancamento (principal inimigo das ligações adesivas), clivagem e impacto.
2. É importante usar geometrias que evitem tensões localizadas e que garantam uma distribuição uniforme de tensões. Se as tensões não estiverem perfeitamente perpendiculares ao adesivo, podem surgir forças de arrancamento ou de clivagem.

3. Apresentam limitada resistência a condições extremas, tais como o calor e a humidade devido à natureza polimérica do adesivo.
4. A ligação não é normalmente realizada instantaneamente, o que requer a utilização de ferramentas de fixação para manter as peças em posição.
5. Para obter bons resultados é necessário uma cuidada preparação das superfícies através de, por exemplo, abrasão mecânica, desengorduramento com solvente, ataques químicos, primários, etc.
6. Os adesivos são frequentemente curados a elevadas temperaturas (forno, prensa, etc.)
7. O controlo de qualidade e segurança são mais difíceis embora tenham sido desenvolvidas recentemente técnicas não destrutivas adequadas.
8. Um dos grandes problemas da utilização mais frequente dos adesivos estruturais é o facto de não haver um critério de dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura.

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Como foi referido, a indústria aeronáutica permitiu desenvolver substancialmente as ligações adesivas e hoje a sua aplicação é cada vez mais comum e diversificada. São usadas, por exemplo, na ligação de reforços à fuselagem e às asas de chapa fina (ver Figura 2) e permitem também a construção de estruturas em favos de abelha (*honeycomb structures*) como é mostrado na Figura 3 (da Silva et al. 2007).

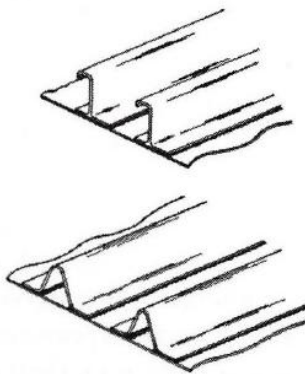


Figura 2 – Ligação de reforços à fuselagem e às asas de chapa fina (da Silva et al. 2007).

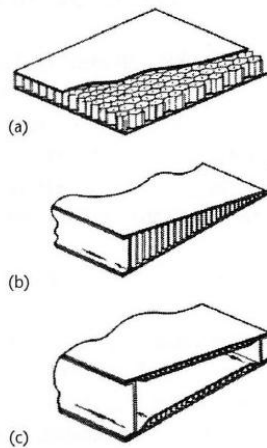


Figura 3 – Construção de estruturas em ninho de abelha (da Silva et al. 2007).

Na indústria automóvel, a preocupação em reduzir o peso do automóvel para diminuir consumos e aumentar velocidades originou o recurso a materiais leves, como o alumínio ou plásticos reforçados com fibras. Esses materiais são difíceis de ligar pelos métodos tradicionais de fixação, levando os adesivos a constituir-se como o método viável a utilizar (ver Figura 4).



Figura 4 – Lotus Elise em que a estrutura de alumínio tem ligações adesivas (2015).

Outros meios de transporte como camiões, autocarros (ver Figura 5) e comboios estão a ser fabricados com materiais leves para controlar os níveis de emissão poluente utilizando adesivos como método de ligação.



Figura 5 – A carroçaria e piso do autocarro CIVITAS foram produzidos em material compósito numa estrutura do tipo sanduíche (Aguiar et al. 2011).

A indústria naval utiliza cada vez mais plásticos e compósitos devido ao seu baixo peso, à sua resistência à corrosão e à sua facilidade de processamento. Neste caso, deve-se ter em conta a resistência dos adesivos quando sujeitos a condições ambientais severas. Outros exemplos de aplicação crescente de adesivos estruturais são a construção civil (pontes, painéis, caixilharia, etc.) (Figura 6) e o desporto (bicicletas, raquetes de ténis, tacos de golfe, etc.) (Figura 7).



Figura 6 – Vigas moldadas com reforço em fibra de carbono/vidro (Correia et al. 2011).



Figura 7 – Bicicleta feita em fibra de carbono (2015).

2.1.3 Esforços típicos em juntas adesivas

É raro encontrar uma distribuição de tensões uniforme numa junta adesiva. É de facto normal encontrar uma distribuição não uniforme. As forças aplicadas produzem concentrações de tensões que podem ser várias vezes superiores à tensão média. Essas concentrações de tensão são muitas vezes inesperadas e podem determinar a máxima resistência da junta. É responsabilidade do engenheiro diminuir esses gradientes através de um projeto adequado. Todavia, convém antes identificar os vários modos de carregamento. Existem essencialmente quatro modos fundamentais de carregamento: corte, tração, arrancamento e clivagem (Figura 8). Qualquer combinação ou variação destes pode ser encontrado na prática (da Silva et al. 2007).

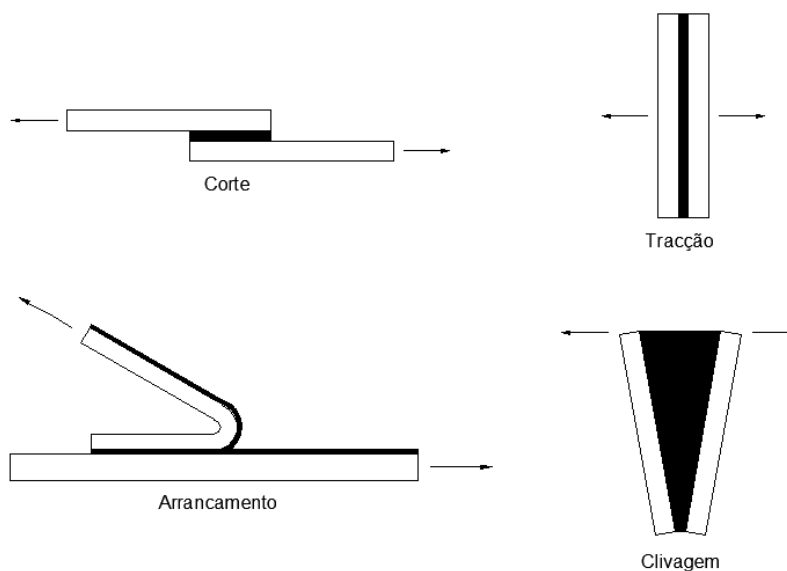


Figura 8 – Quatro modos fundamentais de carregamento.

2.1.4 Tipos de rotura

A finalidade de uma ligação eficiente é a transmissão de carga entre os dois componentes ligados, mantendo a sua integridade estrutural sob solicitações estáticas e/ou dinâmicas e condições ambientais (humidade e temperatura) adversas. Torna-se assim fundamental a correta avaliação da distribuição do perfil de tensões e, conseqüentemente, dos tipos de rotura induzidos nas juntas coladas. De um modo geral, distinguem-se três modos de rotura diferentes em juntas coladas (ver Figura 9): rotura coesiva no interior do adesivo, rotura adesiva na interface substrato-adesivo e rotura de um dos substratos.

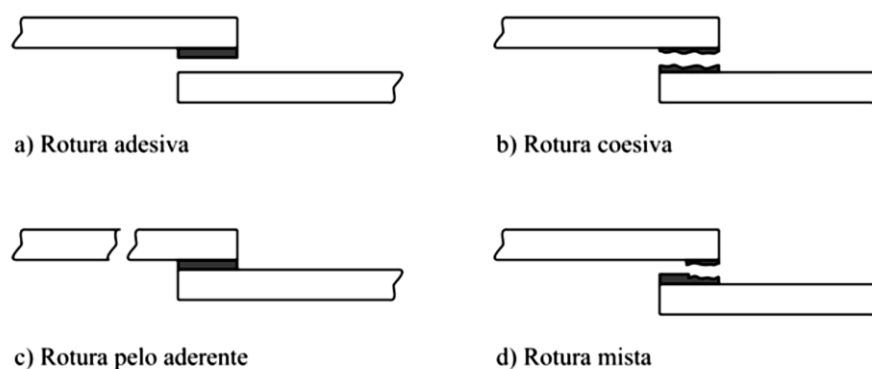


Figura 9 – Representação dos tipos de rotura (Azevedo 2014).

A rotura coesiva ocorre quando, a tensão aplicada é superior à resistência interna do próprio material (adesivo ou substrato). Por vezes a rotura ocorre por uma combinação dos referidos modos designando-se nesse caso por uma rotura mista. A rotura adesiva pode ser originada por uma má preparação das superfícies. Por outro lado assume-se que uma junta deve ser projetada de modo a que a rotura nunca ocorra pelo adesivo. Daqui se depreende que uma junta corretamente projetada e concebida será aquela onde ocorra rotura do substrato (da Silva et al. 2007, de Moura et al. 2011).

2.1.5 Configurações possíveis de junta

Numa junta ideal, o adesivo deve ser solicitado na direção segundo este desenvolve a sua resistência máxima. Conseqüentemente, durante a conceção da junta deve-se providenciar uma configuração em que a solicitação ocorra segundo a direção mais favorável para a junta. As juntas adesivas podem assumir várias configurações, pela possibilidade de alteração da geometria dos substratos (Figura 10). De todas as juntas existentes, destacam-se pela sua facilidade de fabrico as juntas topo a topo planas, JSS e

juntas de sobreposição dupla. Contudo, as JSS não são as que apresentam melhores resultados devido a elevados picos de σ_y e de corte que apresentam nas extremidades da ligação. Por outro lado, nas juntas de sobreposição dupla este efeito já é mais limitado devido à simetria longitudinal do carregamento (da Silva et al. 2007).

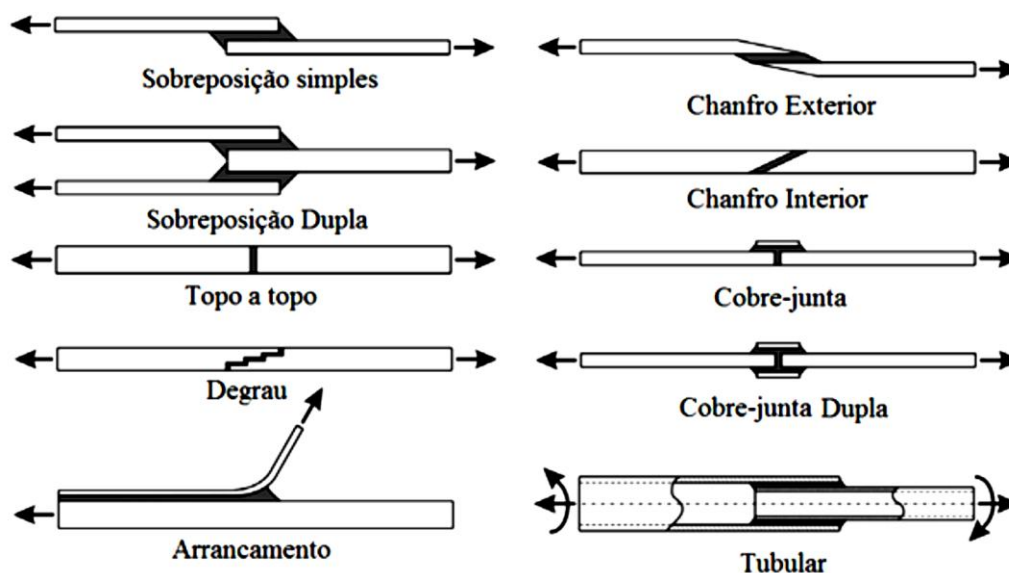


Figura 10 – Tipos de configurações de juntas adesivas (da Silva et al. 2007).

2.1.6 Efeito das propriedades do adesivo

As propriedades dos adesivos têm uma grande influência na resistência da junta, mas deve-se sempre ter em conta que um adesivo com maior resistência mecânica não resulta necessariamente numa junta com maior resistência. Na verdade, um adesivo resistente mas frágil alcança localmente tensões elevadas nas extremidades da ligação, mas não permitem a redistribuição de tensões para as zonas com valores baixos de tensão.

Como resultado, a tensão média de corte na rotura é muito baixa (Campilho et al. 2013). Por outro lado, os adesivos com elevada ductilidade e uma baixo valor de Módulo de Young (E) têm, geralmente, uma baixa resistência. No entanto, eles são capazes de distribuir as tensões de maneira mais uniforme ao longo do comprimento de ligação (devido à baixa rigidez) e se deformar plasticamente, o que faz com que as juntas sejam muito mais resistentes do que os adesivos de alta resistência mas frágeis (da Silva et al. 2006). A rigidez do adesivo também tem uma influência direta nas tensões de corte (τ_{xy}). Um adesivo de baixa rigidez proporciona uma distribuição de tensões mais uniforme

comparado com um adesivo rígido, o que dá origem a concentrações de tensão maiores nas extremidades da sobreposição (Figura 11).

Geralmente, os adesivos são resistentes, rígidos e frágeis ou com pouca resistência, dúcteis, e flexíveis. Embora idealmente um adesivo deva ser resistente, dúctil, flexível, esta combinação é muito difícil de conseguir com adesivos modernos. Como tal, a recomendação vai para utilização de adesivos menos resistentes mas dúcteis.

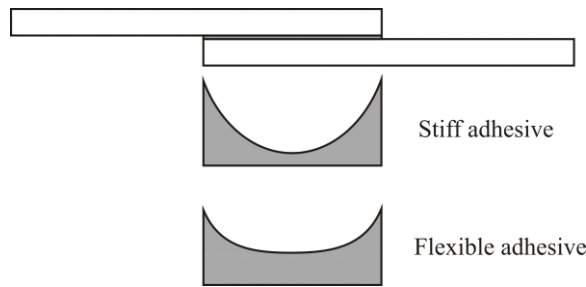


Figura 11 – Influência do valor de E do adesivo na distribuição de τ_{xy} ao longo da camada de adesivo (Campilho e da Silva In press).

2.1.7 Efeito do comprimento de sobreposição

O aumento da largura da junta aumenta proporcionalmente a sua resistência. No entanto, o L_0 depende do tipo de adesivo (isto é, dúctil ou frágil) e do tipo de aderente. Para aderentes metálicos, três casos devem ser considerados: aderentes elásticos (por exemplo, de aço de alta resistência) e adesivo dúctil, aderente elástico e adesivo frágil, e aderentes que cedem plasticamente.

Para aderentes elásticos e adesivos dúcteis (mais de 20% de deformação de rotura ao corte), a resistência da junta é aproximadamente proporcional ao L_0 . Isso ocorre porque os adesivos dúcteis podem deformar plasticamente, redistribuindo as tensões à medida que o carregamento aumenta, e como tal utilizar toda a camada de adesivo para a transmissão de esforços. Para adesivos com ductilidade intermédia, ocorre rotura no adesivo porque a sua deformação nas extremidades da sobreposição atinge a deformação de rotura ao corte do adesivo (Figura 12). Para aderentes elásticos e adesivos frágeis, a resistência da junta não é proporcional à sobreposição e é atingido um patamar. Este comportamento observa-se porque a tensão é concentrada nas extremidades de sobreposição, e uma sobreposição com maior tamanho não altera de forma relevante a distribuição das tensões ao longo da sobreposição. Para aderentes que cedem plasticamente, a rotura é ditada pela cedência do

aderente e é novamente atingido um valor de patamar correspondente à cedência do aderente. (Campilho e da Silva In press)

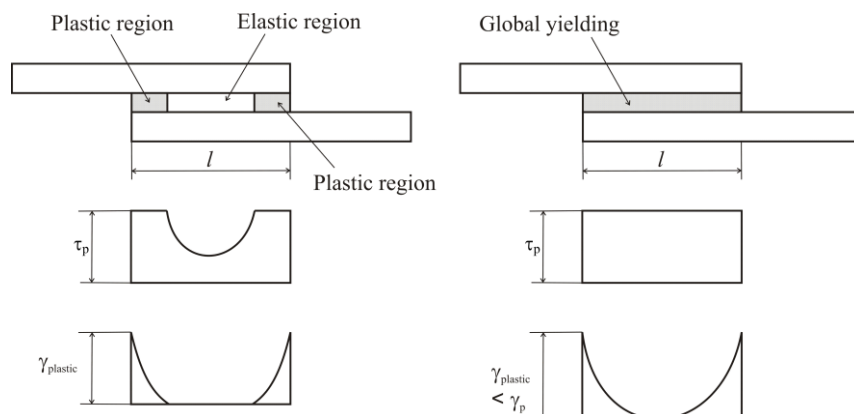


Figura 12 – Ruptura devido à deformação de corte do adesivo (esquerda) e devido à cedência generalizada (direita) (Campilho e da Silva In press).

2.2 Classificação dos adesivos

Os adesivos podem ser classificados por vários métodos. A mais ampla classificação é distinguir entre um adesivo fabricado a partir de produtos que são sintéticos ou naturais. Os adesivos sintéticos são fabricados a partir de materiais polímeros. Os adesivos naturais são fabricados a partir de materiais naturais como subprodutos animais ou de agricultura.

Os adesivos modernos tais como epóxicos, uretanos ou acrílicos que são usados em aplicações estruturais muito exigentes são feitos de polímeros sintéticos. A classificação dos adesivos em sintéticos e naturais é demasiado ampla para muitas aplicações. A indústria usa outros métodos para classificar os adesivos de acordo com os seus objetivos. Essas classificações são feitas por (da Silva et al. 2007):

- Função
- Composição química
- Método de reação
- Forma física
- Custo
- Substratos
- Aplicação

2.2.1 Caracterização dos adesivos estruturais

A classificação funcional define os adesivos como sendo estruturais ou não estruturais. Os adesivos estruturais são materiais de elevada resistência e desempenho. Geralmente, os adesivos estruturais são definidos como aqueles que possuem uma resistência ao corte superior a 5-10 MPa e uma boa resistência aos meios ambientes mais comuns. A sua função principal é a de manter ligadas as estruturas e de serem capazes de resistir a cargas elevadas sem grande deformação.

2.2.2 Tipos de adesivos estruturais

Os principais adesivos estruturais podem ser classificados da seguinte forma (de Moura et al. 2011):

Tabela 1 – Classificação dos adesivos segundo a sua função (de Moura et al. 2011).

ADESIVOS			
Estruturais		Não estruturais	
Fenólicos	fenólicos-vinílicos fenólicos-nitrilo fenólicos-policloropreno	Borrachas sintéticas	silicone policloropreno e nitrilo polisulfureto
Acrílicos	anaeróbicos cianoacrilatos	Poliésteres	
Poliuretano		Termofusíveis	
Poliimida		Inorgânicos	
Epóxido	epóxido-poliamida epóxido-polisulfureto epóxido-fenólicos epóxido-poliuretano epóxido-nitrilo		

2.2.2.1 Adesivos epóxidos

Os adesivos epóxidos são extensamente aplicados na colagem de uma grande variedade de materiais. Estes adesivos possuem uma boa resistência mecânica, não produzem agentes voláteis durante a cura e apresentam reduzida contração. São comercializados sob a forma de monocomponentes ou policomponentes (geralmente dois: resina e endurecedor) baseados, na maioria dos casos, em diglicidil éter de bisfenol A. O processo de cura destes adesivos não necessita da aplicação de pressão, pelo que basta o simples posicionamento das peças a serem coladas. O desenvolvimento deste tipo de adesivos ao longo do tempo,

apresentando elevada rigidez, potenciou o seu uso em muitos tipos de indústria. Estes adesivos apresentam uma enorme diversidade de aplicações, podendo ser empregues na ligação de quase todos os materiais utilizados na construção mecânica. As propriedades dos adesivos de epóxido podem ser modificadas pela adição de outras resinas (poliamida, polisulfido, fenólicas, etc.) ou por um elastómero (poliuretano ou nitrilo).

2.2.2.2 Adesivos fenólicos

Foram os primeiros adesivos estruturais disponibilizados para metais e têm uma longa história na ligação de metais e madeira. São quimicamente idênticos aos adesivos de resorcinol e o mecanismo de cura é o mesmo. Durante o processo de cura, que deve realizar-se a altas temperaturas, ocorre libertação de água. Por tal motivo, os substratos devem ser porosos ou deve-se aplicar uma elevada pressão para evitar o aparecimento de vazios na zona de colagem. Os adesivos fenólicos apresentam em geral um baixo custo e possuem boa resistência mecânica e boa resistência a temperaturas elevadas e aos agentes ambientais. Como restrições, aponta-se a baixa resistência à corrosão por solventes, baixa resistência ao impacto e grande fragilidade. Para a resolução destes problemas têm sido desenvolvidos adesivos que combinam a resina fenólica com uma resina vinílica ou um elastómero (nitrilo ou policloropreno).

2.2.2.3 Adesivos de poliuretano

Os adesivos de poliuretano resultam da reação de um polioliol (ou poliéster-polioliol) com um isocianato e apresentam-se sob a forma de um ou dois componentes, e a cura processa-se lentamente à temperatura ambiente. Possuem uma boa flexibilidade, um bom comportamento a baixas temperaturas, uma boa resistência ao arrancamento, à abrasão e uma boa tenacidade. As limitações principais incluem a elevada sensibilidade às proporções da mistura, a toxicidade do isocianato e a baixa resistência ao corte à temperatura ambiente.

2.2.2.4 Adesivos acrílicos

Dentro dos adesivos acrílicos incluem-se os adesivos anaeróbicos e os cianoacrilatos. Os adesivos anaeróbicos são líquidos monocomponentes que se armazenam em contacto com o ar para manterem a sua forma monomérica. O processo de endurecimento dá-se por uma reação de polimerização do tipo radical-livre, uma vez eliminado o oxigénio. Apresentam

uma resistência mecânica muito variável, uma boa resistência a solventes e, em geral, a sua temperatura máxima de utilização situa-se próximo dos 150°C. Os cianoacrilatos são líquidos monocomponentes que se utilizam sem solventes e que têm uma cura rápida à temperatura ambiente. O processo de cura é influenciado pela humidade relativa existente no meio circundante ou nas superfícies a serem coladas, pelo teor em pH no meio e pela espessura da junta colada. Apresentam excelente resistência à tração mas baixa resistência ao arrancamento, fragilidade e custo elevado.

2.2.2.5 Adesivos de poliimida

São adesivos para aplicações nas quais a temperatura de serviço é bastante elevada (superior a 200°C). Geralmente apresentam-se sob a forma de filmes ou líquidos e o seu custo é bastante elevado. Requerem longos tempos de cura com ciclos de pressão e temperatura elevada, pelo que a aplicação é complexa. Têm uma grande dureza, mas são relativamente frágeis, pouco tenazes e resistem mal a vibrações.

2.3 Previsão da resistência das juntas

No passado, a não existência de modelos de materiais precisos e critérios de rotura adequados, conduziu ao sobredimensionamento das juntas adesivas, que invariavelmente resultou em estruturas mais pesadas e mais caras. Com a disponibilidade de metodologias de previsão, surgiram novas possibilidades para o uso eficiente de juntas coladas. Duas alternativas podem ser escolhidas para análise de juntas adesivas: métodos analíticos e métodos numéricos (ou seja, EF). O estudo sobre juntas adesivas remonta a 1930 com o modelo de Volkersen (Volkersen 1938) que considera um comportamento puramente elástico dos materiais (adesivo e substrato) e a deformação do adesivo só ao corte. No entanto, a formulação analítica das juntas adesivas torna-se mais complexa se considerarmos a deformação plástica do adesivo, ou substratos em compósito, ou substratos de diferentes materiais são utilizados. Os EF são a técnica mais popular para as juntas adesivas, e Adams e seus colaboradores foram pioneiros nesta técnica (Adams e Peppiatt 1974). A abordagem da mecânica contínua para a previsão da resistência em juntas adesivas foi usada na análise inicial, requerendo a distribuição de tensões e um critério de rotura adequado. Uma análise de EF também pode ser usada em conjunto com os critérios da Mecânica da Fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade de tensão ou abordagens de energia, como a técnica de fecho virtual da fenda

(TFVF). No entanto, com estas técnicas de modelação de crescimento da fenda torna-se complicado obter a rotura da junta devido a ter que se repetir a malha durante a análise e o referido custo computacional (Curiel Sosa e Karapurath 2012). Desenvolvimentos importantes foram feitos, e uma deles é a modelação de danos por combinação de EF com elementos de zona coesivos. Esta técnica combina a modelação EF convencional para as regiões que não são esperadas sofrer danos. 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 entre materiais é o Método dos Elementos Finitos Estendido (MEFX), que usa funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

2.3.1 Modelos analíticos

Os métodos de previsão consistem em formulações analíticas, e as análises de Volkersen (Volkersen 1938) e Goland e Reissner (Goland e Reissner 1944) foram os precursores de uma série de estudos teóricos que tiveram a vantagem da simplicidade para atingir os campos de tensão nas estruturas ligadas por adesivo. São modelos simplistas em termos da geometria das estruturas, carregamento, e condições de fronteira, dando soluções elásticas eficientes. Assim, cada estrutura pode ser analisada de forma rápida, ainda que com muito pressupostos incorporados (Panigrahi e Pradhan 2007). Com estes modelos, deformações e tensões podem ser facilmente calculadas, juntamente com a distribuição do momento fletor na estrutura. A resistência foi tipicamente prevista por critérios baseados em tensões ou deformações. Até hoje em dia, estes modelos foram progressivamente substituídas por análises numéricas, embora os estudos teóricos também tenham sido refinados ao longo dos anos em termos de capacidades de modelação, tais como a não-linearidade material da camada adesiva (Hart-Smith 1981) ou análises geométricas não-lineares (Penado 1998).

2.3.2 Métodos numéricos

2.3.2.1 Modelação contínua

Na abordagem da mecânica dos meios contínuos, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previsto por análises EF, são geralmente usados nos critérios de rotura para estimar a resistência dos conjuntos. Isto é conseguido quando os valores previstos, obtidos por critérios baseados em tensão ou deformação (por exemplo, o

critério de tensão normal máxima, CTNM, ou o critério de deformação de corte máxima, CDCM), igualam a resistência da estrutura. Esta abordagem foi prontamente aplicada a juntas adesivas no geral em aplicações estruturais logo após o método de EF e a programação computacional foram disponibilizados (por exemplo, (Harris e Adams 1984)). As vantagens desta técnica quando aplicada à análise de estruturas coladas com ou sem um dano inicial, e sob uma carga arbitrária. Não obstante, estes parâmetros têm uma limitação intrínseca, uma vez que as estruturas coladas costumam ter singularidades de tensão no final das regiões que se sobrepõem, devido a cantos afiados. Como resultado, numa análise de EF a uma estrutura ligada, tensões numa única região aumentam com o refinamento da malha e a convergência não é atingida, dando à malha previsões dependentes (Panigrahi e Pradhan 2007). Ao longo dos anos, foram introduzidas melhorias a esta técnica de modelação, tais como a definição de parâmetros baseados em tensão ou deformação mais complexos para diferentes materiais e mecanismos de fratura, ou combinação com modelos de material contínuo mais realistas, mas ainda assim a dependência da malha não poderia ser resolvida.

2.3.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica contínua assume que a estrutura e o seu material são contínuos. Esta suposição não engloba a existência de materiais ligados com arestas retas, como existem usualmente em juntas adesivas. Consequentemente, a mecânica contínua não dá nenhuma solução a estes pontos singulares, resultando em singularidades de tensão ou deformação. As fendas são o defeito mais comum em estruturas, para as quais a mecânica da fratura foi desenvolvida. Na mecânica da fratura, é bem aceite que as tensões calculadas usando a mecânica contínua são singulares (infinitas) na ponta da fenda. Com as atuais teorias sobre a mecânica, tal singularidade sempre existe quando o ângulo da fenda é inferior a 180° . Este resultado foi encontrado por (Williams 1959) para as singularidades de tensão num componente com entalhe. Este argumento é igualmente aplicável para a singularidade de tensão em dois materiais ligados entre si contendo arestas retas. A mecânica da fratura tem sido aplicada com sucesso para muitos problemas de engenharia nos últimos anos. Muitos estudos que lidam com juntas adesivas usam a taxa de libertação da energia de deformação, G , e respetivo valor crítico ou tenacidade à fratura, G_c (Fernlund e Spelt 1991) em vez de fatores de intensidade de tensão. Estes não são facilmente determináveis, quando a fenda cresce na ou perto de uma interface, no entanto, a fratura de juntas adesivas tipicamente ocorre em modo misto por causa da variação das propriedades entre diferentes

materiais e o sistema complexo de tensão. Os critérios de rotura em modo misto podem ser desenvolvidos de uma maneira análoga aos critérios de rotura clássicos, embora deva ser introduzido o conceito de superfície (ou envelope) de fratura, que representa a variação de G em função da mixicidade do carregamento. A Figura 13 mostra as tensões normais na extremidade de uma fenda numa placa com uma largura infinita dada pela modelação contínua. Fisicamente, as tensões no eixo dos yy , σ_y , na ponta da fenda A têm de ser finitas (ao invés de infinitas, como a teoria prevê). No entanto, as tensões σ_y na fenda e fora da ponta da fenda (representado como B na Figura 13) são nulas devido às superfícies livres. Consequentemente, ocorre uma descontinuidade de σ_y no ponto A a não ser que σ_y seja nula neste ponto. Tal distribuição de tensões não pode ser obtida pela modelação contínua, que requer que todas as tensões sejam finitas. Como resultado, as tensões na ponta da fenda não são definidas (sendo infinitas).

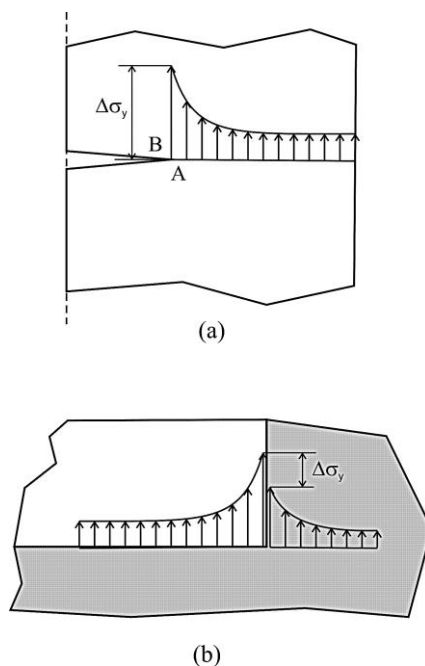


Figura 13 – Descontinuidades de tensões na (a) ponta da fissura e (b) no canto reentrante (da Silva e Campilho 2012).

2.3.2.3 Mecânica do dano

As técnicas avançadas de modelação que estão atualmente disponíveis garantem previsões precisas de rotura, superando as limitações das abordagens anteriores. De um modo geral, os danos estruturais podem ocorrer por microfendas ao longo de um volume finito ou região interfacial, reduzindo a transferência de carga. Uma simulação de EF com base em

modelação contínua sólida gera indevidamente plastificação generalizada nos elementos sem evolução do dano (a curva $abcd'$ na Figura 14), enquanto um modelo de mecânica do dano pode realmente induzir danos nos elementos por redução das cargas transferidas (a curva $abcd$ na Figura 14). Como resultado, é permitida a simulação do dano passo-a-passo e da fratura no caminho pré-definido da fenda ou dentro de uma região arbitrariamente finita (Duan et al. 2004). Embora esses métodos estejam disponíveis há bastante tempo, não apenas para estruturas coladas, só que mais recentemente estes foram aplicados em estruturas híbridas. Apesar deste fato, este ainda é um campo inovador sob intenso desenvolvimento, a respeito de técnicas mais precisas de modelação, métodos de estimação de parâmetros materiais confiáveis e simples, aumento de robustez e eliminação de problemas de convergência (Liljedahl et al. 2006). As técnicas de modelação de dano podem ser locais ou à base de continuidade. Dentro da modelação de dano local, o dano ocorre numa linha de volume zero ou uma superfície (análise a duas dimensões - 2D - ou a três dimensões - 3D, respetivamente). Simula uma rotura interfacial entre materiais, por exemplo, entre a ligação adesiva e o aderente, a fratura interlaminar de compósitos laminados ou a interface entre as fases sólidas de materiais. Por modelação contínua, o dano se estende por uma área ou volume (análise 2D ou 3D, respetivamente), para simular uma rotura coesiva ou para modelar uma fratura coesiva do adesivo.

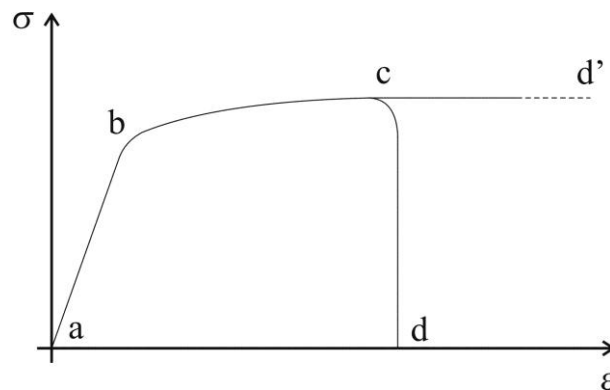


Figura 14 – Resposta uniaxial σ - ϵ típica de um material ou estrutura dúctil (da Silva e Campilho 2012).

2.3.2.3.1 Modelos de dano coesivo

A implementação computacional dos métodos da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) teve grande sucesso há algumas décadas, mas estes foram limitados a pequena plastificação na ponta da fenda. Além disso, os adesivos modernos desenvolvem zonas

plásticas sobre carga, que podem ser maiores do que a espessura aderente. Os MDC (Figura 15) foram desenvolvidos no final de 1950 / início de 1960 (Barenblatt 1959) para descrever os danos sob cargas estáticas na zona coesiva processada, à frente da aparente ponta da fenda, dando uma solução promissora para métodos mais refinados para prever danos em estruturas ligadas. Os MDC foram então amplamente testados, para simular o início e a propagação da fenda em problemas de rotura coesiva e interfacial ou delaminações em compósitos. Os MDC podem contar com elementos de mola ou mais convencionalmente com elementos coesivos (Feraren e Jensen 2004), e eles podem ser facilmente incorporados em análises de EF convencionais para modelar o comportamento da fratura em vários materiais, incluindo em juntas adesivas (Ji et al. 2010). O principal conceito dos MDC é que uma ou múltiplas interfaces/regiões da fratura podem ser introduzidas nas estruturas artificialmente, no qual o crescimento do dano é permitido pela introdução de uma possível descontinuidade no campo da deformação. Isto é possível pela definição de leis de tração-separação para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis dos MDC são aplicadas entre os nós de pares de elementos coesivos, e eles podem conectar nós de elementos que representam diferentes materiais ou diferentes camadas em compósitos. Podem ser aplicadas diretamente entre dois materiais sem contato para simular uma tira fina, por exemplo, para simular uma ligação adesiva. Os MDC fornecem uma reprodução macroscópica de dano pela relação entre a tensão e o deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda, que se baseia em parâmetros de grande escala que regem o processo de crescimento da fenda, como as energias de fratura. Estes modelos simulam a evolução da resistência e o amaciamento das tensões até à rotura, para ter em conta a degradação progressiva das propriedades do material. As leis de tração-separação são tipicamente construídas por relações lineares em cada uma das fases de carregamento (Yang e Thouless 2001), embora uma ou mais fases possam ser definidas diferentemente para uma representação mais precisa do comportamento dos materiais.

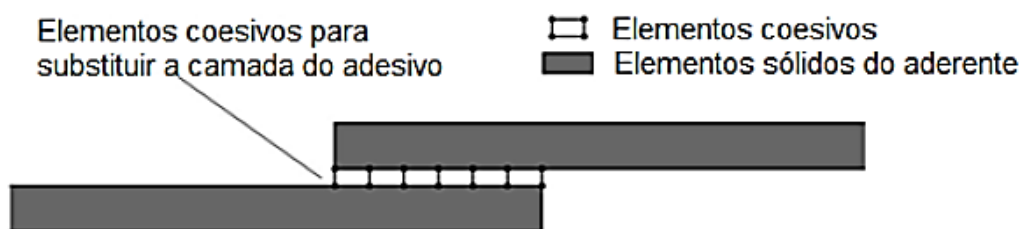


Figura 15 – Utilização de elementos coesivos para modelação da camada de adesivo numa JSS (Neto 2011).

2.3.2.3.2 *Abordagem alternativa aos modelos de dano coesivo*

Esta secção descreve técnicas alternativas aos modelos coesivos de dano (AMDC), isto é, com exceção da modelação dos MDC, que pode ser classificado dentro do quadro contínuo, para se modelar volumes finitos de material. Nestas metodologias, um parâmetro de dano é estabelecido para modificar a resposta constitutiva de materiais pela depreciação de rigidez ou resistência, por exemplo, para ligações adesivas finas (Khoramishad et al. 2010), ou delaminações compostas ou rotura da matriz (Daudeville e Ladevèze 1993), para representar a gravidade dos danos materiais durante o carregamento. Esta variável de estado pode ser usada em uma lei de evolução de dano, para modelar a absorção de dano da pré-fenda e o crescimento da fenda. As variáveis de dano podem ser categorizadas em dois grupos principais: (1) variáveis que preveem a quantidade de dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, mas que não se relacionam diretamente com o mecanismo de dano, e (2) variáveis ligadas à definição física de um tipo específico de danos, tais como porosidades ou área relativa de micro-cavidades (Voyiadjis e Kattan 2005). Por AMDC, o crescimento de dano é definido como uma função da carga para a modelação estática ou a contagem cíclica para análises de fadiga. Para juntas coladas, pouco trabalho é publicado neste campo. Comparado à fadiga dos MDC, técnicas das AMDC não fornecem uma clara distinção entre as fases de iniciação da fadiga e da propagação, embora elas possam dar uma base para a análise preditiva (Khoramishad et al. 2010). No entanto, a evolução do dano antes do crescimento da macro-fenda pode ser simulado. Por outro lado, a modelação de dano com os MDC de fadiga, se restringe a caminhos pré-definidos de fenda e, em aplicações específicas, AMDC pode ser recomendado se o dano é mais generalizado ou o caminho de rotura não é conhecido (Shenoy et al. 2010).

2.3.2.4 **Método de elementos finitos estendido**

O método de elementos finitos estendido (MEFX) é uma melhoria recente do método dos EF para modelar o crescimento de dano em estruturas. Ele usa leis de dano para a previsão da fratura, que são baseadas na maior resistência por parte dos materiais para a iniciação de dano e deformação para a avaliação de rotura (definido pela tenacidade à tração, G_{IC}), em vez dos valores de resistência coesiva à tração (t_n^0) / resistência coesiva ao corte (t_s^0) ou o deslocamento correspondente a t_n^0 (δ_n^0) / deslocamento correspondente a t_n^0 (δ_s^0) utilizado para os MDC. O MEFX tem como vantagem sobre a modelação por MDC, uma vez que

não necessita da fenda para seguir um caminho pré-definido. As fendas podem crescer livremente dentro de uma região de um material (ver Figura 16), sem o requisito da malha coincidir com a geometria das discontinuidades, nem voltar a criar a malha perto da fenda (Mohammadi 2008). Este método é uma extensão à modelação EF, cujas características fundamentais foram introduzidas no final dos anos 90 por Belytschko e Black (1999). O MEFX baseia-se no conceito de partição da unidade e pode ser implementado nos EF tradicionais, através da introdução de funções locais de enriquecimento para os deslocamentos nodais perto da fenda, para permitir o seu crescimento e a separação entre as faces da fenda (Moës et al. 1999). Devido ao crescimento da fenda, a ponta da fenda muda continuamente a sua posição e orientação, em função das condições de carga e geometria da estrutura, simultaneamente à criação das funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos EF em redor da extremidade da fenda.

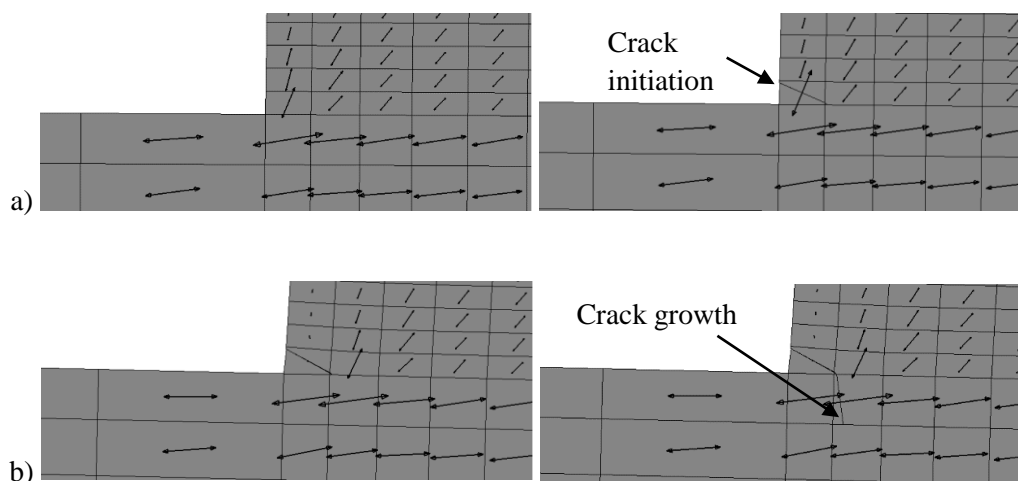


Figura 16 – Falha progressiva de uma JSS usando o MEFX (as setas representam as direções da deformação máxima principal): início do dano dentro do adesivo nas arestas da sobreposição (a) e o crescimento do dano no aderente (b) (Campilho et al. 2011).

2.4 Juntas com defeitos internos na zona de ligação

Na literatura é abordado e estudado a influência de vários tipos de defeitos internos na ligação de juntas adesivas. O trabalho realizado por de Moura et al. (2006) avalia a influência de defeitos retangulares no comportamento mecânico de JSS feitas de carbono-epóxico. Para juntas com um L_0 de 12,5 mm e os defeitos centrados obtidos com Teflon[®] têm 1, 2 e 4 mm de comprimento (Figura 17).

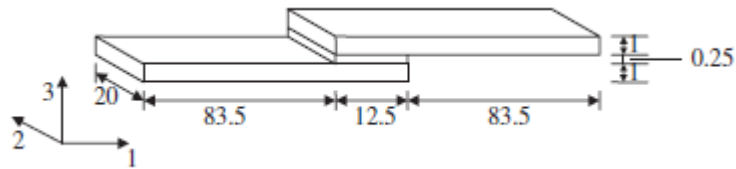


Figura 17 – Geometria e dimensões da junta (de Moura et al. 2006).

A Figura 18 mostra a comparação entre os gráficos P - δ obtidos numérica e experimentalmente para as juntas sem defeito e com defeitos de 1, 2 e 4 mm de comprimento. Observa-se que erros muito baixos ($<3.2\%$) foram obtidos relativamente aos valores para a força máxima ($P_{\text{máx}}$) entre as duas abordagens. Esses valores, como esperado, baixam consoante o aumento do tamanho do defeito, chegando a ser 42% inferior nas juntas com defeito de 4 mm comparativamente com as juntas sem defeito. Na Figura 19 e na Figura 20 pode-se observar valores mais elevados de tensões nas extremidades da sobreposição do que nas extremidades dos defeitos. Também se observa um valor de tensão superior na extremidade esquerda da sobreposição comparativamente com a extremidade direita, isto deve-se ao facto de se estar a fazer uma análise na interface inferior do adesivo/carbono-epóxico.

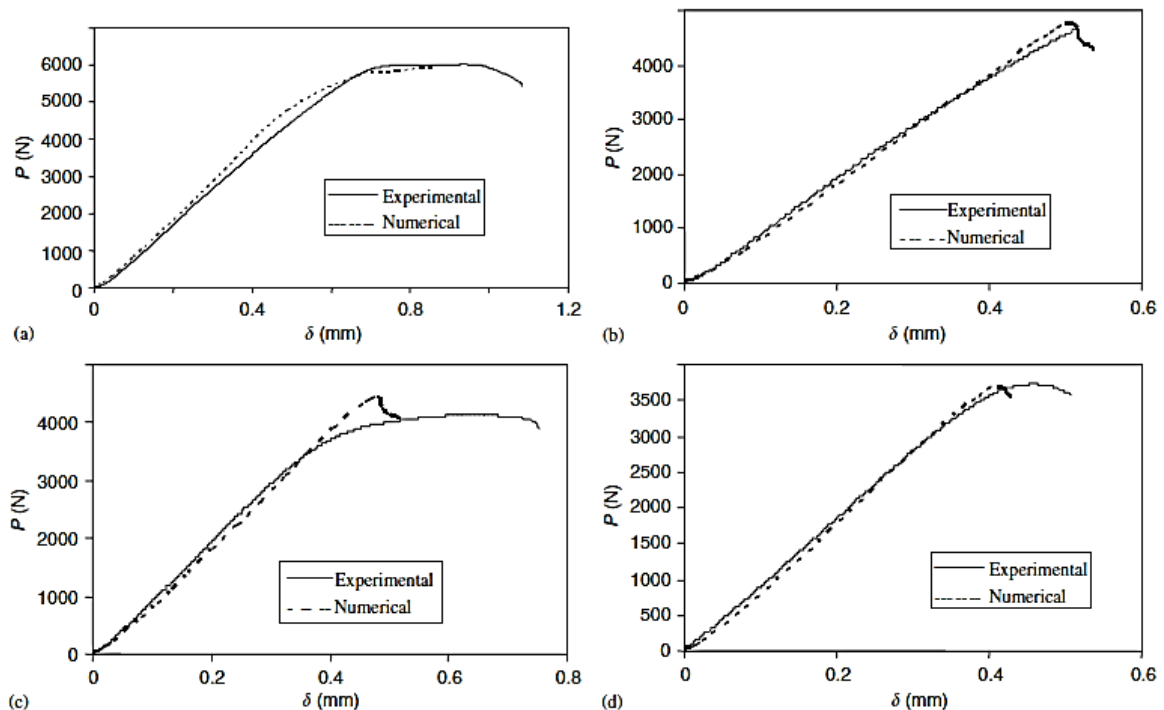


Figura 18 – Comparação entre as curvas P - δ obtidas numericamente e experimentalmente para as juntas sem defeito (a) e para as juntas com defeitos de 1 mm (b), 2 mm (c) e 4 mm (d) (de Moura et al. 2006).

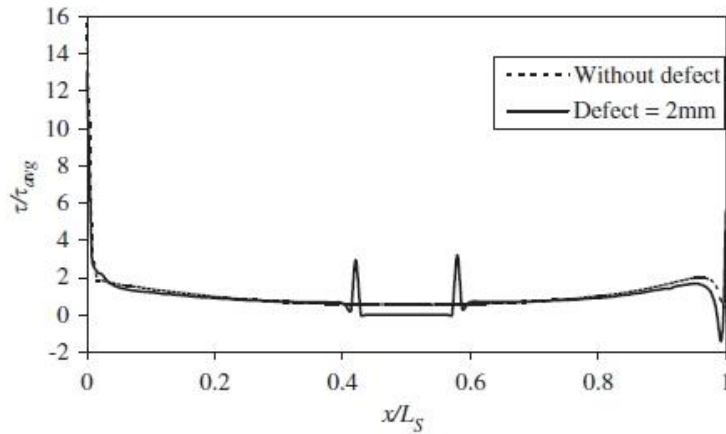


Figura 19 – τ_{xy} normalizadas ao longo do L_0 para as juntas com defeito de 2 mm (de Moura et al. 2006).

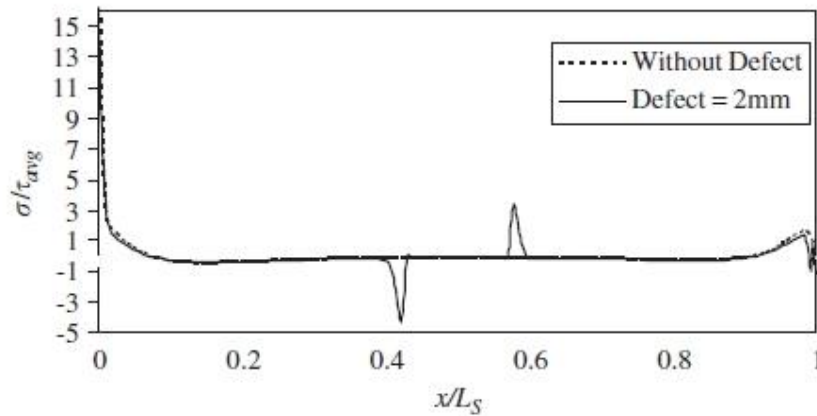


Figura 20 – σ_y normalizadas ao longo do L_0 para as juntas com defeito de 2mm (de Moura et al. 2006)

Relativamente à rotura das juntas, dois modos de rotura foram observados e geralmente apareciam na mesma superfície de rotura. A degradação começa coesivamente numa das extremidades da sobreposição e muito perto da interface do adesivo com o aderente. Na verdade, é concluído em estudos anteriores (Gonçalves et al. 2002, Magalhães et al. 2005), que as concentrações de tensões na interface adesivo/aderente são superiores comparativamente com aquelas verificadas a meio da camada do adesivo ou no aderente. Consequentemente, numa junta bem preparada, o início da rotura é provável de ocorrer na interface adesivo/aderente. No entanto, após alguma propagação, o modo de rotura muda para interlaminar, ocorrendo na primeira camada de um dos aderentes (Figura 21).

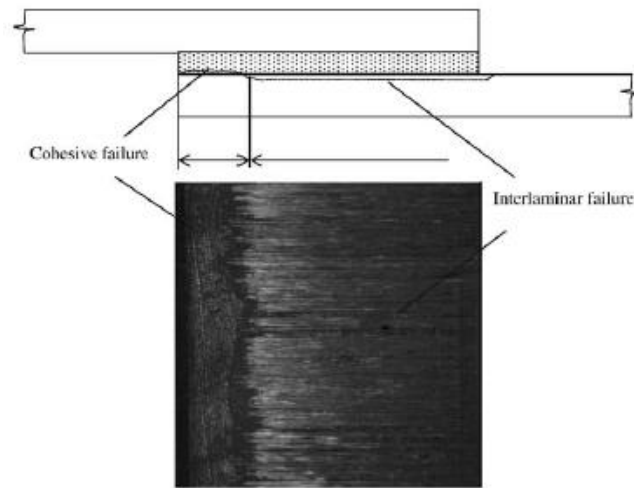


Figura 21 – Os dois modos de rotura observados (de Moura et al. 2006).

Esta alteração no modo de rotura pode ser explicada pela redução área efetiva colada e pelas forças de arrancamento induzidas pela rotação da junta. É de realçar que estes tipos de rotura ocorrem quase à $P_{máx}$. Isto significa que a força de rotura pode ser definida como a que inicia a rotura coesiva. Estes modos de rotura também foram observados nas juntas com defeitos.

O trabalho realizado por (Xu e Wei 2012) utilizou a simulação por EF para estudar a resistência de JSS com substratos metálicos e defeitos na camada de adesivo. Foram considerados três tipos de defeitos: uma área da sobreposição sem adesivo (*local debonding*), uma área da sobreposição com fraca colagem (*weak bonding*) e a colocação de vazios na zona adesiva (*voids*), como se pode observar na Figura 22.

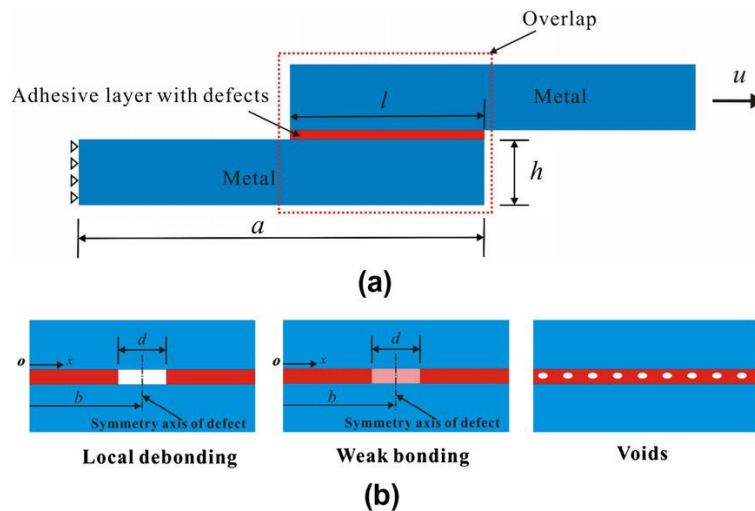


Figura 22 – Geometria da junta e os vários tipos de defeitos aplicados (Xu e Wei 2012).

Foi desenvolvido um método numérico para os dois primeiros tipos de defeitos utilizando um modelo coesivo modificado por sub-rotinas definidas pelo utilizador. Este modelo é realizado para se considerar a influência do tamanho do defeito e a sua localização. Além disso, o modelo de Gurson–Tvergaard–Needleman (GTN) foi empregue para simular o adesivo com espaços vazios, considerando-se a influência do tamanho do vazio. A Figura 23 mostra a variação da força normalizada em função do deslocamento normalizado para as juntas com defeitos comparativamente com os resultados obtidos para a junta sem defeito. Os resultados mostram que a resistência geral das juntas diminui à medida que o tamanho do defeito aumenta. Especialmente, as propriedades adesivas de fratura e o tamanho da região de fraca colagem apresentaram influências combinadas na resistência das juntas. A resistência residual das juntas foi significativamente influenciada por propriedades de fratura do adesivo fraco quando a área fracamente ligada é relativamente maior. Os resultados obtidos forneceram princípios fundamentais para a avaliação da resistência de juntas adesivas com defeitos na camada de adesivo.

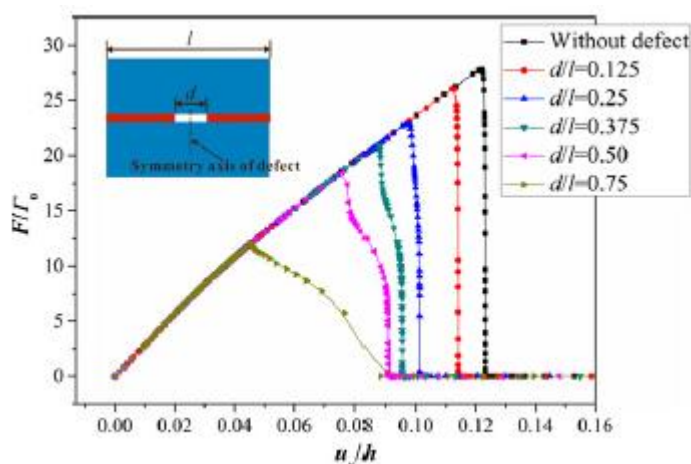


Figura 23 – Curvas de força normalizada em função do deslocamento normalizado para os tamanhos de defeitos d/l (Xu e Wei 2012).

O trabalho realizado por Karachalios et al. (2013) aborda a influência de dois tipos de defeitos, retangular e circular, na resistência de JSS coladas com dois adesivos de características diferentes, um dúctil (AV119) e um frágil (MY753). Relativamente aos substratos, foram utilizados três aços com diferentes níveis de resistência. Para os defeitos retangulares, dois L_0 foram mais usados (25 e 40 mm), ao passo que para os defeitos circulares só o L_0 de 25mm foi testado (ver Figura 24). O defeito artificial consistiu na aplicação de uma camada fina de Teflon® (0,1 mm) no meio da zona de sobreposição,

criando assim uma irregularidade do tamanho requerido. Os defeitos retangulares cobrem a largura toda da junta (ver Figura 25), ao passo que os defeitos circulares só cobrem uma porção, dependendo do diâmetro (ver Figura 26).

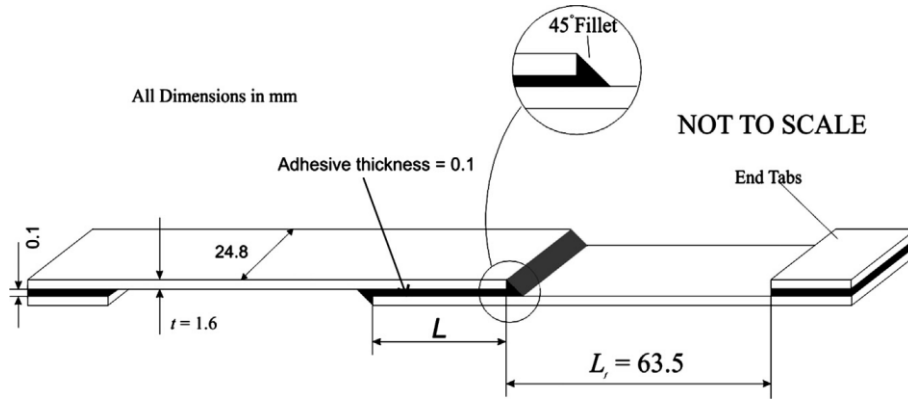


Figura 24 – Desenho e dimensões da junta (Karachalios et al. 2013).

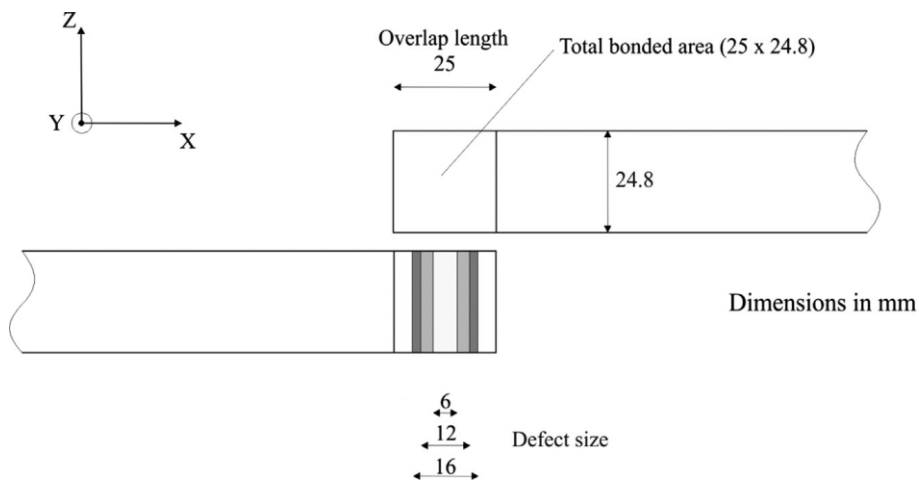


Figura 25 – Localização do defeito retangular (Karachalios et al. 2013).

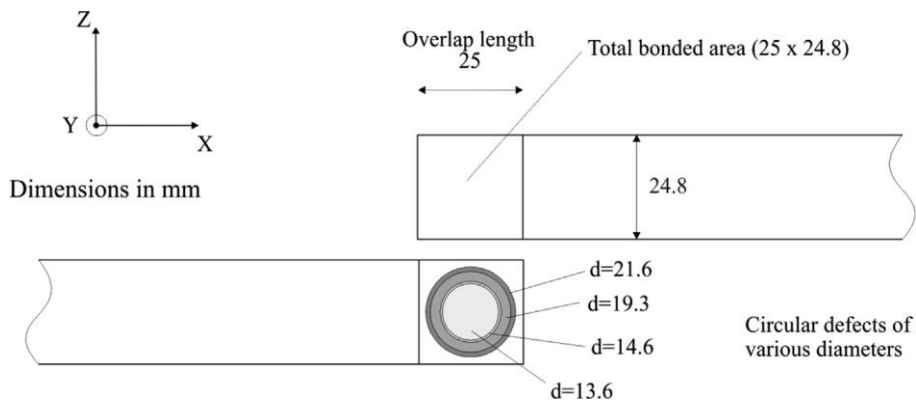


Figura 26 – Localização do defeito circular (Karachalios et al. 2013).

Em termos de conclusões obtidas do trabalho, para o adesivo dúctil foram alcançados níveis diferentes de resistência para as JSS, dependendo das propriedades do material do substrato. Foi observado um decréscimo quase linear na resistência das juntas à medida que o tamanho de defeito aumenta, no caso do substrato de aço de alta resistência (Figura 27 (a), curva azul). Relativamente ao aço intermédio e ao aço macio, registou-se uma descida não linear na resistência (Figura 27 (b) e (c), respetivamente). Para pequenos defeitos, não há uma influência significativa. No entanto, à medida que o tamanho de defeito aumenta, é registada uma rápida descida na resistência das juntas.

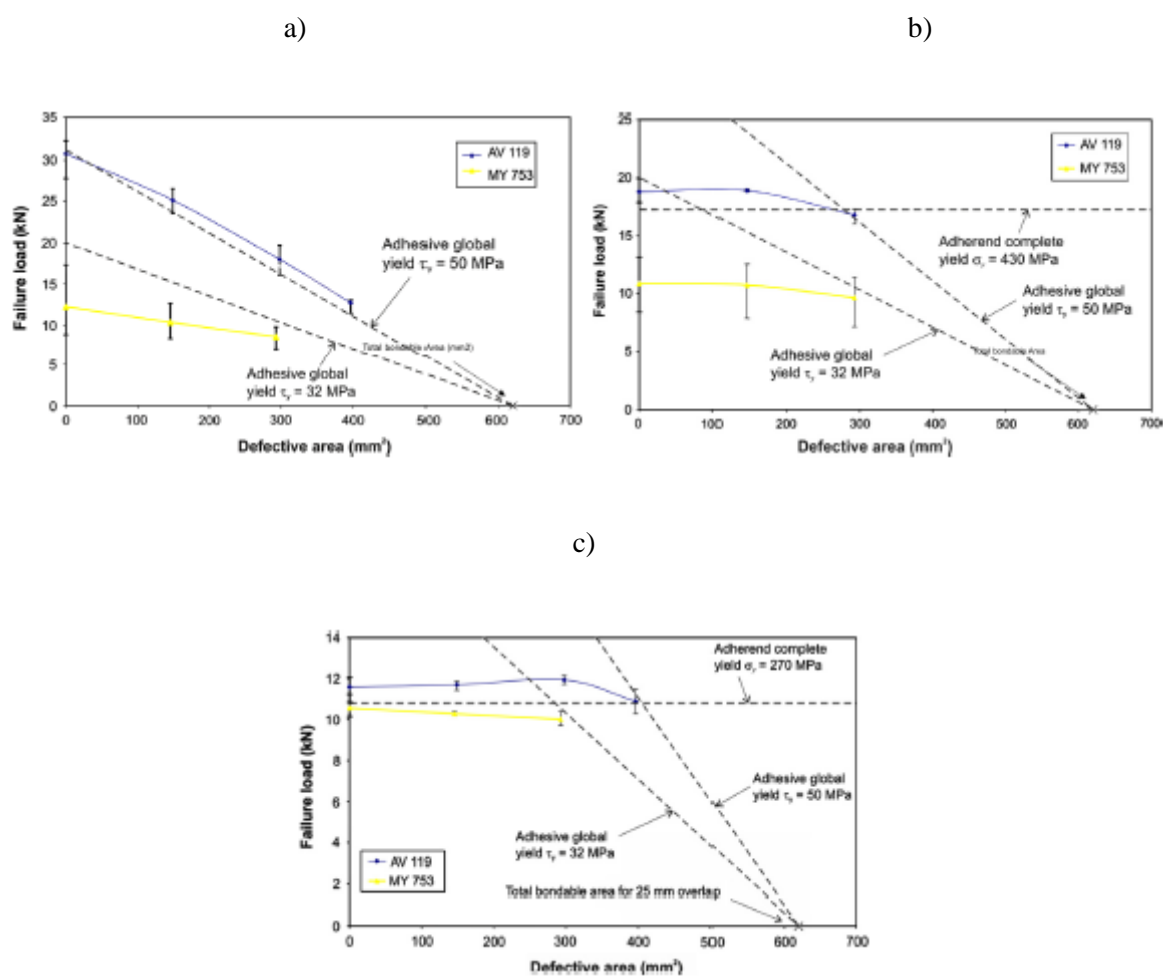


Figura 27 – Variação da resistência em ordem ao tamanho de defeito para JSS coladas com os dois adesivos, com $L_0 = 25$ mm, para os substratos de aço de alta resistência (a), aço intermédio (b) e aço macio (c).

A situação é ligeiramente diferente quando o adesivo é frágil. Para substratos que não cedem plasticamente, a redução na resistência à medida que o tamanho de defeito aumenta, não é proporcional para pequenos defeitos, indicando que as extremidades da junta tornam-

se mais importantes devido às deformações locais excederem os valores limite do adesivo. Para adesivos frágeis com substratos dúcteis (aço macio), acontece o mesmo do que com o adesivo dúctil. A rotura é dominada pelas extremidades da sobreposição devido à plasticidade dos aderentes controlar o processo de rotura. Há alguma dependência relativamente à área colada mas só para valores grandes de defeito. No caso de a rotura ser dominada pela área colada, a forma do defeito (retangular ou circular) não tem influência para a resistência da junta, Sendo que o mais relevante é o tamanho da zona colada.

3 Trabalho Experimental

3.1 Materiais

3.1.1 Substratos

Neste trabalho será utilizado um compósito de matriz polimérica de resina epóxida reforçada com fibra de carbono (*Carbon-fiber reinforced plastic* ou CFRP), pré-impregnada e unidirecional (SEAL[®] Texipreg HS 160 RM). Os plásticos reforçados a fibras de carbono são os materiais de excelência em aplicações de alto desempenho como no desporto de competição ou na indústria aeronáutica, onde o fator mais decisivo é a resistência, rigidez específica e estruturas leves.

Tabela 2 – Propriedades elásticas ortotrópicas do CFRP, com as fibras alinhadas unidireccionalmente (Campilho et al. 2005).

<i>Propriedades do CFRP</i>		
$E_x=1,09E+05$ MPa	$\nu_{xy}=0,342$	$G_{xy}=4315$ MPa
$E_y=8819$ MPa	$\nu_{xz}=0,342$	$G_{xz}=4315$ MPa
$E_z=8819$ MPa	$\nu_{yz}=0,380$	$G_{yz}=3200$ MPa

3.1.2 Adesivos

As propriedades dos adesivos usados neste trabalho foram determinadas em trabalhos anteriormente realizados. Os adesivos selecionados para este trabalho foram o adesivo epóxido frágil Araldite[®] AV138 e o adesivo poliuretano dúctil Sikaforce[®] 7752.

3.1.2.1 Adesivo Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138/HV988 é um adesivo frágil, conforme se pode observar nas curvas tensão-deformação (σ - ε) da Figura 28. Trata-se de um adesivo epóxico, que se apresenta sob forma de líquido de dois componentes, a resina Araldite® AV138 e o endurecedor HV988. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100g/40g, respetivamente. Estas informações foram retiradas da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante. Na Tabela 3 apresentam-se os parâmetros relevantes do adesivo.

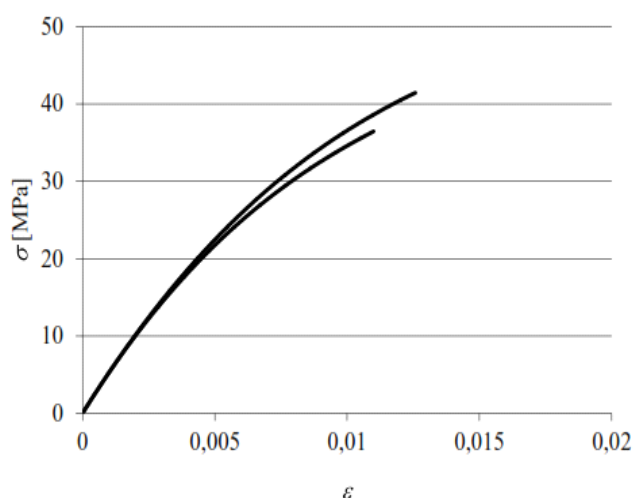


Figura 28 – Curvas σ - ε de provetes maciços de Araldite® AV138 (Neto et al. 2012).

Tabela 3 – Propriedades do adesivo Araldite® AV138 (Neto et al. 2012, Campilho et al. 2013)

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson, ν^b	0,35
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura à tração, σ_r [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura à tração, ε_r [%]	1,21±0,10
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura ao corte, τ_r [MPa]	30,2±0,40
Deformação de rotura ao corte, γ_r [%]	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 (Neto 2011)	
^b valor do fabricante	

3.1.2.2 Adesivo Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 é um adesivo dúctil, conforme se pode observar na curva σ - ε da Figura 29. 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. Estas informações foram retiradas da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante. Na Tabela 4 apresentam-se as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo.

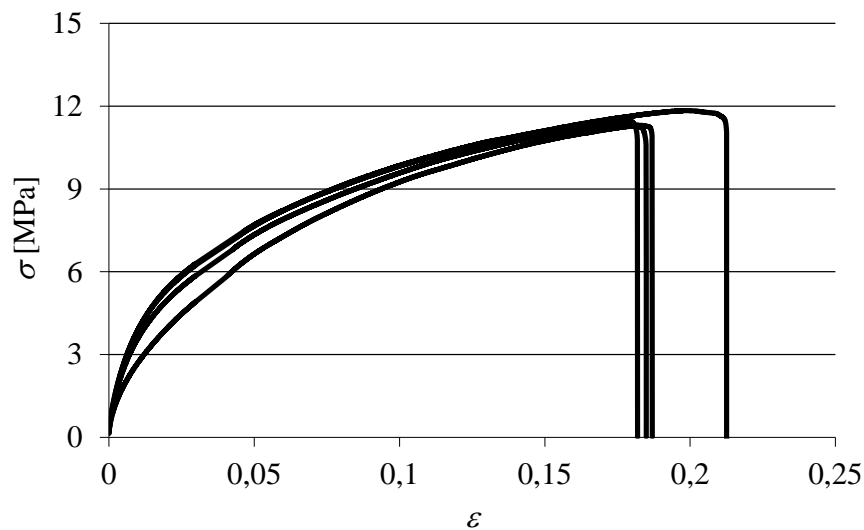


Figura 29 – Curvas σ - ε de provetes maciços de Sikaforce® 7752 (Faneco 2014).

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 obtidas 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 (Fernandes et al. 2015).

Tabela 4 – Propriedades do adesivo Sikaforce 7752® (Azevedo 2014).

Propriedades	SikaForce® 7752
Módulo de <i>Young</i> , E [GPa]	0,49±0,09
Coefficiente de <i>Poisson</i> , ν ^a	0,30
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	3,24±0,48
Tensão de ruptura à tração, σ_r [MPa]	11,48±0,25
Deformação de ruptura à tração, ε_r [%]	19,18±1,40
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	0,19±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	5,16±1,14
Tensão de ruptura ao corte, τ_r [MPa]	10,17±0,64
Deformação de ruptura ao corte, γ_r [%]	54,82±6,38
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	2,36±0,17
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	5,41±0,47
^a valor do fabricante	

3.2 Procedimento experimental

3.2.1 Geometria das juntas

Para este trabalho foram feitas oitenta JSS, em que quarenta foram coladas com o adesivo Araldite® AV138 e as restantes quarenta com o adesivo Sikaforce® 7752. Para cada adesivo, vinte juntas têm o L_0 de 25mm (ver Figura 30) e para as outras vinte, o L_0 de 50mm (ver Figura 31). Para cada L_0 , cinco juntas não têm qualquer defeito, as restantes quinze juntas têm 25%, 50% e 75% de defeito (ver Figura 32 e Figura 33).

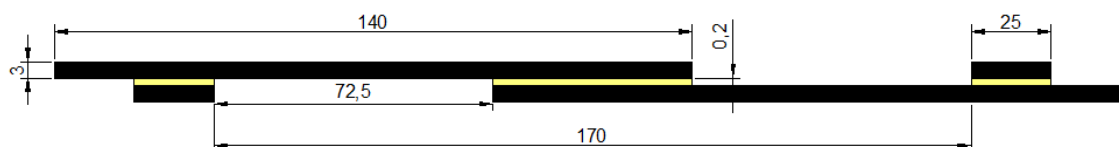


Figura 30 – Geometria e dimensões das juntas de L_0 de 25 mm.

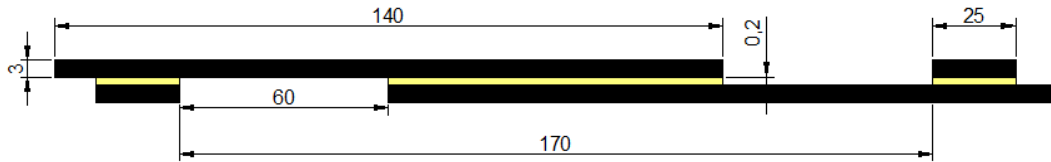


Figura 31 – Geometria e dimensões das juntas de L_0 de 50 mm.

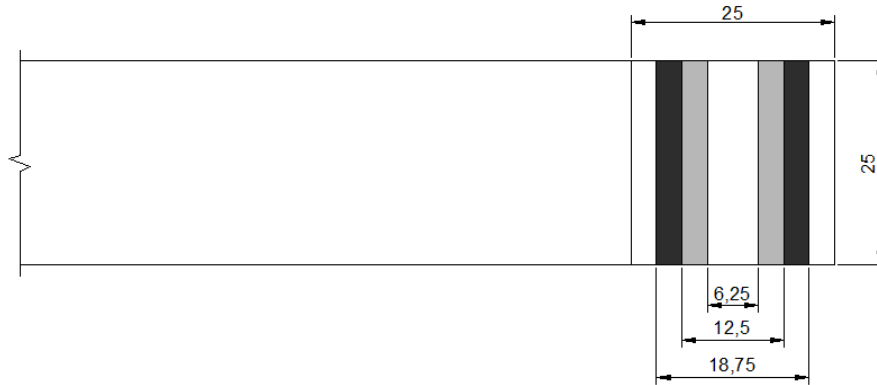


Figura 32 – Localização e dimensões do defeito utilizado na junta de L_0 de 25 mm.

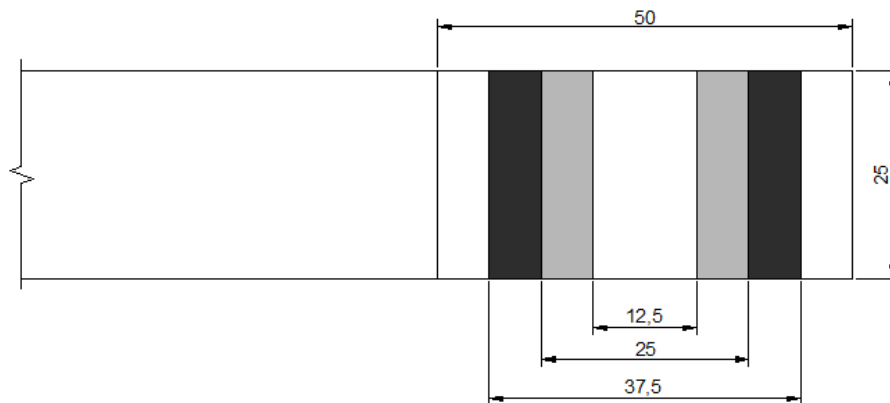


Figura 33 – Localização e dimensões do defeito utilizado na junta de L_0 de 25 mm.

3.2.2 Processo de fabrico

3.2.2.1 Fabrico das placas de compósito

Fabricaram-se oito placas de compósito de carbono-epóxico com 3 mm de espessura, para posteriormente se cortar os substratos necessários. Foi utilizado pré-impregnado unidirecional da SEAL[®] Texipreg HS160 RM para o fabrico das placas com uma sequência de empilhamento de 0°. O fabrico das placas seguiu os seguintes passos:

1. Retirou-se o rolo de compósito de carbono-epóxico da arca congeladora, deixando-o estabilizar à temperatura ambiente por alguns minutos.
2. Com o auxílio de uma chapa metálica 300×300 mm², posicionou-se corretamente a régua para se proceder ao corte (Figura 34 a)).
3. Depois de dimensionar as folhas (300×610 mm²), cortou-se 10 tiras com o auxílio de um x-ato, como se pode ver na Figura 34 b).

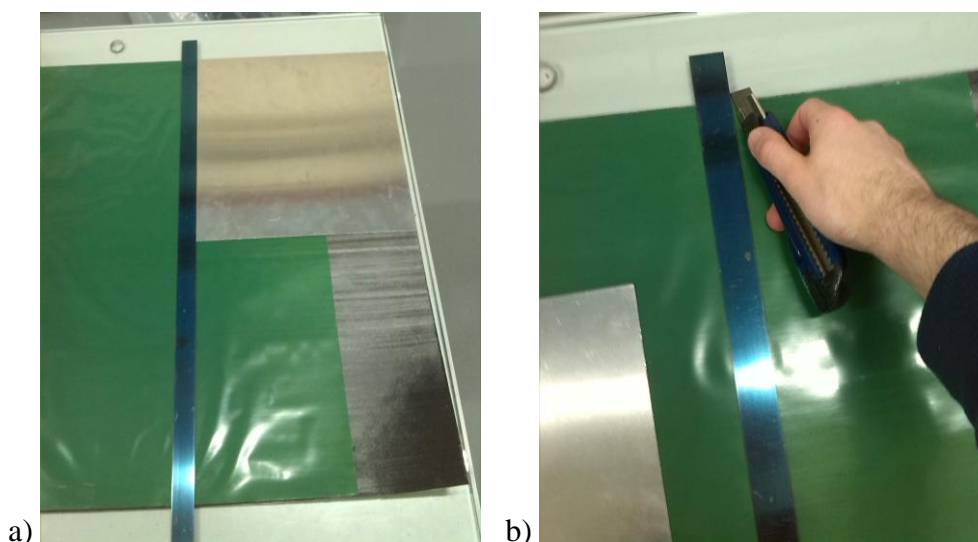


Figura 34 – Posicionamento correto da régua (a) e corte das tiras de carbono-epóxico com auxílio do x-ato (b).

4. Após se terem 10 folhas (300×610 mm) cortaram-se estas a meio de modo a se obter 20 folhas (300×305 mm).
5. De seguida efetuou-se o empilhamento, tendo em atenção que no presente caso a sequência de empilhamento de todas as camadas é 0°. Inicialmente, coloca-se as duas folhas de carbono-epóxico a colar, em cima da mesa de trabalho, e com uma pistola de calor passar 2 vezes por cada folha (Figura 35).
6. Depois, com cuidado, sobrepor uma sobre a outra, e com a mão comprimi-las.
7. Para evitar a formação de vazios entre camadas, comprimir com uma peça metálica as folhas em questão.



Figura 35 – Aplicação de calor nas folhas de carbono-epóxico através da pistola de calor.

8. Com um x-ato, no canto da folha de carbono-epóxico, retirar a folha de revestimento num ângulo de 45°, garantido que sai toda de uma vez (Figura 36).



Figura 36 – Remoção da folha de revestimento com o x-ato.

9. Repetir os quatro passos anteriores até se empilharem 20 camadas de carbono-epóxico, ficando com uma espessura de 3,30 mm (espessura de carbono-epóxico + espessura da folha inferior e superior) (Figura 37).

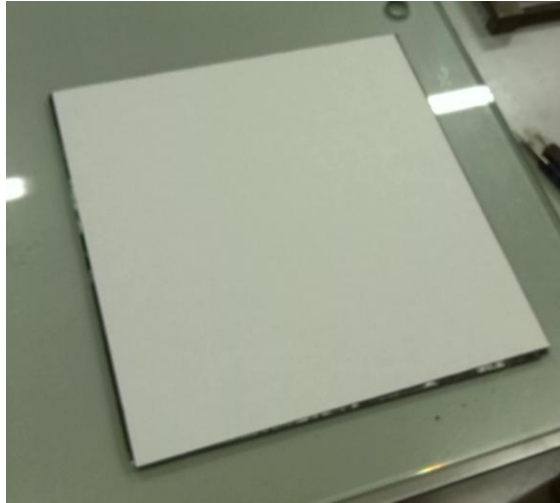


Figura 37 – Aspeto final depois do empilhamento.

10. Depois da placa estar pronta, é preciso preparar o molde. Primeiro, com uma espátula remover qualquer vestígio de resina agarrado às placas, moldura ou tiras metálicas, que tenha restado de utilizações anteriores.
11. Depois, aplicar desmoldante às duas placas, à moldura de 3mm e às quatro tiras metálicas de 0,3mm. Repetir este processo 3 vezes de cada lado (Figura 38).



Figura 38 – Mesa de trabalho com as partes do molde para a aplicação do desmoldante.

12. Por fim, posicionar a placa de carbono-epóxico no molde e colocar na prensa de pratos quentes INTOCO (Figura 39).



Figura 39 – Posicionamento da placa de carbono-epóxico no molde.

3.2.2.2 Curas das placas

As placas foram colocadas na prensa de pratos quentes INTOCO (Figura 40), para serem submetidas a um ciclo térmico, tendo como parâmetros de controlo a pressão e a temperatura. As placas foram submetidas a um ciclo térmico (ver Figura 41), recomendado pelo fabricante, a uma pressão de 30 bar. O ciclo começa com 1 h a 148°C, seguida de 1 h a 140°C, deixando depois arrefecer a placa até à temperatura ambiente (20°C). Por vezes foi necessário, abrir a água para aumentar a velocidade de arrefecimento. A partir dos 50°C, retirou-se a placa da prensa, deixando-a a arrefecer ao ar livre até à temperatura ambiente.



Figura 40 – Prensa de pratos quentes INTOCO (Neto 2011).

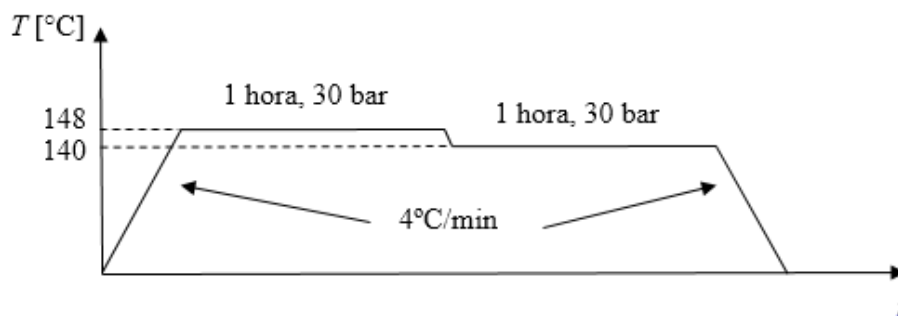


Figura 41 – Ciclo térmico para a cura das placas de carbono-epóxico.

3.2.2.3 Corte das placas

As placas de compósito foram cortadas com as dimensões finais necessárias para os provetes. Para este efeito utilizou-se a máquina de corte BATISTI MECCANICA s.r.l DV25 (Figura 42) existente nas Oficinas Mecânicas do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Esta máquina é constituída por um disco de corte com revestimento de diamante refrigerada a água e uma mesa deslizante. Começou-se por retirar as folhas de revestimento das placas de carbono. Depois, deu-se um corte vertical e um horizontal nos bordos da placa, para se obter duas arestas a 90°. Por fim, procedeu-se ao corte dos provetes. Para garantir que os provetes ficavam com a mesma largura colocou-se um calço para servir de apoio de encosto.



Figura 42 – Máquina de corte BATISTI MECCANICA s.r.l DV25 (Neto 2011).

3.2.2.4 Preparação das superfícies dos provetes

As superfícies de ligação foram preparadas por abrasão manual com lixa grossa. Após a remoção da película superficial (Figura 43), passou-se papel embebido em acetona com bastante vigor e repetidamente por essas superfícies até o papel não apresentar qualquer sujidade. Esta operação é da maior importância pois é crítica para se obter uma adesão ótima entre os substratos e o adesivo.

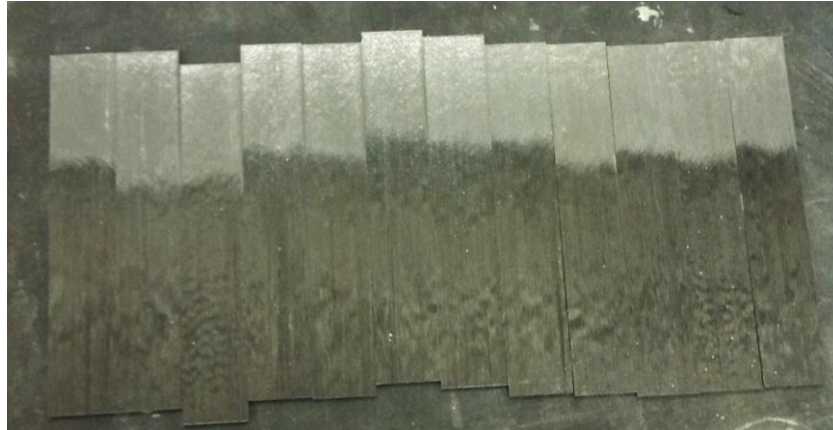


Figura 43 – Provetes após a utilização da lixa grossa.

3.2.2.5 Colocação do Teflon® nos provetes

Para as juntas com defeitos, é necessário a colocação de uma tira de Teflon® na junta para simular um defeito (ver Figura 44). Este processo ocorre antes da limpeza com acetona na junta, tendo em conta que é necessário colocar os dedos sobre a zona de colagem. Os passos seguidos foram estes:

1. Primeiro mede-se o comprimento da tira a cortar, variando consoante a percentagem de defeito que a junta vai ter (25, 50 ou 75%). Com o auxílio do x-ato, corta-se o número de tiras necessárias.
2. Para posicionar a tira de Teflon® na junta, corta-se um pedaço de fita-cola de papel e coloca-se numa das extremidades do teflon.
3. Com um paquímetro mede-se a distância até à parte superior do provete, garantindo o L_0 .
4. Por fim, coloca-se o pedaço de fita-cola de papel por cima da outra extremidade da tira de Teflon®, ficando assim imóvel.

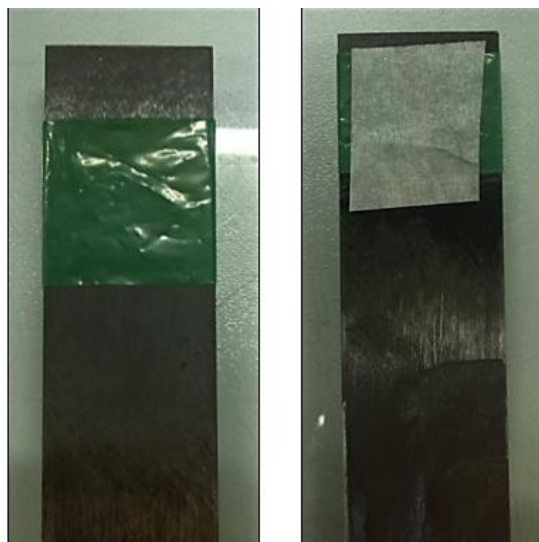


Figura 44 – Método de fixação do Teflon® nos provetes.

3.2.2.6 Preparação do molde

As juntas foram produzidas utilizando um molde para as dimensões específicas do provete (Figura 45) existente no Laboratório de Adesivos existente na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Este molde permite produzir seis juntas em simultâneo. O bloco inferior tem pinos de guiamento que garantem o perfeito alinhamento dos substratos e blocos posicionadores que permitem controlar o L_0 quando se fabrica JSS. O molde também possui quatro pinos de alinhamento que garantem o alinhamento das duas partes constituintes do molde.

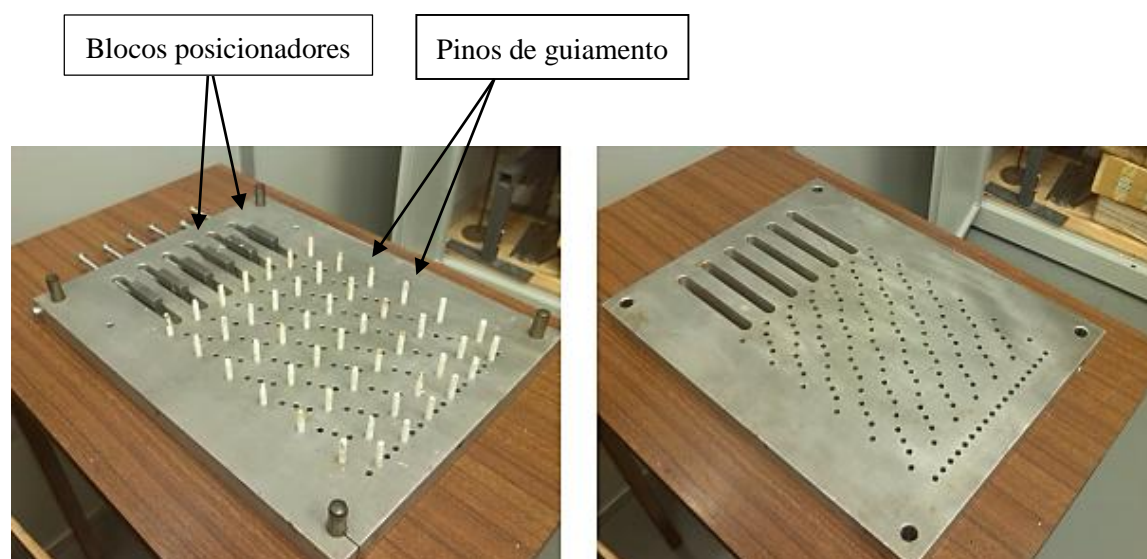


Figura 45 – Blocos inferior e superior do molde, respetivamente.

O molde deve encontrar-se limpo, antes de se colocar os provetes. Deve-se remover todos os restos de adesivo que possam existir no molde, com recurso a uma espátula de alumínio. Depois deve-se limpar o molde com papel embebido em acetona, removendo a sujidade e pó que possam existir nas superfícies do molde. Depois aplicou-se o desmoldante por todas as superfícies do molde com a ajuda de um pincel. O desmoldante tem como objetivo garantir que o adesivo não adere ao molde. O desmoldante utilizado foi o FREKOTE® 770-NC da LOCTITE (ver Figura 46).



Figura 46 – Desmoldante FREKOTE® 770-NC da LOCTITE.

3.2.2.7 Preparação dos espaçadores

Para a execução das juntas, foram utilizados dois tipos de espaçadores:

- De modo a garantir uma espessura constante do adesivo de $t_A = 0,2$ mm ao longo de todo o comprimento da junta, foram colocados espaçadores feitos de fita de aço calibrada, da respetiva espessura, em dois locais distintos do molde.
- Para manter um L_0 constante de 25 mm ou 50 mm, dependendo da junta a fazer, utilizou-se espaçadores de carbono-epóxico, com comprimentos de 115 mm e 90 mm, respetivamente. Estes espaçadores foram fabricados da mesma forma que os provetes.

Na Figura 47 está representado um esquema do posicionamento das tiras metálicas e dos espaçadores em carbono relativamente ao substrato e adesivo.



Figura 47 – Posicionamento das tiras metálicas e dos espaçadores em carbono.

Para ambos os espaçadores, foi aplicado desmoldante para evitar qualquer aderência à junta e/ou ao molde.

3.2.2.8 Preparação do adesivo e colagem dos substratos

Após as tarefas descritas anteriormente, procedeu-se à colagem dos substratos. Para isso é necessário ter já posicionado no molde, um dos substratos a colar, os espaçadores de carbono-epóxico e as tiras metálicas calibradas, como mostra a Figura 48.

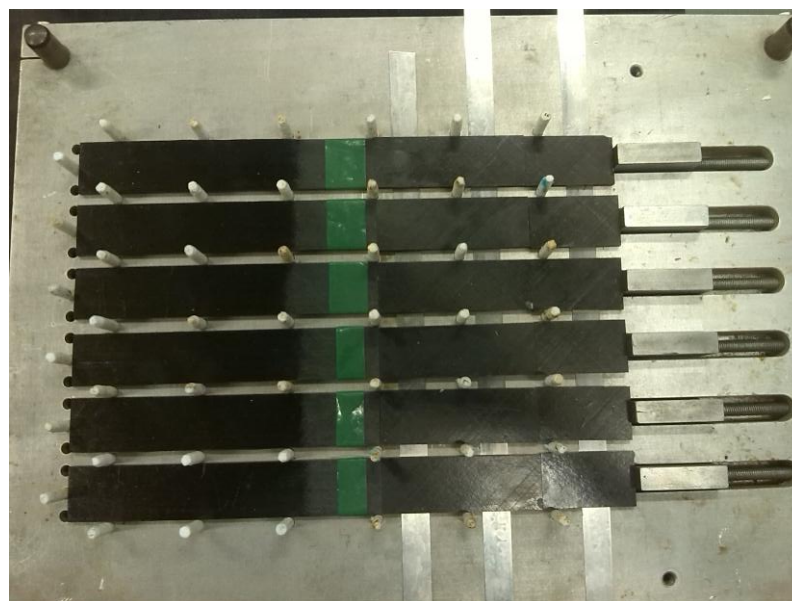


Figura 48 – Posicionamento dos substratos, espaçadores e tiras metálicas na parte inferior do molde, antes da colagem.

Os adesivos utilizados, quer o Sikaforce[®] 7752 quer o Araldite[®] AV138, são bi-componente, resina e endurecedor. Na preparação do adesivo é preciso pesá-los e misturá-los. O Sikaforce[®] 7752 tem uma razão de 10:2 entre resina e endurecedor, ao passo que o Araldite[®] AV138 tem uma razão de 10:4.

Depois do adesivo estar preparado, com o auxílio de uma espátula, aplicou-se o adesivo sobre os substratos colocados previamente no molde. Com cuidado, coloca-se o substrato superior sobre o adesivo, aplica-se pressão para garantir uma homogeneização e o transbordo do adesivo excedente. Com todas as juntas coladas, coloca-se a parte superior do molde sobre a parte inferior, tendo cuidado para não haver deslocamentos dentro do molde, Por fim, coloca-se alguns pesos por cima do molde para aplicar pressão enquanto as juntas curam.

3.2.2.9 Remoção do excesso de adesivo

Após a cura dos provetes foi necessário remover os excessos de adesivo que se encontravam no exterior da junta. Os excessos laterais das juntas foram facilmente retirados com um alicate, ao passo que os filetes nas extremidades da sobreposição tiveram que ser retirados com o auxílio da furadora vertical OPTIMUM BF 20 Vario à qual foi aplicada uma fresa de topo (ver Figura 49). Este último passo foi realizado com bastante cuidado para não provocar delaminação no CFRP, estando a fresa só em contacto com o adesivo.



Figura 49 – Remoção do filete das juntas na furadora vertical OPTIMUM BF 20 Vario (Neto 2011).

3.2.2.10 Colagem dos calços

Com o excesso de adesivo retirado das juntas coladas, seguiu-se a colagem dos calços. Os calços foram obtidos através de carbono-epóxico que tinha restado do fabrico dos provetes

e também dos espaçadores utilizados no fabrico das juntas. Foram cortados ao todo 160 calços, com as dimensões de $25 \times 25 \text{ mm}^2$, na máquina de corte BATISTI MECCANICA s.r.l DV25 para serem colocados nas 80 juntas adesivas.

Após a fabricação dos calços, procedeu-se à marcação do posicionamento dos mesmos nas juntas adesivas com um marcador. Os calços têm estar separados por 170 mm, como mostrado na Figura 30 e na Figura 31. Com as juntas marcadas, limpou-se a superfície a ser colada com acetona, para remover qualquer sujidade ou poeira presente. Com as superfícies limpas, colocou-se Teflon[®] sobre a mesa de trabalho para impedir que o adesivo adira à superfície desta. Preparou-se o adesivo a utilizar, neste caso foi usado o Araldite[®] AV138. Com a ajuda de uma espátula, depositou-se o adesivo sobre a junta e pressionou-se o calço contra a mesma até parar de escorrer adesivo (ver Figura 50).

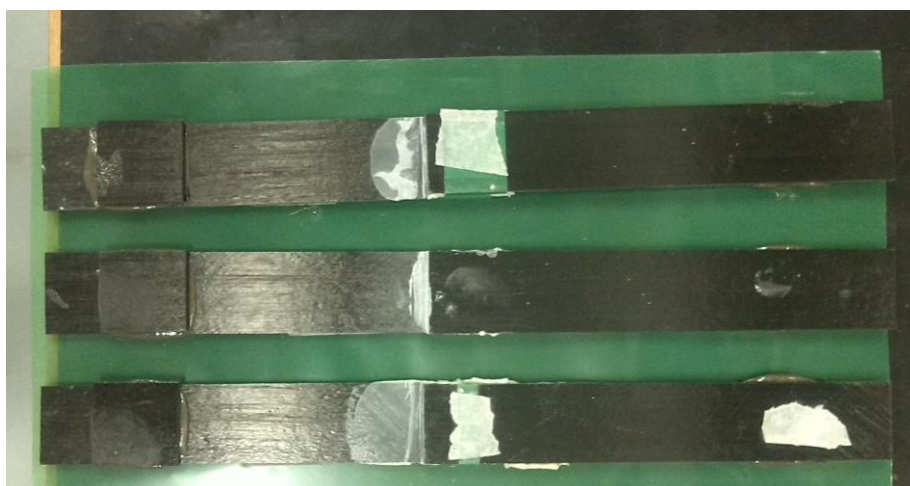


Figura 50 – Juntas adesivas com os calços colados.

3.2.3 Ensaio das juntas

Com o objetivo de determinar a resistência das juntas, realizaram-se os ensaios na máquina de testes INSTRON[®] 3367 (Figura 50), sendo esta equipada com uma célula de carga de 30 kN, existente no Laboratório de Adesivos da FEUP. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 1,0 mm/min e a distância entre garras foi de 170 mm. Para cada adesivo foram ensaiadas 40 JSS, 20 por cada L_0 .

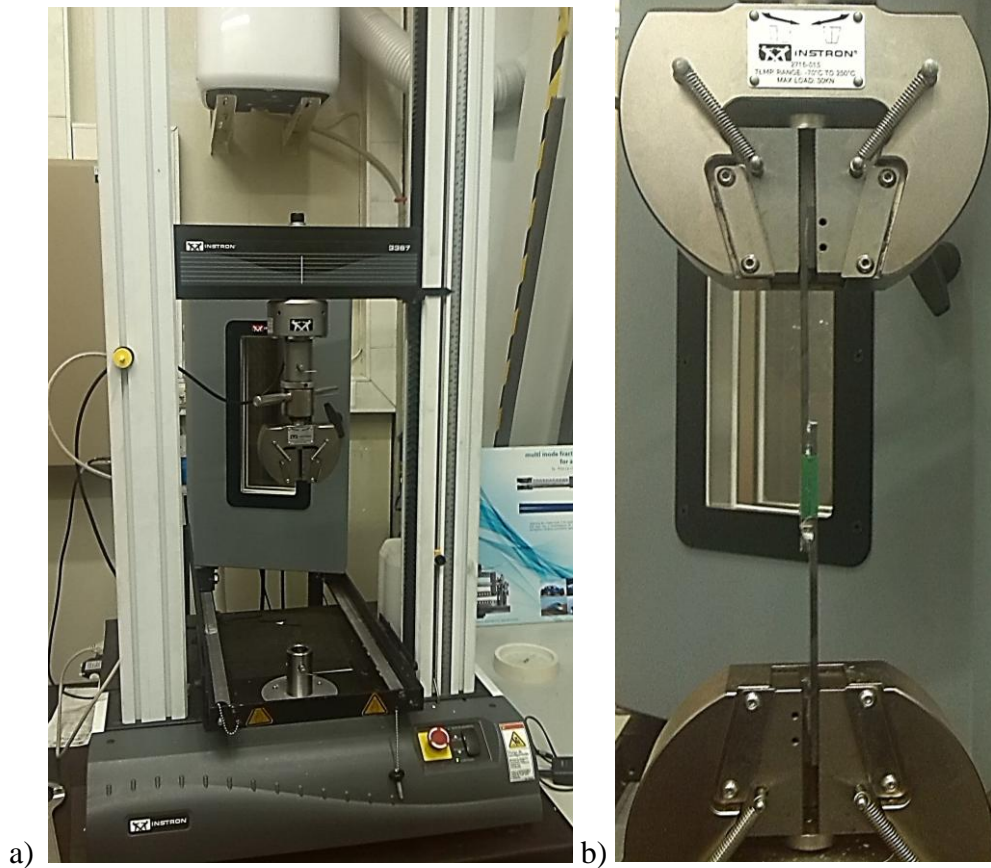


Figura 51 – Máquina de testes INSTRON® 3367 (a) e fixação das JSS (b).

3.3 Resultados

3.3.1 Curvas $P-\delta$

Neste subcapítulo são apresentadas as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) para as JSS coladas com os dois adesivos utilizados neste trabalho e para os dois L_0 escolhidos. Começando pelo adesivo Araldite® AV138, na Figura 52 e na Figura 53 são apresentados quatro gráficos representando as curvas para as quatro condições existentes para o $L_0 = 25$ mm e $L_0 = 50$ mm, respectivamente.

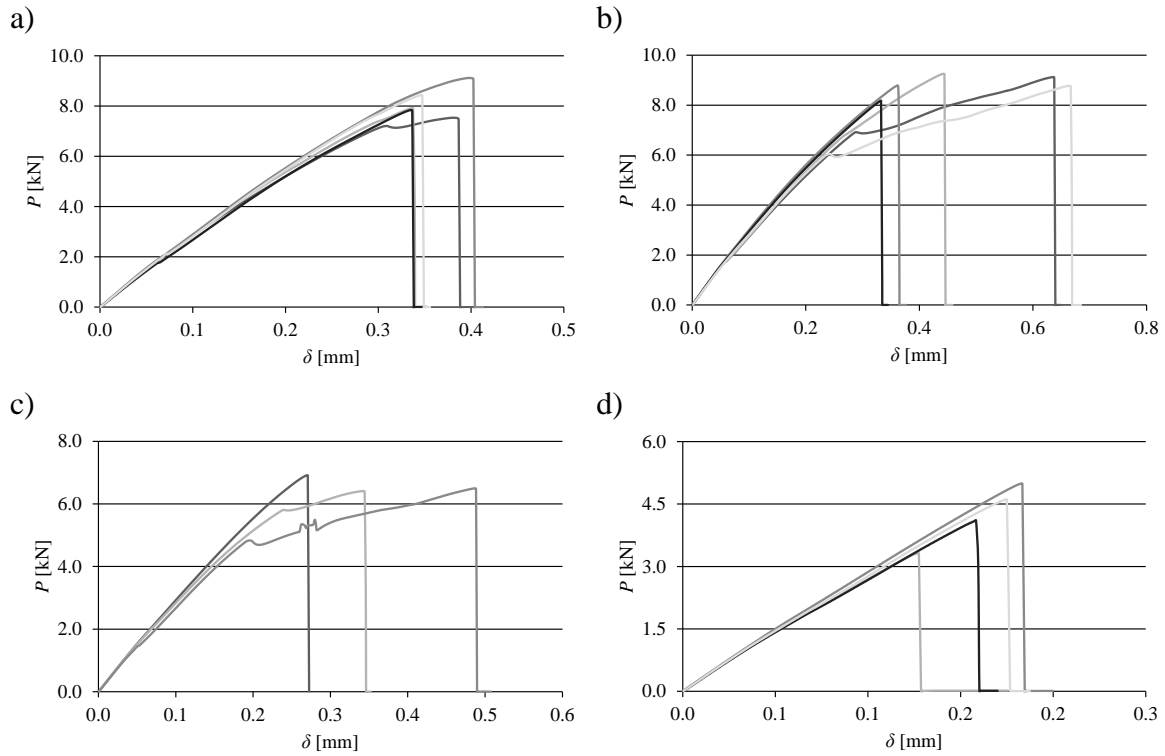


Figura 52 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite® AV138 para $L_0 = 25$ mm para as JSS a) sem defeito, b) com 25% de defeito, c) 50% de defeito e d) 75% de defeito.

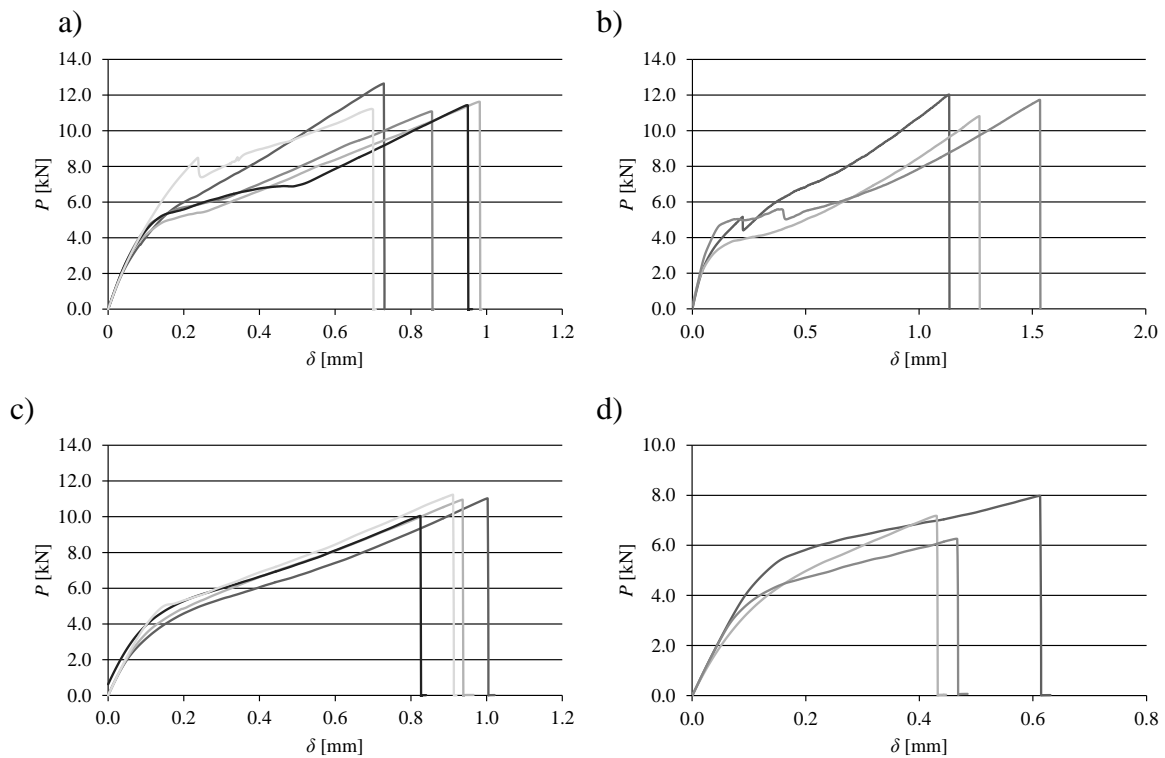


Figura 53 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite® AV138 para $L_0 = 50$ mm para as JSS a) sem defeito, b) com 25% de defeito, c) 50% de defeito e d) 75% de defeito.

Verifica-se o comportamento linear da junta até à rotura, e a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido à flexibilidade da máquina e questões da amarração dos provetes. Houve escorregamento de diversas juntas, como é possível observar nas curvas obtidas, devido ao facto de vários calços terem descolado durante os ensaios. No entanto, esta ocorrência não afeta a validade dos resultados obtidos para a $P_{m\acute{a}x}$. No que toca aos substratos, não se verificou qualquer dano visível. De uma forma geral existe uma boa repetibilidade das curvas no que diz respeito à rigidez e à carga máxima.

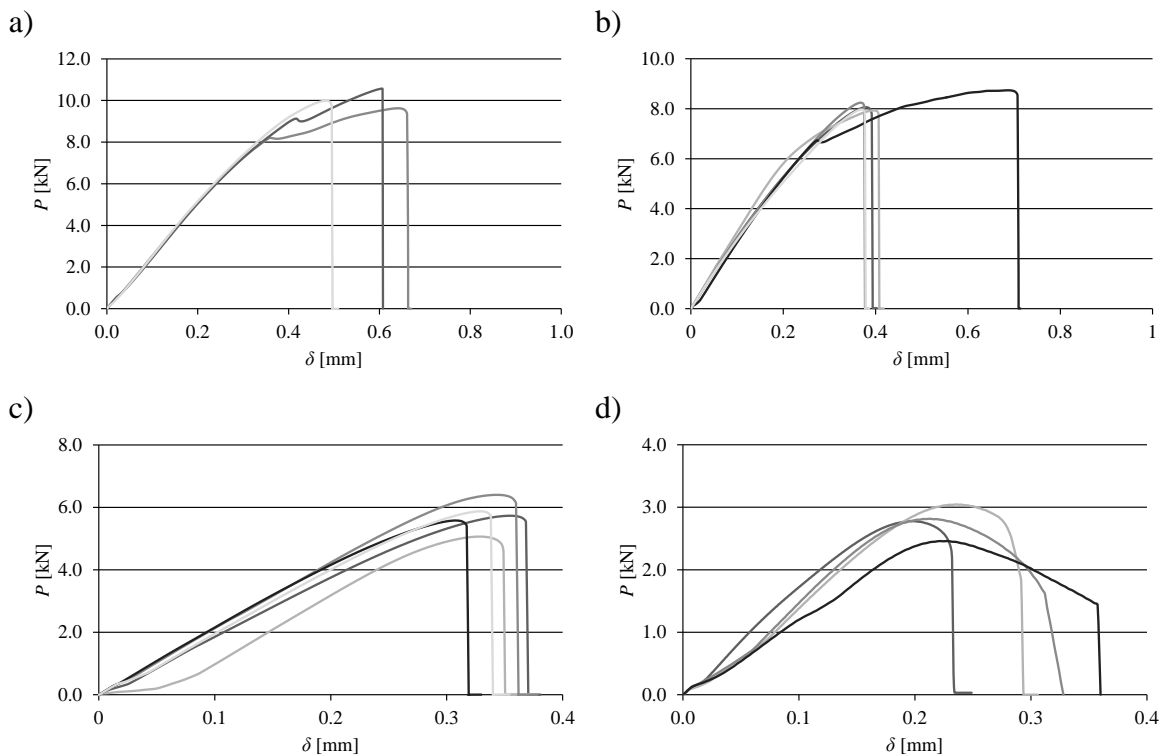


Figura 54 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Sikaforce[®] 7752 para $L_O = 25$ mm para as JSS a) sem defeito, b) com 25% de defeito, c) 50% de defeito e d) 75% de defeito.

O adesivo Sikaforce[®] 7752 tem comportamento não linear na proximidade de $P_{m\acute{a}x}$, devido à elevada plasticidade que possui. Para o caso em que $L_O = 50$ mm esta não linearidade é bem evidente. Tal como para o adesivo Araldite[®] AV138, ocorrem pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido à flexibilidade da máquina e questões da amarração dos provetes. Para este adesivo, ocorreu menos escorregamento das juntas, sendo possível ver isso nas curvas obtidas. Em termos de carga máxima e rigidez, há uma boa repetibilidade das curvas, em especial para o $L_O = 50$ mm.

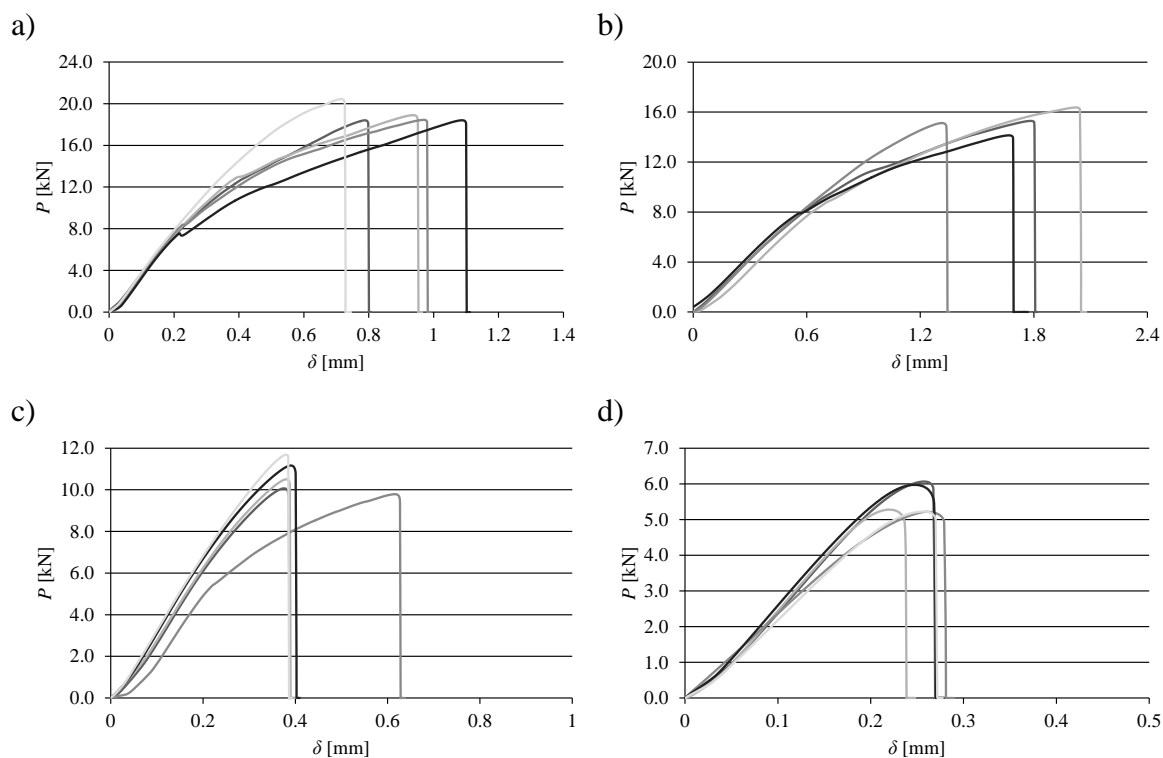


Figura 55 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Sikaforce[®] 7752 para $L_0 = 50$ mm para as JSS a) sem defeito, b) com 25% de defeito, c) 50% de defeito e d) 75% de defeito.

3.3.2 Modos de rotura

Observando a rotura das ligações coladas com o adesivo Araldite[®] AV138, verifica-se que ocorreu uma rotura coesiva em todos os provetes, pois existe adesivo em ambas as superfícies dos aderentes. Contudo as roturas ocorreram muito próximas da interface entre o adesivo e o substrato. Na Figura 56 e na Figura 57 apresentam-se exemplos das superfícies de rotura para as JSS com $L_0 = 25$ mm e $L_0 = 50$ mm, respetivamente.

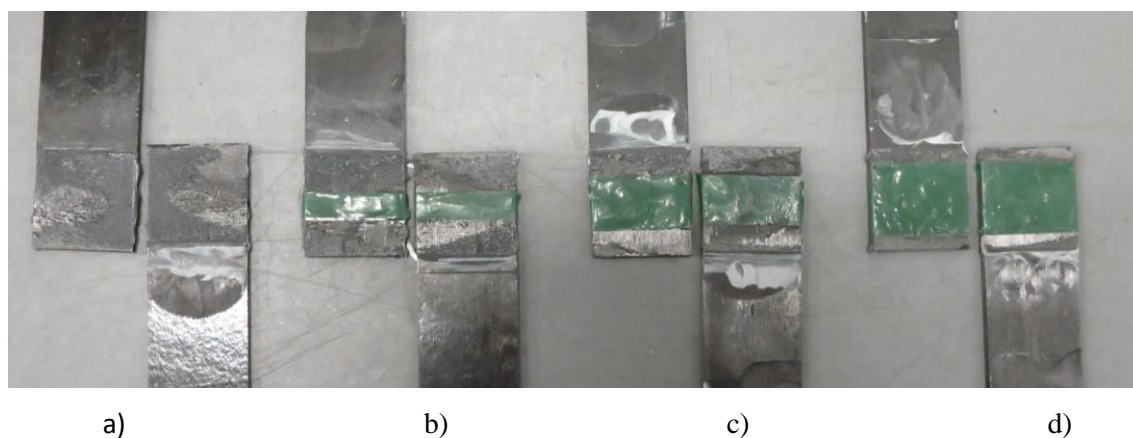


Figura 56 – Rotura das juntas coladas com Araldite[®] AV138, através do ensaio de tração, para $L_0 = 25$ mm, sem defeito (a), com 25% de defeito (b), 50% de defeito (c) e 75% de defeito (d).

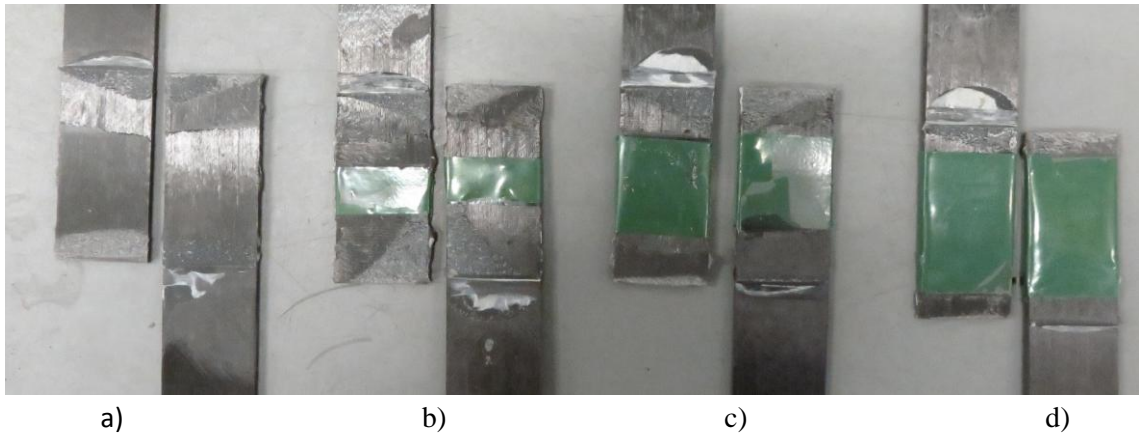


Figura 57 – Rotura das juntas coladas com Araldite® AV138, através do ensaio de tração, para $L_0 = 50$ mm, sem defeito (a), com 25% de defeito (b), 50% de defeito (c) e 75% de defeito (d).

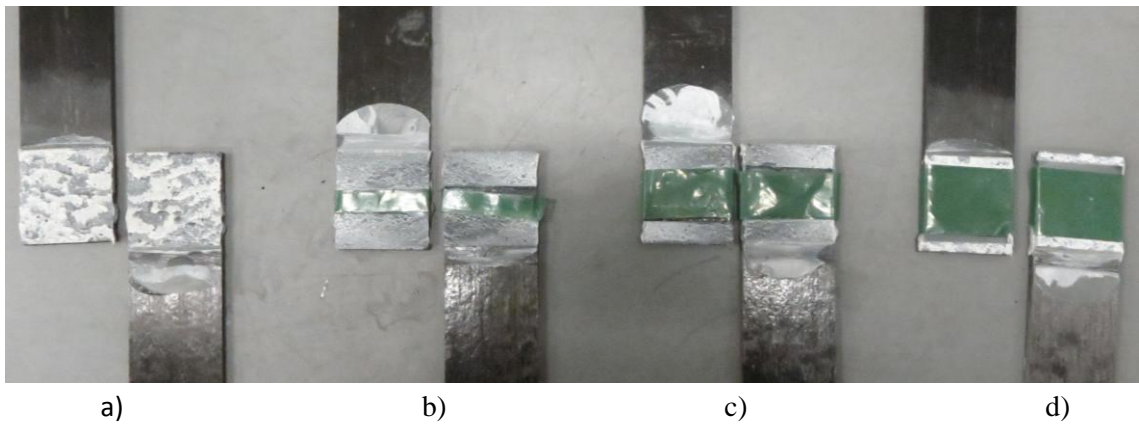


Figura 58 – Rotura das juntas coladas com Sikaforce® 7752, através do ensaio de tração, para $L_0 = 25$ mm, sem defeito (a), com 25% de defeito (b), 50% de defeito (c) e 75% de defeito (d).

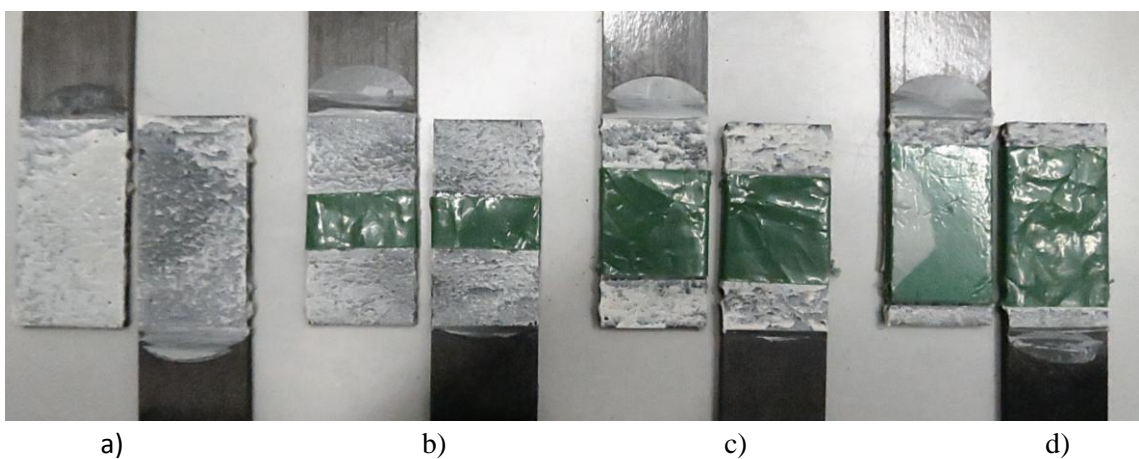


Figura 59 – Rotura das juntas coladas com Sikaforce® 7752, através do ensaio de tração, para $L_0 = 50$ mm, sem defeito (a), com 25% de defeito (b), 50% de defeito (c) e 75% de defeito (d).

Analisando agora a rotura das ligações coladas com o adesivo Sikaforce[®] 7752, verifica-se que ocorreu uma rotura coesiva em todos os provetes, pois existe adesivo em ambas as superfícies dos aderentes. Na Figura 58 e Figura 59 na apresentam-se exemplos das superfícies de rotura para as JSS com $L_O = 25$ mm e $L_O = 50$ mm, respetivamente.

3.4 Resistência das juntas

Analisa-se de seguida, detalhadamente, os dados obtidos através dos ensaios de tração. Neste capítulo apenas se descreve os resultados obtidos sem justificação detalhada dos comportamentos observados, o que será feito posteriormente no capítulo 4, referente à análise numérica, após estudo das distribuições de tensões na camada de adesivo e da variável de dano.

Começando pelo adesivo Araldite[®] AV138, pode-se ver na Figura 60 as curvas referentes à $P_{m\acute{a}x}$ e respetivos desvios padrão em função da percentagem de defeito para os dois valores de L_O em estudo. Obtiveram-se desvios padrão aceitáveis para todas as configurações de junta, com valores percentuais máximos de 12% para o Araldite[®] AV138 ($L_O = 50$ mm e 75% de defeito). Observa-se que para as JSS com $L_O = 25$ mm, a $P_{m\acute{a}x}$ tem o valor de 8822 N para 0% de defeito, baixando progressivamente até atingir o valor de 4256 N para a junta com 75% de defeito, assinalando-se uma redução de 51,8%. Em relação a $L_O = 50$ mm, a $P_{m\acute{a}x}$ tem o valor de 11732 N para 0% de defeito, diminuindo até atingir o valor de 7142 N para a junta com 75% de defeito, o que corresponde a uma redução percentual de 39,1%. Em termos de magnitude da $P_{m\acute{a}x}$, este valor não evolui linearmente relativamente ao aumento de L_O , registando-se um aumento de 8822 N para 11732 N para a junta sem defeito, o que corresponde a um aumento de 33%. Para as juntas com defeito, registou-se uma variação semelhante. Para os dois valores de L_O , a variação do valor de $P_{m\acute{a}x}$ das juntas com 0% até as juntas com 50% é mínimo, observando-se por outro lado um decréscimo significativo nas juntas com 75% de defeito. Em termos gerais, comparando os dois valores de L_O , existe uma maior variação de $P_{m\acute{a}x}$ nas juntas com $L_O = 25$ mm do que nas juntas com $L_O = 50$ mm.

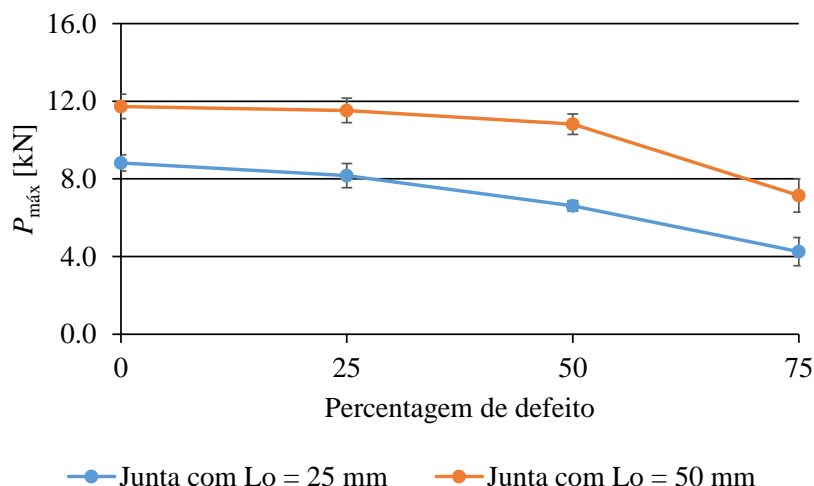


Figura 60 – $P_{máx}$ em função da percentagem de defeito para as JSS coladas com Araldite® AV138 para o $L_0 = 25$ mm e $L_0 = 50$ mm.

Passando agora para as JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752, pode-se ver na Figura 61 as curvas referentes para a $P_{máx}$ em função da percentagem de defeito para os dois valores de L_0 em estudo. Obtiveram-se desvios padrão aceitáveis para todas as configurações de junta, com valores percentuais máximos de 6% para o Sikaforce® 7752 ($L_0 = 50$ mm e 25% de defeito). Observa-se que, para as JSS com $L_0 = 25$ mm, a $P_{máx}$ tem o valor de 10062 N para 0% de defeito, reduzindo progressivamente até atingir o valor de 2775 N para a junta com 75% de defeito, assinalando-se assim uma variação de 72,4%. Em relação às configurações de junta com $L_0 = 50$ mm, $P_{máx}$ tem o valor de 18923 N para 0% de defeito, diminuindo até atingir o valor de 6011 N para a junta com 75% de defeito, variando 68,2%. Em termos de magnitude de $P_{máx}$, este valor aumenta quase linearmente com o aumento do L_0 de 25 para 50 mm, passando de 10062 N para 18923 N (juntas sem defeito), registando-se um aumento de 88,1%. Este comportamento estende-se para todas as configurações com defeito. Para os dois valores de L_0 , o decréscimo de $P_{máx}$ é muito semelhante com o aumento da percentagem de defeito, não existindo oscilações dignas de relevo. Em termos gerais, comparando os dois valores de L_0 , o comportamento do adesivo é semelhante quer para o $L_0 = 25$ mm quer para o $L_0 = 50$ mm.

Por fim, comparando os dados analisados para os dois adesivos em estudo, para o Araldite® AV138 verifica-se que o valor de $P_{máx}$ tem variações menores com o aumento da percentagem de defeito comparativamente com o adesivo Sikaforce® 7752, e também com o aumento de L_0 . De facto, a $P_{máx}$ aumenta ligeiramente para as juntas coladas com o

adesivo Araldite® AV138 ao aumentar L_0 de 25 para 50 mm, ao passo que para as juntas coladas com Sikaforce® 7752 o aumento é quase linear.

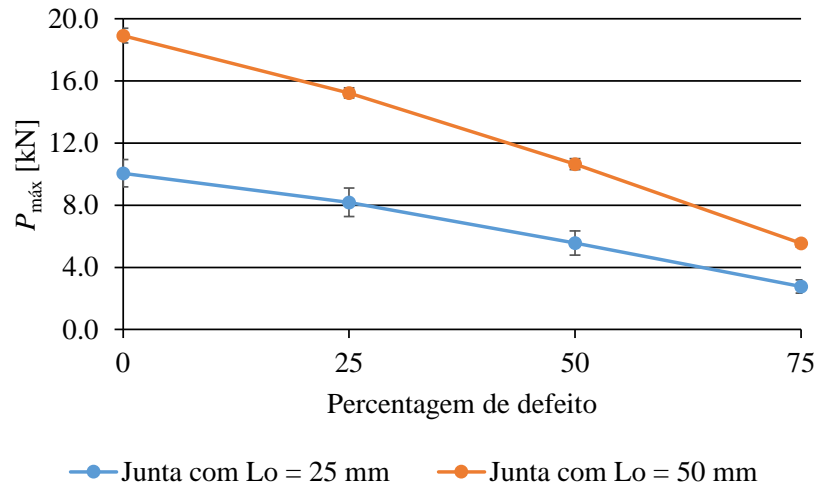


Figura 61 – $P_{máx}$ em função da percentagem de defeito para as JSS coladas com Sikaforce® 7752 para o $L_0 = 25$ mm e $L_0 = 50$ mm.

4 Trabalho numérico

A parte numérica deste trabalho tem como objetivo principal a reprodução dos resultados experimentais através da utilização de leis de dano coesivo que sejam representativas do comportamento dos adesivos utilizados. Desta forma valida-se a utilização posterior desta técnica para efeitos de previsão da resistência de juntas adesivas com estes adesivos. As simulações foram feitas recorrendo ao MEF, incluindo o MDC formulado seguidamente. Antes do estudo de previsão de resistência efetuou-se um estudo das tensões σ_y e τ_{xy} durante a fase elástica do carregamento, e também da variável de dano durante a propagação, para melhor compreender a influência de um defeito na resistência da junta.

4.1 Condições da análise numérica

A simulação foi feita recorrendo ao *software* ABAQUS® versão 6.14. Este *software* baseia-se no MEF e a sua escolha recai pela possibilidade de utilização do módulo integrado de MDC para prever o comportamento das juntas em ensaios de tração. Inicialmente analisase as τ_{xy} e arrancamento na zona de ligação, bem como o parâmetro de dano SDEG existente na camada de adesivo. A modelação das juntas foi feita em duas dimensões, com elementos sólidos de estado plano de deformação para a modelação dos aderentes (CPE4 do ABAQUS®). Para simular a junta colada foi usado um elemento coesivo de quatro nós (COH2D4 do ABAQUS®), já utilizado em estudos anteriores (Campilho et al. 2011) e que utilizou o MDC com lei triangular de amaciamento. As JSS (ver Figura 62) foram modeladas com as dimensões iguais às usadas nos ensaios experimentais. As propriedades dos substratos e dos adesivos, utilizadas no modelo, estão descritas na Tabela 5.



Figura 62 – Modelo do ABAQUS® utilizado para simular uma JSS com $L_0 = 50$ mm e com 50% de defeito.

Tabela 5 – Propriedades utilizadas no ABAQUS®

Propriedades				
	Araldite® AV138	Sikaforce® 7752	CFRP	Unidades
E	4890	490		MPa
G	1560	190		MPa
σ_f	39,45	17,7		MPa
τ_f	30,2	13,5		MPa
G_{IC}	0,3	3,7		N/mm
G_{IIC}	0,68	5,63		N/mm
E_x			109000	MPa
E_y / E_z			8819	MPa
G_{xy} / G_{xz}			4315	MPa
G_{yz}			3200	MPa
ν_{xy} / ν_{xz}			0,342	
ν_{yz}			0,38	

Em termos de condições de ensaio, a extremidade esquerda do modelo foi encastada e a extremidade direita foi sujeita a um deslocamento horizontal de 2 mm, não sendo permitido deslocamentos verticais. Cada incremento utilizado na simulação do modelo corresponde a 0,25% do deslocamento horizontal total, podendo ser alterado, caso seja necessário obter maior precisão nos resultados ou o processo de simulação do programa seja muito demorado. Na Figura 63 mostra-se um detalhe da malha na proximidade da extremidade ao defeito, onde se pode observar os elementos coesivos representativos do adesivo com dimensões de $0,2 \times 0,2 \text{ mm}^2$. Na zona correspondente à pré-fenda, a malha não é tão refinada no sentido do comprimento dos provetes, uma vez que esta zona não estará sujeita a grandes gradientes de tensão. Na direção da espessura, foi utilizada uma gradação do tamanho dos elementos (efeito *bias*) no sentido do maior refinamento na proximidade do adesivo, devido à necessidade de modelação do adesivo com precisão (Azevedo 2014).

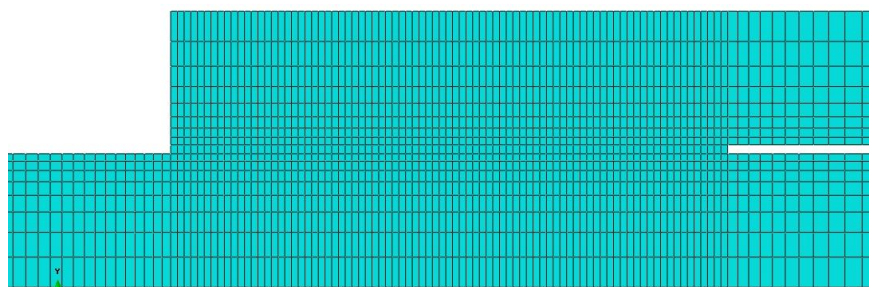


Figura 63 – Refinamento de malha utilizado no modelo do ABAQUS®.

Para a obtenção das curvas $P-\delta$, dá-se início à simulação do modelo até se obter rotura no adesivo, para por fim extrair os dados obtidos para a força e o deslocamento. No caso das curvas do parâmetro de dano SDEG, é necessário definir no modelo onde se pretende retirar a informação (na camada de adesivo). De seguida utiliza-se a ferramenta *path* para escolher essa zona. Por fim, escolhe-se o incremento na simulação da qual se deseja obter a curva. A Figura 64 mostra a evolução do parâmetro de dano SDEG ao longo da camada do adesivo Araldite® AV138 para o modelo com $L_0 = 25$ mm e 25% de defeito.

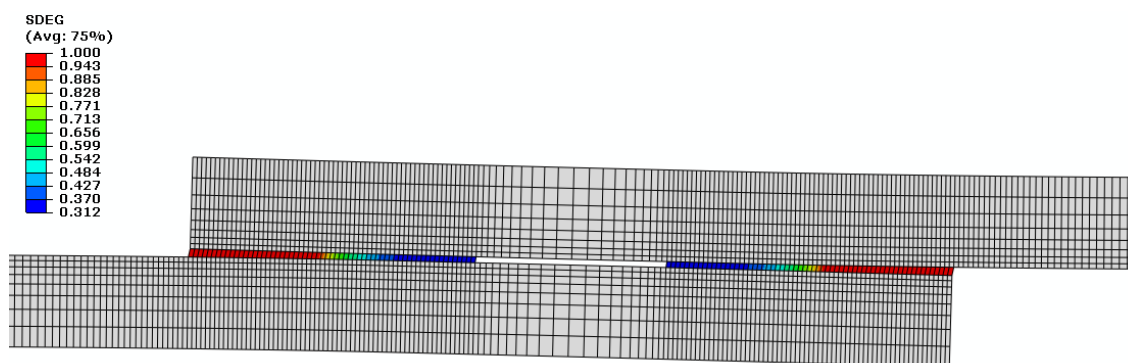


Figura 64 – Simulação do modelo de $L_0 = 25$ mm e 25% de defeito quando o adesivo entra em rotura.

Para se obter as curvas referentes às τ_{xy} e arrancamento, foram criados MDC semelhantes aos inicialmente feitos. Em termos de propriedades dos adesivos, colocou-se só valores referentes a características elásticas (E e coeficiente de Poisson (ν)) e escolheu-se elementos do tipo sólido para a camada de adesivo, em vez de elementos coesivos. No que toca à malha dos modelos, foram aplicados elementos coesivos representativos do adesivo com dimensões de $0,02 \times 0,02$ mm², ou seja, houve um refinamento 10x superior comparativamente com os modelos anteriores, para se extrair com precisão os valores de tensão. Na Figura 65, verifica-se que a camada de adesivo (malha a cor vermelha) em termos de espessura está subdividida em dez partes, devido ao refinamento utilizado. Depois do refinamento da malha, estão definidos todos os parâmetros para se poder iniciar

a simulação do modelo. Para obtenção dos valores de tensão, utiliza-se a ferramenta *path* no meio da camada do adesivo.

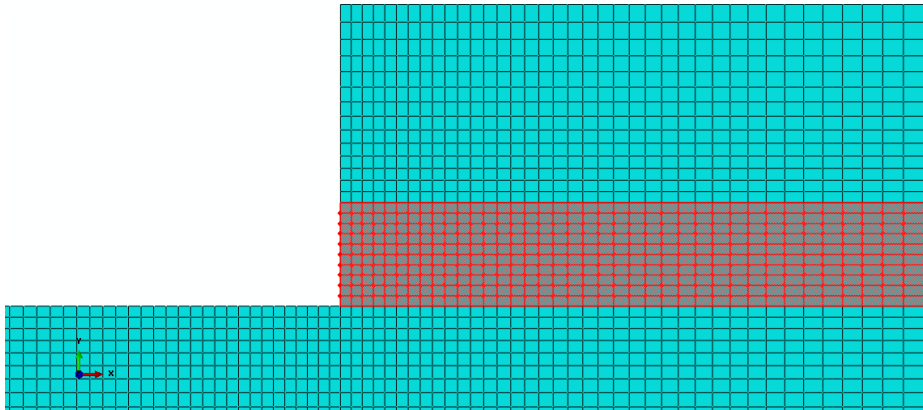


Figura 65 – Pormenor da malha utilizada nos modelos do ABAQUS® para obtenção dos gráficos referentes às τ_{xy} e σ_y .

4.2 Modelo de dano coesivo

Como falado anteriormente, os MDC baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos que ligam nós homólogos dos elementos coesivos, de forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima e, subsequentemente, a degradação até à rotura (Campilho et al. 2005).

4.2.1 Modelo de dano triangular

A lei de dano triangular, ver Figura 66, assume inicialmente um comportamento linear elástico, seguido de degradação linear. O comportamento elástico é definido por uma matriz constitutiva (\mathbf{K}) que contém os parâmetros de rigidez, e relaciona as tensões e deformações em tração e corte ao longo dos elementos coesivos (subscritos n e s, respetivamente)

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}\boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

onde ε_n é a deformação à tração e ε_s a deformação ao corte.

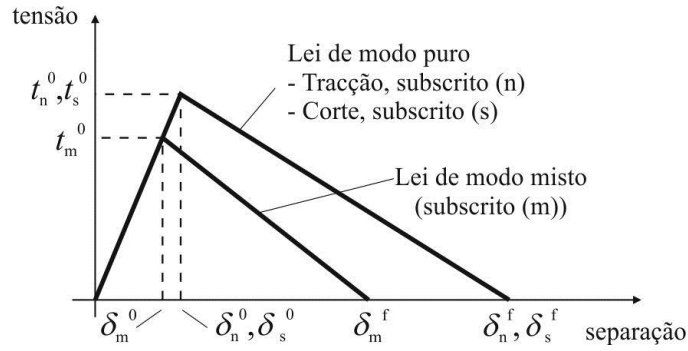


Figura 66 – MDC triangular.

Para camadas finas de adesivo, uma aproximação viável é dada por $K_{nn} = E$, $K_{ss} = G$ (Módulo de Corte) e $K_{ns} = 0$. A iniciação do dano pode ser especificada por diferentes critérios. Neste trabalho, foi considerado o critério quadrático de tensões que se segue para a iniciação do dano, por já ter sido provada a sua fiabilidade (Campilho et al. 2008), sendo dado por

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

onde t_n é a tensão coesiva à tração e t_s é a tensão coesiva ao corte. $\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_m^0 na Figura 66), através da equação anterior, a rigidez do material é degradada. A separação completa é prevista por um critério linear energético da forma

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1, \quad (3)$$

em que G_I é a taxa de libertação de energia à tração, G_{II} é a taxa de libertação de energia ao corte e G_{IIC} é a tenacidade ao corte.

4.2.2 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tração e corte, é necessário conhecer a t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} (Figura 66). No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios em adesivo maciço

(Pocius 2002, Campilho 2005). No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias, e a propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina (Andersson e Stigh 2004, Hogberg e Stigh 2006, Leffler et al. 2007). Assim sendo, é necessária a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

Para a determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios em adesivo maciço e ensaio de corte *Thick Adherent Shear Test* (TAST) para a definição de t_n^0 e t_s^0 , respetivamente. Os valores de G_{IC} e G_{IIC} foram obtidos através de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF), respetivamente, com valores t_A e espessura do substrato, t_P idênticos aos utilizados neste trabalho, para garantir condições idênticas de restrição às deformações da camada de adesivo. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST). Em função do exposto, facilmente se constata que algumas das propriedades do adesivo não foram determinadas em adesivo como camada fina. No entanto, espera-se que a aproximação imposta não comprometa a previsão de resistência a ser realizada. A Tabela 6 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 6 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo de Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm (Azevedo et al. , Campilho et al. 2011, Constante et al. 2015).

E [MPa]	4890	G [MPa]	1560
t_n^0 [MPa]	39,45	t_s^0 [MPa]	30,2
G_{IC} [N/mm]	0,3	G_{IIC} [N/mm]	0,68

O processo de obtenção de propriedades coesivas para o adesivo Sikaforce® 7752 seguiu uma técnica completamente diferente da utilizada para o Araldite® AV138. De facto, para a determinação da lei coesiva ao corte, foi seguido o método direto, baseado inicialmente na medição de G_{IC} (tração) e G_{IIC} (corte) pelo integral J, seguido da diferenciação da curva $G_{I-\delta_I}$ e $G_{II-\delta_{II}}$, respetivamente, para a obtenção das leis coesivas em tração e corte do

adesivo. Os valores de $G_I\text{-}\delta_I$ (deslocamento em tração para a extremidade da fenda) e $G_{II}\text{-}\delta_{II}$ (deslocamento em corte para a extremidade da fenda) representam os deslocamentos em tração e corte na extremidade da fenda, respetivamente. A medição destes parâmetros é um passo crítico na utilização do método direto, e pode ser efetuada com recurso a meios mecânicos como Linear Variable Differential Transducers (LVDT) ou por meios óticos (Campilho et al. 2014). Este procedimento permite determinar de forma robusta a lei coesiva exata, obtendo-se de uma só vez os valores de G_{IC} e t_n^0 (lei coesiva à tração) e G_{IIC} e t_s^0 (lei coesiva ao corte). Os valores de E e G foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST) (Faneco 2014). A Tabela 7 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada de adesivo Sikaforce® 7752 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 7 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo de Sikaforce® 7752 com uma espessura de 0,2 mm (Faneco 2014, Fernandes 2015).

E [MPa]	490	G [MPa]	190
t_n^0 [MPa]	17,7	t_s^0 [MPa]	13,5
G_{IC} [N/mm]	3,7	G_{IIC} [N/mm]	5,63

4.3 Análise de tensões na junta

A análise de tensões das juntas adesivas baseia-se no estudo das σ_y e das τ_{xy} em regime elástico e é realizada no plano médio da espessura do adesivo, que se considera representativo do estado de tensão no adesivo. Apesar disto, sabe-se que existem concentrações de tensões na interface com os aderentes (Xu e Wei 2012). Estas distribuições de tensões exibem picos de tensões nas extremidades da sobreposição, que são responsáveis pelo início do dano prematuro nas juntas, pelo que é de extrema importância o seu estudo para a explicação dos resultados de resistência obtidos (Marques 2014). A obtenção dos gráficos envolveu um procedimento de normalização. Dividiram-se as tensões τ_{xy} e σ_y pela tensão de corte média ($\tau_{méd}$) para o valor de L_0 respetivo, para a junta sem defeito. Um procedimento de normalização similar foi realizado para L_0 (x/L_0), em que x representa a distância desde a extremidade esquerda da camada do adesivo. O intervalo do gráfico é então dado por $0 \leq x/L_0 \leq 1$ (Fernandes 2014).

4.3.1 Tensões de corte

A Figura 67 e a Figura 68 mostram a distribuição de τ_{xy} normalizadas para os dois valores de L_0 estudados em juntas com o adesivo frágil Araldite® AV138, com e sem defeitos. Em ambos os gráficos é possível observar valores de tensão mais reduzidos na região interior do adesivo, atingindo o máximo nas extremidades da sobreposição (Vable e Reddy Maddi 2006, Luo e Tong 2007). Este comportamento deve-se à deformação diferencial de cada um dos substratos ao longo da sobreposição, que é nula na extremidade livre de cada aderente e aumenta progressivamente até à extremidade oposta, o que provoca escorregamento localizado nas extremidades da sobreposição (Volkersen 1938, da Silva et al. 2007). Na região central da sobreposição estes efeitos são anulados, e o aparecimento de tensões τ_{xy} é apenas devido ao esforço de tração aplicado na junta, que provoca o deslizamento em corte dos aderentes. Pode-se verificar que quanto maior é a percentagem de defeito na junta, também maior é o valor de pico das tensões normalizadas (sendo esta variação mínima até às juntas com 50% de defeito). No interior do adesivo este valor aproxima-se cada vez mais do valor na extremidade da junta. Isto acontece devido à diminuição de área colada que tem de resistir ao esforço aplicado, levando a zona interna do adesivo a contribuir mais para a resistência da junta. Os gradientes de tensão τ_{xy} aumentam com L_0 (o valor de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ máximo obtido subiu de 5,0 para 7,0, desde $L_0 = 25$ até 50 mm) devido ao gradiente crescente de deformações longitudinais nos aderentes causados pelas grandes áreas de L_0 e aumento dos esforços transmitidos (Neto et al. 2012).

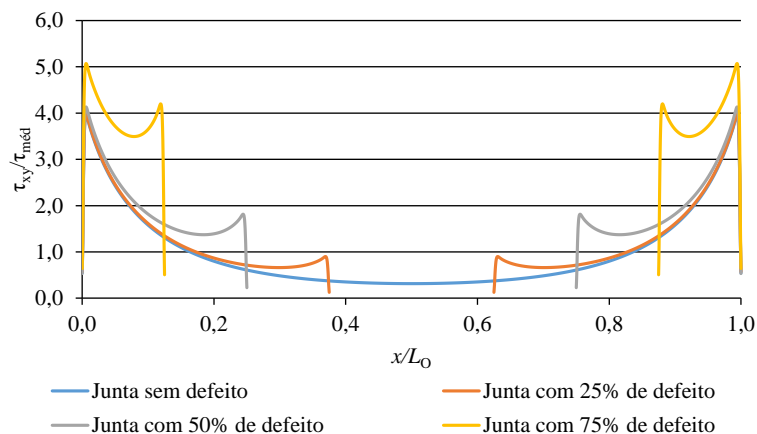


Figura 67 – Distribuição de tensões τ_{xy} para JSS coladas com Araldite® AV138 e $L_0 = 25$ mm.

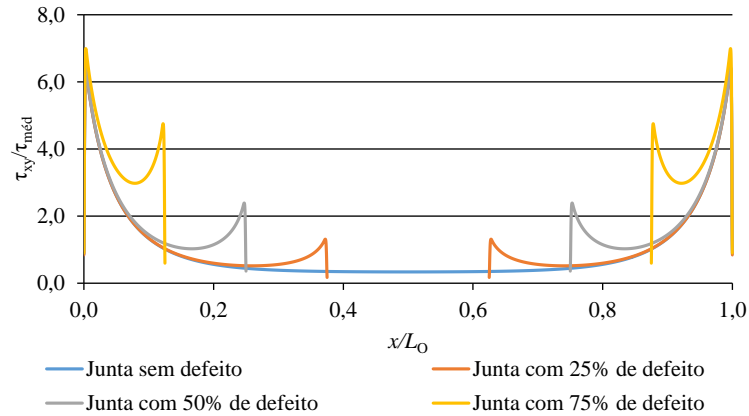


Figura 68 – Distribuição de tensões τ_{xy} para JSS coladas com Araldite® AV138 e $L_0 = 50$ mm.

A Figura 69 e a Figura 70 mostram a distribuição de τ_{xy} normalizadas para os dois valores de L_0 em juntas coladas com o adesivo dúctil Sikaforce® 7752, com e sem defeitos. Em ambos os gráficos é possível observar valores de tensão mais reduzidos na região interior do adesivo, atingindo o máximo nas extremidades da sobreposição. No entanto, o gradiente de tensões ao longo da camada de adesivo é bastante menor comparativamente com o adesivo Araldite® AV138 (o valor de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ máximo obtido desceu de 7,0 para 4,2). Como o adesivo Sikaforce® 7752 é mais flexível, há uma melhor distribuição de tensões nas extremidades da sobreposição. O mesmo sucede à medida que a percentagem de defeitos na junta aumenta, já que as diferenças entre o interior e as extremidades da junta são inferiores e toda a junta praticamente resiste da mesma forma (para $L_0 = 25$ mm, os valores variam de 173,0% na junta sem defeito para 7,0% na junta com 75% de defeito). Para valores de L_0 mais elevados, há uma ligeira subida nas magnitudes das tensões na proximidade das singularidades, enquanto a zona interna tem um menor contributo para a resistência da junta. A justificação deste comportamento é idêntica à apresentada para o adesivo Araldite® AV138.

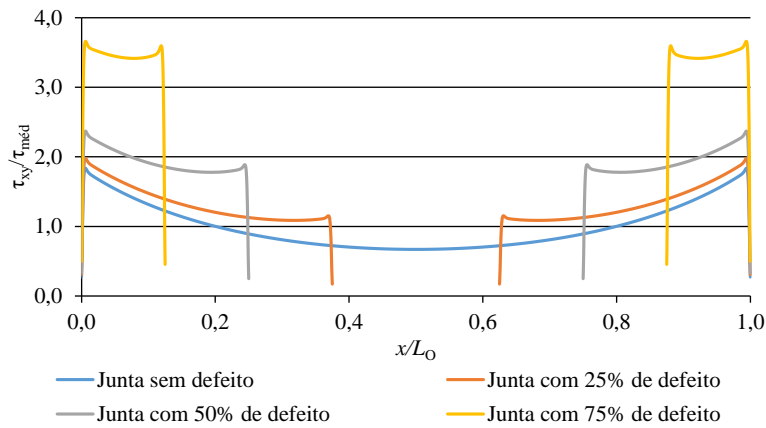


Figura 69 – Distribuição de tensões τ_{xy} para JSS coladas com Sikaforce® 7752 e $L_O = 25$ mm

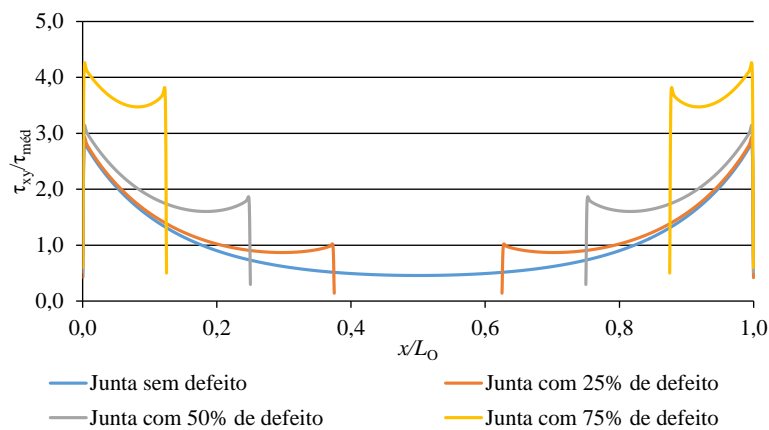


Figura 70 – Distribuição de tensões τ_{xy} para JSS coladas com Sikaforce® 7752 e $L_O = 50$ mm.

De forma geral, verifica-se que em termos de τ_{xy} o adesivo Sikaforce® 7752 tem um comportamento mais favorável comparativamente ao adesivo Araldite® AV138, mesmo este último tendo valores mais elevados de resistência ao corte. Isto deve-se ao facto de o adesivo Sikaforce® 7752 ter melhor distribuição das tensões devido à sua flexibilidade, e também apresentar uma grande capacidade de plastificação. Desta forma, no que concerne às τ_{xy} , prevê-se um melhor desempenho do Sikaforce® 7752 em juntas com e sem defeito.

4.3.2 Tensões de arrancamento

A Figura 71 e a Figura 72 mostram a distribuição de σ_y normalizadas para os dois valores de L_O em juntas com o adesivo frágil Araldite® AV138, com e sem defeitos. Tal como nos gráficos de tensões τ_{xy} normalizadas, de uma forma geral, é possível observar valores de tensão mais reduzidos na região interior do adesivo, atingindo o máximo nas extremidades

da sobreposição. Refere-se que os valores de tensão negativos obtidos são referentes a esforços de compressão. Este efeito está relacionado com a curvatura ou deformação transversal da junta, que é governada pela deformação dos aderentes, e que provoca separação nas extremidades da camada de adesivo e compressão na zona intermédia da mesma (Campilho et al. 2008, Campilho et al. 2009). Pode-se verificar que quanto maior é a percentagem de defeito na junta, maior é o gradiente das tensões de tração (sendo esta variação pouco significativa até às juntas com 50% de defeito). Ao mesmo tempo, o valor das tensões de compressão no interior do adesivo aproxima-se cada vez mais do valor das de tração. Isto acontece devido à diminuição de área colada que tem de resistir ao esforço aplicado, levando a uma maior curvatura da junta adesiva, aumentando assim a compressão na mesma. Para valores de L_O mais elevados, observam-se picos de tração mais significativos na proximidade das singularidades da junta (o valor de $\sigma_y/\tau_{méd}$ máximo de tração obtido subiu de 8,5 para 11,3, desde $L_O = 25$ até 50 mm – juntas com 75% de defeito). Ao mesmo tempo, as tensões compressivas na zona interior da camada do adesivo tornam-se menos significativas, devido ao efeito não tão acentuado da curvatura dos aderentes na camada de adesivo.

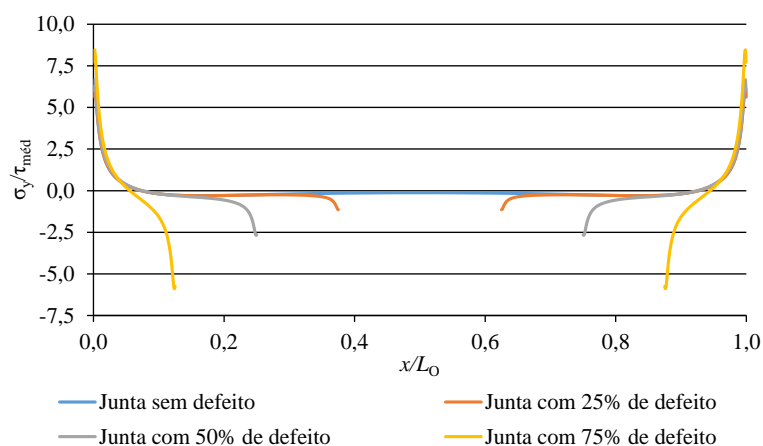


Figura 71 – Distribuição de tensões σ_y para JSS coladas com Araldite® AV138 e $L_O = 25$ mm.

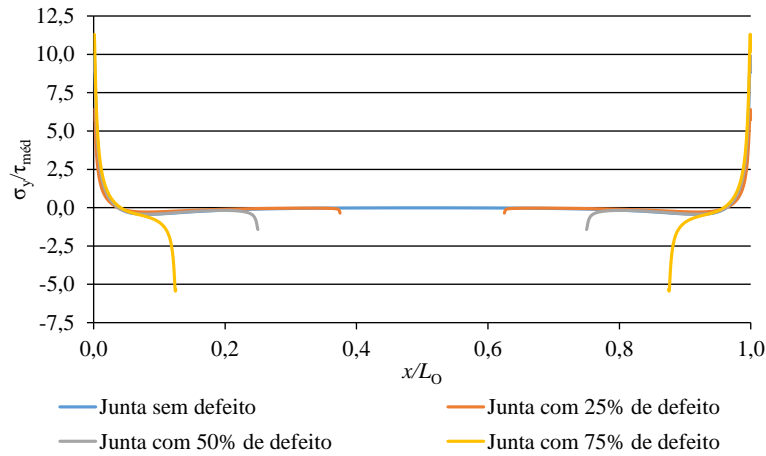


Figura 72 – Distribuição de tensões σ_y para JSS coladas com Araldite® AV138 e $L_0 = 50$ mm.

A Figura 73 e a Figura 74 mostram a distribuição de σ_y normalizadas para os dois valores de L_0 em juntas coladas com o adesivo dúctil Sikaforce® 7752, com e sem defeitos. Em ambos os gráficos é possível observar valores de tensão mais reduzidos na região interior do adesivo, atingindo o máximo nas extremidades da sobreposição. No entanto, estes picos de tensão são muito inferiores em magnitude comparativamente ao registado para o adesivo Araldite® AV138, devido ao menor valor de E deste adesivo (o valor de $\sigma_y/\tau_{méd}$ máximo de tração obtido desceu de 11,3 para 4,8 – juntas com 75% de defeito). Esta diferença de valores de E permite uma distribuição de tensões σ_y menos concentrada nas extremidades da zona de ligação, levando a uma maior resistência da junta. Com o aumento da percentagem de defeitos nas juntas, o gradiente das tensões de tração é superior e o valor das tensões σ_y de compressão no interior do adesivo aproxima-se cada vez mais do valor das de tração. Para valores de L_0 mais elevados, observam-se picos de tração de magnitude superior na proximidade das singularidades da junta (o valor de $\sigma_y/\tau_{méd}$ máximo de tração obtido subiu de 3,1 para 4,8, desde $L_0 = 25$ até 50 mm – juntas com 75% de defeito). Ao mesmo tempo, as tensões compressivas na zona interior da camada do adesivo tornam-se, de uma forma geral, menos significativas, o que é justificado de forma idêntica ao descrito para o adesivo Araldite® AV138.

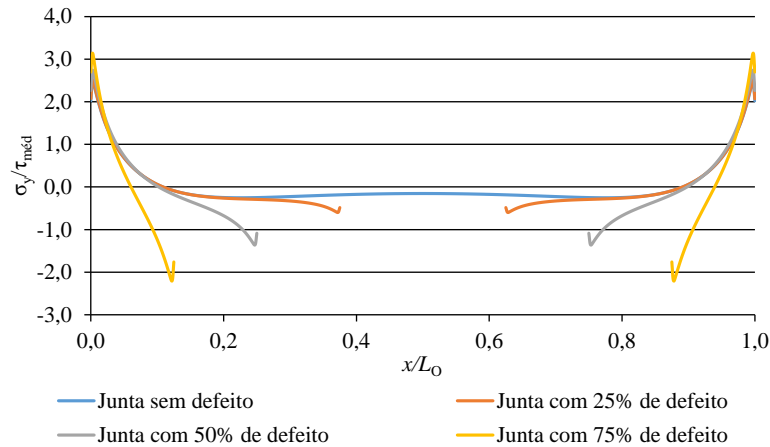


Figura 73 – Distribuição de tensões σ_y para JSS coladas com Sikaforce® 7752 e $L_0 = 25$ mm.

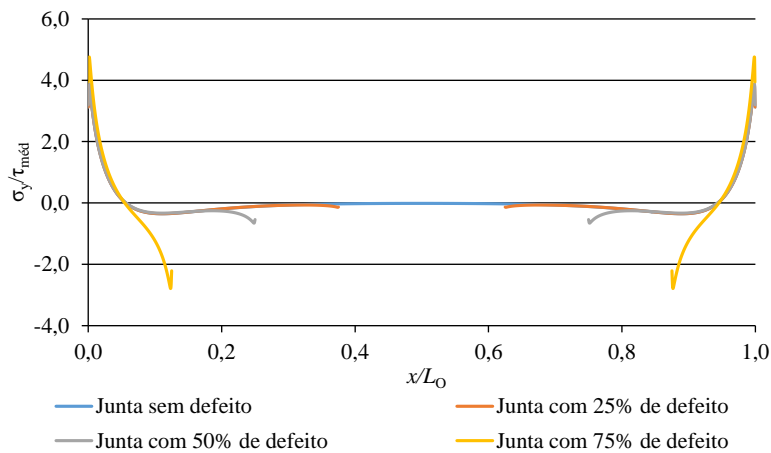


Figura 74 – Distribuição de tensões σ_y para JSS coladas com Sikaforce® 7752 e $L_0 = 50$ mm.

Em suma, verifica-se que em termos de tensões σ_y , o adesivo Sikaforce® 7752 apresenta uma distribuição de tensões mais uniforme e com valores de pico normalizados inferiores, o que mostra que este adesivo é mais adequado para o tipo de aplicação em causa em comparação com o adesivo Araldite® AV138.

4.4 Análise do parâmetro de dano no adesivo

A análise do parâmetro de dano consiste no estudo da variável de dano SDEG dos elementos coesivos da camada de adesivo ao longo de x/L_0 . Esta variável permite visualizar a degradação da rigidez da lei coesiva em modo misto do MDC (Figura 66) e varia entre SDEG=0 (material não danificado) até SDEG=1 (rotura completa). O estudo desta variável é de extrema importância, porque permite avaliar o estado de degradação da

camada de adesivo num dado estado do carregamento, e assim compreender melhor o processo de rotura para diferentes configurações de junta e adesivos.

4.4.1 Análise da variável do dano para $P_{\text{máx}}$

A Figura 75 e a Figura 76 analisam a degradação da rigidez ao longo do L_0 quando é aplicada a $P_{\text{máx}}$ para os quatro tipos de juntas com o adesivo Araldite® AV138. Tendo em conta a variação do parâmetro de dano SDEG com a percentagem de defeito, observa-se que com o seu aumento a porção danificada da camada de adesivo diminui. Tal acontece devido à diminuição da zona de colagem já que, como se verificou nas análises de tensões τ_{xy} (Figura 67 à Figura 70) e σ_y (Figura 71 à Figura 74), estas tensões ficam restringidas a extensões mais reduzidas da área colada com o aumento de defeito. Aumentando o L_0 , o comportamento é idêntico, embora ocorra uma aproximação das curvas, diminuindo a diferença entre os quatro tipos de junta. Este comportamento pode ser explicado pelo aumento dos gradientes de tensões de $L_0 = 25$ para 50 mm (Figura 67 e Figura 68 para tensões τ_{xy} ; Figura 71 e Figura 72 para tensões σ_y), o que resulta numa zona danificada mais restrita.

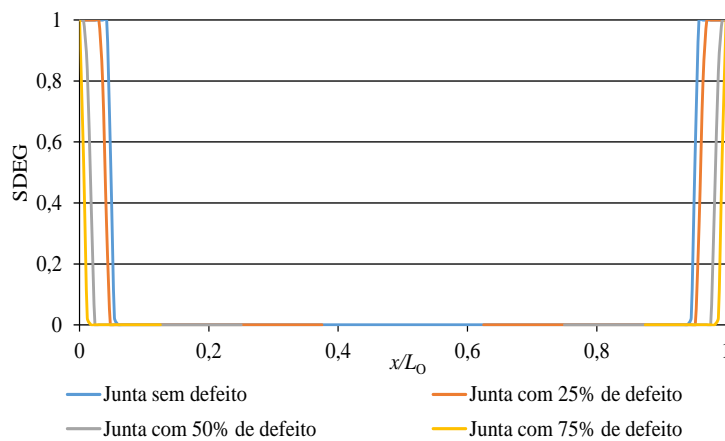


Figura 75 – Variável de dano quando aplicada a $P_{\text{máx}}$ para JSS com o adesivo Araldite® AV138 com e sem defeitos, com $L_0 = 25$ mm.

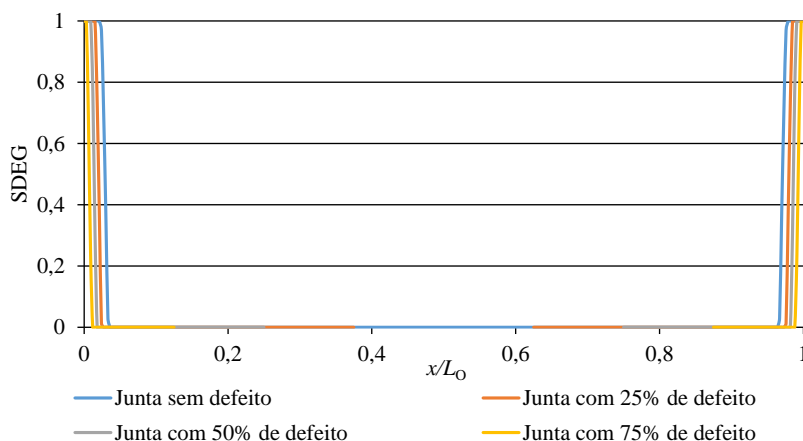


Figura 76 – Variável de dano quando aplicada a $P_{m\acute{a}x}$ para JSS com o adesivo Araldite® AV138 com e sem defeitos, com $L_O = 50$ mm.

Nas juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_O = 25$ mm (Figura 77), a variável de dano estende-se de forma mais uniforme na zona de ligação, começando em $SDEG=0,08$ para a junta de $L_O = 25$ mm sem defeito e atingindo o valor de aproximadamente $SDEG=0,45$ na extremidade da sobreposição. Aumentando a percentagem de defeito, os valores de SDEG diminuem. Este comportamento deve-se à redução dos comprimentos de ligação com introdução de defeito, o que diminui os gradientes de tensões nas camadas de adesivo (Figura 69 e Figura 70 para τ_{xy} ; Figura 73 e Figura 74 para σ_y), o que resulta em valores de SDEG inferiores para $P_{m\acute{a}x}$. Analisando as juntas com $L_O = 50$ mm verifica-se, de uma forma geral, que os valores de SDEG para $P_{m\acute{a}x}$ são superiores nas extremidades da sobreposição ($SDEG=0,6$ para as juntas sem defeito). Esta diferença ocorre devido aos maiores gradientes de tensão para L_O superiores (na Figura 70 e Figura 74).

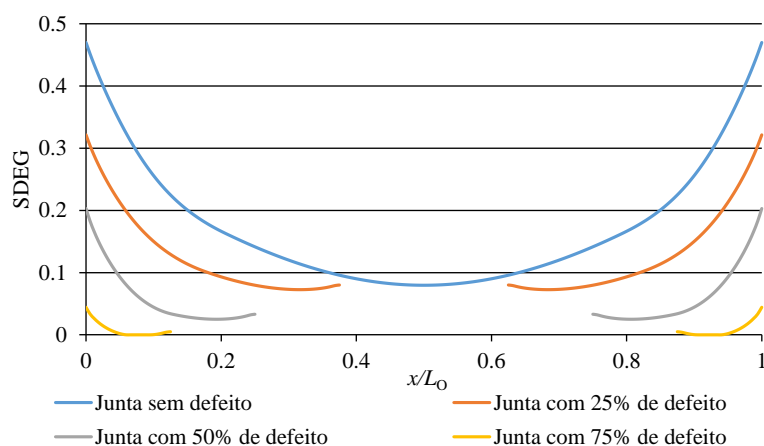


Figura 77 – Variável de dano quando aplicada a $P_{m\acute{a}x}$ para JSS com o adesivo Sikaforce® 7752 com e sem defeitos, com $L_O = 25$ mm.

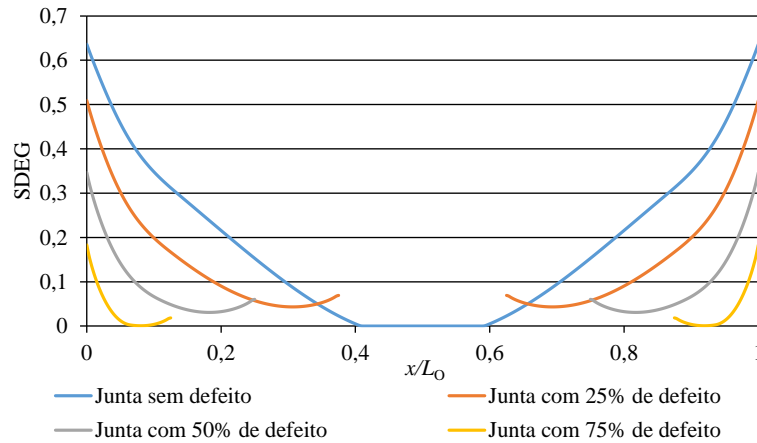


Figura 78 – Variável de dano quando aplicada a $P_{\text{máx}}$ para JSS com o adesivo Sikaforce® 7752 com e sem defeitos, com $L_0 = 50$ mm.

4.4.2 Análise da variável de dano quando o 1º elemento coesivo atinge a rotura

Analisando agora o parâmetro de dano SDEG para o adesivo Araldite® AV138 quando o 1º elemento coesivo atinge a rotura completa (Figura 79), verifica-se que o comportamento é semelhante, independentemente da percentagem de defeito estudada. Devido a este facto só se representou dois tipos de junta. Há uma variação brusca no parâmetro de dano em relação ao L_0 mostrando, mais uma vez, que uma pequena área de colagem da sobreposição é que suporta os esforços na junta. Comparando os dois L_0 , verifica-se uma variação mais acentuada para a junta com $L_0 = 50$ mm (Figura 80), o que resulta do maior gradiente de tensões para o maior valor de L_0 (Figura 67 e Figura 68 para tensões τ_{xy} ; Figura 71 e Figura 72 para tensões σ_y).

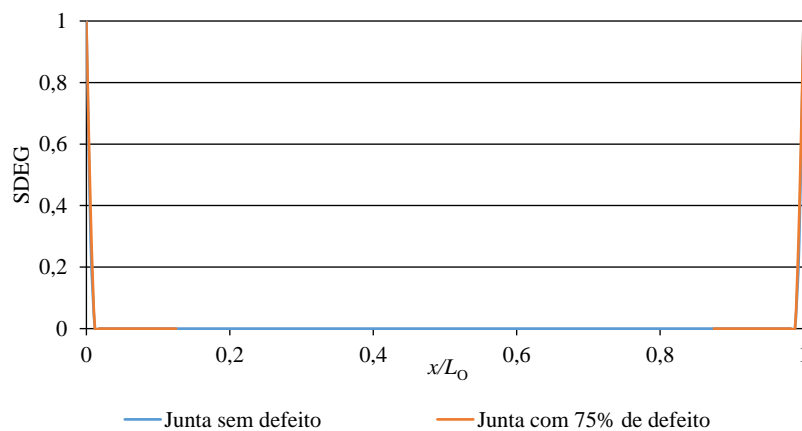


Figura 79 – Variável de dano quando o 1º elemento coesivo atinge a rotura completa, para JSS com o adesivo Araldite® AV138 com e sem defeitos, com $L_0 = 25$ mm.

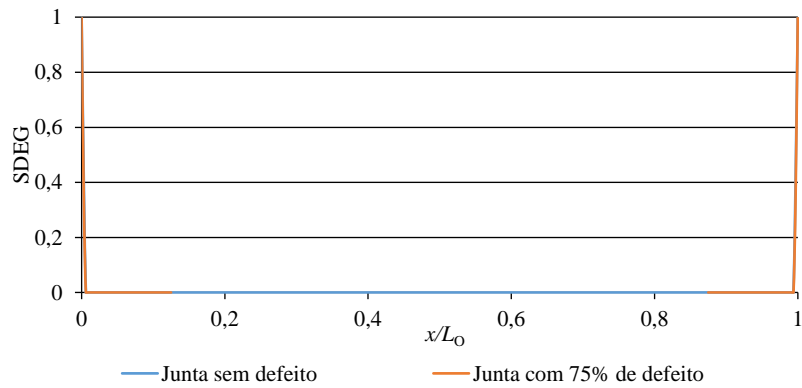


Figura 80 – Variável de dano quando o 1º elemento coesivo atinge a rotura completa, para JSS com o adesivo Araldite® AV138 com e sem defeitos, com $L_0 = 50$ mm.

A variável de dano para o adesivo Sikaforce® 7752 e os dois valores de L_0 estudados (Figura 81) comportam-se de maneira completamente oposta comparando com o adesivo Araldite® AV138, verificando-se que quando o 1º elemento coesivo atinge a rotura completa ($SDEG=1$), o resto da junta também o atinge, comprovando assim a sua ductilidade e processo de rotura mais gradual. Aumentando a percentagem de defeito ou o L_0 , obteve-se a mesma curva, tendo por este motivo só se apresentado um gráfico.

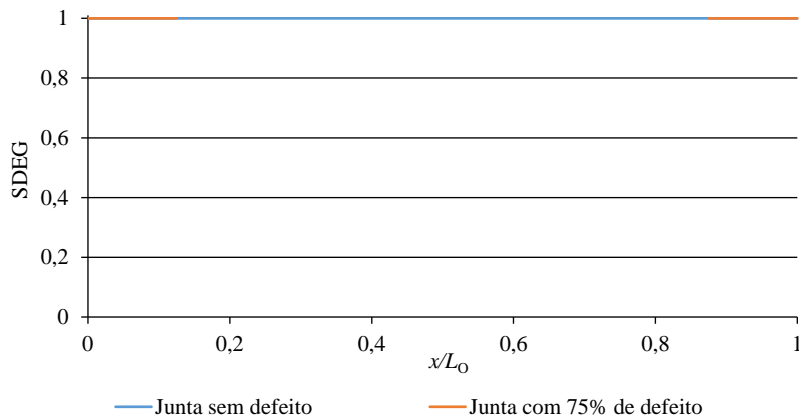


Figura 81 – Variável de dano quando o 1º elemento coesivo atinge a rotura completa, para JSS com o adesivo Sikaforce® 7752 com e sem defeitos, com os $L_0 = 25$ e 50 mm.

4.4.3 Evolução da variável do dano com $\delta/\delta P_{\text{máx}}$

Da Figura 82 à Figura 85 é mostrada a evolução do parâmetro de dano SDEG para valores crescentes de $\delta/\delta P_{\text{máx}} \times 100$ [%], para as juntas coladas com Araldite® AV138 e para os dois L_0 em estudo, aumentando a percentagem de defeito. $\delta P_{\text{máx}}$ é o deslocamento para a $P_{\text{máx}}$

(como resultado, um valor de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ de 100% corresponde a $P_{\text{máx}}$). De uma forma geral, verifica-se que, devido ao adesivo Araldite® AV138 ser frágil, o valor de SDEG na sobreposição varia entre SDEG=0 (ausência de dano) e SDEG=1 (dano completo) numa extensão reduzida, o que resulta numa zona de dano muito pequena e estando a maior parte da junta sem contribuir para a resistência. Só há contribuição quando a junta está perto da rotura, sendo possível se observar isso, por exemplo, na Figura 83 a. O valor de $P_{\text{máx}}$ é atingido com um grau de plastificação reduzido do adesivo nas extremidades de sobreposição, o que mais uma vez se observa ser coerente com as distribuições de tensão para este adesivo (Figura 67 e Figura 68). A rotura completa ocorre muito rapidamente, de uma forma geral, para todas as configurações de juntas (entre $\delta/\delta P_{\text{máx}} = 100\%$ e 103,6% para $L_O = 25$ mm sem defeito e entre 100% e 100,6%, para $L_O = 25$ mm com 75% de defeito). Aumentando o L_O para 50 mm, a rotura ocorre para um valor de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ inferior comparativamente às juntas com $L_O = 25$ mm (entre $\delta/\delta P_{\text{máx}} = 100\%$ e 101,8% para a junta sem defeito - Figura 82 b - e entre 100% e 100,4%, para a junta com 75% de defeito - Figura 85 b). Isto acontece, como foi referido no capítulo 4.4.1, devido à diminuição da zona de colagem e, como se verificou anteriormente, só as extremidades da sobreposição é que contribuem para a resistência da junta. Aumentando a percentagem de defeito das juntas, os valores de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ para a rotura completa diminuem, como era esperado, o que se explica pela fragilidade do adesivo, o que faz com que a junta não consiga acomodar picos crescentes de tensões com o aumento de defeito.

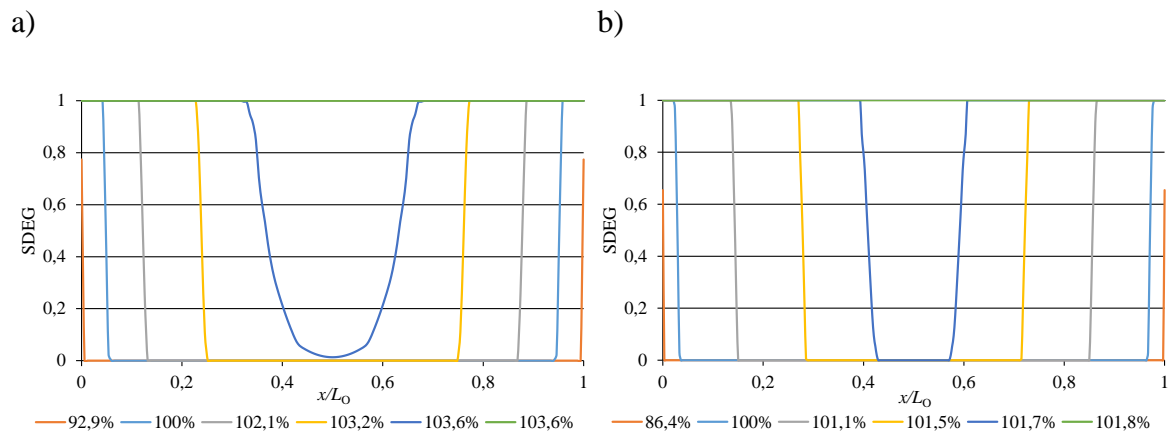


Figura 82 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138 sem defeito, com a) $L_O = 25$ mm e b) $L_O = 50$ mm.

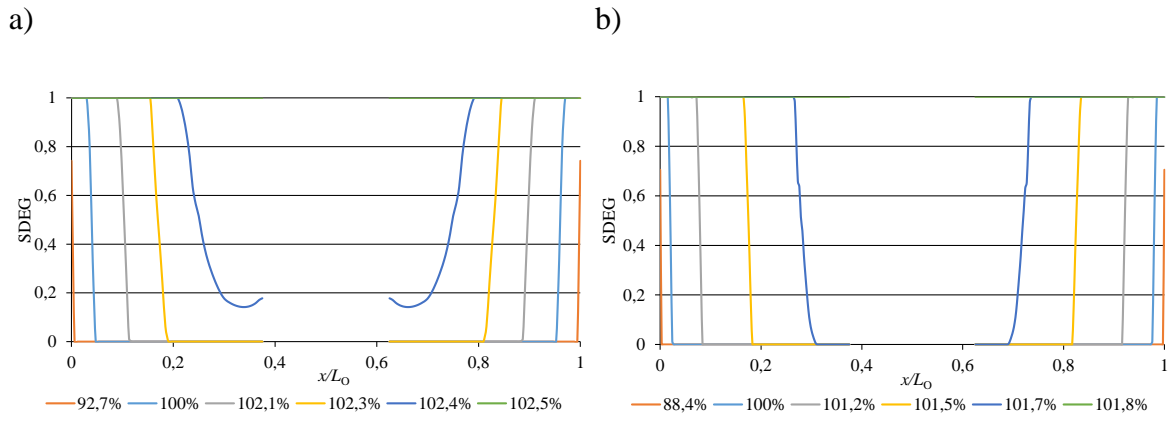


Figura 83 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138 com 25% de defeito, com a) $L_0 = 25$ mm e b) $L_0 = 50$ mm.

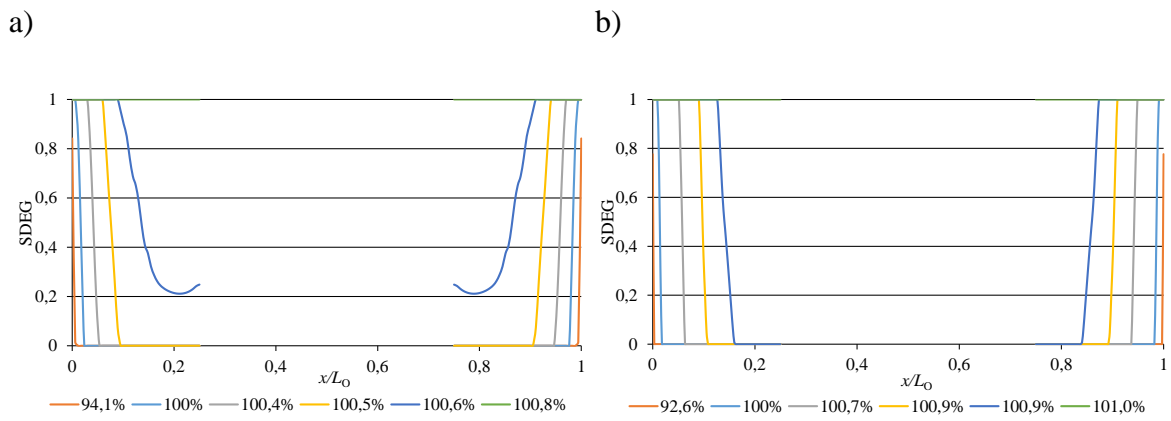


Figura 84 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138 com 50% de defeito, com a) $L_0 = 25$ mm e b) $L_0 = 50$ mm.

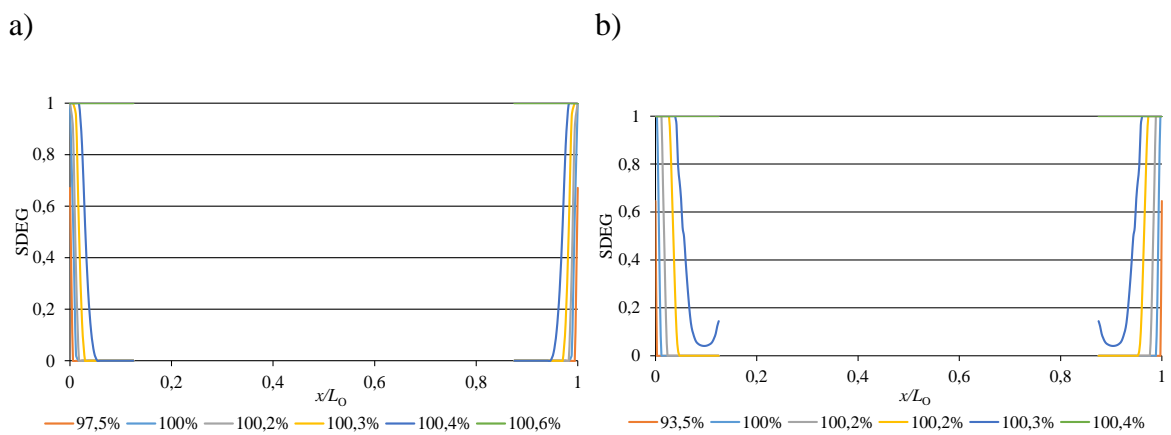


Figura 85 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138 com 75% de defeito, com a) $L_0 = 25$ mm e b) $L_0 = 50$ mm.

Da Figura 86 à Figura 89 é mostrada a evolução do parâmetro de dano SDEG quando é aplicada a $P_{\text{máx}}$ para as juntas coladas com Sikaforce[®] 7752 e para os dois L_O em estudo, em função da percentagem de defeito. Comparativamente com o adesivo Araldite[®] AV138, o adesivo Sikaforce[®] 7752 tem um comportamento dúctil e como tal, regista-se uma variação muito mais gradual do parâmetro de dano SDEG. Verifica-se que no início do carregamento são as extremidades da sobreposição que sofrem dano, passando de seguida as regiões internas a apresentar dano (tipicamente a partir das curvas de $\delta/\delta P_{\text{máx}} = 100\%$ até a junta atingir a rotura completa). A plasticidade do adesivo é demonstrada pelos valores elevados de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ correspondente à rotura, ($\delta/\delta P_{\text{máx}}$ de 437,5% para junta com $L_O = 25$ mm sem defeito).

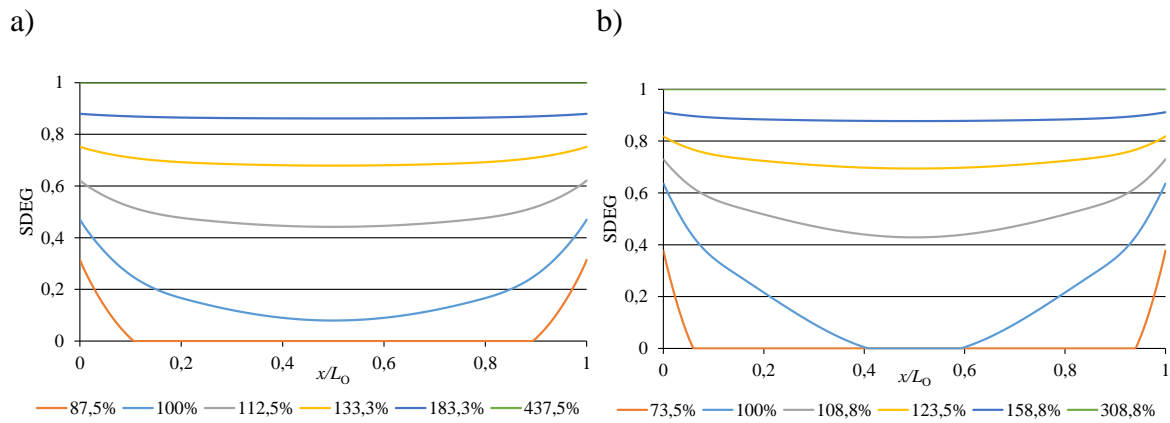


Figura 86 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Sikaforce[®] 7752 sem defeito, com a) $L_O = 25$ mm e b) $L_O = 50$ mm.

Aumentando L_O para 50 mm, a rotura ocorre para um valor de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ inferior comparativamente às juntas com $L_O = 25$ mm ($\delta/\delta P_{\text{máx}}$ de 308,8% para a junta sem defeito), tal como ocorreu com o adesivo Araldite[®] AV138, devido à junta estar sujeita a esforços mais elevados, o que consequentemente leva à existência de valores mais elevados de $\delta P_{\text{máx}}$ para $L_O = 50$ relativamente a 25 mm. Observando o formato das curvas, no geral verifica-se que para as juntas com $L_O = 50$ mm o gradiente de SDEG é superior, mostrando que a parte interior da junta contribui menos comparativamente com as juntas de $L_O = 25$ mm. A zona de colagem interior tem um contributo mais tardio para resistência da junta, devido aos também maiores gradientes de tensões (Figura 69 e Figura 70 para tensões τ_{xy} ; Figura 73 e Figura 74 para tensões σ_y). Também se pode constatar que o valor de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ aumenta com a percentagem de defeito nas juntas ($\delta/\delta P_{\text{máx}} = 437,5\%$ na junta sem defeito com $L_O = 25$ mm e $\delta/\delta P_{\text{máx}} = 996,2\%$ na junta com 75% de defeito para $L_O =$

25 mm). Isto deve-se ao facto de as cargas registadas nas juntas com defeitos serem progressivamente menores, o que permite à junta suportar valores de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ maiores devido à elevada plasticidade do adesivo Sikaforce® 7752.

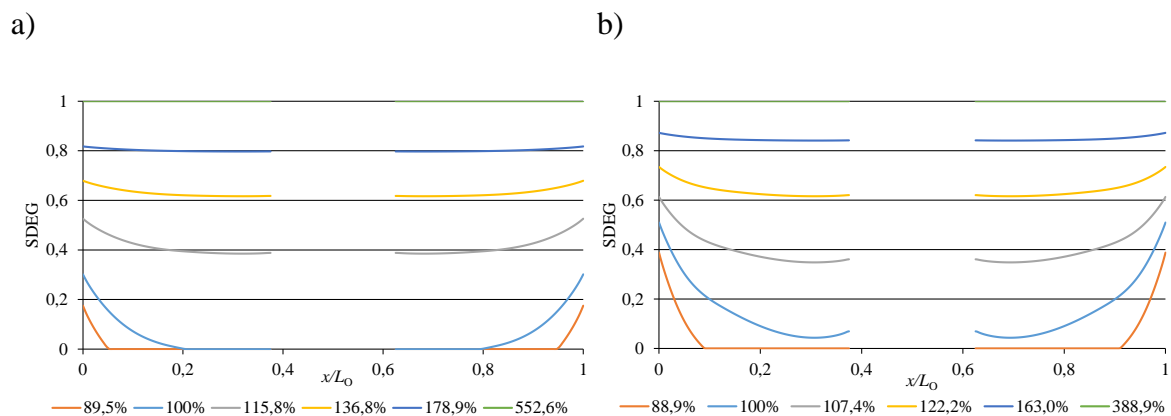


Figura 87 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 com 25% de defeito, com a) $L_0 = 25$ mm e b) $L_0 = 50$ mm.

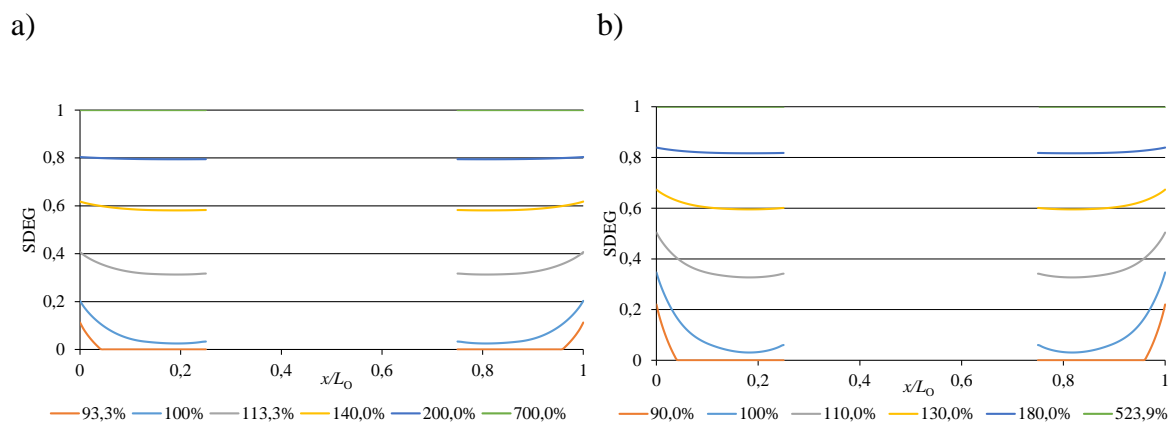


Figura 88 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 com 50% de defeito, com a) $L_0 = 25$ mm e b) $L_0 = 50$ mm.

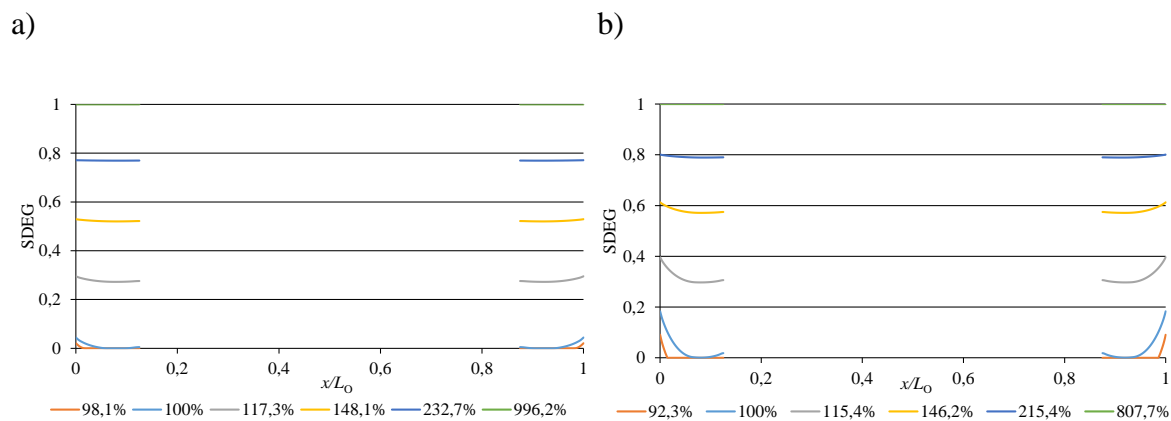


Figura 89 – Evolução da variável de dano com δ para JSS coladas com o adesivo Sikaforce[®] 7752 com 75% de defeito, com a) $L_0 = 25$ mm e b) $L_0 = 50$ mm.

4.5 Previsão de resistência

Este capítulo compara as previsões de $P_{\text{máx}}$ pelos MDC com os resultados dos ensaios experimentais e apresenta uma discussão detalhada dos resultados obtidos, ou seja, comparação dos adesivos, valores de L_0 e configurações de juntas utilizadas (sem defeito e com 25%, 50% e 75% de defeito), em função das conclusões tiradas nas análises de tensões e do parâmetro de dano SDEG. Apresentam-se inicialmente alguns exemplos de curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente pelos MDC do *software* ABAQUS[®]. A Figura 90 e a Figura 91 (a) e (b) apresentam as curvas para as JSS coladas com o adesivo Araldite[®] AV138, para $L_0 = 25$ e 50 mm, e sem e com 75% de defeito, respetivamente. As juntas coladas com o adesivo Sikaforce[®] 7752, para $L_0 = 25$ e 50 mm, sem e com 75% de defeito apresentam-se na Figura 90 e a Figura 91 (c) e (d), por esta ordem. A correlação geral para as JSS foi bastante aceitável para as juntas adesivas em que se empregou o adesivo Araldite[®] AV138, em relação à $P_{\text{máx}}$, rigidez ou deslocamento de rotura, não tendo em conta o escorregamento visível em algumas curvas, pois alterou o valor de deslocamento das juntas. Para o adesivo Sikaforce[®] 7752, os resultados experimentais superaram os numéricos, sendo este facto abordado mais à frente nesta tese.

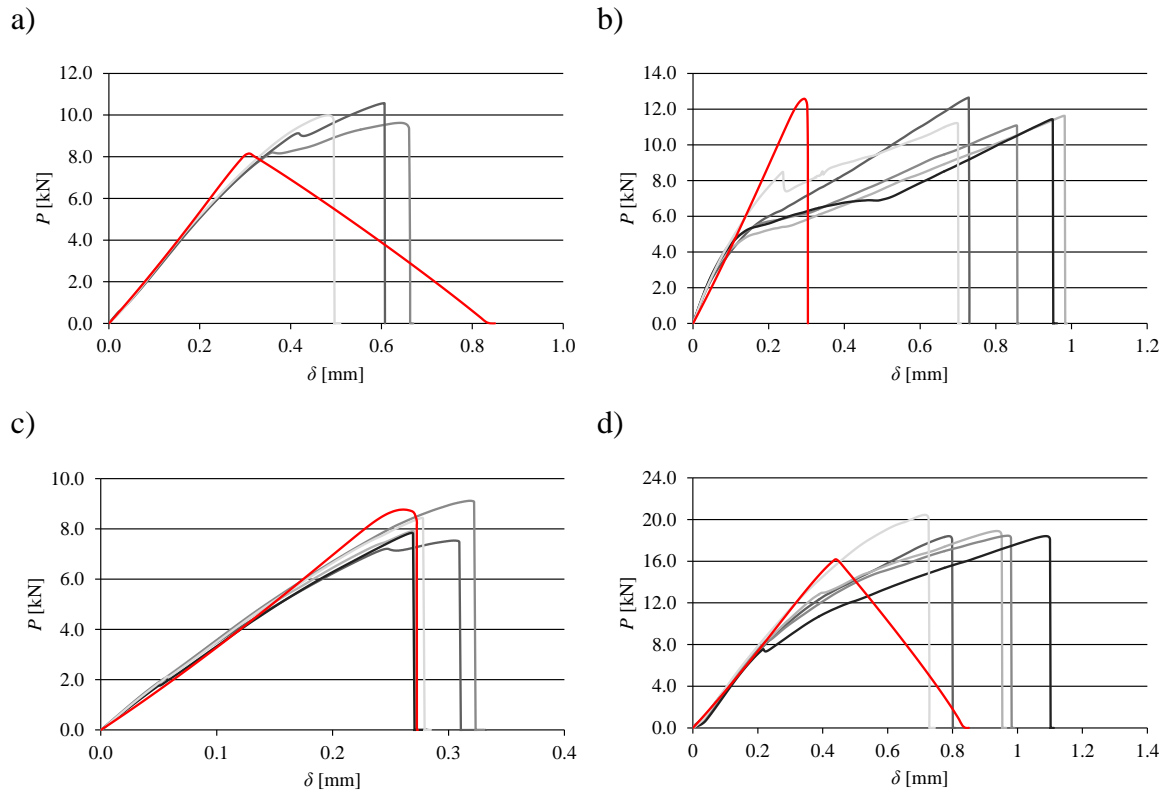


Figura 90 – Curvas P - δ obtidas numericamente e experimentalmente para as JSS coladas com Araldite® AV138 com $L_0 = 25\text{mm}$ (a) e $L_0 = 50\text{ mm}$ (b) e para as JSS coladas com Sikaforce® 7752 com $L_0 = 25\text{mm}$ (c) e $L_0 = 50\text{ mm}$ (d), todas sem defeito.

Os resultados obtidos apresentam diferentes tendências, dependendo das propriedades de resistência dos adesivos (resistência e ductilidade). O valor de E dos adesivos também influencia a distribuição das tensões e conseqüentemente a resistência: um adesivo com menor valor de E tem uma distribuição de tensões mais uniforme, sendo o caso das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 (Fernandes et al. 2015). Esta variação torna as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 com picos de tensões mais elevados (os valores do E dos adesivos podem ser comparados na Tabela 3 e Tabela 4). Da Figura 67 à Figura 74 mostra-se que o perfil das tensões τ_{xy} e σ_y torna-se mais constante com a redução de L_0 , o que torna as sobreposições menores mais dependentes da resistência do adesivo do que da tenacidade à fratura. Por outro lado, um adesivo frágil sofre rotura quando a resistência limite é atingida nas extremidades da zona colada, enquanto os adesivos dúcteis permitem uma plastificação nas extremidades de sobreposição, ao mesmo tempo que o interior da zona colada aumenta a sua contribuição para a resistência da junta (Adams e Peppiatt 1974). No que toca à percentagem de defeito na junta, verifica-se um comportamento semelhante para os dois tipos de adesivos no que diz respeito à variação

das tensões τ_{xy} e σ_y , ou seja, só se observando variações significativas da magnitude dessas tensões para valores elevados de defeito (junta com 75% de defeito), identificando-se o mesmo nas juntas com L_O mais elevado.

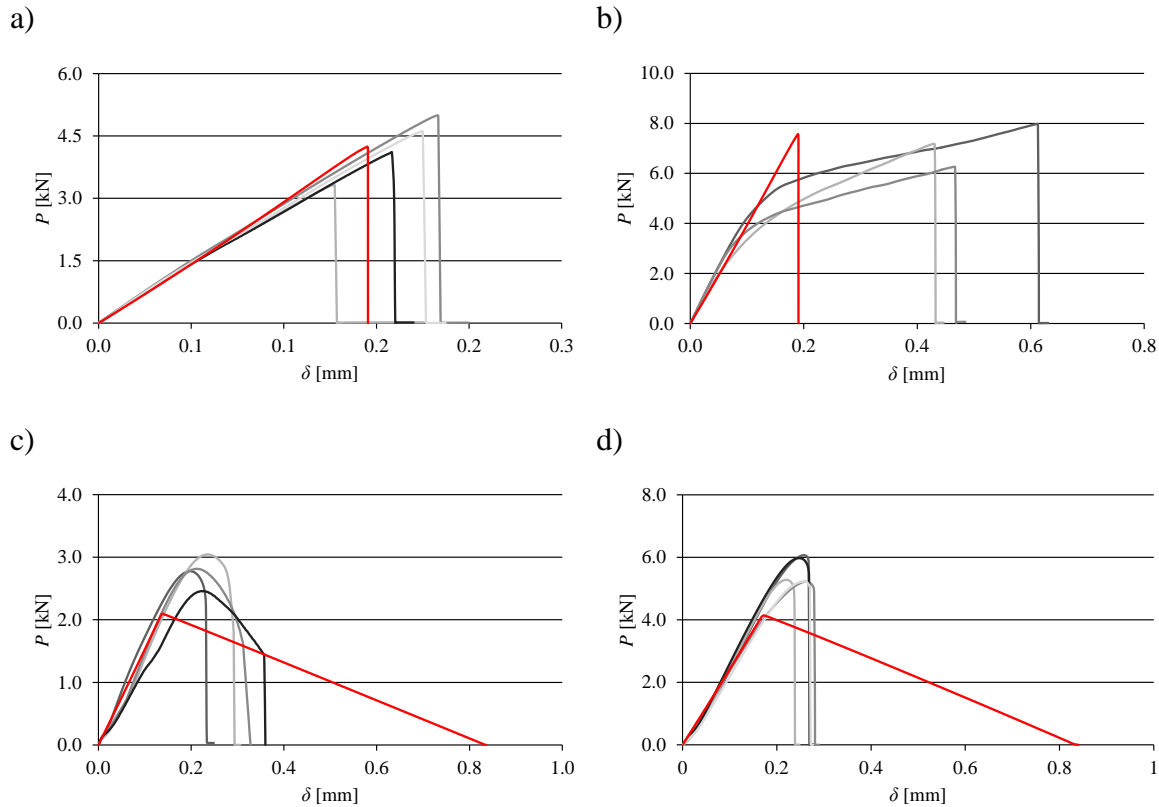


Figura 91 – Curvas P - δ obtidas numericamente e experimentalmente para as JSS coladas com Araldite® AV138 com $L_O = 25\text{mm}$ (a) e $L_O = 50\text{mm}$ (b) e para as JSS coladas com Sikaforce® 7752 com $L_O = 25\text{mm}$ (c) e $L_O = 50\text{mm}$ (d), todas com 75% de defeito.

Pode também ser realizada uma correlação com os gráficos da variável de dano (da Figura 75 à Figura 89) observa-se que, quando $P_{\text{máx}}$ é atingida, o adesivo Araldite® AV138 concentra o dano numa região normalizada com menor extensão (Figura 75 e Figura 76) do que o adesivo Sikaforce® 7752 (Figura 77 e Figura 78). Com o aumento do L_O , a região interna da ligação adesiva com o Araldite® AV138 sofre menos dano e as extremidades de sobreposição são mais afetadas. Além disso, a rotura completa é atingida para um valor significativamente menor de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ do que para o adesivo dúctil, porque este adesivo é frágil (Fernandes et al. 2015). Relativamente ao comportamento dos adesivos com o aumento da percentagem de defeito, observa-se que o adesivo Araldite® AV138 apresenta valores mais baixos de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ devido à redução da porção de dano admissível nas juntas com este adesivo, em virtude de ser um adesivo frágil. Por outro lado, o adesivo Sikaforce®

7752 comporta-se de maneira diferente, apresentando valores mais elevados de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ para todos os valores de percentagem de defeito. Tal acontece devido ao facto das cargas registadas nas juntas com defeitos serem progressivamente menores, permitindo à junta ter $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ maiores, devido à sua elevada plasticidade. Com o aumento de L_0 , os valores de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ para a rotura completa decrescem para os dois adesivos devido ao aumento das cargas a que a junta está sujeita, o que se reflete em valores de $\delta P_{\text{máx}}$ superiores. Assim, o valor de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ normalizado por $\delta P_{\text{máx}}$ diminui. Considerando a variação de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ com o aumento da percentagem de defeito depende do tipo de adesivo, de tal forma que estes valores diminuem para o adesivo Araldite® AV138 e aumentam para o adesivo Sikaforce® 7752. Este comportamento também está diretamente relacionado com a ductilidade do adesivo, ou seja, com o aumento da percentagem de defeito o Araldite® AV138 não permite acomodar as concentrações de tensões crescentes, ao contrário do Sikaforce® 7752.

A Figura 92 e Figura 93 representam a comparação entre os valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais e numéricos para as juntas sem defeito com defeito para os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. A partir destas figuras consegue-se obter conclusões bastante importantes no que toca à previsão da resistência das juntas. Verifica-se que, para o adesivo Araldite® AV138, $P_{\text{máx}}$ só varia de forma significativa para valores bastante elevadas de percentagem de defeito (75% de defeito) existentes na junta. Tal é justificado pela variação observada da magnitude das tensões normalizadas τ_{xy} e σ_y nas extremidades da sobreposição, na medida em que só se observa uma variação significativa nestas distribuições de tensões entre uma percentagem de defeito entre 50 e 75% (Figura 67 e Figura 68 para tensões τ_{xy} ; Figura 71 e Figura 72 para tensões σ_y). Relativamente ao adesivo Sikaforce® 7752, $P_{\text{máx}}$ diminui de forma quase linear e proporcional com o aumento da percentagem de defeito. Isto pode ser comprovado pela distribuição praticamente uniforme das tensões normalizadas τ_{xy} (Figura 69 e Figura 70), pela baixa magnitude de tensões σ_y observada (Figura 73 e Figura 74), o que se reflete em valores da variável de dano SDEG muito semelhantes ao longo da camada de adesivo (da Figura 86 à Figura 89). Estes fatores mostram que os valores de $P_{\text{máx}}$ do adesivo Sikaforce® 7752 refletem de forma direta a redução da área colada proveniente do aumento da percentagem de defeito, enquanto o comportamento das juntas se mantém igual. Relativamente ao aumento do valor de L_0 desde 25 até 50 mm, o adesivo Araldite® AV138 regista um aumento de 33% na $P_{\text{máx}}$ enquanto o adesivo Sikaforce® 7752 tem um aumento de 88,1% (para juntas sem defeito).

A diferença no aumento da $P_{\text{máx}}$ entre adesivos deve-se ao facto de, no caso do Araldite® AV138, apenas as extremidades resistirem às cargas aplicadas (Figura 79), enquanto as juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 resistem com todo o L_0 , em virtude da grande durabilidade deste adesivo (Figura 81).

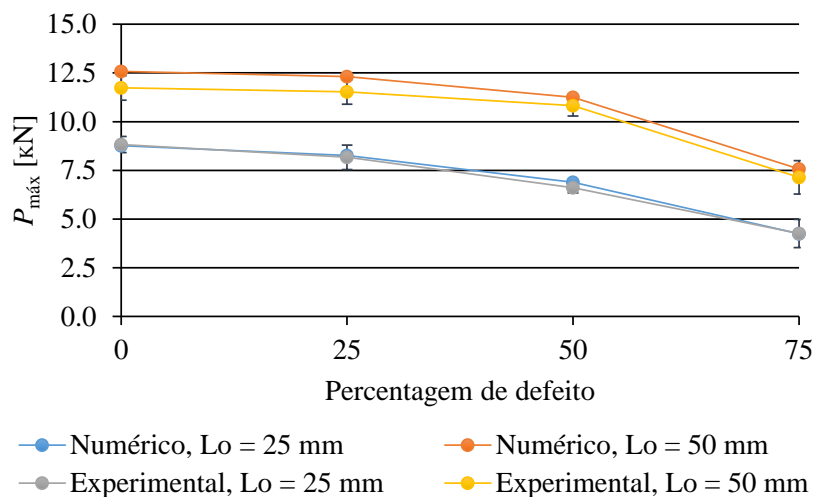


Figura 92 – Comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais e numéricos em função da percentagem de defeito para as JSS coladas com Araldite® AV138.

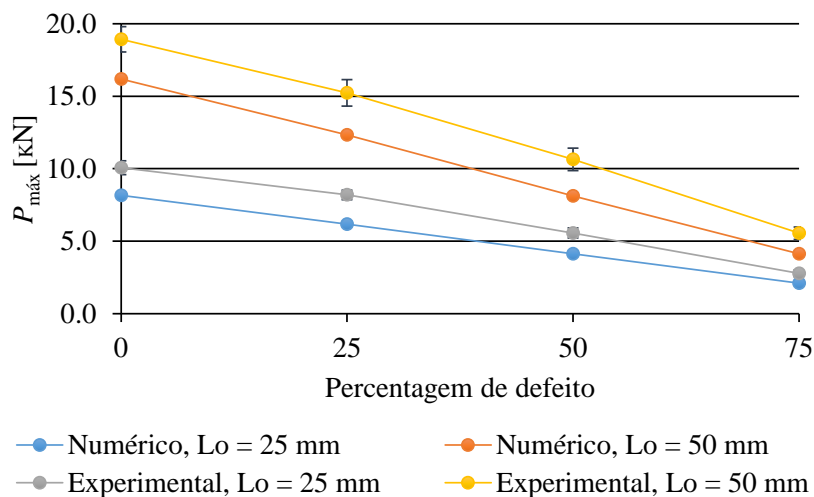


Figura 93 – Comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais e numéricos em função da percentagem de defeito para as JSS coladas com Sikaforce® 7752.

Ao analisar a capacidade de previsão dos MDC, considera-se que os resultados foram muito díspares entre as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 (Figura 92) e o adesivo Sikaforce® 7752 (Figura 93). Os desvios relativos máximos, relativamente aos

valores experimentais, foram de 7,2% (Araldite[®] AV138, junta com $L_0 = 50$ mm sem defeito) e 25,7% (Sikaforce[®] 7752, junta com $L_0 = 50$ mm e 75% de defeito). Conclui-se assim que relativamente ao adesivo Araldite[®] AV138 se obteve uma aproximação bastante razoável através da lei coesiva triangular, visto este ter um comportamento frágil e uma plastificação bastante reduzida (ver Tabela 3). Contrariamente, para o adesivo Sikaforce[®] 7752, apresentam um desvio assinalável aos resultados experimentais. Este comportamento foi causado pela grande ductilidade deste adesivo (ver Tabela 4), que não é adequadamente modelada pela lei coesiva triangular. De facto, embora este modelo dê uma ideia aproximada da resistência da junta e mostre como varia a $P_{\text{máx}}$ com o aumento da percentagem de defeito, para se obterem resultados mais precisos, podem ser antes consideradas leis coesivas trapezoidais (Campilho et al. 2013).

5 Conclusões

O principal objetivo deste trabalho foi o estudo de JSS à tração com aderentes de materiais compósitos e diferentes dimensões de defeitos na camada de adesivo, considerando diferentes adesivos e valores de L_0 . Os resultados obtidos mostraram que o comportamento das juntas é altamente dependente do tipo de adesivo. Para o adesivo Araldite® AV138, em virtude de ter um valor elevado de E , observaram-se picos de tensão τ_{xy} e σ_y mais elevados nas extremidades da sobreposição relativamente ao adesivo Sikaforce® 7752. Por outro lado, o adesivo Sikaforce® 7752 permite a plastificação da ligação adesiva quando se atinge a tensão limite, o que resulta num aumento da resistência da junta. Aumentando o valor de L_0 , verificou-se um aumento no valor dos picos de tensão τ_{xy} e σ_y para os dois adesivos, devido ao gradiente crescente de deformações longitudinais nos aderentes causados pelas grandes áreas de L_0 e aumento dos esforços transmitidos. Relativamente ao aumento da percentagem de defeito nas juntas, o valor de pico das tensões normalizadas τ_{xy} e σ_y também aumentam (sendo esta variação mínima até às juntas com 50% de defeito para os dois adesivos).

A análise da variável de dano quando atingida a $P_{m\acute{a}x}$ mostrou que os dois adesivos têm comportamentos completamente distintos. O adesivo Araldite® AV138 assinala uma zona de dano muito restrita nas extremidades da sobreposição. Por outro lado, para o adesivo Sikaforce® 7752, a variável de dano estende-se de forma mais uniforme ao longo da zona de ligação. Relativamente à evolução da variável de dano com $\delta/\delta P_{m\acute{a}x}$, chegou-se a diversas conclusões. De uma forma geral, verifica-se que, devido ao adesivo Araldite® AV138 ser frágil, o valor de SDEG na sobreposição varia entre SDEG=0 (ausência de dano) e SDEG=1 (dano completo) numa extensão reduzida, o que resulta numa zona de dano muito pequena e estando a maior parte da junta sem contribuir para a resistência. Isto acontece devido a um grau reduzido de plastificação. Comparativamente com o adesivo Araldite® AV138, o adesivo Sikaforce® 7752 tem um comportamento dúctil e, como tal,

registra-se uma variação muito mais gradual do parâmetro de dano SDEG. Verifica-se que no início do carregamento são as extremidades da sobreposição que sofrem dano, passando de seguida as regiões internas a apresentar dano (tipicamente a partir das curvas de $\delta/\delta P_{\text{máx}} = 100\%$ até a junta atingir a rotura completa). A rotura completa ocorre muito rapidamente para o adesivo Araldite® AV138 de uma forma geral para todas as configurações de juntas (entre $\delta/\delta P_{\text{máx}} = 100\%$ e $103,6\%$ para $L_0 = 25$ mm sem defeito). Comparativamente a este adesivo, a plasticidade do adesivo Sikaforce® 7752 é demonstrada pelos valores elevados de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ correspondente à rotura, ($\delta/\delta P_{\text{máx}}$ de $437,5\%$ para junta com $L_0 = 25$ mm sem defeito). Aumentando o valor de L_0 , ambos os adesivos apresentam a mesma tendência. De facto, a rotura ocorre para um valor de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ inferior comparativamente às juntas com $L_0 = 25$ mm. Isto acontece devido à junta estar sujeita a esforços mais elevados, o que consequentemente leva à existência de valores mais elevados de $\delta P_{\text{máx}}$ para $L_0 = 50$ relativamente a 25 mm. Por fim, relativamente ao aumento da percentagem de defeitos nas juntas, os dois adesivos têm comportamentos díspares. Os valores de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ do Araldite® AV138 para a rotura completa diminuem, o que se explica pela fragilidade do adesivo, e resulta na falta de capacidade destas juntas de acomodar picos crescentes de tensões com o aumento de defeito. Para o adesivo Sikaforce® 7752, o valor de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ aumenta com a percentagem de defeito nas juntas, devido ao facto de as cargas registadas nas juntas com defeitos serem progressivamente menores, o que permite à junta suportar valores de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ maiores devido à sua elevada plasticidade.

Em função dos comportamentos descritos, foi possível compreender em detalhe a variação de $P_{\text{máx}}$ para as diferentes configurações de junta. Comparando os dados analisados para os dois adesivos em estudo, para o Araldite® AV138 verifica-se que o valor de $P_{\text{máx}}$ tem variações menores com o aumento da percentagem de defeito desde a configuração sem defeito até 75% de defeito (redução de $51,8\%$) comparativamente com o adesivo Sikaforce® 7752 (redução de $72,4\%$). Este comportamento está relacionado com o diferente processo de rotura das juntas com os dois tipos de adesivo, na medida em que na rotura do Sikaforce® 7752 todo o adesivo contribui para a resistência, enquanto a rotura do Araldite® AV138 é uma rotura frágil mal se atinge os picos de tensões na junta, conforme se observou pelas análises de tensão e de dano. Por outro lado os comportamentos dos dois adesivos também foram bastante distintos com o aumento de L_0 (redução de $39,1\%$ para o Araldite® AV138 e redução de $68,2\%$ para o Sikaforce® 7752). De facto, a $P_{\text{máx}}$ aumenta ligeiramente para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 ao aumentar L_0 de 25

para 50 mm (aumento de 33,0%), enquanto para as juntas coladas com Sikaforce® 7752 o aumento é quase linear (aumento de 88,1%). Para o Araldite® AV138, o pequeno aumento de $P_{\text{máx}}$ registado deve-se ao aumento das concentrações de tensões com o aumento de L_0 e falta de capacidade de plastificação deste adesivo. Por outro lado, o Sikaforce® 7752 também apresenta estes picos de tensão, mas permite a plastificação quase completa da camada de adesivo quando $P_{\text{máx}}$ é atingido o que resulta em incrementos significativos de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 .

A percentagem de defeito têm uma influência na resistência muito mais significativa para o adesivo Sikaforce® 7752, tendo em conta que o comportamento dúctil deste adesivo faz com que a rotura ocorra em condições muito próximas da cedência generalizada. Como tal, o valor de $P_{\text{máx}}$ é aproximadamente proporcional à área de corte da camada de adesivo. Por outro lado, o adesivo Araldite® AV138, devido à sua fragilidade provoca rotura com a zona interior do adesivo sem ter grande contributo para $P_{\text{máx}}$. Assim, a resistência não é tão afetada pela presença de defeito. Apenas para dimensões de defeito significativas se observa uma redução digna de registo em $P_{\text{máx}}$.

A técnica dos MDC mostrou ser precisa na previsão da resistência das juntas, com a exceção das configurações de junta que obtiveram rotura na ligação adesiva com o Sikaforce® 7752 (desvio máximo de 25,7%). Por outro lado, a máxima diferença registada nas juntas com o Araldite® AV138 foi de 7,2%. No primeiro caso, devido à grande ductilidade do adesivo, as leis triangulares do MDC não foram compatíveis com os resultados experimentais. Esta limitação pode ser contornada usando um MDC mais adequado para o adesivo em questão.

Como sugestões para trabalhos futuros apresentam-se as seguintes:

- Estudo da influência de defeitos em diferentes configurações de juntas, que propiciem diferentes distribuições de tensões;
- Estudo da presença de filetes de adesivo na extremidade de sobreposição de juntas adesivas e respetivo efeito no valor de $P_{\text{máx}}$;
- Estudo da influência de defeitos a outros tipos de solicitações, como por exemplo flexão;
- Tentativa de modelação das juntas com adesivo dúctil através de leis trapezoidais, para uma melhor modelação das características do adesivo.

Referências

- (2015). "Devota: Bicicletas de carbono." Retrieved 21-09-2015, from <http://bicicletasdecarbono.com/>.
- (2015). "Lotus Elise Sport 190: The elitist Elise." Retrieved 21-09-2015, from <https://www.classicdriver.com/en/article/lotus-elise-sport-190-elitist-elise>.
- Adams, R. D. e Peppiatt, N. A. (1974). "Stress analysis of adhesive-bonded lap joints." *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* **9**(3): 185-196.
- Aguiar, C., Almeida, F. G., Rocha, C. e Couto, N. (2011). Design do produto. TecnoMetal. Faculdade de Engenharia do Porto, AIMMAP.
- Andersson, T. e Stigh, U. (2004). "The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces." *International Journal of Solids and Structures* **41**: 413–434.
- Azevedo, J. C. S. (2014). Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF). Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Azevedo, J. C. S., Campilho, R. D. S. G., da Silva, F. J. G., Faneco, T. M. S. e Lopes, R. M. "Cohesive law estimation of adhesive joints in mode II condition." *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*.
- Barenblatt, G. I. (1959). "The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks." *J Appl Math Mech* **23**: 622–636.
- Belytschko, T. e Black, T. (1999). "Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing." *Int J Fract Mech* **45**: 601–620.
- Campilho, R. D. S. G. (2005). Modelação da Execução de Reparações em Materiais Compósitos. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Campilho, R. D. S. G., Banea, M. D., Neto, J. A. B. P. e da Silva, L. F. M. (2013). "Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **44**: 48-56.
- Campilho, R. D. S. G., Banea, M. D., Pinto, A. M. G., da Silva, L. F. M. e de Jesus, A. M. P. (2011). "Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **31**(5): 363-372.
- Campilho, R. D. S. G. e da Silva, L. F. M. (In press). Joint design in natural fiber composites. *Natural fiber composites*. R. D. S. G. Campilho. Boca Raton, CRC Press.

- Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F. e Domingues, J. J. M. S. (2005). "Modelling single and double-lap repairs on composite materials." *Composites Science and Technology* **65**(13): 1948-1958.
- Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F. e Domingues, J. J. M. S. (2008). "Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs." *International Journal of Solids and Structures* **45**(5): 1497-1512.
- Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F. e Domingues, J. J. M. S. (2009). "Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **29**(2): 195-205.
- Campilho, R. D. S. G., Moura, D. C., Banea, M. D. e da Silva, L. F. M. (2014). "Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **53**: 15-22.
- Constante, C. J., Campilho, R. D. S. G. e Moura, D. C. (2015). "Tensile fracture characterization of adhesive joints by standard and optical techniques." *Engineering Fracture Mechanics* **136**: 292-304.
- Correia, J. R., Sá, M., Gonilha, J., Almeida, I., Branco, F. e Garrido, M. (2011). Pontes em plásticos reforçados com fibras (FRP) e em betão-FRP. 1^{as} Jornadas de Materiais na Construção. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Curiel Sosa, J. L. e Karapurath, N. (2012). "Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method." *Composites Science and Technology* **72**(7): 788-791.
- da Silva, L. F. M. e Campilho, R. D. S. G. (2012). *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. Heidelberg, Springer.
- da Silva, L. F. M., de Magalhães, A. G. e de Moura, M. F. S. F. (2007). *Juntas adesivas estruturais*. Porto, Publindústria.
- da Silva, L. F. M., Rodrigues, T., Figueiredo, M. A. V., de Moura, M. e Chousal, J. A. G. (2006). "Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength." *The Journal of Adhesion Science and Technology* **82**: 1091-1115.
- Daudeville, L. e Ladevèze, P. (1993). "A damage mechanics tool for laminate delamination." *Composite Structures* **25**(1): 547-555.
- de Moura, M. F. S. F., Daniaud, R. e Magalhães, A. G. (2006). "Simulation of mechanical behaviour of composite bonded joints containing strip defects." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **26**(6): 464-473.
- de Moura, M. F. S. F., de Morais, A. B. e de Magalhães, A. G. (2011). *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Porto, Publindústria
- Duan, K., Hu, X. e Mai, Y. W. (2004). "Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints." *J Adhes Sci Technol* **18**: 39-53.
- Faneco, T. M. S. (2014). *Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Feraren, P. e Jensen, H. M. (2004). "Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints." *Eng Fract Mech* **71**: 2125-2142.

- Fernandes, R. L. (2015). Estudo numérico da adequação de diferentes tipos de leis coesivas na previsão de resistência de juntas adesivas por Modelos de Dano Coesivo. Tese de Mestrado - em curso, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Fernandes, T. A. B. (2014). Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Fernandes, T. A. B., Campilho, R. D. S. G., Banea, M. D. e da Silva, L. F. M. (2015). "Adhesive selection for single lap bonded joints: Experimentation and advanced techniques for strength prediction." *The Journal of Adhesion* **91**: 841-862.
- Fernlund, G. e Spelt, J. K. (1991). "Failure load prediction of structural adhesive joints: Part 1: Analytical method." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **11**(4): 213-220.
- Goland, M. e Reissner, E. (1944). "The stresses in cemented joints." *Journal of Applied Mechanics* **66**: 17-27.
- Gonçalves, J. P. M., de Moura, M. F. S. F. e de Castro, P. M. S. T. (2002). "A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **22**(5): 357-365.
- Harris, J. A. e Adams, R. A. (1984). "Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **4**(2): 65-78.
- Hart-Smith, L. J. (1981). *Stress analysis: a continuum mechanics approach*. Developments in Adhesives. A. J. Kinloch. London, Applied Science Publishers
- Hogberg, J. L. e Stigh, U. (2006). "Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer." *Engineering Fracture Mechanics* **73**: 2541-2556.
- Ji, G., Ouyang, Z., Li, G., Ibekwe, S. e Pang, S.-S. (2010). "Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints." *International Journal of Solids and Structures* **47**(18-19): 2445-2458.
- Karachalios, E. F., Adams, R. D. e da Silva, L. F. M. (2013). "Strength of single lap joints with artificial defects." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **45**: 69-76.
- Khoramishad, H., Crocombe, A. D., Katnam, K. B. e Ashcroft, I. A. (2010). "Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model." *Int J Fatigue* **32**: 1146-1158.
- Leffler, K., Alfredsson, K. S. e Stigh, U. (2007). "Shear behaviour of adhesive layers." *International Journal of Solids and Structures* **44**: 530-545.
- Liljedahl, C. D. M., Crocombe, A. D., Wahab, M. A. e Ashcroft, I. A. (2006). "Damage modelling of adhesively bonded joints." *Int J Fract* **141**: 147-161.
- Luo, Q. e Tong, L. (2007). "Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints." *International Journal of Solids and Structures* **44**(7-8): 2349-2370.
- Magalhães, A. G., de Moura, M. F. S. F. e Gonçalves, J. P. M. (2005). "Evaluation of stress concentration effects in single-lap bonded joints of laminate composite materials." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **25**(4): 313-319.
- Marques, G. P. (2014). Influência do tipo de adesivo em juntas híbridas soldadas-adesivas. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

- Moës, N., Dolbow, J. e Belytschko, T. (1999). "A finite element method for crack growth without remeshing." *Int J Numer Meth Eng* **46**: 131–150.
- Mohammadi, S. (2008). *Extended finite element method for fracture analysis of structures*. New Jersey, Blackwell Publishing.
- Neto, J. A. B. P. (2011). *Estudo paramétrico de juntas adesivas em material compósito*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Neto, J. A. B. P., Campilho, R. D. S. G. e da Silva, L. F. M. (2012). "Parametric study of adhesive joints with composites." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **37**: 96-101.
- Panigrahi, S. K. e Pradhan, B. (2007). "Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* **26**(2): 183-201.
- Penado, F. E. (1998). "A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint." *Journal of Thermoplastic Composite Materials* **11**: 272-287.
- Pocius, A. V. (2002). *Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction*.
- Shenoy, V., Ashcroft, I. A., Critchlow, G. W. e Crocombe, A. D. (2010). "Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue." *Eng Fract Mech* **77**: 1073–1090.
- Vable, M. e Reddy Maddi, J. (2006). "Boundary element analysis of adhesively bonded joints." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **26**(3): 133-144.
- Volkersen, O. (1938). "Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten." *Luftfahrtforschung* **15**: 41-47.
- Voyiadjis, G. Z. e Kattan, P. I. (2005). *Damage Mechanics*. New York, Marcell Dekker.
- Williams, M. L. (1959). "The stresses around a fault or crack in dissimilar media." *Bull Seism Soc of America* **49**: 199–204.
- Xu, W. e Wei, Y. (2012). "Strength analysis of metallic bonded joints containing defects." *Computational Materials Science* **53**(1): 444-450.
- Xu, W. e Wei, Y. (2012). "Strength and interface failure mechanism of adhesive joints." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **34**: 80-92.
- Yang, Q. D. e Thouless, M. D. (2001). "Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints." *Int J Fract* **110**: 175–187.