



Previsão de resistência de juntas adesivas utilizando leis coesivas obtidas pelo método inverso

FILIPE ANDRÉ LOURENÇO VIANA

novembro de 2017

PREVISÃO DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS UTILIZANDO LEIS COESIVAS OBTIDAS PELO MÉTODO INVERSO

Filipe André Lourenço Viana

1120367

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica

PREVISÃO DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS UTILIZANDO LEIS COESIVAS OBTIDAS PELO MÉTODO INVERSO

Filipe André Lourenço Viana

1120367

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

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Manuel Jorge Dores de Castro

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Eduardo André de Sousa Marques

Investigador, FEUP

AGRADECIMENTOS

A elaboração desta Dissertação de Mestrado apenas foi possível graças à colaboração e ao contributo, de forma direta ou indireta, de várias pessoas, às quais gostaria de exprimir algumas palavras de agradecimento e profundo reconhecimento, em particular:

ao meu orientador Professor Doutor Raul Campilho pela excelente oportunidade em trabalhar em conjunto e particularmente pela transmissão de conhecimento, experiência e aconselhamento que apresentou durante o tempo de realização deste trabalho. Foi sem dúvida uma longa jornada de aprendizagem contínua que envolveu dedicação, disponibilidade, sacrifício e incentivo nas diversas etapas que compuseram este trabalho;

à minha família, em especial à Conceição e ao Vítor, pela privação de convívio que lhes causei. O apoio e compreensão inestimáveis, pelos diversos sacrifícios suportados e pelo constante encorajamento a fim de prosseguir a elaboração deste trabalho, foram sem dúvida vitais no decorrer desta longa etapa;

à minha namorada Diana, por todos os horas privadas de convívio e confraternização. O encorajamento, dedicação e compressão foram incalculáveis, e sem duvida revigorantes de forma a concluir esta caminhada;

ao Pedro Ribeiro, pela camaradagem, pelo companheirismo e pelo prestimoso contributo que se transformaram em conselhos e sugestões;

finalmente ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, enquanto instituição que me transmitiu os conhecimentos devidos ao longo da minha formação académica e que disponibilizou as instalações e meios para a realização da componente experimental integrante deste trabalho.

PALAVRAS CHAVE

Juntas adesivas, Adesivo, Lei coesiva, Modelos de Dano Coesivo, Método de Elementos Finitos, Parâmetros coesivos, Método inverso.

RESUMO

As ligações adesivas apareceram pela necessidade de se encontrar formas de unir componentes, por vezes dissimilares, através de técnicas mais vantajosas. Nos tempos atuais, qualquer estrutura deve ter como característica a resistência, a robustez e a leveza, o que amplificou o interesse industrial e investigação nas ligações adesivas, principalmente na melhoria das propriedades de resistência e fratura dos materiais. Assim sendo, nos últimos anos, o emprego de juntas adesivas em aplicações industriais tem crescido gradualmente, substituindo alguns métodos de ligação tradicionais, por apresentarem vantagens tais como redução de concentração de tensões, reduzido peso e preço, e facilidade de processamento/fabrico.

Nesta dissertação, as leis coesivas de três adesivos, Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, foram obtidas pela aplicação de um método inverso de ajuste entre curvas força-deslocamento ($P-\delta$) numéricas e experimentais, de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) para caracterização à tração e ensaios *End-Notched Flexure* (ENF) para caracterização ao corte. Posteriormente estas leis são validadas com dados experimentais de juntas de sobreposição simples (JSS) e sobreposição dupla (JSD) através do *software* ABAQUS®.

Para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, à tração e ao corte, a lei triangular previu o comportamento do adesivo de forma bastante adequada, verificando-se uma elevada concordância entre os resultados experimentais e numéricos. Para a previsão da resistência do adesivo Sikaforce® 7752, a lei triangular não se ajustou convenientemente nem à tração nem ao corte. Considera-se que, devido à ductilidade do mesmo, para o adesivo Sikaforce, uma lei trapezoidal é a que melhor se adequa.

KEYWORDS

Adhesive joints, Adhesive, Cohesive Law, Cohesive Zone Models, Finite Element Method, Cohesive Parameters, Inverse Method.

ABSTRACT

Adhesive bonds appeared by the necessity to find ways of joining components, sometimes dissimilar, through more advantageous techniques. Nowadays, any structure must have strength, robustness and lightness, which has amplified the industrial interest and investigation in adhesive joints, mainly in the improvement of the strength and fracture properties of the materials. Thus, in recent years, the use of adhesive joints in industrial applications has gradually grown, replacing some traditional bonding methods, since they have advantages such as reduced stress concentrations, reduced weight and cost, and ease of processing/manufacturing.

In this dissertation, the cohesive laws of three adhesives, Araldite® AV138, Araldite® 2015 and Sikaforce® 7752, were obtained by the application of an inverse method of adjustment between the numerical and experimental force-displacement curves (P - δ) of Double-Cantilever Beam (DCB) tests for tensile characterization and End-Notched Flexure (ENF) tests for shear characterization. Next, these laws are validated with experimental data of single-lap joints (SLJ) and double-lap joints (DLJ) through the ABAQUS® software.

For the adhesives Araldite® AV138 and Araldite® 2015, in tension and shear, the triangular law predicted the behavior of the adhesive very accurately, with a high agreement between the experimental and numerical results. To predict the strength of the adhesive Sikaforce® 7752, the triangular law did not suitably fit either the tension or shear behaviours. It is considered that, due to its ductility, for the adhesive Sikaforce, a trapezoidal law is the one that suits best.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

| | |
|------|---|
| 2D | Duas dimensões |
| 4ENF | <i>Four-Point End-Notched Flexure</i> |
| ADCB | <i>Asymmetric Double-Cantilever Beam</i> |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| CAD | Desenho assistido por computador |
| CBBM | <i>Compliance-Based Beam Method</i> |
| CBT | <i>Corrected Beam Theory</i> |
| CCM | <i>Compliance Calibration Method</i> |
| CLS | <i>Crack-Lap Shear</i> |
| CZM | <i>Cohesive Zone Model</i> |
| DBT | <i>Direct Beam Theory</i> |
| DCB | <i>Double-Cantilever Beam</i> |
| ELS | <i>End-Loaded Split</i> |
| ENF | <i>End-Notched Flexure</i> |
| FRMM | <i>Fixed Ratio Mixed-Mode</i> |
| ISEP | Instituto Superior de Engenharia do Porto |
| JCI | Junta de chanfro interior |
| JD | Junta em degrau |
| JSD | Junta sobreposição dupla |

| | |
|------|---------------------------------------|
| JSS | Junta sobreposição simples |
| JTT | Junta topo-a-topo |
| MDC | Modelo do Dano Coesivo |
| MEF | Método de Elementos Finitos |
| MEFE | Método de Elementos Finitos Extendido |
| MFLE | Mecânica da Fratura Linear Elástica |
| MMB | <i>Mixed-Mode Bending</i> |
| MMF | <i>Mixed-Mode Flexure</i> |
| PVC | Policloreto de vinil |
| SDEG | <i>Stiffness degradation</i> |
| SENB | <i>Single-Edge Notched Bend</i> |
| SLB | <i>Single-Leg Bending</i> |
| TDCB | <i>Tapered Double-Cantilever Beam</i> |
| TND | Teste não destrutivo |
| ZPF | Zona de processo de fratura |

Lista de Símbolos

| | |
|------------------------|---|
| a_0 | Comprimento da pré-fenda |
| B | Largura dos substratos |
| E | Módulo de Young |
| $E_{p\text{máx}}$ | Energia libertada desde o início até à carga máxima |
| $E_{\delta\text{máx}}$ | Energia libertada desde o início até á rutura |
| G | Taxa de libertação de energia |

| | |
|-----------------|--|
| G_c | Taxa crítica de libertação de energia |
| h | Espessura dos substratos |
| L | Comprimento dos substratos |
| P | Carga |
| $P_{máx}$ | Carga máxima |
| t_A | Espessura adesiva |
| t_n^0 | Resistência coesiva à tração |
| t_s^0 | Resistência coesiva ao corte |
| x/L_0 | Distância normalizada ao longo do comprimento do adesivo |
| δ | Deslocamento |
| $\delta_{máx}$ | Deslocamento máximo |
| δ_n^0 | Deslocamento de carga máxima |
| $\delta_{Pmáx}$ | Deslocamento na carga máxima |
| δ_s^f | Deslocamento de rotura |
| ϵ_f | Deformação de rotura à tração |
| ν | Coefficiente de Poisson |
| σ_f | Tensão de rotura à tração |
| τ_f | Tensão de rotura ao corte |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - ESTRUTURA ESQUEMÁTICA DE UM AVIÃO E RESPECTIVAS LIGAÇÕES [5]..... | 7 |
| FIGURA 2 - CONSTITUIÇÃO TÍPICA DE UMA JUNTA ADESIVA [5] | 8 |
| FIGURA 3 - APLICAÇÃO DOS ADESIVOS EM AUTOMÓVEIS MODERNOS [8]..... | 12 |
| FIGURA 4 - APLICAÇÃO DE ADESIVOS NA INDÚSTRIA AEROESPACIAL [11]..... | 12 |
| FIGURA 5 - JUNTA ADESIVA ENTRE O CASCO E O CONVÉS DE UM BARCO [11]..... | 13 |
| FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DOS VÁRIOS ESFORÇOS DE UMA LIGAÇÃO ADESIVA [12]..... | 14 |
| FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES NOS ESFORÇOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO [5] | 14 |
| FIGURA 8 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DE CORTE NUMA JUNTA ADESIVA [5] | 15 |
| FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NOS ESFORÇOS DE CLIVAGEM E DE ARRANCAMENTO [5]..... | 16 |
| FIGURA 10 - ROTURA COESIVA [5]..... | 16 |
| FIGURA 11 - ROTURA ADESIVA [5]..... | 17 |
| FIGURA 12 - ROTURA NO SUBSTRATO [5] | 17 |
| FIGURA 13 - ROTURA MISTA [5] | 17 |
| FIGURA 14 - TIPOS DE CONFIGURAÇÕES DE JUNTAS [15]..... | 20 |
| FIGURA 15 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO NAS JSS [16] | 21 |
| FIGURA 16 - ELEMENTOS COESIVOS PARA SIMULAR UMA ESPESSURA NULA DE MATERIAL: A) APROXIMAÇÃO LOCAL E B) APROXIMAÇÃO CONTÍNUA [65] | 30 |
| FIGURA 17 - MODELO COESIVO DE DANO TRIANGULAR [62] | 32 |
| FIGURA 18 - MODELO COESIVO DO DANO TRAPEZOIDAL [62] | 33 |
| FIGURA 19 - GEOMETRIA DO PROVETE DCB [50] | 35 |
| FIGURA 20 - GEOMETRIA DO PROVETE ENF [50] | 35 |
| FIGURA 21 - MODOS DE ROTURA [83] | 38 |
| FIGURA 22 – COMBINAÇÃO ENTRE OS PRINCIPAIS MODOS DE CARREGAMENTO [1]..... | 38 |
| FIGURA 23 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO DCB [8]..... | 39 |
| FIGURA 24 - GEOMETRIA DO ENSAIO DCB ADOTADA PELA NORMA ASTM D3433-99 (DIMENSÕES EM MM) [8]..... | 39 |
| FIGURA 25 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO ENF [8] | 41 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 26 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO (σ -E) DA LIGA DE ALUMÍNIO AL6082-T651 [65]..... | 48 |
| FIGURA 27 - MODO DE FORNECIMENTO DA RESINA ARALDITE® AV 138 E ENDURECEDOR HV 998 [93].. | 48 |
| FIGURA 28 - CURVAS σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [94] | 49 |
| FIGURA 29 - MODO DE FORNECIMENTO DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [97] | 50 |
| FIGURA 30 - CURVAS σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [85]..... | 50 |
| FIGURA 31 - MODO DE FORNECIMENTO DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [99] | 52 |
| FIGURA 32 - CURVAS Σ -E DE PROVETES MACIÇOS DE SIKAFORCE® 7752 [98]..... | 52 |
| FIGURA 33 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM ENSAIO DCB [86]..... | 54 |
| FIGURA 34 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM ENSAIO ENF [83] | 56 |
| FIGURA 35 - GRANALHADORA CIDBLAST, MODELO RT6S [1]..... | 58 |
| FIGURA 36 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA LOCALIZAÇÃO DOS CALÇOS [1] | 58 |
| FIGURA 37 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA LOCALIZAÇÃO DOS CALÇOS CALIBRADOS [3]..... | 59 |
| FIGURA 38 - PROCESSO DE POSICIONAMENTO DURANTE A CURA..... | 59 |
| FIGURA 39 - LIMPEZA DOS BORDOS DOS PROVETES | 60 |
| FIGURA 40 - MÁQUINA DE ENSAIOS SHIMADZU AG-X 100 [3] | 61 |
| FIGURA 41 - FACE LATERAL DO PROVETE CAPTADA PELA CÂMARA [1]..... | 61 |
| FIGURA 42 - EVOLUÇÃO DAS CURVAS P- Δ DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [1]..... | 62 |
| FIGURA 43 - EVOLUÇÃO DAS CURVAS P- Δ DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [1] | 63 |
| FIGURA 44 – EVOLUÇÃO DAS CURVAS P- Δ DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [2] | 64 |
| FIGURA 45 - CURVAS-R DE UM PROVETE DCB COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 [1] | 67 |
| FIGURA 46 - CURVAS-R DE UM PROVETE DCB COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 [1]..... | 69 |
| FIGURA 47 - CURVA-R DE UM PROVETE DCB COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [2] | 70 |
| FIGURA 48 - COMPARATIVO DAS CURVAS P- Δ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA APÓS O PROCEDIMENTO DE AJUSTE DE UM PROVETE DCB COLADO COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 | 72 |
| FIGURA 49 - LEIS COESIVAS OBTIDAS POR AJUSTE NUMÉRICO PARA OS PROVETES DCB COLADOS COM O ADESIVO ARALDITE® AV 138, E RESPETIVA LEI COESIVA MÉDIA | 73 |
| FIGURA 50 - COMPARATIVO DAS CURVAS P- Δ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA APÓS O PROCEDIMENTO DE AJUSTE DE UM PROVETE DCB COLADO COM O ADESIVO ARALDITE® 2015..... | 74 |
| FIGURA 51 – LEIS COESIVAS OBTIDAS POR AJUSTE NUMÉRICO PARA OS PROVETES DCB COLADOS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, E RESPETIVA LEI COESIVA MÉDIA..... | 75 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 52 - COMPARATIVO DAS CURVAS P-Δ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA APÓS O PROCEDIMENTO DE AJUSTE DE UM PROVETE DCB COLADO COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752..... | 77 |
| FIGURA 53 - LEIS COESIVAS OBTIDAS POR AJUSTE NUMÉRICO PARA OS PROVETES DCB COLADOS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, E RESPECTIVA LEI COESIVA MÉDIA..... | 78 |
| FIGURA 54 - CURVAS P-Δ PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 [3] | 79 |
| FIGURA 55 - CURVAS P-Δ PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015 [3]..... | 80 |
| FIGURA 56 - CURVAS P-Δ PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 L60 [3]..... | 80 |
| FIGURA 57 - CURVAS-R DE UM PROVETE ENF COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 [3]..... | 84 |
| FIGURA 58 - CURVAS-R DE UM PROVETE ENF COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 [3] | 85 |
| FIGURA 59 - CURVA-R DE UM PROVETE ENF COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [3]..... | 87 |
| FIGURA 60 - COMPARATIVO DAS CURVAS P-Δ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA APÓS O PROCEDIMENTO DE AJUSTE DE UM PROVETE ENF COLADO COM O ADESIVO ARALDITE® AV138..... | 89 |
| FIGURA 61 - LEIS COESIVAS OBTIDAS POR AJUSTE NUMÉRICO PARA OS PROVETES ENF COLADOS COM O ADESIVO ARALDITE® AV 138, E RESPECTIVA LEI COESIVA MÉDIA | 91 |
| FIGURA 62 - COMPARATIVO DAS CURVAS P-Δ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA APÓS O PROCEDIMENTO DE AJUSTE DE UM PROVETE ENF COLADO COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 | 92 |
| FIGURA 63 - LEIS COESIVAS OBTIDAS POR AJUSTE NUMÉRICO PARA OS PROVETES ENF COLADOS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, E RESPECTIVA LEI COESIVA MÉDIA..... | 93 |
| FIGURA 64 - COMPARATIVO DAS CURVAS P-Δ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA APÓS O PROCEDIMENTO DE AJUSTE DE UM PROVETE ENF COLADO COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 | 95 |
| FIGURA 65 - LEIS COESIVAS OBTIDAS POR AJUSTE NUMÉRICO PARA OS PROVETES ENF COLADOS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, E RESPECTIVA LEI COESIVA MÉDIA..... | 96 |
| FIGURA 66 - CONFIGURAÇÃO DA GEOMETRIA DOS PROVETES DE JSS (A) E JSD (B)..... | 97 |
| FIGURA 67 – DEFINIÇÃO DO TIPO DE ELEMENTOS PARA OS DIFERENTES CONSTITUINTES DAS JUNTAS PARA AS ANÁLISES DE DANO E RESISTÊNCIA NO ABAQUS® | 98 |
| FIGURA 68 - SENTIDO DO EFEITO BIAS DA MALHA NA REGIÃO DA SOBREPOSIÇÃO | 100 |
| FIGURA 69 - SENTIDO DO EFEITO BIAS DA MALHA NA REGIÃO DOS SUBSTRATOS SEM CONTACTO COM O ADESIVO | 100 |
| FIGURA 70 - SENTIDO DO EFEITO BIAS DA MALHA AO LONGO DA ESPESSURA DOS SUBSTRATOS..... | 100 |
| FIGURA 71 - CONDIÇÕES FRONTEIRA IMPOSTAS NOS MODELOS NUMÉRICOS..... | 100 |
| FIGURA 72 – MDC TRIANGULAR IMPLEMENTADO NO SOFTWARE ABAQUS® | 102 |
| FIGURA 73 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_y EM JSS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0 | 104 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 74 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0 | 105 |
| FIGURA 75 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0 | 105 |
| FIGURA 76 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSD COM O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0 | 106 |
| FIGURA 77 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSD COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0 | 107 |
| FIGURA 78 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSD COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0 | 107 |
| FIGURA 79 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY} EM JSS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0 | 109 |
| FIGURA 80 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY} EM JSS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0 | 109 |
| FIGURA 81 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY} EM JSS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0 | 110 |
| FIGURA 82 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY} EM JSD COM O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0 | 111 |
| FIGURA 83 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY} EM JSD COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0 | 111 |
| FIGURA 84 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY} EM JSD COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0 | 112 |
| FIGURA 85 - VARIÁVEL DE DANO NA CAMADA DE ADESIVO NO INSTANTE EM QUE $P_{MÁX}$ É ATINGIDO PARA AS JSS [118]..... | 113 |
| FIGURA 86 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM Δ PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 PARA $L_0=12,5$ MM..... | 114 |
| FIGURA 87 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM Δ PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 PARA $L_0=50$ MM..... | 114 |
| FIGURA 88 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM Δ PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 PARA $L_0=12,5$ MM..... | 115 |
| FIGURA 89 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM Δ PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 PARA $L_0=50$ MM..... | 115 |
| FIGURA 90 - VARIÁVEL DE DANO NA CAMADA DE ADESIVO NO INSTANTE EM QUE SE ATINGE $P_{MÁX}$ PARA AS JSD..... | 116 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 91 - EVOLUÇÃO DE SDEG NA ZONA COLADA COM A APLICAÇÃO DE Δ PARA AS JSD COM ARALDITE® AV138 E $L_0=12,5$ MM..... | 117 |
| FIGURA 92 - EVOLUÇÃO DE SDEG NA ZONA COLADA COM A APLICAÇÃO DE Δ PARA AS JSD COM ARALDITE® AV138 E $L_0=50$ MM..... | 118 |
| FIGURA 93 - EVOLUÇÃO DE SDEG NA ZONA COLADA COM A APLICAÇÃO DE Δ PARA AS JSD COM SIKAFORCE® 7752 E $L_0=12,5$ MM..... | 118 |
| FIGURA 94 - EVOLUÇÃO DE SDEG NA ZONA COLADA COM A APLICAÇÃO DE Δ PARA AS JSD COM SIKAFORCE® 7752 E $L_0=50$ MM..... | 119 |
| FIGURA 95 – CURVAS P- Δ PARA OS RESPETIVOS L_0 DO ADESIVO ARALDITE® AV138 NAS JSS..... | 119 |
| FIGURA 96 - CURVAS P- Δ PARA OS RESPETIVOS L_0 DO ADESIVO ARALDITE® AV138 NAS JSD..... | 120 |
| FIGURA 97 - CURVAS P- Δ PARA OS RESPETIVOS L_0 DO ADESIVO ARALDITE® 2015 NAS JSS..... | 121 |
| FIGURA 98 - CURVAS P- Δ PARA OS RESPETIVOS L_0 DO ADESIVO ARALDITE® 2015 NAS JSD..... | 122 |
| FIGURA 99 - CURVAS P- Δ PARA OS RESPETIVOS L_0 DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 NAS JSS..... | 123 |
| FIGURA 100 - CURVAS P- Δ PARA OS RESPETIVOS L_0 DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 NAS JSD..... | 124 |
| FIGURA 101 – CURVAS NUMÉRICAS $P_{MÁX MÉDIO} - L_0$ PARA CADA ADESIVO NAS JSS..... | 126 |
| FIGURA 102 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS $P_{MÁX MÉDIO} - L_0$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 NAS JSS..... | 126 |
| FIGURA 103 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS $P_{MÁX MÉDIO} - L_0$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015 NAS JSS..... | 127 |
| FIGURA 104 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS $P_{MÁX MÉDIO} - L_0$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 NAS JSS..... | 128 |
| FIGURA 105 - CURVAS NUMÉRICAS $P_{MÁX MÉDIO} - L_0$ PARA CADA ADESIVO NAS JSD..... | 129 |
| FIGURA 106 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS $P_{MÁX MÉDIO} - L_0$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 NAS JSD..... | 130 |
| FIGURA 107 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS $P_{MÁX MÉDIO} - L_0$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015 NAS JSD..... | 130 |
| FIGURA 108 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS $P_{MÁX MÉDIO} - L_0$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 NAS JSD..... | 131 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 1 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES MÉTODOS DE LIGAÇÃO DE MATERIAIS | 6 |
| TABELA 2 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES TIPOS DE LIGAÇÃO | 9 |
| TABELA 3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS TRÊS ESTRUTURAS MOLECULARES DE MATERIAIS POLIMÉRICOS [13] | 18 |
| TABELA 4 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ENSAIOS PARA A CARACTERIZAÇÃO À FRATURA DE JUNTAS ADESIVAS EM MODO MISTO | 43 |
| TABELA 5 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO ARLDITE® AV138 [95] | 49 |
| TABELA 6 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO ARLDITE® 2015 [84]. | 51 |
| TABELA 7 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [98]..... | 53 |
| TABELA 8 - DIMENSÕES DOS PROJETOS DCB [1, 101]..... | 55 |
| TABELA 9 - DIMENSÕES DOS PROJETOS ENF [3] | 57 |
| TABELA 10 - VALORES DE $P_{MÁX}$, $\Delta P_{MÁX}$, $\Delta M_{MÁX}$, $E_{PMÁX}$ E $E_{\Delta M_{MÁX}}$ PARA O ADESIVO ARLDITE® AV138 [1]..... | 65 |
| TABELA 11 - VALORES DE $P_{MÁX}$, $\Delta P_{MÁX}$, $\Delta M_{MÁX}$, $E_{PMÁX}$ E $E_{\Delta M_{MÁX}}$ PARA O ADESIVO ARLDITE® 2015 [1] | 66 |
| TABELA 12 - VALORES DE $P_{MÁX}$, $\Delta P_{MÁX}$ PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752..... | 67 |
| TABELA 13 - VALORES DE GIC PELOS QUATRO MÉTODOS PARA O ADESIVO ARLDITE® AV138 [1] | 68 |
| TABELA 14 - VALORES DE GIC PELOS QUATRO MÉTODOS PARA O ADESIVO ARLDITE® 2015 [1]..... | 69 |
| TABELA 15 - VALORES DE GIC PELO MÉTODO CBBM PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [2]..... | 70 |
| TABELA 16 - VALORES DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DAS JUNTAS DCB COLADAS COM ADESIVO ARLDITE® AV138..... | 71 |
| TABELA 17 - VALORES OBTIDOS PELA LEI COESIVA TRIANGULAR, À TRAÇÃO, DO ADESIVO ARLDITE® AV138..... | 73 |
| TABELA 18 - VALORES DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DAS JUNTAS DCB COLADAS COM ADESIVO ARLDITE® 2015 | 74 |
| TABELA 19 - VALORES OBTIDOS PELA LEI COESIVA TRIANGULAR, À TRAÇÃO, DO ADESIVO ARLDITE® 2015 | 75 |
| TABELA 20 - VALORES DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DAS JUNTAS DCB COLADAS COM ADESIVO SIKAFORCE® 7752 | 76 |

| | |
|---|-----|
| TABELA 21 - VALORES OBTIDOS PELA LEI COESIVA TRIANGULAR, À TRAÇÃO, DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 | 77 |
| TABELA 22 - VALORES DE $P_{MÁX}$ E RESPETIVO $\Delta P_{MÁX}$ DAS CURVAS P- Δ DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [3] | 81 |
| TABELA 23 - VALORES DE $P_{MÁX}$ E RESPETIVO $\Delta P_{MÁX}$ DAS CURVAS P- Δ DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [3] | 82 |
| TABELA 24 - VALORES DE $P_{MÁX}$ E RESPETIVO $\Delta P_{MÁX}$ DAS CURVAS P- Δ DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [3] | 83 |
| TABELA 25 - VALORES DE GIIC DO ARALDITE® AV138 OBTIDOS PELOS VÁRIOS MÉTODOS [3] | 85 |
| TABELA 26 - VALORES DE GIIC DO ARALDITE® 2015 OBTIDOS PELOS VÁRIOS MÉTODOS [3] | 86 |
| TABELA 27 - VALORES DE GIIC DO SIKAFORCE®7752 OBTIDOS PELO MÉTODO CBBM [3] | 87 |
| TABELA 28 - VALORES DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DAS JUNTAS ENF COLADAS COM ADESIVO ARALDITE® AV138 | 89 |
| TABELA 29 - VALORES OBTIDOS PELA LEI COESIVA TRIANGULAR, AO CORTE, DO ADESIVO ARALDITE® AV138 | 90 |
| TABELA 30 - VALORES DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DAS JUNTAS ENF COLADAS COM ADESIVO ARALDITE® 2015 | 91 |
| TABELA 31 - VALORES OBTIDOS PELA LEI COESIVA TRIANGULAR, AO CORTE, DO ADESIVO ARALDITE® 2015 | 93 |
| TABELA 32 - VALORES DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DAS JUNTAS ENF COLADAS COM ADESIVO SIKAFORCE® 7752 | 94 |
| TABELA 33 - VALORES OBTIDOS PELA LEI COESIVA TRIANGULAR, AO CORTE, DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 | 95 |
| TABELA 34 - DIMENSÕES DAS JSS E JSD | 97 |
| TABELA 35 – PROPRIEDADES DOS SUBSTRATOS DE LIGA DE AL6082-T651 | 98 |
| TABELA 36 - VARIAÇÃO DAS DIMENSÕES DA MALHA NAS JSD EM FUNÇÃO DE L_0 [MM]. | 99 |
| TABELA 37 - DESLOCAMENTOS APLICADOS NOS MODELOS NUMÉRICOS DO SOFTWARE ABAQUS®. | 101 |
| TABELA 38 - VALORES DE ENTRADA DA LEI COESIVA À TRAÇÃO NO SOFTWARE ABAQUS® DE TODOS OS ADESIVOS | 103 |
| TABELA 39 - VALORES DE ENTRADA DA LEI COESIVA EM CORTE NO SOFTWARE ABAQUS® DE TODOS OS ADESIVOS | 103 |
| TABELA 40 – VALORES DE $P_{MÁX}$ DO ADESIVO ARALDITE® AV138 NAS JSS | 120 |
| TABELA 41 - VALORES DE $P_{MÁX}$ DO ADESIVO ARALDITE® AV138 NAS JSD | 121 |

| | |
|---|-----|
| TABELA 42 - VALORES DE $P_{MÁX}$ DO ADESIVO ARALDITE® 2015 NAS JSS | 122 |
| TABELA 43 - VALORES DE $P_{MÁX}$ DO ADESIVO ARALDITE® 2015 NAS JSD..... | 123 |
| TABELA 44 - VALORES DE $P_{MÁX}$ DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 NAS JSS | 124 |
| TABELA 45 - VALORES DE $P_{MÁX}$ DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 NAS JSD..... | 125 |

ÍNDICE

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Contextualização | 1 |
| 1.2 | Objetivos | 1 |
| 1.3 | Organização do relatório | 2 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1 | Ligações adesivas | 5 |
| 2.1.1 | Caracterização das juntas adesivas | 7 |
| 2.1.2 | Aplicações comuns das juntas adesivas | 11 |
| 2.1.3 | Esforços e modos de rotura em juntas adesivas | 13 |
| 2.1.4 | Adesivos estruturais | 17 |
| 2.1.5 | Configurações possíveis de junta | 20 |
| 2.2 | Previsão de resistência de juntas adesivas | 22 |
| 2.2.1 | Modelos analíticos | 23 |
| 2.2.2 | Métodos numéricos | 24 |
| 2.2.3 | Mecânica dos meios contínuos | 24 |
| 2.2.4 | Mecânica da fratura | 24 |
| 2.2.5 | Modelos de dano coesivo..... | 25 |
| 2.2.6 | Mecânica do dano | 26 |
| 2.2.7 | Método de Elementos Finitos Extendido | 27 |
| 2.3 | Modelos de dano coesivo | 27 |
| 2.3.1 | Fundamentos do método | 29 |
| 2.3.2 | Tipos de leis coesivas..... | 32 |
| 2.3.3 | Métodos de estimação das leis coesivas | 33 |
| 2.3.4 | Método de identificação individual das propriedades coesivas | 35 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 2.3.5 | Método inverso | 36 |
| 2.3.6 | Método direto | 36 |
| 2.4 | Ensaio para determinação da tenacidade à fratura | 37 |
| 2.4.1 | Ensaio em tração (modo I) | 39 |
| 2.4.2 | Ensaio em corte (modo II) | 41 |
| 2.4.3 | Ensaio em solitação combinada (modos I + II) | 42 |
| 3 | DESENVOLVIMENTO | 47 |
| 3.1 | Determinação experimental das leis coesivas | 47 |
| 3.1.1 | Materiais utilizados | 47 |
| 3.1.1.1 | Substratos | 47 |
| 3.1.1.2 | Adesivos | 48 |
| 3.1.1.2.1 | Araldite® AV138 | 48 |
| 3.1.1.2.2 | Araldite® 2015 | 50 |
| 3.1.1.2.3 | Sikaforce® 7752 | 51 |
| 3.1.2 | Geometria das juntas | 53 |
| 3.1.2.1 | Provetes DCB | 53 |
| 3.1.2.2 | Provetes ENF | 56 |
| 3.1.3 | Processo de fabrico | 58 |
| 3.1.4 | Ensaio das juntas | 60 |
| 3.1.4.1 | Provetes DCB | 60 |
| 3.1.4.2 | Provetes ENF | 61 |
| 3.1.5 | Resultados obtidos | 62 |
| 3.1.5.1 | Provetes DCB | 62 |
| 3.1.5.1.1 | Curvas P- δ | 62 |
| 3.1.5.1.1.1 | Araldite® AV138 | 62 |
| 3.1.5.1.1.2 | Araldite® 2015 | 63 |
| 3.1.5.1.1.3 | Sikaforce® 7752 | 64 |
| 3.1.5.1.2 | Discussão de resultados | 65 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 3.1.5.1.2.1 | Araldite® AV138..... | 65 |
| 3.1.5.1.2.2 | Araldite® 2015..... | 65 |
| 3.1.5.1.2.3 | Sikaforce® 7752..... | 66 |
| 3.1.5.1.3 | Determinação de GIC..... | 67 |
| 3.1.5.1.3.1 | Araldite® AV138..... | 67 |
| 3.1.5.1.3.2 | Araldite® 2015..... | 68 |
| 3.1.5.1.3.3 | Sikaforce® 7752..... | 70 |
| 3.1.5.1.4 | Determinação da lei coesiva em tração..... | 71 |
| 3.1.5.1.4.1 | Araldite® AV138..... | 71 |
| 3.1.5.1.4.2 | Araldite® 2015..... | 73 |
| 3.1.5.1.4.3 | Sikaforce® 7752..... | 76 |
| 3.1.5.2 | Provetes ENF..... | 78 |
| 3.1.5.2.1 | Curvas P- δ | 78 |
| 3.1.5.2.1.1 | Araldite® AV138..... | 78 |
| 3.1.5.2.1.2 | Araldite® 2015..... | 79 |
| 3.1.5.2.1.3 | Sikaforce® 7752..... | 80 |
| 3.1.5.2.2 | Discussão de resultados..... | 81 |
| 3.1.5.2.2.1 | Araldite® AV138..... | 81 |
| 3.1.5.2.2.2 | Araldite® 2015..... | 82 |
| 3.1.5.2.2.3 | Sikaforce® 7752..... | 83 |
| 3.1.5.2.3 | Determinação de GIIC..... | 84 |
| 3.1.5.2.3.1 | Araldite® AV138..... | 84 |
| 3.1.5.2.3.2 | Araldite® 2015..... | 85 |
| 3.1.5.2.3.3 | Sikaforce® 7752..... | 86 |
| 3.1.5.2.4 | Determinação da lei coesiva em corte..... | 88 |
| 3.1.5.2.4.1 | Araldite® AV138..... | 88 |
| 3.1.5.2.4.2 | Araldite® 2015..... | 91 |
| 3.1.5.2.4.3 | Sikaforce® 7752..... | 94 |
| 3.2 | Validação numérica das leis coesivas..... | 96 |
| 3.2.1 | Geometria das juntas..... | 96 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.2.2 | Condições da análise numérica | 98 |
| 3.2.3 | Modelo de dano coesivo | 101 |
| 3.2.4 | Leis coesivas para simulação do adesivo..... | 103 |
| 3.2.5 | Análise de tensões na junta..... | 103 |
| 3.2.5.1 | Tensões de arrancamento | 104 |
| 3.2.5.2 | Tensões de corte..... | 108 |
| 3.2.6 | Estudo da variável de dano | 112 |
| 3.2.7 | Previsão da resistência | 119 |
| 3.2.7.1 | Araldite® AV138..... | 119 |
| 3.2.7.2 | Araldite® 2015 | 121 |
| 3.2.7.3 | Sikaforce® 7752 | 123 |
| 3.2.8 | Análise dos resultados obtidos..... | 125 |
| 4 | CONCLUSÕES..... | 135 |
| 5 | BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO..... | 141 |

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O emprego das ligações adesivas tem crescido substancialmente nos últimos anos quando comparadas com as técnicas de união mais conhecidas, tais como, a soldadura e as ligações mecânicas (ligações aparafusadas). A união através de adesivos tem crescido principalmente na indústria automóvel, bem como na indústria aeronáutica, devido a características como uma melhor distribuição de tensões, menores concentrações das mesmas, custos de fabrico mais reduzidos, boa resistência à fadiga e possibilidade de união de materiais dissimilares.

Ao longo dos anos, foram criados vários modelos de previsão de dano, dos quais um se destaca, os Modelos de Dano Coesivo (MDC). Este método, que assenta principalmente em parâmetros energéticos, apresenta várias vantagens em relação aos métodos baseados nas Resistências dos Materiais, principalmente quando os materiais em questão têm comportamentos plásticos.

Assim sendo, os MDC exibem-se como o principal instrumento capaz de modelar juntas adesivas, combinando critérios da resistência dos materiais e energéticos de forma a lidar com a propagação de dano na junta.

Porém, como qualquer método, existem os contras, isto é, para se aplicar corretamente os Modelos de Dano Coesivo é necessária uma medição exata dos parâmetros coesivos, tais como a tenacidade à tração (G_{Ic}) e a resistência à tração (t_n^0) para a lei coesiva à tração, e a tenacidade ao corte (G_{IIc}) e a resistência coesiva ao corte (t_s^0) para a lei coesiva ao corte.

1.2 Objetivos

Nesta dissertação estuda-se numericamente a previsão de resistência de juntas adesivas utilizando as leis coesivas obtidas pelo método inverso. Para isso, irão ser estudadas as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) para caracterização à tração e ensaios *End-Notched Flexure* (ENF) para caracterização ao corte.

Três tipos de adesivos foram alvo de estudo experimental, nomeadamente o Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. Este estudo centrou-se no tratamento de dados após os ensaios DCB e ENF, para a identificação das curvas força vs. deslocamento ($P-\delta$). Após obter estas informações e com a medição do comprimento de fenda durante

o ensaio, foi possível a obtenção das curvas de resistência (curvas- R) através de vários métodos de redução com o intuito de determinar a tenacidade à fratura (G_{Ic} e G_{IIc}) dos adesivos estruturais em estudo. Posteriormente, as leis coesivas dos três adesivos são obtidas por método iterativo de ajuste entre as curvas P - δ experimentais e numéricas.

Com o recurso ao *software* ABAQUS® e a um MDC triangular pretende-se validar numericamente as leis coesivas obtidas experimentalmente por ensaios DCB (tração) e ENF (corte) pelo método inverso, recorrendo à comparação entre as P - δ numéricas e experimentais e resistência em juntas de sobreposição simples e dupla com os mesmos adesivos utilizados na caracterização das leis coesivas.

1.3 Organização do relatório

A dissertação seguinte está estruturada da seguinte forma:

- Capítulo 1: Contextualização do trabalho, indicando os principais objetivos do trabalho, bem como a sua estruturação;
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica do tema em estudo. Inicia-se pelas generalidades das ligações adesivas, sendo indicadas as suas vantagens e desvantagens, os seus esforços e modos de rotura, e descritos os diferentes tipos de adesivos estruturais. Posteriormente irá ser feita uma pequena introdução às previsões de resistência, aos modelos de dano coesivo, e aos ensaios capazes de determinar a tenacidade à fratura;
- Capítulo 3: É descrito o trabalho experimental, no qual se explica a determinação experimental das leis coesivas. É feita uma descrição dos materiais utilizados (adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015 por Constante [1] e Sikaforce® 7752 por Campilho et al. [2]), da geometria de junta usada e dos ensaios nas juntas (ensaios DCF e ensaios ENF) [3]. Posteriormente são apresentados os resultados obtidos. Sucintamente, neste capítulo é descrito o procedimento experimental, que envolve a caracterização dos materiais utilizados, o fabrico dos provetes, os ensaios em tração e em corte, e são apresentados os resultados obtidos para dos três adesivos. Posteriormente, através das simulações anteriormente realizadas no *software* Abaqus®, é efetuada a validação numérica das leis coesivas, através da previsão da resistência da junta e feita a análise dos resultados;
- Capítulo 4: São apresentadas as conclusões da dissertação, e referem-se ainda trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

A ligação adesiva é uma técnica com grande histórico de utilização. Apesar de a primeira patente atribuída a um adesivo ter ocorrido em Inglaterra por volta do ano 1750, tratando-se de uma cola elaborada a partir de peixe, esta técnica já tinha sido utilizada pelos Egípcios, quinze séculos antes de Jesus Cristo, onde se empregava colas à base de gelatina, ovo e resinas extraídas de árvores em aplicações de madeira e pedra [4]. As primeiras ligações adesivas utilizavam adesivos naturais, como por exemplo baseados em caseína (material polimérico derivado do leite). Estes funcionavam bem exceto quando submetidos a ambientes húmidos, tornando-se muito fracos e exaladores de odores desagradáveis devido à absorção de água [4].

Durante a segunda guerra mundial, devido às exigências tecnológicas, foram desenvolvidos adesivos sintéticos constituídos por resinas de ureia-formaldeído e resinas fenólicas. Mais tarde, devido à fragilidade exibida por estes adesivos, a química dos adesivos foi modificada e melhorada através da combinação com polímeros com boa tenacidade. Estes permitiram a ligação de materiais metálicos e de madeira com muito sucesso. Atualmente, todos os adesivos são baseados em polímeros sintéticos, tais como os fenólicos, epóxidos, acrílicos e uretanos [4].

O constante e rápido desenvolvimento das ligações adesivas permitiu a sua aplicação em diversas áreas nos campos de engenharia. Atualmente, a união de componentes está presente em quase todas as indústrias, e esta união pode ser feita através de diferentes formas: soldadura, aparafusamento, rebitagem e ligações adesivas. Porém, a relação custo-vantagens está sempre presente e é um dos elementos mais diferenciadores relativamente à união de componentes. Na Tabela 1 é realizada uma comparação entre os diferentes métodos de ligação de materiais.

Os adesivos começaram a ser utilizados há muitos anos atrás, e devido ao desenvolvimento abrupto de algumas indústrias, o estudo das ligações adesivas permitiu o melhoramento e descobrimentos de novos adesivos. Inicialmente os adesivos tinham origem vegetal, animal ou substâncias minerais. Posteriormente, surgiu o aparecimento dos adesivos poliméricos sintéticos (séc. XX) e é a partir desse momento que as ligações adesivas passam a ser parte importante de muitas indústrias, pois estes adesivos apresentavam características mecânicas muito superiores às conhecidas. Além disto, o facto de se poder ligar materiais dissimilares foi um dos pontos mais importantes para o nascimento do interesse por parte destas indústrias. Entre os anos 1940 e 1950 proporcionou-se então um forte crescimento no que toca ao desenvolvimento de

adesivos estruturais e vedantes, muito devido à indústria aeronáutica militar. Na Figura 1 são apresentadas as diversas áreas de juntas adesivas presentes num avião.

Tabela 1 - Comparação entre os diferentes métodos de ligação de materiais

| | Juntas adesivas | Aparafusamento | Soldadura | Juntas híbridas |
|--|-----------------|----------------|-----------|-----------------|
| Necessidade de preparação de superfície | Extensa | Pequena | Pequena | Extensa |
| União de materiais dissimilares | Boa | Limitada | Pobre | Boa |
| Peso adicional para a estrutura | Baixo | Alto | Moderado | Moderado |
| Resistência à fadiga | Alta | Pobre | Moderada | Moderada |
| Resistência à corrosão | Alta | Pobre | Moderada | Moderada |
| Inspeção por Testes Não Destrutivos (TND) | Muito limitada | Adequada | Adequada | Limitada |
| Desmontagem | Difícil | Fácil | Difícil | Difícil |
| Custo de produção | Médio | Baixo | Baixo | Alto |
| Resistência à degradação e meio ambiente | Pobre | Pobre | Moderada | Moderada |
| Tempo de produção | Lento | Rápido | Moderado | Lento |



Figura 1 - Estrutura esquemática de um avião e respectivas ligações [5]

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Atualmente, as técnicas tradicionais de união de materiais estão a ser bastante questionadas. Estas questões levantam-se devido à contante evolução das exigências nas indústrias, que provocam a procura de novos materiais estruturais cada vez mais leves, mais resistentes e menos sujeitos a degradação, não exigindo assim uma constante manutenção [6]. São nestas questões que entram os adesivos.

Os adesivos apresentam-se como a melhor técnica alternativa às técnicas tradicionais. Um adesivo pode ser definido como um material polimérico capaz de promover a união entre dois substratos e com capacidade de resistir à sua separação, pela ação de diferentes forças: forças adesivas (adesão) e forças coesivas (coesão). Essa união entre os dois substratos e o adesivo designa-se junta adesiva.

Uma junta adesiva consiste na união de dois corpos, geralmente conhecidos por substratos ou aderentes, através de um adesivo. Os substratos ou aderentes são os materiais, corpos ou componentes a ser ligados através do adesivo. Sucintamente, uma junta adesiva corresponde à zona na qual dois aderentes estão ligados entre si através de um adesivo. É constituída por (Figura 2) [5]:

- **Aderente** – Material, corpo ou componente a ser ligado através de um adesivo. Depois da ligação, o substrato é frequentemente designado por aderente.
- **Adesivo** – Material polimérico que promove a união entre dois substratos, com capacidade de resistir à sua separação, pela ação combinada de forças adesivas (adesão) e forças coesivas (coesão).
- **Adesão** – Atracção entre moléculas/átomos de diferentes substâncias (adesivo/substrato) resultante das forças intermoleculares que se estabelecem entre elas.

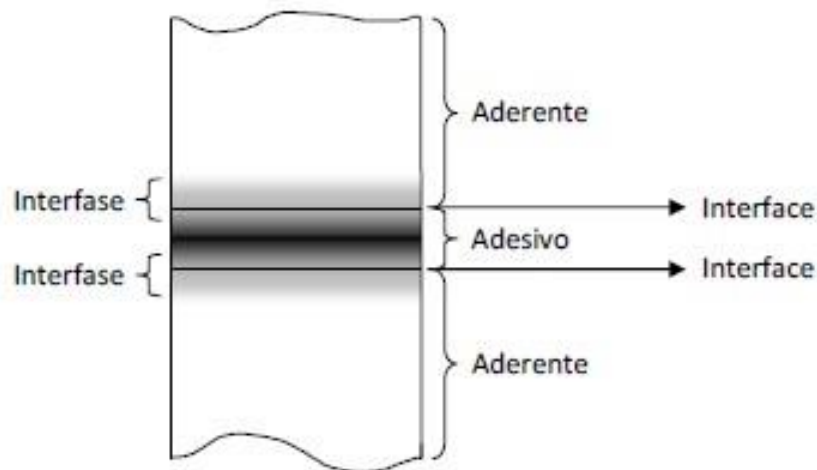


Figura 2 - Constituição típica de uma junta adesiva [5]

- **Interfase** – É uma fina região na zona de contacto adesivo-aderente. É a região entre o adesivo e o aderente que se estende desde um ponto no aderente onde as propriedades locais (físicas, químicas, mecânicas e morfológicas) começam a alterar-se desde as propriedades do aderente até um ponto no adesivo onde as propriedades locais igualam as propriedades do adesivo. A interface está contida na interfase.
- **Interface** - Também designada por camada limite, corresponde ao plano de contacto entre duas superfícies de dois materiais como, por exemplo, entre o adesivo e o aderente. Está contida na interfase.

As ligações adesivas para além de permitirem uma redução de peso da junta, permitem também uma distribuição uniforme de tensões, o que não se verifica nos métodos de união tradicionais, nos quais existem elevadas concentrações de tensões em apenas alguns pontos. Assim sendo, a ligação adesiva permite melhores resultados no que toca à resistência à flexão bem como vibração quando comparada com, por exemplo, rebites.

Na Tabela 2 é feita a comparação dos diferentes tipos de juntas:

- Adesiva;
- Soldada;
- Mecânica.

Tabela 2 - Comparação entre os diferentes tipos de ligação

| | Juntas adesivas | Ligações soldadas | Fixações mecânicas |
|----------------------------------|---|---|--|
| Desmontagem | Junta permanente | Junta permanente | Permite desmontagem |
| Distribuição de tensões | Boa distribuição de tensões (exceto no arrancamento e clivagem) | Cria tensões internas na estrutura | Pontos de alta tensão nos locais de fixação |
| Aparência | Boa aparência | Aparência aceitável | Descontinuidade de superfície |
| Materiais ligados | Ideal para a maioria de pares de diferentes materiais | Limitado a grupos e pares de materiais similares | Aplicável à maioria de formas e combinações de materiais |
| Resistência à temperatura | Fraca resistência a altas temperaturas | Resiste a temperaturas muito elevadas | Resiste a temperaturas elevadas |
| Resistência mecânica | Resistente à corrosão e à fadiga (atenção à fluência) | Necessita de tratamentos para obter boa resistência mecânica | Pouco resistente à fadiga |
| Pós-processamento | Nem sempre necessário | Tratamentos térmicos por vezes necessários | Geralmente não é necessário |
| Equipamento | Alguns adesivos são caros | Equipamento caro, por vezes volumoso e de grande consumo | Relativamente barato e portátil |
| Consumíveis | Alguns adesivos (estruturais) são caros | Fios, elétrodos, entre outros são geralmente baratos | Bastante caro |
| Taxa de produção | De segundos a horas de acordo com o tipo de adesivo | Pode ser rápido | A preparação da junta e aperto manual são lentos. Aperto automatizado é rápido |
| Garantia de qualidade | Aplicação de ensaios não destrutivos é limitada | Os ensaios não destrutivos são aplicáveis à maioria dos processos | Confiança razoável quando se controla o binário de aperto |

A resistência de uma junta adesiva assenta principalmente nos seguintes pontos [7]:

- Propriedades mecânicas do adesivo/aderente;
- Tensões internas residuais;
- Boa ligação interfacial;
- Geometria da junta.

As ligações adesivas, no momento atual, proporcionam uma vasta gama de vantagens quando comparadas com os métodos de união tradicionais, tais como [7-10]:

- Distribuição mais uniforme das tensões sobre o total da área colada;
- Redução ou eliminação de concentração de tensões;
- Melhoria da resistência à fadiga;
- Elevada capacidade de amortecimento de vibrações;
- Incremento da rigidez e também do isolamento acústico;
- Possibilidade de ligar e vedar simultaneamente;
- Redução do peso da estrutura;
- Globalmente mais económico;
- Rapidez: em geral envolvem menos componentes pelo que podem ser mais simples e rápidas do que as ligações mecânicas. É um método simples e fácil de automatizar;
- Permite a ligação de qualquer combinação de materiais (similares ou dissimilares);
- Capacidade de ligar substratos sensíveis ao choque;
- Boa resistência à corrosão (capacidade de ligar metais suscetíveis de desenvolver corrosão galvânica);
- Versatilidade: permitem ligar materiais de qualquer espessura e com qualquer geometria, o que torna o projeto mais flexível. Permitem unir formas complexas e superfícies irregulares;
- Invisibilidade: as ligações adesivas são, na maioria dos casos, invisíveis;
- Permitem obter contornos suaves (aspeto estético ou aerodinâmico);
- Nas ligações adesivas não há alterações estruturais (pode ser efetuada a temperaturas relativamente baixas);
- Não danificam o substrato ao contrário das ligações mecânicas tradicionais;

Porém, existem também algumas desvantagens que podem levar à escolha de métodos tradicionais em detrimento das ligações adesivas [7-10]:

- Necessidade de um tratamento das superfícies a ligar: as ligações adesivas baseiam-se no fenómeno da adesão para transferirem carga;
- O processo de endurecimento pode ser bastante moroso;
- Pode ser necessário temperatura e pressão;
- Resistência e durabilidade fortemente dependentes das condições de processamento;

- Durabilidade limitada em condições extremas de serviço (nomeadamente de temperatura);
- Pode necessitar de ferramentas especiais para garantir o posicionamento e alinhamento dos substratos;
- Desmontagem impossível ou difícil;
- Fraca resistência à propagação de fendas de alguns adesivos;
- Fraca resistência aos esforços de arrancamento e clivagem;
- Fluência: a fluência pode ser um problema, especialmente em situações de exposição contínua e prolongada a temperaturas elevadas;
- Tempo de vida limitado em alguns adesivos;
- Toxicidade e inflamabilidade de alguns adesivos (devem ser tomadas algumas precauções para evitar efeitos nefastos provocados por solventes e outros químicos);
- Existem muitos tipos de adesivos – o que exige cuidado e conhecimentos para a seleção do adesivo;
- Difícil inspeção para verificação da qualidade da ligação;
- Conhecimento: menor conhecimento e falta de experiência de utilização desta tecnologia relativamente às ligações mecânicas tradicionais;
- Geralmente é necessário um controlo rigoroso do processo: necessidade de recorrer a pessoal especializado;
- Não existe um critério de dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura.

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Atualmente, o uso de juntas adesivas tem vindo a crescer. Cada vez mais se verifica o constante desenvolvimento e expansão das juntas adesivas. Os adesivos são usados numa variedade de indústrias, tais como: automóvel, aeroespacial, naval, construção, embalagem, móveis, têxtil, entre outras. Neste tópico vai apenas ser detalhada alguma informação sobre as principais indústrias, isto é, automóvel, aeroespacial, naval e calçado (têxtil).

Indústria automóvel

É na indústria automóvel que as juntas adesivas têm ganho o seu espaço. O seu uso começou há décadas atrás na colagem de para-brisas. Posteriormente começou a ser aplicada noutros componentes, tais como as janelas traseiras. Ao mesmo tempo os adesivos eram também aplicados em lacunas de soldadura de forma a evitar a corrosão [11]. Isto proporcionou então um acréscimo da rigidez do corpo do carro e, desta forma, começaram a ser utilizados adesivos de alto módulo para otimizar a resistência à torção [11]. Na Figura 3 apresenta-se a aplicação dos adesivos em automóveis modernos.



Figura 3 - Aplicação dos adesivos em automóveis modernos [8]

Indústria aeroespacial

A indústria aeroespacial e os adesivos possuem uma relação longa e interessante, ou seja, mesmo com a evolução dos diversos tipos de transporte aéreo, as ligações adesivas têm sido cruciais para o desenvolvimento de cada novo tipo de veículo aéreo. Isto porque as características das juntas adesivas são favoráveis ao desenvolvimento da indústria automóvel, ou seja, propriedades como reduzido peso, boa resistência à fadiga, amortecimento de vibração sónica e por facilmente se conseguir obter superfícies aerodinâmicas [11] facilitam o desenvolvimento de veículos aéreos. Na Figura 4 são apresentados os locais onde são utilizadas ligações adesivas na indústria aeroespacial, neste caso no avião SAAB 340.

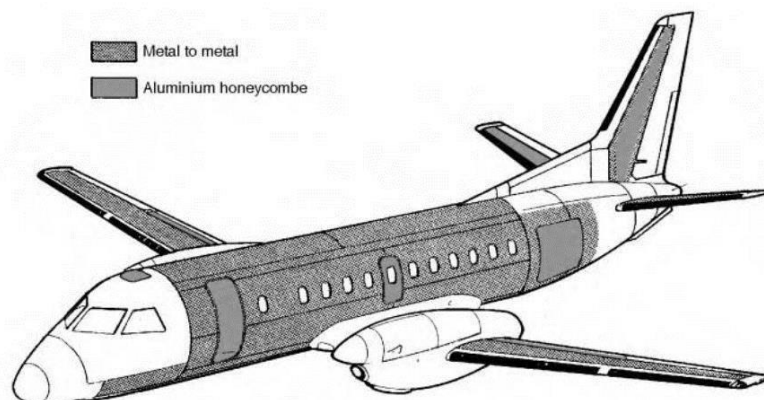


Figura 4 - Aplicação de adesivos na indústria aeroespacial [11]

Indústria naval

Para além da indústria automóvel e aeroespacial, as ligações adesivas estão a começar a ganhar também alguma popularidade na indústria naval. É nas juntas estruturais de grandes partes que as juntas adesivas mais são utilizadas, tais como casco e o convés [11]. Na Figura 5 é apresentado um exemplo da aplicação de adesivos na indústria naval, de aplicação de adesivos no casco de uma embarcação. Na indústria naval os adesivos precisam de possuir resistência à humidade, calor e raios ultravioleta [11].



Figura 5 - Junta adesiva entre o casco e o convés de um barco [11]

Indústria do calçado

Os adesivos têm sido utilizados como alternativa à costura, pregos, tachas ou agrafos na ligação da parte superior do calçado à sola [11]. A aplicação de adesivos na indústria do calçado é vista com bons olhos, pois o facto de tornar as ligações mais flexíveis e homogéneas, a distribuição mais uniforme das tensões aplicadas no conjunto, e o produto esteticamente mais atraente, permite grandes vantagens competitivas [11]. Porém, apesar das vantagens referidas, a aplicação de adesivos na indústria do calçado possuiu também algumas limitações, tais como, a necessidade de um grande controlo em todas as fases de produção [11].

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Os esforços típicos numa ligação adesiva são (Figura 6) [12]:

- **Esforços de tração**

As tensões de tração desenvolvem-se quando as forças atuam perpendicularmente ao plano de corte. Nos esforços de tração, as tensões normais são distribuídas uniformemente ao longo da área colada. As juntas devem ser concebidas de forma a ter as superfícies dos substratos paralelas e as forças perfeitamente perpendiculares a estas. Porém, devido à dificuldade em controlar a espessura do adesivo e às forças raramente serem precisamente axiais, originam-se tensões de clivagem e de arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição.

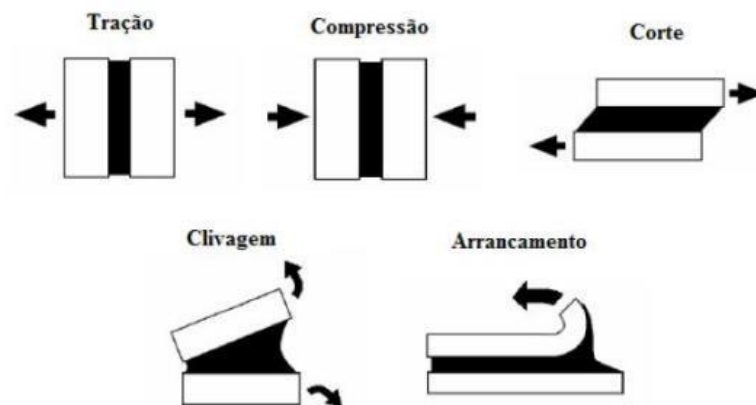


Figura 6 - Representação dos vários esforços de uma ligação adesiva [12]

▪ Esforços de compressão

As forças de compressão, tal como as forças de tração, devem-se manter perfeitamente perpendiculares à superfície de ligação, de modo a que o adesivo permaneça em compressão pura. Uma junta em compressão pura praticamente não precisa de adesivo. A distribuição das tensões é constante em toda a junta, e esta só rompe se a distribuição das tensões não for uniforme.

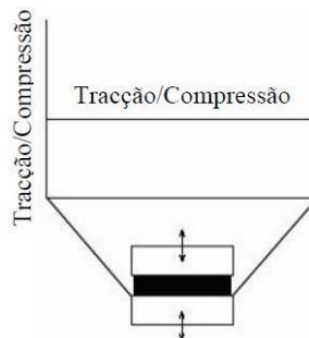


Figura 7 - Distribuição das tensões nos esforços de tração e compressão [5]

▪ Esforços de corte

As forças de corte provocam o escorregamento entre os dois substratos. A distribuição da tensão de corte, neste caso, tem uma maior incidência nas extremidades, tal como se pode verificar na Figura 8. Este comportamento deve-se ao efeito da deformação diferencial ao longo de L_0 , uma vez que cada substrato se deforma longitudinalmente a uma taxa crescente, desde a sua extremidade livre até à extremidade oposta da sobreposição. Este efeito é mais notório com o aumento de L_0 . Devido a este comportamento, para o aumento da resistência das juntas adesivas é mais benéfico o aumento da largura da junta.

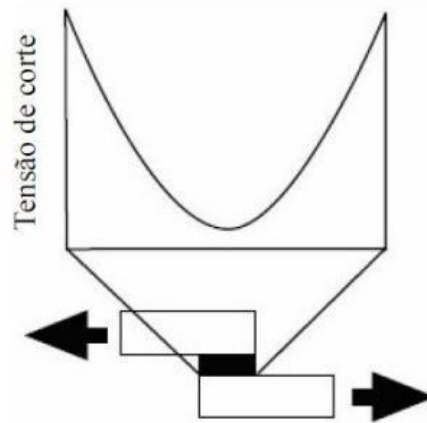


Figura 8 - Distribuição de tensões de corte numa junta adesiva [5]

- **Esforços de clivagem**

Os esforços de clivagem são definidos como aqueles que ocorrem quando forças na extremidade de uma junta rígida atuam de modo a separar os substratos. Estes esforços também podem acontecer em juntas de topo a topo sob carregamento axial, se as forças não forem rigorosamente axiais.

- **Esforços de arrancamento**

As tensões de arrancamento são semelhantes às de clivagem, mas aplicam-se ao caso onde um ou ambos os substratos são flexíveis. Por conseguinte, o ângulo de separação pode ser muito maior para o arrancamento do que para a clivagem. Os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis às forças de arrancamento. Por outro lado, os adesivos mais dúcteis e flexíveis permitem uma distribuição de tensões menos concentrada e, conseqüentemente, maior resistência da junta adesiva. Na Figura 9 é possível ver a distribuição de tensões nos esforços de clivagem e arrancamento.

De todos os esforços anteriormente apresentados, os que mais produzem efeitos nocivos são os esforços de clivagem e arrancamento, e como tal, estes devem ser sempre que possível evitados, utilizando configurações que admitam maiores esforços de corte.

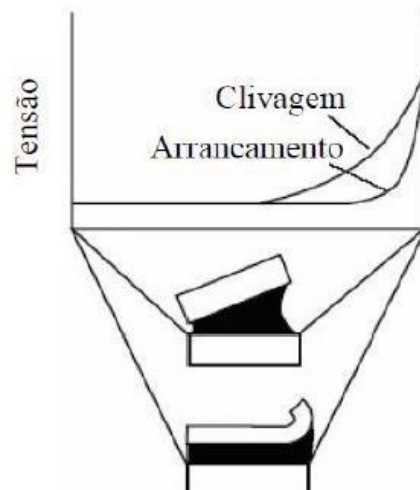


Figura 9 - Distribuição de tensões nos esforços de clivagem e de arrancamento [5]

O processo de união por ligações adesivas tem como principal objetivo a transmissão de carga entre dois componentes ligados, conservando sempre a integridade da estrutura sujeita a solicitações estáticas e/ou dinâmicas e em condições ambientais adversas, tais como na presença de humidade e altas/baixas temperaturas. Assim sendo, é importante estudar a forma como ocorrem os modos de rotura nas juntas adesivas. De um modo geral, é possível distinguir-se quatro modos de rotura diferentes:

- **Rotura coesiva**

Caracteriza-se pela rotura no interior do adesivo. Ocorre quando a resistência da ligação entre o adesivo e o substrato é maior do que a resistência interna do adesivo. Após a rotura, ambas as superfícies dos substratos ficam com uma película de adesivo (Figura 10)

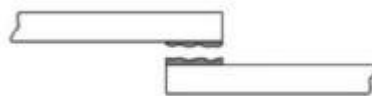


Figura 10 - Rotura coesiva [5]

- **Rotura adesiva**

Ocorre na interface entre os substratos e o adesivo. Nesta rotura verifica-se que a superfície de um dos aderentes está isenta de adesivo. Por outro lado, a superfície do outro substrato apresenta-se coberta de adesivo. Nesta situação, ocorre falha de adesão entre o adesivo e a superfície do substrato (Figura 11), o que pode indicar que a preparação da superfície não foi efetuada corretamente ou que ocorreu uma má seleção do adesivo. Segundo Adams [11] este tipo de rotura é provavelmente o mais crítico.



Figura 11 - Ruptura adesiva [5]

- **Rotura no aderente**

Tipo de ruptura similar à ruptura coesiva do adesivo. Esta ruptura ocorre no substrato (Figura 12) e a ocorrência da mesma dá-se porque a resistência interna do substrato é inferior à resistência da zona de ligação. Esta ruptura é a ruptura ideal.



Figura 12 - Ruptura no substrato [5]

- **Rotura Mista**

Combinação de dois modos de ruptura: a ruptura adesiva e a ruptura coesiva (Figura 13). Este tipo de ruptura ocorre devido a uma não limpeza ou limpeza ineficaz numa dada região das superfícies a ligar.



Figura 13 - Ruptura mista [5]

2.1.4 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais distinguem-se entre si quanto à sua natureza, rigidez, resistência mecânica, fragilidade, resistência à ação dos agentes químicos, composição química, modo de endurecimento, custo e desempenho.

Assim sendo, devido à base da sua estrutura molecular, os adesivos tem diversos tipos de classificação:

- Resinas termoplásticas (acrílica, poliamida, vinílica, etc.);
- Resinas termoendurecíveis (fenólica, epóxido, poliéster, etc.);
- Elastómeros (poliuretano, nitrilo, silicone, etc.).

Na Tabela 3 é feita uma comparação entre os diferentes tipos de adesivos estruturais.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas das três estruturas moleculares de materiais poliméricos [13]

| | Flexibilidade | Resistência mecânica | Resistência térmica | Resistência a agentes químicos |
|---------------------------|---------------|----------------------|---------------------|--------------------------------|
| Resinas termoplásticas | Média | Medíocre | Medíocre | Boa |
| Resinas termoendurecíveis | Má | Boa | Boa | Boa |
| Elastômeros | Muito boa | Má | Variável | Medíocre |

Os adesivos estruturais são adesivos que normalmente são fabricados com resinas termoendurecíveis. Estes adesivos devem ser capazes de garantir uma elevada rigidez, resistência à tração e flexibilidade suficiente para suportar as forças a que vão ser sujeitos. É esperado que os adesivos estruturais resistam a forças consideráveis, proporcionando assim a obtenção de valores de resistência ao corte superiores a 7 MPa [14].

Dentro dos adesivos estruturais podem-se considerar os seguintes tipos de famílias de adesivos [13]:

- **Adesivos fenólicos**

Inicialmente este tipo de adesivos apenas era usado para a colagem de madeiras. Posteriormente, devido aos bons resultados obtidos, os adesivos fenólicos passaram a ser utilizados na colagem de metais, no qual se verificou uma resistência minimamente satisfatória. Porém, estes adesivos apresentam limitações no que toca à resistência ao choque e às vibrações. De modo a contornar estas limitações, estes adesivos foram combinados com as resinas vinílicas ou com elastômeros. A combinação fenólico-vinílico proporciona um melhoramento nas propriedades mecânicas, no que toca à resistência ao corte e ao arrancamento. A combinação fenólicos-elastômeros proporciona uma resistência mecânica superiores às vibrações e às baixas temperaturas.

- **Adesivos acrílicos**

Podem ser subdivididos em:

- **Anaeróbicos** – Maioritariamente utilizados para a ligação de peças com geometrias cilíndricas. Normalmente são líquidos que podem ser curados à temperatura ambiente e são de fácil utilização. O seu processo de endurecimento ocorre devido à eliminação do oxigénio, ocorrendo assim uma reação de polimerização do tipo radical-livre. Geralmente, estes adesivos não curam fora da junta, uma vez que estão em contacto com o oxigénio. Os valores de resistência deste adesivo são bastante variáveis, embora possam ser próximos dos valores dos epóxidos.

- **Cianoacrilatos** – Adesivos utilizados para colagens rápidas ou quase instantâneas. A sua cura depende de vários fatores, tais como a humidade, espessura da junta colada e do teor de pH. São adesivos que apresentam elevadas resistências à tração, mais baixos valores relativamente à fragilidade e à resistência ao arrancamento. Além disto, estes adesivos tem um custo elevado.
- **Modificados** – Adesivos que sofreram alterações na sua composição química pela introdução de polimetilmetacrilato e borracha de nitrilo. Têm elevada resistência ao impacto e ao arrancamento. Porém, apresentam baixa resistência mecânica a altas temperaturas e elevada flamabilidade. O seu processo de cura permite ligações fortes que proporciona assim a possibilidade de unir uma vasta gama de materiais.
- **Adesivos de poliuretano**

Adesivos com valores de resistência ao corte e à tração inferiores aos valores obtidos pelos outros adesivos. Porém, diferenciam-se pelas seguintes características:

- Boa resistência ao arrancamento;
- Boa resistência às vibrações e ao choque;
- Excelentes características de adesão em superfícies metálicas;
- Bom comportamento a baixas temperaturas;
- Resistência de rotura com valores na ordem dos 20 MPa.
- **Adesivos epóxicos**

Usualmente usados para a colagem de metais devido à sua elevada resistência mecânica e fácil aplicação. Podem ser aplicados em quase todos os materiais da indústria de construção mecânica, pois, as suas propriedades podem ser alteradas adicionando outras resinas, tais como a poliamida, fenólica ou polisulfido.

- **Adesivos de poliimida**

Os adesivos de poliimida ou adesivos poliaromáticos de elevada temperatura, tal como o nome indica, são os adesivos que apresentam as melhores características e melhores comportamentos apresentam a elevadas temperaturas ($\geq 200^{\circ}\text{C}$). Apesar de serem adesivos com boas propriedades a temperaturas elevadas, estes adesivos são bastante caros e difíceis de manusear durante o fabrico das juntas, sendo que estão disponíveis no mercado sob a forma de líquidos e filmes. São geralmente utilizados em aplicações de baixo peso sujeitas a temperaturas mais elevadas, como chips, eletroímãs e outros componentes eletrónicos. Além disto, o seu processo de cura é naturalmente mais difícil e problemático pois requer períodos elevados com ciclos de pressão e temperaturas altas.

2.1.5 Configurações possíveis de junta

As juntas adesivas apresentam vários tipos de configurações. A distribuição de tensões ao longo da junta depende principalmente da sua geometria e também das propriedades mecânicas do adesivo e do substrato [15]. As configurações mais comuns de cada tipo de junta são apresentadas na Figura 14.

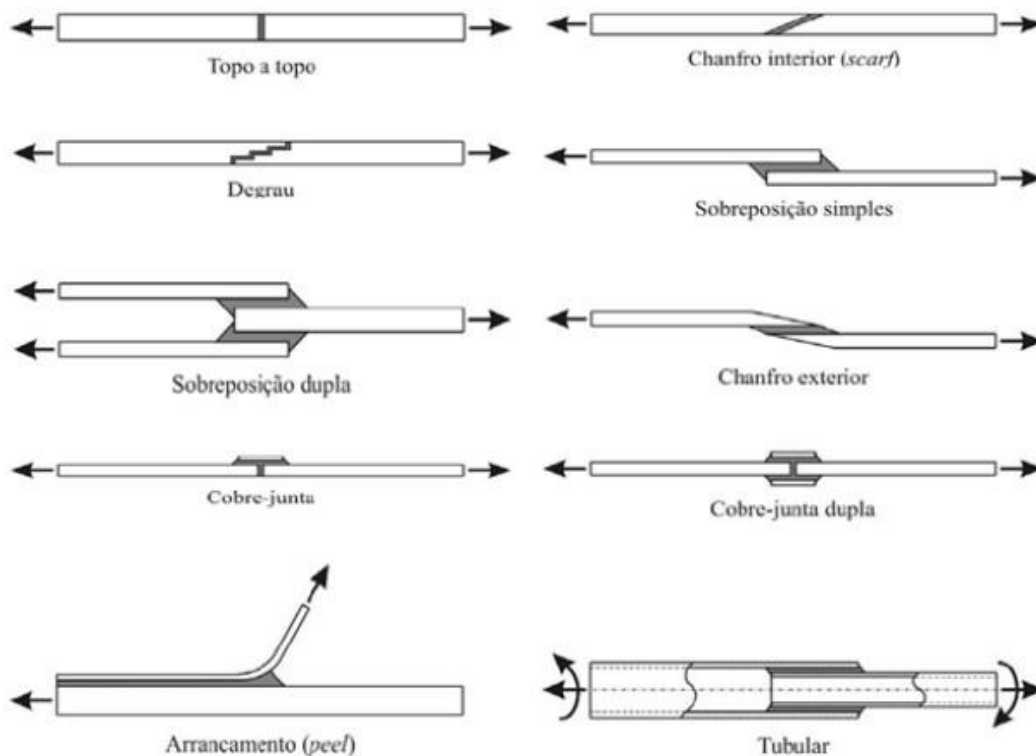


Figura 14 - Tipos de configurações de juntas [15]

▪ **Topo a topo**

De todas as configurações apresentadas na Figura 14, estas são as juntas mais fáceis de fabricar. Porém, como contrapartida, não são as juntas que apresentam os melhores resultados. Estas juntas apresentam elevadas concentrações de tensões de corte e de arrancamento, não resistindo a esforços de flexão, pois o adesivo fica sujeito a esforços de clivagem.

▪ **Chanfro interior (scarf) e degrau**

Juntas que geram uma diminuição da variação de tensões ao longo do adesivo, o que permite aumentar a sua resistência. A significativa diminuição da excentricidade dos esforços também contribui para este facto [15]. Porém, a dificuldade de maquinar os degraus torna este processo relativamente mais caro [11]. Uma forma de contornar este

obstáculo é utilizar substratos em compósito, pois as operações de maquinagem são eliminadas [16].

- **Sobreposição simples**

As juntas de sobreposição simples (JSS) são as mais utilizadas na indústria atual, pois, para além do adesivo ser maioritariamente solicitado ao corte, estas juntas são as mais simples de fabricar. Contudo, estas juntas registam esforços de arrancamento provenientes dos efeitos de flexão. Nas extremidades destas juntas ocorre um efeito de entalhe causado pela brusca mudança de geometria (Figura 15). Estes dois efeitos mais nocivos para estas juntas ocorrem maioritariamente na zona mais crítica o que conduz a um crescimento de concentrações de tensões. Uma forma de contornar este problema é utilizar uma junta de sobreposição dupla (JSD), a qual os efeitos de flexão são visivelmente inferiores [11, 17].

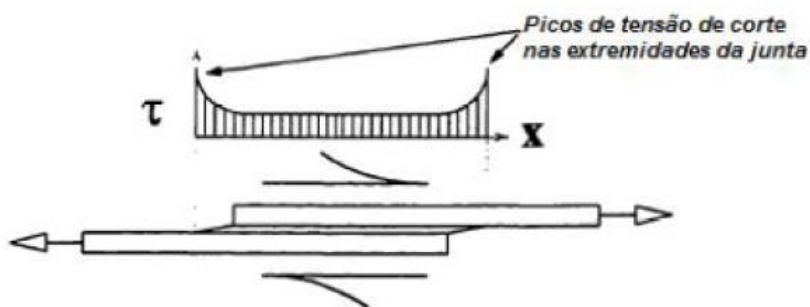


Figura 15 - Distribuição de tensão nas JSS [16]

- **Sobreposição dupla**

Tipo de configuração de junta quando se pretende minimizar os efeitos de flexão. Como desvantagem, esta junta tem um processo de fabrico mais demorado e nem sempre é possível utilizar [16]. As JSD, devido à sua geometria, apresentam uma configuração simétrica que se supõe isente de flexão. Porém, na linha de adesão, podem desenvolver-se tensões de tração e compressão, desde que os substratos exteriores sofram flexão [16].

- **Chanfro exterior**

As juntas com chanfros exteriores foram desenvolvidas de forma a reduzir os picos de tensão que ocorrem nas extremidades das JSS [4]. Com esta alteração de geometria ocorre uma diminuição da concentração de tensões para além de uma distribuição mais uniforme das mesmas [1].

- **Cobre-junta e cobre-junta dupla**

Juntas que apresentam melhores resultados no que toca à sua resistência quando comparadas com as JSS, mas que apresentam o mesmo tipo de problemas, ou seja, são juntas que também estão sujeitas a esforços de arrancamento. As juntas com reforço duplo proporcionam um menor momento fletor, o que faz com que estas juntas sejam preferíveis em relação às juntas com reforço simples. Este tipo de junta é usado em reparações de fuselagem de aeronaves com remendos de alumínio ou compósitos [4].

- **Arrancamento**

A solicitação de juntas obtidas por colagem de substratos finos a componentes espessos introduz geralmente forças de arrancamento. Estes esforços são os mais indesejados em juntas coladas, uma vez que as tensões se concentram em porções muito reduzidas da área de colagem.

- **Tubular**

Este tipo de configuração permite a união de tubos que podem ter a extremidade plana ou em chanfro. Esta geometria garante uma excelente resistência a esforços de tração e de compressão. Porém, caso não ocorra um perfeito alinhamento relativamente ao eixo de revolução, podem gerar-se esforços de arrancamento. Uma forma de eliminar esses problemas é a utilização de chanfros, canais ou ressalto, o que facilita a montagem dos componentes e aumenta a área de contacto. No que toca à inspeção desta junta, o facto de existir inacessibilidade ao seu interior, impossibilita a sua inspeção [17].

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

No passado, a falta de modelos materiais precisos e de critérios de rotura adequados conduziu ao fabrico de juntas adesivas sobredimensionadas, o que invariavelmente resulta em estruturas mais pesadas e mais caras. Com a disponibilidade de metodologias de previsão fiáveis, surgiram novas possibilidades para o uso eficiente de juntas adesivas. Podem ser escolhidas duas alternativas para a análise de juntas adesivas: análises de forma fechada (métodos analíticos) e métodos numéricos (por exemplo EF). O estudo de juntas adesivas remonta a 1930 com o modelo analítico de Volkersen [18] que considera os materiais totalmente elásticos e deformações do adesivo apenas em corte. No entanto, a formulação analítica de juntas adesivas torna-se mais complexa se o adesivo se deformar plasticamente, se forem usados substratos de compósito, ou se forem considerados substratos de materiais diferentes. O método de EF é a técnica mais utilizada para análise de juntas adesivas. Adams et al. [19] foram os pioneiros nesta técnica. A rotação da junta, a plasticidade dos substratos e dos adesivos e a influência do filete foram aspetos estudados em primeiro lugar por Harris e Adams [20]. A abordagem da mecânica contínua para a previsão da resistência das juntas coladas foi a

técnica considerada em primeiro lugar para a previsão da resistência de juntas adesivas, e requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado. O método de EF também pode ser usado em conjunto com critérios da mecânica da fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade de tensão ou por métodos energéticos, como a técnica de fecho virtual da fenda. Contudo, com estas técnicas de modelação, o crescimento da fenda torna-se complicado devido à necessidade de voltar a criar a malha sempre que há propagação da fenda, o que tem consequências a nível do esforço computacional [21]. A modelação numérica de juntas adesivas teve grandes desenvolvimentos nas últimas décadas, e um deles é a modelação de dano por combinação de EF com MDC. Esta técnica combina a técnica de EF convencional para as regiões em que não é esperado dano e uma abordagem da mecânica da fratura através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação do dano. Uma alternativa muito recente para modelar a propagação de fendas nos materiais é o Método dos Elementos Finitos Estendido, que usa funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

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

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

2.2.1 Modelos analíticos

Voltando ao início da análise de estruturas ligadas, os métodos de previsão consistiam em técnicas analíticas, e as formulações de Volkersen [18] e Goland e Reissner [22] foram pioneiras numa série de estudos teóricos que tiveram a vantagem de simplificar os campos de tensão nas estruturas adesivas devido ao uso de hipóteses simplificativas em termos de geometria das estruturas, carregamento e condições de fronteira, fornecendo soluções eficientes em forma fechada. Assim, cada estrutura ligada pode ser analisada de forma rápida, ainda que com muitos pressupostos incorporados [23]. Com estes modelos, as tensões e deformações podem ser facilmente calculadas, juntamente com a distribuição do momento fletor na estrutura. A resistência era tipicamente prevista por critérios de tensão ou deformação. Com a evolução, estes estudos foram progressivamente substituídos por análises numéricas, embora os estudos teóricos também tenham sido refinados ao longo dos anos em termos de capacidades de modelação, tais como modelação de adesivos não-lineares [24] ou consideração de análises geométricas não-lineares [25].

2.2.2 Métodos numéricos

2.2.3 Mecânica dos meios contínuos

Na abordagem da mecânica dos meios contínuos, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos por modelos analíticos ou por EF, são geralmente usados em critérios de rotura para estimar a resistência da junta. Isto é alcançado quando os valores previstos, obtidos por critérios de tensão ou deformação (por exemplo, o Critério de Tensão Normal Máxima ou o Critério de Tensão de Corte Máxima) atingem os valores limites dos materiais. Esta abordagem foi rapidamente aplicada para juntas em aplicações estruturais após a disponibilização do método de EF e programação de computador [20]. A vantagem desta técnica inclui a análise de estruturas adesivas com ou sem dano inicial, e sob uma carga arbitrária. Todavia, esta técnica tem uma limitação intrínseca, uma vez que as estruturas coladas são propensas a tensões localizadas nas extremidades das regiões de sobreposição, devido às arestas vivas. Como resultado, na análise da estrutura adesiva em EF, a tensão nestas zonas aumenta com o refinamento da malha e não se consegue obter convergência, o que significa previsões dependentes da malha [23]. Ao longo dos anos, foram introduzidas melhorias a esta técnica de modelação, tais como a definição dos critérios mais complexos de tensões ou deformações para diferentes materiais e mecanismos de fratura, ou combinação com modelos de meios contínuos mais realistas, mas ainda assim a dependência da malha continua sem solução.

2.2.4 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos assume que a estrutura e os materiais são contínuos. Desta forma, não se enquadram nesta suposição defeitos ou dois materiais com cantos reentrantes. Consequentemente, a mecânica dos meios contínuos não fornece nenhuma solução para o estado de tensão destes pontos singulares, resultando em tensões ou deformações localizadas. As fendas são os defeitos mais comuns em estruturas, para as quais se desenvolveu a mecânica da fratura. Na mecânica da fratura é bem aceite que tensões calculadas usando a mecânica dos meios contínuos são singulares na extremidade da fenda. Sabe-se que tal singularidade existe sempre que o ângulo da fenda é inferior a 180° . Este resultado foi descoberto por Williams [26] para as tensões singulares num entalhe. Este argumento é igualmente aplicável para as tensões singulares em dois materiais ligadas entre si com um canto reentrante. A mecânica da fratura tem sido aplicada, com sucesso, em muitos problemas de engenharia nos últimos anos. Muitos estudos que lidam com juntas adesivas usam a taxa de libertação de energia de deformação, e o respetivo valor crítico ou tenacidade à fratura [27] em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são

facilmente determináveis quando a fenda se propaga numa interface ou perto dela. Contudo, a fratura de juntas adesivas ocorre usualmente em modo misto por causa das variações das propriedades entre os diferentes materiais e do campo de tensões complexo. Os critérios de rotura em modo misto podem tomar uma forma idêntica aos critérios clássicos de rotura, embora deva ser introduzido o conceito de superfície ou envelope de fratura para lidar com a mixicidade do carregamento.

2.2.5 Modelos de dano coesivo

A implementação em computador das técnicas baseadas na Mecânica da Fratura Linear Elástica teve um grande sucesso há algumas décadas, mas estas encontram-se limitadas ao comportamento elástico dos materiais. Além disso, os adesivos dúcteis atualmente existentes desenvolvem zonas plásticas que podem ser maiores do que a espessura dos substratos. Os MDC foram desenvolvidos no final de 1950 / início de 1960 [28] para descrever o dano sob cargas estáticas na zona de processo coesiva à frente da extremidade da fenda, fornecendo uma solução promissora para prever danos em estruturas adesivas. Os MDC foram amplamente testados, desde então, para simular a iniciação e propagação de fendas em problemas de rotura coesiva e interfacial ou delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [29]. Estes elementos podem ser facilmente incorporados numa análise de EF para modelação do comportamento da rotura em vários materiais, incluindo juntas adesivas [30]. O princípio base dos MDC é que uma ou mais regiões ou interfaces de fratura podem ser introduzidas artificialmente em estruturas, em que se possibilita o crescimento do dano pela introdução de uma possível descontinuidade no campo de deslocamentos. Isto é possível pela definição de leis de tração-separação para a modelação de interfaces ou regiões finitas [31]. As leis dos MDC são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos, e estas podem ligar nós sobrepostos que representam diferentes materiais ou diferentes camadas em compósitos, ou podem ser aplicadas diretamente entre dois materiais sem contato para simular uma camada fina (por exemplo, uma ligação adesiva). Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica de dano definida pela resposta das leis de tração-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. A propagação das fendas é baseada nas energias de rotura. É modelada a evolução da resistência e amaciamento até à rotura, o que permite 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 [31], embora se possa definir uma ou mais fases de forma diferente para uma representação mais precisa do comportamento dos materiais.

2.2.6 Mecânica do dano

Atualmente estão disponíveis técnicas avançadas de modelação que garantem previsões precisas de rotura, o que supera as limitações das abordagens anteriores. De um modo geral, os danos estruturais podem ocorrer por microfissuras ao longo de um volume finito ou uma região interfacial, o que reduz a transferência de carga. Uma simulação de EF com base em modelação sólida contínua gera indevidamente plastificação generalizada nos elementos sem evolução do dano, enquanto um modelo de mecânica do dano pode simular dano nos elementos pela redução das cargas transferidas. Como resultado, torna-se possível a simulação passo-a-passo do dano e fratura num caminho pré-definido ou arbitrariamente dentro de uma região [32]. Este é ainda um campo inovador sob intenso desenvolvimento, no sentido de obter técnicas mais precisas de modelação, métodos de estimativa de parâmetros de materiais fiáveis e simples, aumento de robustez e eliminação de problemas de convergência [33]. As técnicas de modelação do dano podem ser locais ou contínuas. Dentro da modelação de dano local, o dano ocorre numa linha ou superfície (análise a duas dimensões (2D) ou a três dimensões (3D), respetivamente), que simula uma rotura interfacial entre materiais, por exemplo, entre a ligação adesiva e o substrato, a fratura interlaminar de compósitos laminados ou a interface entre as fases sólidas de materiais. Pela modelação contínua, o dano estende-se por uma área ou volume finitos (análise 2D ou 3D, respetivamente), para simular uma rotura ou para modelar uma fratura coesiva do adesivo. Os MDC são a técnica englobada na mecânica do dano com maior aplicação a juntas adesivas.

A mecânica do dano é uma ferramenta para a modelação da degradação de materiais. Como exemplos de utilização destes modelos para depreciação das propriedades referem-se as ligações adesivas finas [34], delaminação de compósitos ou até rotura da matriz [35]. Nestes métodos estipulam-se parâmetros de dano para alterar a resposta constitutiva dos materiais através de uma diminuição de rigidez ou resistência. Sucintamente, o dano é implementado com a alteração das propriedades físicas dos materiais para simular o crescimento irreversível de micro-defeitos [36]. Tal parâmetro pode ser usado numa lei de evolução de dano para modelação do dano antes da iniciação da fenda e durante a evolução da mesma. As variáveis de dano podem ser qualificadas em dois grupos. Num dos grupos as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, apesar de estas não estarem diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. Noutro grupo, as variáveis estão relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [37].

Comparativamente à modelação de fadiga por MDC, as técnicas de MAMD não possibilitam uma distinção clara entre o início da fadiga e as fases de propagação desta, embora possam dar uma base para a previsão [34]. De salientar, no entanto, que é

possível modelar a evolução do dano antes do crescimento de uma macro-fenda. Como vantagem comparativamente ao MDC, em aplicações específicas, esta pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido, enquanto pelo MDC a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [38].

2.2.7 Método de Elementos Finitos Estendido

O Método de Elementos Finitos Estendido é uma melhoria recente do método de EF para modelar o crescimento de dano em estruturas. O método utiliza leis de dano para a previsão da fratura baseadas na resistência dos materiais em maciço para a iniciação de dano e deformações para a rotura (definido como G_{IC}), em vez dos valores de resistência coesiva à tração/corte (t_n^0/t_s^0) ou deslocamentos correspondentes à resistência coesiva à tração/corte (δ_n^0/δ_s^0) utilizados nos MDC. O Método de Elementos Finitos Estendido tem a vantagem em relação aos MDC, da fenda não necessitar de seguir um caminho pré-definido. De facto, as fendas podem-se propagar livremente dentro de uma região do material, sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades ou que haja a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda durante a análise [39]. Este método é uma extensão à modelação convencional por EF, cujas características fundamentais foram referenciadas no final dos anos 90 por Belytschko et al. [40]. O Método de Elementos Finitos Estendido baseia-se no conceito de partição da unidade e pode ser implementado no método de EF tradicional 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 [41]. Devido ao crescimento de dano, a extremidade da fenda modifica continuamente a sua posição e orientação em função das condições de carga e da geometria da estrutura, simultaneamente com a criação das funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos EF na proximidade da extremidade da fenda.

2.3 Modelos de dano coesivo

As juntas adesivas são amplamente utilizadas em vários campos de engenharia, tais como em estruturas automóveis, aeronáuticas e espaciais, como um método fácil de unir componentes, garantindo ao mesmo tempo os requisitos de projeto para a estrutura [42]. As capacidades gerais deste método de junção envolvem campos de tensão mais uniformes do que a fixação ou rebiteagem, a vedação de fluidos, a alta resistência à fadiga e a possibilidade de unir materiais diferentes devido à prevenção da corrosão e acomodação de diferentes expansões térmicas dos aderentes [43, 44]. As técnicas de previsão de força das juntas ligadas também melhoraram. Inicialmente,

foram propostos métodos teóricos (principalmente de forma fechada) para distribuições de tensões no adesivo para geometrias simples, como JSS ou JSD, e a previsão de rotura era realizada por comparação das tensões máximas com a resistência dos materiais [45]. Algumas décadas depois, o método dos elementos finitos (FEM) iniciou sua incursão na análise de juntas adesivas [46], considerando critérios de resistência ou a mecânica de fratura para a previsão da rotura [47].

Os Modelos de Dano Coesivo (MDC) foram utilizados nas últimas décadas para a previsão de força das juntas adesivas, como um complemento para análises FEM que permite a simulação do crescimento do dano dentro de regiões sólidas de materiais ou em interfaces entre diferentes materiais [48]. Em comparação com o FEM convencional, é alcançada uma previsão muito mais precisa, uma vez que podem ser desenvolvidas diferentes formas para as leis coesivas, dependendo da natureza do material ou da interface a ser simulada. As formas triangular e trapezoidal são as mais comumente usadas para a previsão de rotura de materiais estruturais típicos. Para a aplicação desta técnica, são estabelecidas leis de tração e separação com uma forma pré-definida nos caminhos de rotura e os valores da taxa de liberação de energia de tensão em tração e corte (G_I e G_{II} , respetivamente) ao longo dos caminhos de fratura e respetivos valores críticos ou valores de tenacidade (G_{Ic} e G_{IIc}) são obrigatórios. As resistências coesivas em tração e corte (t_{n0} e t_{s0} , respetivamente) são igualmente necessárias e relacionam-se com a iniciação do dano, isto é, o fim do comportamento elástico e o início do dano. Atualmente estão disponíveis técnicas diferentes para a definição dos parâmetros coesivos (G_{Ic} , G_{IIc} , t_{n0} e t_{s0}), como a técnica de identificação individual de propriedade, o método direto e o método inverso. Estes métodos geralmente baseiam-se em ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) ou *End-Notched Flexure* (ENF, geralmente com bons resultados [43, 49-53]. A técnica de identificação consiste no cálculo separado de cada um dos parâmetros da lei coesiva por testes adequados, enquanto no método inverso os parâmetros MDC são estimados por ajuste iterativo da precisão por FEM com os dados medidos experimentalmente (tipicamente o deslocamento de carga, $P-\Delta$, curva) até uma representação precisa. O método direto permite obter a forma precisa das leis MDC de um material ou interface [54]. Isto é feito pela diferenciação de G_I (tração) ou G_{II} (corte) em relação à abertura relativa da fenda (δ_n para tração ou δ_s para corte).

Carlberger e Stigh [55] estimaram as formas das leis coesivas de uma camada fina de adesivo em tração e corte com testes DCB e ENF, respetivamente, para espessuras, t_A , entre 0,1 e 1,6 mm. As leis coesivas foram obtidas por um método direto baseado na diferenciação dos dados $G_I \parallel G_{II}$ vs. $\delta_n \parallel \delta_s$. As formas das leis coesivas e os respetivos parâmetros variaram significativamente com t_A , o que provoca uma variação de uma forma triangular para valores menores de t_A até uma forma trapezoidal para maiores valores de t_A . Ji et al. [56] estudaram a influência de t_A nos valores de t_{n0} e G_{Ic} de um adesivo epóxico frágil, através de ensaios DCB e do método direto para estimação dos parâmetros. A metodologia de análise baseou-se na medição de G_{Ic} por uma técnica

analítica proposta por Andersson e Stigh [57] que exigiu medir a rotação relativa entre os substratos do provete DCB. A derivação das leis de tensão coesiva em tração (t_n) - δ_s foi rapidamente obtida pela diferenciação dos dados G_I - δ_n [58] e mostrou claramente uma redução de t_n^0 e aumento de G_{Ic} para valores maiores de t_A . Por outro lado, a influência do desvio entre as aproximações parametrizadas e as leis coesivas reais no resultado das simulações também depende em grande parte de parâmetros como a espessura dos substratos (t_p) ou a rigidez dos substratos. Pinto et al. [59] avaliaram a resistência à tração de juntas entre substratos com diferentes valores de t_A e materiais, sendo utilizadas leis coesivas trapezoidais parametrizadas nas simulações numéricas por MDC. Os dados P - Δ revelam que o uso de formas precisas de leis coesivas para o adesivo é muito mais importante com substratos rígidos, uma vez que a deformação diferencial entre os substratos é minimizada, e o adesivo é carregado uniformemente ao longo de todo o comprimento da ligação. Em conformidade, os substratos dão origem a fortes gradientes de esforço de corte, o que proporciona resultados relativamente insensíveis à forma da lei coesiva.

Ridha et al. [60] estudaram por MDC a reparação de componentes por remendos embebidos com adesivos em painéis compósitos ligados por um adesivo epóxico dúctil designado por FMs 300M (Cyttec). Foi comparado o amaciamento pela lei linear, exponencial e trapezoidal.

Apesar da previsão da resistência ser bastante precisa, no modelo linear e exponencial os valores de resistência são previstos por defeito em quase 20%, em virtude da degradação excessiva da zona plastificada nas extremidades da ligação adesiva, o que não é observado nos ensaios experimentais. Kafkalidis e Thouless [61] foram dos primeiros autores a fazer investigações sobre a precisão da resistência de juntas pelo MDC usando leis coesivas trapezoidais. As cargas de rotura foram estimadas com precisão para JSS simétricas e assimétricas.

Este capítulo fornece uma descrição geral do MDC aplicado à previsão de resistência de juntas em condições estáticas. É inicialmente dada uma visão geral da técnica, seguindo-se as técnicas mais comuns para estimar as leis coesivas, essenciais como entrada nas simulações numéricas. Os problemas de convergência são relevantes na análise MDC de juntas adesivas devido ao processo de rotura às vezes abrupto, são especificamente abordados neste capítulo.

2.3.1 Fundamentos do método

Na última década, os MDC têm sido utilizados para prever a resistência de juntas adesivas, como um suplemento à análise de EF, e permitem a simulação do crescimento do dano em regiões maciças de material contínuo ou na interface entre diferentes materiais [48, 62]. Em relação à análise convencional de EF, consegue-se uma maior

fiabilidade e precisão das previsões, uma vez que podem ser desenvolvidas diferentes formas para as leis coesivas, dependendo da natureza do material ou da interface a simular. Quando o adesivo apresenta um comportamento frágil, pode ser usada a MFLE para caracterizar o processo de rotura. Esta técnica teve bastante sucesso há algumas décadas atrás, mas tinha a desvantagem de ser restrita a deformações de pequena escala em torno da extremidade da fenda. Como nos adesivos estruturais modernos a zona de plastificação se pode estender por um comprimento superior à espessura dos substratos, foram desenvolvidos estudos em 1959 e 1960, respetivamente por Barenblatt [28] e Dugdale [63], no sentido de modelar este processo de dano. Foram estes autores que propuseram o conceito de zona coesiva para descrever situações de dano sob condições estáticas de carregamento na zona coesiva do processo, à frente da ponta da fenda. Surgiram então os MDC, que podem ser baseados em elementos de mola ou mais convencionalmente em elementos coesivos, e que ligam os elementos sólidos 2D ou 3D das estruturas [29]. Os MDC baseiam-se no pressuposto de que uma ou múltiplas regiões/interfaces de fratura podem ser artificialmente introduzidas nas estruturas, nas quais a propagação do dano é propiciada pela existência de uma possível descontinuidade. Posto isto, uma das principais vantagens do uso dos MDC é o facto de estes serem facilmente incorporados em *softwares* de simulação de EF para modelar o comportamento à fratura de diversos materiais, incluindo juntas adesivas [62]. A técnica dos MDC consiste na aplicação de leis de tração – separação para modelar interfaces ou regiões finitas. Estas leis estabelecem-se entre pares de nós homólogos dos elementos coesivos e podem ser consideradas duas aproximações para a modelação: a aproximação local e a aproximação contínua (Figura 16) [62].

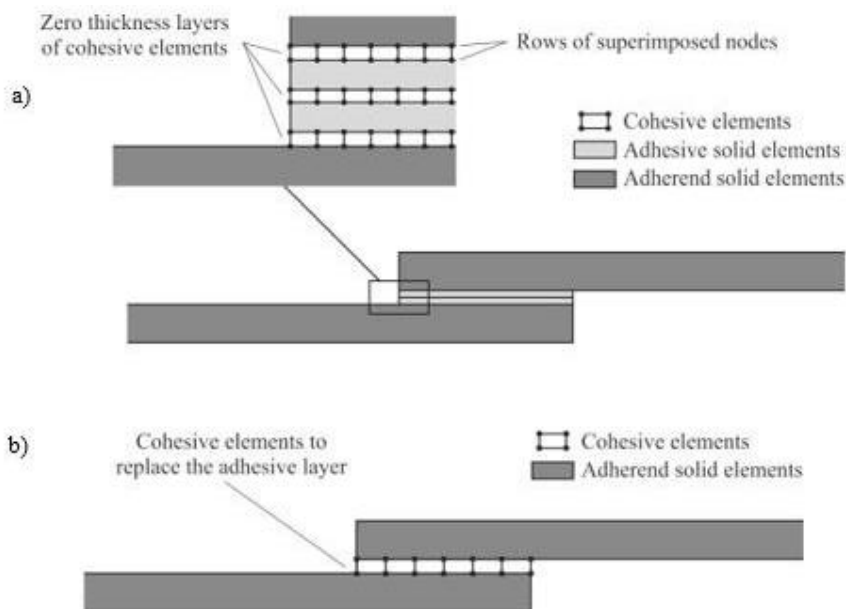


Figura 16 - Elementos coesivos para simular uma espessura nula de material: a) aproximação local e b) aproximação contínua [65]

Na aproximação local (Figura 16 a) as leis coesivas são usadas para ligar nós de elementos sólidos sobrepostos que representam diferentes materiais ou diferentes camadas de compósitos, de modo a simular uma espessura nula, como é o caso das interfaces [66]. Com esta metodologia, as dissipações plásticas de uma ligação adesiva são simuladas com EF sólidos, enquanto o uso de elementos coesivos é restrito à simulação do crescimento do dano. As leis do MDC normalmente apresentam uma rigidez inicial extremamente elevada (método da função da penalidade), para não alterar a rigidez global da estrutura. Segundo Campilho et al. [64], o uso de elementos coesivos em diferentes planos de crescimento de dano, em diferentes planos da espessura do adesivo, permite a obtenção dos respectivos gradientes de concentração de tensões para as regiões a analisar. Na simulação de juntas adesivas, o adesivo é modelado como uma camada elasto-plástica contínua por elementos sólidos, ao passo que a sua energia de fratura intrínseca é considerada nas leis do MDC no lugar de G_c , que corresponde à energia dissipada requerida para a formação de uma nova superfície, enquanto as dissipações plásticas dos materiais dúcteis ocorrem nos elementos sólidos que representam a ligação adesiva [33]. Portanto, G_c é a soma destas duas componentes energéticas, que inclui as dissipações plásticas dos materiais nos modelos. Sob estas premissas, a propagação do dano é governada pelo trabalho de separação das superfícies de fratura em vez de G_c , devido à energia dissipada pelos elementos contínuos. Segundo Ji et al. [56], os efeitos das restrições internas e externas nas dissipações plásticas de uma ligação adesiva são também contabilizados nesta abordagem local [62]. Por outro lado, comparativamente à aproximação contínua, são necessários mais parâmetros e trabalho computacional.

Na aproximação contínua (Figura 16 b) as leis são aplicadas diretamente entre dois materiais (diferentes ou não) que não se contactam, de modo a simular a existência de um outro material entre eles com uma espessura finita, como é o caso de uma camada de adesivo [67]. No caso da simulação do comportamento de ligações adesivas, toda a ligação adesiva é representada por uma linha de elementos coesivos (Figura 16 b) que assumem o comportamento da ligação. A rigidez inicial dos elementos coesivos, ao contrário do que acontece na aproximação local, representa a rigidez da ligação adesiva em cada modo de carregamento. Este método tem sido bastante usado na simulação da propagação do dano em juntas adesivas, dada a sua simplicidade, mas também porque permite obter resultados precisos desde que as leis coesivas tenham sido obtidas em condições idênticas às juntas em que vão ser aplicadas. Apesar da sua eficácia e simplicidade, este método também apresenta algumas limitações, nomeadamente [56-60, 62]:

- A significância do processo de fratura é de certa forma desvanecida com esta aproximação, pois as separações coesivas reais são acompanhadas com comportamentos plásticos localizados ao longo das camadas adesivas, mesmo

em adesivos frágeis, representados por este método com propriedades médias equivalentes;

- Os MDC tornam-se dependentes da geometria da estrutura, nomeadamente da espessura de adesivo e dos substratos, dado que estes parâmetros afetam a extensão da ZPF bem como a zona da plastificação em torno da ponta da fenda, o que torna as leis do MDC dependentes destes parâmetros.

Os MDC têm sido bastante usados recentemente na simulação do comportamento de estruturas até à rotura, pois permitem incluir nos modelos numéricos a possibilidade de rotura múltipla, em diferentes regiões dos materiais ou entre interfaces, como é o caso das interfaces nas ligações adesivas. A grande desvantagem dos MDC é a necessidade de colocação dos elementos coesivos nos potenciais planos de rotura. No entanto, em juntas adesivas a rotura encontra-se restrita a poucos planos possíveis de propagação de dano, o que torna o método adequado para juntas adesivas.

Existem várias formas para as leis coesivas que têm sido apresentadas na literatura, dependendo da natureza do material ou da interface a ser simulada. Dentro das formas mais comuns destacam-se a triangular, exponencial e a trapezoidal, que são usadas para prever a resistência de materiais.

2.3.2 Tipos de leis coesivas

Existem vários tipos de leis coesivas, tais como: triangular [68], linear parabólica [69], polinomial [70], exponencial [71] e o trapezoidal [72]. Atualmente, a lei coesiva triangular (Figura 17), devido à sua simplicidade, é a mais utilizada.

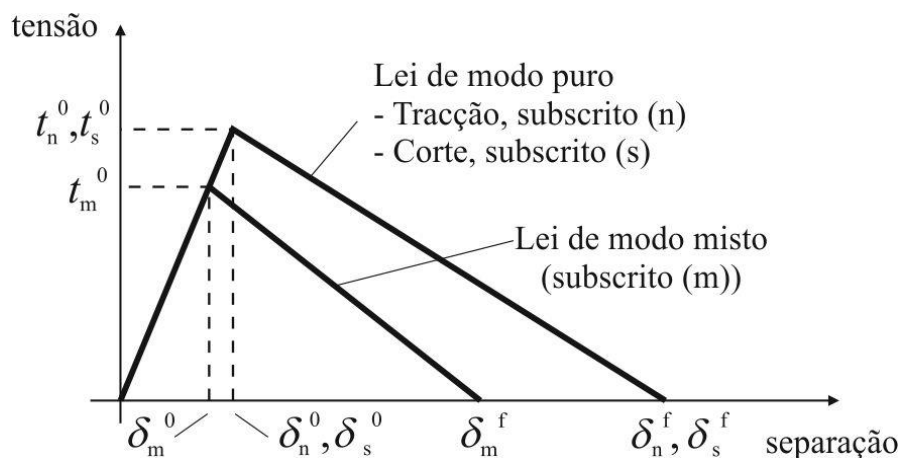


Figura 17 - Modelo coesivo de dano triangular [62]

Além disto, o reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda o facto de se obterem resultados precisos para a maioria das condições reais [33] são fatores que permitem a maior utilização desta lei. Esta lei distingue dois modos. A lei de maiores

dimensões caracteriza as leis em modo puro e é caracterizada pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei respetiva. A lei de menores dimensões caracteriza a lei de modo misto, onde são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar os modos puros de tração e corte [8].

A Figura 18 representa um modelo de dano coesivo trapezoidal. O modelo coesivo de dano trapezoidal tem como principal objetivo substituir os tradicionais elementos sólidos utilizados para modelar a camada fina de adesivo. O comportamento dúctil do adesivo é simulado pela existência de um patamar na lei coesiva, traduzindo o seu comportamento plástico [5].

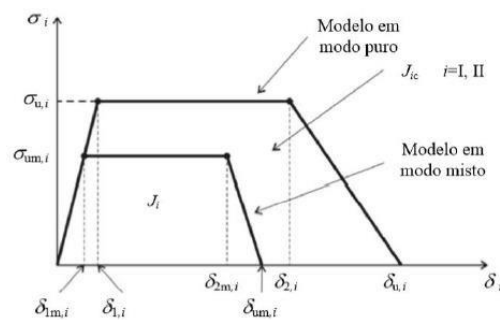


Figura 18 - Modelo coesivo do dano trapezoidal [62]

2.3.3 Métodos de estimação das leis coesivas

As análises por MDC permitem modelar o comportamento do dano em juntas adesivas. Contudo, os parâmetros coesivos devem ser calibrados com ensaios experimentais e respetivamente validados, de forma a simular com maior precisão a rotura da ligação [55]. Vários estudos têm sido publicados sobre a definição dos parâmetros coesivos (t_n^0 , t_s^0 , G_{Ic} e G_{IIc}). Contudo, segundo Lee et al. [42], a determinação de alguns parâmetros, como t_n^0 e t_s^0 , ainda não se encontram devidamente padronizada. Existem algumas técnicas para estimar estes parâmetros, como por exemplo o método de identificação individual de parâmetros, o método direto e o método indireto, que apresentam diferentes graus de complexidade e de precisão. Alguns trabalhos são realizados para validar ensaios em modo misto, estimando os MDC em modo puro através de ensaios DCB, ENF e JSS, alcançando bons resultados [61].

O método de identificação individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. No entanto este método é particularmente crítico devido aos desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e em camada fina [54]. Este problema é causado pelo efeito de restrição às deformações de uma camada fina de adesivo entre dois substratos, e também devido

ao modo misto de propagação de fendas em ligações adesivas. De facto, as fendas em materiais maciços tendem a crescer de forma perpendicular à direção de tensão principal máxima [73]. Em ligações adesivas finas, como o adesivo é tipicamente mais fraco e flexível do que os substratos, as fendas são obrigadas a propagar do sentido longitudinal da ligação. O método inverso consiste no procedimento iterativo de ajuste entre as previsões numéricas e os dados experimentais, por exemplo, a curva P - δ o que permite a estimativa de leis coesivas simplificadas para as condições específicas em que se está a executar o ajuste de parâmetros. Nos métodos de definição dos parâmetros e inverso é selecionada uma forma parametrizada da lei coesiva (por exemplo, bilinear ou trilinear) para obter o MDC, com base no comportamento do material a ser simulado [72]. Por outro lado, o método direto define a forma exata das leis coesivas, na medida que este método calcula os MDC da ligação adesiva a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura [54], pela diferenciação das curvas G_I - δ_n ou G_{IIc} - δ_s (em que δ_n é deslocamento em tração e δ_s é deslocamento em corte). No entanto, no que respeita aos parâmetros dos MDC, G_{Ic} e G_{IIc} são normalmente os principais parâmetros a determinar, em função do papel preponderante que desempenham nos resultados globais. Para avaliação de G_{Ic} e G_{IIc} , os métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são geralmente mais simples de aplicar, embora só possam ser utilizados em adesivos que não apresentem uma ductilidade muito acentuada. De facto, a MFLE não é viável em adesivos com grande plastificação e, nestas condições, o integral- J surge como alternativa para definição de G_{Ic} e G_{IIc} . Independentemente da técnica utilizada para avaliação dos parâmetros coesivos, os ensaios tipicamente usados para a determinação de G_{Ic} e G_{IIc} são o ensaio DCB (tração) e ENF (corte). O ensaio DCB é o mais utilizado para determinar G_{Ic} pois apresenta uma geometria simples e fácil fabrico dos provetes. Existem vários métodos para obter G_{Ic} , como métodos baseados na teoria de vigas (corrigida ou não), no comprimento deformado equivalente ou no integral- J [74]. Rice [75] tornou possível obter uma expressão para o valor de G_{Ic} em provetes DCB através do integral- J , que também permite obter a relação entre as tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda, ou seja, a lei coesiva [55]. O ensaio DCB é constituído por dois substratos colados entre si com uma camada fina de adesivo. Durante a fabricação do provete, é provocada uma fenda inicial numa das extremidades do mesmo. Todavia, podem ser sentidas algumas dificuldades quando se determina o valor de G_{Ic} . Por vezes a propagação da fenda pode ser instável e, nesses casos, a medição do comprimento de fenda durante o ensaio torna-se difícil. Em alguns ensaios DCB, a ponta da fenda pode não ser claramente visível, dependendo do adesivo utilizado [72]. A norma referente ao ensaio DCB é a norma ASTM D3433-99 (2012), onde está enunciado o método para execução de ensaio. O esquema definido para este ensaio encontra-se representado na Figura 19. Na mesma norma é indicada a forma de determinar a altura mínima do substrato (h) de forma a evitar deformação plástica dos substratos durante o ensaio, definido pela equação (1) em que T corresponde a 150% da carga máxima necessária

para iniciar a fenda na ligação adesiva, a é o comprimento da fenda, B é a largura do substrato e σ_y corresponde à tensão de cedência do material dos substratos.

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

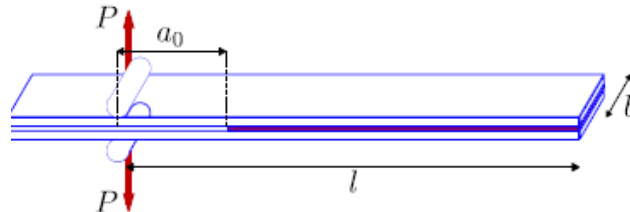


Figura 19 - Geometria do provete DCB [50]

O ensaio ENF descreve-se como uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e carregada a meio vão, com um comprimento da pré-fenda inicial (a_0) definido, onde a meio é aplicada uma carga P (Figura 20). A solicitação aplicada origina a propagação da fenda sem haver a separação dos substratos. Para que a propagação da fenda seja estável, é necessário que o a_0 seja pelo menos igual a 70% do comprimento total do provete ($2L$) [76]. Como os métodos utilizados para determinação dos parâmetros coesivos tipicamente requerem a medição de a durante a propagação, podem-se observar dificuldades na estimativa de G_{Ic} por esta medição [50].

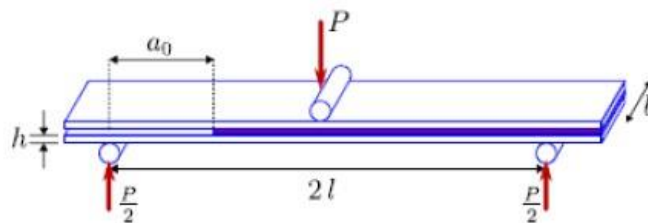


Figura 20 - Geometria do provete ENF [50]

2.3.4 Método de identificação individual das propriedades coesivas

Este método começa pela escolha da forma da lei coesiva a utilizar para o material (neste caso adesivo), em função do seu comportamento conhecido [77]. De seguida, calcula-se separadamente cada um dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios apropriados. Segundo este método, pelo menos um dos parâmetros das leis coesivas é obtido por consideração das propriedades do adesivo como material maciço. Assim, esta técnica pode por exemplo envolver a utilização de propriedades de adesivo maciço como aproximação para os valores de t_n^0 e t_s^0 . No entanto, como os parâmetros coesivos

dependem da espessura de adesivo (t_A) e espessura dos substratos, sempre que for aplicada esta aproximação, são esperados desvios entre a previsão quantitativa dos parâmetros coesivos e o comportamento real da ligação adesiva [78].

No trabalho de Campilho et al. [72], t_n^0 e o deslocamento de tração de início de amaciamento (δ_n^s) foram obtidos a partir da curva tensão–deformação (σ - ε) de provetes de adesivo maciço, tendo em consideração o trabalho de Andersson e Stigh [57], onde se observou que t_n^0 é da mesma ordem de grandeza da resistência à tração medida em testes de adesivo maciço, e também que δ_n^s e deslocamento de corte de início de amaciamento (δ_s^s) não influenciam significativamente os resultados numéricos. Por outro lado, o valor de t_s^0 foi estimado a partir de t_n^0 , considerando o critério de von Mises para materiais isotrópicos. Os valores de G_{Ic} e G_{IIc} foram estimados a partir de testes DCB e ENF, respetivamente. Para uma avaliação do efeito das aproximações feitas anteriormente, os autores também levaram a cabo uma análise de sensibilidade numérica, cujos resultados mostraram que os valores de δ_n^s e δ_s^s das leis MDC de juntas adesivas não têm influência visível no modo de rotura e resistência das juntas.

2.3.5 Método inverso

O método inverso é um processo iterativo que consiste em ajustar os dados obtidos nas simulações de MEF aos dados obtidos experimentalmente, até se obter uma boa concordância entre os dois por variação dos parâmetros coesivos. Este método necessita inicialmente de uma reprodução precisa da geometria da junta adesiva e utiliza leis coesivas aproximadas, com base no comportamento típico do material a ser simulado. Ao contrário do método de identificação individual dos parâmetros, o método inverso fornece uma estimativa mais precisa do comportamento do adesivo nas condições reais em que este vai ser aplicado [66]. Para a determinação das leis coesivas de adesivos, o procedimento habitual consiste na utilização de valores de G_{Ic} ou G_{IIc} obtidos em ensaios de fratura (DCB ou ENF, respetivamente) como parâmetros de entrada da lei coesiva respetiva, e posterior utilização de valores aproximados de t_n^0 ou t_s^0 para a iniciação do processo iterativo de tentativa e erro. A estimativa destes parâmetros é então realizada por algumas iterações numéricas até se alcançar uma previsão precisa dos dados experimentais. O método inverso utiliza padrões de ajuste iterativo como as curva- R [79], o perfil de abertura de fenda [80] ou, mais habitualmente, a curva P - δ [49].

2.3.6 Método direto

O método direto permite obter a forma exata das leis coesivas de um material ou uma camada adesiva, uma vez que estas são estimadas a partir dos dados experimentais de testes de fratura, tais como o DCB ou ENF [54]. Estes ensaios permitem obter os valores

de G_I (tração) ou G_{II} (corte) em função do deslocamento relativo na extremidade da fenda (δ_n para a tração ou δ_s para corte). As leis coesivas pelo método direto são determinadas pelas curvas G_I - δ_n ou pelas curvas G_{II} - δ_s , cuja diferenciação permite obter as leis coesivas em tração ou em corte, respectivamente.

No âmbito da utilização do método direto em tração pelo ensaio DCB, Stigh et al. [55], em trabalho realizado baseado no pressuposto da existência de uma lei coesiva, concluíram que, para as camadas do adesivo, a lei coesiva é independente das partes ligadas.

2.4 Ensaios para determinação da tenacidade à fratura

Normalmente, a mecânica da fratura é utilizada para a caracterização do comportamento dos materiais à fratura (estudo da propagação de fenda), sendo que tem como principal objetivo a obtenção das propriedades fundamentais para a previsão da resistência das ligações adesivas. Esta técnica assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo e também considera os defeitos nas estruturas. Para isso, são associados principalmente dois critérios à mecânica da fratura para prever a propagação de uma fenda:

- Critério 1: baseado na taxa de libertação de energia;
- Critério 2: baseado no fator de intensidade de tensão.

Em 1920, Griffith [81] revolucionou o conceito da mecânica da fratura em que recorreu a ensaios experimentais, através de comparações entre os valores teóricos com os valores reais da resistência à rotura e verificou que o diferencial entre eles era devido à existência de fendas nos materiais e que a rotura ocorre na fenda mais crítica [82]. Estabeleceu então que a propagação de um defeito interno ocorre quando a energia disponível na extremidade desse defeito (G – Taxa de Libertação de Energia) e devida à solitação aplicada, iguala a energia necessária para a propagação da fenda (G_c – Taxa Crítica de Libertação de Energia), esta última considerada uma propriedade do material. A equação que traduz a taxa de libertação de energia é dada por [8]:

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA}, \quad (2)$$

em que W é o trabalho realizado pelas forças exteriores, U a energia de deformação interna do sólido e dA a variação de superfície da fenda.

O critério que se baseia no conceito do fator de intensidade de tensão é caracterizado por um fator de escala que define a alteração do estado de tensão na vizinhança da extremidade da fenda. A expressão que define este estado é traduzida por:

$$K = Y\sigma_R \sqrt{\pi a}, \quad (3)$$

em que Y é um fator adimensional que depende da geometria e distribuição de carga e σ_R a tensão remota aplicada.

Quando a tensão atinge o valor crítico, σ_u , obtém-se a Tenacidade à Fratura. A equação que a traduz é definida como:

$$K_c = \sigma_u \sqrt{\pi a} . \quad (4)$$

Qualquer destes critérios subentende a presença de um defeito na zona de colagem. Contudo, em algumas aplicações estruturais a sua localização e o seu tamanho não é tão evidente, o que se traduz numa clara dificuldade de aplicação dos métodos [8, 83].

Na Figura 21 estão representados três modos principais de propagação de fendas. O modo I ou modo de abertura (*opening*) ocorre quando esforços de tração provocam a abertura da fenda. No modo II (*sliding*) as superfícies da fenda têm movimento relativo perpendicular à fenda. No modo III (*tearing*) o movimento é paralelo à frente da fenda [8, 84].

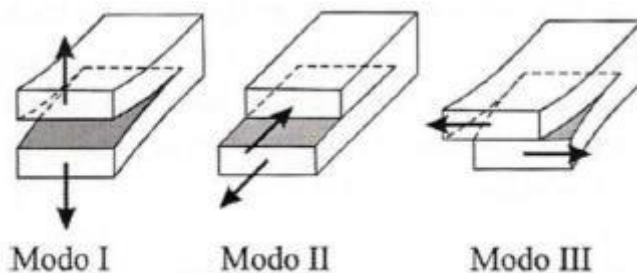


Figura 21 - Modos de rotura [83]

Os esforços na ponta da fenda de uma estrutura ocorrem geralmente como resultado da combinação entre os modos principais. Na Figura 22 são apresentados os diferentes tipos de combinações entre os principais modos de carregamento.

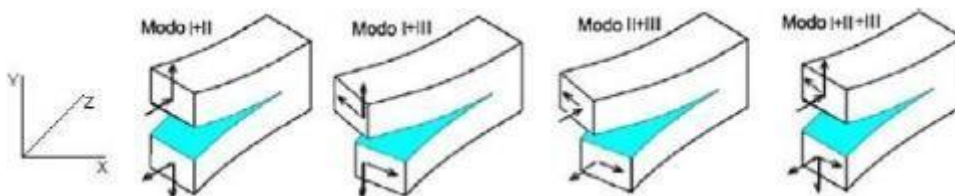


Figura 22 – Combinação entre os principais modos de carregamento [1]

Entre os dois critérios previamente descritos, o critério baseado na taxa crítica de libertação de energia G_c é o mais empregue. Por outro lado, os modos de carregamento mais estudados são o modo puro I e modo puro II. Os ensaios de rotura em ligações adesivas servem para avaliar as propriedades dos adesivos à fratura e posteriormente

efetuar a previsão da resistência de juntas adesivas. Para o estudo destes ensaios recorre-se normalmente aos conceitos da MFLE.

2.4.1 Ensaios em tração (modo I)

O movimento de abertura da fenda na direção perpendicular ao seu plano provocado pelas tensões de tração (Figura 23) nessa direção caracteriza o modo puro I (tração). Este é considerado como o modo mais crítico referente à propagação da fenda. Existem diferentes métodos de ensaio para caracterizar o modo I, porém, o ensaio DCB é considerado o mais prático e simples.

Este ensaio consiste em solicitar a extremidade de um provete que contenha uma pré-fenda, com uma carga P . O valor de P é continuamente registado em função do deslocamento δ , verificado no mesmo ponto. É considerada uma região inicial denominada de fenda inicial, cujo comprimento é definido por a_0 , isenta de adesivo. A velocidade de ensaio está compreendida entre 0,5 e 3 mm/min, sendo que apenas varia conforme as dimensões dos substratos e as características dos materiais a serem ensaiados [8]. O ensaio DCB (Figura 23) está normalizado para a medição de G_{IC} em juntas adesivas (norma D3433-99 [78]) (Figura 24).

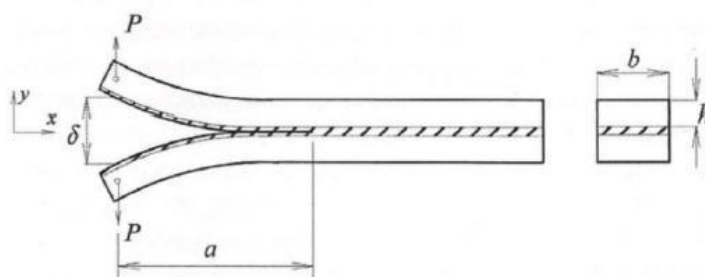


Figura 23 - Representação esquemática do ensaio DCB [8]

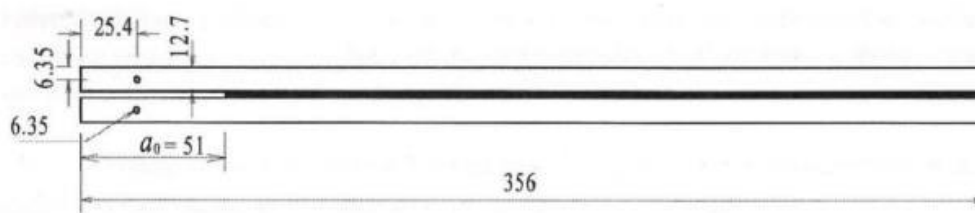


Figura 24 - Geometria do ensaio DCB adotada pela norma ASTM D3433-99 (dimensões em mm) [8]

Segundo a norma ASTM D3433 – 99 os substratos terão de apresentar as dimensões detalhadas na Figura 23. No entanto, a altura mínima dos substratos deve ser definida

para evitar a deformação plástica dos mesmos durante o ensaio. Esta altura é representada pela equação (5):

$$h = \sqrt{\frac{6Ta}{B\sigma_y}}, \quad (5)$$

no qual h é a espessura mínima que o substrato deve ter de forma a que ocorra apenas deformação elástica, T corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda na ligação adesiva, B representa a largura do substrato, a a medição do comprimento da fenda e σ_y corresponde à tensão de cedência do material do substrato [85].

A taxa crítica de libertação de energia de deformação em modo I (G_{Ic}), pode ser determinada pelo *Compliance Calibration Method* (CCM) recorrendo à equação de Irwin- Kies [86]

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da}, \quad (6)$$

sendo C a sua flexibilidade, dada pela relação

$$C = \frac{\delta}{P}. \quad (7)$$

Em juntas adesivas, dependendo do adesivo, a ponta da fenda pode não ser claramente visível. Para ajustar a curva de $C = f(a)$, utiliza-se um polinómio de 3º grau ($C=C_3a^3+C_2a^2+C_1a+C_0$) que conduz a

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2B} (3C_3a^2 + 2C_2a + C_1). \quad (8)$$

Pelo *Corrected Beam Theory* (CBT) G_{Ic} é obtido, ao qual se recorre à Teoria das Vigas Corrigidas [86]

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2B(a+|\Delta|)}, \quad (9)$$

onde Δ é uma correção para a rotação e deslocamento do substrato junto à frente da fenda. Pelo *Compliance-Based Beam Method* (CBBM) o G_{Ic} pode ser obtido a partir da equação (6)

$$G_{Ic} = \frac{6P^2}{B^2h} \left(\frac{2a_{eq}^2}{h^2E_f} + \frac{1}{5G_{13}} \right), \quad (10)$$

em que G_{13} é o módulo de elasticidade ao corte do material, E_f o módulo de flexão e a_{eq} o comprimento de fenda equivalente.

2.4.2 Ensaios em corte (modo II)

O modo puro II é definido como o modo deslizante devido ao corte, no qual as superfícies da fenda se deslocam uma sobre a outra, perpendicularmente à frente da fenda (Figura 21). Atualmente, não existe um consenso quanto à definição da fratura em modo II de juntas adesivas. No entanto, existem vários tipos de ensaios para determinar G_{IIC} , das quais se destacam os ensaios ENF, ELS e 4ENF [8]. A difícil medição do comprimento da fenda em modo II é apresentada como um dos obstáculos que habitualmente se encontra. A propagação da fenda dá-se de uma forma algo complexa, o que traduz alguma incerteza na medição experimental do seu comprimento [87].

Devido à simplicidade de fabrico e de condições de ensaio, o ensaio ENF (Figura 25) é atualmente o mais usado [8]. Este ensaio consiste na utilização de um provete com espessura constante, simplesmente apoiado nas extremidades, sujeito a uma carga P a meio vão e a uma velocidade constante, onde num dos lados é criada uma pré-fenda. O carregamento irá originar a propagação da fenda, em que é registada a carga P e o comprimento da fenda a em intervalos de tempo constantes. Devido à instabilidade na propagação da fenda, este ensaio requer uma relação $a_0/L > 0,7$ [88]. É um ensaio utilizado regularmente para a determinação de G_{IIC} .

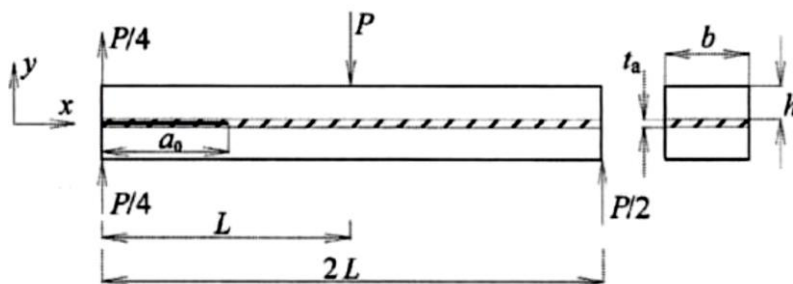


Figura 25 - Representação esquemática do ensaio ENF [8]

Pelo método CCM, G_{IIC} pode ser definido pela expressão:

$$G_{IIC} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (11)$$

Pela *Direct Beam Theory* (DBT) pode escrever-se:

$$G_{IIC} = \frac{9P\delta a^2}{2B(2L^3 + 3a^3)}, \quad (12)$$

em que L é o comprimento de metade da amostra. Pelo método CBT tem-se que:

$$G_{IIC} = \frac{9(a + 0.42\Delta_f)^2 P^2}{16B^2 h^3 E_1}, \quad (13)$$

onde E_1 é o módulo axial e Δ_f a correção do comprimento de fenda. Pelo CBBM, GIIC para o ensaio ENF é dado pela seguinte equação:

$$G_{IIC} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16B^2 E_1 h^3}. \quad (14)$$

2.4.3 Ensaios em solitação combinada (modos I + II)

Tipicamente, as juntas adesivas estão sujeitas em simultâneo a vários modos de carregamento sendo que o modo I e modo II são os mais frequentes na prática. Existe, portanto, interesse na determinação da resistência das juntas adesivas em modo misto (combinação de tração e corte). Assim sendo, a caracterização de um material sob solitações em modo misto I+II pode ser efetuada recorrendo a vários ensaios [8].

Na Tabela 4 está presente a representação esquemática dos ensaios mais representativos para a caracterização à fratura de juntas adesivas em modo misto (c representa a flexibilidade, dada por δ/P).

A caracterização à fratura em modo misto (I+II) fica dependente da definição do grau de rácio de modos, ϕ , útil para caracterizar a fratura em problemas planos, dado pela equação (15)

$$\phi = \tan^{-1} \sqrt{\frac{G_{II}}{G_I}}. \quad (15)$$

Embora o teste MMB permita variar o parâmetro ϕ , é um teste que requer uma configuração complexa. O ADCB também permite alguma variação do parâmetro ϕ , contudo na região de fratura assemelha-se ao modo puro I. Os testes como CLS, FRMM e SLB conseguem promover valores de modo misto intermédios. O teste SLB apresenta uma excelente relação entre a sua simplicidade e equilíbrio entre as energias dissipadas nos dois modos [89]. As principais diferenças entre os ensaios residem nas montagens experimentais, entre as diferentes combinações de modo I e modo II, que são geralmente calculadas pela relação G_{II}/G_I ou pelo parâmetro ϕ e ainda pela possibilidade de ajuste da contribuição de cada um dos modos.

Tabela 4 - Representação esquemática dos ensaios para a caracterização à fratura de juntas adesivas em modo misto

| Tipo de ensaio | Representação esquemática | Grau de rácio de modos, ϕ (°) |
|--|---------------------------|------------------------------------|
| <i>Asymmetric Double-Cantilever Beam (ADCB)</i> | | 0-34 |
| <i>Single-Leg Bending (SLB)</i> | | 41 |
| <i>Cracked-Lap Shear (CLS)</i> | | 49 |
| <i>Asymmetric-Tapered Double-Cantilever Beam (ATDCB)</i> | | 20 |
| <i>Mixed-Mode Bending (MMB)</i> | | $\phi = f(c)$ |
| <i>Fixed Ratio Mixed-Mode (FRMM)</i> | | 41 |

Nos materiais homogêneos e isotrópicos as fendas têm tendência a propagar-se em modo I, perpendicularmente à direção da tensão principal máxima, independentemente da orientação da fenda original. Porém, numa junta adesiva a direção de propagação da fenda, devido às restrições impostas pelos substratos, origina na globalidade das situações uma propagação de modo misto (I + II) [8]. Assim sendo, é fundamental usar critérios energéticos adequados para combinação de modos, que geralmente aparecem na seguinte forma [90]

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^A + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^B = 1. \quad (16)$$

O critério linear ($A=B=1$) e o quadrático ($A=B=2$) são os mais usados.

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Determinação experimental das leis coesivas

Na presente dissertação/tese é proposto um estudo numérico, pelo Método de Elementos Finitos, de comparação dos ensaios DCB e ENF para determinação de G_{IC} e G_{IIC} . Sendo este estudo apenas focado na análise numérica e recorrendo a dados experimentais já existentes para comparação de resultados, a fase experimental aqui descrita é referente a um trabalho realizado anteriormente [91]. No entanto, todo o tratamento dos dados experimentais e respetiva análise foram realizados no âmbito da presente tese. Aqui serão apresentados todos os dados registados em toda a fase experimental, bem como os materiais utilizados, fabrico dos provetes DCB e ENF e o ensaio desses mesmos provetes.

3.1.1 Materiais utilizados

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

3.1.1.1 Substratos

O material usado como substrato em todas as juntas consiste na liga de alumínio AL6082-T651. Esta liga de alumínio é obtida através de envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C. A sua seleção deveu-se não só às boas propriedades mecânicas, mas também ao amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada. Esta liga de alumínio foi caracterizada em trabalhos anteriores [90], onde foram definidas as seguintes propriedades: resistência à tração de 324,00±0,16 MPa, módulo de Young (E) de 70,07±0,83 GPa, tensão de cedência à tração de 261,67±7,65 MPa e deformação de rotura à tração de 21,70±4,24%.

As curvas tensão-deformação (σ - ϵ) dos substratos de alumínio foram obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [65], e encontram-se representadas na Figura 26. Também está representada a aproximação numérica usada nos MDC.

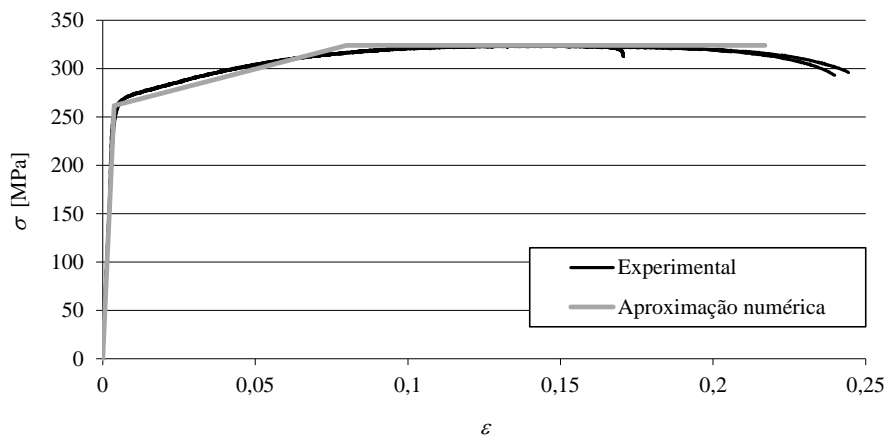


Figura 26 - Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AL6082-T651 [65]

3.1.1.2 Adesivos

Neste tópico descrevem-se os adesivos usados no trabalho experimental e suas propriedades. Nos ensaios efetuados usaram-se três tipos de adesivos: o Araldite® AV138, que se caracteriza por ser um adesivo epóxico frágil, o Araldite® 2015, definido como sendo um adesivo epóxico dúctil, e o adesivo Sikaforce® 7752, que se caracteriza como um adesivo poliuretano estrutural que combina elevada ductilidade com resistência mecânica moderada.

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 descreve-se como um adesivo epóxico frágil, mas de elevada resistência, adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [92].

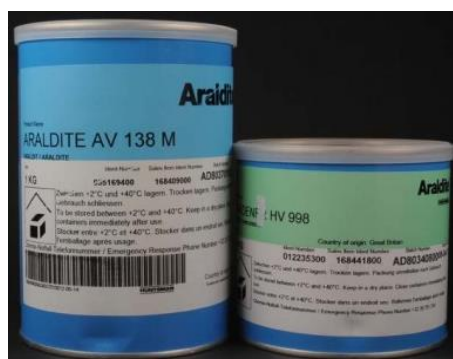


Figura 27 - Modo de fornecimento da resina Araldite® AV 138 e endurecedor HV 998 [93]

As curvas σ - ϵ dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 28 [92]. Na Tabela 5 visualizam-se as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

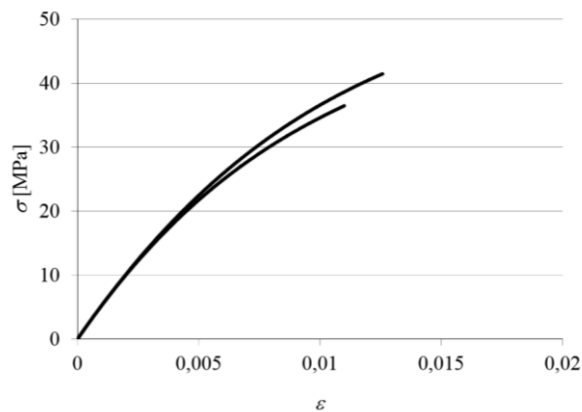


Figura 28 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [94]

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [95]

| Propriedades | Araldite® AV138 |
|--|-------------------|
| Módulo de Young, E [GPa] | 4,89±0,81 |
| Coefficiente de Poisson, ν | 0,35 ^b |
| Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa] | 36,49±2,47 |
| Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa] | 39,45±3,18 |
| Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%] | 1,21±0,10 |
| Módulo de elasticidade ao corte, G [GPa] | 1,56±0,01 |
| Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa] | 25,1±0,33 |
| Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa] | 30,2±0,40 |
| Deformação de rotura ao corte, γ_f [%] | 7,8±0,7 |
| Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm] | 0,20 ^a |
| Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm] | 0,38 ^a |
| ^a valores estimados na referência [96]. | |
| ^b valor do fabricante. | |

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 (Figura 29) define-se como um adesivo epóxico estrutural de duas partes, de ductilidade moderada e que, comparando com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração, tipicamente nas extremidades das juntas, devido à existência de assimetria da junta e ao efeito de deformação diferencial dos substratos [95].



Figura 29 - Modo de fornecimento do adesivo Araldite® 2015 [97]

Na Figura 30 apresentam-se as curvas σ - ϵ dos provetes maciços para este adesivo [94]. Na Tabela 6 estão apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo. Comparando os valores deste adesivo com o Araldite® AV138, verifica-se que a deformação de rotura ao corte é quase seis vezes superior. Por outro lado, a tensão de rotura ao corte e à tração do Araldite® AV138 é praticamente o dobro da do Araldite® 2015.

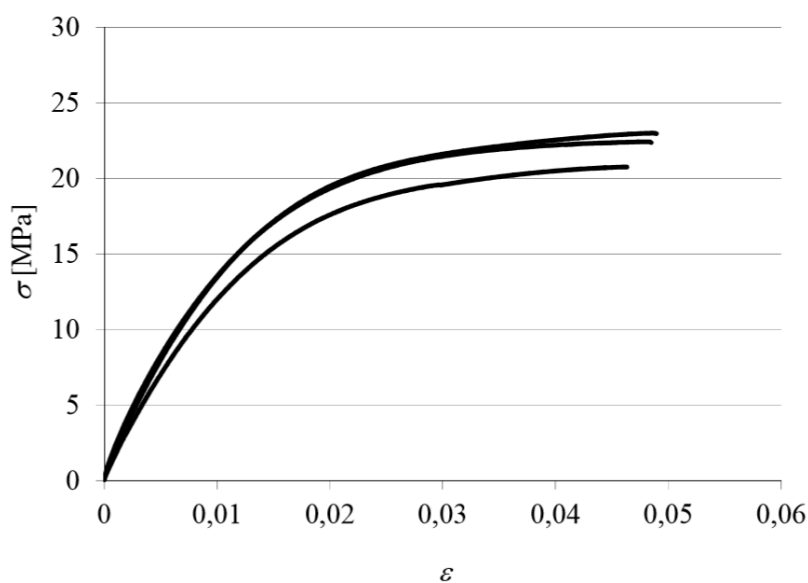


Figura 30 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [85]

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [84].

| Propriedades | Araldite® 2015 |
|---|-----------------------|
| Módulo de Young, E [GPa] | 1,85±0,21 |
| Coefficiente de Poisson, ν | 0,33 ^a |
| Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa] | 12,63±0,61 |
| Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa] | 21,63±1,61 |
| Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%] | 4,77±0,15 |
| Módulo de elasticidade ao corte, G [GPa] | 0,56±0,21 |
| Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa] | 14,6±1,3 |
| Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa] | 17,9±1,8 |
| Deformação de rotura ao corte, γ_f [%] | 43,9±3,4 |
| Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm] | 0,43±0,02 |
| Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm] | 4,70±0,34 |
| ^a valor do fabricante. | |

3.1.1.2.3 Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 (Figura 31) é um adesivo dúctil, conforme se pode observar na curva σ - ϵ da Figura 32 [98]. Comparativamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, o SikaForce® 7752 é o que apresenta a menor resistência ao corte e tração dos três adesivos, no entanto é o mais dúctil do conjunto.



Figura 31 - Modo de fornecimento do adesivo SikaForce® 7752 [99]

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. Na Tabela 7 apresentam-se as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo [98].

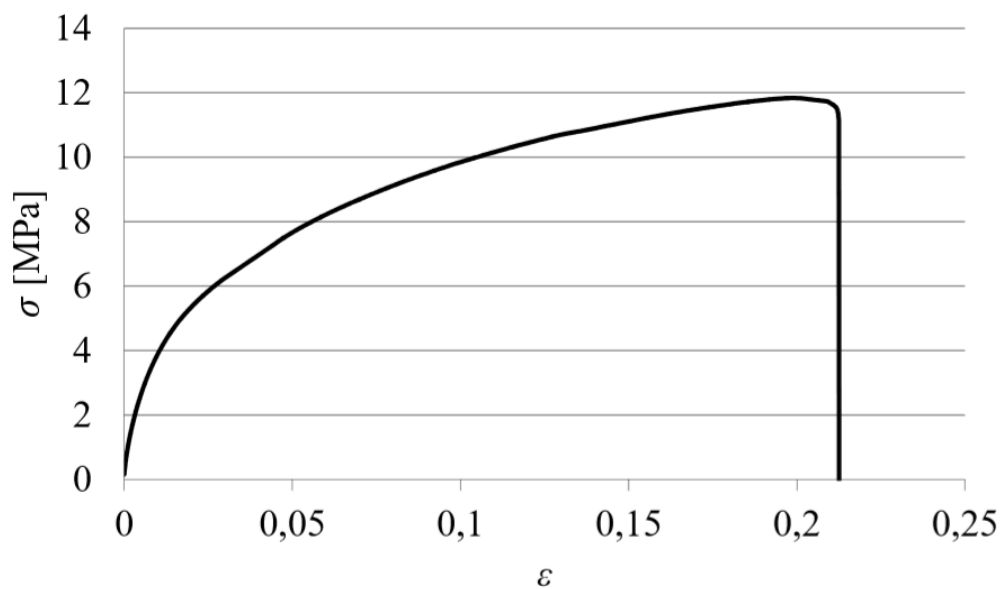


Figura 32 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Sikaforce® 7752 [98]

Tabela 7 - Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce® 7752 [98]

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

Em função das propriedades obtidas, é expectável que a resistência de juntas adesivas com este adesivo seja elevada, pois este adesivo combina uma resistência muito aceitável com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Assim, são permitidas tensões elevadas na camada de adesivo, bem como um efeito acentuado de plastificação sem rotura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência [100].

3.1.2 Geometria das juntas

3.1.2.1 Provetes DCB

A Figura 33 mostra a geometria característica de um provete para um ensaio DCB [86].

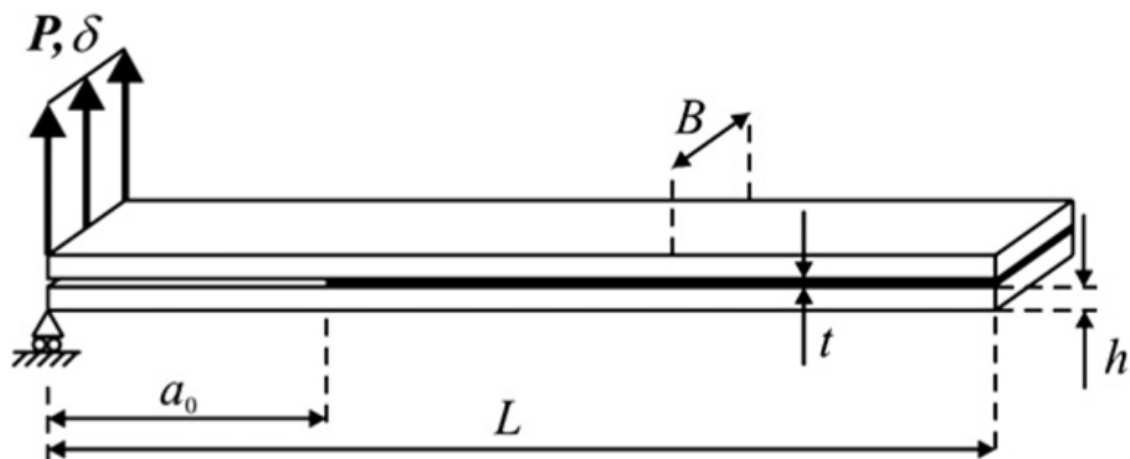


Figura 33 - Representação esquemática de um ensaio DCB [86]

Os parâmetros geométricos relevantes são os seguintes:

- a_0 - Comprimento de pré-fenda inicial [mm];
- L - Comprimento total do provete [mm];
- h - Espessura do substrato [mm];
- t - Espessura do adesivo [mm];
- P - Carregamento [N];
- δ - Deslocamento [mm];
- B - Largura do substrato [mm].

Os substratos foram produzidos a partir de uma chapa laminada de 2000×1000×3 (dimensões em mm) de liga de alumínio AW6082-T651. Essa liga de alumínio foi cortada em tiras com uma largura de 27 mm e, posteriormente cortadas a um comprimento de 143 mm. Esta operação foi realizada pelo fornecedor da chapa (Lanema). Relativamente às dimensões utilizadas nos provetes, a Tabela 8 indica as dimensões dos provetes utilizados no ensaio DCB.

Tabela 8 - Dimensões dos provetes DCB [1, 101]

| Adesivo | Provete | Comprimento | Largura | Espessura | Pré-fenda |
|--------------------|---------|---------------|-------------|-----------|------------|
| | | L [mm] | B [mm] | h [mm] | a_0 [mm] |
| Araldite® AV138 | A_1 | 143,06/143,03 | 27,05/26,94 | 3,03/3,03 | 49,35 |
| | A_2 | 143,06/143,08 | 26,81/26,55 | 3,02/3,01 | 47,26 |
| | A_3 | 143,07/143,13 | 26,89/26,77 | 3,06/3,01 | 46,43 |
| | A_4 | 143,03/143,34 | 26,93/26,90 | 3,01/3,02 | 47,84 |
| | A_5 | 143,06/143,13 | 26,91/26,95 | 3,02/3,03 | 45,89 |
| | A_6 | 143,19/143,08 | 26,90/27,05 | 3,01/3,04 | 46,89 |
| Araldite® 2015 | B_1 | 143,06/143,02 | 27,02/26,73 | 3,06/3,06 | 46,48 |
| | B_2 | 143,07/143,13 | 26,82/26,81 | 3,01/3,03 | 47,35 |
| | B_3 | 143,12/143,12 | 26,91/26,88 | 3,03/3,00 | 47,40 |
| | B_4 | 143,02/143,11 | 26,89/26,86 | 3,02/3,04 | 46,37 |
| | B_5 | 143,10/143,00 | 26,98/27,02 | 3,01/3,02 | 46,92 |
| | B_6 | 143,04/143,04 | 27,03/26,86 | 3,03/3,00 | 46,06 |
| SikaForce® 7752 | C_1 | | | | 54,26 |
| | C_2 | | | | 55,63 |
| | C_3 | 143 | 27 | 2,9 | 57,05 |
| | C_4 | | | | 55,09 |
| | C_5 | | | | 55,11 |
| | C_6 | | | | 55,39 |

3.1.2.2 Provetes ENF

A Figura 34 mostra a geometria característica de um provete para ensaio ENF, sendo definida pelos parâmetros que se seguem [83]:

- a_0 - Comprimento de pré-fenda inicial [mm];
- L - Distância entre punção de carga e rolete de apoio [mm];
- h - Espessura do substrato [mm];
- t - Espessura do adesivo [mm];
- P - Carregamento [N];
- δ - Deslocamento [mm];
- B - Largura do substrato [mm].

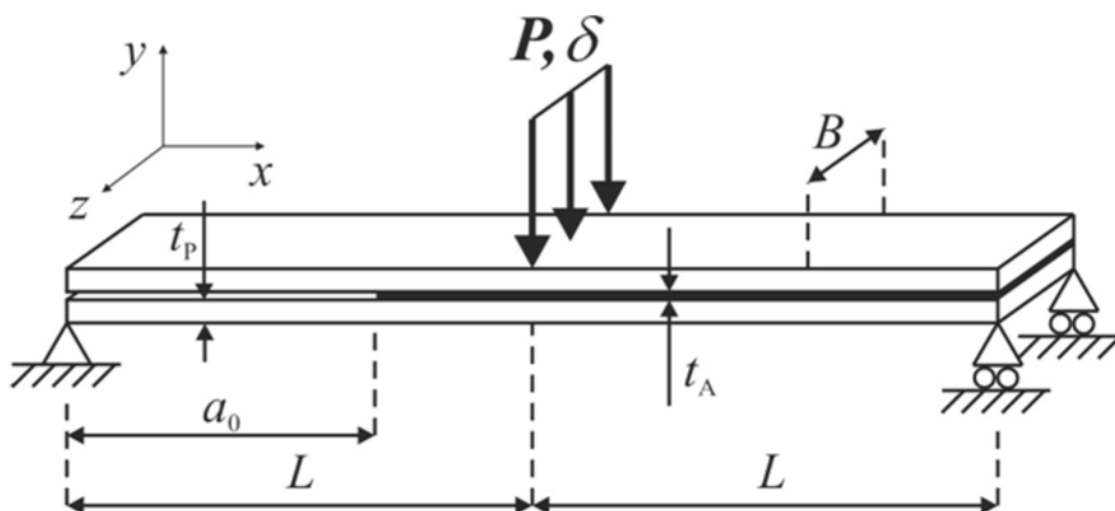


Figura 34 - Representação esquemática de um ensaio ENF [83]

Foram utilizados substratos da liga de alumínio AW6082-T651. Estes foram fabricados a partir de chapa de 3 mm de espessura, adquiridos em tiras de 27 mm de largura ao fornecedor Lanema. Posteriormente, a partir das tiras foram cortados 48 substratos com um comprimento de $230 \pm 0,5$ mm. Na Tabela 9 estão representadas as principais dimensões dos substratos.

Tabela 9 - Dimensões dos provetes ENF [3]

| Adesivo | Provete | Comprimento L [mm] | Largura B [mm] | Espessura h [mm] | Pré-fenda a₀ [mm] |
|--------------------|----------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---|
| Araldite® AV138 | A_1 | 230 ± 0,5 | 25 ± 0,05 | 3 ± 0,05 | 65,90 |
| | A_2 | | | | 51,65 |
| | A_3 | | | | 50,60 |
| | A_4 | | | | 84,80 |
| | A_5 | | | | 66,10 |
| | A_6 | | | | 64,15 |
| | A_7 | | | | 67,80 |
| | A_8 | | | | 66,15 |
| Araldite® 2015 | B_1 | 230 ± 0,5 | 25 ± 0,05 | 3 ± 0,05 | 48,84 |
| | B_2 | | | | 53,87 |
| | B_3 | | | | 51,60 |
| | B_4 | | | | 48,46 |
| | B_5 | | | | 49,67 |
| | B_6 | | | | 48,93 |
| | B_7 | | | | 52,19 |
| | B_8 | | | | 21,22 |
| SikaForce® 7752 | C_1 | 230 ± 0,5 | 25 ± 0,05 | 3 ± 0,05 | 49,92 |
| | C_2 | | | | 60,13 |
| | C_3 | | | | 58,02 |
| | C_4 | | | | 58,84 |
| | C_5 | | | | 53,31 |
| | C_6 | | | | 51,49 |
| | C_7 | | | | 54,53 |
| | C_8 | | | | 55,97 |

3.1.3 Processo de fabrico

Tal como já fora dito anteriormente, os substratos foram fabricados a partir de uma chapa laminada de 2000×1000×3 (dimensões em mm) de liga de alumínio AW6082-T651, que foi cortada em tiras com uma largura de 27 mm, posteriormente cortadas a um comprimento de 143 mm. Seguidamente, foram desengordurados com acetona. Posteriormente, procedeu-se à granalhagem a seco com óxido de alumínio, um abrasivo em pó com alto poder de limpeza, elevada tenacidade e dureza. A granalhagem foi executada no Laboratório de Ensaios Tecnológicos do ISEP numa máquina CIDBLAST RT6S (Figura 35). De forma a garantir 1 mm de espessura de adesivo ao longo dos provetes, foram utilizados calços calibrados na extremidade colada dos provetes e na zona da pré-fenda, tal como é possível verificar na Figura 36. O calço utilizado na extremidade colada dos provetes foi uma fita de aço calibrada com espessura de 1 mm e a largura do provete. O outro calço permite não só garantir o valor de t_A como também criar a pré-fenda do adesivo. Este calço consiste numa lâmina de barbear com 0,1 mm de espessura no meio de duas fitas de aço calibradas com 0,45 mm [1].



Figura 35 - Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S [1]

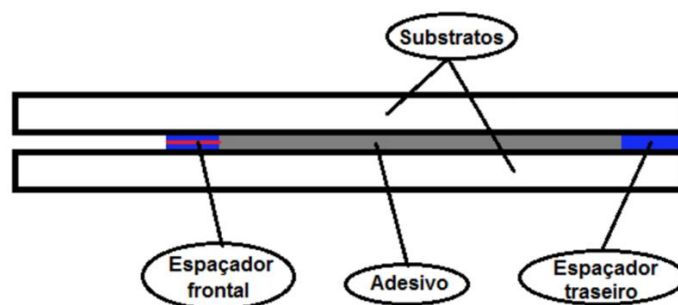


Figura 36 - Representação esquemática da localização dos calços [1]

Depois de garantido o controlo das dimensões de todos os substratos, efetuou-se a preparação das superfícies através de uma decapagem mecânica. Posteriormente foi realizada a devida limpeza de todas as superfícies e identificação dos provetes. A forma escolhida para garantir uma espessura de adesivo constante e a obtenção da pré-fenda inicial consistiu na utilização de fitas de aço calibrado para a produção dos calços (Figura 37) [3].

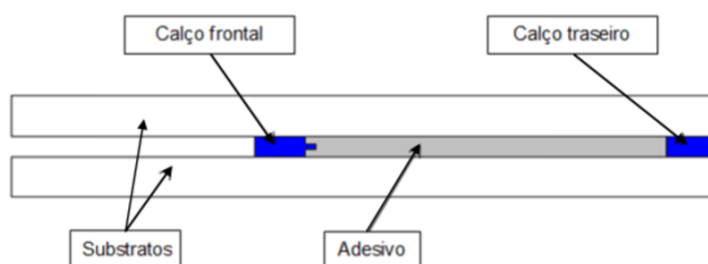


Figura 37 - Representação esquemática da localização dos calços calibrados [3]

Relativamente aos calços traseiros, foi utilizada uma fita de aço calibrado de 0,2 mm de espessura. Na produção do calço frontal, o método seguido foi proposto por Lee et al. [42]. Este método consiste em fabricar um calço composto por uma lâmina de 0,1 mm de espessura intercalada por duas fitas de aço calibrado de 0,05 mm de espessura, com a lâmina ligeiramente adiantada com o objetivo de criar uma pré-fenda no adesivo [3].

Para o adesivo Araldite® 2015 foi utilizada uma pistola manual de mistura e para os adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752 a deposição foi efetuada manualmente com auxílio de espátula após mistura também manual dos dois componentes. O processo de cura decorreu à temperatura ambiente, a cerca de 20° C com os substratos pressionados através da aplicação de grampos de forma garantir a espessura desejada do adesivo (Figura 38) [3].



Figura 38 - Processo de posicionamento durante a cura

Embora o método apresentado seja bastante utilizado na introdução de pré-fendas em juntas adesivas, o facto de a lâmina possuir um raio de curvatura na sua ponta que não pode ser considerado desprezável é uma desvantagem que este método apresenta. De forma a ultrapassar esta limitação, a fenda vai ser ligeiramente propagada de forma manual antes do início do ensaio, ao qual se segue a medição do valor da pré-fenda de forma a serem aplicados os métodos de obtenção de G_{IIc} . Após a cura, os calços foram removidos de todos os provetes. Posteriormente, ocorreu a remoção de dos excessos de adesivo dos bordos dos provetes, tendo sido utilizado um engenho de furar e uma mó em pedra (Figura 39).



Figura 39 - Limpeza dos bordos dos provetes

Terminada a remoção dos excessos de adesivo e com o objetivo de se melhorar a visualização da propagação da fenda, procedeu-se à pintura com tinta de corretor de uma das faces laterais do provete, em que se incidiu sobre a linha do adesivo. Posteriormente provocou-se a propagação da fenda de forma manual. Esta propagação tem como principal objetivo evitar o aumento artificial do valor medido de G_{IIc} no início da propagação, induzido pelo raio da lâmina. Convém dizer que a propagação manual não deve exceder 3 a 4 mm. Após este passo, iniciou-se o posicionamento dos provetes.

3.1.4 Ensaio das juntas

3.1.4.1 Provetes DCB

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente (20°C) numa máquina de ensaios Shimadzu AGX 100 (Figura 40), com uma célula de carga de 100 kN. É importante referir também que todos os ensaios foram efetuados com uma velocidade de solitação de 0,5 mm/min. A gravação dos dados foi realizada a 5 Hz para a carga (P) e deslocamento (δ), registados durante o ensaio, como uma função do tempo decorrido desde a sua

iniciação. Foram tiradas fotos durante o teste dos provetes com 5 segundos de intervalo, usando uma camera digital CANON 70D com uma resolução de 18 megapixel e processador de imagem DIGIC 5, sem zoom e distância focal fixa de aproximadamente 100 mm à face visível dos provetes. A câmara foi posicionada de forma a captar a face lateral do provete desde o início da escala até um comprimento de fenda de aproximadamente 35 mm (Figura 41) [1].



Figura 40 - Máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 [3]

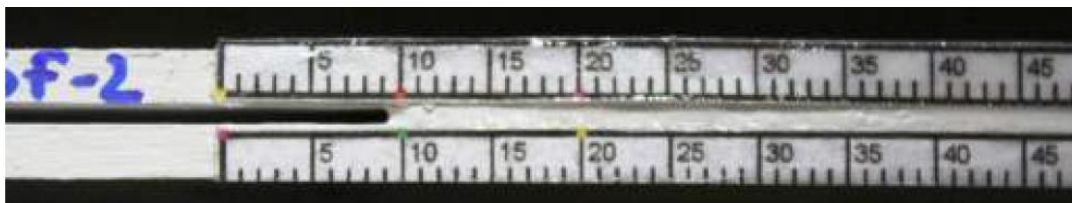


Figura 41 - Face lateral do provete captada pela câmara [1]

3.1.4.2 Provetes ENF

Tal como nos ensaios em provetes DCB, todos os provetes ENF foram sujeitos a carregamento contínuo numa máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100, com uma célula de carga de 100 kN. Porém, enquanto que nos provetes DCB a velocidade de solicitação para os ensaios foi igual para todos os adesivos, nos provetes ENF as velocidades de solicitação variaram consoante os adesivos, isto é, para o adesivo Araldite® AV138 a velocidade foi de 0,75 mm/min, e para os restantes adesivos de 2 mm/min. A monitorização da propagação da fenda foi efetuada com o auxílio de uma câmara de

alta resolução apoiada numa base sólida para gravação de imagens, numa cadência de intervalos de tempo especificados em 5 segundos [3].

3.1.5 Resultados obtidos

Neste capítulo são exibidos os resultados experimentais alcançados, tanto para os provetes DCB como para os provetes ENF. Irá ser feita a apresentação das curvas P - δ , dos valores de G_{IC} e de G_{IIC} obtidos e das leis coesivas em tração e em corte.

3.1.5.1 Provetes DCB

Os resultados que se seguem são divididos em curvas P - δ , discussão de resultados, determinação de G_{IC} e estimativa da lei coesiva em tração.

3.1.5.1.1 Curvas P - δ

3.1.5.1.1.1 Araldite® AV138

Na Figura 42 são apresentadas as curvas P - δ experimentais relativas a cada um dos ensaios realizados com adesivo Araldite® AV138.

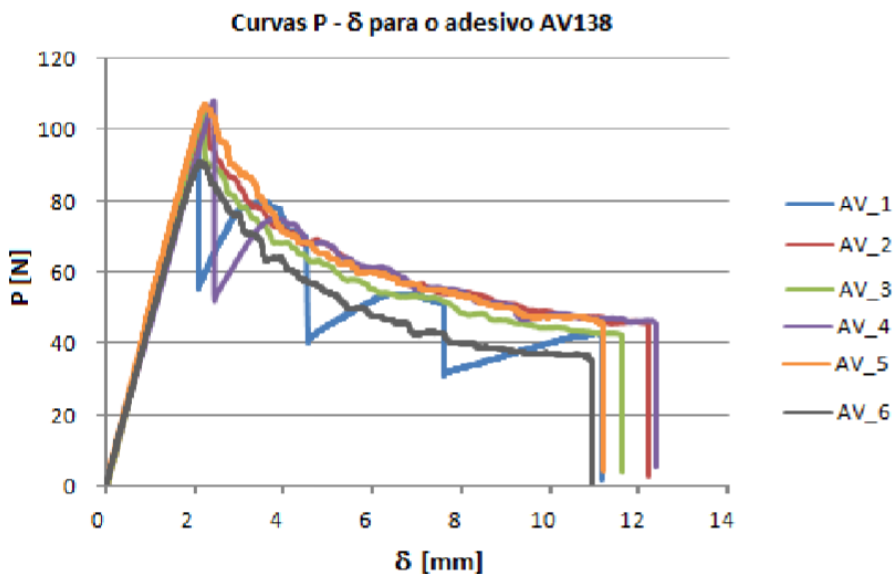


Figura 42 - Evolução das curvas P - δ do adesivo Araldite® AV138 [1]

Tal como se pode ver através de uma breve análise aos gráficos, verifica-se que todas as curvas P - δ apresentam no geral o mesmo comportamento. Porém, os provetes com designação AV_1 e AV_4 apresentam algumas diferenças, já que apresentam quebras abruptas de carga (P) durante a propagação da fenda, representativas da propagação

instável da fenda. Todavia, como estes provetes apresentam também zonas de propagação estável e boa repetibilidade no que diz respeito ao comportamento geral e valores de G_{Ic} obtidos, estes provetes são incluídos na análise de G_{Ic} que se segue. De notar que as curvas $P-\delta$ apresentam também três fases distintas. Na primeira fase observa-se um regime elástico. Esta fase tem um comportamento reversível, em que a relação entre P e δ é linear. Na segunda fase, verifica-se uma perda de linearidade na zona da carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$), correspondente a um processo irreversível. Nesta fase, a energia armazenada do provete atinge o valor crítico, G_{Ic} , que origina o início de propagação da fenda. Já na terceira fase, após $P_{m\acute{a}x}$ ser atingida, verifica-se a propagação idealmente estável da fenda e a força vai diminuindo progressivamente. No final existe uma queda abrupta, originada pela rotura total do provete.

3.1.5.1.1.2 Araldite® 2015

Na Figura 43 são apresentadas as curvas $P-\delta$ experimentais dos provetes DCB com Araldite® 2015, correspondentes a cada um dos ensaios realizados.

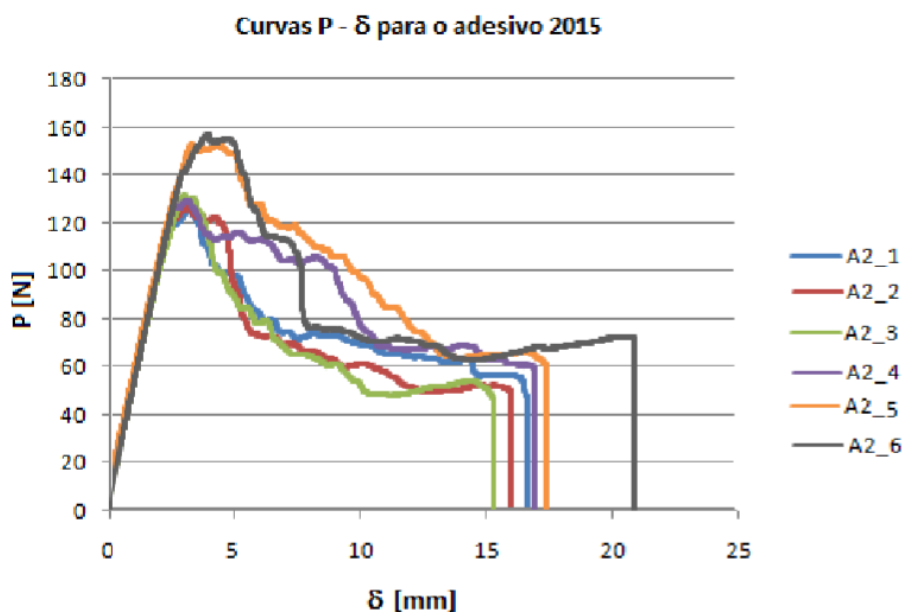


Figura 43 - Evolução das curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® 2015 [1]

Tal como nas curvas $P-\delta$ experimentais dos provetes DCB com dos adesivos Araldite® AV138, pode-se verificar que estas apresentam uma boa repetibilidade respeitante à rigidez elástica (antes da propagação da fenda), $P_{m\acute{a}x}$, comportamento durante a propagação do dano e $\delta_{m\acute{a}x}$. Os gráficos apresentam três fases distintas. Numa primeira fase, que corresponde ao regime elástico, verifica-se que a evolução de P com δ tem um comportamento reversível. A segunda fase corresponde ao início de propagação da fenda. Na zona da $P_{m\acute{a}x}$, a energia armazenada no provete atinge o seu valor crítico, G_{Ic} .

A perda de linearidade verificada é correspondente à formação da Zona de Processo de Fratura (ZPF). A terceira fase desenvolve-se após $P_{máx}$, em que a força aplicada diminui progressivamente, correspondente a uma fase de crescimento de fenda. No final há uma quebra abrupta, motivada pela rotura total do provete. De notar que durante o período de propagação, a curva $P-\delta$ apresenta pequenas oscilações. Pode-se apontar como justificação o aparecimento de micro-fendas consecutivas que se propagam a uma curta distância, causando uma ligeira diminuição da força. Subsequentemente ao aparecimento da nova micro-fenda, ocorre um gradual aumento da força e assim sucessivamente, até à rotura total do provete [1].

3.1.5.1.1.3 Sikaforce® 7752

Na Figura 44 são apresentadas as curvas $P-\delta$ experimentais correspondentes a cada um dos ensaios realizados com adesivo SikaForce® 7752. As curvas revelaram, tal como nos adesivos anteriores, uma boa repetibilidade no que respeita à rigidez elástica, $P_{máx}$ e ainda comportamento durante a propagação do dano. Através da análise das curvas $P-\delta$ é possível verificar três fases distintas. Na primeira fase a evolução de P com δ é linear, com um comportamento claramente reversível, ou seja, o comportamento é elástico. Na segunda fase, um pouco antes da $P_{máx}$, observa-se uma perda de linearidade, correspondente à ocorrência de um processo irreversível no adesivo, nomeadamente formação da ZPF. Na vizinhança de $P_{máx}$, a energia armazenada no provete atinge o seu valor crítico, G_{Ic} , correspondente ao início de propagação da fenda. Após $P_{máx}$ ser atingida, ocorre a terceira fase. Verifica-se a propagação estável da fenda e a força vai diminuindo progressivamente. No final existe uma queda abrupta, originada pela rotura total do provete.

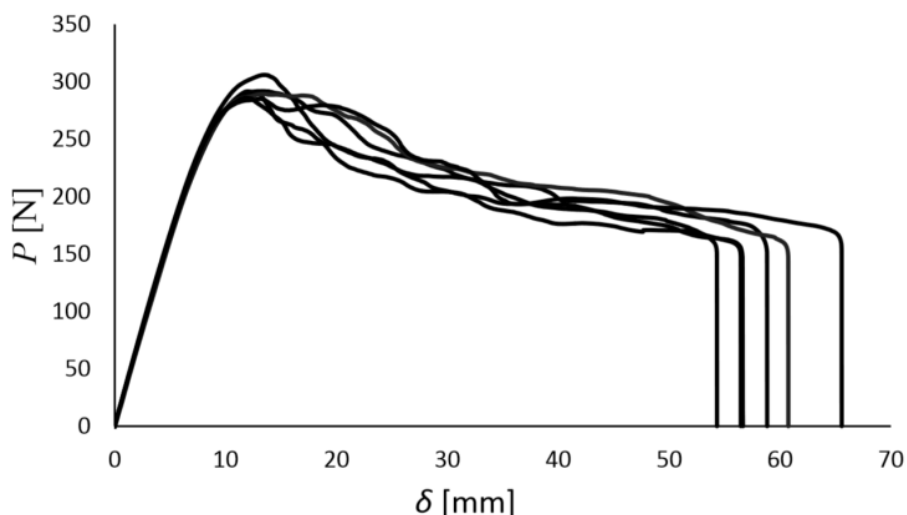


Figura 44 – Evolução das curvas $P-\delta$ do adesivo SikaForce® 7752 [2]

3.1.5.1.2 Discussão de resultados

3.1.5.1.2.1 Araldite® AV138

Na Tabela 10 estão apresentados os dados referentes a $P_{m\acute{a}x}$, $\delta_{Pm\acute{a}x}$ (deslocamento para a carga máxima), deslocamento máximo ($\delta_{m\acute{a}x}$), energia libertada desde o início até à carga máxima ($E_{Pm\acute{a}x}$) e energia libertada desde o início até à rutura ($E_{\delta m\acute{a}x}$). Através de uma pequena análise dos valores de desvio padrão, verifica-se que os dados refletem uma elevada repetibilidade, em especial no $\delta_{Pm\acute{a}x}$. Porém, o parâmetro que resulta num maior desvio padrão é a carga máxima, uma vez que o provete AV_6, em termos percentuais, obteve o maior desvio, cerca de 11,8% em comparação com a média.

Tabela 10 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$, $\delta_{Pm\acute{a}x}$, $\delta_{m\acute{a}x}$, $E_{Pm\acute{a}x}$ e $E_{\delta m\acute{a}x}$ para o adesivo Araldite® AV138 [1]

| Provete | $P_{m\acute{a}x}$ [N] | $\delta_{Pm\acute{a}x}$ [mm] | $\delta_{m\acute{a}x}$ [mm] | $E_{Pm\acute{a}x}$ [J] | $E_{\delta m\acute{a}x}$ [J] |
|----------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------|
| AV_1 | 101,56 | 2,05 | 11,12 | 0,10 | 0,56 |
| AV_2 | 106,16 | 2,23 | 12,16 | 0,10 | 0,75 |
| AV_3 | 105,19 | 2,17 | 11,61 | 0,10 | 0,63 |
| AV_4 | 108,05 | 2,43 | 12,37 | 0,11 | 0,68 |
| AV_5 | 107,19 | 1,49 | 11,19 | 0,17 | 0,66 |
| AV_6 | 90,93 | 2,12 | 10,93 | 0,06 | 0,55 |
| Média | 103,19 | 2,08 | 11,57 | 0,13 | 0,63 |
| Desvio Padrão | 6,41 | 0,31 | 0,59 | 0,01 | 0,06 |

3.1.5.1.2.2 Araldite® 2015

A Tabela 11 apresenta os valores de $P_{m\acute{a}x}$, $\delta_{Pm\acute{a}x}$, $\delta_{m\acute{a}x}$, $E_{Pm\acute{a}x}$ e $E_{\delta m\acute{a}x}$ para os provetes DCB com o adesivo Araldite® 2015. Através da análise dos dados da tabela é possível concluir que existe uma repetibilidade aceitável entre os resultados obtidos para os vários provetes. É importante referir que nenhum provete foi excluído, sendo que todos os valores foram considerados para efeitos de cálculo da média e desvio padrão. No que toca aos dados de $P_{m\acute{a}x}$, os provetes A2_5 e A2_6 destacam-se por apresentarem um valor superior à média de cerca de 10% e 11%, respetivamente. Este desvio leva a que o valor do desvio padrão de $P_{m\acute{a}x}$ seja bastante elevado.

Tabela 11 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$, $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$, $\delta_{m\acute{a}x}$, $E_{P_{m\acute{a}x}}$ e $E_{\delta_{m\acute{a}x}}$ para o adesivo Araldite® 2015 [1]

| Provete | $P_{m\acute{a}x}$ [N] | $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ [mm] | $\delta_{m\acute{a}x}$ [mm] | $E_{P_{m\acute{a}x}}$ [J] | $E_{\delta_{m\acute{a}x}}$ [J] |
|----------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| A2_1 | 126,18 | 2,98 | 16,39 | 0,24 | 1,23 |
| A2_2 | 125,82 | 2,89 | 15,67 | 0,24 | 1,11 |
| A2_3 | 132,35 | 2,72 | 15,05 | 0,22 | 1,06 |
| A2_4 | 129,44 | 2,63 | 16,46 | 0,23 | 1,43 |
| A2_5 | 152,90 | 3,05 | 17,11 | 0,28 | 1,65 |
| A2_6 | 157,64 | 3,44 | 20,39 | 0,34 | 1,78 |
| Média | 137,39 | 2,95 | 16,84 | 0,26 | 1,38 |
| Desvio Padrão | 14,13 | 0,28 | 1,88 | 0,04 | 0,29 |

3.1.5.1.2.3 Sikaforce® 7752

A Tabela 12 apresenta os valores disponíveis para os parâmetros de $P_{m\acute{a}x}$ e $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$. Através da análise dos dados da tabela conclui-se que existe uma boa repetibilidade entre os resultados obtidos para os vários provetes. Nenhum provete foi excluído, pelo que todos os valores foram considerados para efeitos de cálculo da média e desvio padrão. Tanto o parâmetro $P_{m\acute{a}x}$ como $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ não apresentam grandes desvios em relação à média respetiva.

É importante referir que, quando comparados os três adesivos, o SikaForce® 7752 apresenta para $P_{m\acute{a}x}$ valores cerca de 2,8 vezes superiores ao Araldite® AV138 e 2,1 vezes superior ao Araldite® 2015. Relativamente $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$, o Araldite® 2015 é superior 1,3 vezes ao SikaForce® 7752 e 8 vezes superior ao Araldite® AV138.

Tabela 12 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$, $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ para o adesivo SikaForce® 7752

| Provete | $P_{m\acute{a}x}$ [N] | $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ [mm] |
|----------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 1 | 291,627 | 12,038 |
| 2 | 305,978 | 13,514 |
| 3 | 291,820 | 13,055 |
| 4 | 289,288 | 13,297 |
| 5 | 286,063 | 11,870 |
| 6 | 285,047 | 13,159 |
| Média | 291,637 | 12,822 |
| Desvio Padrão | 7,559 | 0,691 |

3.1.5.1.3 Determinação de G_{Ic}

3.1.5.1.3.1 Araldite® AV138

A Figura 45 mostra as curvas-R pelos métodos CCM, CBT e CBBM para um provete dos seis ensaios realizados com o adesivo Araldite® AV138.

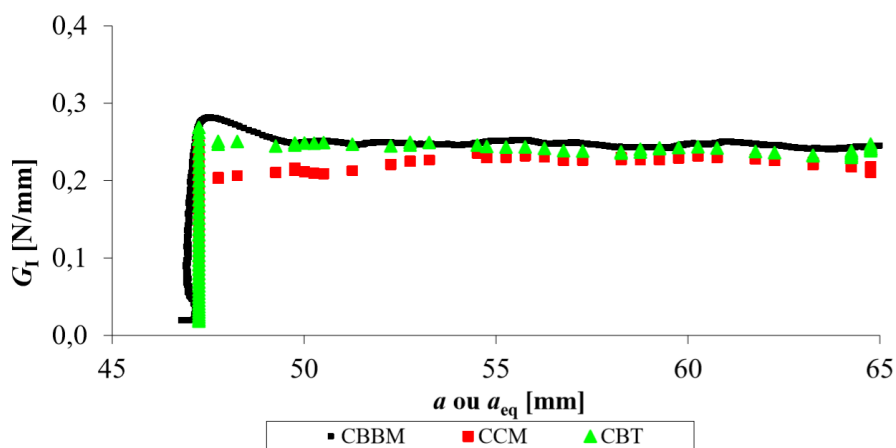


Figura 45 - Curvas-R de um provete DCB com o adesivo Araldite® AV138 [1]

Pode-se verificar que as curvas-R apresentam boa repetibilidade no valor de patamar. Os três métodos preveem a propagação do dano a um valor aproximadamente

constante de G_I ao longo de um comprimento de propagação ligeiramente inferior a 20 mm, sendo G_{Ic} o valor de patamar das curvas.

A Tabela 13 resume os valores de G_{Ic} obtidos através dos quatro métodos de redução considerados. Os resultados mostram que a coerência entre provetes é ótima. Comparando os quatro métodos, observa-se uma diferença aceitável entre cada provete e os valores de desvio padrão para cada método de obtenção de G_{Ic} . Relativamente ao provete AV_4, é de referir que os seus dados não foram considerados nos cálculos de média e desvio padrão para o método CCM. Para o CBBM obteve-se $G_{Ic}=0,249\pm 0,033$ N/mm, para o CCM, $G_{Ic}=0,199\pm 0,012$ N/mm, para o CBT, $G_{Ic}=0,238\pm 0,030$ N/mm e, para o integral-J, $G_{Ic}=0,245\pm 0,045$ N/mm. Claramente o método CCM é o que apresenta o valor de G_{Ic} mais baixo, enquanto os restantes métodos estão muito próximos do método de referência CBBM.

Tabela 13 - Valores de G_{Ic} pelos quatro métodos para o adesivo Araldite® AV138 [1]

| Provete | CBBM [N/mm] | CCM [N/mm] | CBT [N/mm] | Integral-J [N/mm] |
|----------------------|----------------|---------------|---------------|----------------------|
| AV_1 | 0,231 | 0,200 | 0,237 | 0,224 |
| AV_2 | 0,247 | 0,219 | 0,241 | 0,252 |
| AV_3 | 0,234 | 0,193 | 0,215 | 0,231 |
| AV_4 | 0,310 | - | 0,291 | 0,329 |
| AV_5 | 0,254 | 0,189 | 0,237 | 0,237 |
| AV_6 | 0,217 | 0,195 | 0,206 | 0,197 |
| Média | 0,249 | 0,199 | 0,238 | 0,245 |
| Desvio Padrão | 0,033 | 0,012 | 0,030 | 0,045 |

3.1.5.1.3.2 Araldite® 2015

A Figura 46 representa as curvas-R, determinadas pelos métodos CCM, CBT e CBBM, para um dos provetes testados. Estas curvas representam os resultados globais obtidos com o adesivo Araldite® 2015. Pela análise do gráfico verifica-se também neste caso uma boa correspondência entre os três métodos de obtenção de G_{Ic} . Observou-se um crescimento de fenda a G_I aproximadamente constante para todos os métodos e uma repetibilidade no valor de patamar.

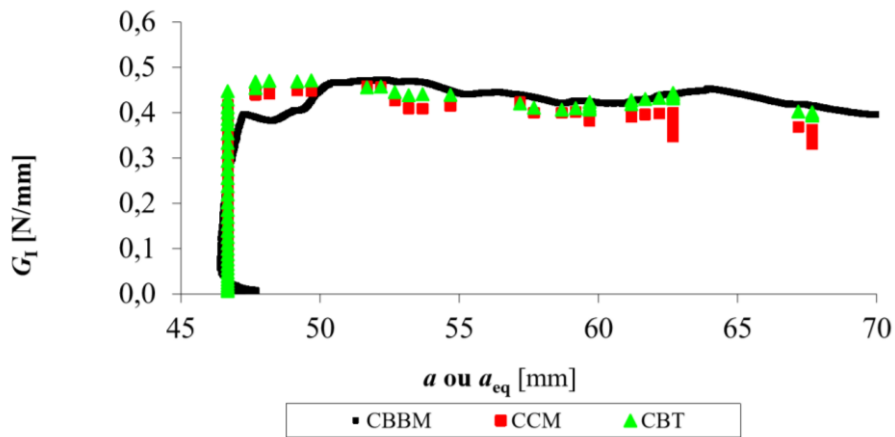


Figura 46 - Curvas-R de um provete DCB com o adesivo Araldite® 2015 [1]

A Tabela 14 apresenta os valores obtidos de G_{Ic} relativos aos ensaios realizados às juntas adesivas com o adesivo Araldite® 2015. Para este adesivo verifica-se uma boa repetibilidade entre provetes. Comparando os quatro métodos, constata-se uma diferença aceitável entre cada provete e os valores de desvio padrão para cada método de obtenção de G_{Ic} . Para o CBBM obteve-se $G_{Ic}=0,539\pm 0,116$ N/mm, para o CCM, $G_{Ic}=0,496\pm 0,110$ N/mm, para o CBT, $G_{Ic}=0,530\pm 0,099$ N/mm, e para o integral-J, $G_{Ic}=0,533\pm 0,123$ N/mm. Também para este adesivo, o método CCM é o que apresenta G_{Ic} mais baixo, enquanto os restantes métodos se encontram muito próximos do CBBM.

Tabela 14 - Valores de G_{Ic} pelos quatro métodos para o adesivo Araldite® 2015 [1]

| Provete | CBBM [N/mm] | CCM [N/mm] | CBT [N/mm] | Integral-J [N/mm] |
|----------------------|----------------|---------------|---------------|----------------------|
| A2_1 | 0,444 | 0,403 | 0,431 | 0,437 |
| A2_2 | 0,467 | 0,387 | 0,484 | 0,434 |
| A2_3 | 0,492 | 0,576 | 0,484 | 0,494 |
| A2_4 | 0,460 | 0,399 | 0,471 | 0,456 |
| A2_5 | 0,709 | 0,590 | 0,676 | 0,665 |
| A2_6 | 0,663 | 0,619 | 0,632 | 0,712 |
| Média | 0,539 | 0,496 | 0,530 | 0,533 |
| Desvio Padrão | 0,116 | 0,110 | 0,099 | 0,123 |

3.1.5.1.3.3 Sikaforce® 7752

Na Figura 47 está representada a curva-R de um provete pelo método CBBM. Para este adesivo, os dados disponíveis apenas contemplam este método de redução de G_{Ic} .

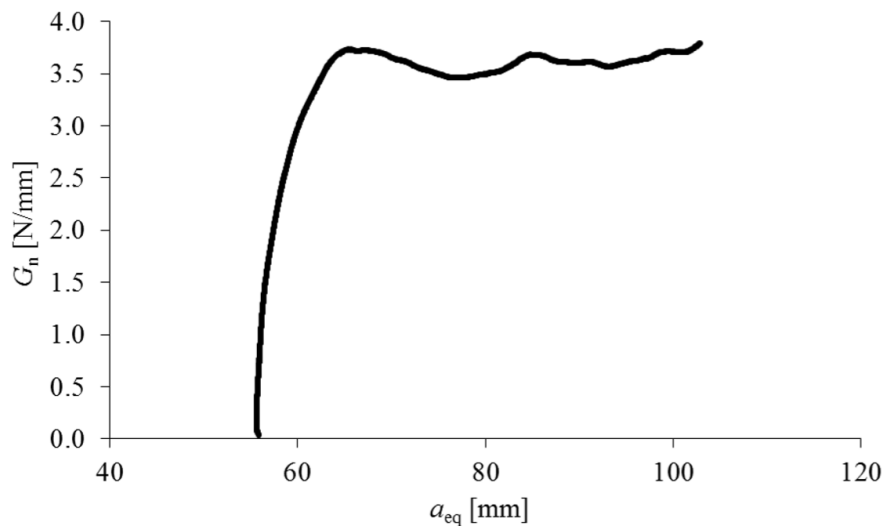


Figura 47 - Curva-R de um provete DCB com o adesivo SikaForce® 7752 [2]

Tabela 15 - Valores de G_{Ic} pelo método CBBM para o adesivo SikaForce® 7752 [2]

| Provete | CBBM [N/mm] |
|----------------------|----------------|
| 1 | 3,420 |
| 2 | 3,900 |
| 3 | 3,840 |
| 4 | 4,000 |
| 5 | 3,400 |
| 6 | 3,650 |
| Média | 3,702 |
| Desvio Padrão | 0,231 |

A Tabela 15 apresenta o resumo dos valores obtidos de G_{Ic} do SikaForce® 7752 obtidos pelo método direto, que foi o único método considerado para este adesivo.

Relativamente ao valor médio de G_{Ic} obtido, os provetes não apresentaram desvios consideráveis, como comprova o valor do desvio padrão.

3.1.5.1.4 Determinação da lei coesiva em tração

Com o objetivo de determinar a lei coesiva representativa do comportamento à tração para cada um dos adesivos testados, foram efetuadas simulações numéricas considerando condições de simulação anunciadas anteriormente.

Desta forma, a validação das leis coesivas triangulares para a modelação da camada de cada adesivo em tração consistiu no ajuste iterativo e comparação das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais, mais concretamente no que toca aos valores de $P_{máx}$, rigidez inicial e comportamento durante a propagação da fenda. Cada ensaio realizado (DCB) foi modelado individualmente pela consideração das dimensões do provete respetivo. Assim, são expostos os resultados para os três adesivos em função dos MDC abordados.

3.1.5.1.4.1 Araldite® AV138

A Tabela 16 apresenta os valores de entrada usados em cada um dos modelos numéricos das juntas DCB unidas com o adesivo Araldite® AV138 em que o procedimento de ajuste permitiu a estimativa de t_n^0 . Em relação aos valores médios registados, G_{Ic} obteve $0,236 \pm 0,021$ N/mm, apresentando um desvio padrão percentual de 9%. Considerou-se assim que este parâmetro apresenta uma repetibilidade aceitável.

Tabela 16 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com adesivo Araldite® AV138

| Proвете | t_n^0 [MPa] | E [MPa] | G_{Ic} [N/mm] |
|---------------|---------------|-----------|-----------------|
| AV_1 | 39,45 | 4890 | 0,24 |
| AV_2 | 39,45 | 4890 | 0,25 |
| AV_3 | 39,45 | 4890 | 0,23 |
| AV_4 | 39,45 | 4890 | 0,27 |
| AV_5 | 39,45 | 4890 | 0,215 |
| AV_6 | 39,45 | 4890 | 0,215 |
| Média | - | - | 0,236 |
| Desvio Padrão | - | - | 0,021 |

A Figura 48 exibe a curva $P-\delta$ experimental e numérica obtida para um provete com adesivo Araldite® AV138, após concluído o ensaio do provete e respetivo procedimento de ajuste numérico. Generalizando, verificou-se que todas as curvas $P-\delta$ apresentam o mesmo comportamento, verificando-se zonas de propagação estável e boa repetibilidade. Assim sendo, através da análise do gráfico, considerou-se que as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente caracterizam bastante bem as curvas experimentais de todos os provetes, pelo que as leis coesivas correspondentes foram consideradas como representativas do comportamento da camada adesiva.

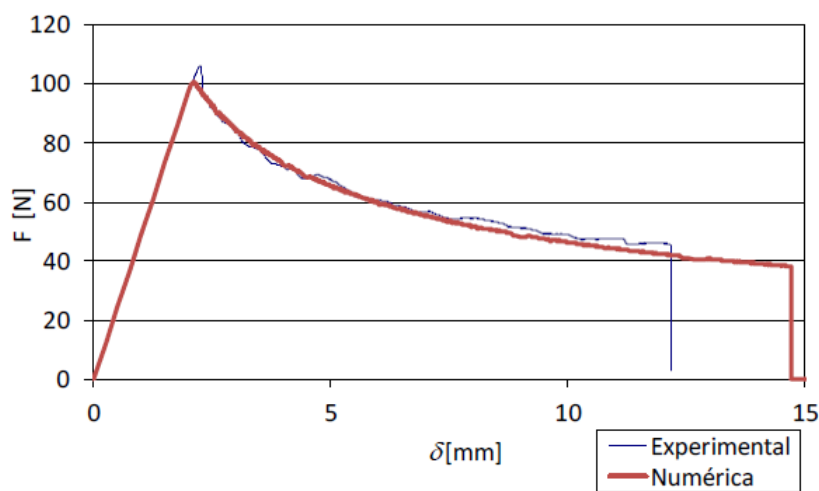


Figura 48 - Comparativo das curvas $P-\delta$ experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete DCB colado com o adesivo Araldite® AV138

Os valores individuais adquiridos de δ_n^0 (deslocamento de carga máxima) e δ_s^f (deslocamento de rotura) estão apresentados na Tabela 17. O valor médio registado do parâmetro δ_s^f foi de $0,0156 \pm 0,0014$ mm, o que corresponde a um desvio percentual de 9%. Considerou-se também que este apresenta uma repetibilidade igualmente aceitável.

A Figura 49 apresenta as leis coesivas triangulares alcançadas para cada um dos provetes, obtidas através do ajuste das seis curvas $P-\delta$ experimentais do adesivo Araldite® AV138. De forma a se obter uma referência na comparação entre amostras, foi considerada uma lei coesiva média, tendo sido obtida a partir das médias de t_n^0 e G_{Ic} para os seis provetes ensaiados. Através de uma análise ao gráfico, é possível observar que as leis apresentam uma boa repetibilidade entre si, dando boas indicações sobre a robustez dos resultados experimentais obtidos e processo iterativo de ajuste.

Tabela 17 - Valores obtidos pela lei coesiva triangular, à tração, do adesivo Araldite® AV138

| Provete | δ_n^0 [mm] | δ_s^f [mm] |
|---------------|-------------------|-------------------|
| AV_1 | 0,003872 | 0,016 |
| AV_2 | 0,003872 | 0,017 |
| AV_3 | 0,003872 | 0,015 |
| AV_4 | 0,003872 | 0,018 |
| AV_5 | 0,003872 | 0,014 |
| AV_6 | 0,003872 | 0,014 |
| Média | - | 0,0156 |
| Desvio Padrão | - | 0,0014 |

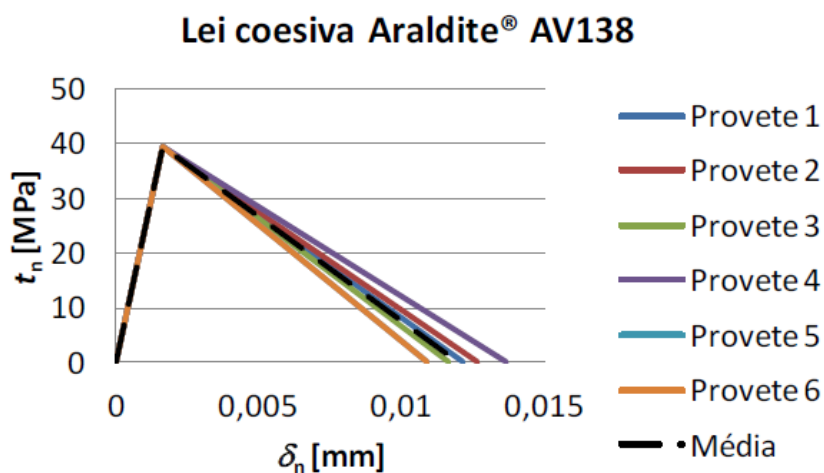


Figura 49 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes DCB colados com o adesivo Araldite® AV 138, e respetiva lei coesiva média

3.1.5.1.4.2 Araldite® 2015

A Tabela 18 apresenta os valores de entrada utilizados em cada um dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com o adesivo Araldite® A2015, em que o procedimento de ajuste permitiu a estimativa de t_n^0 . Para G_{Ic} , como valor médio obteve-se $0,498 \pm 0,107$ N/mm, em que apresenta um desvio padrão percentual de 22%. Apesar de G_{Ic} apresentar um desvio um pouco elevado, devido aos resultados apresentados

pelos provetes A2_5 e A2_6, considerou-se que este parâmetro apresenta uma repetibilidade aceitável.

Tabela 18 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com adesivo Araldite® 2015

| Provete | t_n^0 [MPa] | E [MPa] | G_{ic} [N/mm] |
|----------------------|---------------|-----------|-----------------|
| A2_1 | 21,63 | 1850 | 0,43 |
| A2_2 | 21,63 | 1850 | 0,40 |
| A2_3 | 21,63 | 1850 | 0,40 |
| A2_4 | 21,63 | 1850 | 0,51 |
| A2_5 | 21,63 | 1850 | 0,65 |
| A2_6 | 21,63 | 1850 | 0,60 |
| Média | - | - | 0,498 |
| Desvio Padrão | - | - | 0,107 |

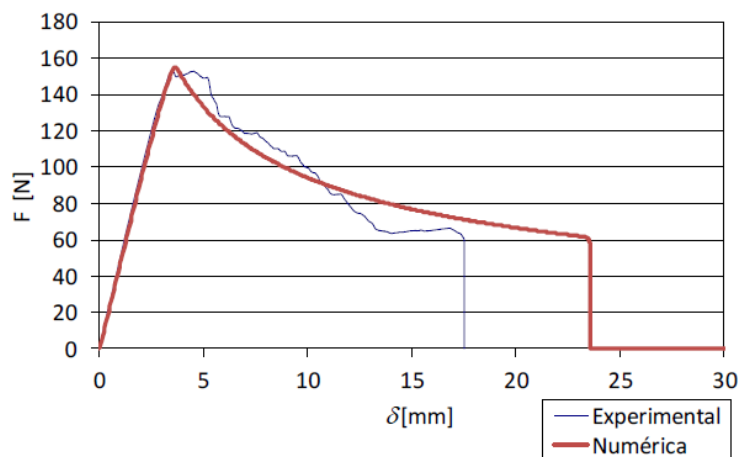


Figura 50 - Comparativo das curvas P - δ experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete DCB colado com o adesivo Araldite® 2015

A Figura 50 apresenta a curva P - δ experimental e numérica obtida para um provete com o adesivo Araldite® 2015. Na maioria dos ensaios, verificou-se uma concordância bastante admissível entre os resultados, bem como no comportamento pós-pico (zona que corresponde à propagação da fenda durante o ensaio). Observa-se assim que as

curvas $P-\delta$ obtidas numericamente reproduzem bastante bem as curvas experimentais de todos os provetes, pelo que se consideram as leis coesivas obtidas adequadas para a simulação do comportamento do adesivo Araldite® 2015 à tração.

Na Tabela 19 são exibidos os valores individuais obtidos para δ_n^0 e δ_s^f . Para o parâmetro δ_s^f registou-se um valor médio e respetivo desvio de $0,055 \pm 0,011$ mm. Estes valores correspondem a um desvio percentual de 22%. Embora estes resultados apresentem desvios com alguma significância, apresentam uma repetibilidade aceitável.

Tabela 19 - Valores obtidos pela lei coesiva triangular, à tração, do adesivo Araldite® 2015

| Provete | δ_n^0 [mm] | δ_s^f [mm] |
|---------------|-------------------|-------------------|
| A2_1 | 0,006393 | 0,048 |
| A2_2 | 0,006393 | 0,045 |
| A2_3 | 0,006393 | 0,045 |
| A2_4 | 0,006393 | 0,057 |
| A2_5 | 0,006393 | 0,073 |
| A2_6 | 0,006393 | 0,067 |
| Média | - | 0,055 |
| Desvio Padrão | - | 0,011 |

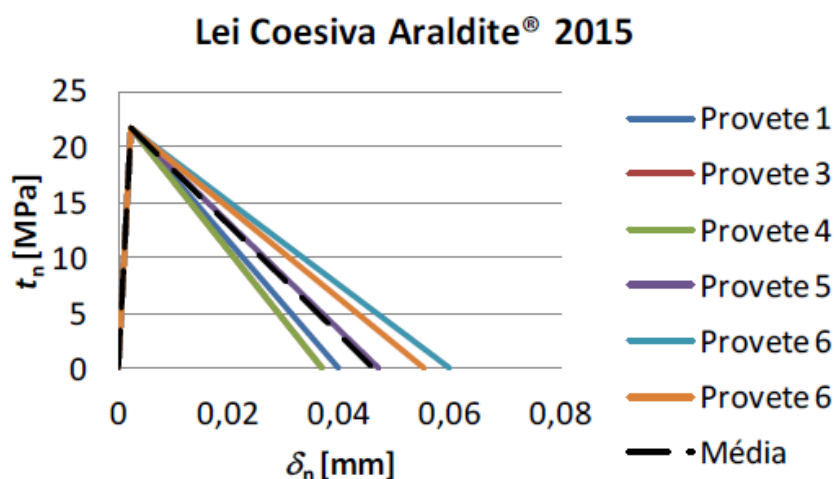


Figura 51 – Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes DCB colados com o adesivo Araldite® 2015, e respetiva lei coesiva média

A Figura 51 apresenta as leis coesivas triangulares para cada um dos provetes. Estas curvas foram obtidas através do ajuste das seis curvas $P-\delta$ experimentais do adesivo Araldite® 2015. Foi considerada uma lei coesiva média, obtida a partir das médias de t_n^0 e G_{Ic} para os seis provetes ensaiados. Observa-se um desvio relativamente reduzido entre as leis coesivas dos diversos provetes.

3.1.5.1.4.3 Sikaforce® 7752

Na Tabela 20 estão apresentados os valores de entrada utilizados em cada um dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com o adesivo SikaForce® 7752 que foram obtidas através do procedimento de ajuste que permitiu a estimativa de t_n^0 . Em relação aos valores médios registados, obteve-se para G_{Ic} o valor de $3,65 \pm 0,310$ N/mm com um desvio percentual de 8%. Considerou-se que este parâmetro apresentou um bom grau de aproximação e é representativo de todos os ensaios.

Tabela 20 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com adesivo SikaForce® 7752

| Proвете | t_n^0 [MPa] | E [MPa] | G_{Ic} [N/mm] |
|---------------|---------------|-----------|-----------------|
| A2_1 | 21,63 | 1850 | 0,43 |
| A2_2 | 21,63 | 1850 | 0,40 |
| A2_3 | 21,63 | 1850 | 0,40 |
| A2_4 | 21,63 | 1850 | 0,51 |
| A2_5 | 21,63 | 1850 | 0,65 |
| A2_6 | 21,63 | 1850 | 0,60 |
| Média | - | - | 0,498 |
| Desvio Padrão | - | - | 0,107 |

A Figura 52 apresenta as curvas $P-\delta$ de um provete representativo de todos os ensaios. Em geral, verificou-se uma previsão por defeito da carga na zona correspondente à propagação da fenda para todos os ensaios. É importante referir que este desvio se deve à modelação de um adesivo de grande ductilidade com uma lei coesiva triangular, que não é a mais adequada para este tipo de adesivo, uma vez que a lei triangular promove uma redução das tensões transmitidas a partir do momento em que a tensão limite é atingida, o que não é coerente com o comportamento típico muito dúctil, em que existe um patamar de tensões após o início da plastificação. Conclui-se assim que as leis

coesivas obtidas não são adequadas para a simulação do comportamento do adesivo SikaForce® 7752 à tração.

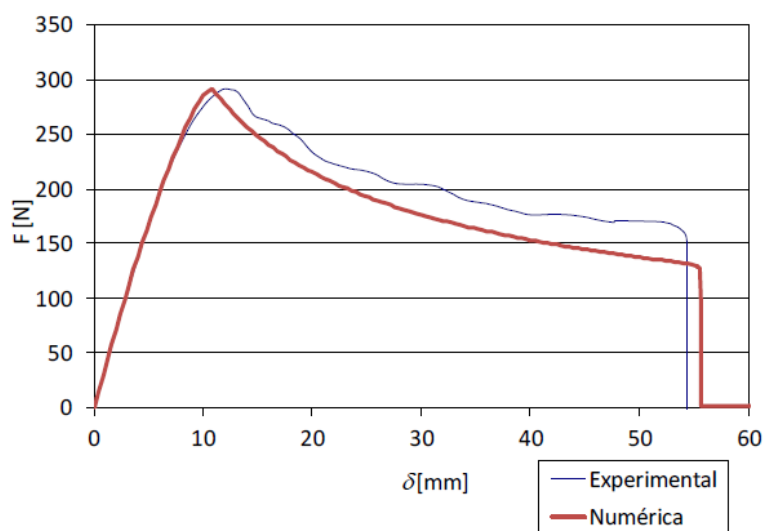


Figura 52 - Comparativo das curvas P- δ experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete DCB colado com o adesivo SikaForce® 7752

Tabela 21 -Valores obtidos pela lei coesiva triangular, à tração, do adesivo SikaForce® 7752

| Provete | δ_n^0 [mm] | δ_s^f [mm] |
|----------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0,010705 | 0,649 |
| 2 | 0,010705 | 0,698 |
| 3 | 0,010705 | 0,708 |
| 4 | 0,010705 | 0,826 |
| 5 | 0,010705 | 0,688 |
| 6 | 0,010705 | 0,747 |
| Média | - | 0,719 |
| Desvio Padrão | - | 0,06 |

Na Tabela 21 são apresentados os valores individuais obtidos para δ_n^0 e δ_s^f . Em relação ao parâmetro δ_s^f , verificou-se um valor médio e respetivo desvio de $0,719 \pm 0,061$ mm, o que corresponde a 8% em termos de desvios percentuais. Porém, apesar destes desvios

apresentarem relativa significância, estes parâmetros apresentam uma boa repetibilidade.

A Figura 87 exhibe as leis coesivas triangulares alcançadas para todos os provetes, obtidas através do acerto das seis curvas P - δ experimentais do adesivo SikaForce® 7752. Foi igualmente considerada uma lei coesiva média, tendo sido calculada a partir das médias de t_n^0 e G_{Ic} para os seis provetes ensaiados. Constata-se um desvio reduzido das leis coesivas entre os vários provetes, o que mostra mais uma vez a repetibilidade dos ensaios realizados.

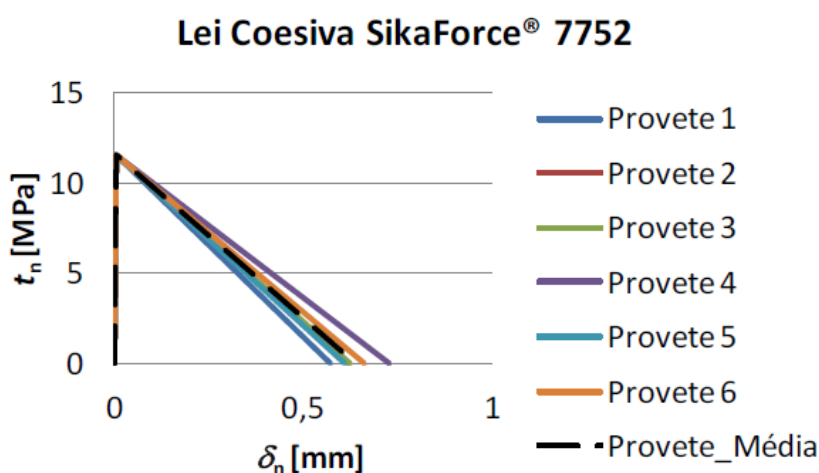


Figura 53 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes DCB colados com o adesivo SikaForce® 7752, e respetiva lei coesiva média

3.1.5.2 Provetes ENF

Os resultados que se seguem são divididos em curvas P - δ , discussão de resultados, determinação de G_{Ic} e estimativa da lei coesiva em corte.

3.1.5.2.1 Curvas P - δ

3.1.5.2.1.1 Araldite® AV138

As curvas P - δ das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 estão representadas na Figura 54. Tal se pode constatar, as curvas P - δ apresentaram um crescimento de rigidez na região inicial dos ensaios e este facto pode ser imputado à flexibilidade da máquina de ensaios. As curvas apresentadas foram corrigidas considerando a rigidez dos provetes na zona intermédia da região elástica antes do início da propagação da fenda [3]. Apesar de terem sido efetuados ensaios em oito provetes, apenas sete foram considerados como válidos. Numa análise aos gráficos, este adesivo mostra um comportamento frágil, uma vez que se verifica uma propagação de fenda abrupta após ser atingido $P_{máx}$. De

seguida P cai abruptamente, o que origina uma propagação rápida da fenda. A repetibilidade das curvas é boa em termos de rigidez dos provetes até à iniciação da fenda. O comportamento durante a propagação foi algo instável, o que se atribui à elevada rigidez e baixa ductilidade do adesivo, que tipicamente conduzem a este comportamento [3].

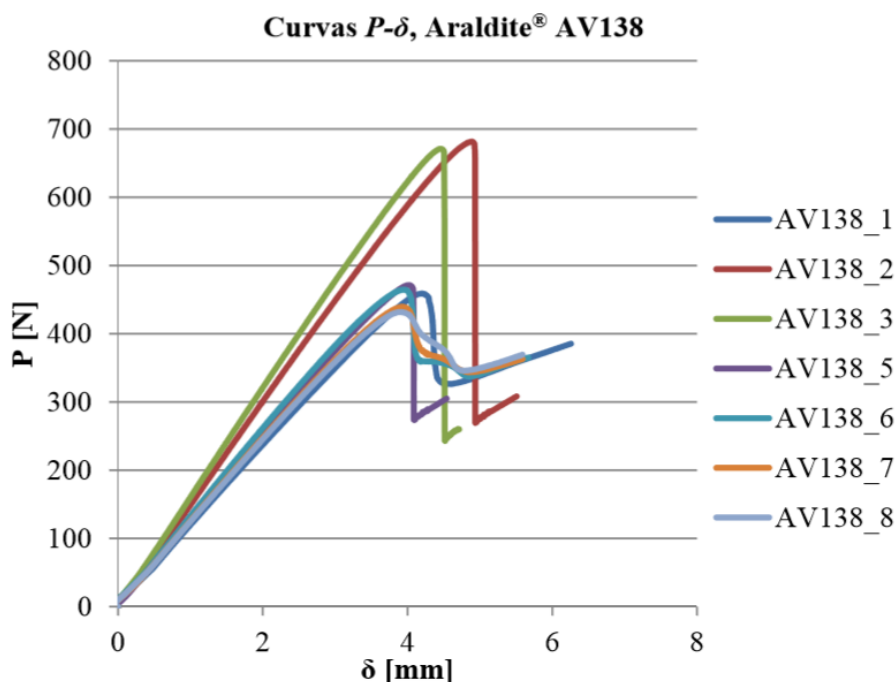
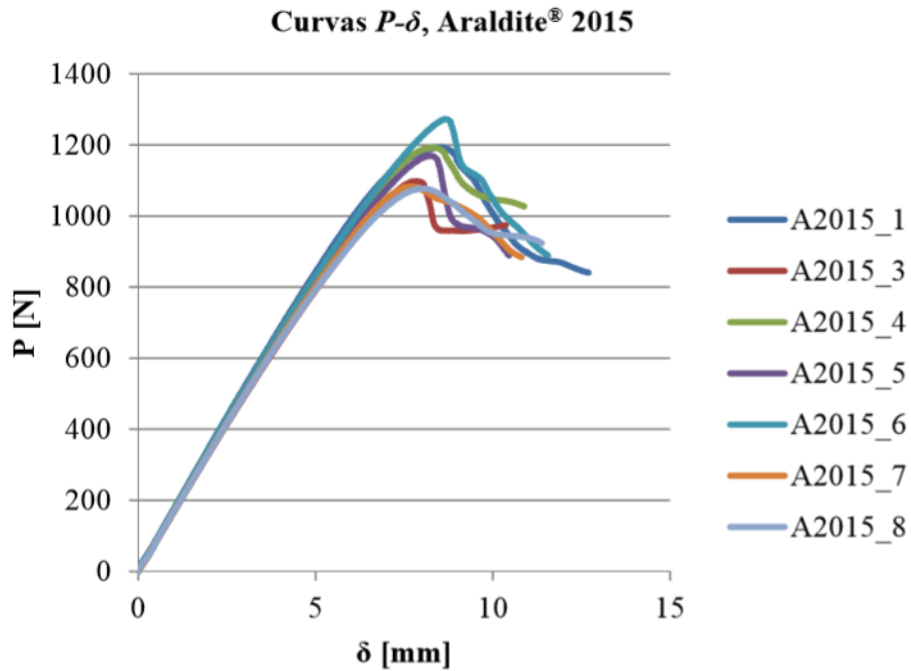


Figura 54 - Curvas P - δ para o Adesivo Araldite® AV138 [3]

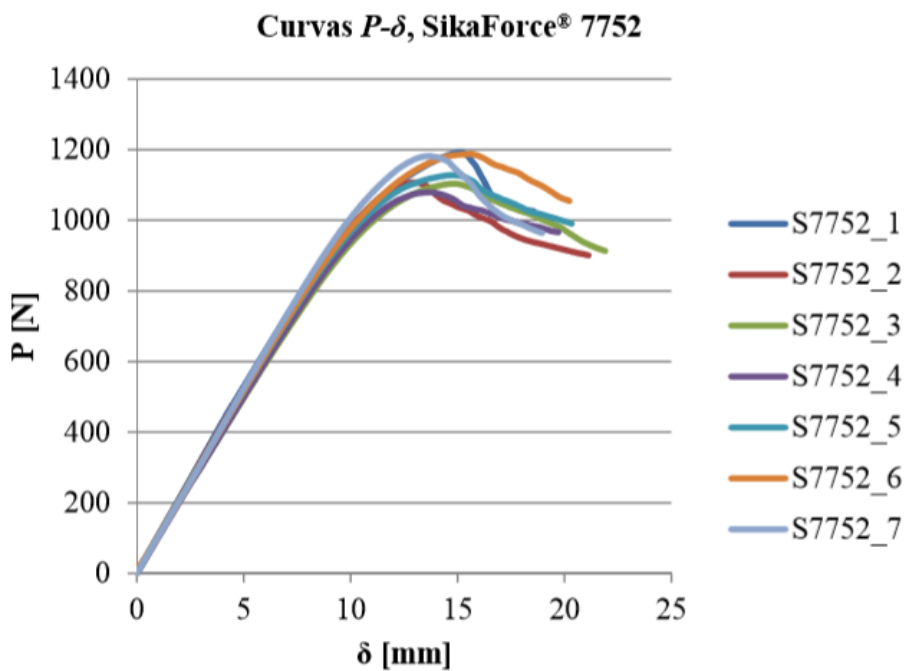
3.1.5.2.1.2 Araldite® 2015

Na Figura 55 estão representadas as curvas P - δ obtidas para os provetes das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015, sendo que apenas sete ensaios foram considerados válidos. Sucintamente, através da análise dos gráficos verifica-se uma grande repetibilidade dos ensaios, nomeadamente rigidez elástica e comportamento durante a propagação da fenda. Conseguiu-se aferir que o adesivo tem um comportamento com alguma ductilidade, já que é possível verificar uma rotura mais suave com valores de deslocamento próximos de 8,3 mm [3]. Na análise das curvas P - δ do adesivo Araldite® 2015, verifica-se que estas apresentam três fases distintas. Na primeira fase, a evolução da carga/deslocamento é linear, e o comportamento é elástico e reversível. Numa segunda fase, antes de se atingir o ponto de carga máxima, nota-se uma perda de linearidade, induzido por a um processo plástico irreversível do adesivo, (formação da ZPF). Na proximidade de $P_{máx}$, a energia armazenada no provete atinge o seu valor crítico, G_{IIC} , correspondente ao início da propagação da fenda. Quando a $P_{máx}$ é atingida, inicia-se uma terceira fase caracterizada pela carga aplicada diminuir gradualmente devido à uma propagação estável da fenda [3].

Figura 55 - Curvas P - δ para o Adesivo Araldite® 2015 [3]

3.1.5.2.1.3 Sikaforce® 7752

A Figura 56 apresenta as curvas P - δ obtidas para os provetes considerados válidos das juntas coladas com o adesivo SikaForce® 7752.

Figura 56 - Curvas P - δ para o Adesivo SikaForce® 7752 L60 [3]

Nesta série de ensaios verificou-se uma boa concordância entre as curvas $P-\delta$ dos vários provetes a nível de rigidez no domínio elástico, $P_{\text{máx}}$ e respetivo $\delta_{P_{\text{máx}}}$. As curvas $P-\delta$ evidenciam um adesivo com um comportamento dúctil, onde se verifica uma rotura muito suavizada com valores de deslocamento aplicado de cerca de 14,4 mm, para a carga máxima [3]. No decorrer dos ensaios com este adesivo, observou-se que a aparente propagação da fenda medida pela rotura da camada de tinta branca não condizia com a realidade, já que a grande ductilidade levou a que a tinta rompesse antes da propagação real da fenda. Desta forma, estimou-se o valor de G_{IIC} apenas pelo método CBBM [3].

3.1.5.2.2 Discussão de resultados

3.1.5.2.2.1 Araldite® AV138

A Tabela 22 apresenta os valores de carga máxima e deslocamento no ponto de carga máxima para o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 22 - Valores de $P_{\text{máx}}$ e respetivo $\delta_{P_{\text{máx}}}$ das curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® AV138 [3]

| Provete | $P_{\text{máx}}$ [N] | $\delta_{P_{\text{máx}}}$ [mm] |
|----------------------|--|--|
| AV138_1 | 458,97 | 4,30 |
| AV138_2 | 671,58 | 4,97 |
| AV138_3 | 617,01 | 4,55 |
| AV138_4 | 451,04 | 8,99 |
| AV138_5 | 471,29 | 4,07 |
| AV138_6 | 464,54 | 4,08 |
| AV138_7 | 439,53 | 4,06 |
| AV138_8 | 431,89 | 4,04 |
| Média | 516,97 | 4,29 |
| Desvio Padrão | 109,74 | 0,35 |

Relativamente aos dados referentes ao provete AV138_4, é importante dizer que estes não foram considerados para efeitos de média e desvio padrão dos parâmetros da

tabela, pois apresentavam grandes diferenças nos valores quando comparados com os outros provetes. Analisando aos valores do desvio padrão, os dados refletem uma boa repetibilidade para o parâmetro de $\delta_{P_{\text{máx}}}$. No que toca aos dados de $P_{\text{máx}}$, os provetes AV138_2 e AV138_3 destacam-se por apresentarem um desvio em relação à média de cerca de 31,8% e 29,8%, respetivamente. O facto de apresentarem estes desvios significativos levam a que o valor do desvio padrão do $P_{\text{máx}}$ fosse bastante elevado. De realçar que, para os três adesivos testados em geometria ENF, não estão disponíveis os dados referentes a $P_{\text{máx}}$, $\delta_{P_{\text{máx}}}$, $\delta_{\text{máx}}$, $E_{P_{\text{máx}}}$ e $E_{\delta_{\text{máx}}}$ apresentados no âmbito da discussão dos ensaios DCB.

3.1.5.2.2.2 Araldite® 2015

A Tabela 23 apresenta os valores de $P_{\text{máx}}$ e $\delta_{P_{\text{máx}}}$ para o adesivo Araldite® 2015.

Tabela 23 - Valores de $P_{\text{máx}}$ e respetivo $\delta_{P_{\text{máx}}}$ das curvas P - δ do adesivo Araldite® 2015 [3]

| Provete | $P_{\text{máx}}$ [N] | $\delta_{P_{\text{máx}}}$ [mm] |
|---------------|----------------------|--------------------------------|
| A2015_1 | 1193,22 | 8,49056 |
| A2015_2 | 1162,62 | 9,30723 |
| A2015_3 | 1097,85 | 7,94058 |
| AV138_4 | 1192,65 | 8,52392 |
| A2015_5 | 1170,06 | 8,27390 |
| A2015_6 | 1212,76 | 8,89056 |
| A2015_7 | 1082,77 | 7,82390 |
| A2015_8 | 1076,84 | 7,96556 |
| Média | 1155,164 | 8,272 |
| Desvio Padrão | 72,531 | 0,386 |

Os dados referentes ao provete A2015_2 não foram considerados para o cálculo da média e desvio padrão dos parâmetros da tabela. Analisando os valores do desvio padrão, os dados refletem uma boa repetibilidade dos ensaios em geral. Em comparação com o adesivo Araldite® AV138, o valor do desvio padrão associado ao parâmetro $P_{\text{máx}}$ apresenta melhorias evidentes. Quando comparados os valores de $\delta_{P_{\text{máx}}}$ entre os

mesmos adesivos, o Araldite 2015 verifica aproximadamente o dobro do deslocamento de rotura comparativamente ao Araldite® AV138. O valor médio da carga máxima é ligeiramente superior ao dobro do apresentado pelo Araldite® AV138.

3.1.5.2.2.3 Sikaforce® 7752

A Tabela 24 apresenta os valores de $P_{m\acute{a}x}$ e $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ para o adesivo SikaForce® 7752. Para o cálculo da média e desvio padrão dos parâmetros da tabela, os dados referentes ao provete S7752_8 não foram considerados. Analisando os valores do desvio padrão verifica-se uma excelente repetibilidade dos ensaios. Quando comparados os três adesivos, o SikaForce® 7752 e o Araldite® 2015 apresentam para $P_{m\acute{a}x}$ valores cerca de 2,2 vezes superiores ao Araldite® AV138. Relativamente a $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$, o SikaForce® 7752 é superior 1,7 vezes ao Araldite® 2015 e 3,3 vezes ao Araldite® AV138.

Tabela 24 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ e respetivo $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ das curvas P - δ do adesivo SikaForce® 7752 [3]

| Provete | $P_{m\acute{a}x}$ [N] | $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ [mm] |
|----------------------|---|---|
| S7752_1 | 1191,70 | 15,1578 |
| S7752_2 | 1106,93 | 13,0322 |
| S7752_3 | 1103,61 | 14,8656 |
| S7752_4 | 1079,21 | 13,7156 |
| S7752_5 | 1127,82 | 14,7822 |
| S7752_6 | 1187,12 | 11,6656 |
| S7752_7 | 1181,81 | 13,6739 |
| S7752_8 | 1062,62 | 13,6489 |
| Média | 1139,743 | 14,413 |
| Desvio Padrão | 46,372 | 0,949 |

3.1.5.2.3 Determinação de G_{IIc}

3.1.5.2.3.1 Araldite® AV138

As curvas- R relativas ao adesivo Araldite® AV138 estão representadas na Figura 57. Verificou-se que o crescimento de G_{II} foi aproximadamente constante para os quatro métodos. Observou-se também que apresentam estes uma boa repetibilidade no valor de patamar de DBT, CCM e CBBM, excetuando o ensaio CBT que subestima o valor de G_{IIc} .

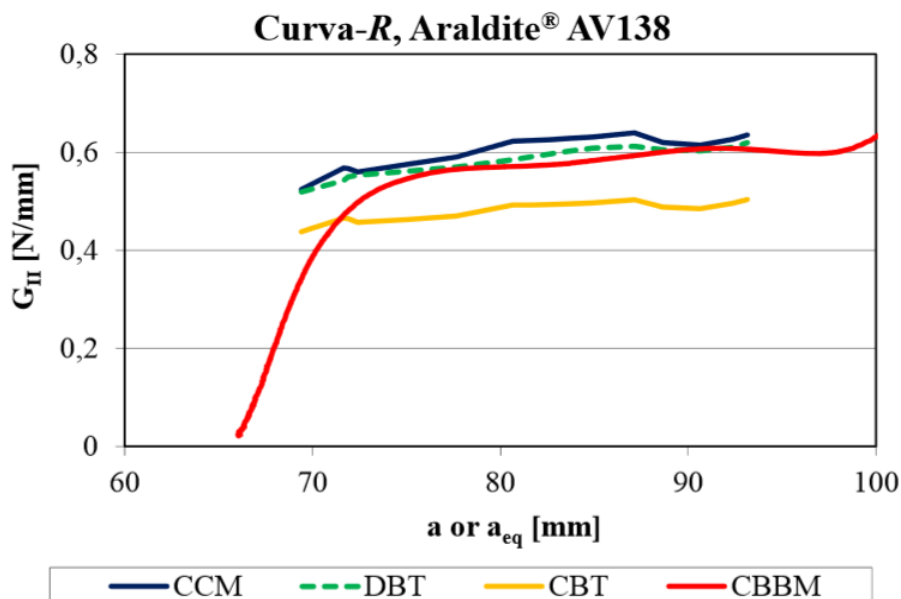


Figura 57 - Curvas- R de um provete ENF com o adesivo Araldite® AV138 [3]

A Tabela 25 resume os valores de G_{IIc} [N/mm] dos ensaios válidos por todos os métodos, bem como a média e desvio padrão associados a cada método. Através da análise dos valores obtidos de G_{IIc} pelos diferentes métodos, verifica-se que ambos apresentam uma boa proximidade. Como o método CBBM é o método mais robusto e que melhor consegue descrever com precisão o valor de G_{IIc} [83], considera-se o valor do CBBM como referência. Assim, em comparação com o método CBBM, o CCM apresenta um valor médio inferior em 9,16%, o DBT em 1,83% e o CBT em 17,25%. Claramente, o método CBT apresenta resultados muito inferiores aos restantes.

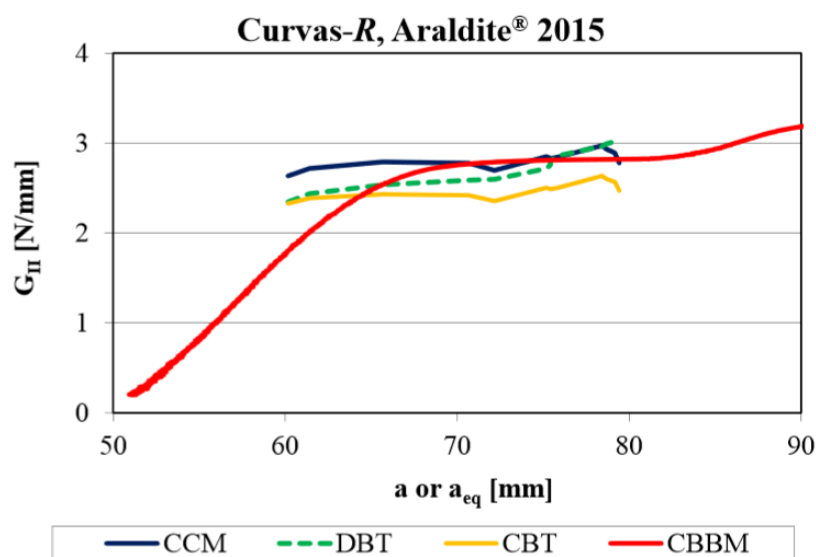
Tabela 25 - Valores de G_{IIc} do Araldite® AV138 obtidos pelos vários métodos [3]

| Provete | CCM [N/mm] | DBT [N/mm] | CBT [N/mm] | CBBM [N/mm] |
|---------------|------------|------------|------------|-------------|
| AV138_1 | 0,469 | 0,566 | 0,440 | 0,572 |
| AV138_2 | * | 0,709 | 0,566 | 0,712 |
| AV138_3 | * | 0,650 | 0,608 | 0,724 |
| AV138_4 | - | - | - | - |
| AV138_5 | * | 0,578 | 0,519 | 0,594 |
| AV138_6 | 0,568 | 0,579 | 0,487 | 0,562 |
| AV138_7 | 0,605 | 0,581 | 0,478 | 0,576 |
| AV138_8 | 0,603 | 0,583 | 0,481 | 0,585 |
| Média | 0,561 | 0,606 | 0,511 | 0,618 |
| Desvio Padrão | 0,064 | 0,053 | 0,058 | 0,069 |

* provete em que não foi possível obter ajuste do polinómio $C=f(a)$

3.1.5.2.3.2 Araldite® 2015

Na Figura 58 estão representadas as curvas- R dos diversos métodos considerados.

Figura 58 - Curvas- R de um provete ENF com o adesivo Araldite® 2015 [3]

Verifica-se um crescimento de fenda a G_{II} aproximadamente constante para todos os métodos e uma repetibilidade no valor de patamar, exceto para o método CBT.

A Tabela 26 apresenta os valores de G_{IIC} [N/mm] referentes aos ensaios válidos por todos os processos, bem como a média e desvio-padrão associada a cada método. Regista-se uma concordância entre as amostras razoavelmente boa. Tal como no adesivo Araldite® AV138 tomou-se como referencia o método CBBM, e verificou-se que o CCM exibe um valor médio superior em 4,69%, o DBT um valor inferior em 3,78% e o CBT um valor também inferior em 17,88%. Também para este adesivo o valor de CBT é bastante inferior aos restantes, uma vez que este método exige a medição do comprimento da fenda no decorrer da fase de propagação, o que foi efetuado de forma manual e pode induzir a erros adicionais [83].

Tabela 26 - Valores de G_{IIC} do Araldite® 2015 obtidos pelos vários métodos [3]

| Provete | CCM [N/mm] | DBT [N/mm] | CBT [N/mm] | CBBM [N/mm] |
|----------------------|------------|------------|------------|-------------|
| A2015_1 | 3,029 | 3,083 | 2,644 | 3,420 |
| A2015_2 | - | - | - | - |
| A2015_3 | 3,675 | 2,401 | 2,177 | 2,545 |
| A2015_4 | 3,214 | 2,926 | 2,544 | 2,943 |
| A2015_5 | 2,812 | 2,741 | 2,476 | 2,801 |
| A2015_6 | 3,357 | 3,088 | 2,644 | 3,136 |
| A2015_7 | 2,696 | 2,831 | 2,624 | 2,901 |
| A2015_8 | 3,008 | 2,952 | 2,512 | 3,025 |
| Média | 3,113 | 2,859 | 2,517 | 2,967 |
| Desvio Padrão | 0,334 | 0,238 | 0,164 | 0,273 |

3.1.5.2.3.3 Sikaforce® 7752

A Figura 59 apresenta um exemplo da curva- R obtida pelo método CBBM. A curva- R foi obtida apenas pelo método CBBM, pois, é o único método que não requer medição de comprimento de fenda. Observa-se que a curva- R apresenta um patamar de

crescimento de fenda a G_{II} aproximadamente constante, apesar de conter uma extensão inferior quando comparada com os outros dois adesivos em estudo.

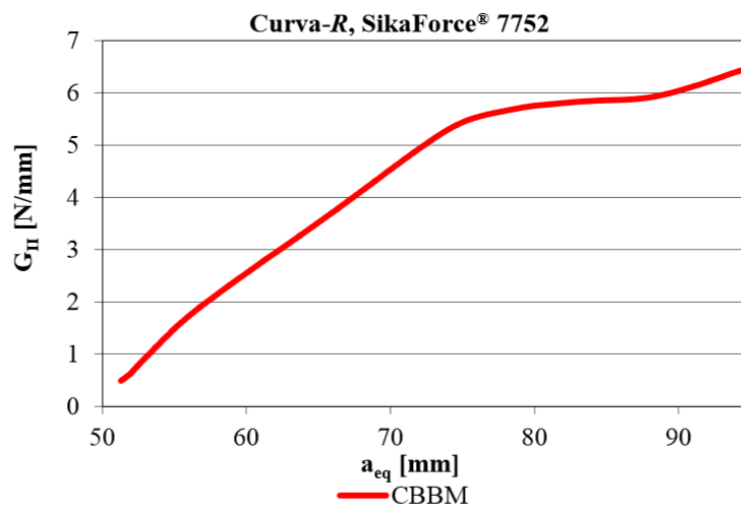


Figura 59 - Curva-R de um provete ENF com o adesivo SikaForce® 7752 [3]

A Tabela 27 apresenta os valores de G_{IIc} para os ensaios pelo método CBBM.

Tabela 27 - Valores de G_{IIc} do SikaForce®7752 obtidos pelo método CBBM [3]

| Provete | CBBM [N/mm] |
|----------------------|-------------|
| S7752_1 | 5,86 |
| S7752_2 | 5,88 |
| S7752_3 | 5,47 |
| S7752_4 | 4,81 |
| S7752_5 | 5,68 |
| S7752_6 | 5,65 |
| S7752_7 | 5,62 |
| S7752_8 | - |
| Média | 5,56 |
| Desvio Padrão | 0,36 |

Apenas se considerou sete dos oito ensaios como válidos, Tal como nos adesivos anteriores, verifica-se a concordância entre as amostras, comprovada pelo reduzido valor de desvio padrão dos ensaios. Verifica-se a existência de repetibilidade entre os valores obtidos para os vários provetes, com exceção do provete S7752_4 que apresenta um valor ligeiramente inferior, o que valida a execução de provetes com condições idênticas.

3.1.5.2.4 Determinação da lei coesiva em corte

As simulações numéricas foram executadas sob as condições previamente anunciadas com o objetivo de determinar uma lei coesiva que represente o comportamento do mesmo ao corte para cada adesivo ensaiado, de modo a que esta possa ser posteriormente aplicada para a previsão da resistência de juntas adesivas.

Assim sendo, recorreu-se a um método de ajuste de parâmetros, que se baseia na introdução no modelo numérico, do valor de G_{IIC} adquirido de forma experimental pelo CBBM. O valor de G foi alcançado também experimentalmente a partir de E e ν , tendo-se como consideração a relação da lei de Hooke para materiais isotrópicos. É usado inicialmente um valor típico de t_s^0 , que é ajustado através da comparação das curvas $P-\delta$ experimentais com as curvas $P-\delta$ numéricas de cada amostra. Este procedimento é efetuado individualmente para cada provete dos três adesivos em estudo, obtendo-se os valores médios de G_{IIC} , t_s^0 e δ_s^0 e as respetivas leis triangulares.

Verificou-se através do procedimento de ajuste efetuado que os valores de G_{IIC} e t_s^0 possuem uma grande influência no perfil das curvas $P-\delta$ numéricas. O valor de G_{IIC} , utilizado nas simulações numéricas, influencia especialmente o valor da carga de pico. A consideração de valores mais elevados de t_s^0 aumenta a carga de pico e a rigidez da amostra até o pico de carga, conduzindo a uma redução mais abrupta da carga pós-pico. Nos resultados apresentados seguidamente apresenta-se também o valor de deslocamento relativo máximo em corte, δ_s^f , para que ocorra uma rotura completa. Este valor é obtido a partir de G_{IIC} e t_s^0 , igualando a área abaixo da lei coesiva ao respetivo valor de G_{IIC} .

3.1.5.2.4.1 Araldite® AV138

Na Tabela 28 estão apresentados os valores de entrada empregues em cada um dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com o adesivo Araldite® AV138, e cujo procedimento de ajuste permitiu a estimativa de t_s^0 . Em relação aos valores médios registados, o parâmetro t_s^0 registou um valor de $19,85 \pm 3,22$ MPa, correspondente a um desvio percentual de 16%. Quanto a G_{IIC} , obteve-se um valor de $0,634 \pm 0,102$ N/mm, correspondendo também um desvio percentual de 16%. Considerou-se que estes parâmetros apresentam uma repetibilidade aceitável.

Tabela 28 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com adesivo Araldite® AV138

| Provete | t_s^0 [MPa] | E [MPa] | G_{Ic} [N/mm] |
|---------------|---------------|-----------|-----------------|
| AV138_1 | 20 | 1560 | 0,571 |
| AV138_2 | 23 | 1560 | 0,826 |
| AV138_3 | 22,5 | 1560 | 0,729 |
| AV138_5 | 22,5 | 1560 | 0,594 |
| AV138_6 | 20 | 1560 | 0,562 |
| AV138_7 | 16 | 1560 | 0,578 |
| AV138_8 | 15 | 1560 | 0,578 |
| Média | - | - | 0,634 |
| Desvio Padrão | - | - | 0,102 |

Na Figura 60 estão apresentadas as curvas P - δ experimental e numérica de um provete ENF colado com o adesivo Araldite® AV138, após o procedimento iterativo de ajuste cuja concordância final é representativa do conjunto das simulações realizadas para todos os provetes.

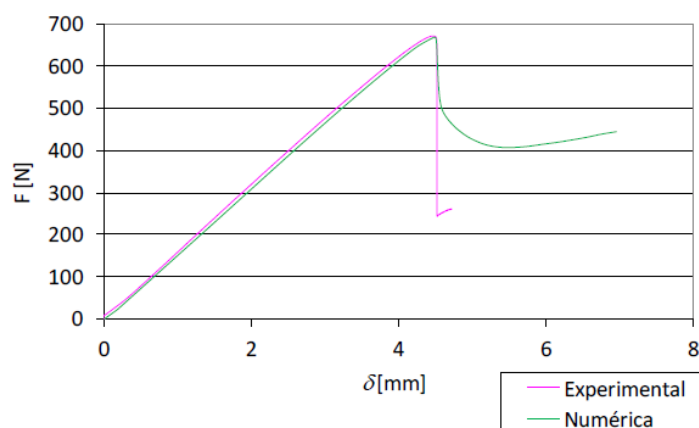


Figura 60 - Comparativo das curvas P - δ experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete ENF colado com o adesivo Araldite® AV138

Verificou-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, especialmente no comportamento pós-pico, que representa a zona de maior

importância no processo de ajuste, pois corresponde à zona de propagação da fenda. Verificou-se que, de um modo geral, as curvas P - δ obtidas numericamente reproduzem bastante bem as curvas experimentais de todos os provetes.

A Tabela 29 apresenta os valores individuais obtidos para δ_n^0 e δ_s^f . O valor médio registado para cada um dos parâmetros foi de $0,00255 \pm 0,00041$ mm e $0,0645 \pm 0,0094$ mm, respetivamente, o que corresponde a um desvio percentual de 16,1% e 14,6%. Tal como nos parâmetros obtidos anteriormente, verificou-se uma repetibilidade igualmente aceitável.

Tabela 29 - Valores obtidos pela lei coesiva triangular, ao corte, do adesivo Araldite® AV138

| Provete | δ_n^0 [mm] | δ_s^f [mm] |
|----------------------|-------------------|-------------------|
| AV138_1 | 0,00256 | 0,057 |
| AV138_2 | 0,00295 | 0,072 |
| AV138_3 | 0,00288 | 0,065 |
| AV138_5 | 0,00288 | 0,053 |
| AV138_6 | 0,00256 | 0,056 |
| AV138_7 | 0,00205 | 0,072 |
| AV138_8 | 0,00192 | 0,077 |
| Média | 0,00255 | 0,0645 |
| Desvio Padrão | 0,00041 | 0,0094 |

A Figura 61 apresenta as leis coesivas triangulares obtidas para cada um dos provetes, conseguidas através do ajuste das sete curvas P - δ experimentais do adesivo Araldite® AV138. É importante referir que se considerou uma lei coesiva média, obtida a partir das médias de t_s^0 e G_{IIC} para os sete provetes ensaiados. Na análise do gráfico verifica-se que as leis apresentam um grau aceitável de concordância entre elas, o que é indicativo da robustez dos resultados experimentais obtidos e processo iterativo de ajuste.

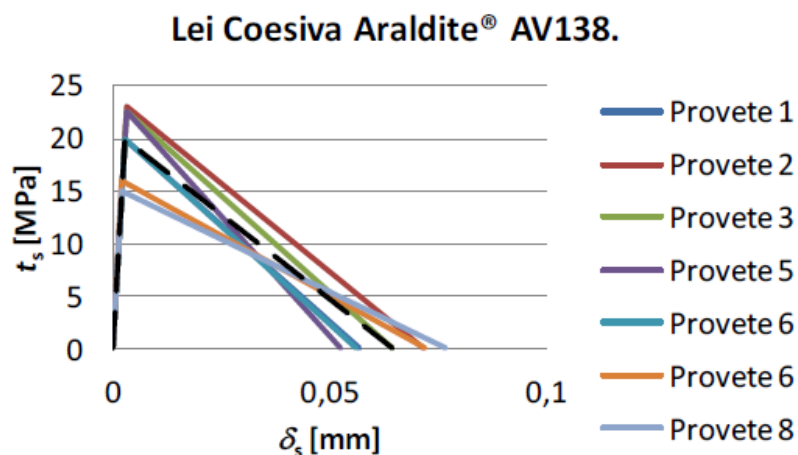


Figura 61 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes ENF colados com o adesivo Araldite® AV 138, e respetiva lei coesiva média

3.1.5.2.4.2 Araldite® 2015

Na Tabela 30 estão apresentados os valores de entrada utilizados em cada um dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com o adesivo Araldite® 2015 cujo procedimento de ajuste permitiu a estimativa de t_s^0 .

Tabela 30 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com adesivo Araldite® 2015

| Provete | t_s^0 [MPa] | E [MPa] | G_{Ic} [N/mm] |
|----------------------|---------------|-----------|-----------------|
| A2015_1 | 17 | 560 | 3,42 |
| A2015_3 | 20,5 | 560 | 2,58 |
| A2015_4 | 19,5 | 560 | 3,10 |
| A2015_5 | 20,5 | 560 | 2,80 |
| A2015_6 | 21 | 560 | 3,43 |
| A2015_7 | 19 | 560 | 2,85 |
| A2015_8 | 17 | 560 | 2,90 |
| Média | 19,21 | - | 3,01 |
| Desvio Padrão | 1,65 | - | 0,32 |

O valor médio registado para t_s^0 foi de $19,21 \pm 1,65$ MPa, correspondente a um desvio percentual de 9%. Relativamente ao valor médio obtido para G_{IIc} , este foi de $3,01 \pm 0,32$ N/mm, verificando-se um desvio percentual de 11%. Tal como no adesivo anterior, considerou-se que estes parâmetros apresentam uma repetibilidade aceitável.

A Figura 62 apresenta o resultado final do ajuste entre as curvas $P-\delta$ numérica e experimental de um provete ENF colado com o adesivo Araldite® 2015. Tal como é visível, na globalidade dos ensaios, verificou-se uma concordância razoável, quando comparados os resultados numéricos com os experimentais. Relativamente ao comportamento pós-pico, observou-se também uma concordância razoável, correspondendo à zona de propagação da fenda. Verificou-se que, de um modo geral, as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente reproduzem com bastante eficácia as curvas experimentais de todos os provetes.

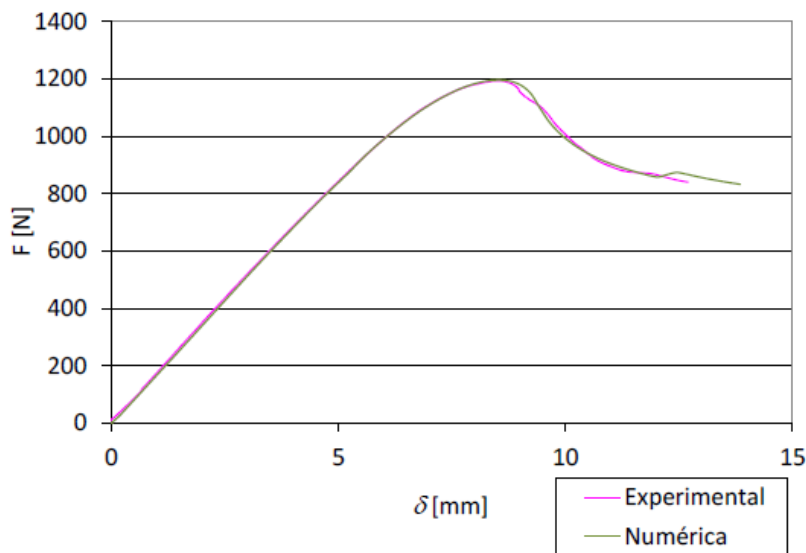


Figura 62 - Comparativo das curvas $P-\delta$ experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete ENF colado com o adesivo Araldite® 2015

A Tabela 31 apresenta os valores individuais obtidos para δ_n^0 e δ_s^f , no qual se verificou, respetivamente, um valor médio de $0,00686 \pm 0,00059$ mm e $0,316 \pm 0,049$ mm. Estes valores correspondem a um desvio percentual de 8,6% e 15,5%, pela mesma ordem. Apesar destes desvios apresentarem alguma significância, estes parâmetros apresentam uma boa repetibilidade.

Tabela 31 - Valores obtidos pela lei coesiva triangular, ao corte, do adesivo Araldite® 2015

| Provete | δ_n^0 [mm] | δ_s^f [mm] |
|----------------------|-------------------|-------------------|
| A2015_1 | 0,00607 | 0,402 |
| A2015_3 | 0,00732 | 0,252 |
| A2015_4 | 0,00696 | 0,318 |
| A2015_5 | 0,00732 | 0,273 |
| A2015_6 | 0,00750 | 0,327 |
| A2015_7 | 0,00679 | 0,300 |
| A2015_8 | 0,00607 | 0,341 |
| Média | 0,00686 | 0,316 |
| Desvio Padrão | 0,00059 | 0,049 |

A Figura 63 apresenta as leis coesivas triangulares para cada um dos provetes obtidas através do ajuste das sete curvas P - δ experimentais do adesivo Araldite® 2015. É também apresentada uma lei coesiva média, obtida a partir das médias de t_s^0 e G_{IIc} para os 7 provetes ensaiados. Pela observação do gráfico, consegue-se verificar que as leis exibem um grau de concordância admissível entre elas, sendo um bom indicativo do rigor dos resultados experimentais obtidos e processo iterativo de ajuste.

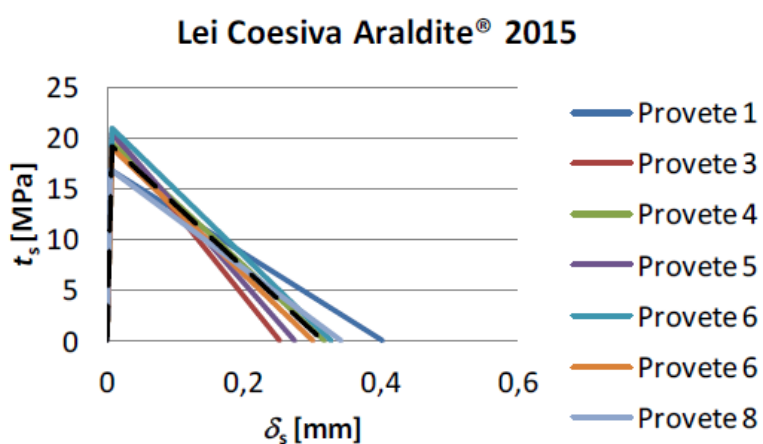


Figura 63 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes ENF colados com o adesivo Araldite® 2015, e respectiva lei coesiva média

3.1.5.2.4.3 Sikaforce® 7752

Na Tabela 32 são apresentados os valores de entrada usados em cada um dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com o adesivo SikaForce® 7752 cujo procedimento de ajuste permitiu a estimativa de t_s^0 do adesivo. Na análise efetuada, relativamente aos valores médios registados, obteve-se $19,5 \pm 2,06$ MPa para o parâmetro t_s^0 , correspondendo a um desvio percentual de 11%, enquanto para G_{IIC} se obteve $5,666 \pm 0,476$ N/mm, o que corresponde a um desvio percentual de 8%. Considerou-se que estes parâmetros apresentam uma repetibilidade satisfatória.

Tabela 32 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com adesivo SikaForce® 7752

| Provete | t_s^0 [MPa] | E [MPa] | G_{IIC} [N/mm] |
|----------------------|---------------|-----------|------------------|
| S7752_1 | 18,5 | 190 | 5,950 |
| S7752_2 | 21 | 190 | 5,465 |
| S7752_3 | 20,5 | 190 | 5,949 |
| S7752_4 | 23 | 190 | 4,800 |
| S7752_5 | 17,5 | 190 | 5,600 |
| S7752_6 | 18,5 | 190 | 6,300 |
| S7752_7 | 17,5 | 190 | 5,600 |
| Média | 19,5 | - | 5,666 |
| Desvio Padrão | 2,06 | - | 0,476 |

A Figura 64 apresenta o resultado final do ajuste entre as curvas $P-\delta$ experimental e numérica de um provete ENF colado com o adesivo SikaForce® 7752, representativo da generalidade dos ensaios realizados no que concerne à reprodutibilidade conseguida nos resultados experimentais. Através da análise do gráfico, verificou-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, particularmente no comportamento pós-pico, que corresponde à propagação da fenda e, como tal, representa a zona de maior importância no processo de ajuste. Verifica-se, de um modo geral, que as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente reproduzem de forma bastante satisfatória as curvas experimentais de todos os provetes.

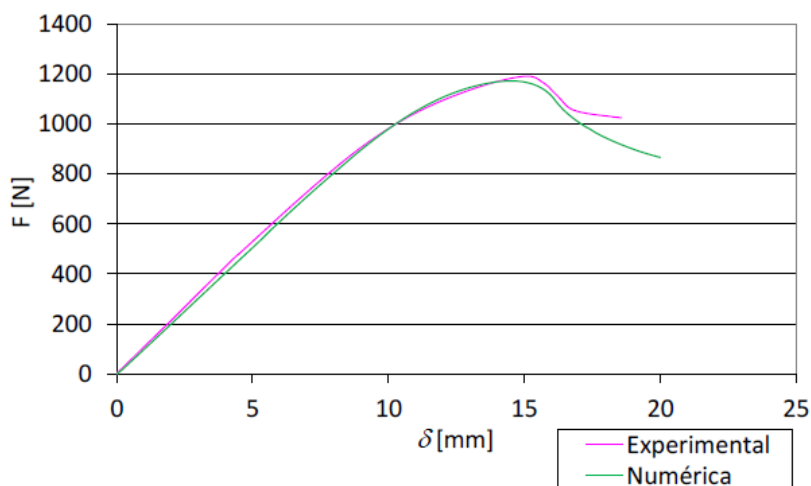


Figura 64 - Comparativo das curvas P- δ experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete ENF colado com o adesivo SikaForce® 7752

A Tabela 33 apresenta os valores individuais obtidos para δ_n^0 e δ_s^f , sendo que como valores médios foram obtidos os seguintes: $0,002053 \pm 0,00217$ mm e $0,588 \pm 0,092$ mm, respetivamente.

Tabela 33 - Valores obtidos pela lei coesiva triangular, ao corte, do adesivo SikaForce® 7752

| Provete | δ_n^0 [mm] | δ_s^f [mm] |
|----------------------|-------------------|-------------------|
| S7752_1 | 0,01947 | 0,643 |
| S7752_2 | 0,02211 | 0,520 |
| S7752_3 | 0,02158 | 0,580 |
| S7752_4 | 0,02421 | 0,417 |
| S7752_5 | 0,01842 | 0,640 |
| S7752_6 | 0,01947 | 0,681 |
| S7752_7 | 0,01842 | 0,640 |
| Média | 0,02053 | 0,588 |
| Desvio Padrão | 0,00217 | 0,092 |

Estes valores correspondem a um desvio percentual de 11%, e 16%, pela mesma ordem. É possível observar que a lei triangular apresenta um grau de concordância satisfatório entre os vários provetes.

Na Figura 65 são apresentadas as leis coesivas triangulares obtidas individualmente para cada um dos provetes, adquiridas através do ajuste das sete curvas P - δ experimentais do adesivo SikaForce® 7752. Além disso, é também apresentada uma lei coesiva média, obtida a partir das médias de t_s^0 e G_{IIc} para os sete provetes válidos, cujos valores individuais foram obtidos por ajuste das sete curvas P - δ experimentais do adesivo SikaForce® 7752. É possível observar que as leis manifestam um grau de concordância aceitável entre elas, indicando um bom nível de robustez dos resultados experimentais obtidos e processo iterativo de ajuste.

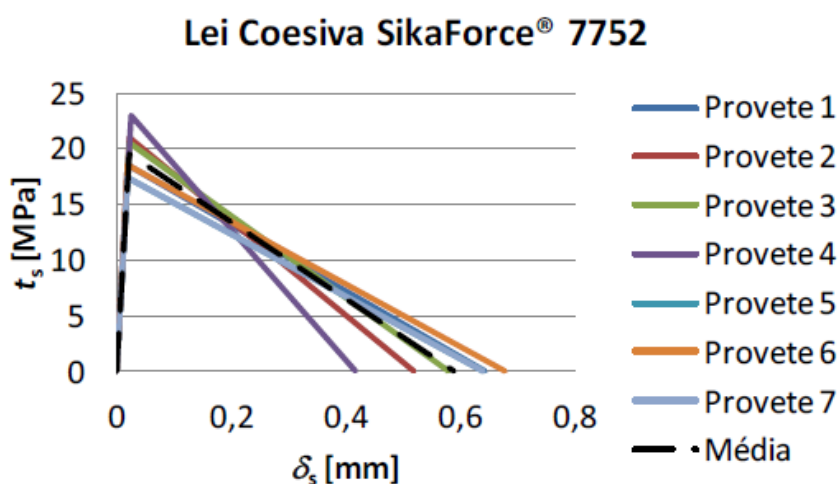


Figura 65 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes ENF colados com o adesivo SikaForce® 7752, e respetiva lei coesiva média

3.2 Validação numérica das leis coesivas

3.2.1 Geometria das juntas

A Figura 66 apresenta a geometria e dimensões características das JSS e JSD. Relativamente aos parâmetros geométricos são eles:

- Comprimento total dos provetes (L_T);
- Espessura do substrato (t_p);
- Espessura do adesivo (t_A);
- Comprimento de sobreposição (L_o).

O estudo paramétrico assentou principalmente no valor de L_o , sendo que se consideraram os seguintes valores:

- 12,5 mm;
- 25 mm;
- 37,5 mm;
- 50 mm.

A largura de todas as juntas foi de 25 mm. Deve ser referido que neste trabalho se consideraram valores idênticos de t_p para os substratos exteriores e interior das JSD, em oposição à utilização de áreas de secção idênticas dos dois lados da zona de ligação, isto é, considerando o substrato interior com o dobro de t_p dos dois substratos exteriores. Esta escolha não compromete os objetivos deste trabalho de comparar os diferentes adesivos em JSS e JSD e de avaliar a capacidade de previsão dos MDC.

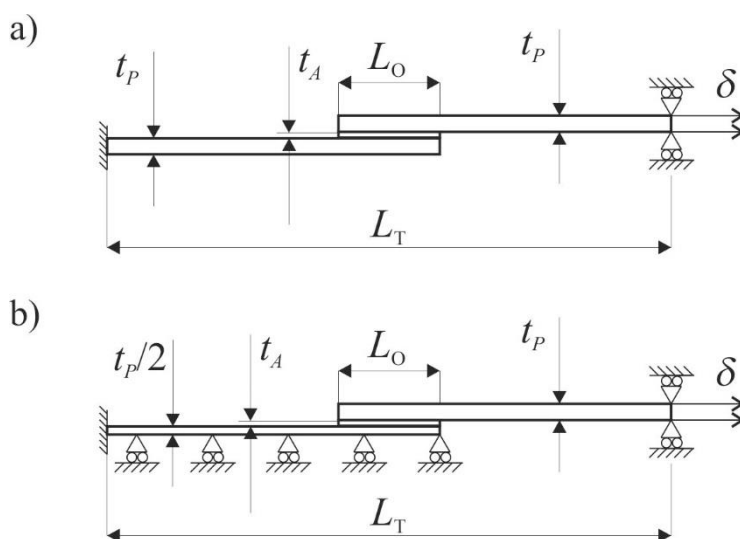


Figura 66 - Configuração da geometria dos provetes de JSS (a) e JSD (b)

As dimensões referidas anteriormente são apresentadas na Tabela 34.

Tabela 34 - Dimensões das JSS e JSD

| Parâmetro | Valor [mm] | | | |
|-----------|------------|-------|-------|-------|
| L_O | 12,5 | 25,0 | 37,5 | 50,0 |
| L_T | 170,0 | 170,0 | 170,0 | 170,0 |
| t_p | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 |
| t_A | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |

3.2.2 Condições da análise numérica

A análise numérica efetuada teve por base o *software* ABAQUS®. O *software* ABAQUS® baseia-se no método de EF e a sua escolha deve-se à possibilidade de utilização do MDC para prever a resistência das JSD. De forma a aprofundar o conhecimento destas juntas, foi feita na fase inicial uma análise de tensões na camada do adesivo. Esta análise foi realizada considerando uma malha muito refinada e modelação dos substratos e adesivo por elementos sólidos bidimensionais de estado plano de deformação. Para as análises de dano e de resistência, considerou-se uma malha mais grosseira, uma vez que a propagação de dano por MDC é independente do tamanho da malha, desde que seja garantido um refinamento mínimo. Neste caso, os substratos foram modelados com elementos sólidos bidimensionais de estado plano de deformação e o adesivo com elementos coesivos (Figura 67), considerando apenas um elemento na direção da espessura do adesivo.

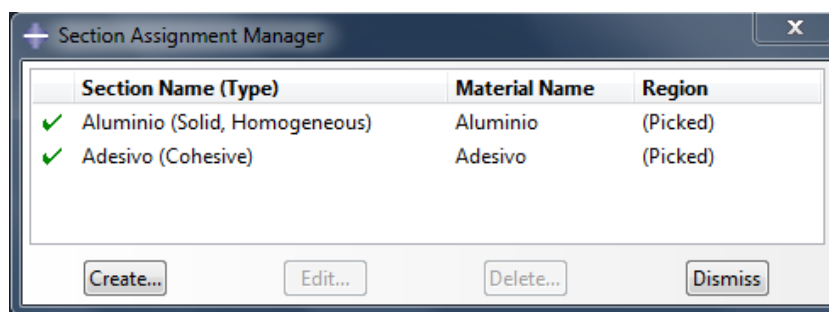


Figura 67 – Definição do tipo de elementos para os diferentes constituintes das juntas para as análises de dano e resistência no ABAQUS®

Também foi necessário introduzir as propriedades mecânicas dos materiais em estudo, nomeadamente dos adesivos (cujos parâmetros vão ser discutidos posteriormente) e dos substratos (Tabela 35). Refira-se que foi considerado nos modelos o comportamento plástico da liga de alumínio.

Tabela 35 – Propriedades dos substratos de liga de Al6082-T651

| Substrato | E [MPa] | ν | σ_y [MPa] | σ_f [MPa] |
|-------------|---------|-------|---------------------|---------------------|
| Al6082-T651 | 70070 | 0,3 | 261,67 | 324 |

As malhas para os modelos de análise de tensões são muito refinadas. Através do refinamento da malha é possível controlar/eliminar a instabilidade dos valores de tensão na proximidade das extremidades de sobreposição, teoricamente consideradas regiões singulares [64]. Tal como se pode verificar na Tabela 36, ao longo da junta existe

alteração na dimensão da malha, que é mais refinada na zona da camada de adesivo. De forma a garantir um maior refinamento nas zonas críticas da junta foi escolhido o número de elementos e rácio de *bias* (rácio de refinamento) de cada aresta da junta.

Tabela 36 - Variação das dimensões da malha nas JSD em função de L_0 [mm].

| | | 12,5 | 25 | 37,5 | 50 |
|--|--|------|-----|------|-----|
| Zona de sobreposição | | | | | |
| Número de Elementos | | 40 | 80 | 120 | 160 |
| Rácio de <i>bias</i> | | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Altura do substrato superior | | | | | |
| Número de Elementos | | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Rácio de <i>bias</i> | | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| Altura do substrato inferior | | | | | |
| Número de Elementos | | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Rácio de <i>bias</i> | | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| Comprimento não ligado dos substratos | | | | | |
| Número de Elementos | | 100 | 90 | 80 | 80 |
| Rácio de <i>bias</i> | | 12 | 12 | 12 | 12 |

Na Figura 68 é possível verificar que ao longo de L_0 o efeito *bias* foi construído a partir da região central do adesivo no sentido das extremidades de L_0 . Já na região relativa ao comprimento dos substratos (região que não tem contacto com o adesivo) a malha foi refinada no sentido da camada adesiva, tal como demonstrado na Figura 69.

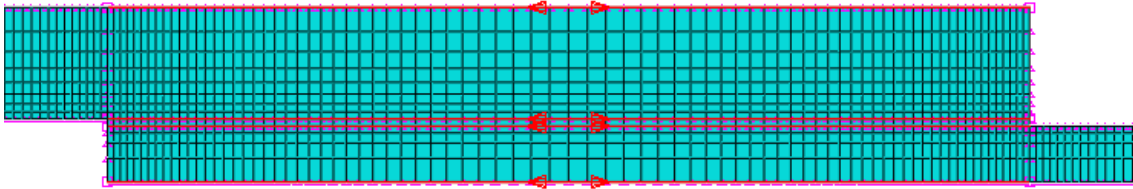


Figura 68 - Sentido do efeito bias da malha na região da sobreposição

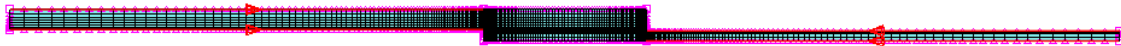


Figura 69 - Sentido do efeito bias da malha na região dos substratos sem contacto com o adesivo

Posteriormente, tal como se pode verificar na Figura 70, foi também aplicado um refinamento crescente da malha ao longo da espessura dos substratos.

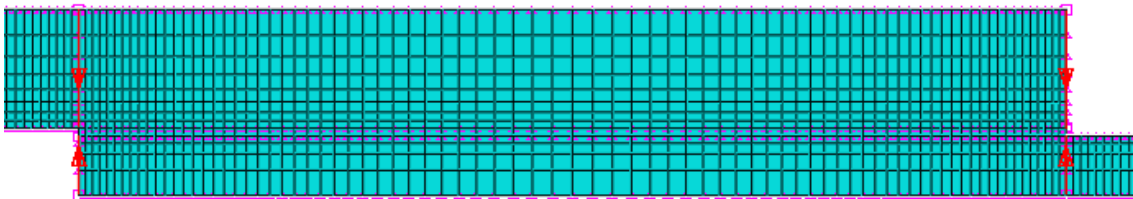


Figura 70 - Sentido do efeito bias da malha ao longo da espessura dos substratos

Todas as variações do efeito *bias* e do número de elementos na malha para os diferentes L_0 têm como principal objetivo reduzir o esforço computacional, já que permitem uma diminuição do tempo na obtenção dos resultados, sem comprometer a precisão dos resultados nas zonas com grandes variações de tensão.

Relativamente às condições fronteira utilizadas nos modelos numéricos (Figura 71), de forma a simular as condições reais dos ensaios experimentais, considerou-se uma das extremidades da junta encastrada, enquanto na extremidade oposta foi aplicada uma restrição vertical e um deslocamento de tração.



Figura 71 - Condições fronteira impostas nos modelos numéricos

Já na análise por MDC, o adesivo foi modelado com elementos coesivos pela aproximação contínua, com uma única linha de elementos coesivos e uma lei de tração-separação triangular. Os deslocamentos aplicados nos modelos numéricos, em função de L_0 , variam para os diferentes adesivos utilizados, conforme mostra a Tabela 37.

Tabela 37 - Deslocamentos aplicados nos modelos numéricos do *software* ABAQUS®.

| Adesivo | L_0 [mm] | | | |
|-----------------|------------|-----|------|----|
| | 12,5 | 25 | 37,5 | 50 |
| Araldite® AV138 | 0,5 | 0,5 | 6 | 8 |
| Araldite® 2015 | 0,5 | 0,5 | 6 | 8 |
| Sikaforce® 7752 | 0,5 | 05 | 8 | 8 |

3.2.3 Modelo de dano coesivo

Em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [59]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [68], linear parabólico [69], exponencial [71], polinomial [70] e trapezoidal [61]. A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [28]. O modelo triangular 2D implementado no *software* ABAQUS® está representado na Figura 72, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

O modo puro caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo forem anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar os esforços de tensão e corte [72]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente normal de deformação e de uma deformação de corte que são determinadas recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas entre substratos rígidos as tensões de membrana são desprezadas.

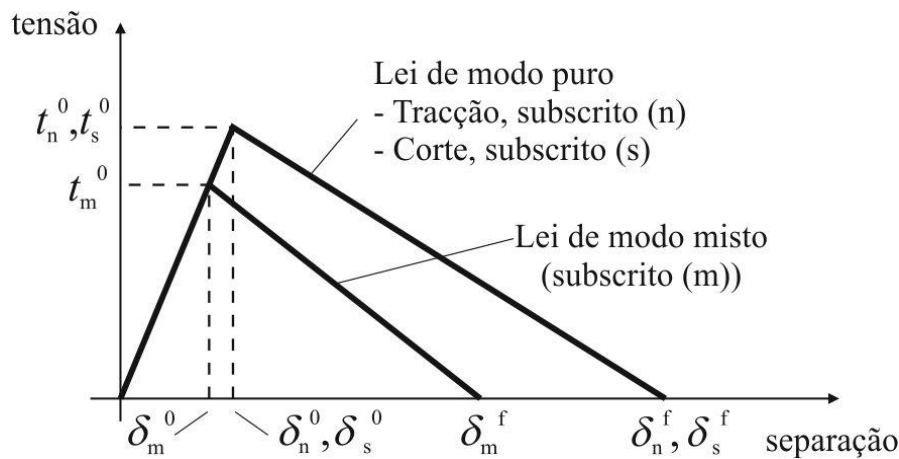


Figura 72 – MDC triangular implementado no software ABAQUS®

Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz \mathbf{K}_{COH} , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida como:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{\text{COH}} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (17)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja uma formulação local, usada para simular fraturas de espessura nula, os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [64]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0, \quad (18)$$

onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Considerando estes parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [72]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério quadrático de tensões, expresso pela seguinte expressão

$$\left\langle \frac{t_n}{t_n^0} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{t_s}{t_s^0} \right\rangle^2 = 1. \quad (19)$$

$\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [102]. Quando t_m^0 é atingido (Figura 72), pela igualdade da equação (19), a rigidez do

material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos (δ_m^f na Figura 72) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC} .

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (20)$$

3.2.4 Leis coesivas para simulação do adesivo

Com o objetivo de verificar as leis coesivas obtidas pelo método inverso foi utilizado o *software* ABAQUS®. Assim sendo, iniciou-se a introdução dos parâmetros obtidos pelo método inverso.

Relativamente à determinação da lei coesiva à tração apresentada no capítulo 3.1.5.1.4, verificou-se a obtenção dos seguintes parâmetros (Tabela 38).

Tabela 38 - Valores de entrada da lei coesiva à tração no software ABAQUS® de todos os adesivos

| Adesivo | t_n^0 [MPa] | G_{IC} [N/mm] | E [MPa] | G [MPa] |
|------------------------|---------------|-----------------|-----------|-----------|
| Araldite® AV138 | 39,45 | 0,236 | 4890 | 1560 |
| Araldite® 2015 | 21,63 | 0,498 | 1850 | 560 |
| Sikaforce® 7752 | 11,49 | 3,65 | 490 | 190 |

Em relação à lei coesiva em corte apresentada no capítulo 3.1.5.2.4 verificou-se os seguintes valores de entrada (Tabela 39).

Tabela 39 - Valores de entrada da lei coesiva em corte no software ABAQUS® de todos os adesivos

| Adesivo | t_s^0 [MPa] | G_{IIC} [N/mm] | E [MPa] | G [MPa] |
|------------------------|---------------|------------------|-----------|-----------|
| Araldite® AV138 | 19,85 | 0,634 | 4890 | 1560 |
| Araldite® 2015 | 19,21 | 3,01 | 1850 | 560 |
| Sikaforce® 7752 | 19,5 | 5,66 | 490 | 190 |

3.2.5 Análise de tensões na junta

Neste subcapítulo analisam-se as tensões instaladas em regime elástico nas JSS e JSD, comparando as tensões σ_y e τ_{xy} obtidas numericamente no ABAQUS®. A análise é

realizada a meio da espessura de adesivo, para os diversos adesivos e valores de L_0 das juntas. Esta análise tem como objetivo compreender a influência de cada uma das configurações de junta na distribuição de tensões e resistência das juntas, auxiliando a fundamentar os resultados obtidos de $P_{máx}$. Os gráficos das tensões apresentados nos capítulos 3.2.5.1 e 3.2.5.2 foram obtidos mediante um procedimento de normalização de tensões, que consistiu em dividir as tensões σ_y e τ_{xy} por $\tau_{méd}$ para cada valor de L_0 . O valor de L_0 também foi normalizado para x/L_0 (x representa a distância desde uma das extremidades de sobreposição), de tal forma que $0 \leq x/L_0 \leq 1$.

3.2.5.1 Tensões de arrancamento

A Figura 73, Figura 74 e Figura 75 apresentam as distribuições de tensões σ_y para as JSS, em função de L_0 . As tensões σ_y registam uma magnitude inferior a $\tau_{méd}$, com exceção das extremidades de ligação das juntas, em virtude de estas constituírem zonas de singularidade de tensão devido à rotação dos substratos [103-105]. Por causa desta rotação, nestas regiões geram-se tensões de tração, ao passo que nas zonas mais interiores se geram tensões de compressão. Isto verifica-se porque a deformação dos substratos durante a solicitação provoca a deformação transversal da junta, o que resulta no tracionamento das extremidades da ligação adesiva e compressão na zona intermédia da mesma. A resistência destas juntas é significativamente afetada pelas tensões σ_y , dada a criticidade das mesmas para a ligação adesiva, pelo que estas podem conduzir à rotura precoce da junta [64, 102, 106].

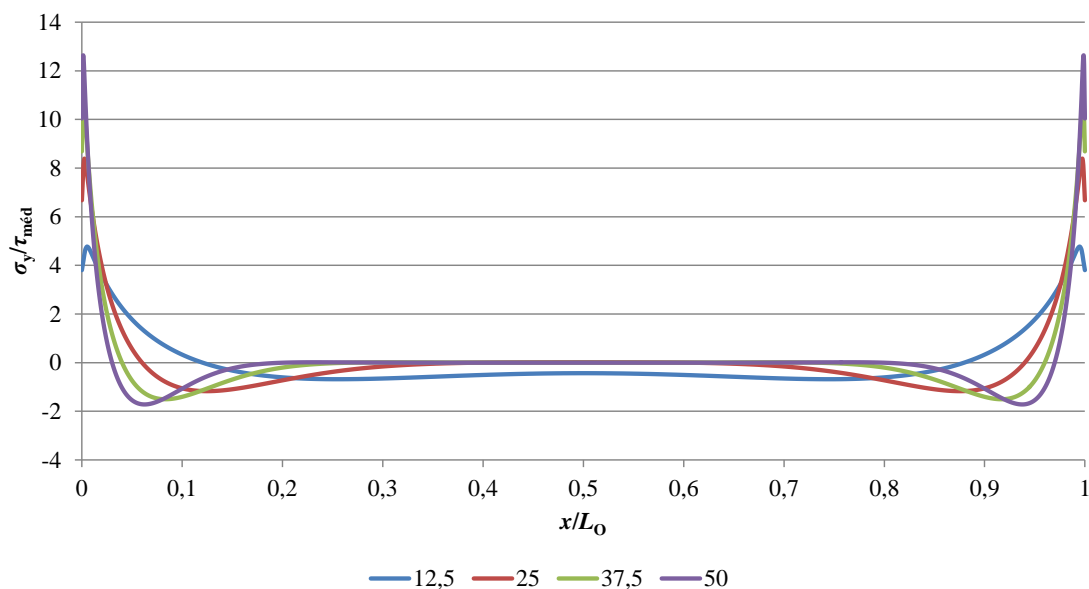


Figura 73 - Distribuição de tensões σ_y em JSS com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0

O estudo paramétrico de L_0 demonstrou que os picos das tensões σ_y aumentaram com o incremento de L_0 . Na proximidade das singularidades observam-se picos compressivos de σ_y que também tendem a aumentar de intensidade com o aumento de L_0 , enquanto as tensões compressivas no sentido do interior da ligação tendem a diminuir. De referir que o aumento dos picos de tensão σ_y com o incremento de L_0 tende a diminuir a resistência média da junta na área de ligação, especialmente nas juntas com adesivos frágeis [107].

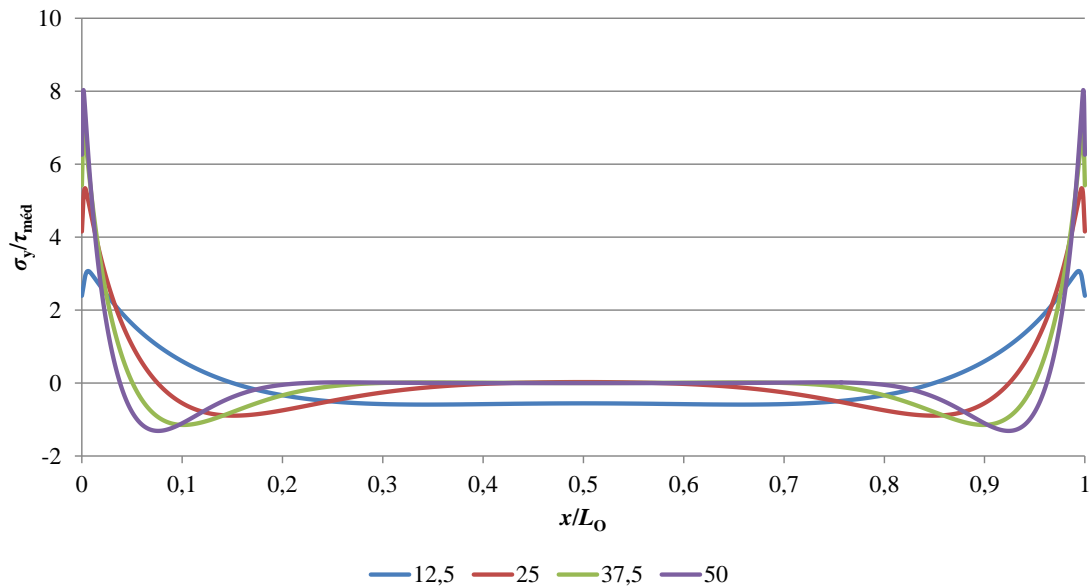


Figura 74 - Distribuição de tensões σ_y em JSS com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0

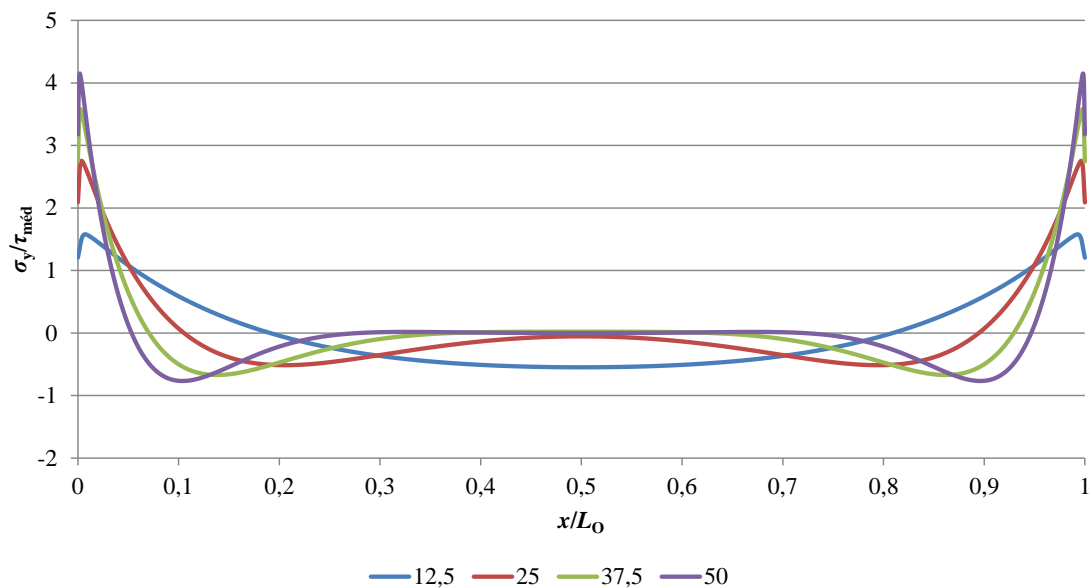


Figura 75 - Distribuição de tensões σ_y em JSS com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0

Observa-se que o adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta o maior gradiente de tensões σ_y para os diversos valores de L_0 . Isto justifica-se pela sua superior rigidez, que influencia a distribuição de tensões na camada adesiva, e que pode induzir à rotura prematura da mesma. Por outro lado, os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 revelam distribuições de tensões mais uniformes. Terminando, no contexto da análise das tensões σ_y , para o valor de $L_0=50$ mm, os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 apresentam valores de pico de tensão σ_y normalizada em tração de 12,6, 8,0 e de 4,1, respetivamente, o que condiz com a ordem decrescente de rigidez dos mesmos.

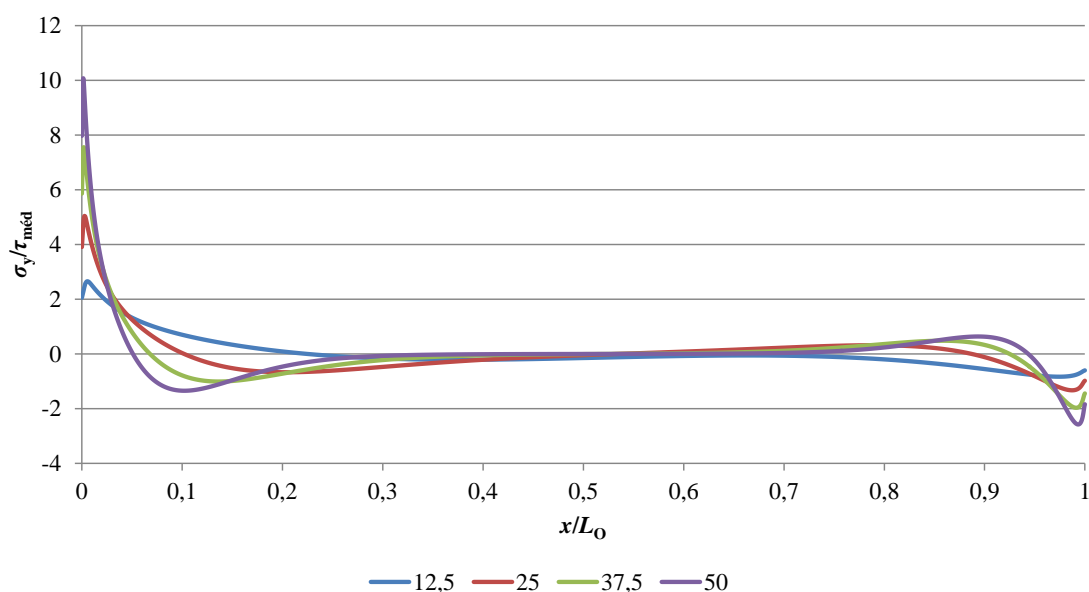


Figura 76 - Distribuição de tensões σ_y em JSD com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0

A Figura 76, Figura 77 e Figura 78 representam a distribuição das tensões σ_y para as JSD, com diversos adesivos e valores de L_0 . À semelhança das JSS, nestas juntas σ_y também regista uma magnitude inferior às tensões τ_{xy} , com exceção das extremidades da ligação devido à singularidade de tensão [103-105]. No entanto, o perfil de tensões das JSD não é totalmente semelhante ao das JSS. Na extremidade esquerda das JSD, correspondente à extremidade exterior da sobreposição, verificam-se picos de tração [108], e picos de compressão na extremidade interior da sobreposição [109]. Estas diferenças nos perfis de tensões devem-se sobretudo ao facto das JSD não apresentarem deflexão transversal do substrato interior devido ao carregamento simétrico [110, 111]. Isto promove uma redução generalizada das tensões de pico σ_y nas JSD em todos os valores de L_0 [112]. Já os valores das tensões σ_y na região central são aproximadamente nulos, com gradientes crescentes para as extremidades da ligação com o incremento de L_0 , à semelhança das JSS. Deste modo, as tensões compressivas na extremidade interna das JSD, combinadas com tensões de pico σ_y inferiores na extremidade externa face às JSS, deixam antever

benefícios significativos no que respeita à resistência da junta para a mesma área de ligação [109].

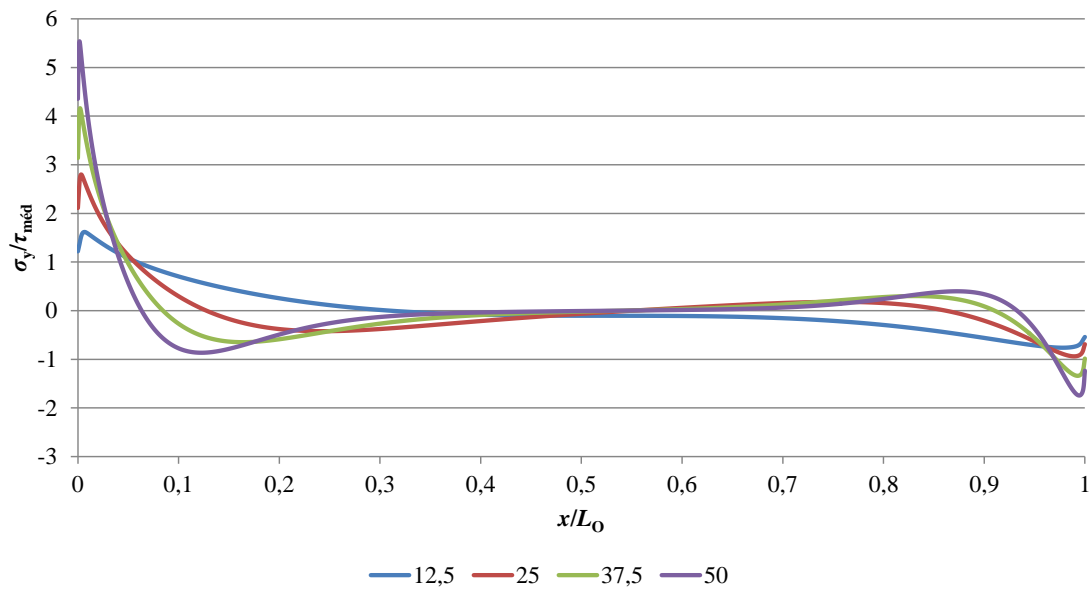


Figura 77 - Distribuição de tensões σ_y em JSD com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0

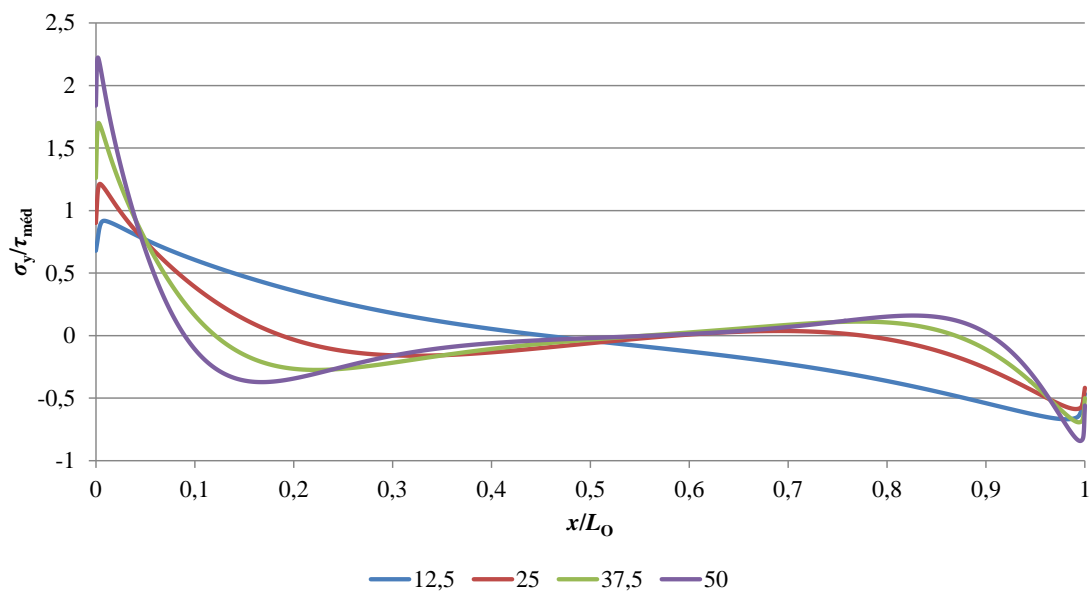


Figura 78 - Distribuição de tensões σ_y em JSD com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0

Fazendo uma analogia entre os três adesivos das JSD, denota-se que o adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta os valores de pico de tensão σ_y mais pronunciados na extremidade exterior. Isto verifica-se devido à elevada rigidez do adesivo, o que limita a uniformidade da distribuição de tensões ao longo da sobreposição. Para além disso,

como referido anteriormente para as JSS, uma elevada rigidez pode induzir à rotura prematura da junta.

Para o valor de $L_0=50$ mm, os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 apresentam respetivamente, valores de pico de tensão σ_y normalizados em tração de 10,0, 5,5 e de 2,2, o que condiz com a ordem decrescente de rigidez dos mesmos. Os valores de pico de tensão σ_y apresentados revelam um decréscimo, face aos homólogos das JSS, de aproximadamente 20,6%, 31,3% e de 46,3%, respetivamente.

3.2.5.2 Tensões de corte

Na Figura 79, Figura 80 e Figura 81 observam-se as distribuições de tensões τ_{xy} para os diversos adesivos e valores de L_0 (JSS). Na zona interior da sobreposição as tensões τ_{xy} possuem uma grandeza inferior a $\tau_{méd}$, excetuando nas extremidades da sobreposição, que constituem zonas de concentração de tensão [11, 104, 105]. Este comportamento ocorre devido à deformação diferencial longitudinal de cada um dos substratos ao longo da sobreposição, que é nula na extremidade livre dos mesmos e aumenta até à extremidade oposta [108, 113]. No entanto, na região central da sobreposição, o referido efeito é anulado, com o desenvolvimento de tensões τ_{xy} apenas devido ao esforço de tração aplicado na junta. Verifica-se ainda um aumento progressivo das tensões de pico τ_{xy} com o aumento de L_0 . Esta tendência deve-se ao gradiente crescente de deformações longitudinais dos substratos à medida que se aumenta o valor de L_0 , o que por sua vez é decorrente do aumento das áreas de ligação e cargas transmitidas [65]. À semelhança dos gradientes de tensões σ_y , verifica-se que os gradientes de tensão τ_{xy} são extremamente prejudiciais para a resistência das juntas, nomeadamente se forem utilizados adesivos frágeis, cuja fratura ocorre no momento em que é atingida τ_f e pela capacidade de plastificação quase nula destes adesivos [113]. Este efeito pode ser contornado pela utilização de adesivos dúcteis, uma vez que estes permitem a plastificação do adesivo e rotura da junta para valores mais elevados de $\tau_{méd}$ [114]. Tal verifica-se porque a capacidade de plastificação destes adesivos conduz a uma melhor redistribuição de tensões ao longo da sobreposição, enquanto a baixa rigidez contribui para um menor gradiente de tensões, o que se traduz num decréscimo de tensões τ_{xy} nas extremidades da sobreposição face aos adesivos frágeis, e simultaneamente num aumento das referidas tensões na região interna da sobreposição, o que culmina no aumento da resistência da junta [115, 116]. Deste modo, numa situação limite, toda a região da sobreposição estaria a ser solicitada no momento da rotura [114].

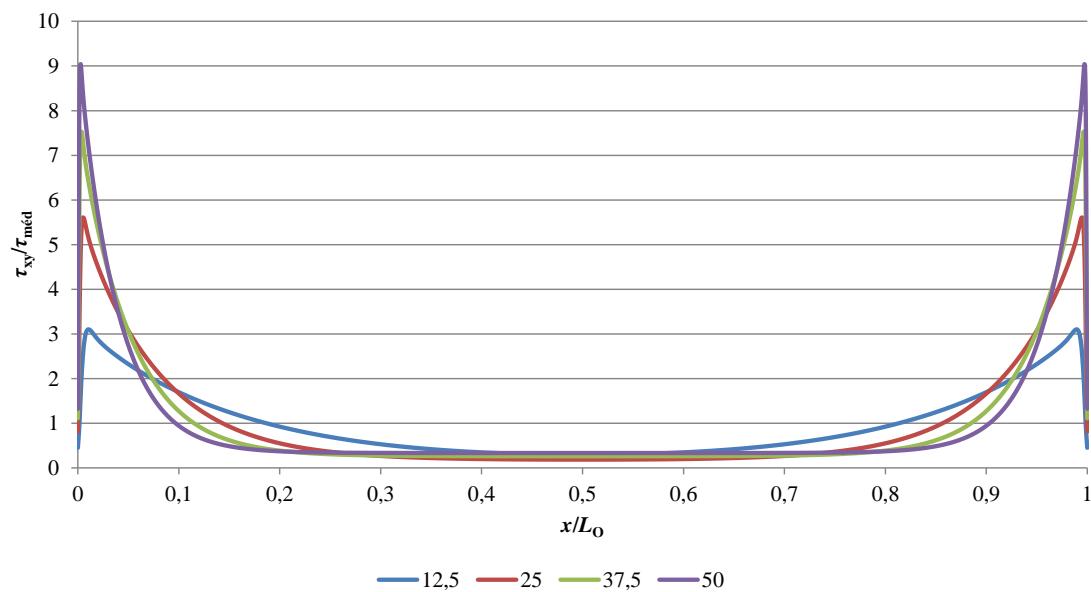


Figura 79 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0

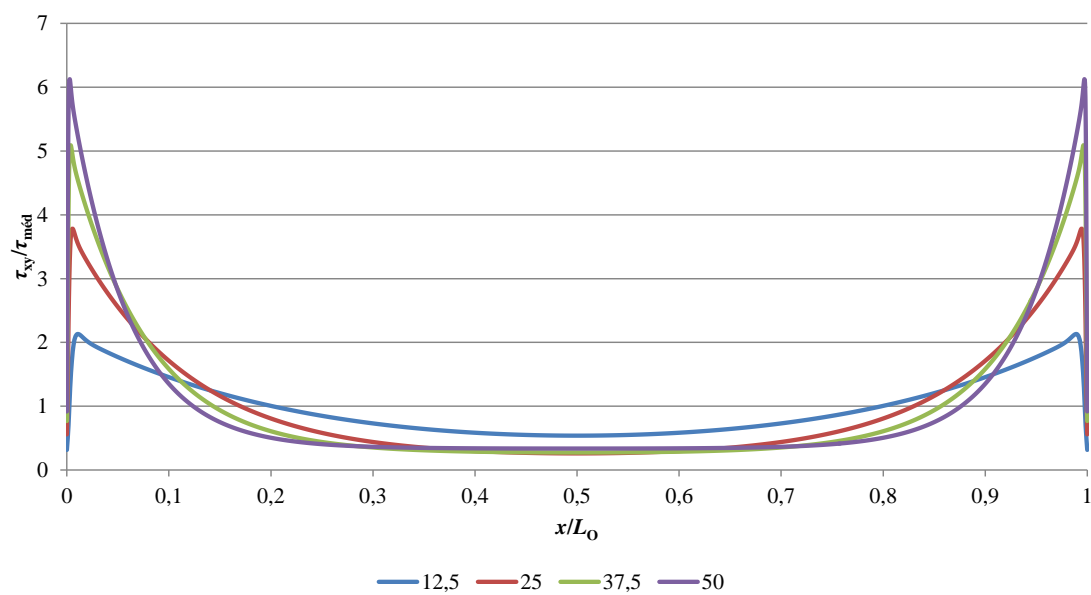


Figura 80 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0

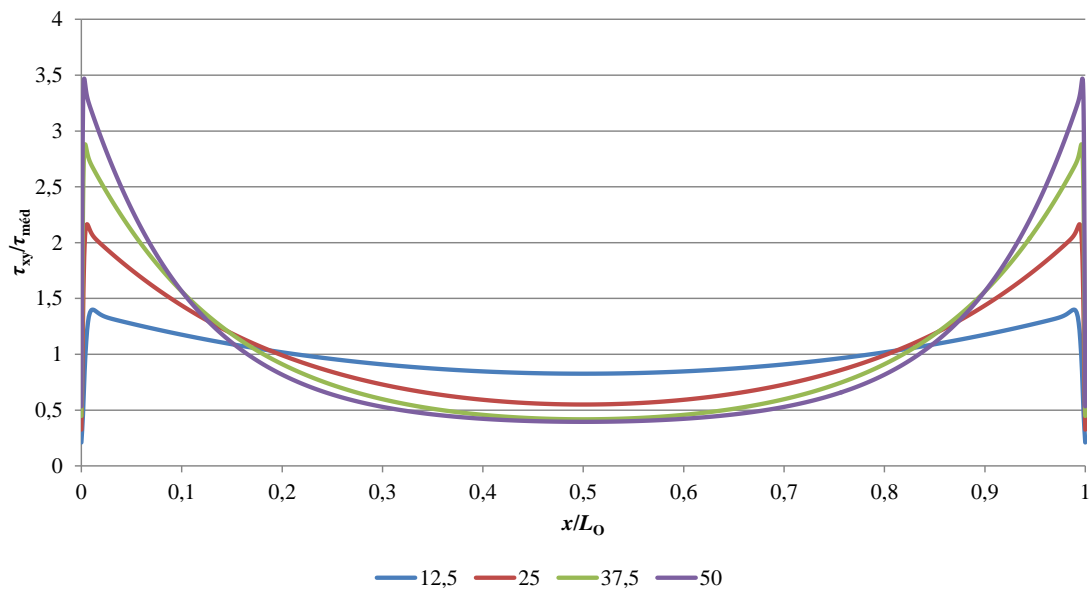


Figura 81 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0

Através da comparação entre as tensões τ_{xy} instaladas nos adesivos das JSS, denota-se que o adesivo mais frágil (Araldite® AV138) dos três adesivos é o que apresenta valores de pico superiores, o que corresponde a gradientes de tensões mais elevados ao longo da sobreposição. Estes factos devem-se sobretudo à elevada rigidez do adesivo em questão, que influencia a distribuição de tensões na camada adesiva. Para o valor de $L_0=50$ mm, os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 apresentam valores de pico de tensão τ_{xy} em tração de 9,04, 6,1 e de 3,5, respetivamente, o que condiz com a ordem decrescente de rigidez dos mesmos.

Na Figura 82, Figura 83 e Figura 84 estão representadas as distribuições de tensões τ_{xy} para as JSD, para os três adesivos e quatro valores de L_0 . Observa-se que a distribuição de tensões não é simétrica, contrariamente ao registado nas JSS. De facto, a extremidade exterior das JSD apresenta uma magnitude de tensões τ_{xy} bem superior à extremidade oposta, devido à solitação a que o substrato intermédio é sujeito, o que se traduz em cargas elevadas na proximidade de $x/L_0=0$. Comparando os picos das tensões τ_{xy} com os equivalentes nas JSS, denota-se que na extremidade interior de sobreposição ocorre um decréscimo significativo na magnitude dos mesmos. Já na extremidade exterior também se verifica uma diminuição do pico das tensões τ_{xy} , embora de forma menos significativa [117]. Esta diferença deve-se à menor variação das deformações longitudinais entre os dois substratos exteriores e o substrato interior, o que se traduz na redução do efeito da deformação diferencial dos mesmos [109]. As modificações no perfil de tensões τ_{xy} das JSD, devem-se refletir numa resistência da junta superior a 2 vezes a das JSS, correspondente à relação entre as áreas coladas de ambas as configurações de junta [116]. À semelhança do que se verificou nas JSS, o

aumento de $P_{\text{máx}}$ nas JSD também não deve ser proporcional ao aumento de L_0 , dado que os picos das tensões σ_y e τ_{xy} sofrem um acréscimo de intensidade com o aumento de L_0 . Isto será ainda mais evidente nas juntas com adesivos frágeis, uma vez que o adesivo não permitirá plastificação nas extremidades da sobreposição quando são atingidas as tensões limite [113].

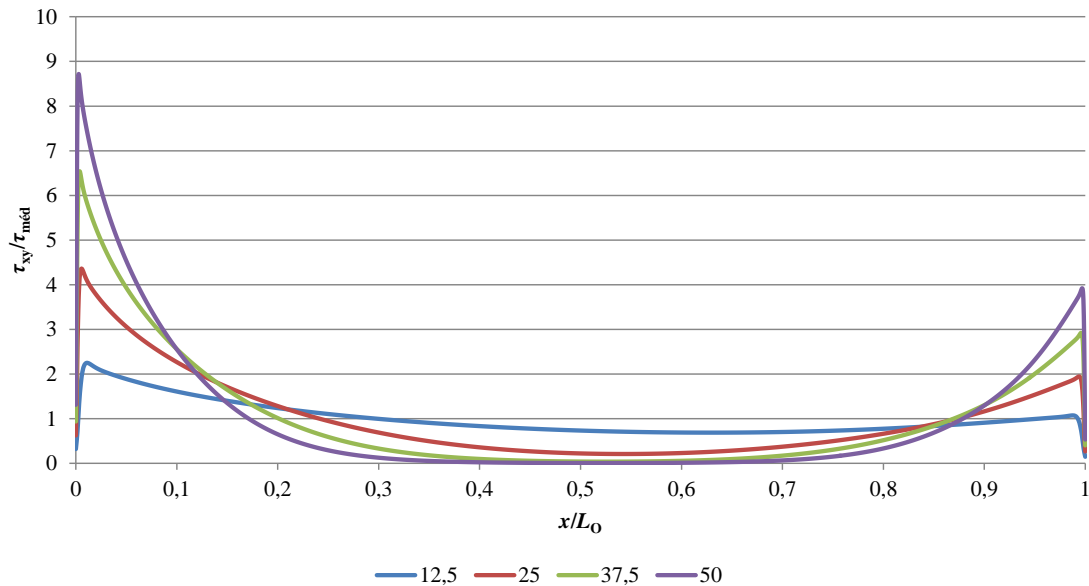


Figura 82 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSD com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0

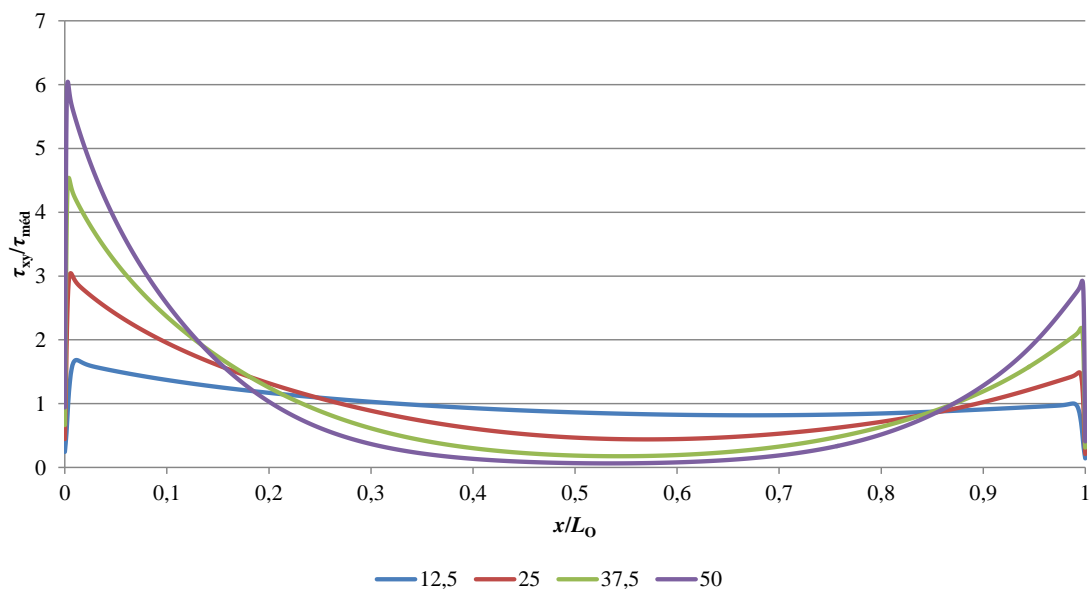


Figura 83 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSD com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0

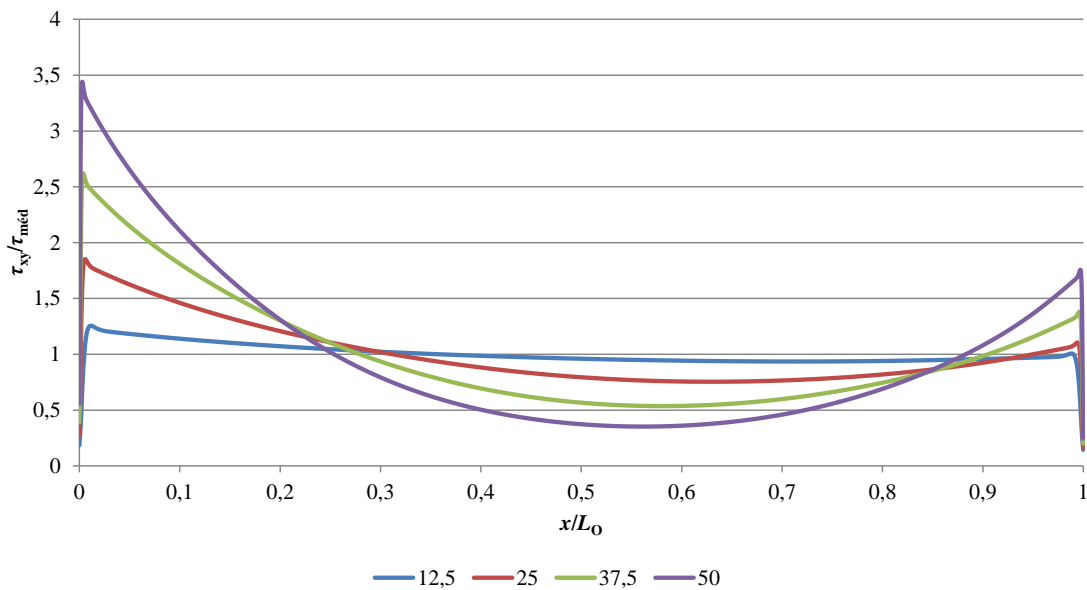


Figura 84 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSD com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0

Pela comparação entre os três adesivos ensaiados, observa-se que o adesivo Araldite® AV138, devido à sua fragilidade, é que apresenta o maior gradiente de tensões τ_{xy} , devido à sua rigidez. Para além disso, denota preponderância no que concerne às tensões de pico τ_{xy} nas extremidades da ligação.

Quantificando os picos de tensões τ_{xy} normalizada nas extremidades das JSD, para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, e $L_0=50$ mm, obtiveram-se valores de 8,72, 6,0 e 3,44, respetivamente. Esta variação está em concordância com a ordem de decrescente de rigidez dos adesivos, à semelhança do sucedido nas JSS. Comparando os valores de tensões τ_{xy} apresentados nas mesmas condições face às JSS, regista-se um decréscimo percentual nas referidas tensões de pico τ_{xy} de 3,7%, 2,17% e de 0,9%, respetivamente. Este decréscimo deve ser responsável por um aumento da resistência das JSD face às JSS com igual valor de L_0 superior a 2 vezes (relação de áreas coladas).

3.2.6 Estudo da variável de dano

O estudo da variável de dano SDEG dos elementos coesivos da camada de adesivo ao longo de x/L_0 é uma das ferramentas que ajuda à comparação entre JSS e JSD. Esta variável varia entre SDEG=0 (material não danificado) até SDEG=1 (rotura completa) e fornece a degradação da rigidez da lei coesiva em modo misto do MDC. A Figura 85 apresenta a variável de dano na camada de adesivo no instante em que $P_{m\acute{a}x}$ é obtido para as JSS [118], sendo que nesta análise só se consideram os valores menores e maiores de L_0 (12,5 e 50 mm), uma vez que representam os comportamentos limite das

juntas, enquanto as juntas entre estes valores extremos mostram um comportamento intermédio entre estas configurações de juntas.

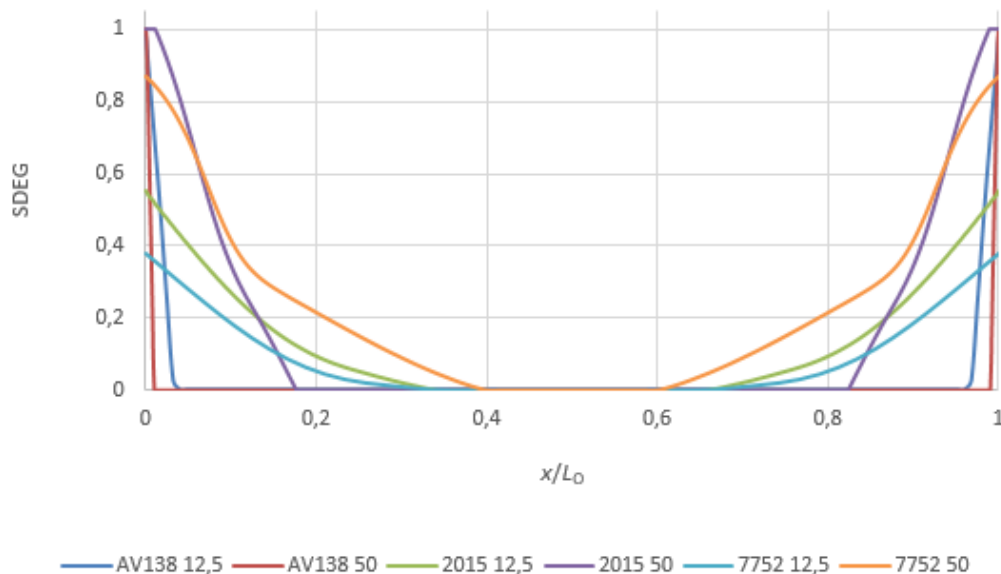


Figura 85 - Variável de dano na camada de adesivo no instante em que $P_{m\acute{a}x}$ é atingido para as JSS [118]

Através da análise da Figura 85, é possível verificar que o dano se estende por uma área mais alargada para $L_0=12,5$ mm, porque o gradiente das tensões τ_{xy} (que governam o processo de rotura) é menor para L_0 reduzidos, exceto para o Sikaforce® 7752, devido à grande ductilidade deste adesivo. Comparando os três adesivos usados, verifica-se que a curva da variável de dano se torna mais plana ao longo de L_0 para o adesivo Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 devido à capacidade de plastificação e redistribuição de tensões destes adesivos. Este comportamento é responsável pelo elevado valor de $P_{m\acute{a}x}$ obtido para estes dois adesivos. Para o Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm, $P_{m\acute{a}x}$ ocorre sem que se observe dano total em qualquer porção de L_0 , devido à grande ductilidade do adesivo. Por outro lado, este valor é de 2,0% para o Araldite® 2015 e quase nulo para a Araldite® AV138.

A análise da evolução da variável de dano com o carregamento aplicado é também bastante útil. Este estudo foi realizado para as JSS [118] e apenas para os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. A variável de dano é representada para valores crescentes de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}} \times 100$ [%], onde $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ é o deslocamento em $P_{m\acute{a}x}$ (como resultado, um valor de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ de 100% corresponde a $P_{m\acute{a}x}$).

Para as JSS e o adesivo Araldite® AV138 (Figura 86), por este ser um adesivo frágil, o valor de SDEG na sobreposição varia entre SDEG=0 (ausência de dano) e SDEG=1 (dano completo) numa extensão muito reduzida, o que resulta numa zona de dano muito pequena. O valor de $P_{m\acute{a}x}$ é atingido com um grau insignificante de plastificação do adesivo nas extremidades de sobreposição. Este comportamento é responsável pelo

aumento reduzido de $P_{\text{máx}}$ com L_0 . A rotura completa ocorre muito rapidamente (entre $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}=100\%$ e $101,24\%$ para $L_0=12,5$ mm e entre 100% e $102,47\%$ para $L_0=50$ mm).

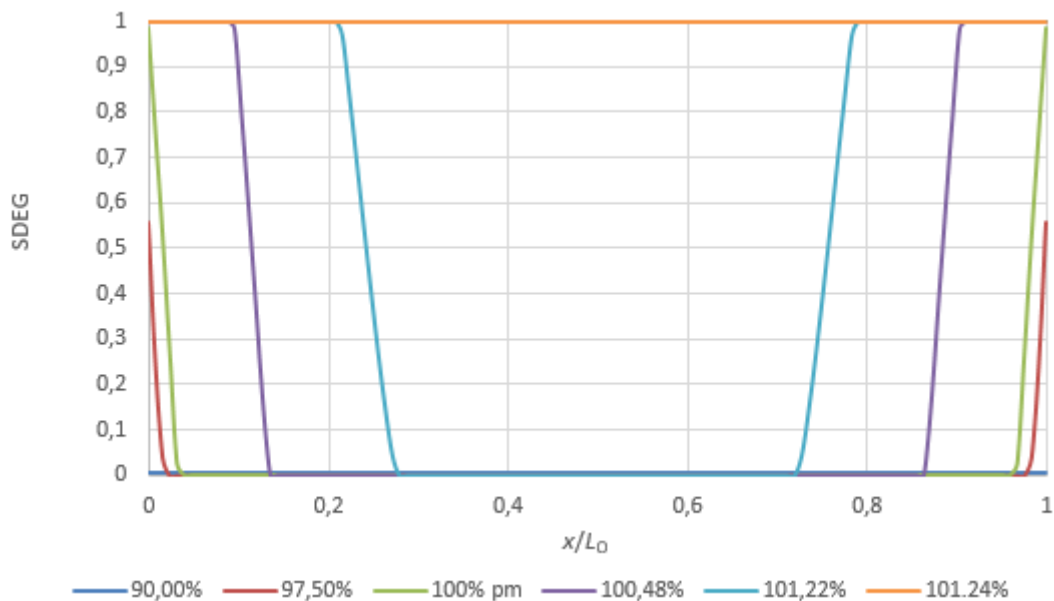


Figura 86 - Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Araldite® AV138 para $L_0=12,5$ mm

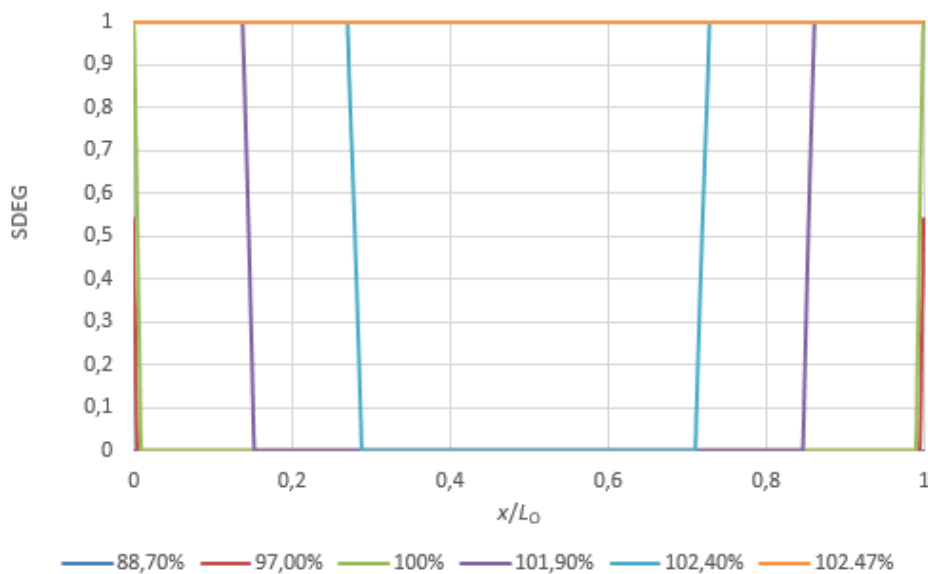


Figura 87 - Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Araldite® AV138 para $L_0=50$ mm

A principal diferença para as JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 (Figura 88 e Figura 89) foi a variação mais gradual de SDEG através da zona adesiva. Este fenómeno acontece devido a este adesivo ter uma ductilidade significativa. Para $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}=100\%$, por exemplo, apenas uma fração de $\approx 21,7\%$ ($L_0=12,5$ mm) e $19,9\%$ ($L_0=50$ mm) da sobreposição está sem dano. A porção restante da sobreposição está na fase de amaciamento da lei coesiva ou já atingiu mesmo a rotura. Para $L_0=12,5$ mm, a rotura

completa ocorreu em $\delta/\delta_{p_{\max}} \approx 162,63\%$, enquanto para $L_0=50$ mm corresponde a um $\delta/\delta_{p_{\max}} \approx 102,71\%$, o que corresponde a um processo de rotura muito mais gradual do que para o Araldite® AV138.

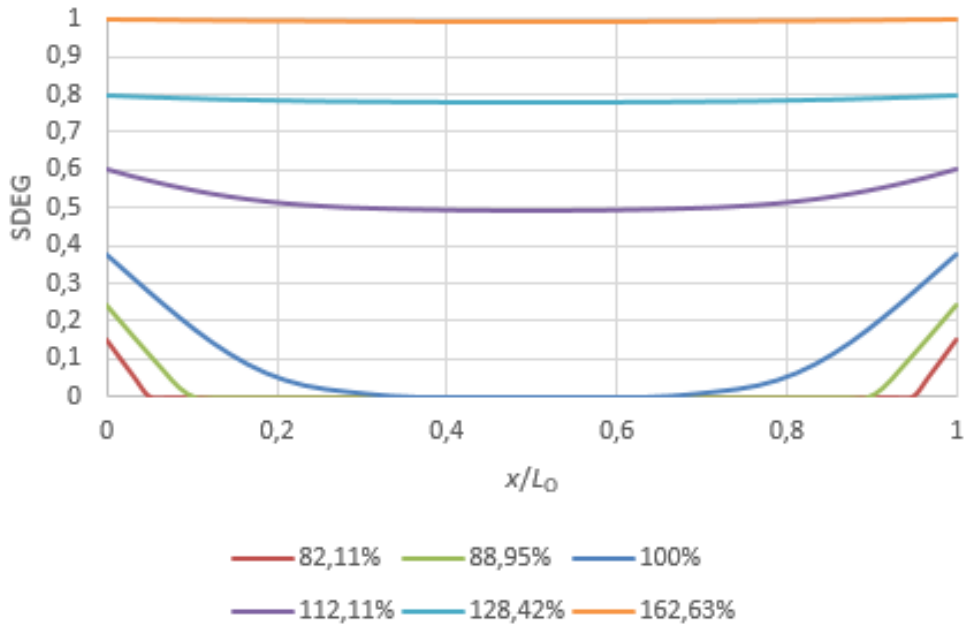


Figura 88 - Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Sikaforce® 7752 para $L_0=12,5$ mm

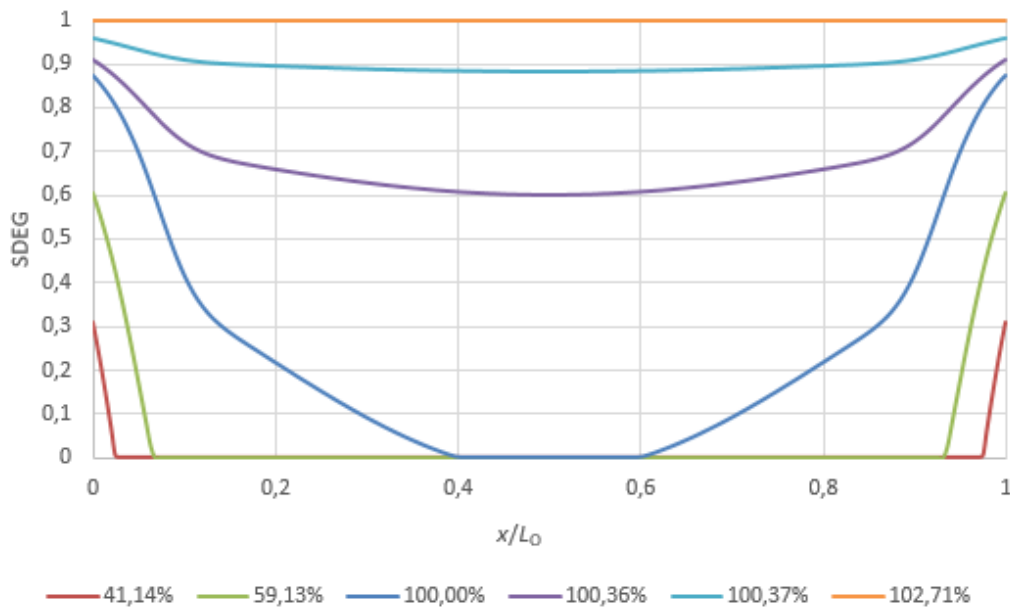


Figura 89 - Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Sikaforce® 7752 para $L_0=50$ mm

Para as JSD (Figura 90) e para todos os adesivos, considerando o instante de P_{\max} , o dano propaga-se ao longo da zona colada numa extensão que depende do adesivo utilizado, e este deixa de ser simétrico devido às distribuições também assimétricas das tensões

σ_y e τ_{xy} ao longo da sobreposição (Figura 76 a Figura 78 e Figura 82 a Figura 84). De facto, devido à maior deformação longitudinal dos substratos na extremidade exterior da sobreposição, as tensões σ_y e τ_{xy} concentram-se nesta zona, tornando este o local do início do dano. Tal como nas JSS, o dano apresenta uma distribuição mais uniforme para $L_0=12,5$ mm do que para 50 mm, devido à menor magnitude dos picos de tensões σ_y e τ_{xy} . Pela comparação das configurações de junta com $L_0=12,5$ e 50 mm, e ao contrário do observado nas JSS, no instante em que $P_{m\acute{a}x}$ é atingida, a extensão do dano para o interior da zona colada nem sempre é maior para as juntas com $L_0=50$ mm, dependendo antes do adesivo. O elevado grau de dano para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 quando $P_{m\acute{a}x}$ é atingido para $L_0=12,5$ ou 50 mm é indicativo do elevado grau de plastificação até à rotura e, correspondentemente, dos valores mais elevados de $P_{m\acute{a}x}$ que se esperam relativamente ao adesivo Araldite® AV138. De igual forma às JSS, os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 possibilitam que uma região plástica considerável contribua para a resistência das juntas, ao contrário do adesivo frágil Araldite® AV138, que concentra o dano na extremidade da sobreposição. Quando o $P_{m\acute{a}x}$ é atingido, as juntas adesivas com o Araldite® 2015 e $L_0=50$ mm apresentam dano total em 35,1% na zona de ligação, comparado com os 10,7% para as juntas com o Araldite® AV138. Relativamente às juntas adesivas com o Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm o dano chega a 79% verificando-se a partir desse ponto uma estrição do substrato.

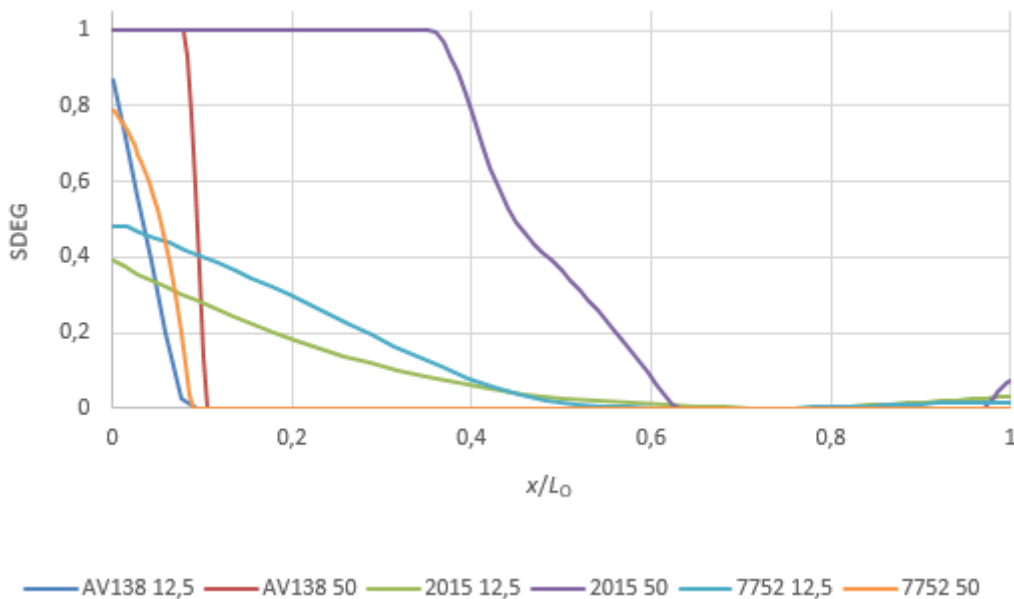


Figura 90 - Variável de dano na camada de adesivo no instante em que se atinge $P_{m\acute{a}x}$ para as JSD

Apresenta-se na Figura 91 e Figura 92 a evolução de SDEG com $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ para o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm e 50 mm, respetivamente. As Figura 93 e Figura 94 representam uma análise idêntica para o adesivo Sikaforce® 7752. Para as JSD coladas com o Araldite® AV138, a rápida variação de SDEG desde o estado não danificado até

dano completo que se observou para as JSS é também observada nestas juntas, especialmente para $L_0=50$ mm. Como resultado, a rotura destas juntas ocorre com um grau muito pequeno de plastificação. Para $L_0=12,5$ mm, a rotura completa ocorreu a menos de 100,1% de $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}$, enquanto para $L_0=50$ mm este valor aumentou para 110,9%. Comparando com as configurações de junta correspondentes das JSS [118], além da ausência de simetria nos gráficos de dano, $P_{\text{máx}}$ é atingido com maior (mas ainda reduzida) porção de dano na sobreposição, o que é resultado da melhoria nas distribuições das tensões das JSD relativamente às JSS. Esta diferença deve ser responsável por valores de $P_{\text{máx}}$ superiores em mais de 2× aos apresentados para as JSS. Em comparação com o Araldite® AV138, o dano do Sikaforce® 7752 estende-se muito mais gradualmente através das juntas devido à capacidade de plastificação deste adesivo. Também devido a este facto, para $P_{\text{máx}}$ ($\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}=100\%$) e para $L_0=12,5$ mm, só $\approx 16\%$ do adesivo está sem dano. Para $L_0=50$ mm, este valor é $\approx 91\%$. Comparando com os resultados das JSS [118], deixa de haver simetria nas curvas de dano. A rotura completa ocorre para $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}} \approx 166,91\%$ para as juntas com $L_0=12,5$ mm, e para $L_0=50$ mm não ocorre rotura completa, devido à estrição ocorrida no substrato, já anteriormente explicada. O valor menor de $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}$ para valores maiores de L_0 é justificado pela plastificação do substrato interior, o que desencadeia uma rotura prematura do adesivo. Contudo, em ambos os casos a rotura é muito mais progressiva do que para o adesivo Araldite® AV138. A quantidade significativa de dano completo para $L_0=50$ mm e para $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}=100\%$ (31,1%) é o resultado da plastificação do substrato interior, que reduz o valor efetivo de L_0 que contribui para $P_{\text{máx}}$. Isto irá provavelmente conduzir a um rácio de resistência entre esta JSD e a JSS correspondente menor do que a relação de área colada, de 2×, entre estas duas configurações de junta.

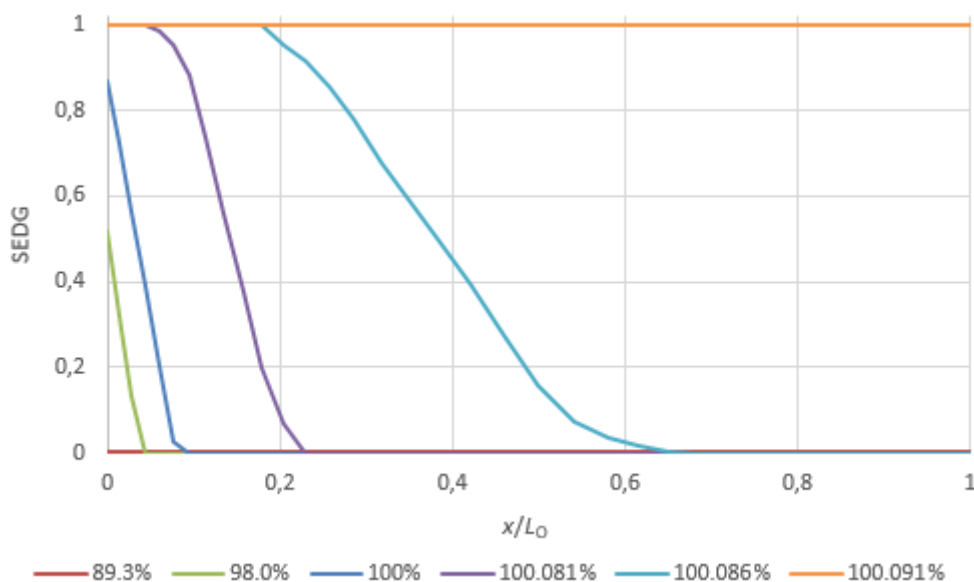


Figura 91 - Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ para as JSD com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm

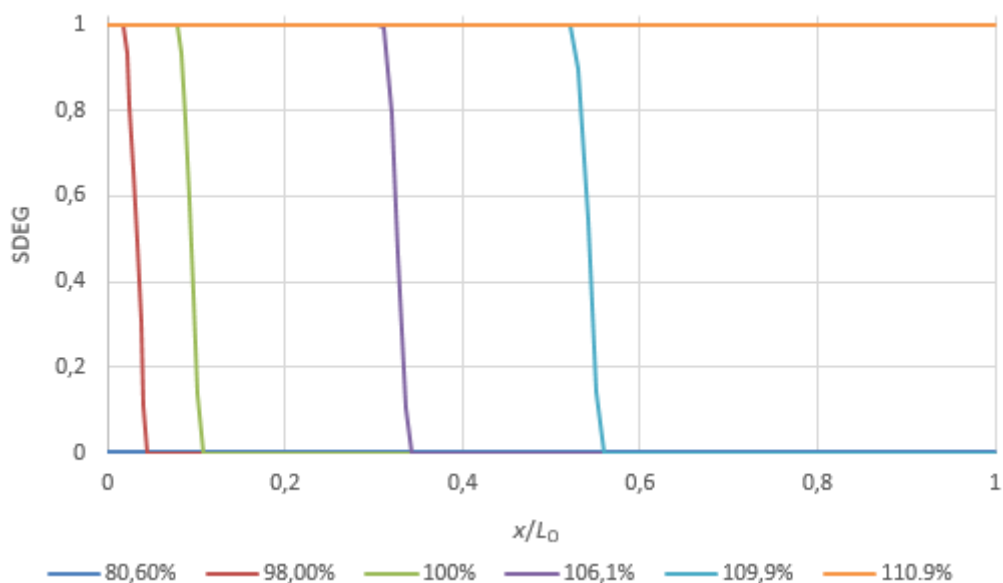


Figura 92 - Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ para as JSD com Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm

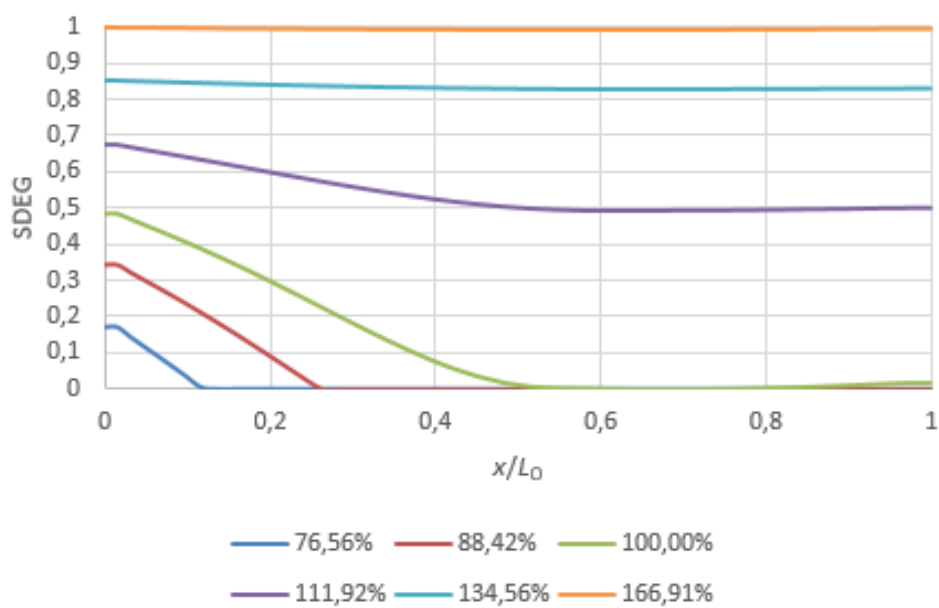


Figura 93 - Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ para as JSD com Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm

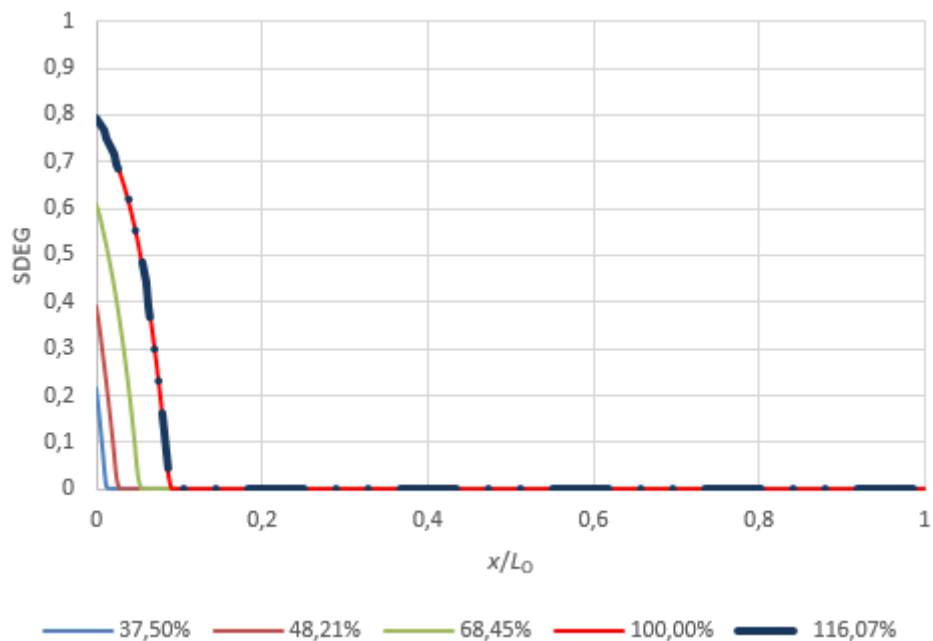


Figura 94 - Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ para as JSD com Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm

3.2.7 Previsão da resistência

3.2.7.1 Araldite® AV138

Na Figura 95 são apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas relativas a cada um dos ensaios realizados com adesivo Araldite® AV138 nas JSS.

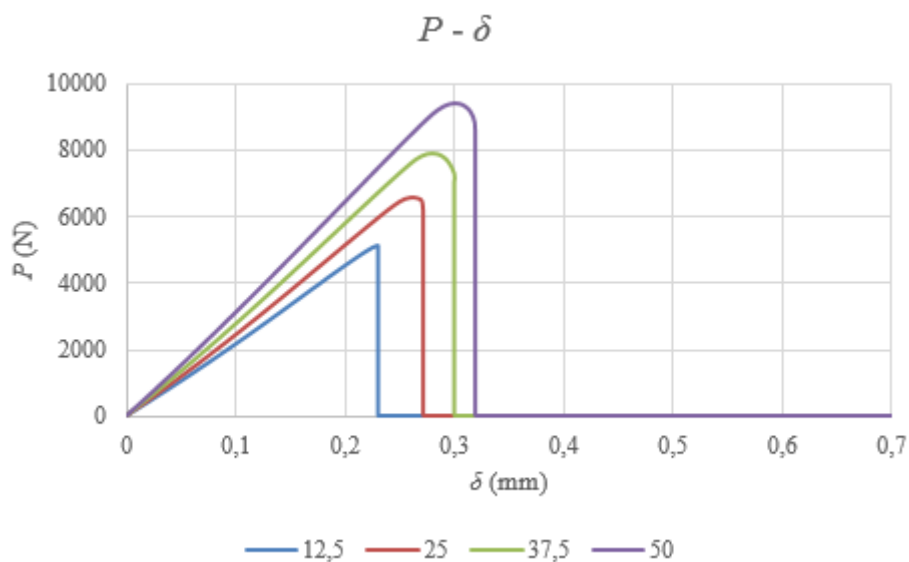


Figura 95 – Curvas $P-\delta$ para os respectivos L_0 do adesivo Araldite® AV138 nas JSS

Tal como se pode ver através de uma breve análise aos gráficos, verifica-se que todas as curvas $P-\delta$ apresentam no geral o mesmo comportamento, embora com valores de $P_{\text{máx}}$ distintos. De notar que as curvas $P-\delta$ apresentam duas fases distintas. Na primeira fase observa-se um regime elástico. Esta fase tem um comportamento reversível, em que a relação entre P e δ é linear. Na segunda fase verifica-se uma perda de linearidade na zona da carga máxima ($P_{\text{máx}}$) (Tabela 40), correspondente a um processo irreversível. No final existe uma queda abrupta, originada pela rotura total do provete.

Tabela 40 – Valores de $P_{\text{máx}}$ do adesivo Araldite® AV138 nas JSS

| L_0 [mm] | $P_{\text{máx}}$ [N] |
|------------|----------------------|
| 12,5 | 5105,69 |
| 25 | 6551,16 |
| 37,5 | 7932,24 |
| 50 | 9391,54 |

Na Figura 96 são apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas relativas a cada um dos ensaios realizados com o adesivo Araldite® AV138 nas JSD.

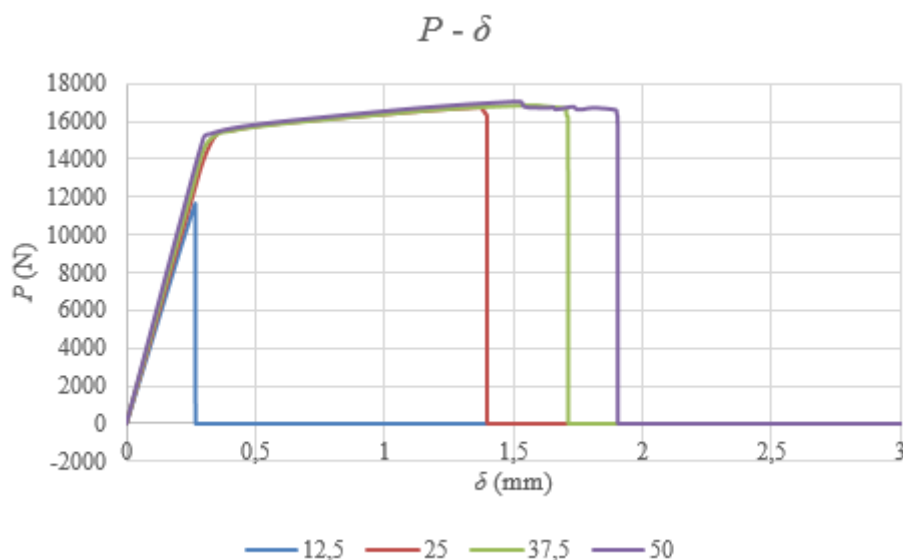


Figura 96 - Curvas $P-\delta$ para os respetivos L_0 do adesivo Araldite® AV138 nas JSD

Tal como se pode ver através de uma breve análise aos gráficos, verifica-se comportamentos semelhantes para as curvas $P-\delta$ relativas a $L_0=25$ mm, 37,5 mm e 50

mm. O mesmo não se verifica para $L_0=12,5$ mm, no qual o adesivo apresenta valores de carga máxima bastante inferiores aos seguintes comprimentos. Tal como nas JSS, as curvas $P-\delta$ da JSD com $L_0=12,5$ mm apresentam as mesmas duas fases. Por outro lado, para os restantes valores de L_0 , registam-se três fases. Na primeira fase observa-se um regime elástico. Na segunda fase verifica-se uma perda de linearidade na zona de $P_{\text{máx}}$ (Tabela 41), correspondente a um processo irreversível. Na terceira fase verifica-se um patamar devido à plastificação ao substrato. No final do patamar o adesivo não consegue acompanhar as deformações implícitas, provocando uma queda abrupta, originada pela rotura total do provete.

Tabela 41 - Valores de $P_{\text{máx}}$ do adesivo Araldite® AV138 nas JSD

| L_0 [mm] | $P_{\text{máx}}$ [N] |
|------------|----------------------|
| 12,5 | 11628,67 |
| 25 | 16669,28 |
| 37,5 | 16885,42 |
| 50 | 17022,17 |

3.2.7.2 Araldite® 2015

Na Figura 97 são apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas para o adesivo Araldite® 2015 (JSS).

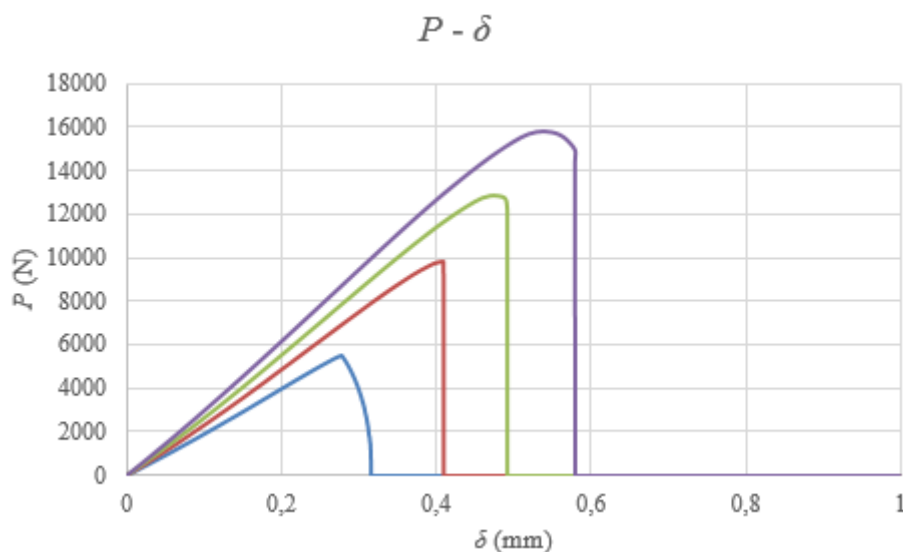


Figura 97 - Curvas $P-\delta$ para os respetivos L_0 do adesivo Araldite® 2015 nas JSS

Os gráficos apresentam duas fases distintas. Numa primeira fase, que corresponde ao regime elástico, verifica-se que a evolução de P com δ tem um comportamento reversível. A segunda fase corresponde ao início de propagação da fenda, provocando consequentemente uma queda abrupta, originada pela rotura do provete. A Tabela 42 apresenta os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos para cada L_0 . Relativamente ao Araldite® AV138, este adesivo apresenta valores mais altos de $P_{\text{máx}}$ e também maiores deslocamentos.

Tabela 42 - Valores de $P_{\text{máx}}$ do adesivo Araldite® 2015 nas JSS

| L_0 [mm] | $P_{\text{máx}}$ [N] |
|------------|----------------------|
| 12,5 | 5509,74 |
| 25 | 9782,47 |
| 37,5 | 12873,71 |
| 50 | 15822,38 |

Na Figura 98 são apresentadas as curvas P - δ obtidas para o adesivo Araldite® 2015 (JSD).

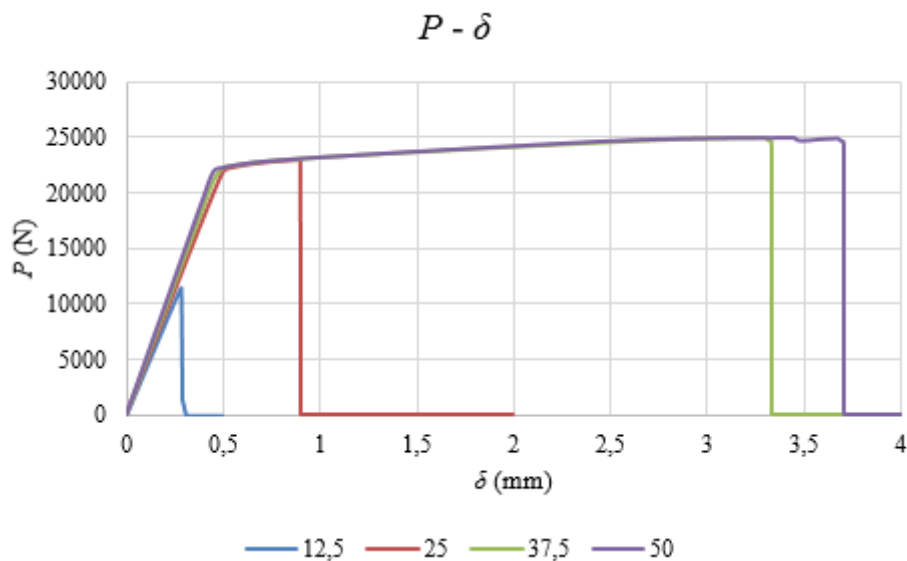


Figura 98 - Curvas P - δ para os respetivos L_0 do adesivo Araldite® 2015 nas JSD

Através da análise do gráfico verifica-se alguns comportamentos distintos, mais concretamente, nos $L_0=12,5$ mm e $L_0=25$ mm. Relativamente ao comprimento de sobreposição de 12,5 mm regista-se um valor de $P_{\text{máx}}$ bastante inferior aos restantes. No que toca ao comprimento de 25 mm registam-se valores de $P_{\text{máx}}$ idênticos aos seguintes

L_0 , porém, verificam-se deslocamentos bastante inferiores. Apesar destas diferenças, é possível verificar as três fases distintas. A primeira fase corresponde à evolução de P com δ . Na segunda fase, tal como no adesivo Araldite® AV138, também se verifica a criação de um patamar referente à plastificação do substrato. Posteriormente, verifica-se a queda abrupta de P , correspondente à rotura do provete. Na Tabela 43 são apresentados os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos para cada L_0 .

Tabela 43 - Valores de $P_{\text{máx}}$ do adesivo Araldite® 2015 nas JSD

| L_0 [mm] | $P_{\text{máx}}$ [N] |
|------------|----------------------|
| 12,5 | 11425,77 |
| 25 | 22936,35 |
| 37,5 | 24883,89 |
| 50 | 24976,59 |

3.2.7.3 Sikaforce® 7752

Na Figura 99 são apresentadas as curvas P - δ correspondentes a cada um dos L_0 com o adesivo SikaForce® 7752 para as JSS.

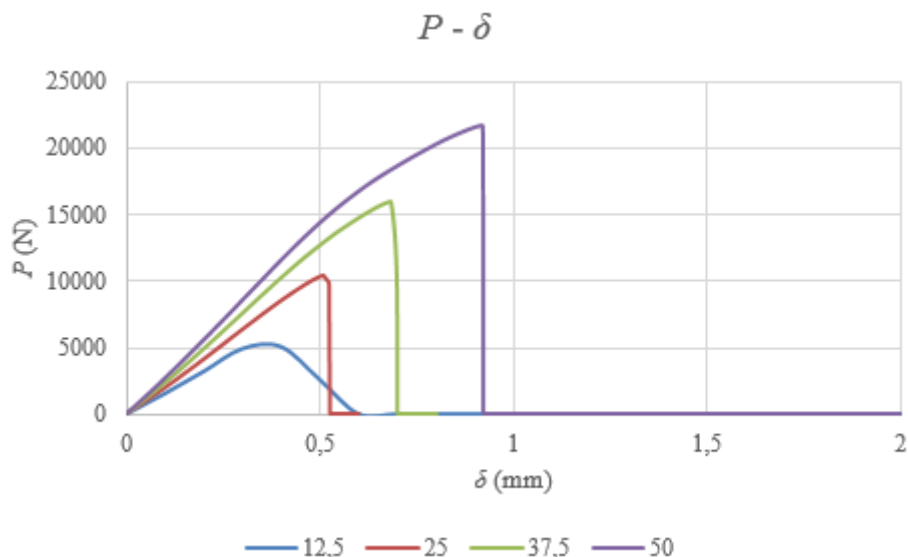


Figura 99 - Curvas P - δ para os respetivos L_0 do adesivo Sikaforce® 7752 nas JSS

Com a análise das curvas $P-\delta$ é possível verificar duas fases distintas. Na primeira fase verifica-se a evolução de P com δ é linear, com um comportamento claramente reversível, ou seja, o comportamento é elástico. Na segunda fase, um pouco antes de $P_{\text{máx}}$, ocorre uma ligeira perda de linearidade, após a qual existe uma queda abrupta, originada pela rotura total do provete. Na Tabela 44 são exibidos os valores de $P_{\text{máx}}$ para cada valor de L_0 .

Tabela 44 - Valores de $P_{\text{máx}}$ do adesivo Sikaforce® 7752 nas JSS

| L_0 [mm] | $P_{\text{máx}}$ [N] |
|------------|----------------------|
| 12,5 | 5029,08 |
| 25 | 10507,41 |
| 37,5 | 15964,37 |
| 50 | 21687,69 |

A Figura 100 apresenta as curvas $P-\delta$ correspondentes a cada um dos L_0 com o adesivo SikaForce® 7752 para as JSD.

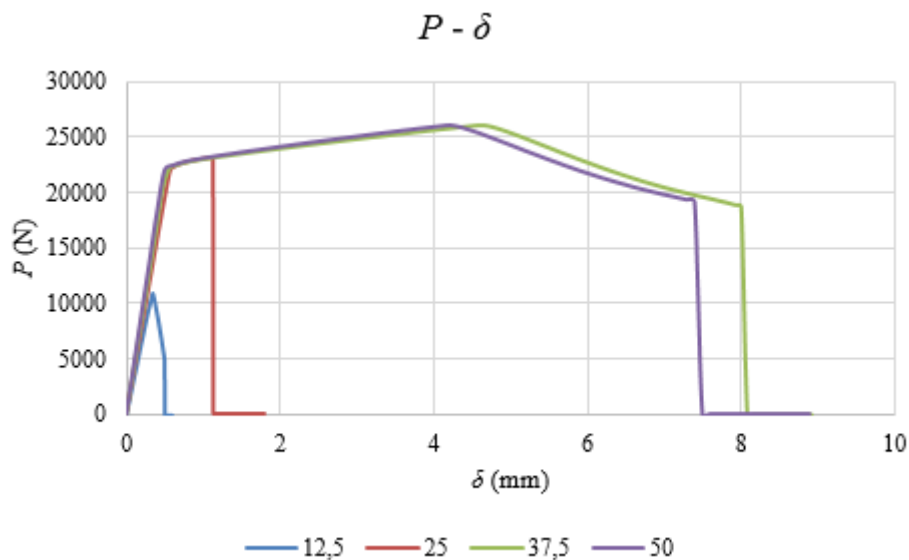


Figura 100 - Curvas $P-\delta$ para os respetivos L_0 do adesivo Sikaforce® 7752 nas JSD

À exceção de $L_0=12,5$ mm, que apresenta duas fases, as curvas $P-\delta$ permitem o reconhecimento de três fases, sendo que na primeira fase a evolução de P com δ é linear, com um comportamento claramente reversível, ou seja, o comportamento é

elástico. A segunda fase corresponde a um decréscimo no crescimento das curvas P - δ em relação ao P , onde se verifica a obtenção de $P_{\text{máx}}$ (Tabela 45). Após $P_{\text{máx}}$ ser atingida, ocorre a terceira fase, na qual se verifica uma queda progressiva de P . Posteriormente ocorre uma queda abrupta, originada pela rotura total do provete.

Tabela 45 - Valores de $P_{\text{máx}}$ do adesivo Sikaforce® 7752 nas JSD

| L_0 [mm] | $P_{\text{máx}}$ [N] |
|------------|----------------------|
| 12,5 | 10893,79 |
| 25 | 23090,68 |
| 37,5 | 26139,81 |
| 50 | 26137,29 |

3.2.8 Análise dos resultados obtidos

Na Figura 101 são apresentadas as curvas obtidas experimentalmente para cada tipo de adesivo, nomeadamente, Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Na análise do gráfico verifica-se que $P_{\text{máx}} \text{ médio}$ depende nitidamente do adesivo em questão. Relativamente aos valores de $L_0=12,5$ mm, os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 são os que mais se destacam em relação à resistência oferecida pelas juntas, seguidos do Sikaforce® 7752. Neste contexto, o adesivo Araldite® AV138 demarca-se ligeiramente do Araldite® 2015, com uma diferença percentual de 2,5%, e do Sikaforce® 7752, com um desvio percentual de 49,5%. Para o valor de $L_0=25$ mm, o adesivo Araldite® AV138 é ultrapassado em termos de resistência pelo Sikaforce® 7752 e pelo Araldite® 2015, apresentando um acréscimo percentual de 6,5% e 40,7%, respetivamente. Relativamente ao $L_0=37,5$ mm, o Araldite® AV138 é o menos resistente, apresentando valores de $P_{\text{máx}} \text{ médio}$ de aproximadamente 8 kN, sendo visivelmente ultrapassado pelo Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015, que apresentam desvios percentuais de 34,4% e 52,6%, respetivamente. Quando comparados os valores de $L_0=50$ mm é possível verificar que esta diferença entre o adesivo Araldite® AV138 e os adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 é ainda mais notória, porque os adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 apresentam valores de $P_{\text{máx}} \text{ médio}$ claramente superiores ao Araldite® AV138, situados na ordem dos 14 kN e 15 kN, respetivamente, e que correspondem a desvios percentuais de 54,0% e 62,5% quando comparados com o Araldite® AV138.

Assim sendo, verifica-se que o adesivo que apresenta maior proporcionalidade no aumento de $P_{\text{máx}} \text{ médio}$ em função de L_0 é o Sikaforce® 7752, seguido do Araldite® 2015 e

finalmente do Araldite® AV138. Além disto, é também possível observar que o adesivo Araldite® AV138 é o adesivo que apresenta menor aumento de $P_{\text{máx médio}}$ entre valores limite de L_0 .

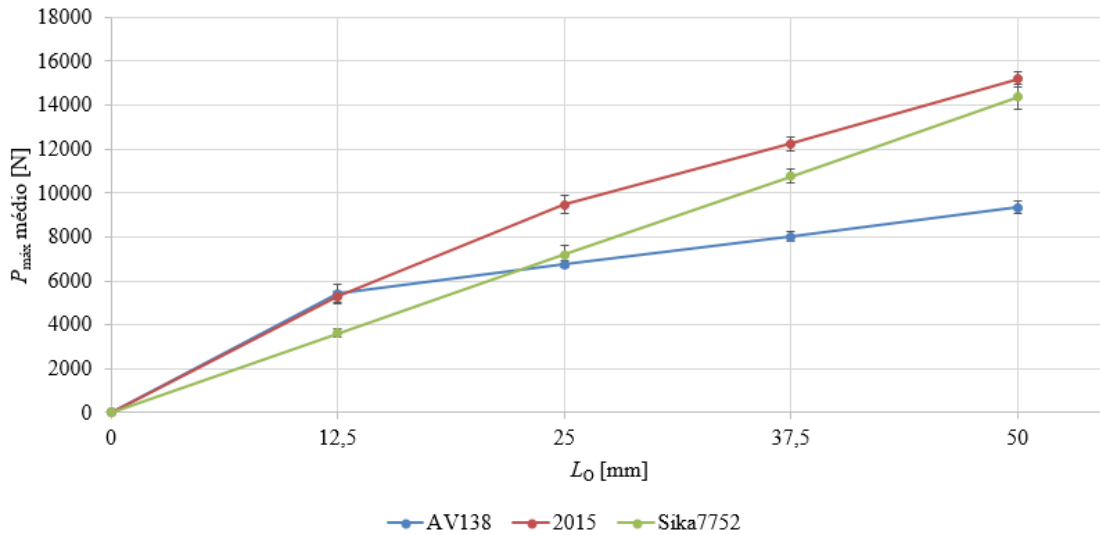


Figura 101 – Curvas numéricas $P_{\text{máx médio}} - L_0$ para cada adesivo nas JSS

A Figura 102 apresenta a comparação entre os valores numéricos e experimentais nas JSS do adesivo Araldite® AV138, onde se pode observar uma excelente concordância de resultados.

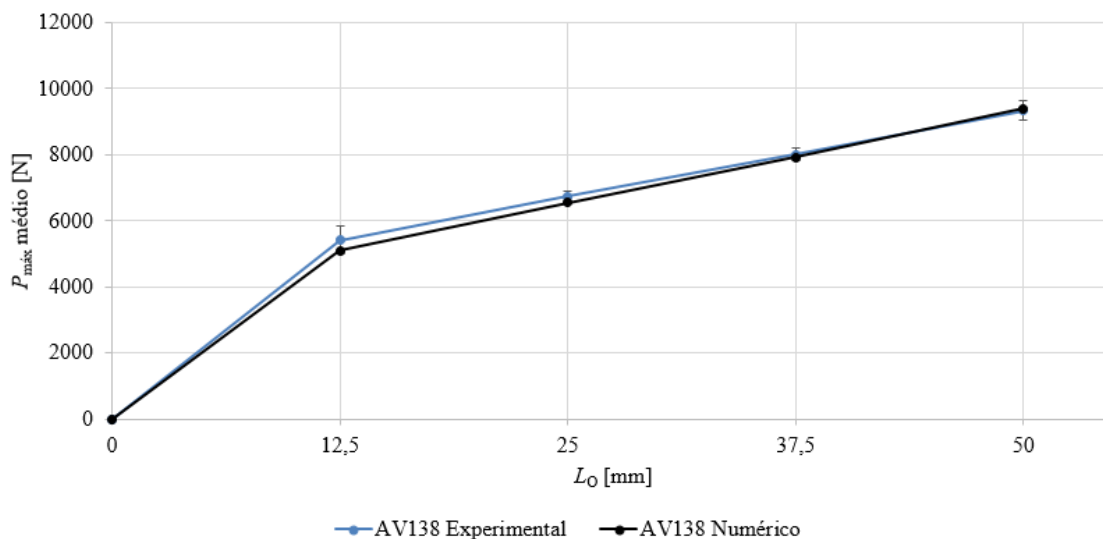


Figura 102 - Comparação entre as curvas $P_{\text{máx médio}} - L_0$ experimentais e numéricas para o adesivo Araldite® AV138 nas JSS

É para $L_0=12,5$ mm que se apresenta o maior desvio percentual, sendo ele igual a -5,82%, apresentando um valor numérico de $P_{\text{máx médio}}$ na ordem dos 5,1 kN. Relativamente a

$L_0=25$ mm regista-se um desvio percentual de -2,78% com um valor numérico de $P_{\text{máx médio}}$ de aproximadamente 6,6 kN. No que toca aos seguintes L_0 (37,5 mm e 50 mm) verifica-se um decréscimo nos desvios percentuais (-1,05% e 0,53%, respetivamente) e um aumento do valor numérico de $P_{\text{máx médio}}$ (7932,2 kN e 9391,5 kN, respetivamente).

A Figura 103 apresenta a comparação entre os resultados experimentais com os numéricos das JSS relativas ao adesivo Araldite® 2015 na qual, tal como na Figura 102 (Araldite® AV138), se regista uma excelente aproximação dos valores numéricos com os valores experimentais. De facto, o maior desvio percentual é de cerca 5,22% com um $P_{\text{máx médio}}$ de aproximadamente 12,8 kN, correspondente a $L_0=37,5$ mm. Relativamente aos outros L_0 verifica-se, para $L_0=12,5$ mm, um valor de $P_{\text{máx médio}} \approx 5,5$ kN com um desvio percentual de 4,20% e, para $L_0=25$ mm, um valor de $P_{\text{máx médio}} \approx 9,8$ kN com um desvio percentual de 3,18%. Por último, para $L_0=50$ mm, o valor de $P_{\text{máx médio}}$ registado foi de 15,8 kN com desvio percentual de 4,21%.

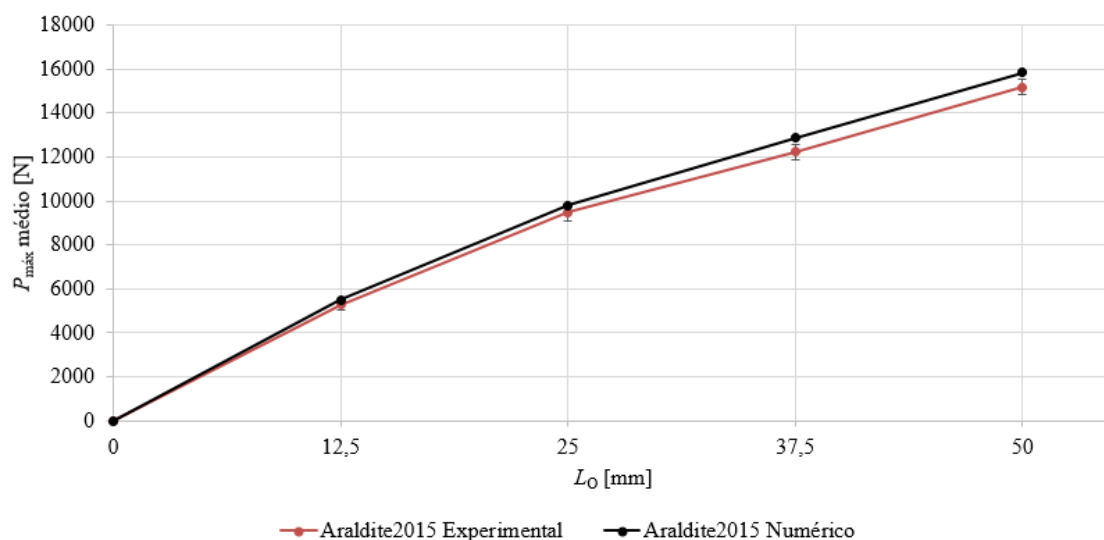


Figura 103 - Comparação entre as curvas $P_{\text{máx médio}} - L_0$ experimentais e numéricas para o adesivo Araldite® 2015 nas JSS

Na Figura 104 são apresentadas as curvas experimentais e numéricas de $P_{\text{máx médio}}$ em função de L_0 para o adesivo Sikaforce® 7752 nas JSS. Através da análise do gráfico, verifica-se a existência de grandes desvios percentuais, sendo que os resultados numéricos apresentam valores de $P_{\text{máx médio}}$ bastante superiores aos experimentais. Através da análise detalhada dos modelos numéricos, observou-se que esta diferença se deveu à estimativa por excesso de t_n^0 e t_s^0 para este adesivo. De facto, devido à utilização de leis coesivas triangulares para modelar um adesivo de grande ductilidade foi necessário aumentar t_n^0 e t_s^0 nos processos inversos de ajuste dos ensaios DCB e ENF, respetivamente (capítulos 3.1.5.1 e 3.1.5.2). Desta forma, a posterior aplicação destes valores para a previsão de resistência de juntas adesivas conduz à previsão por excesso de $P_{\text{máx}}$. Relativamente a $L_0=12,5$ mm, registou-se o menor desvio padrão, sendo ele de

38,71% com um $P_{\text{máx médio}} \approx 5,0$ kN. Seguidamente, para $L_0=25$ mm verificou-se um $P_{\text{máx médio}} \approx 10,5$ kN com um desvio percentual de 46,43%. Em relação a $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm, registaram-se valores de $P_{\text{máx médio}} \approx 15,9$ kN com um desvio percentual de 48,17%, e $P_{\text{máx médio}} \approx 21,7$ kN com um desvio percentual de 50,78%, respetivamente.

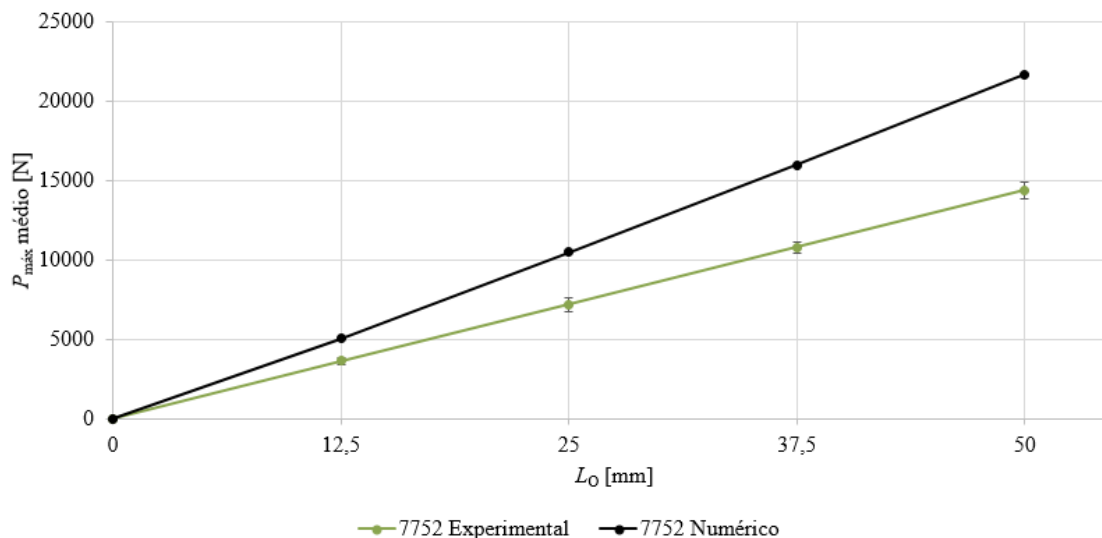


Figura 104 - Comparação entre as curvas $P_{\text{máx médio}} - L_0$ experimentais e numéricas para o adesivo Sikaforce® 7752 nas JSS

Na Figura 105 são apresentadas as curvas $P_{\text{máx médio}}$ em função de L_0 para as JSD. Relativamente a $L_0=12,5$ mm, as juntas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 definiram-se como as mais resistentes, ambas com cargas de rotura próximas dos 12 kN. Já a junta com o Sikaforce® 7752 é a que apresenta a menor resistência, na ordem dos 7,5 kN. Este último adesivo destaca-se negativamente dos primeiros dois adesivos com uma variação percentual de -66,9% e de -56,7%, respetivamente. Para o valor de $L_0=25$ mm, a junta com o adesivo Araldite® 2015 demarca-se das restantes, com uma resistência de ≈ 22 kN, enquanto as juntas ensaiadas com o Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 atingem valores de resistência próximos, entre 14,5 kN e 16,5 kN, pela mesma ordem. Assim sendo, o adesivo Araldite® 2015 superioriza-se dos restantes adesivos com uma diferença percentual de 41,1% e de 55,5%, respetivamente. Para $L_0=25$ mm e posteriores, verifica-se que a evolução de $P_{\text{máx médio}}$ das juntas com o adesivo Araldite® AV138 é praticamente nula, permanecendo na casa dos 16 kN. No caso de $L_0=37,5$ mm ocorre uma aproximação de resistência entre o adesivo Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015, que registam valores de $P_{\text{máx médio}}=22$ kN e $P_{\text{máx médio}}=24$ kN, respetivamente, enquanto o Araldite® AV138 fica aquém dos restantes adesivos, com $P_{\text{máx médio}} \approx 16$ kN. Assim constata-se uma diferença percentual deste último adesivo relativamente ao Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 de 31,2% e de 46,1%, respetivamente. Relativamente ao maior valor de L_0 considerado (50 mm), os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 equiparam-se em termos de resistência, ambos situados na ordem dos 24 kN, enquanto

o Araldite® AV138, tal como fora dito anteriormente, permanece praticamente sem variações. Desta forma, verifica-se uma diferença percentual do Araldite® 2015 relativamente aos restantes de 0,5% (Sikaforce® 7752) e de 42,0% (Araldite® AV138). De salientar que a resistência das JSD testadas com o adesivo Araldite® 2015 ($L_0=25$ mm, $L_0=37,5$ mm, $L_0=50$ mm) e Sikaforce® 7752 ($L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm) é limitada pela resistência do material dos substratos. Devido à plastificação dos substratos, nenhum dos adesivos apresenta uma proporcionalidade total da resistência em função dos valores de L_0 . O adesivo Araldite® AV138 não apresenta proporcionalidade de todo. O Araldite® 2015 apresenta proporcionalidade até $L_0=25$ mm, enquanto o Sikaforce® 7752 regista proporcionalidade de valores até $L_0=37,5$ mm. À semelhança das JSS, a maior variação de $P_{\text{máx médio}}$ entre valores limite de L_0 ocorre também nas juntas ensaiadas com o Sikaforce® 7752, dada a sua elevada ductilidade, ao passo que a menor variação de $P_{\text{máx médio}}$ é novamente atribuída ao adesivo Araldite® AV138. Tal sucede-se devido à reduzida capacidade de plastificação do adesivo Araldite® AV138, decorrente da referida fragilidade, o que implica uma rotura da junta assim que são atingidas as tensões limite nas extremidades da mesma. A maior dispersão de valores de $P_{\text{máx médio}}$ ocorre para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, com preponderância deste último adesivo.

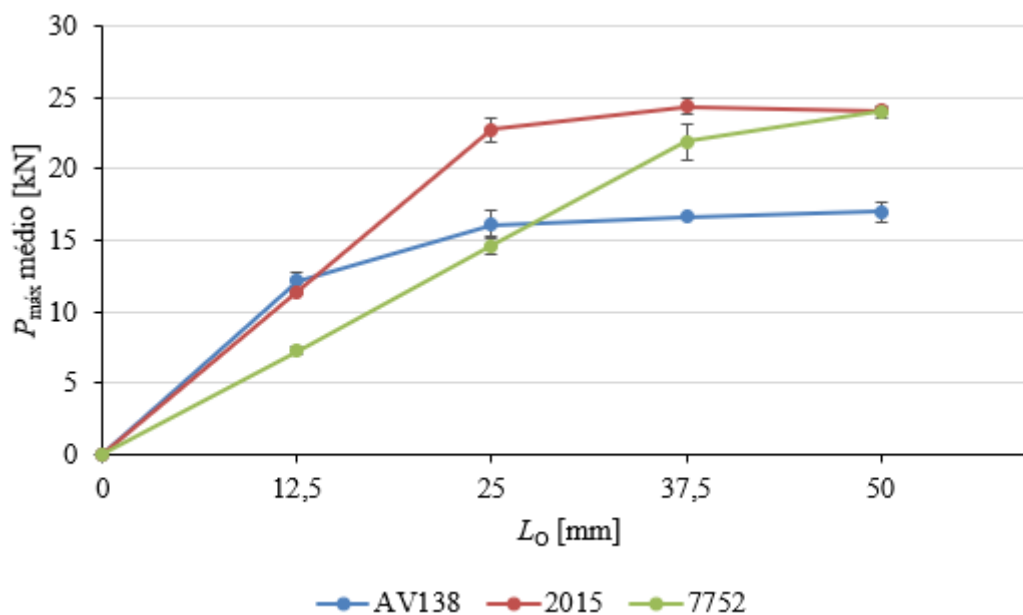


Figura 105 - Curvas numéricas $P_{\text{máx médio}} - L_0$ para cada adesivo nas JSD

A Figura 106 apresenta a comparação entre os valores numéricos e experimentais nas JSD do adesivo Araldite® AV138 onde, tal como nas JSS do mesmo adesivo, se pode observar uma excelente concordância de resultados. Relativamente aos desvios percentuais, é para $L_0=12,5$ mm que se verificam os piores resultados, de -4,22%, registando-se um valor numérico de $P_{\text{máx médio}}$ na ordem dos 11,6 kN. Relativamente a

$L_0=25$ mm regista-se um desvio percentual de 3,43% com um valor numérico de $P_{\text{máx}}^{\text{médio}}$ aproximadamente de 16,7 kN. No que toca aos seguintes L_0 (37,5 mm e 50 mm) verifica-se um decréscimo nos desvios percentuais (1,28% e 0,24%, respetivamente) e um aumento do valor numérico de $P_{\text{máx}}^{\text{médio}}$ (16,9 kN e 17,0 kN, respetivamente).

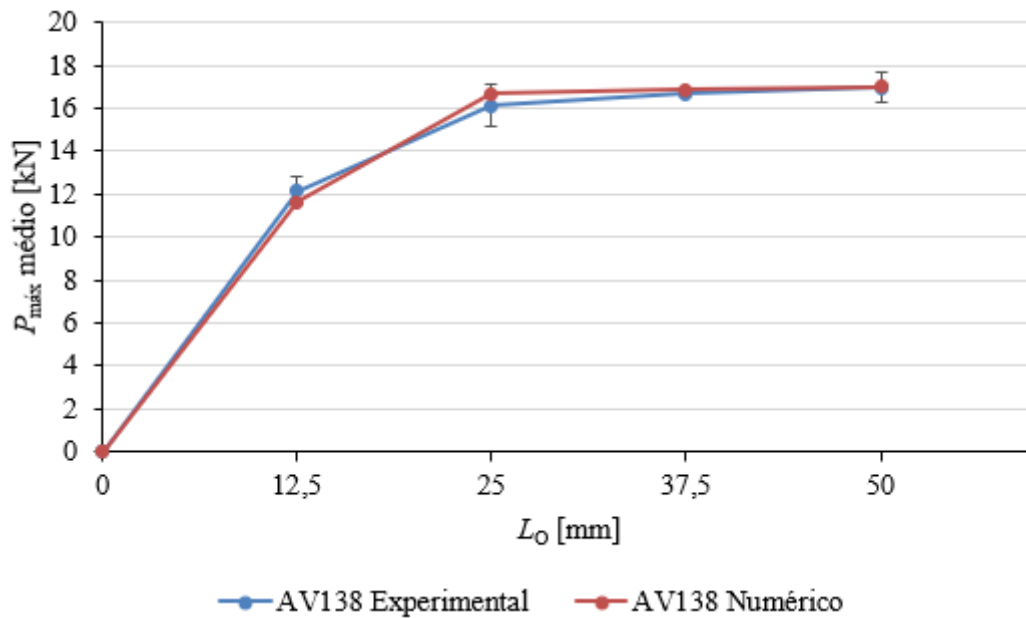


Figura 106 - Comparação entre as curvas $P_{\text{máx}}^{\text{médio}} - L_0$ experimentais e numéricas para o adesivo Araldite® AV138 nas JSD

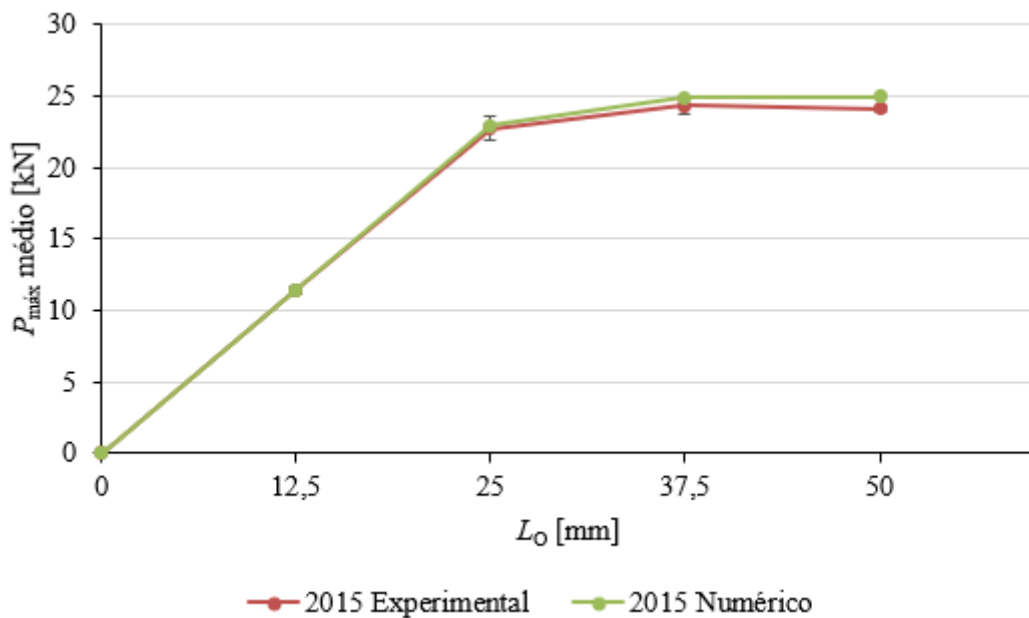


Figura 107 - Comparação entre as curvas $P_{\text{máx}}^{\text{médio}} - L_0$ experimentais e numéricas para o adesivo Araldite® 2015 nas JSD

A Figura 107 apresenta a comparação entre os resultados experimentais com os numéricos das JSD relativas ao adesivo Araldite® 2015. Entre todos os resultados numéricos obtidos, os que melhor se adequam aos resultados experimentais são os da JSD com o adesivo Araldite® 2015, onde se registam os menores desvios percentuais. Relativamente a $L_0=12,5$ mm, verifica-se um desvio percentual de 0,17% com um $P_{\text{máx médio}}$ de aproximadamente 11,4 kN. Em relação aos outros L_0 verifica-se para $L_0=25$ mm, um valor de $P_{\text{máx médio}} \approx 22,9$ kN com um desvio percentual de 0,89% e para $L_0=37,5$ mm, um valor de $P_{\text{máx médio}} \approx 24,9$ kN com um desvio percentual de 2,20%. Por último, para $L_0=50$ mm, o valor de $P_{\text{máx médio}}$ registado foi de 25,0 kN com desvio percentual de 3,61%.

A Figura 108 apresenta as curvas experimentais e numéricas $P_{\text{máx médio}}$ em função de L_0 para o adesivo Sikaforce® 7752 nas JSD. Tal como nas JSS, através da análise detalhada dos modelos numéricos, verificou-se uma enorme diferença entre os resultados experimentais e numéricos e que esta diferença se deveu à estimativa por excesso de t_n^0 e t_s^0 para este adesivo. De facto, devido à utilização de leis coesivas triangulares para modelar um adesivo de grande ductilidade foi necessário aumentar t_n^0 e t_s^0 nos processos inversos de ajuste dos ensaios DCB e ENF, respetivamente. Desta forma, a posterior aplicação destes valores para a previsão de resistência de juntas adesivas conduz à previsão por excesso de $P_{\text{máx}}$. Relativamente ao $L_0=12,5$ mm registou-se o menor desvio padrão, sendo ele de 49,71% com um $P_{\text{máx médio}} \approx 10,9$ kN. Seguidamente, para $L_0=25$ mm verificou-se um $P_{\text{máx médio}} \approx 23,1$ kN, com um desvio percentual de 57,91%. Em relação a $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm, registaram-se valores de $P_{\text{máx médio}} \approx 25,0$ kN com um desvio percentual de 14,13% e $P_{\text{máx médio}} \approx 25,0$ kN com um desvio percentual de 4,12%, respetivamente.

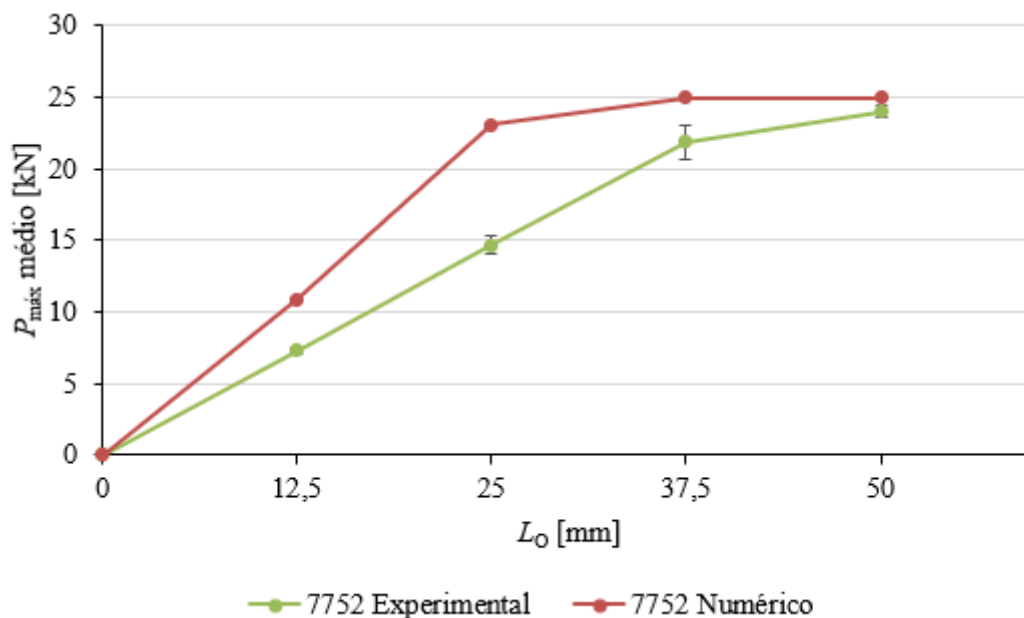


Figura 108 - Comparação entre as curvas $P_{\text{máx médio}} - L_0$ experimentais e numéricas para o adesivo Sikaforce® 7752 nas JSD

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

A realização desta dissertação teve como principal objetivo a previsão de resistência de adesivas utilizando leis coesivas obtidas pelo método inverso. De forma a prever a resistência das juntas, estimou-se a lei coesiva triangular à tração e corte em juntas adesivas de provetes DCB (tração) e ENF (corte), respetivamente e posteriormente efetuou-se a comparação entre os resultados experimentais de trabalhos anteriores com os resultados obtidos numericamente. Na base deste trabalho estão os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Relativamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 verificou-se um comportamento frágil e moderadamente dúctil, respetivamente. Em relação ao Sikaforce® 7752 registaram-se comportamentos de um adesivo bastante dúctil e não apropriado para a lei coesiva triangular. A análise numérica foi realizada no *software* Abaqus®.

Inicialmente e com base em trabalhos anteriores, procedeu-se à determinação dos resultados experimentais obtidos pelo método inverso, na qual se focou nos valores de t_n^0 e G_{IC} , t_s^0 e G_{IIC} . Assim sendo, considerando o adesivo Araldite® AV138, os valores médios obtidos foram os seguintes: $t_n^0=39,45$ kN; $G_{IC}=0,236$ N/mm; $t_s^0= 19,85$ kN e $G_{IIC}=0,634$ N/mm. Relativamente ao Araldite® 2015, verificou-se que $t_n^0=21,63$ kN; $G_{IC}=0,498$ N/mm; $t_s^0= 19,21$ kN e $G_{IIC}=3,01$ N/mm. No que toca ao adesivo Sikaforce® 7752 registou-se $t_n^0=11,49$ kN; $G_{IC}=3,65$ N/mm; $t_s^0= 19,50$ kN e $G_{IIC}=5,666$ N/mm.

No que respeita à análise numérica, esta teve como objetivo a previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla utilizando as leis coesivas acima referenciadas.

Relativamente ao adesivo Araldite® AV138 verificou-se que a lei coesiva obtida se adequa perfeitamente pois, na comparação dos resultados experimentais com os numéricos, verificou-se que nas JSS o maior desvio percentual obtido foi de -5,83% para $L_0=12,5$ mm. Nos L_0 seguintes registou-se uma redução dos desvios percentuais, o que valida a lei coesiva anteriormente obtida, isto é, para $L_0=25$ mm, $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm verificaram-se desvios percentuais de -2,78%, -1,05% e 0,53%, respetivamente. Na que toca às JSD os valores obtidos, reforçam a validade da lei coesiva aplicada, verificando-se desvios percentuais na ordem de -4,22%, 3,43%, 1,28% e 0,24% para $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$ mm, $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm, respetivamente. Nas JSS registou-se uma $P_{máx}=9,4$ kN para $L_0=50$ mm e nas JSD verificou-se uma $P_{máx}=17,0$ kN para $L_0=50$ mm. Estes resultados evidenciaram o facto de o adesivo Araldite® AV138 ser considerado um adesivo frágil, algo que já era expectável, e confirma o bom comportamento aquando a modelação por leis coesivas triangulares obtidas pelo método inverso.

Em relação ao adesivo Araldite® 2015, tal como o Araldite® AV138, pode-se considerar a sua modelação utilizando leis coesivas obtidas pelo método inverso. Nas JSS registou-se o valor 5,21% como maior desvio percentual obtido e para $L_0=37,5$ mm. Relativamente a $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$ mm e $L_0=50$ mm verificaram-se desvios percentuais de 4,20%, 3,18% e 4,22%, respetivamente. Na que toca às JSD, os valores obtidos validam a lei coesiva aplicada, registando-se um crescimento gradual nos desvios percentuais na ordem de 0,18%, 0,90%, 2,20% e 3,62% para $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$ mm, $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm, respetivamente. Nas JSS registou-se uma $P_{m\acute{a}x}=15,8$ kN para $L_0=50$ mm e nas JSD verificou-se uma $P_{m\acute{a}x}=25,0$ kN para $L_0=50$ mm.

Para Sikaforce® 7752 verificou-se que a lei coesiva triangular aplicada não foi a mais adequada. Registaram-se desvios percentuais bastante elevados, que nalguns casos excederam os 50%. No que toca às JSS, o maior desvio percentual obtido pertenceu a $L_0=50$ mm, em que se verificou valores de 50,78% com uma $P_{m\acute{a}x}=21,7$ kN. Nos outros L_0 , verificou-se sempre um crescimento gradual no desvio percentual com valores de 38,71%, 46,43% e 48,17% para $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$ mm e $L_0=50$ mm, respetivamente. Nas JSD, apesar dos altos desvios percentuais verificados, registou-se também um comportamento que comprova que a lei coesiva triangular não é a mais adequada para este adesivo, ou seja, para valores de $L_0=12,5$ mm o desvio percentual apresenta-se em 49,71%. Seguidamente, para $L_0=25$ mm encontra-se o maior desvio percentual, de cerca de 57,91% e, posteriormente, para $L_0=37,5$ mm regista-se uma queda abrupta do desvio percentual, que baixa para 14,13%. Para $L_0=50$ mm o desvio percentual apresenta-se em valores de 4,12%. Nas JSD, o $P_{m\acute{a}x}$ registado foi de 25,0 kN para $L_0=37,5$ mm e nas JSS, o $P_{m\acute{a}x}$ registado foi de 21,7 kN para $L_0=50$ mm.

Assim sendo, as leis coesivas obtidas pelo método inverso confirmaram o comportamento frágil do Araldite® AV138, cujo comportamento pode ser modelado com alguma precisão com leis triangulares, sendo que apresentou sempre resultados favoráveis. O Araldite® 2015 também pode ser modelado por um MDC triangular com um grau de precisão aceitável. Relativamente ao adesivo Sikaforce® 7752, verificou-se que a lei triangular se apresenta um pouco desajustada na previsão de rotura do adesivo SikaForce® 7752, que se apresentou como um adesivo mais dúctil. Além disto, verificou-se que deverá ser utilizada uma lei trapezoidal na modelação deste adesivo de forma a controlar corretamente o seu comportamento plástico.

Em suma, pode-se concluir que foi possível avaliar com algum detalhe as potencialidades dos MDC na avaliação da resistência das juntas e, desta forma, facultar informações sobre o comportamento de diferentes adesivos. Os MDC podem ser usados para efeitos de previsão do comportamento das juntas, uma vez que são um método fiável. Com a utilização das diferentes leis coesivas, abrem-se oportunidades para realizar previsões de resistência em juntas de geometria genéricas.

Como sugestões de trabalhos futuros referem-se os seguintes:

- Estudo da lei coesiva trapezoidal nos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752;
- Comparação entre diferentes tipos de leis coesivas para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, nomeadamente a lei coesiva triangular e a lei coesiva trapezoidal;
- Estudo considerando modificações geométricas nas JSS, nomeadamente na espessura dos substratos, valor de L_0 e espessura dos adesivos.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Constante, C.J., *Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
2. Campilho, R.D.S.G., et al., *Adhesive thickness effects of a ductile adhesive by optical measurement techniques*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2015. **57**: p. 125-132.
3. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fractura em tracção de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
4. da Silva, J., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido*. *Dissertação de Mestrado em Engenharia*. 2012, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
5. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*, in *Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Tese de Doutoramento*, in *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto*. 2007.
6. Ribeiro, A.S., A.M.P. De Jesus, and A.J.M. Ferreira, . . , *Comportamento estático e à fadiga de juntas coladas com perfis pultrudidos*, in *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões* **16**: p. 81-87. 2008.
7. Ebnesajjad, S., *Adhesives technology handbook.*, ed. N.W.A. Inc. Second Edition ed. 2008.
8. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007, Porto: Publindustria.
9. Kosmac, A., *Adhesive Bonding of Stainless Steels*, in *Materials and Applications Series*, ed. E.T.E.S.S.D. Association. 2013.
10. Hashim, S.A., *Adhesive bonding of thick steel adherends for marine structures*. *Marine Structures*. 1999. p. 12(6): p. 405-423. .
11. Adams, R.D., *Adhesive bonding - Science, technology and applications*, ed. W.P.L. 559. 2005.
12. RDF., M., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência*. *Tese Mestrado.*, in *Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto*. 2013.
13. JL., E., *Estudo do comportamento de adesivos estruturais*, in *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Tese de Mestrado*. 1990: Porto.
14. DE., P., *Handbook of Adhesion*, J.W. Sons, Editor. 2005: Chichester.
15. JFP., O., *Studies on stiffness and fracture behaviour in adhesively bonded composite-to-metal shear joints*, in *A Thesis Master of Science in Engineering: University of New Brunswinck*. 1998.

16. Das MDR, M.E., Ambur DR. , *Three-dimensional nonlinear analyses of scarf repairs in composite laminates and sandwich panels*. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2008. **3:1641-1658**.
17. Army - MR, N.-A., Air Force - 11., . *Composite Materials Handbook*, ed. U.S.o.A.M.-H.-.-F. Department of Defense. Vol. Vol 3: Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, and Analysis. 2013.
18. O., V., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*, ed. Luftfahrtforschung. Vol. 15:41-47. 1938.
19. Adams RD, P.N., *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of Strain Analysis, 1974: p. 9:185-196.
20. Harris JA, A.R., *Strength prediction of bonded single-lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1984: p. 4:65-78.
21. Sosa JLC, K.N., *Delamination modeling of GLARE using the extended finite element method*, ed. C.S.a. Technology. 2012. 72:788-791.
22. Goland M, R.E., *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics, 1944: p. 66:17-27.
23. Panigrahi SK, P.B., *Three dimensional failure analysis and damage propagation behavior of adhesively bonded single lap joints in laminated FRP composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007: p. 26:183-201.
24. LJ., H.-S., *Stress analysis: a continuum mechanics approach*. 1973: Developments in Adhesives.
25. FE., P., *A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint*. Journal of Thermoplastic Composite Materials 1998: p. 11:272-287.
26. ML., W., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America. 1959.
27. Fernlund G, S.J., *Failure load prediction*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1991. **11:213-227**.
28. Gl., B., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks*. . Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. **23:622-636**.
29. Feraren, P.J.H., *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. Vol. 71:2125-2142. 2004: Engineering Fracture Mechanics.
30. Ji G, O.Z., Li G, Ibekwe S, Pang SS., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47:2445-2458**.
31. Yang QD, T.M., *Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110:175-187**.
32. Duan K, H.X., Mai YW. , *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology 2004. **18:39-53**.
33. Liljedahl CDM, C.A., Wahab MA, Ashcroft IA., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141:147-161**.
34. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, and I.A. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32(7): p. 1146-1158**.

35. Daudeville, L.a.P.L., *A damage mechanics tool for laminate delamination*, ed. C. Structures. Vol. 25(1–4): p. 547-555. 1993.
36. Kondo, D., H. Welemane, and F. Cormery, *Basic concepts and models in continuum damage mechanics*, ed. R.E.d.G. Civil. Vol. 11(7-8): p. 927-943. 2007.
37. Kattan, P.I.a.G.Z.V., *Damage mechanics with finite elements*, ed. H. Springer-Verlag. 2005.
38. Shenoy V, A.I., Critchlow GW, Crocombe AD., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*, ed. E.F. Mech. Vol. 77. 2010. 1073–1090.
39. S., M., *Extended Finite Element Method for Fracture Analysis of Structures*. 2008, New Jersey: Blackwell Publishing.
40. Belytschko T, B.T., *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal of Fracture Mechanics, 1999. **45:601–620**.
41. Moës N, D.J., Belytschko T. , *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46:131–150**.
42. Lee, M.J., et al., *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30(5)**: p. p. 322-328.
43. Banea, M.D.a.L.F.M.d.S., *Adhesively bonded joints in composite materials: An overview. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. Journal of Materials Design and Applications, 2009. **223(1)**: p. p. 1-18.
44. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling of single-lap joints using cohesive zone models: Effect of the cohesive parameters on the output of the simulations*. The Journal of Adhesion, 2012. **88(4-6)**: p. p. 513-533.
45. Lai, Y., Dwayne Rakestraw, and D.A. Dillard, *The cracked lap shear specimen revisited - a closed solution*. International Journal of Solids and Structures, 1996. **33(12)**: p. **817-820**.
46. Wooley, G.R.a.D.R.C., *Stress concentration factors for bonded lap joints*. Journal of Aircraft, 1971. **8(10)**: p. p. 817-820.
47. Tsai, M.Y.a.J.M., *An evaluation of analytical and numerical solutions to the single-lap joint*. International Journal of Solids and Structures, 1994. **31(18)**: p. p. 2537-2563.
48. Feraren, P.A.H.M.J., *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*, ed. E.F. Mechanics. Vol. 71. 2004.
49. Li, S., et al., *Use of a cohesive-zone model to analyze the fracture of a fiber-reinforced polymer–matrix composite*, ed. C.S.a. Technology. Vol. 65(3–4). 2005. p. 537-549.
50. Blackman, B.R.K., A.J. Brunner, and J.G. Williams, *Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem*, ed. E.F. Mechanics. Vol. 73(16). 2006.
51. Biel, A.a.U.S., *Effects of constitutive parameters on the accuracy of measured fracture energy using the DCB-specimen*, ed. E.F. Mechanics. Vol. 75(10). 2008. p. 2968-2983.
52. Banea, M.D., L.F.M. da Silva, and R.D.S.G. Campilho, *Temperature Dependence of the Fracture Toughness of Adhesively Bonded Joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2010. **24(11-12)**: p. p. 2011-2026.

53. Campilho, R.D.S.G., et al., *extended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*, ed. C.M. Science. Vol. 50(4). 2011.
54. Pandya, K.C.a.J.G.W., *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*, ed. P.E. Science. Vol. 40(8). 2000.
55. Carlberger, T.a.U.S., *Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study*. The Journal of Adhesion, 2010. **86(8)**: p. p. 816-835.
56. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47(18–19)**: p. p. 2445-2458.
57. Andersson, T.a.U.S., *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41(2)**: p. p. 413-434.
58. Sørensen, B.F., *Cohesive law and notch sensitivity of adhesive joints*, ed. A. Materialia. Vol. 50(5). 2002.
59. Pinto, A.M.G., et al., *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85(6)**: p. p. 351-376.
60. Ridha, M., V.B.C. Tan, and T.E. Tay, *Traction–separation laws for progressive failure of bonded scarf repair of composite panel*, ed. C. Structures. Vol. 93(4). 2011. p. 1239-1245.
61. Kafkalidis, M.S.e.T., M. D., *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures 2002. **39(17)**: **4367-4383**.
62. R.D.S.G. Campilho, L.F.M.d.S., *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*, ed. ISBN. Vol. 1ª edição. 2012.
63. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1960. **Vol. 8**(100-104).
64. Raul D.S.G. Campilho, M.F.S.F.d.M., J. J. M. S. Domingues, *Modelling single and double lap repairs on composite materials*, ed. C.S.a. Technology. Vol. Vol. 65. 2005. p. 1948-1958.
65. Raul D.S.G. Campilho, M.D.B., Arnaldo M.G. Pinto, L.F.M. da Silva, A.M.P. Jesus, *Strength prediction of single and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2011. **Vol. 31**, , p. **363-372**.
66. T. Pardo, T.F., C.M. Landis, F. Delannay, *Constraint effects in adhesive joint fracture*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005. **Vol. 53**: p. p. 1951-1983.
67. D. Xie, A.M.W., *Discrete cohesive zone model for mixed-mode fracture using finite element analysis*, ed. E.F. Mechanics. Vol. Vol. 73. 2006.
68. Alfano, G.a.M.A.C., *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**.
69. Allix, O.e.C., A. , *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture 1996. **77(2)**(111-140).

70. Chen, J., *Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15(5)**.
71. Chandra, N., H. Li, C. Shet, and H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39(10)**.
72. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45(5)**: p. 1497-1512.
73. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*, ed. E. Mechanics. Vol. 32(4): 296-303. 1992.
74. Campilho, R.D.S.G., Moura, D. C., Banea, M. D. e da Silva, L. F. M., *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion and Adhesives 2014. **53: 15-22**.
75. Rice, J., *A Path Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks*. Vol. 35. 1968. 379-386.
76. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*, ed. E.F. Mechanics. 2004. 71(13-14): 2065-2077.
77. Campilho, R.D.S.G., de Moura, M. F. S. F., Pinto, A. M. G., Morais, J. J. L. e Domingues, J. J. M. S., *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*, ed. C.P.B. Engineering. 2009.
78. Leffler, K., Alfredsson, K. S. e Stigh, U., *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids and Structures 2007. **44(2): 530-545**.
79. Flinn, B.D., Lo, C. S., Zok, F. W. e Evans, A. G., *Fracture Resistance Characteristics of a Metal-Toughened Ceramic*. Journal of the American Ceramic Society 1993. **76(2): 369-375**.
80. Mello, A.W.e.L., K. M., *The Effect of Self-Assembled Monolayers on Interfacial Fracture*. Journal of Applied Mechanics 2004. **73(5): 860-870**.
81. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*, ed. P.a.E.S. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical. Vol. 221(582-593). 1921. 163-198.
82. Branco, C.A.G.d.M., A.A. Fernandes, and P.M.S.T. de Castro, *Fadiga de estruturas soldadas*, ed. F.C. Gulbenkian. 1999, Lisboa.
83. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46(6)**: p. 1589-1595.
84. de Moura, M.F.S.F., A.B. de Morais, and A.G. de Magalhães, *Materiais compósitos - materiais, fabrico e comportamento mecânico*, ed. P. Publindústria. 2006.
85. D3433-99, A., *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives* A.D.-i.B.M. Joints, Editor. 2012.
86. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*, ed. C.S.a. Technology. Vol. 68(10-11): p. 2224-2230. 2008.

87. da Silva, L.F., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Springer Science & Business Media.
88. Carlsson, L.A., J.W. Gillespie, and R.B. Pipes, *On the Analysis and Design of the End Notched Flexure (ENF) Specimen for Mode II Testing*. *Journal of Composite Materials*, 1986. **20(6)**: p. 594-604.
89. Fernández, M.V., M.F.S.F. de Moura, L.F.M. da Silva, and A.T. Marques, *Mixed-mode I + II fatigue/fracture characterization of composite bonded joints using the Single-Leg Bending test*, ed. C.P.A.A.S.a. Manufacturing. Vol. 44: p. 63-69. 2013.
90. Dillard, D.A., H.K. Singh, D.J. Pohlit, and J.M. Starbuck, *Observations of Decreased Fracture Toughness for Mixed Mode Fracture Testing of Adhesively Bonded Joints*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2009. **23(10-11)**: p. 1515-1530.
91. Araújo, R.V.C., *Validação numérica de leis coesivas triangulares para previsão de resistência de juntas adesivas em tração e corte puros*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2016, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
92. Raul D.S.G. Campilho, M.D.B., J.A.B.P. Neto, L.F.M. da Silva, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2013. **88**: p. 513-533.
93. Pigmente, K. <http://www.kremer-pigmente.com/en/product/araldit-av-138-m-1-hv-998-1-pack-97930.html?info=10570&sorting=model&xa0382=035a480323ed1d6142ac3e8b3a02da27>. 2016
94. R.D.S.G. Campilho, A.M.G.P., M.D. Banea, R.F. Silva, L.F.M. da Silva, *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2011. **25**.
95. J.A.B.P. Neto, R.D.S.G.C., L.F.M. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2012. **37**.
96. Neto, J.A.B.P., *Estudo paramétrico de juntas Adesivas em Material Compósito. Tese de Mestrado*, in *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*. 2011: Porto.
97. Farnell. *Adhesive ARALDITE 2015 50ML* <http://pt.farnell.com/araldite/araldite-2015-50ml/adhesive-araldite-2015-50ml/dp/1759544>. 2016.
98. Faneco, T.M.S., *Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo de Materiais e Tecnologias de Fabrico*, in *Instituto Superior de Engenharia do Porto*. 2014: Porto.
99. Gimeg. *Sikaforce 7752*. 2016; Available from: <http://www.gimeg.nl/nl-nl/sikaforce-7752-10-2kg-2621400>.
100. T.A.B. Fernandes, R.D.S.G.C., M.D. Banea, L.F.M. Silva, *Adhesive selection for single lap bonded joints: experimentation and advanced techniques for strength prediction*. *The Journal of Adhesion*, 2015. **91**.
101. Fernandes, R.L., *Estudo numérico da adequação de diferentes tipos de leis coesivas na previsão da resistência de juntas adesivas por Modelos de Dano Coesivo*, in *Departamento de Engenharia Mecânica, Tese de Mestrado*. 2015, Instituto Superior de Engenharia do Porto Porto.

102. Campilho RDSG, d.M.M., Domingues JJMS, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009. **29:195–205**.
103. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*, ed. ISBN. Vol. 1ª Edição. Estados Unidos da América: McGraw-Hill. 2000.
104. J. Radice, J.V., *On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structure: analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation*, ed. C.S.a. Technology. Vol. 66. 2006. 2528-2547.
105. A.A. Taib, R.B., S. Achiou, H. Boukehili, *Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2006. **26**: p. 237-248.
106. Kinloch, A.J., *Adhesion and adhesives: science and technology - 1ª edição*. London: Chapman & Hall, ed. ISBN. Vol. 978-90-481-4003-9. 1987.
107. P. Reis, F.A., J.A.M. Ferreira, *Influence of superposition length on mechanical resistance of single lap adhesive joints*, ed. C. Structures. Vol. 67. 2005. 125-133.
108. W. Jiang, P.Q., *An improved four-parameter model with consideration of Poisson's effect on stress analysis of adhesive joints*, ed. E. Structures. Vol. 88. 2015. 203-215.
109. R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F.d.M., J.J.M.S. Domingues, J.J.L. Morais *Computational modelling of the residual strength of repaired composite laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2008. **22**: p. 1565-1591.
110. J. de Castro, H.K., *Ductile double-lap joints from brittle GFRP laminates and ductile adhesives, Part I: Experimental investigation. Composites Part B: Engineering*. Vol. 39. 2008. 271-281.
111. B. Zhao, Z.-H.L., Y.-N. Lu., *Two-dimensional analytical solution of elastic stresses for balanced single-lap joints – Variational method*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2014. **49**: p. 115-126.
112. M. Shishesaz, N.B., *Shear stress distribution in adhesive layers of a double-lap joint with void or bond separation*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013. **27**: p. 1197-1225.
113. L.D.R. Grant, R.D.A., L.F.M. da Silva, *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009. **29**: p. 405-413.
114. L.F.M. Silva, R.J.C.C., G.W. Critchlow, M.A.V. Figueiredo, K. Brown, *Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009. **29**: p. 621-632.
115. R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F.d.M., J.J.M.S. Domingues, J.J.L. Morais, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*, ed. C.S.a. Technology. Vol. 65. 2005. 1948-1958.
116. M. Davis, D.B., *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1999. **19**: p. 91-105.
117. T. Vallée, J.R.C., T. Keller, *Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles part I: Experimental and numerical investigations*, ed. C.S.a. Technology. Vol. 66. 2006. 1903-1914.

118. TAB., F., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, in Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2014.*