



# Estudo numérico da adequação de diferentes tipos de leis coesivas na previsão da resistência de juntas adesivas por Modelos de Dano Coesivo

RICARDO LOURENCO FERNANDES

Outubro de 2015

Estudo numérico da adequação de diferentes tipos de  
leis coesivas na previsão da resistência de juntas  
adesivas por Modelos de Dano Coesivo

Ricardo Lourenço Fernandes

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

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



15 de outubro de 2015



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

Candidato: Ricardo Lourenço Fernandes, N°1080881, 1080881@isep.ipp.pt

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

Mestrado em Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



15 de outubro de 2015



*Dedico este trabalho a todas as pessoas que contribuíram para a sua realização...*



## *Agradecimentos*

Agradeço em primeiro lugar ao meu orientador Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho pela oportunidade e todo o apoio prestado ao longo da realização deste trabalho. Gratifico assim todo o conhecimento transmitido e a disponibilidade demonstrada. Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) pela oportunidade concedida para a elaboração deste trabalho.

Finalmente, aos meus amigos por toda a ajuda e apoio dados.



## *Resumo*

O uso de ligações adesivas aumentou significativamente nos últimos anos e é hoje em dia uma técnica de ligação dominante na indústria aeronáutica e automóvel. As ligações adesivas visam substituir os métodos tradicionais de fixação mecânicos na união de estruturas. A melhoria ao longo dos anos de vários modelos de previsão de dano, nomeadamente através do Método de Elementos Finitos (MEF), tem ajudado ao desenvolvimento desta técnica de ligação. Os Modelos de Dano coesivo (MDC), usados em conjunto com MEF, são uma ferramenta viável para a previsão de resistência de juntas adesivas. Os MDC combinam critérios da resistência dos materiais para a iniciação do dano e conceitos da mecânica da fratura para a propagação da fenda. Existem diversas formas de leis coesivas possíveis de aplicar em simulações por MDC, em função do comportamento expectável dos materiais que estão a ser simulados.

Neste trabalho, estudou-se numericamente o efeito de diversas formas de leis coesivas na previsão no comportamento de juntas adesivas, nomeadamente nas curvas força-deslocamento ( $P-\delta$ ) de ensaios *Double-Cantilever Beam* para caracterização à tração e ensaios *End-Notched Flexure* para caracterização ao corte. Também se estudou a influência dos parâmetros coesivos à tração e corte nas curvas  $P-\delta$  dos referidos ensaios. Para o Araldite® AV138 à tração e ao corte, a lei triangular é a que melhor prevê o comportamento do adesivo. Para a previsão da resistência de ambos os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, a lei trapezoidal é a que melhor se adequa, confirmando assim que esta lei é a que melhor caracteriza o comportamento de dano de adesivos tipicamente dúcteis. O estudo dos parâmetros revelou influência distinta na previsão do comportamento das juntas, embora com bastantes semelhanças entre os diferentes tipos de adesivos.

### **Palavras-Chave**

Juntas adesivas, Lei coesiva, Modelo de Danos Coesivo, Método de Elementos Finitos, Parâmetros coesivos.



## *Abstract*

The use of adhesive bonds increased significantly in recent years and it is nowadays a dominant joining technology in the aerospace and automotive industry. Adhesive bonds are intended to replace the traditional mechanical fastening methods in structural joints. The improvement over the years of various damage prediction models, particularly by the Finite Element Method (FEM), has helped the development of this bonding technique. Cohesive zone models (CZM), used in conjunction with the FEM, is a viable tool for predicting the strength of adhesive joints. CZM combine criteria of strength of materials for damage initiation with fracture mechanics concepts for crack the propagation. There are several shapes of cohesive laws possible to apply in CZM simulations, depending on the expected behavior of the materials that are being simulated.

In this work, the effect of several cohesive law shapes in predicting the behavior of adhesive joints was numerically studied, particularly in the load-displacement ( $P$ - $\delta$ ) curves of Double-Cantilever Beam tests to characterize the traction behavior and End-Notched Flexure tests to characterize the shear behavior. The influence of the cohesive parameters in tension and shear on the  $P$ - $\delta$  curves of the tests was also addressed. For the Araldite<sup>®</sup> AV138 in tension and shear, the triangular law is the one that predicts the best the adhesive behavior. For predicting the strength of both adhesives Araldite<sup>®</sup> 2015 and SikaForce<sup>®</sup> 7752, the trapezoidal law is the best suited, thus confirming that this law is the one that best characterizes the damage behavior of typically ductile adhesives. The study of the cohesive parameters revealed a distinct influence in predicting the behavior of the joints, but with many similarities between the different types of adhesives.

### **Keywords**

Adhesive joints, Cohesive law, Cohesive Zone Model, Finite Element Method, Cohesive parameters.



# Índice

|   |           |
|---|-----------|
| AGRADECIMENTOS.....   | VII       |
| RESUMO .....  | IX        |
| ABSTRACT .....  | XI        |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....   | XVII      |
| ÍNDICE DE TABELAS .....   | XXIII     |
| NOMENCLATURA.....   | XXV       |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....  | 1         |
| 1.2 OBJETIVOS.....  | 2         |
| 1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....  | 2         |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                      | <b>5</b>  |
| 2.1 LIGAÇÕES ADESIVAS.....  | 5         |
| 2.1.1 <i>Caraterização das juntas adesivas</i> .....                      | 6         |
| 2.1.2 <i>Esforços e modos de rotura em juntas adesivas</i> .....          | 8         |
| 2.1.3 <i>Configurações possíveis de junta</i> .....                       | 13        |
| 2.2 PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DAS JUNTAS .....                              | 16        |
| 2.2.1 <i>Mecânica dos meios contínuos</i> .....                           | 17        |
| 2.2.2 <i>Mecânica da fratura</i> .....                                    | 18        |
| 2.2.3 <i>Modelos de dano coesivo</i> .....                                | 19        |
| 2.2.3.1 Tipos de leis coesivas .....                                      | 20        |
| 2.2.3.2 Influência do tipo de lei coesiva na resistência das juntas ..... | 22        |
| 2.2.3.3 Influência dos parâmetros coesivos na resistência das juntas..... | 25        |
| 2.2.3.4 Determinação dos parâmetros coesivos.....                         | 30        |
| 2.2.3.4.1 Método de definição individual dos parâmetros .....             | 33        |
| 2.2.3.4.2 Método inverso.....   | 33        |
| 2.2.3.4.3 Método direto .....   | 34        |
| 2.2.4 <i>Mecânica do dano</i> .....                                       | 36        |
| 2.2.5 <i>Método dos Elementos Finitos Extendido</i> .....                 | 37        |
| <b>3 TRABALHO EXPERIMENTAL.....</b>                                       | <b>39</b> |
| 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....   | 39        |
| 3.1.1 <i>Substratos</i> .....   | 39        |
| 3.1.2 <i>Adesivos</i> .....   | 41        |
| 3.1.2.1 Araldite® AV138.....  | 41        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 3.1.2.2   | Araldite® 2015.....                                      | 43        |
| 3.1.2.3   | Sikaforce® 7752.....                                     | 45        |
| 3.2       | ENSAIOS DCB .....  | 46        |
| 3.2.1     | <i>Geometria, fabrico e teste dos provetes DCB</i> ..... | 46        |
| 3.2.2     | <i>Resultados obtidos</i> .....                          | 56        |
| 3.2.2.1   | Adesivo Araldite® AV138.....                             | 57        |
| 3.2.2.1.1 | Determinação do $G_{Ic}$ .....                           | 58        |
| 3.2.2.1.2 | Determinação da lei coesiva em tração.....               | 61        |
| 3.2.2.2   | Adesivo Araldite® 2015.....                              | 63        |
| 3.2.2.2.1 | Determinação do $G_{Ic}$ .....                           | 64        |
| 3.2.2.2.2 | Determinação da lei coesiva em tração.....               | 67        |
| 3.2.2.3   | Adesivo Sikaforce® 7752 .....                            | 68        |
| 3.2.2.3.1 | Determinação do $G_{Ic}$ .....                           | 69        |
| 3.2.2.3.2 | Determinação da lei coesiva em tração.....               | 71        |
| 3.2.2.4   | Análise e comparação dos resultados .....                | 72        |
| 3.3       | ENSAIOS ENF.....   | 73        |
| 3.3.1     | <i>Geometria, fabrico e teste dos provetes ENF</i> ..... | 73        |
| 3.3.2     | <i>Resultados obtidos</i> .....                          | 76        |
| 3.3.2.1   | Adesivo Araldite® AV138.....                             | 77        |
| 3.3.2.1.1 | Determinação do $G_{IIc}$ .....                          | 77        |
| 3.3.2.1.2 | Determinação da lei coesiva em corte.....                | 81        |
| 3.3.2.2   | Adesivo Araldite® 2015.....                              | 82        |
| 3.3.2.2.1 | Determinação do $G_{IIc}$ .....                          | 83        |
| 3.3.2.2.2 | Determinação da lei coesiva em corte.....                | 86        |
| 3.3.2.3   | Adesivo Sikaforce® 7752 .....                            | 87        |
| 3.3.2.3.1 | Determinação do $G_{IIc}$ .....                          | 88        |
| 3.3.2.3.2 | Determinação da lei coesiva em corte.....                | 91        |
| 3.3.2.4   | Análise e comparação dos resultados .....                | 92        |
| 3.4       | ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS JUNTAS .....                | 93        |
| <b>4</b>  | <b>TRABALHO NUMÉRICO .....</b>                           | <b>95</b> |
| 4.1       | CONDIÇÕES DA ANÁLISE NUMÉRICA.....                       | 95        |
| 4.2       | MODELOS DE DANO COESIVO .....                            | 98        |
| 4.3       | VALIDAÇÃO DAS LEIS COESIVAS OBTIDAS .....                | 101       |
| 4.3.1     | <i>Ensaaios DCB</i> .....                                | 101       |
| 4.3.1.1   | Araldite® AV138.....                                     | 101       |
| 4.3.1.2   | Araldite® 2015.....                                      | 104       |
| 4.3.1.3   | Sikaforce® 7752.....                                     | 106       |
| 4.3.2     | <i>Ensaaios ENF</i> .....                                | 108       |
| 4.3.2.1   | Araldite® AV138.....                                     | 108       |
| 4.3.2.2   | Araldite® 2015.....                                      | 110       |
| 4.3.2.3   | Sikaforce® 7752.....                                     | 113       |
| 4.4       | ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS COESIVOS .....       | 115       |
| 4.4.1     | <i>Ensaaios DCB</i> .....                                | 115       |

|          |                          |            |
|----------|--------------------------|------------|
| 4.4.1.1  | Araldite® AV138.....     | 115        |
| 4.4.1.2  | Araldite® 2015.....      | 118        |
| 4.4.1.3  | Sikaforce® 7752 .....    | 120        |
| 4.4.2    | <i>Ensaio ENF</i> .....  | 122        |
| 4.4.2.1  | Araldite® AV138.....     | 122        |
| 4.4.2.2  | Araldite® 2015.....      | 124        |
| 4.4.2.3  | Sikaforce® 7752 .....    | 126        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES</b> .....  | <b>129</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b> ..... | <b>133</b> |



## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Distribuição de tensões de ligações soldadas, rebitadas e coladas (Pinto 2007) .  | 7  |
| Figura 2 – Principais esforços em ligações adesivas (da Silva et al. 2007) .....   | 9  |
| Figura 3 – Distribuição de tensão axial numa junta sob esforço de tração (Petrie 2000) .....   | 9  |
| Figura 4 – Distribuição de tensão axial numa junta sob esforço de compressão (Petrie 2000)<br>.....  | 10 |
| Figura 5 – Distribuição de tensão corte numa junta sob esforço de corte (Petrie 2000) .....  | 10 |
| Figura 6 – Distribuição de tensão axial numa junta sob esforço de clivagem (Petrie 2000)<br>.....  | 11 |
| Figura 7 – Distribuição de tensão axial numa junta sob esforço de arrancamento (Petrie 2000)<br>.....  | 11 |
| Figura 8 – Modos de rotura em juntas adesivas (da Silva et al. 2007).....  | 13 |
| Figura 9 – Principais configurações de juntas (da Silva et al. 2007).....  | 13 |
| Figura 10 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero:<br>aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação<br>contínua (b) (da Silva e Campilho 2011) ..... | 19 |
| Figura 11 – Modelo coesivo triangular (de Moura et al. 2000, Campilho et al. 2007) .....   | 21 |
| Figura 12 – Modelo coesivo trapezoidal (Campilho et al. 2008) .....  | 21 |
| Figura 13 – Leis coesivas em tração (a) e corte (b) para ambos os adesivos .....   | 22 |
| Figura 14 – Desvio percentual entre os valores experimentais e numéricos de $P_{máx}$ para o<br>Araldite® 2015.....  | 23 |
| Figura 15 – Desvio percentual entre os valores experimentais e numéricos de $P_{máx}$ para o<br>Araldite® AV138.....   | 24 |
| Figura 16 – Degradação da rigidez para as juntas com $L_O=80$ mm e com o Araldite® AV138<br>(a) e Araldite® 2015 (b) quando $P_{máx}$ é atingido (lei trapezoidal).....  | 24 |
| Figura 17 – Leis coesivas à tração (a) e corte (b) para alteração de $G_{Ic}$ e $G_{IIc}$ entre -80 até<br>+100% do valor inicial (Campilho et al. 2012).....  | 26 |
| Figura 18 – Leis coesivas à tração (a) e corte (b) para alteração de $t_n^0$ e $t_s^0$ entre -80 até<br>+100% do valor inicial (Campilho et al. 2012).....   | 27 |
| Figura 19 – Variação percentual de $P_{máx}/P_m^0$ com valores de $G_{Ic}$ desde -80 até +100% do<br>valor inicial (Campilho et al. 2012) .....  | 27 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 20 – Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$ com valores de $G_{IIc}$ desde -80 até +100% do valor inicial (Campilho et al. 2012) .....   | 27 |
| Figura 21 – Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$ com valores de $G_{Ic} + G_{IIc}$ desde -80 até +100% dos valores iniciais (Campilho et al. 2012).....   | 28 |
| Figura 22 – Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$ com valores de $t_n^0$ desde -80 até +100% do valor inicial (Campilho et al. 2012) .....   | 28 |
| Figura 23 – Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$ com valores de $t_s^0$ desde -80 até +100% do valor inicial (Campilho et al. 2012) .....   | 29 |
| Figura 24 – Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$ com valores de $t_n^0$ e $t_s^0$ desde -80 até +100% dos valores iniciais (Campilho et al. 2012).....  | 29 |
| Figura 25 – Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$ com valores de $G_{Ic}$ , $G_{IIc}$ , $t_n^0$ e $t_s^0$ desde -80 até +100% dos valores iniciais (Campilho et al. 2012) .....                  | 30 |
| Figura 26 – Geometria do provete DCB (Gustafson e Waas 2009).....   | 32 |
| Figura 27 – Geometria do provete ENF (Gustafson e Waas 2009) .....  | 32 |
| Figura 28 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) (Campilho et al. 2011) ..... | 38 |
| Figura 29 – Curvas $\sigma$ - $\varepsilon$ da liga de alumínio AW 6082-T651 (Campilho et al. 2011).....  | 40 |
| Figura 30 – Curvas $\sigma$ - $\varepsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 (Campilho et al. 2013) .....   | 41 |
| Figura 31 – Adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 (Azevedo 2014) .....  | 42 |
| Figura 32 – Formato comercial do adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 de 50 ml (Azevedo 2014) .....   | 43 |
| Figura 33 – Curvas $\sigma$ - $\varepsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 (Campilho et al. 2013).....   | 43 |
| Figura 34 – Adesivo Sikaforce <sup>®</sup> 7752 (Azevedo 2014).....   | 45 |
| Figura 35 – Curvas $\sigma$ - $\varepsilon$ relativas ao adesivo Sikaforce <sup>®</sup> 7752 (Faneco 2014) .....  | 45 |
| Figura 36 – Representação esquemática dos provetes DCB (Constante 2014) .....   | 47 |
| Figura 37 – Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S (Constante 2014) .....   | 48 |
| Figura 38 – Representação esquemática da localização dos espaçadores (Constante 2014) .....   | 48 |
| Figura 39 – Fabrico do espaçador frontal (Constante 2014).....  | 49 |
| Figura 40 – Substrato inferior com os espaçadores colocados (Constante 2014).....   | 49 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 41 – Provetes DCB em fase de colagem, com colocação de grampos para aplicação de pressão durante a cura (Constante 2014).....   | 50 |
| Figura 42 – Remoção do excesso de adesivo de um provete DCB com um alicate (Constante 2014) .....  | 50 |
| Figura 43 – Limpeza com mó do excesso de adesivo de um provete DCB (Constante 2014) .....  | 51 |
| Figura 44 – Aplicação de tinta corretora numa face lateral do provete DCB (Constante 2014) .....   | 51 |
| Figura 45 – Face lateral do provete capturada pela câmara (Constante 2014).....  | 53 |
| Figura 46 – Identificação dos pontos para determinar os parâmetros $\delta_n$ e $\theta_0$ .....   | 53 |
| Figura 47 – Identificação da região fotografada nos ensaios (Constante 2014).....  | 54 |
| Figura 48 – Identificação das retas $l_1$ e $l_2$ usadas para determinar $\theta_0$ (Constante 2014) ...   | 55 |
| Figura 49 – Provete colocado nas maxilas da máquina de ensaios (Constante 2014).....   | 56 |
| Figura 50 – Curvas $P$ - $\delta$ do adesivo Araldite® AV138 (Constante 2014).....   | 57 |
| Figura 51 – Superfície de rotura do adesivo Araldite® AV138 (Constante 2014) .....   | 58 |
| Figura 52 – Curvas- $R$ de um provete DCB com o adesivo Araldite® AV138 (Constante 2014) .....   | 58 |
| Figura 53 – Evolução de $\theta_0$ no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® AV138: curva primitiva obtida a partir do método ótico, curva polinomial e curva polinomial ajustada (Constante 2014) ..... | 59 |
| Figura 54 – Evolução de $\delta_n$ no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® AV138: curva primitiva obtida a partir do método ótico, curva polinomial e curva polinomial ajustada (Constante 2014) ..... | 60 |
| Figura 55 – Lei $G_I$ - $\delta_n$ experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® AV138 e ajuste de curva polinomial (Constante 2014) .....  | 61 |
| Figura 56 – Lei $t_n$ - $\delta_n$ experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® AV138, e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial (Constante 2014).....                              | 62 |
| Figura 57 – Curvas $P$ - $\delta$ do adesivo Araldite® 2015 (Constante 2014).....  | 63 |
| Figura 58 – Superfícies de rotura do adesivo Araldite® 2015 (Constante 2014) .....   | 64 |
| Figura 59 – Curvas- $R$ de um provete DCB com o adesivo Araldite® 2015 (Constante 2014) .....  | 64 |
| Figura 60 – Evolução de $\theta_0$ no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® 2015: curva primitiva obtida a partir do método ótico, curva polinomial e curva polinomial ajustada (Constante 2014) .....  | 65 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 61 – Evolução de $\delta_n$ no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® 2015: curva primitiva obtida a partir do método ótico, curva polinomial e curva polinomial ajustada (Constante 2014).....         | 66 |
| Figura 62 – Lei $G_I$ - $\delta_n$ experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® 2015 e ajuste de curva polinomial (Constante 2014).....  | 66 |
| Figura 63 – Lei $t_n$ - $\delta_n$ experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® 2015 e aproximação triangular, trapezoidal e exponencial (Constante 2014).....                                       | 68 |
| Figura 64 – Curvas $P$ - $\delta$ do adesivo Sikaforce® 7752 (Campilho et al. 2014) .....  | 68 |
| Figura 65 – Curva- $R$ de um provete DCB com o adesivo Sikaforce® 7752 (Campilho et al. 2014).....   | 69 |
| Figura 66 – Evolução de $\theta$ no ensaio de um provete com o adesivo Sikaforce® 7752: curva primitiva obtida a partir do método ótico, curva polinomial e curva polinomial ajustada (Campilho et al. 2014) .....   | 69 |
| Figura 67 – Evolução de $\delta_n$ no ensaio de um provete com o adesivo Sikaforce® 7752: curva primitiva obtida a partir do método ótico, curva polinomial e curva polinomial ajustada (Campilho et al. 2014) ..... | 70 |
| Figura 68 – Lei $G_I$ - $\delta_n$ experimental no ensaio de um provete com o adesivo Sikaforce® 7752 (Campilho et al. 2014) .....   | 71 |
| Figura 69 – Lei $t_n$ - $\delta_n$ experimental no ensaio de um provete com o adesivo Sikaforce® 7752 e aproximação triangular, trapezoidal e exponencial (Campilho et al. 2014) .....                               | 72 |
| Figura 70 – Valor médio de $G_{Ic}$ e desvios padrão pelos quatro métodos e para os três adesivos, adaptado de (Campilho et al. 2014, Constante 2014) .....  | 73 |
| Figura 71 – Processo de posicionamento durante a cura (Azevedo 2014).....  | 74 |
| Figura 72 – Posicionamento do provete ENF na máquina de ensaio (Azevedo 2014).....   | 76 |
| Figura 73 – Região do provete abrangida na medição (Azevedo 2014) .....  | 76 |
| Figura 74 – Curvas $P$ - $\delta$ do adesivo Araldite® AV138 (Azevedo 2014) .....  | 77 |
| Figura 75 – Curvas- $R$ de um provete ENF com o adesivo Araldite® AV138 (Azevedo 2014) .....   | 78 |
| Figura 76 – Evolução de $\delta_s$ no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® AV138: curva primitiva obtida a partir do método ótico e curva polinomial (Leitão 2015).....                                      | 80 |
| Figura 77 – Lei $G_{II}$ - $\delta_s$ experimental no ensaio de um provete com adesivo Araldite® AV138 e ajuste de polinomial (Leitão 2015) .....  | 80 |
| Figura 78 – Lei $t_s$ - $\delta_s$ experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® AV138 e aproximação triangular, trapezoidal e exponencial.....   | 82 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 79 – Curvas $P$ - $\delta$ do adesivo Araldite® 2015 (Azevedo 2014).....  | 83  |
| Figura 80 – Curvas- $R$ de um provete ENF com o adesivo Araldite® 2015 (Azevedo 2014)<br>.....   | 83  |
| Figura 81 – Evolução de $\delta_s$ no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® 2015: curva<br>primitiva obtida a partir do método ótico e curva polinomial (Leitão 2015).....  | 85  |
| Figura 82 – Lei $G_{II}$ - $\delta_s$ experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® 2015<br>e ajuste de curva polinomial (Leitão 2015).....                         | 85  |
| Figura 83 – Lei $t_s$ - $\delta_s$ experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® 2015 e<br>aproximação triangular, trapezoidal e exponencial.....                   | 87  |
| Figura 84 – Curvas $P$ - $\delta$ do adesivo Sikaforce® 7752 (Azevedo 2014) .....  | 88  |
| Figura 85 – Curva- $R$ de um provete ENF com o adesivo Sikaforce® 7752 (Azevedo 2014)<br>.....   | 89  |
| Figura 86 – Evolução de $\delta_s$ no ensaio de um provete com o adesivo Sikaforce® 7752: curva<br>primitiva obtida a partir do método ótico e curva polinomial (Leitão 2015)..... | 90  |
| Figura 87 – Lei $G_{II}$ - $\delta_s$ experimental no ensaio de um provete com o adesivo Sikaforce® 7752<br>e ajuste de curva polinomial (Leitão 2015).....                        | 90  |
| Figura 88 – Lei $t_s$ - $\delta_s$ experimental no ensaio de um provete com o adesivo Sikaforce® 7752<br>e aproximação triangular, trapezoidal e exponencial.....                  | 92  |
| Figura 89 – Comparação dos valores de $G_{IIc}$ dos adesivos ensaiados segundo os métodos<br>utilizados, adaptado de (Azevedo 2014, Leitão 2015).....                              | 92  |
| Figura 90 – Distribuição da tensão de corte em adesivos frágeis e dúcteis (Troughton 2008)<br>.....  | 94  |
| Figura 91 – Malha do provete DCB .....   | 96  |
| Figura 92 – Refinamento da malha do provete DCB na extremidade da pré-fenda.....   | 96  |
| Figura 93 – Malha do provete ENF.....  | 97  |
| Figura 94 – Refinamento da malha ENF.....  | 97  |
| Figura 95 – Leis coesivas triangular e exponencial (a) e trapezoidal (b) (da Silva e Campilho<br>2011) .....   | 98  |
| Figura 96 – Definição da variável de dano em tração, $d_n$ , no Abaqus® (que pode ser<br>extrapolada para $d_s$ )......  | 100 |
| Figura 97 – Curvas $P$ - $\delta$ de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete DCB<br>.....  | 102 |
| Figura 98 – Curvas $P$ - $\delta$ de validação das leis coesivas do Araldite® 2015 em provete DCB<br>.....   | 104 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 99 – Curvas $P$ - $\delta$ de validação das leis coesivas do Sikaforce® 7752 em provete DCB           | 106 |
| Figura 100 – Curvas $P$ - $\delta$ de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete ENF          | 108 |
| Figura 101 – Curvas $P$ - $\delta$ de validação das leis coesivas do Araldite® 2015 em provete ENF           | 111 |
| Figura 102 – Curvas $P$ - $\delta$ de validação das leis coesivas do Sikaforce® 7752 em provete ENF          | 113 |
| Figura 103 – Influência de $t_n^0$ nas curvas $P$ - $\delta$ de provetes DCB com o adesivo Araldite® AV138   | 116 |
| Figura 104 – Influência de $G_{Ic}$ nas curvas $P$ - $\delta$ de provetes DCB com o adesivo Araldite® AV138  | 117 |
| Figura 105 – Influência de $t_n^0$ nas curvas $P$ - $\delta$ de provetes DCB com o adesivo Araldite® 2015    | 118 |
| Figura 106 – Influência de $G_{Ic}$ nas curvas $P$ - $\delta$ de provetes DCB com o adesivo Araldite® 2015   | 119 |
| Figura 107 – Influência de $t_n^0$ nas curvas $P$ - $\delta$ de provetes DCB com o adesivo Sikaforce® 7752   | 120 |
| Figura 108 – Influência de $G_{Ic}$ nas curvas $P$ - $\delta$ de provetes DCB com o adesivo Sikaforce® 7752  | 121 |
| Figura 109 – Influência de $t_s^0$ nas curvas $P$ - $\delta$ de provetes ENF com o adesivo Araldite® AV138   | 122 |
| Figura 110 – Influência de $G_{IIc}$ nas curvas $P$ - $\delta$ de provetes ENF com o adesivo Araldite® AV138 | 123 |
| Figura 111 – Influência de $t_s^0$ nas curvas $P$ - $\delta$ de provetes ENF com o adesivo Araldite® 2015    | 124 |
| Figura 112 – Influência de $G_{IIc}$ nas curvas $P$ - $\delta$ de provetes ENF com o adesivo Araldite® 2015  | 125 |
| Figura 113 – Influência de $t_s^0$ nas curvas $P$ - $\delta$ de provetes ENF com o adesivo Sikaforce® 7752   | 126 |
| Figura 114 – Influência de $G_{IIc}$ nas curvas $P$ - $\delta$ de provetes ENF com o adesivo Sikaforce® 7752 | 127 |

## Índice de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Características das juntas adesivas (Petrie 2000) .....  | 6  |
| Tabela 2 – Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 (Azevedo 2014) ....  | 40 |
| Tabela 3 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651; dados do fabricante (Azevedo 2014).....               | 40 |
| Tabela 4 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 (Neto et al. 2012, Campilho et al. 2013).....   | 42 |
| Tabela 5 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 (Campilho et al. 2013).....                      | 44 |
| Tabela 6 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752.....  | 46 |
| Tabela 7 – Dimensões teóricas dos provetes DCB em mm (Constante 2014).....  | 47 |
| Tabela 8 – Dimensões efetivas dos provetes DCB (Campilho et al. 2014, Constante 2014) .....                               | 52 |
| Tabela 9 – Valores de $G_{Ic}$ (em N/mm) pelos métodos convencionais para o Araldite® AV138 (Constante 2014) .....        | 59 |
| Tabela 10 – Parâmetros obtidos pelo método direto para as leis coesivas à tração do adesivo Araldite® AV138.....          | 62 |
| Tabela 11 – Valores de $G_{Ic}$ (em N/mm) pelos métodos convencionais para o adesivo Araldite® 2015 (Constante 2014)..... | 65 |
| Tabela 12 – Parâmetros obtidos pelo método direto para as leis coesivas à tração do adesivo Araldite® 2015.....           | 67 |
| Tabela 13 – Parâmetros obtidos pelo método direto para as leis coesivas à tração do adesivo Sikaforce® 7752 .....         | 71 |
| Tabela 14 – Dimensões teóricas dos provetes ENF (Azevedo 2014).....   | 73 |
| Tabela 15 – Dimensões efetivas dos provetes ENF .....   | 75 |
| Tabela 16 – Valores de $G_{IIc}$ (em N/mm) pelos métodos convencionais para o Araldite® AV138 (Azevedo 2014) .....        | 79 |
| Tabela 17 – Parâmetros obtidos pelo método direto para as leis coesivas ao corte do Araldite® AV138.....                  | 81 |
| Tabela 18 – Valores de $G_{IIc}$ (em N/mm) pelos métodos convencionais para o do Araldite® 2015 (Azevedo 2014).....       | 84 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 19 – Parâmetros obtidos pelo método direto para as leis coesivas ao corte do adesivo Araldite® 2015 .....  | 86  |
| Tabela 20 – Valores de $G_{IIc}$ (em N/mm) pelo método convencional do Sikaforce® 7752 (Azevedo 2014).....        | 89  |
| Tabela 21 – Parâmetros obtidos pelo método direto para as leis coesivas ao corte do adesivo Sikaforce® 7752 ..... | 91  |
| Tabela 22 – Erros de $P_{máx}$ e $\delta P_{máx}$ do adesivo Araldite® AV138 em provete DCB.....                  | 103 |
| Tabela 23 – Erros de $P_{máx}$ e $\delta P_{máx}$ do adesivo Araldite® 2015 em provete DCB .....                  | 105 |
| Tabela 24 – Erros de $P_{máx}$ e $\delta P_{máx}$ do adesivo Sikaforce® 7752 em provete DCB .....                 | 107 |
| Tabela 25 – Média de erro de $P_{máx}$ e $\delta P_{máx}$ do adesivo Araldite® AV138 em provete ENF .....         | 109 |
| Tabela 26 – Média de erro de $P_{máx}$ e $\delta P_{máx}$ do adesivo Araldite® 2015 em provete ENF. ....          | 112 |
| Tabela 27 – Média de erro de $P_{máx}$ e $\delta P_{máx}$ do adesivo Sikaforce® 7752 em provete ENF .....         | 114 |

## *Nomenclatura*

### **Caracteres Romanos**

$a$  – Comprimento da fenda

$a_0$  – Comprimento inicial de fenda

$a_{eq}$  – Comprimento de fenda equivalente

$B$  - Largura do substrato

$d$  – Variável de dano

$d_n$  – Variável de dano à tração

$d_s$  – Variável de dano ao corte

$E$  – Módulo de *Young*

$G$  – Módulo de elasticidade transversal

$G_c$  – Resistência à fratura

$G_I$  - Taxa de libertação de energia em Modo I

$G_{Ic}$  – Tenacidade à tração

$G_{II}$  – Taxa de libertação de energia em Modo II

$G_{IIc}$  – Tenacidade ao corte

$h$  – Espessura do aderente

$I$  – Imagem

**K** – Matriz constitutiva

$K_{nn}$ ,  $K_{ss}$  e  $K_{ns}$  – Parâmetros da matriz **K**

$L$  – Comprimento do provete DCB; Metade do comprimento do provete ENF entre apoios

$L_0$  – Comprimento de sobreposição

$m$  e  $b$  – Parâmetros da reta de decréscimo de  $t_{n,s}$

$P$  – Força

$P_m^0$  -  $P_{máx}$  para os parâmetros iniciais dos modelos

$P_{máx}$  – Força máxima

$P_u$  – Carga aplicada por unidade de largura

$R$  – Fator de correlação

$T$  – 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda na ligação adesiva

$t_n$  – Tensão normal

$t_n^0$  – Resistência coesiva à tração

$t_n^{\text{und}}$  – Resistência coesiva à tração sem degradação de rigidez

$t_s$  – Tensão ao corte

$t_s^0$  – Resistência coesiva ao corte

$t_s^{\text{und}}$  – Resistência coesiva ao corte sem degradação de rigidez

### Caracteres Gregos

$\Delta 2$  – Fator de correção do comprimento de fenda

$\Delta_{aZPF}$  – Contribuição da ZPF para  $a_{eq}$

$\varepsilon_f$  – Deformação de rotura à tração

$\theta_0$  – Rotação dos aderentes na ponta da fenda

$\theta_p$  – Rotação dos aderentes na linha de carga

$\sigma$  – Tensão

$\sigma_f$  – Tensão de rotura à tração

$\sigma_y$  – Tensão de cedência à tração

$\tau_f$  – Tensão de rotura ao corte

$\tau_y$  – Tensão de cedência ao corte

$\Delta$  – Variação percentual

$\alpha$  – Parâmetro adimensional da lei exponencial

$\delta$  – Deslocamento

$\delta_n$  – Deslocamento em tração

$\delta_n^0$  – Deslocamento de tração de início de degradação

$\delta_n^f$  – Deslocamento de rotura à tração

$\delta_n^s$  – Deslocamento de tração de início de amaciamento

$\delta P_{\text{máx}}$  – Deslocamento de força máxima

$\delta_s$  – Deslocamento em corte

$\delta_s^0$  – Deslocamento de corte de início de degradação

$\delta_s^f$  – Deslocamento de rotura ao corte

$\delta_s^s$  – Deslocamento de corte de início de amaciamento

$\varepsilon$  – Deformação

$\varepsilon_n$  – Deformação em tração

$\varepsilon_s$  – Deformação em corte

$\gamma$  – Coeficiente para critério da mecânica da fratura

$\nu$  – Coeficiente de *Poisson*

**Abreviaturas**

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

ASTM – American Society for Testing and Materials

CBBM – *Compliance-Based Beam Method*

CBT – *Corrected Beam Theory*

CCM – *Compliance Calibration Method*

DBT – *Direct Beam Theory*

DCB – *Double-Cantilever Beam*

ENF – *End-Notched Flexure*

HRR – *Hutchinson Rice Rosengreen*

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

JSD – Juntas de sobreposição dupla

JSS – Junta de sobreposição simples

MDC – Modelo do Dano Coesivo

MEF – Método de Elementos Finitos

MEFX – Método de Elementos Finitos Extendido

MFLE – Mecânica da Fratura Linear Elástica

SDEG – *Stiffness degradation*

TFVF – Técnica do fecho virtual da fenda

ZPF – Zona de processo de fratura



# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

O uso de ligações adesivas aumentou significativamente nos últimos anos e é hoje em dia uma técnica de ligação dominante na indústria aeronáutica e automóvel. As ligações adesivas visam substituir os métodos tradicionais de fixação mecânicos na união de estruturas em compósito ou metálicas. Deste modo, as ligações adesivas utilizadas em estruturas buscam a melhoria de características como a distribuição de carga, a possibilidade de ligação de materiais diferentes, a redução de custo de fabrico ou a redução da complexidade da ligação. A existência e melhoria ao longo dos anos de vários modelos de previsão de dano, nomeadamente através do Método de Elementos Finitos (MEF), tem ajudado ao desenvolvimento desta técnica de ligação.

Os modelos de dano coesivo (MDC), usados em conjunto com o MEF, são uma ferramenta viável para a previsão de resistência de juntas adesivas. Os MDC combinam critérios da resistência dos materiais para a iniciação do dano e conceitos da mecânica da fratura para a propagação da fenda. Esta técnica pode levar a uma poupança de recursos e de tempo na análise da resistência de estruturas com juntas adesivas e na seleção do adesivo mais adequado dada aplicação. Os MDC consistem em estabelecer leis coesivas que introduzem artificialmente zonas de propagação de dano na estrutura para avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. Os parâmetros coesivos influenciam de forma significativa os resultados das simulações, nomeadamente 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. A forma da lei coesiva também influencia a previsão de resistência de juntas adesivas por MDC e, dependendo da ductilidade do adesivo em causa, diferentes leis coesivas podem ser recomendadas. A lei triangular e trapezoidal são as leis mais utilizadas. Contudo, a

aplicabilidade da lei triangular é maior, devido à sua simplicidade e implementação mais generalizada em *softwares* de MEF. Como tal, considera-se ser de extrema importância a avaliação da adequabilidade mais comumente utilizadas para a previsão da resistência à tração e ao corte, bem como a determinação qualitativa do desvio observado no caso de aplicação de uma lei coesiva que não é mais adequada ao comportamento de um dado adesivo.

## 1.2 Objetivos

Neste trabalho estuda-se numericamente o efeito de diversos tipos de leis coesivas na previsão no comportamento de juntas adesivas, nomeadamente nas 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. Numa primeira fase do trabalho, é validada a adequabilidade de três tipos de leis coesivas, a triangular, a trapezoidal e a exponencial, para a reprodução das leis coesivas experimentalmente obtidas por ensaios DCB (tração) e ENF (corte) pelo método direto. Esta validação é levada a cabo numericamente recorrendo ao *software* Abaqus®, em que se utilizam MDC triangulares, trapezoidais e exponenciais numa análise MEF. Este estudo é realizado para três adesivos diferentes, um frágil e dois dúcteis. Numa segunda fase, é feito um estudo da influência dos parâmetros coesivos ( $G_{Ic}$ ,  $t_n^0$ ,  $G_{IIc}$  e  $t_s^0$ ) dos três tipos de leis coesivas na previsão do comportamento das juntas DCB e ENF, para uma melhor compreensão do efeito destes parâmetros nas curvas  $P-\delta$ .

## 1.3 Organização do relatório

Esta dissertação encontra-se distribuída em 5 capítulos distintos, de modo a proporcionar uma melhor interpretação da mesma.

No capítulo 1 é apresentado o enquadramento geral do trabalho, definindo os objetivos gerais e descrevendo a organização do relatório.

O capítulo 2 descreve a revisão bibliográfica, que aborda os temas inerentes ao trabalho, como generalidades das ligações adesivas, diferentes tipos de juntas adesivas e esforços

resultantes, e técnicas de previsão da resistência de juntas adesivas como a mecânica dos meios contínuos, mecânica da fratura e os modelos de dano coesivo.

O capítulo 3 faz referência ao trabalho experimental realizado em dissertações anteriores, nomeadamente os ensaios DCB com os adesivos Araldite® AV138 e 2015 por e com o adesivo Sikaforce® 7752 por Campilho et al. (2014), assim como os ensaios ENF para os três adesivos referidos por Azevedo (2014). Neste capítulo são descritos o modo de preparação das juntas adesivas, os ensaios em tração e em corte, assim como os resultados obtidos pelo método direto.

O capítulo 4 refere todo o trabalho numérico realizado no *software* Abaqus®, incluindo as previsões de comportamento dos ensaios DCB e ENF, e comparação com os resultados obtidos experimentalmente. São comparados três tipos de leis coesivas (lei triangular, trapezoidal e exponencial) para deste modo determinar qual a lei coesiva que se adequa melhor a cada adesivo na previsão do dano. Neste capítulo é ainda apresentada uma análise de influência dos parâmetros coesivos na previsão das curvas  $P-\delta$ .

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



# 2 Revisão Bibliográfica

## 2.1 Ligações adesivas

A ligação adesiva, também designada por junta adesiva ou mesmo junta colada, permite a união de dois elementos estruturais, normalmente designados por substratos ou aderentes. Desde há vários anos que se verifica um aumento progressivo na utilização de ligações adesivas. Com a evolução da tecnologia, e em particular a tecnologia dos adesivos, têm surgido adesivos com características superiores no que concerne à resistência e propriedades de adesão, o que lhes tem permitido alcançar um espaço no mercado, substituindo as ligações mais convencionais. Alterações químicas tornaram a combinação de adesivos com bases poliméricas, traduzindo assim em melhores características de tenacidade, do mesmo modo que permitiu obter excelentes resultados na combinação de madeiras e metais (Petrie 2000). O adesivo é, por si só, um material capaz de unir duas superfícies através de forças de adesão e coesão interna, sem alterar a sua estrutura. Quando comparadas com outros métodos de ligação mais tradicionais, como a soldadura ou mesmo ligações mecânicas, as ligações adesivas apresentam diversas vantagens (da Silva et al. 2007). Inicialmente os primeiros adesivos eram muito frágeis. No entanto, o desenvolvimento de juntas adesivas tem-se evidenciado sobretudo quando expostas a condições adversas de temperatura e humidade, o que resultou numa grande aplicabilidade por parte da indústria aeroespacial (Leger et al. 2013). A busca por estruturas mais leves e igualmente resistentes ao impacto faz das ligações adesivas estruturais uma solução viável também na indústria automóvel (Bartczak et al. 2013).

### 2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

As juntas adesivas caracterizam-se por proporcionar uma união entre diferentes materiais, formas e espessuras. A versatilidade das ligações adesivas faz com que estas apresentem um vasto campo de aplicação. Estas são muitas vezes procuradas para satisfazer necessidades de amortecimento de vibrações e absorção de choques. Contudo, as juntas adesivas também se caracterizam pelo seu moroso processo de fabrico, onde o cuidado com a limpeza superficial, assim como o processo de cura, são limitações que devem se consideradas durante a fase de projeto. Na Tabela 1 são apresentadas algumas características das juntas adesivas dos adesivos (Petrie 2000).

Tabela 1 – Características das juntas adesivas (Petrie 2000)

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Tipo de ligações           | Ligações usualmente permanentes                               |
| Distribuição de tensões    | Distribuição de tensões uniforme ao longo da largura da junta |
| União da junta             | Quase invisível, sem contornos do início da ligação           |
| Junção de materiais        | Ideal para união de diferentes materiais                      |
| Resistência a temperaturas | Fraca resistência a elevadas temperaturas                     |
| Resistência mecânica       | Excelentes propriedades de fadiga                             |
|                            | O isolamento elétrico reduz a corrosão                        |
| Preparação da junta        | Necessária uma limpeza cuidada                                |
| Equipamentos               | Elevado custo   |
| Tempo de produção          | Minutos a horas, dependendo do tipo de junta                  |
| Avaliação da qualidade     | Métodos de avaliação limitados                                |

Como já foi referido anteriormente, as ligações adesivas apresentam uma distribuição de tensões mais uniforme ao longo da área colada, quando comparadas com os sistemas de fixação mecânica convencionais (parafusos, rebites, etc.), que apresentam picos de tensão junto à zona de furação (Figura 1).

A preparação das superfícies é um dos aspetos que mais influência a adesão entre o adesivo e os substratos, pelo que se deve efetuar uma rigorosa seleção do adesivo e dos aderentes, de acordo com as suas propriedades. Podem ser usadas várias técnicas com o intuito de melhorar a adesão, como a utilização de tratamentos superficiais, por exemplo a anodização do alumínio (Devries e Adams 2002).

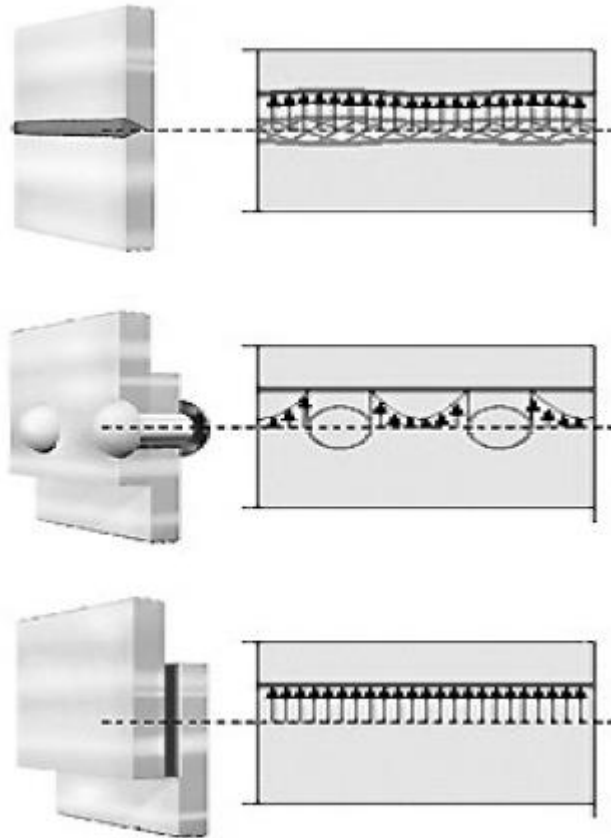


Figura 1 – Distribuição de tensões de ligações soldadas, rebetadas e coladas (Pinto 2007)

A coesão, resistência interna do adesivo quando este é sujeito a esforços, também deve ser levada em consideração, pois quanto mais fortes forem as forças intermoleculares do adesivo, maior será a sua coesão e resistência.

Entre as principais vantagens deste tipo de ligações relativamente às ligações mecânicas destacam-se (Packham 2005, da Silva et al. 2007):

- Diminuição das concentrações de tensões;
- Elevada capacidade de amortecimento de vibrações;
- Aumento da rigidez das estruturas;
- As ligações adesivas permitem também reduzir o número de componentes (parafusos, rebites, grampos, etc);
- Resistência superior à fadiga;
- Excelente relação resistência - peso;
- Custo reduzido devido a processos de fabrico mais baratos;
- Aerodinâmica otimizada;

- Melhor aparência visual;
- Excelentes propriedades elétricas e térmicas;
- Permite a ligação de vários tipos de materiais;
- Resistência à corrosão no caso de juntas de substratos incompatíveis.

Entre as principais limitações, referem-se as seguintes:

- Necessidade de projetar ligações que eliminem as forças de arrancamento e clivagem;
- Necessidade de usar geometrias que evitem tensões localizadas e que garantam uma distribuição uniforme de tensões;
- Os adesivos requerem normalmente cura a altas temperaturas;
- Necessidade de evitar as tensões localizadas e garantir que o adesivo trabalhe essencialmente ao corte;
- Necessidade de uma cuidada preparação superficial;
- Difícil controlo de qualidade e segurança;
- Não existe um critério de dimensionamento universal que defina o projeto para qualquer estrutura;
- Reduzida resistência à temperatura e humidade.

O uso de adesivos em ligações estruturais continua a ser um tema de investigação (da Silva et al. 2007). Um dos requisitos importantes das juntas adesivas é que estas continuem a suportar cargas estáticas e dinâmicas, em condições de serviço, durante o seu ciclo de vida.

### **2.1.2 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas**

A resistência das juntas adesivas está diretamente relacionada com a resistência do adesivo e tipos de esforços desenvolvidos durante o carregamento. Inúmeros estudos foram sendo realizados ao longo dos anos de modo a analisar a resistência de diferentes configurações de juntas adesivas. Na Figura 2 estão representados os tipos de esforços possíveis em ligações adesivas, descritos como se segue (Devries e Adams 2002):

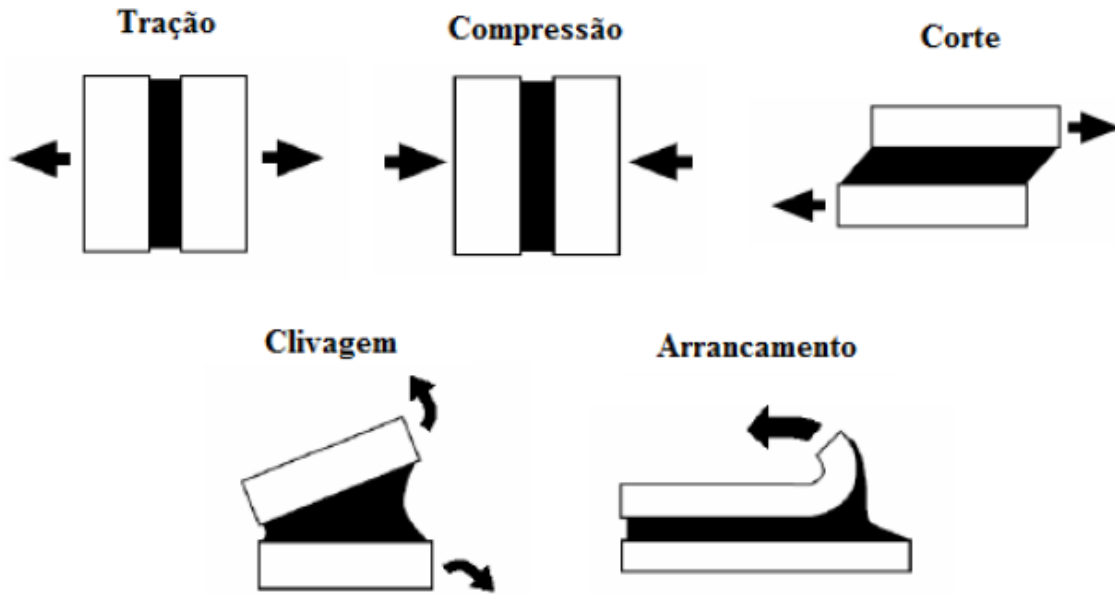


Figura 2 – Principais esforços em ligações adesivas (da Silva et al. 2007)

Esforços de tração – ocorrem pela aplicação de forças perpendiculares ao plano da colagem, fazendo com que os aderentes se afastem, e resultam em tensões uniformemente distribuídas por toda a superfície. Na realidade a espessura de adesivo é difícil de controlar pelo que, na prática, as forças raramente são rigorosamente axiais. Assim, desenvolvem-se regiões de maior concentração de tensões relativamente ao interior do adesivo. Normalmente os adesivos apresentam uma baixa resistência quando solicitados à tração (Figura 3).

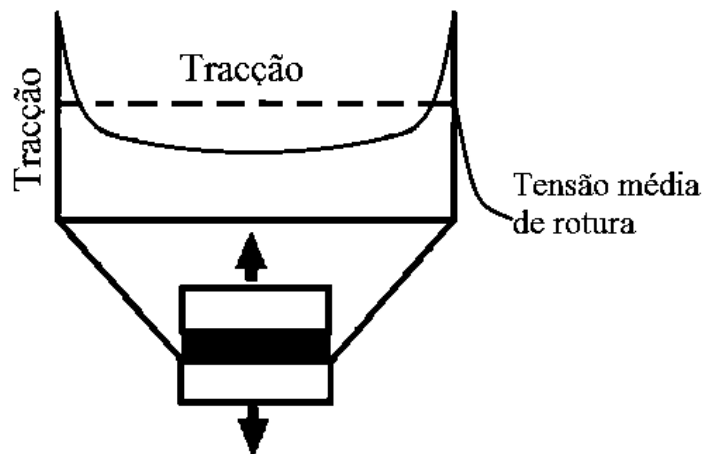


Figura 3 – Distribuição de tensão axial numa junta sob esforço de tração (Petrie 2000)

Esforços de Compressão – esforços similares ao ensaio de tração, onde as forças são aplicadas perpendicularmente ao plano da colagem. Este tipo de esforço diferencia-se da tração pela inversão do sentido do carregamento, que passa a ser compressivo. As forças

devem ser alinhadas de forma que o adesivo permaneça em compressão pura. De acordo com a Figura 4 a distribuição de tensão de compressão pelo adesivo é constante (Figura 4).

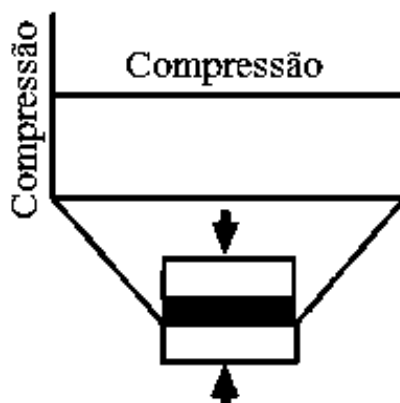


Figura 4 – Distribuição de tensão axial numa junta sob esforço de compressão (Petrie 2000)

Esforços de Corte – provocam o escorregamento entre os dois substratos, que ocorre pela aplicação de forças paralelas ao plano de colagem. Observam-se picos de tensões de corte originadas numa junta sujeita a esforços de corte nos dois extremos do adesivo. Deste modo parte central do adesivo está sujeita a tensões quase nulas e quanto maior forem os seus valores de pico, menor será a resistência do adesivo (Figura 5). Este comportamento deve-se ao efeito da deformação diferencial ao longo do comprimento de sobreposição ( $L_o$ ), de modo que cada aderente se deforma longitudinalmente a uma taxa crescente, desde a sua extremidade livre até à extremidade oposta à sobreposição (da Silva et al. 2007).

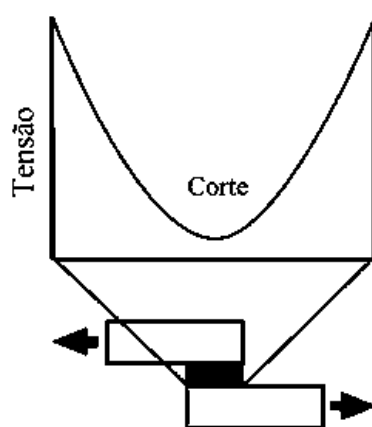


Figura 5 – Distribuição de tensão corte numa junta sob esforço de corte (Petrie 2000)

Esforços de Clivagem – resultam da aplicação de forças numa das extremidades de uma junta rígida, onde se observa uma concentração de tensões normais na zona de aplicação da força (Devries e Adams 2002), e onde a restante porção de adesivo não contribui significativamente para a resistência da junta ligada. As tensões de clivagem devem ser evitadas numa junta colada, pois as juntas apresentam uma resistência muito inferior a este tipo de solicitações, relativamente a esforços de corte (Figura 6).

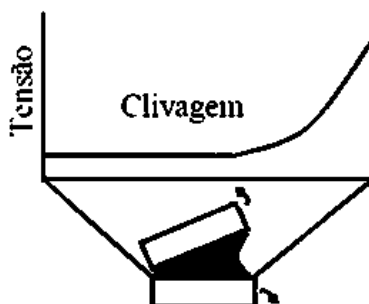


Figura 6 – Distribuição de tensão axial numa junta sob esforço de clivagem (Petrie 2000)

Esforços de Arrancamento – são similares aos esforços de clivagem embora um ou dois aderentes sejam flexíveis e estes podem deformar plasticamente através da ação das forças aplicadas, também devem ser evitados numa junta colada, devido à baixa resistência dos adesivos a esse tipo de esforços. A aplicação do carregamento pode ocorrer com ângulos de arrancamento, entre  $5^\circ$  e  $90^\circ$ . Desta forma, o ângulo de separação dos substratos pode ser maior para o arrancamento do que para a clivagem. Os adesivos mais frágeis e rígidos são mais sensíveis às forças de arrancamento e apresentam maiores gradientes de tensões no sentido da zona de aplicação dos esforços (da Silva et al. 2007) (Figura 7).

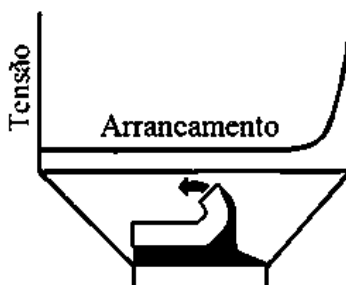


Figura 7 – Distribuição de tensão axial numa junta sob esforço de arrancamento (Petrie 2000)

As ligações adesivas possuem a capacidade de manter a sua integridade estrutural, quando sujeitadas a solicitações estáticas e/ou dinâmicas e condições ambientais adversas, como humidade e temperatura. De forma a verificar o comportamento e o sucesso no fabrico das ligações adesivas, é fundamental a correta avaliação dos modos de rotura induzidos nas juntas coladas. De acordo com a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), ASTM D5573-99 (2012), os modos de rotura mais relevantes que ocorrem nas ligações entre substratos e adesivos são os apresentados na Figura 8: rotura coesiva, rotura adesiva, rotura pelo substrato e rotura mista.

No que diz respeito à rotura coesiva, esta ocorre pelo interior do adesivo, onde se verifica que o substrato é mais forte do que a resistência interna do adesivo. Neste tipo de rotura ambas as superfícies dos substratos contêm uma película de adesivo após a rotura. Este é um dos modos de rotura preferencial uma vez que se está a utilizar a totalidade da resistência do adesivo da junta.

A rotura adesiva, também conhecida por rotura interfacial, ocorre na interface entre o aderente e o adesivo. Por norma, esta rotura deve-se a uma má preparação das superfícies dos substratos, ou pode ser provocada pelas tensões de arrancamento e de corte, que atingem valores máximos junto da interface. Como resultado deste tipo de rotura, observa-se que um dos aderentes não apresenta qualquer resíduo de adesivo, o qual fica depositado, na sua totalidade, na outra superfície. Saliente-se ainda que muitas roturas consideradas inicialmente adesivas são, na realidade, roturas coesivas (Gonçalves et al. 2002).

Quanto à rotura pelo substrato, esta é semelhante ao modo de rotura coesiva do adesivo. No entanto esta rotura ocorre pelo substrato quando a sua resistência interna é inferior à da ligação entre o adesivo e o substrato.

Finalmente, a rotura mista resume-se à combinação de uma rotura adesiva e de uma rotura coesiva. A sua rotura ocorre na zona de ligação entre o adesivo e o substrato e no interior do adesivo. A sua origem pode estar associada à falta de limpeza ou à limpeza ineficaz de uma determinada secção das superfícies a unir.

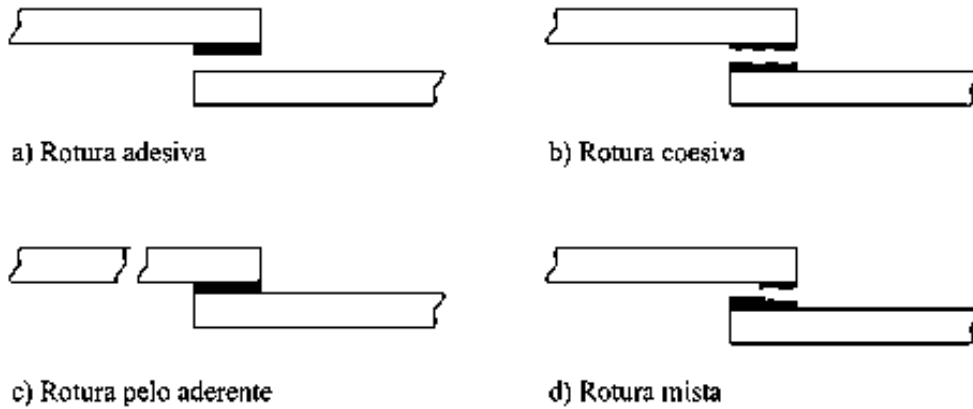


Figura 8 – Modos de rotura em juntas adesivas (da Silva et al. 2007)

### 2.1.3 Configurações possíveis de junta

A escolha da configuração de junta adesiva é de extrema importância para definição da sua resistência, segurança e durabilidade (Troughton 2008). A distribuição de tensões ao longo da junta é influenciada pelas propriedades mecânicas do adesivo e dos substratos como também sua geometria da própria junta (Owens 1998). As juntas adesivas podem apresentar vários tipos de configurações, como representado na Figura 9.

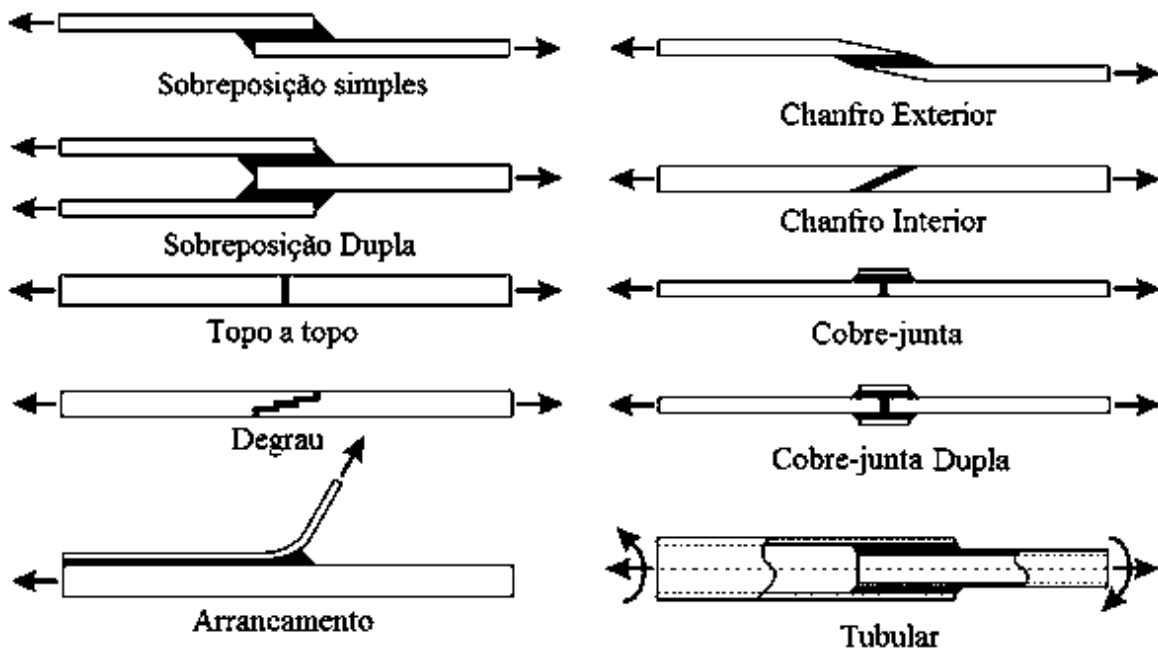


Figura 9 – Principais configurações de juntas (da Silva et al. 2007)

Junta de sobreposição simples (JSS) – são frequentemente utilizadas em aplicações industriais devido ao fácil processo de fabrico. Estas juntas são caracterizadas pela transmissão de carga descentrada, que origina o aparecimento de tensões normais na direção da espessura de adesivo. Por outro lado, a deformação diferencial dos aderentes na zona da ligação causa grandes concentrações de tensões de corte nas extremidades da sobreposição, onde também ocorre um efeito de entalhe causado pela mudança brusca da geometria. Todos estes fatores contribuem para uma resistência reduzida da junta relativamente à área colada (Campilho et al. 2005).

Junta de sobreposição dupla (JSD) – são normalmente utilizadas quando a resistência das JSS não é suficiente, pois funciona como a combinação de duas JSS juntas. A JSD através da sua configuração simétrica provoca efeitos de flexão quase nulos, que originam tensões normais mais baixas. Por outro lado, na linha adesão podem surgir tensões de tração e compressão, desde que os substratos exteriores sofram flexão (ASTM 2002).

Junta com chanfro exterior – neste tipo de junta há uma alteração geometria dos aderentes, na medida em que é criado um chanfro de modo diminuir os picos de tensão de corte que ocorrem nas extremidades da junta de sobreposição simples. Deste modo, esta modificação reduz as concentrações de tensões, o que se traduz num aumento de resistência das juntas.

Junta com chanfro interior – também denominadas de junta em rampa, estas juntas caracterizam-se por diminuir o gradiente de tensões ao longo do adesivo, proporcionado por uma diminuição da excentricidade dos esforços, o que permite alcançar elevadas resistências de junta. Este tipo de junta promove uma boa aerodinâmica na zona de ligação na medida em que os aderentes ficam colineares.

Junta em degrau – junta de elevada resistência, devido à colinearidade dos aderentes e distribuições de tensões favoráveis. No caso de aplicação a aderentes de material compósito, a disposição em degrau pode ser fabricada durante o empilhamento e antes da cura do conjunto. No caso de aderentes metálicos esta junta é fabricada por maquinaria (o que também se pode aplicar para materiais compósitos), o que encarece o processo de fabrico.

Junta com cobre-junta – junta que apresenta maior resistência do que a JSS, embora também seja sujeita a esforços de arrancamento. Este tipo de juntas é associado a ligação a aderentes colineares ou à reparação de estruturas danificadas, sendo que a colagem da cobre-junta promove a alteração dos caminhos de transferência de esforços.

Junta com cobre-junta dupla – esta junta apresenta um comportamento semelhante à cobre-junta simples, estando também associada à redução de esforços decorrente da colinearidade entre os aderentes. Como tal, a transferência de esforços através das cobre-juntas é bastante melhor relativamente à cobre-junta simples. Esta configuração de junta elimina quase por completo a flexão dos seus constituintes, o que também é altamente benéfico para a resistência das juntas. No entanto, no caso de utilização de uma cobre-junta para efeitos de reparação de uma estrutura, pode dar-se o caso de não haver acessibilidade a ambos os lados da estrutura danificada, o que inviabiliza a utilização desta configuração de junta (Petrie 2000).

Junta topo a topo – caracterizam-se por ser o tipo de junta mais fácil de fabricar. Por outro lado, estas juntas apresentam uma resistência muito reduzida devido à área reduzida de colagem. Esta junta apresenta baixa eficácia quando solicitada a esforços de flexão, pois o adesivo ficaria sujeito a clivagem.

Junta tubular – este tipo de junta permite a unir tubos, varões ou veios com a extremidade reta ou em chanfro. Caracteriza-se pela sua boa resistência a esforços de tração e compressão. No entanto, se os esforços atuantes não estiverem alinhados com o eixo de revolução dos tubos, geram-se tensões de arrancamento. Estas tensões podem porém ser atenuadas pela utilização de chanfros, canais ou ressalto, aumentando a área de contacto e a resistência ao arrancamento por efeito mecânico. Este tipo de juntas apresenta maior resistência que as juntas de topo a topo simples devido à maior resistência a esforços de clivagem decorrentes da flexão. Por outro lado, este tipo de junta também se caracteriza pela dificuldade de inspeção da junta. A necessidade de recorrer a operações de maquinaria acresce o custo deste tipo de junta. A utilização de orifícios para a injeção do adesivo e a abertura de canais para facilitar a saída do ar são algumas das soluções para assegurar que o adesivo preencha toda a cavidade de ligação (Montes et al. 2006).

Junta de arrancamento – caracteriza-se por ser uma junta obtida por colagem de substratos finos em componentes mais espessos e com solicitação normal, o que origina tensões de arrancamento. Estes esforços originam tensões que se concentram em porções muito reduzidas da área de colagem, pelo que a resistência desta junta é reduzida.

Junta de Ressalto – caracteriza-se por ser uma solução simples e eficaz para garantir um alinhamento das forças. No entanto, a construção deste tipo de junta é dificultada pelo fabrico do ressalto, especialmente para substratos frágeis ou de elevada resistência.

## **2.2 Previsão da resistência das juntas**

O processo evolutivo das juntas adesivas está intimamente relacionado com o desenvolvimento de metodologias de previsão fiáveis que permitam aumentar a eficiência na sua utilização, possibilitando assim ultrapassar o paradigma das juntas adesivas sobredimensionadas que resultavam em estruturas mais dispendiosas e mais pesadas, tudo isto relacionado com a falta de modelos materiais precisos e de critérios de rotura adequados que se faziam notar há algumas décadas atrás. As duas metodologias que podem ser aplicadas para a análise de juntas adesivas são as análises de forma fechada (métodos analíticos) e os métodos numéricos.

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen (1938), que parte do princípio que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade do adesivo se deformar plasticamente, da utilização de substratos de compósito ou de materiais diferentes. O MEF (Adams e Peppiatt 1974) é então a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams (1984), que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Recorreu-se então à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas coladas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho virtual da fenda (TFVF). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional (Curiel Sosa e Karapurath 2012). Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por

MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

Mais recentemente, começou-se a usar outra técnica para modelar o crescimento de fendas com uma tensão, o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento contínuo.

### **2.2.1 Mecânica dos meios contínuos**

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen (1938), que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. (1997) usou o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de  $L_0$ . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios (Panigrahi e Pradhan 2007). No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams (1984), em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

### 2.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a  $180^\circ$ . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, este se mantém com dimensões inferiores às críticas, embora se possa propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fissuras pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo (da Silva et al. 2007). Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith (1921) através do estudo de fraturas em fibras de vidro, que lhe permitiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final (Williams 1959). Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson (1968) e por Rice (1968) para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia,  $G_I$  ou  $G_{II}$ , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura,  $G_c$  (Fernlund e Spelt 1991), em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da

fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na sollicitação.

### 2.2.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com estudos de Barenblatt (1959) e Dugdale (1960), que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos (Duan et al. 2004).

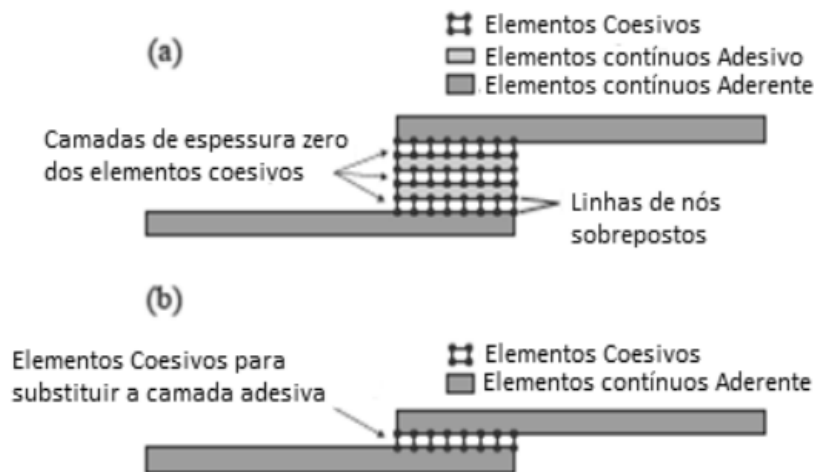


Figura 10 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (da Silva e Campilho 2011)

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura (Ji et al. 2010). O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 10), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local

(Turon et al. 2007), ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua (Kafkalidis e Thouless 2002).

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenômenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais (Yang e Thouless 2001). Este modelo está implementado em *softwares*, como o caso do Abaqus<sup>®</sup>, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D apresenta uma componente adicional de corte (Campilho et al. 2012).

### 2.2.3.1 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico (Allix e Corigliano 1996), triangular (Alfano e Crisfield 2001), exponencial (Chandra et al. 2002), polinomial (Chen 2002) e trapezoidal (Kafkalidis e Thouless 2002). Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos (Pinto et al. 2009).

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 (Liljedahl et al. 2006). Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface (de Moura et al. 2000) de seis nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do Abaqus<sup>®</sup>. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 11).

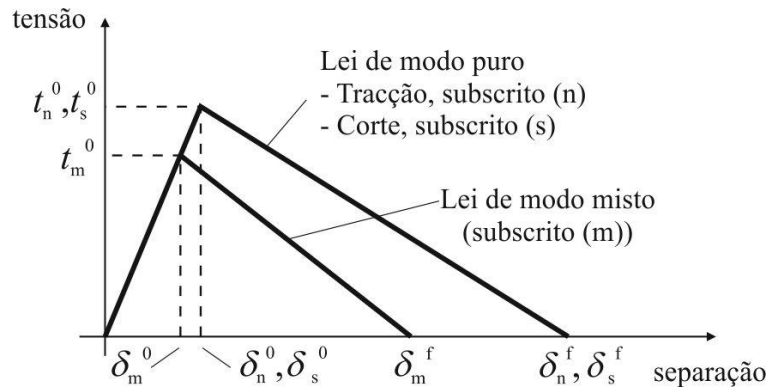


Figura 11 – Modelo coesivo triangular (de Moura et al. 2000, Campilho et al. 2007)

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte (Campilho et al. 2008).

Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I (de Moura et al. 2008) e modo II (de Moura et al. 2009) (Figura 12).

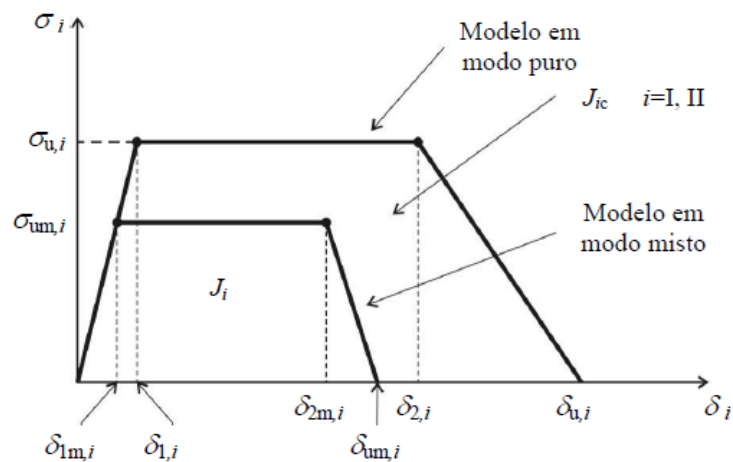


Figura 12 – Modelo coesivo trapezoidal (Campilho et al. 2008)

### 2.2.3.2 Influência do tipo de lei coesiva na resistência das juntas

A forma da lei coesiva apresenta grande influência na previsão de resistência de juntas adesivas e, dependendo da ductilidade do adesivo em causa, diferentes leis coesivas podem ser a mais adequada. Neste capítulo descreve-se com algum detalhe um trabalho em que a influência da lei coesiva é estudada para um adesivo frágil e outro dúctil.

Sendo assim, no trabalho de Campilho et al. (2013) estudou-se o efeito da utilização de leis coesivas triangulares, trapezoidais e exponenciais na previsão da resistência à tração de juntas adesivas com aderentes de carbono-epóxico e um adesivo frágil (Araldite<sup>®</sup> AV138) e outro dúctil (Araldite<sup>®</sup> 2015), e com valores de  $L_0$  entre 10 e 80 mm. A Figura 13 detalha as diferentes leis coesivas para os adesivos Araldite<sup>®</sup> 2015 e AV138 em tração (a) e em corte (b).

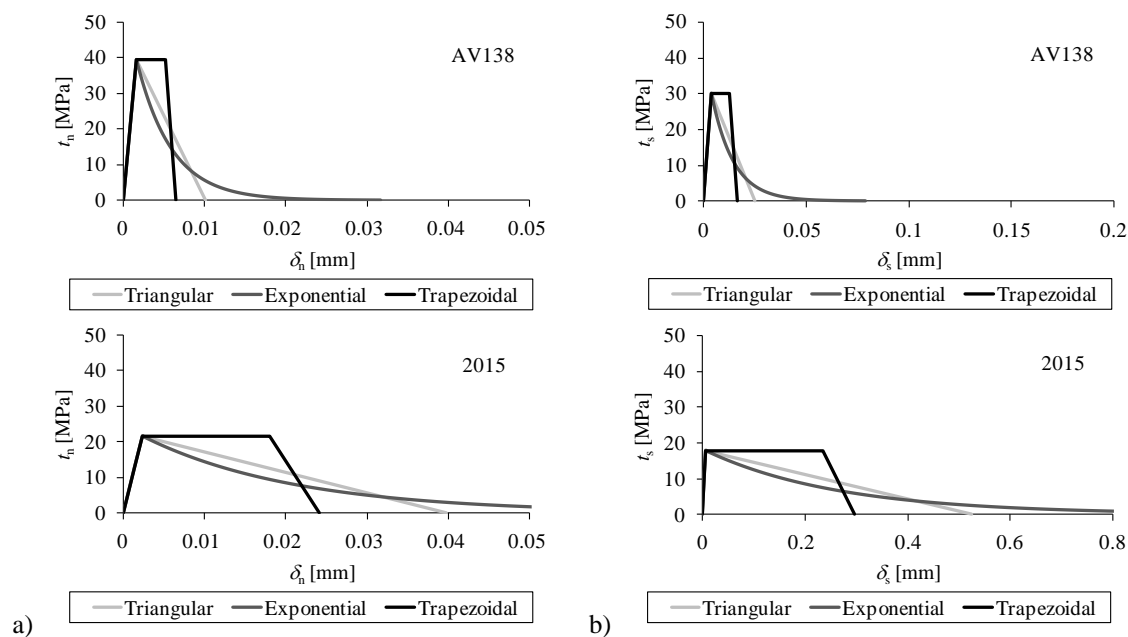


Figura 13 – Leis coesivas em tração (a) e corte (b) para ambos os adesivos

A Figura 14 apresentada o desvio percentual entre os valores experimentais e numéricos por MEF para o Araldite<sup>®</sup> 2015 (normalizados pelos respectivos valores de tensão máxima ( $P_{\text{máx}}$ ) experimentais). Os resultados mostram que as previsões pela lei trapezoidal são as que mais se aproxima dos dados experimentais. Os erros percentuais entre os dados experimentais e o MEF são bastante reduzidos, com um máximo de 1,9% para  $L_0=80$  mm. Estes resultados são coerentes com trabalhos anteriores realizados com este tipo de adesivo (com alguma ductilidade).

A lei triangular subestimou o valor de  $P_{\text{máx}}$ , com uma tendência clara para discrepâncias maiores com maiores valores de  $L_0$  (variação percentual ( $\Delta$ )=-2,2% para  $L_0=10$  mm, crescendo de forma sustentada para valores maiores de  $L_0$ ;  $\Delta=-5,5\%$  para  $L_0=80$  mm). Esta tendência foi justificada pelas distribuições de tensões (nomeadamente as tensões de corte) para JSS. De facto, para pequenos valores de  $L_0$ , a distribuição praticamente uniforme das tensões de corte entre as extremidades faz com que a forma da lei MDC seja praticamente irrelevante porque, no momento em que  $P_{\text{máx}}$  é atingido, o adesivo encontra-se carregado de forma praticamente uniforme em toda a sua extensão. Nas análises de MEF, isto corresponde a um cenário em que os níveis de tensão de todos os elementos coesivos estão na proximidade de  $t_{n,s}^0$  em toda a camada de adesivo, o que faz com que a forma da lei coesiva não seja muito relevante. Para valores maiores de  $L_0$ , os gradientes de tensão na camada de adesivo aumentam e os desvios relativamente aos dados experimentais também aumentam. Apesar das variações observadas para os resultados experimentais, a lei triangular ainda consegue prever  $P_{\text{máx}}$  com uma precisão aceitável, o que é relevante na medida em que a lei coesiva triangular é a de mais fácil utilização em termos de implementação, tempo de cálculo, definição dos parâmetros coesivos e disponibilidade nos códigos comerciais de MEF. A lei coesiva exponencial apresentou resultados díspares para o intervalo considerado de valores de  $L_0$ . Para valores pequenos de  $L_0$ ,  $P_{\text{máx}}$  foi sobrestimado numericamente ( $\Delta$  máximo de 27,9% para  $L_0=10$  mm). Os valores de  $\Delta$  diminuem com o aumento de  $L_0$  e aproximam-se dos valores experimentais para  $L_0=50$  mm. A partir deste ponto, registaram-se previsões por defeito de  $P_{\text{máx}}$  (até um máximo de  $\Delta=-6,8\%$  para  $L_0=80$  mm).

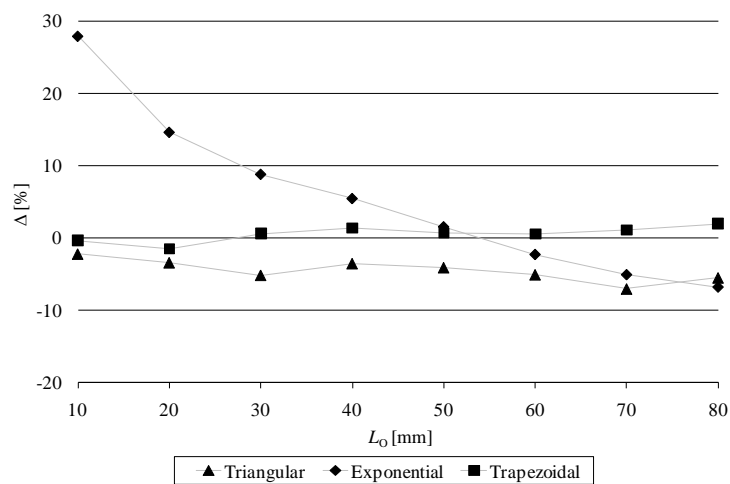


Figura 14 – Desvio percentual entre os valores experimentais e numéricos de  $P_{\text{máx}}$  para o Araldite® 2015.

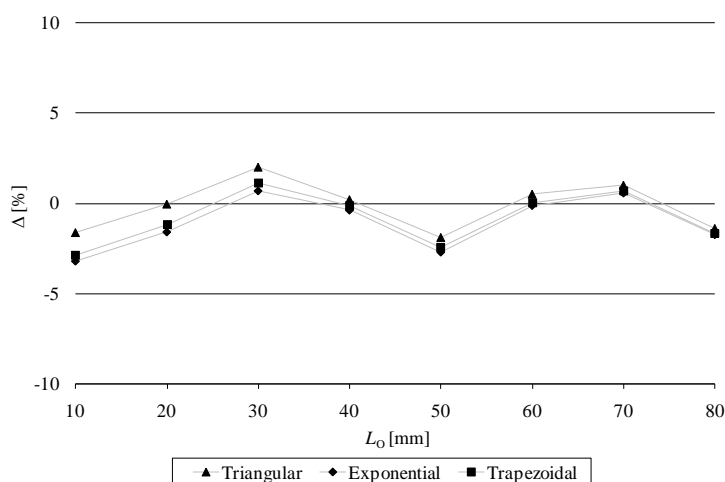


Figura 15 – Desvio percentual entre os valores experimentais e numéricos de  $P_{m\acute{a}x}$  para o Araldite® AV138.

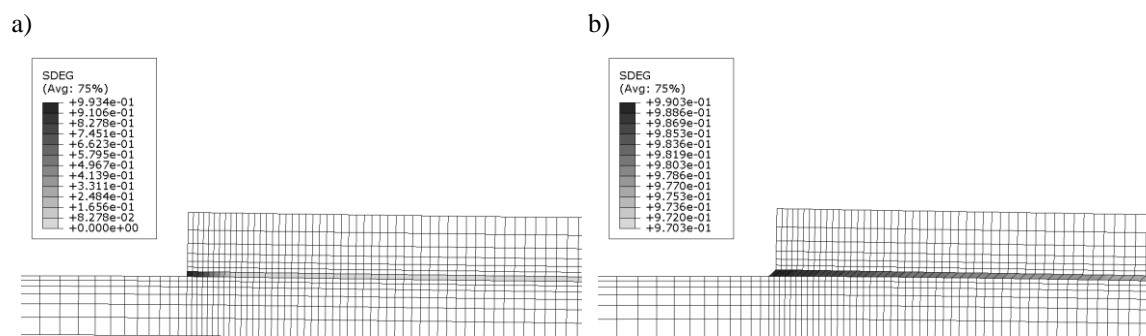


Figura 16 – Degradação da rigidez para as juntas com  $L_0=80$  mm e com o Araldite® AV138 (a) e Araldite® 2015 (b) quando  $P_{m\acute{a}x}$  é atingido (lei trapezoidal).

A Figura 15 apresenta uma comparação idêntica para o Araldite® AV138 adesiva. Pode ser desde já observada uma grande diferença no que se refere à ordem de grandeza de  $\Delta$  uma vez que, para o Araldite® AV138, o desvio máximo é próximo de 3%, em comparação com os cerca de 30% para o Araldite® 2015. Por outro lado, os resultados de todas as três leis coesivas seguem a mesma tendência para toda a gama de valores de  $L_0$ . Isto está relacionado com a fragilidade do Araldite® AV138, especialmente quando comparada com a grande ductilidade do Araldite® 2015, o que pode ser observado na Figura 13 pela diferença dos valores de  $\delta_{n,s}^f$ . De facto, a lei coesiva ao corte do Araldite® 2015 apresenta um valor de deslocamento de rotura ao corte na ponta da fenda ( $\delta_s^f$ ) superior em mais que uma ordem de grandeza relativamente ao Araldite® AV138. Como resultado desta diferença, a forma das leis coesivas do Araldite® AV138 é muito menos influente porque a zona em amaciamento é insignificante relativamente à do Araldite® 2015. Isto pode ser observado na Figura 16,

que compara as juntas com  $L_0=80$  mm coladas com o Araldite® AV138 (a) e Araldite® 2015 (b) quando se atinge  $P_{\text{máx}}$  (lei coesiva trapezoidal). O parâmetro *stiffness degradation* (SDEG) corresponde à degradação da rigidez ao corte, e com SDEG=0 correspondente à ausência de dano e SDEG=1 a indicar a rotura completa. Uma vez que a região de influência das leis coesivas para o Araldite® AV138 está restrita a uma pequena porção da sobreposição, quaisquer diferenças na forma das leis coesivas tem um efeito reduzido. Isto também justifica a mesma tendência entre as três leis coesivas, embora se observe uma pequena redução de  $\Delta$  entre as três formas com o aumento de  $L_0$ , com variações pouco significativas para os valores maiores de  $L_0$ . Esta variação é justificada pelos aumentos dos gradientes de tensão na ligação adesiva, tanto em corte como em arrancamento, o que reduz ainda mais o comprimento de adesivo em amaciamento, onde as diferenças entre as três leis coesivas ocorrem. Em condições de rotura frágil, todas as leis coesivas se revelaram assim adequadas para a previsão da resistências das juntas, embora os melhores resultados (especialmente para valores reduzidos de  $L_0$ ) tenham sido obtidos com a lei triangular (valor máximo de  $\Delta$  de -1,9% para  $L_0=10$  mm). Comparando com estes resultados e com os experimentais, as previsões pela lei trapezoidal apresentaram valores ligeiramente inferiores (máximo  $\Delta=-2,9\%$  para  $L_0=10$  mm). Os resultados da leis exponencial apresentam uma redução ainda mais acentuada (máximo  $\Delta=-3,2\%$  para  $L_0 =10$  mm), embora seguindo a mesma tendência.

Concluiu-se assim que a lei coesiva tem uma influência significativa na previsão de resistência para as juntas com adesivos dúcteis (como é o caso do Araldite® 2015), caso em que uma lei trapezoidal é mais adequada. Para a adesivos frágeis (como é o caso do Araldite® AV138), a lei triangular é mais adequada embora a diferença entre as três leis estuda seja muito reduzida.

### 2.2.3.3 Influência dos parâmetros coesivos na resistência das juntas

Nos últimos anos, foram publicados vários trabalhos a abordar a influência dos parâmetros coesivos ( $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$ ,  $t_n^0$  e  $t_s^0$ ) e alguns métodos de estimação das leis coesivas, como por exemplo o método de definição individual dos parâmetros, o método direto e o método inverso, que apresentam diferente grau de complexidade e precisão expetável dos resultados. Independentemente do método utilizado, espera-se que haja algumas diferenças entre a

previsão quantitativa dos parâmetros coesivos da camada de adesivo e o comportamento real do adesivo (Leffler et al. 2007, Pinto et al. 2009).

Neste capítulo apresenta-se de forma resumida os resultados do trabalho de Campilho et al. (2012) em que se estudou numericamente a influência dos parâmetros coesivos mais relevantes de um modelo de dano triangular em modo misto ( $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$ ,  $t_n^0$  e  $t_s^0$ ) na previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples submetidas à tração com substratos de compósito de carbono-epóxico. Estudou-se a influência da variação percentual dos parâmetros  $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$ ,  $t_n^0$  e  $t_s^0$  isoladamente, e também o efeito da combinação destes parâmetros, no valor de  $P_{máx}/P_m^0$  da junta numérica em estudo ( $P_m^0$  representa  $P_{máx}$  para os parâmetros iniciais dos modelos). As propriedades iniciais foram variadas desde -80 até +100% dos seus valores iniciais. A influência da variação de cada parâmetro na lei coesiva respectiva está representada na Figura 17 para  $G_{Ic}$  (a) e  $G_{IIc}$  (b) e na Figura 18 para  $t_n^0$  (a) e  $t_s^0$  (b).

A Figura 19, Figura 20 e Figura 21 apresentam a influência de variações percentuais de  $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$ , e  $G_{Ic} + G_{IIc}$ , respetivamente, no valor de  $P_{máx}/P_m^0$ . Observa-se que a utilização de valores de  $G_{Ic}$  e/ou  $G_{IIc}$  inferiores aos reais é altamente penalizador para a precisão dos modelos numéricos (máxima subestimação de  $\approx 44,5\%$  para  $L_0 = 80$  mm, pela redução de 80% de  $G_{Ic} + G_{IIc}$  dos seus valores iniciais). Apenas para valores extremamente reduzidos de  $L_0$  não se observe este efeito. Por outro lado, a utilização de  $G_{Ic}$  e/ou  $G_{IIc}$  superiores aos reais tem uma influência reduzida nos resultados (máxima previsão por excesso de  $\approx 9,3\%$  para  $L_0 = 80$  mm; aumento de  $G_{Ic} + G_{IIc}$  de +100%).

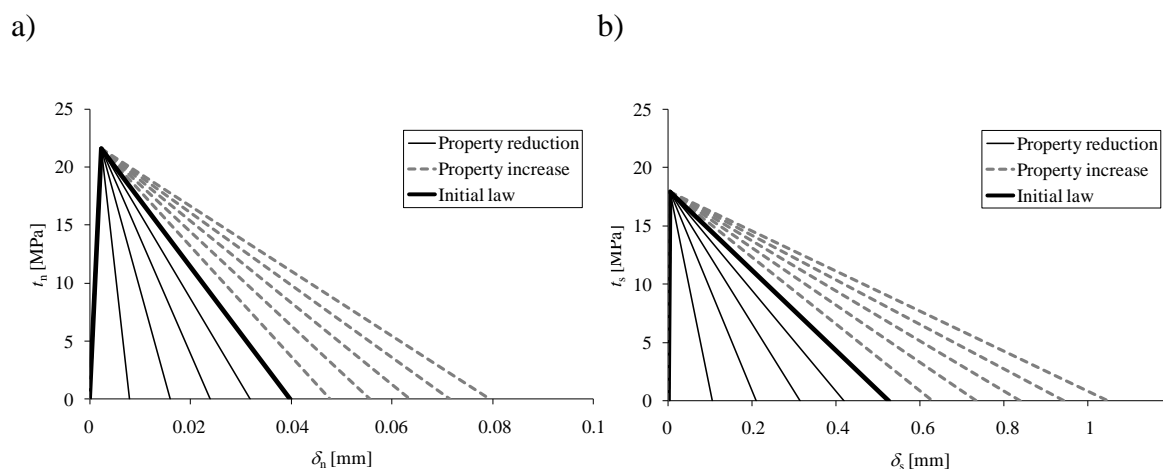


Figura 17 – Leis coesivas à tração (a) e corte (b) para alteração de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  entre -80 até +100% do valor inicial (Campilho et al. 2012)

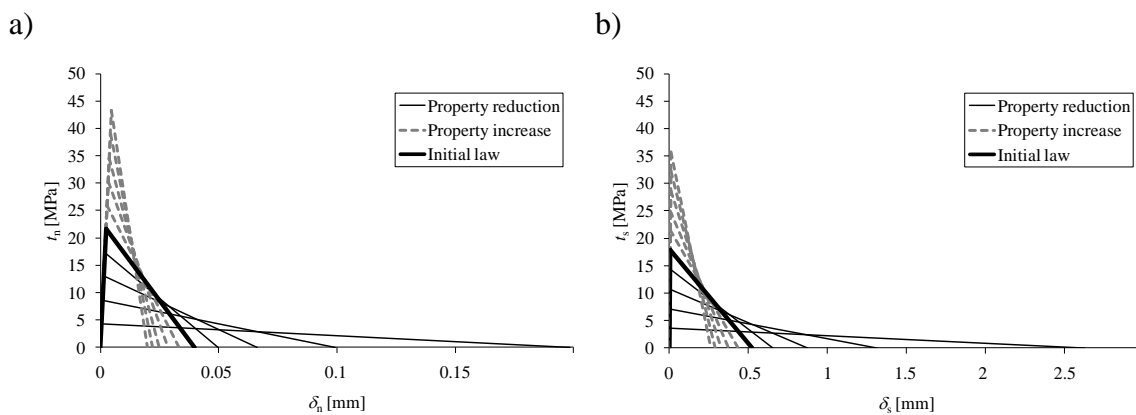


Figura 18 – Leis coesivas à tração (a) e corte (b) para alteração de  $t_n^0$  e  $t_s^0$  entre -80 até +100% do valor inicial (Campilho et al. 2012)

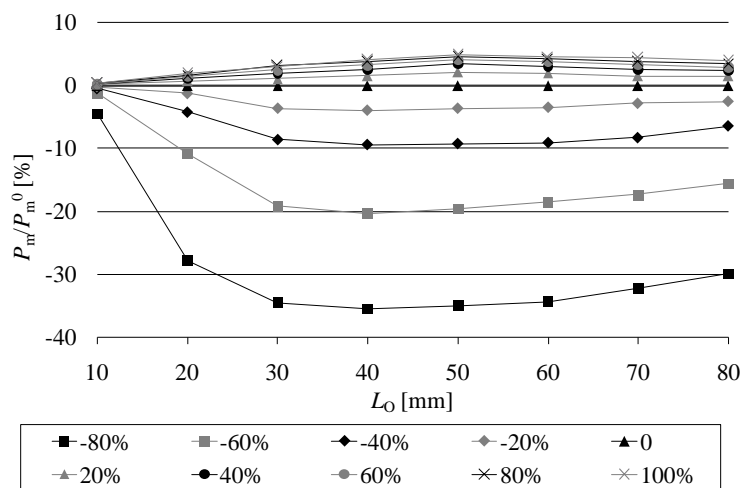


Figura 19 – Variação percentual de  $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$  com valores de  $G_{Ic}$  desde -80 até +100% do valor inicial (Campilho et al. 2012)

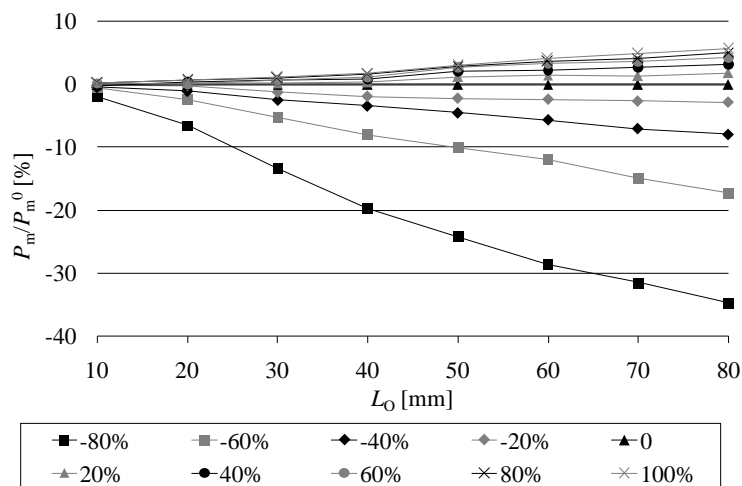


Figura 20 – Variação percentual de  $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$  com valores de  $G_{IIc}$  desde -80 até +100% do valor inicial (Campilho et al. 2012)

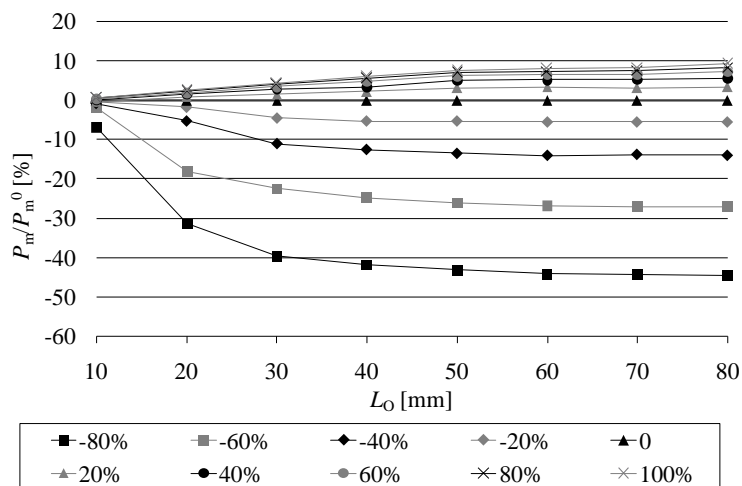


Figura 21 – Variação percentual de  $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$  com valores de  $G_{Ic} + G_{IIc}$  desde -80 até +100% dos valores iniciais (Campilho et al. 2012)

A influência da variação de  $t_n^0$ ,  $t_s^0$  e  $t_n^0 + t_s^0$  nos valores de  $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$  é representada na Figura 22, Figura 23 e Figura 24, respectivamente. Observa-se que a previsão por excesso de  $t_n^0$  é praticamente inconsequente (diferença máxima de  $\approx 3,2\%$  para  $L_0 = 20$  mm e aumento de +100%), embora se observem variações moderadas para valores de  $t_n^0$  inferiores ao real, especialmente para valores pequenos de  $L_0$  (diferença máxima de  $\approx 29,1\%$  para  $L_0 = 20$  mm e -80% de redução).

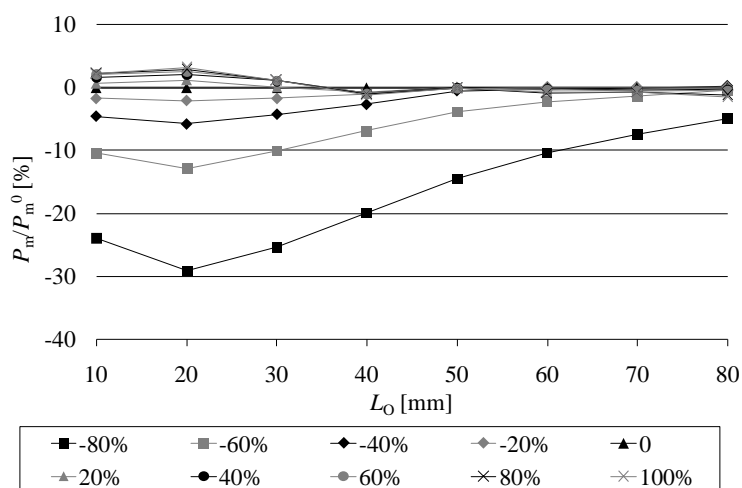


Figura 22 – Variação percentual de  $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$  com valores de  $t_n^0$  desde -80 até +100% do valor inicial (Campilho et al. 2012)

Por outro lado, o valor de  $t_s^0$  tem grande influência nos resultados de  $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$ , com uma relação quase proporcional entre a variação por defeito de  $t_s^0$  e a previsão de  $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$  (diferença máxima de  $\approx 79,1\%$  para  $L_0 = 10$  mm e redução de -80%). Considerando-se

previsões por excesso de  $t_s^0$ , a melhoria de  $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$  não é tao notória, especialmente para valores elevados de  $L_0$  (diferença máxima de  $\approx 78,7\%$  para  $L_0 = 10$  mm e aumento de +100%). O efeito combinado de  $t_n^0 + t_s^0$  é semelhante ao de  $t_n^0$  isoladamente (aumento máximo de  $\approx 90,0\%$  para variação de  $t_n^0 + t_s^0$  de +100%, e redução máxima de 79,4% para variação de  $t_n^0 + t_s^0$  de -80%).

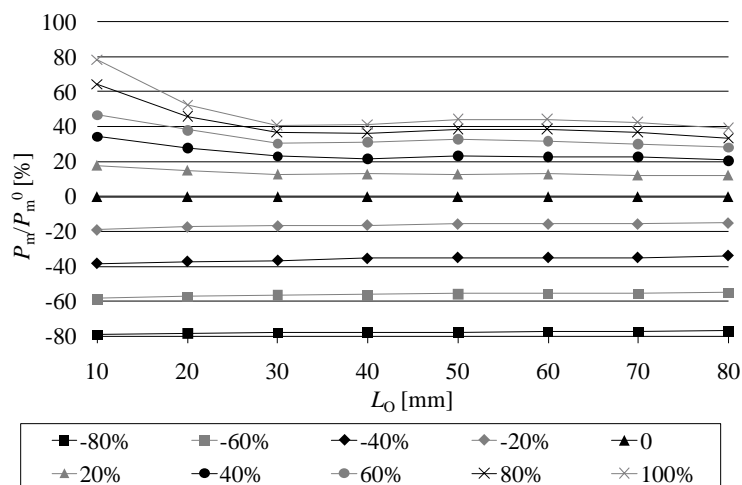


Figura 23 – Variação percentual de  $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$  com valores de  $t_s^0$  desde -80 até +100% do valor inicial (Campilho et al. 2012)

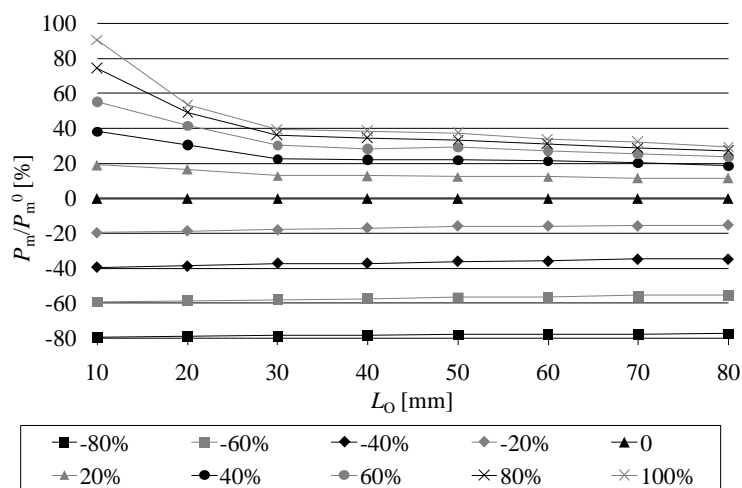


Figura 24 – Variação percentual de  $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$  com valores de  $t_n^0$  e  $t_s^0$  desde -80 até +100% dos valores iniciais (Campilho et al. 2012)

Na Figura 25 está representada a influência da variação combinada dos quatro parâmetros ( $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$ ,  $t_n^0$  e  $t_s^0$ ) nos valores de  $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$ . A variação simultânea dos parâmetros em relação aos reais resulta em valores de  $P_{m\acute{a}x}/P_m^0$  quase proporcionais às variações percentuais dos parâmetros, exceto para previsões por excesso e para valores elevados de  $L_0$ . Nestas

circunstâncias, a melhoria não é tao significativa, com um desvio máximo à proporcionalidade de  $L_0 = 80$  mm (previsão por excesso de  $\approx 69,6\%$  com + 100% de aumento dos parâmetros).

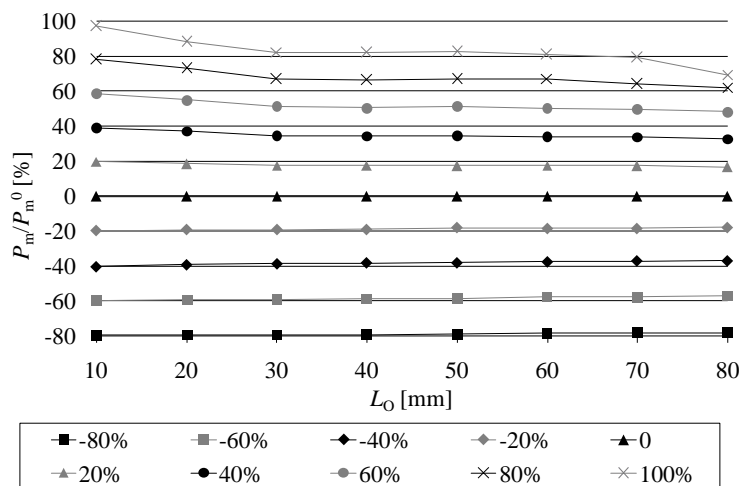


Figura 25 – Variação percentual de  $P_{máx}/P_m^0$  com valores de  $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$ ,  $t_n^0$  e  $t_s^0$  desde -80 até +100% dos valores iniciais (Campilho et al. 2012)

#### 2.2.3.4 Determinação dos parâmetros coesivos

As análises por MDC permitem explicar 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 (Carlberger e Stigh 2010). Vários estudos têm sido publicados sobre a definição dos parâmetros coesivos ( $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ ). Contudo, segundo Jung Lee et al. (2010), alguns parâmetros como  $t_n^0$  e  $t_s^0$ , ainda não se encontram devidamente padronizados. Assim surgem algumas técnicas de análise de dados, como por exemplo o método de definição individual de parâmetros, o método direto e o método indireto, sendo que estes apresentam diferentes graus de complexidade e de precisão. Alguns trabalhos realizados para validar ensaios em modo misto, estimando os MDC em modo puro através de ensaios DCB, ENF e JSS, alcançando bons resultados (Kafkalidis e Thouless 2002, Zhu et al. 2009).

O método de definição individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. No entanto este método é particularmente crítico devidos desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e a ligação adesiva (Pandya e Williams 2000). Este problema surge causado pelo efeito de restrição às deformações de uma camada fina de adesivos entre dois aderentes, 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 (Chai 1992). Em ligações adesivas finas, como o adesivo é tipicamente mais fraco e flexível do que os aderentes, 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, considerando por exemplo a curva  $P-\delta$ , 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 (Campilho et al. 2009). Por outro lado, o método direto define a forma exata as leis coesivas, na medida que este método calcula os MDC da ligação adesiva a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura (Pandya e Williams 2000), pela diferenciação das curvas  $G_I-\delta_n$  ou  $G_{II}-\delta_s$  (em que  $\delta_n$  é deslocamento em tração e  $\delta_s$  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 de fácil fabrico dos provetes. Existem vários métodos para obter  $G_{Ic}$ , como métodos baseados na teoria de vigas (corrigida ou não), métodos baseados no comprimento equivalente ou integral- $J$  (Campilho et al. 2014). Rice (1968) tornou possível obter uma expressão para o valor de  $G_{Ic}$  em provetes DCB através do método de integral- $J$ , que também permite obter a relação entre as tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda, ou seja, a lei coesiva (Stigh et al. 2010). 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 (de Moura et al. 2009). 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 26. 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, 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  $\sigma_y$  corresponde à tensão de cedência do material do substrato.

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

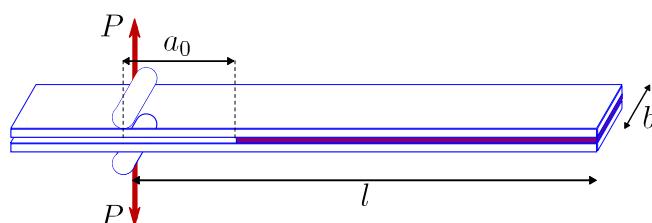


Figura 26 – Geometria do provete DCB (Gustafson e Waas 2009)

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 27). A solicitação aplicada origina a propagação da fenda sem haver a separação dos aderentes. 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 ( $2L$ ) (Yoshihara 2004). 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 (Blackman et al. 2006).

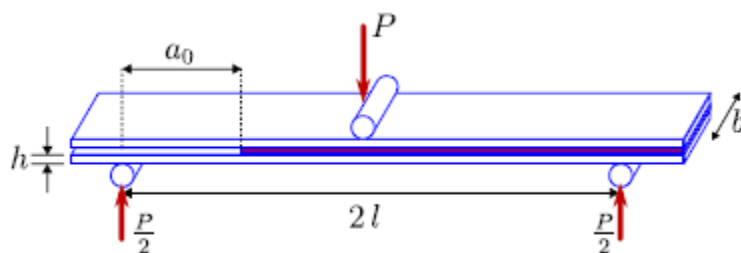


Figura 27 – Geometria do provete ENF (Gustafson e Waas 2009)

#### 2.2.3.4.1 *Método de definição individual dos parâmetros*

Este método começa pela escolha da forma da lei coesiva a utilizar para o material (neste caso adesivo), em função do seu comportamento conhecido (Campilho et al. 2009). 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 do substrato, sempre que for aplicada esta aproximação, são esperados desvios entre a previsão quantitativa dos parâmetros coesivos e o comportamento real da ligação adesiva (Leffler et al. 2007). No trabalho de Campilho et al. (2008),  $t_n^0$  e deslocamento de tração de início de amaciamento ( $\delta_n^s$ ) foram obtidos a partir da curva tensão – deformação ( $\sigma$ – $\varepsilon$ ) de provetes de adesivo maciço, tendo em consideração o trabalho de Andersson e Stigh (2004), 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  $\delta_n^s$  e deslocamento de corte de início de amaciamento ( $\delta_s^s$ ) 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. Devido à baixa influência nos resultados,  $\delta_s^s$  foi definido considerando que a lei coesiva ao corte idêntica à da lei de tração. 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  $\delta_n^s$  e  $\delta_s^s$  das leis MDC de juntas adesivas não têm influência visível no modo de rotura e resistência das juntas.

#### 2.2.3.4.2 *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 de 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 definição individual dos parâmetros, o método inverso fornece uma estimativa

mais precisa do comportamento do adesivo nas condições reais em que este vai ser aplicado (Pardoen et al. 2005). Para a determinação de 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 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- $R$  (Flinn et al. 1993), o perfil de abertura de fenda (Mello e Liechti 2004) ou, mais habitualmente, a curva  $P$ - $\delta$  (Li et al. 2005).

#### 2.2.3.4.3 Método direto

O método direto é um método que permite obter de forma exata as leis coesivas de um material ou uma junta adesiva, uma vez que estas são estimadas a partir dos dados experimentais de testes de fratura, tais como o DCB ou ENF (Pandya e Williams 2000). Estes ensaios permitem obter os valores de  $G_I$  (tração) ou  $G_{II}$  (corte) em função do deslocamento relativo na extremidade da fenda ( $\delta_n$  para a tração ou  $\delta_s$  para corte). As leis coesivas pelo método direto são determinadas pelas curvas  $G_I$ - $\delta_n$  ou pelas curvas  $G_{II}$ - $\delta_s$ , cuja diferenciação permite obter as leis coesivas em tração ou em corte, respetivamente.

No âmbito da utilização do método direto em tração pelo ensaio DCB, Stigh et al. (2010), em trabalho realizado baseando no pressuposto da existência de uma lei coesiva, concluíram que, para as camadas do adesivo, a lei coesiva é independente das partes ligadas. Assim, o integral- $J$  pode ser calculado ao longo dum caminho arbitrário que contorna a fenda. Para o ensaio de DCB, aplicado o conceito do balanço energético e da teoria das vigas para determinar a taxa de libertação de energia em Modo I,  $G_I$ , tem-se que

$$G_I = 12 \frac{(P_u a)^2}{Eh^3} + P\theta_0 \quad \text{ou} \quad G_I = P\theta_p, \quad (2)$$

em função da a carga aplicada por unidade de largura ( $P_u$ ), módulo de *Young* dos aderentes ( $E$ ), rotação relativa dos aderentes na ponta da fenda ( $\theta$ ) e rotação relativa dos aderentes na linha de carga ( $\theta_p$ ). Campilho et al. (2013), em trabalho realizado com base na equação fundamental do integral- $J$  definida por Rice (1968), chegaram à equação (3) para determinar o valor de  $G_{Ic}$ , que permite obter a expressão da lei coesiva

$$G_I = \int_0^{\delta_n^f} t_n(\delta_n) d\delta_n, \quad (3)$$

sendo  $\delta_n$  e  $\delta_n^f$  a abertura da fenda atual e de rotura, respetivamente, medidas em  $a_0$ , e  $t_n$  a tensão normal de tração aplicada. Por diferenciação da expressão (4) obtém-se a lei coesiva à tração

$$t_n(\delta_n) = \frac{\partial G_{II}}{\partial \delta_n}. \quad (4)$$

Assim, o procedimento do ensaio consiste em medir a relação de  $P$ ,  $a$ ,  $\delta_n$  e  $\theta_0$ . Para efeitos de cálculo de  $G_{Ic}$ , considera-se o valor de patamar da curva  $G_I$ - $\delta_n$ .

Para a fratura em modo II pelo ensaio ENF, está disponível uma formulação de cálculo de  $G_{IIc}$  pelo método do integral- $J$  (Zhu et al. 2009). O valor do integral- $J$  é dado por

$$G_{II} = \frac{9}{16} \frac{(P_u a)^2}{Eh^3} + \frac{3}{8} \frac{P_u \delta_s}{h}. \quad (5)$$

Pela avaliação do integral- $J$  ao longo de um caminho exterior à zona de processo de fratura, pode-se escrever

$$G_{II} = \int_0^{\delta_s^f} t_s(\delta_s) d\delta_s, \quad (6)$$

onde  $\delta_s$  e  $\delta_s^f$  são, respetivamente o deslocamento atual em corte na ponta da fenda e o deslocamento de rotura ao corte na ponta da fenda. Mais uma vez pela diferenciação da expressão anterior obtém-se

$$t_s(\delta_s) = \frac{\partial G_{II}}{\partial \delta_s}. \quad (7)$$

A expressão obtida indica que é possível obter a relação entre tensão de corte ( $t_s$ ) e  $\delta_s$ , ou seja, a lei coesiva em corte do adesivo, por diferenciação da curva de  $G_{II}$  em função do valor medido durante o ensaio de  $\delta_s$ . O comportamento observado em ensaio consiste numa curva crescente de  $G_{II}=f(\delta_s)$  até um patamar, que ocorre aquando do início da propagação da fenda e corresponde a  $G_{II}=G_{IIc}$ , e cuja diferenciação resulta diretamente na lei coesiva experimental

para a camada de adesivo. Assim, o procedimento do ensaio consiste em medir a relação de  $P$ ,  $a$  e  $\delta_s$ .

#### **2.2.4 Mecânica do dano**

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze (1993) para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. (2010) para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita (Duan et al. 2004).

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades (Kattan e Voyiadjis 2001). Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas (Raghavan e Ghosh 2005) ou do número de ciclos para análises de fadiga (Wahab et al. 2001, Imanaka et al. 2003). Comparativamente aos MDC e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos (Shenoy et al. 2010).

Hua et al. (2008) propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que

permitiu obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. (2011) usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de  $E$  e do coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

### 2.2.5 Método dos Elementos Finitos Extendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de  $t_n^0/t_s^0$  ou  $\delta_n^0/\delta_s^0$  (deslocamentos de tração e corte correspondentes a  $P_{m\acute{a}x}$ , respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda (Mohammadi 2008). Belytschko e Black (1999), no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda (Moës et al. 1999). Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação

de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais (Abaqus® 2013).

Campilho et al. (2011) utilizou o MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, coladas com um adesivo dúctil, onde se comparou resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 28). Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

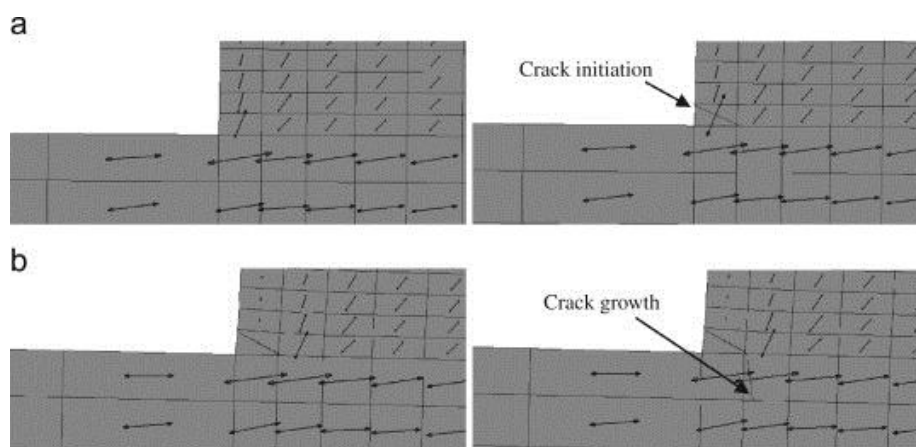


Figura 28 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) (Campilho et al.

2011)

# 3 Trabalho Experimental

Neste capítulo são caracterizados os dados relativos aos ensaios DCB para os adesivos Araldite<sup>®</sup> AV138 e 2015 (Constante 2014) e Sikaforce<sup>®</sup> 7752 (Campilho et al. 2015), e ENF para os três adesivos considerados (Azevedo 2014, Leitão 2015). Apresenta-se a descrição dos materiais utilizados, o procedimento experimental utilizado no fabrico dos provetes DCB e ENF e os ensaios destes mesmos provetes, com o objetivo de obter os valores experimentais de  $G_{Ic}$  nos provetes DCB e  $G_{IIc}$  para os provetes ENF utilizando vários adesivos com diferentes graus de ductilidade. No final, é feita uma discussão detalhada dos resultados obtidos. Todos os trabalhos práticos foram desenvolvidos no âmbito das referências bibliográficas apresentadas no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

## 3.1 Materiais utilizados

Em ambos os ensaios realizados (DCB e ENF), os provetes foram preparados com substratos de alumínio AW 6082-T651 e três adesivos (Araldite<sup>®</sup> AV138, Araldite<sup>®</sup> 2015 e Sikaforce<sup>®</sup> 7752).

### 3.1.1 Substratos

Os provetes foram produzidos utilizando uma liga de alumínio AW 6082-T651, conhecida como liga estrutural da série 6000, com 82% de alumínio, e magnésio e silício como principais elementos de liga (Tabela 2). A escolha desta liga de alumínio deve-se à vasta utilização na produção de componentes estruturais, sejam eles extrudidos como perfis, ou em peças obtidas por maquinarem.

Tabela 2 – Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 (Azevedo 2014)

|          | Si   | Mg   | Mn   | Fe   | Cr   | Zn   | Ti   | Cu   | Al    |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| % Mínimo | 0,70 | 0,60 | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | ----  |
| % Máxima | 1,30 | 1,20 | 1,00 | 0,50 | 0,25 | 0,20 | 0,10 | 0,05 | Resto |

A sua ampla utilização deve-se a propriedades como a elevada resistência à tração (mínimo de 300 MPa, especificado pelo fabricante), obtida através do envelhecimento artificial a uma temperatura de aproximadamente 180°C (Tabela 3).

Tabela 3 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651; dados do fabricante (Azevedo 2014)

| Espessura [mm] | Tensão de rotura mínima [MPa] | Tensão de cedência 0,2% mínima [MPa] | Alongamento mínimo [%] | Dureza Brinell | Módulo de elasticidade [GPa] |
|----------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------------|----------------|------------------------------|
| 3,00           | 300                           | 255                                  | 9                      | 91             | 70                           |

As juntas adesivas de componentes de alumínio são normalmente usadas nas indústrias de aeronáutica e automóvel (Petrie 2000), onde propriedades como a elevada energia de superfície, assim como a sua relação resistência/peso, fazem deste tipo de material um ótimo substrato para este tipo de ligações.

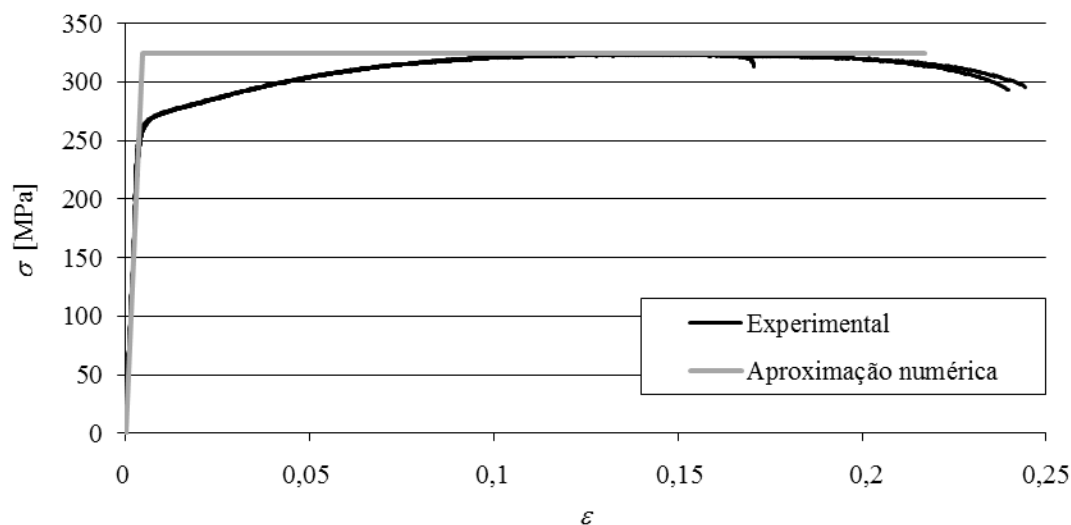


Figura 29 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  da liga de alumínio AW 6082-T651 (Campilho et al. 2011)

Campilho et al. (2011) caracterizaram esta liga de alumínio à tração, de acordo com a norma (ASTM E8M 2004), onde registaram as seguintes propriedades:  $E$  de  $70,07 \pm 0,83$  GPa,  $\sigma_y$  de  $261,67 \pm 7,65$ , tensão de rotura ( $\sigma_r$ ) de  $324,00 \pm 0,16$  MPa e deformação de rotura à tração ( $\epsilon_r$ ) de  $21,70 \pm 4,24\%$ . A Figura 29 mostra as curvas de tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) desta liga.

### 3.1.2 Adesivos

Todos os adesivos utilizados nos ensaios são de bi-componente (resina + endurecedor), dois de base epóxico e um de base de poliuretano. Os três adesivos apresentam uma viscosidade baixa, o que facilita a sua deposição nas superfícies a ligar, permitindo variar a espessura de adesivo facilmente e colmatar alguma falta de planeza dos substratos (Azevedo 2014).

#### 3.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo estrutural Araldite® AV138, fabricado pela empresa suíça *Huntsman Advanced Materials*, caracteriza-se pelo seu comportamento frágil mas de elevada resistência (Figura 30 e Tabela 4), e é adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros (Campilho et al. 2013).

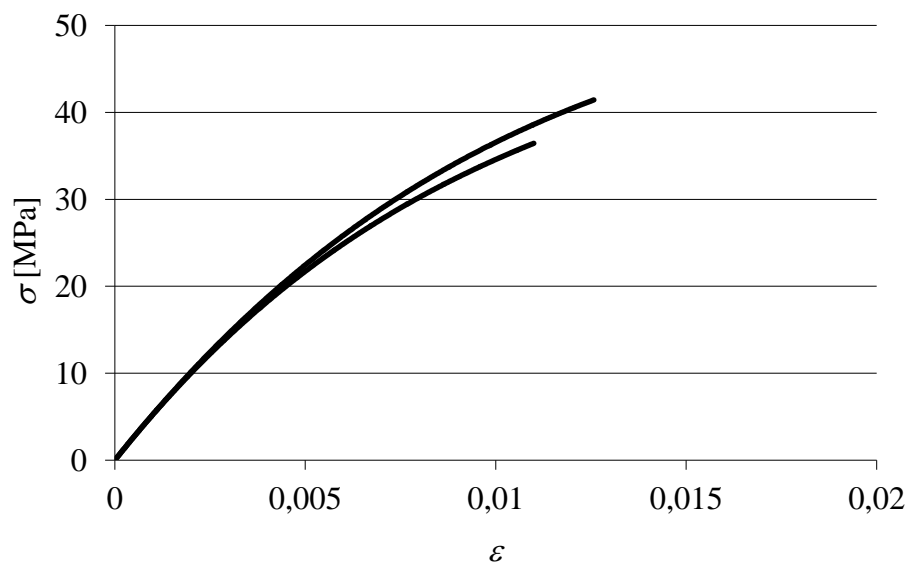


Figura 30 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 (Campilho et al. 2013)

É um adesivo de base epóxico, termoendurecível, composto por dois componentes, resina AV138 e endurecedor HV998 (Figura 31). Este adesivo é fornecido em duas embalagens e, como tal, é necessário proceder à pesagem dos dois componentes, utilizando uma balança

digital. A relação de mistura utilizada neste adesivo é de 100g de resina para 40g de endurecedor, com uma precisão de  $\pm 5\%$ . Este adesivo apresenta-se na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa emissão de gases e perdas voláteis (Azevedo 2014).



Figura 31 – Adesivo Araldite® AV138 (Azevedo 2014)

Tabela 4 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 (Neto et al. 2012, Campilho et al. 2013)

| Propriedades                                    | Araldite® AV138   |
|---|-------------------|
| Módulo de Young, $E$ [GPa]                      | $4,89 \pm 0,81$   |
| Coefficiente de Poisson, $\nu^b$                | 0,35              |
| Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]   | $36,49 \pm 2,47$  |
| Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]     | $39,45 \pm 3,18$  |
| Deformação de rotura à tração, $\epsilon_f$ [%] | $1,21 \pm 0,10$   |
| Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]   | $1,56 \pm 0,01$   |
| Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]     | $25,1 \pm 0,33$   |
| Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]       | $30,2 \pm 0,40$   |
| Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]   | $7,8 \pm 0,7$     |
| Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]            | 0,20 <sup>a</sup> |
| Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]           | 0,38 <sup>a</sup> |

<sup>a</sup> Valores estimados na referência (Neto 2011)

<sup>b</sup> Valores do fabricante

### 3.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo estrutural Araldite® 2015, igualmente fabricado pela empresa suíça *Huntsman Advanced Materials*, caracteriza-se pela baixa contração, pelo seu comportamento moderadamente dúctil e uma alta resistência ao corte e à clivagem. É um adesivo de base epóxico, termoendurecível, composto por dois componentes e fornecido em cartucho (Figura 32). Apresenta-se como uma pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente.

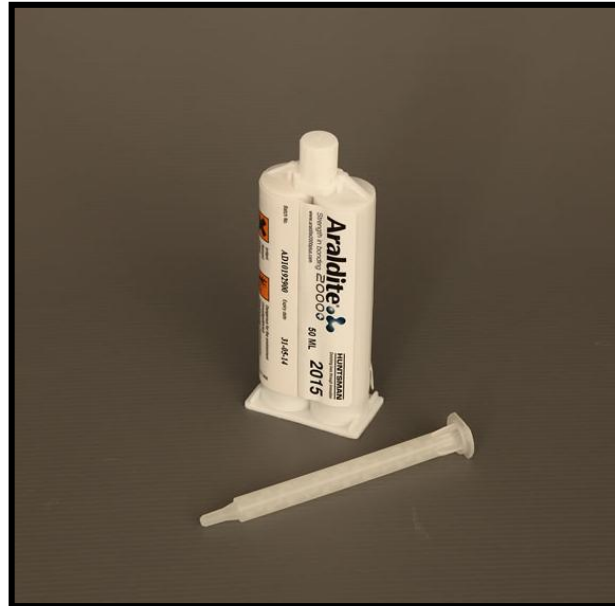


Figura 32 – Formato comercial do adesivo Araldite® 2015 de 50 ml (Azevedo 2014)

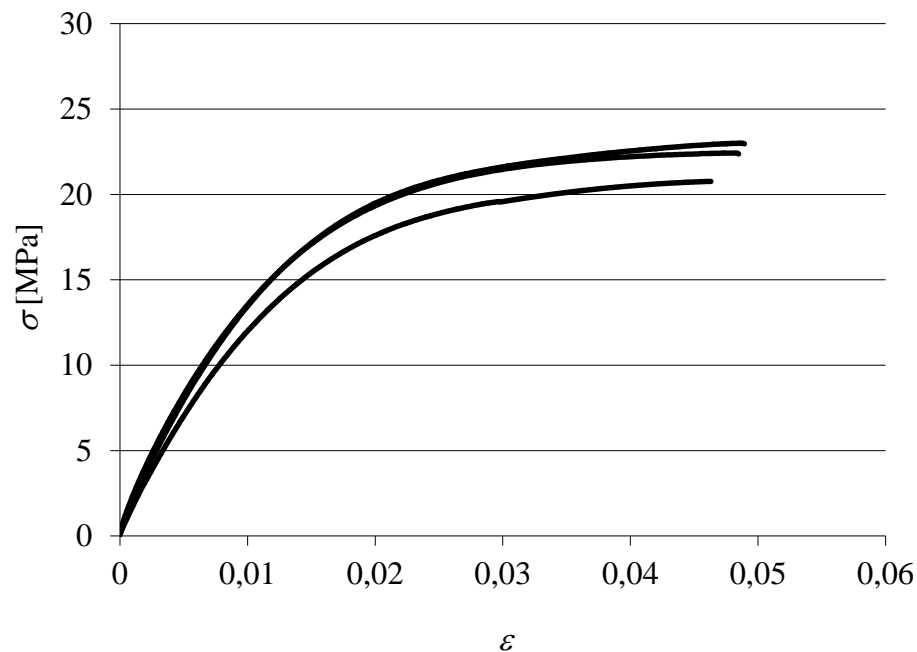


Figura 33 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 (Campilho et al. 2013)

A resistência e durabilidade das ligações efetuadas por este adesivo são dependentes de um tratamento adequado das superfícies a ligar. No mínimo, as superfícies a ligar devem ser limpas com um bom agente desengordurante tal como acetona ou isopropanol (para plásticos), a fim de remover todos os vestígios de contaminações e sujidade. As curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 33 (Campilho et al. 2013).

O adesivo Araldite® 2015, quando comparado com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração de tensão, tipicamente nas extremidades da zona de ligação, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes. A Tabela 5 indica as propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo (Campilho et al. 2013). Este adesivo é composto por resina e endurecedor, e aplica-se com uma pistola manual, o que permite de forma simples e fácil aplicar o adesivo com recurso a um bico que mistura os dois componentes em quantidades iguais.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 (Campilho et al. 2013)

| Propriedades                                       | Araldite® 2015   |
|--|------------------|
| Módulo de Young, $E$ [GPa]                         | $1,85 \pm 0,21$  |
| Coefficiente de Poisson, $\nu^a$                   | 0,33             |
| Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]      | $12,63 \pm 0,61$ |
| Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]        | $21,63 \pm 1,61$ |
| Deformação de rotura à tração, $\varepsilon_f$ [%] | $4,77 \pm 0,15$  |
| Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]      | $0,56 \pm 0,21$  |
| Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]        | $14,6 \pm 1,3$   |
| Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]          | $17,9 \pm 1,8$   |
| Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]      | $43,9 \pm 3,4$   |
| Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]               | $0,43 \pm 0,02$  |
| Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]              | $4,70 \pm 0,34$  |

<sup>a</sup> Valores do fabricante

### 3.1.2.3 Sikaforce® 7752

O adesivo estrutural Sikaforce® 7752 é fornecido pela empresa Sika® em dois componentes separados, e caracteriza-se pela sua base de poliuretano estrutural tixotrópico (Figura 34). A sua resina polioliol com cargas e endurecedor de base isocianato possui uma baixa emissão de gases e perdas voláteis, e oferece uma boa resistência a altas temperaturas (Azevedo 2014).



Figura 34 – Adesivo Sikaforce® 7752 (Azevedo 2014)

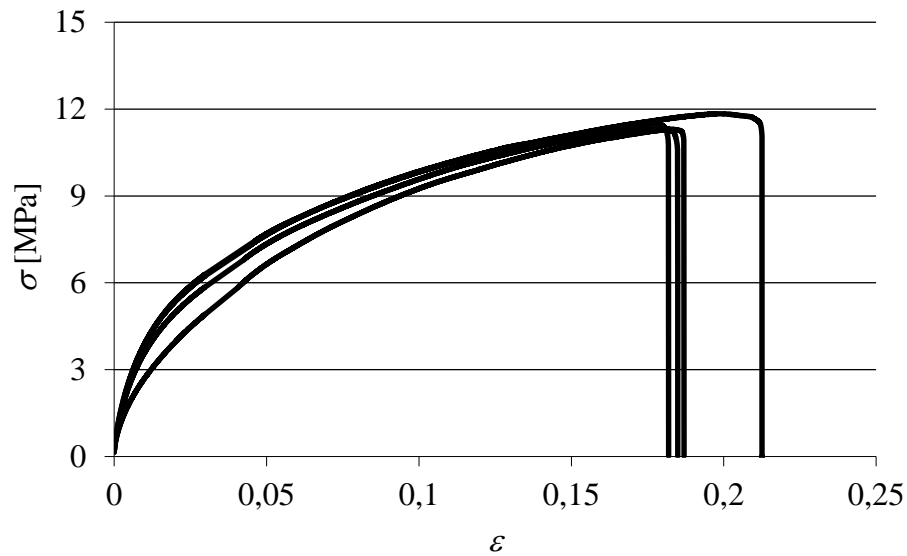


Figura 35 – Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  relativas ao adesivo Sikaforce® 7752 (Faneco 2014)

O Sikaforce® 7752 é um adesivo que cura à temperatura ambiente, com boa resistência ao envelhecimento e à exposição química, com grande resistência ao impacto e bastante flexível a baixas temperaturas. Este adesivo encontra aplicação na ligação de metais, cerâmicos, madeira e seus derivados. As curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 35 (Faneco 2014). Na Tabela 6 são indicados os principais valores das propriedades mecânicas e de fratura do adesivo.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752

| Propriedades                                       | Sikaforce® 7752  |
|--|------------------|
| Módulo de Young, $E$ [GPa]                         | $0,49 \pm 0,09$  |
| Coefficiente de Poisson, $\nu^a$                   | 0,30             |
| Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]      | $3,24 \pm 0,48$  |
| Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]        | $11,48 \pm 0,25$ |
| Deformação de rotura à tração, $\varepsilon_f$ [%] | $19,18 \pm 1,40$ |
| Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]      | $0,19 \pm 0,01$  |
| Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]        | $5,16 \pm 1,14$  |
| Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]          | $10,17 \pm 0,64$ |
| Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]      | $54,82 \pm 6,38$ |
| Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]               | $2,36 \pm 0,17$  |
| Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]              | $5,41 \pm 0,47$  |

<sup>a</sup> Valores do fabricante

## 3.2 Ensaios DCB

### 3.2.1 Geometria, fabrico e teste dos provetes DCB

Para os ensaios DCB foram produzidos 18 provetes, 6 para cada adesivo diferente. As dimensões teóricas para preparação dos provetes são as apresentadas na Figura 36 e na Tabela 7.

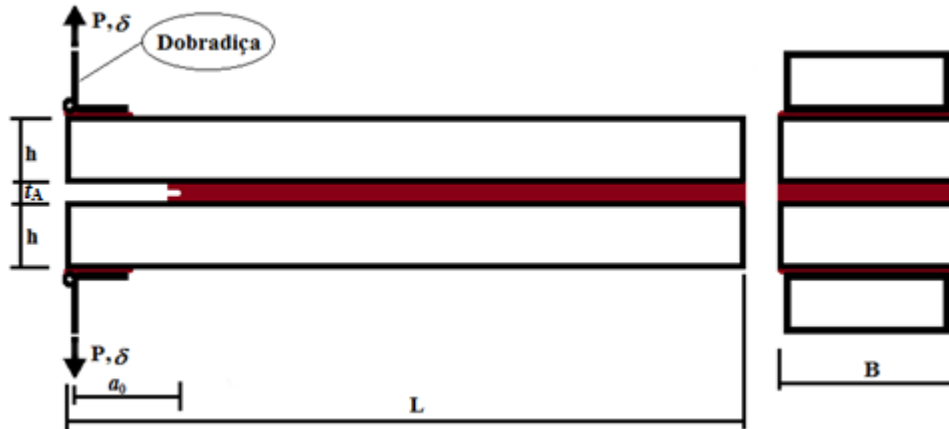


Figura 36 – Representação esquemática dos provetes DCB (Constante 2014)

Tabela 7 – Dimensões teóricas dos provetes DCB em mm (Constante 2014)

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| Comprimento do provete, $L$     | 143 |
| Largura do provete, $B$         | 27  |
| Espessura do substrato, $h$     | 3   |
| Espessura do adesivo, $t_A$     | 1   |
| Comprimento da pré-fenda, $a_0$ | 3   |

Os substratos foram cortados em tiras a partir de chapa de alumínio de espessura 3 mm. Na preparação dos substratos o objetivo principal é garantir uma boa ligação entre o adesivo e os substratos de forma a que a rotura seja preferencialmente coesiva. É essencial uma preparação correta da superfície de granalhagem para obter uma superfície limpa e molhável, e garantir uma manutenção da integridade a longo prazo das juntas coladas (da Silva et al. 2007). No presente trabalho os substratos foram desengordurados com acetona. Seguidamente, as tiras de alumínio foram granalhadas 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 do ISEP utilizando uma máquina CIDBLAST RT6S (Figura 37). Este processo consiste na projeção do pó de alumínio sobre as tiras, de ambos os lados. Embora a colagem só seja executada numa das superfícies dos substratos, a projeção de ambos os lados é importante para aliviar as tensões e empenos do material. Para terminar a preparação, os substratos foram bem limpos com ar comprimido e novamente desengordurados com acetona até o papel embebido em acetona não apresentar mais sujidade, efetuando várias passagens (Constante 2014).



Figura 37 – Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S (Constante 2014)

De modo a garantir 1 mm de espessura de adesivo ao longo dos provetes, foram utilizados espaçadores calibrados na extremidade colada dos provetes e na zona da pré-fenda (Figura 38).

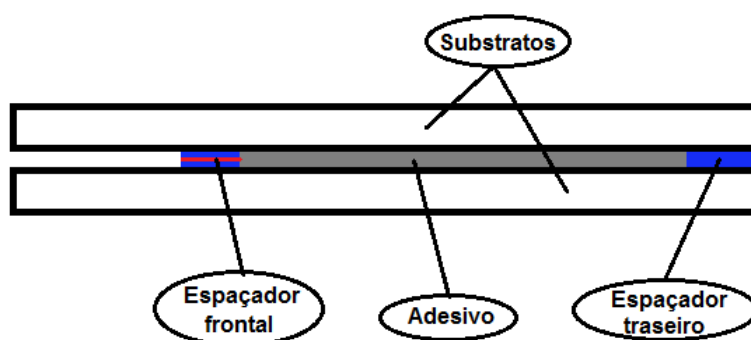


Figura 38 – Representação esquemática da localização dos espaçadores (Constante 2014)

O espaçador utilizado na extremidade colada dos provetes foi uma fita de aço calibrada com espessura de 1 mm e a largura do provete. O outro espaçador que viria a garantir o valor de  $t_A$ , assim como a pré-fenda do adesivo, é baseado no trabalho de Lee et al. (2004), em que o espaçador consiste numa lamina de barbear de 0,1 mm no meio de duas fitas de aço calibradas com 0,45 mm. A coesão do conjunto é garantida com cola de cianocrilato, ficando o cortante saliente de forma a criar a pré-fenda. Utilizou-se o desmoldante Loctite® 770-NC antes da colocação dos espaçadores para garantir a fácil remoção após a cura de adesivo (Figura 39).



Figura 39 – Fabrico do espaçador frontal (Constante 2014)

Após um estágio de 15 minutos no forno a 100°C, o desmoldante foi aplicado nos espaçadores em três camadas. O correto início de pré-fenda foi garantido colocando o espaçador a 50 mm de uma das extremidades do substrato inferior (Figura 40).



Figura 40 – Substrato inferior com os espaçadores colocados (Constante 2014)

Para a preparação do Araldite® AV138, juntou-se a resina com o endurecedor num recipiente, mexendo durante 3 minutos até que a mistura se torne homogênea. Com os substratos pré-preparados, este adesivo foi aplicado manualmente com uma espátula, pela zona de colagem do substrato.

A deposição do adesivo Araldite 2015® foi efetuada com recurso à pistola de aplicação, sob a forma de linhas paralelas transversais ao provete, com espaços reduzidos entre linhas transversais de modo a não potenciar espaços ocós após a montagem do substrato superior.

Os dois componentes do adesivo Sikaforce® 7752, resina e endurecedor, foram pesados uma balança digital, misturados num recipiente, mexendo até a mistura se tornar homogênea. A aplicação foi feita manualmente, com espátula, espalhando o adesivo pelo substrato de modo a que não fiquem espaços ocós (Azevedo 2014).

Os substratos foram colocados em régulas de madeira para facilitar a colagem, e assim possibilitar a colocação de grampos de aperto. Também foram separados em três grupos, um para cada adesivo. A colagem foi executada de acordo com o descrito anteriormente para cada adesivo. O importante na aplicação dos três adesivos é impedir a formação de ocós ou

bolhas de ar entre os substratos e garantir que o adesivo envolve a zona onde se encontra previamente colocado o espaçador com a lâmina de barbear, de modo a que a pré-fenda fique devidamente criada.

Após a aplicação do adesivo no substrato inferior, o substrato superior é colocado por cima do adesivo, cuidadosamente, pressionando-se para evitar a formação de porosidades, vazios na camada de adesivo e garantir um valor de  $t_A$  de 1 mm ao longo de todo o provete. Os provetes ficam fixos a régulas de madeira com grampos para que a espessura de adesivo não sofra alterações durante a cura, assim como demonstra a Figura 41.



Figura 41 – Provetes DCB em fase de colagem, com colocação de grampos para aplicação de pressão durante a cura (Constante 2014)

Durante o processo de cura, os provetes ficaram à temperatura ambiente durante 1 semana. Para finalizar a preparação dos provetes, após a cura retira-se os espaçadores com a lâmina, assim como o excesso de adesivo. Utilizou-se um alicate para retirar o excesso de adesivo mais grosseiro das faces laterais dos provetes e uma mó na furadora de coluna para acabamento (Figura 42 e Figura 43, respetivamente).



Figura 42 – Remoção do excesso de adesivo de um provete DCB com um alicate (Constante 2014)



Figura 43 – Limpeza com mó do excesso de adesivo de um provete DCB (Constante 2014)

Para executar o ensaio dos provetes DCB é necessário um sistema que permita a tração dos substratos na direção transversal aos provetes de modo a que, durante o ensaio, não se crie momento fletor nos pontos a serem tracionados. Para tal, utilizou-se dobradiças coladas na extremidade dos substratos dos provetes. A preparação das zonas de colagem das dobradiças foi semelhante à preparação executada para colar produzir o provete. O adesivo para colar as dobradiças não carece de cuidados especiais. O procedimento de aplicação foi semelhante aos demais adesivos, utilizando uma espátula para espalhar do adesivo e removendo o excesso de adesivo de modo a não colar os dois substratos.

De forma a evidenciar melhor a propagação da fenda ao longo do ensaio, pintou-se uma das faces laterais com corretor branco (Figura 44). Para utilização do método ótico necessário à medição dos parâmetros relevantes para a análise a efetuar, nessa mesma face colaram-se duas escalas e fez-se coincidir o início da fenda com os 10 mm da escala (Figura 45). A fenda é propagada manualmente entre 1 e 2 mm antes da colagem da escala, para garantir o início suave da mesma durante o ensaio.



Figura 44 – Aplicação de tinta corretora numa face lateral do provete DCB (Constante 2014)

Tabela 8 – Dimensões efetivas dos provetes DCB (Campilho et al. 2014, Constante 2014)

| Adesivo             | Provete | Comprimento<br>$L$ [mm] | Largura<br>$B$ [mm] | Espessura<br>$h$ [mm] | Pré-fenda<br>$a_0$ [mm] |
|---------------------|---------|-------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|
| Araldite®<br>AV138  | AV_1    | 143,06 / 143,03         | 27,05 / 26,94       | 3,03 / 3,03           | 49,35                   |
|                     | AV_2    | 143,06 / 143,08         | 26,81 / 26,55       | 3,02 / 3,01           | 47,26                   |
|                     | AV_3    | 143,07 / 143,13         | 26,89 / 26,77       | 3,06 / 3,01           | 46,43                   |
|                     | AV_4    | 143,03 / 143,34         | 26,93 / 26,90       | 3,01 / 3,02           | 47,84                   |
|                     | AV_5    | 143,06 / 143,13         | 26,91 / 26,95       | 3,02 / 3,03           | 45,89                   |
|                     | AV_6    | 143,19 / 143,08         | 26,90 / 27,05       | 3,01 / 3,04           | 46,89                   |
| Araldite®<br>2015   | A2_1    | 143,06 / 143,02         | 27,02 / 26,73       | 3,06 / 3,06           | 46,68                   |
|                     | A2_2    | 143,07 / 143,13         | 26,82 / 26,81       | 3,01 / 3,03           | 47,35                   |
|                     | A2_3    | 143,12 / 143,12         | 26,91 / 26,88       | 3,03 / 3,00           | 47,40                   |
|                     | A2_4    | 143,02 / 143,11         | 26,89 / 26,89       | 3,02 / 3,04           | 46,37                   |
|                     | A2_5    | 143,10 / 143,00         | 26,98 / 27,02       | 3,01 / 3,02           | 46,92                   |
|                     | A2_6    | 143,04 / 143,04         | 27,03 / 26,86       | 3,03 / 3,00           | 46,06                   |
| Sikaforce®<br>7752* | SF_1    |                         |                     |                       | 54,26                   |
|                     | SF_2    |                         |                     |                       | 55,63                   |
|                     | SF_3    | 143                     | 27                  | 2,9                   | 57,05                   |
|                     | SF_4    |                         |                     |                       | 55,09                   |
|                     | SF_5    |                         |                     |                       | 55,11                   |
|                     | SF_6    |                         |                     |                       | 55,39                   |

\*os valores  $L$ ,  $B$  e  $h$  não foram medidos individualmente

Antes dos ensaios, os provetes foram medidos utilizando um paquímetro digital, assim como expressa a Tabela 8. Foram realizadas duas medições de  $L$ ,  $B$  e  $h$  em posições limite dos provetes, consideradas nos tratamentos dos dados subsequentes aos ensaios, através do seu valor médio.

Os provetes DCB foram ensaiados numa máquina servo-hidráulica Shimadzu AG-X 100 equipada com uma célula de carga de 100 kN no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP. A gravação dos dados foi realizada a 5 Hz e foram retiradas as curvas  $P$ - $\delta$ . Foi instalada uma câmara fotográfica a 100 mm do provete para captura de fotos com intervalo de 5 s durante o ensaio até uma propagação de fenda de aproximadamente 35 mm (Figura 45).

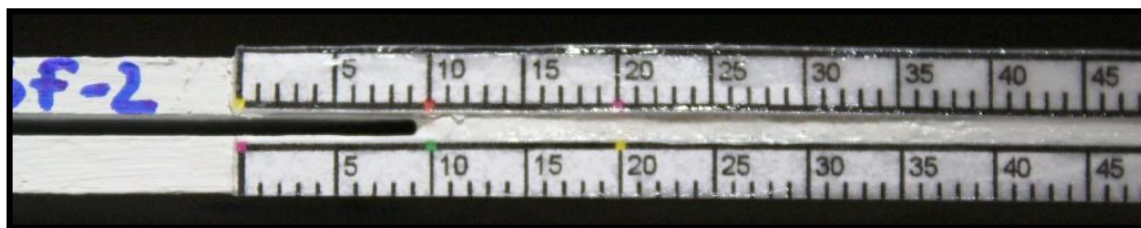


Figura 45 – Face lateral do provete capturada pela câmara (Constante 2014)

Este procedimento permite correlacionar os dados de  $P$  e  $\delta$  com  $a$  e  $\theta_0$ , que são necessários para a obtenção de  $G_{Ic}$  pelo integral- $J$ . Esta correlação é feita pelo instante de tempo correspondente a cada imagem e a velocidade de ensaio dos provetes (Campilho et al. 2013, Campilho et al. 2014).

Para determinar os parâmetros  $\delta_n$  e  $\theta_0$  utilizou-se um método ótico. Para determinada imagem necessita-se de oito pontos no provete, indicados na Figura 46: dois pontos ( $p_1, p_2$ ) para medir a abertura normal na ponta da fenda ( $t_A^{CT}$ ) durante a aplicação da carga em unidades de imagem (pixels), dois pontos ( $p_3, p_4$ ) que definem um segmento de reta na imagem para a qual o comprimento ( $d$ ) é conhecido em unidades SI (mm), dois pontos ( $p_5, p_6$ ) no substrato superior e dois pontos ( $p_7, p_8$ ) no substrato inferior.

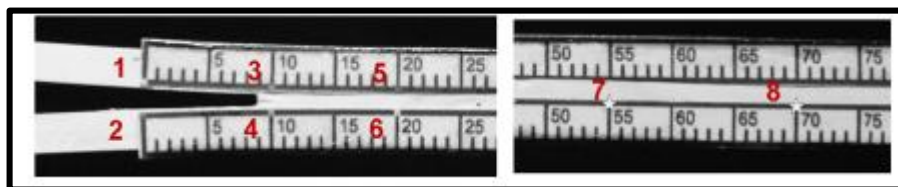


Figura 46 – Identificação dos pontos para determinar os parâmetros  $\delta_n$  e  $\theta_0$

Para aplicação do método ótico recorreu-se ao registo fotográfico utilizando uma câmara fotográfica digital Canon EOS 650D com uma resolução de 18 megapixels, processador de imagem DIGIC 5, sistema de focagem automática de 9 pontos e lente EF-S de 18 a 55 mm. A identificação dos pontos é auxiliada pelas régua coladas nos provetes. Os oito pontos da primeira foto de um ensaio são identificados manualmente utilizando um *software*. Nas seguintes fotos, os pontos são identificados por um algoritmo em Matlab<sup>®</sup> de forma automática (Campilho et al. 2013, Campilho et al. 2014). De um modo geral, para cada ponto  $p_i$  é definida uma região retangular centrada no ponto  $p_i$  e extraída a partir da primeira foto formando um modelo ( $t$ ). Este modelo define o padrão de imagem que rodeia o ponto e é então usado para localizar o ponto na foto seguinte. Isto é feito por determinação da posição

$(u,v)$  na imagem seguinte ( $I$ ) cuja correlação cruzada normalizada ( $\gamma$ ) com o modelo é maior. A  $\gamma$  é uma medida de semelhança entre duas imagens em tons de cinza que não é sensível a mudanças lineares de iluminação e que quantifica a correlação entre níveis de cinza da região de duas fotos (Campilho et al. 2013, Campilho et al. 2014). Este método de semelhança foi escolhido pela sua baixa complexidade computacional, devido à alta resolução das fotos, e é possível de utilizar por causa das pequenas mudanças na rotação da escala dos provetes entre duas fotos consecutivas (separadas por 5 segundos (s)). O valor de  $\gamma$  do modelo de imagem  $t$  com a posição  $(u,v)$  da foto é definido por

$$\gamma(u,v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}] \cdot [t(x-u, y-v) - \bar{t}]}{\left\{ \sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}]^2 \cdot \sum_{x,y} [t(x-u, y-v) - \bar{t}]^2 \right\}^{0,5}}, \quad (8)$$

onde  $f$  é a região da imagem  $I$ , com o mesmo tamanho de  $t$ , centrada na posição  $(u,v)$ . O cálculo de  $\gamma$  para todos os pixels da imagem  $I$  resulta numa matriz, cujo máximo valor absoluto permite obter a região em  $I$  com a maior correlação com  $t$  e, como tal, a localização mais provável de  $p_i$  na imagem seguinte. Depois de identificados todos os pontos na segunda foto, são definidos os novos padrões para pesquisar os oito pontos na terceira foto, e assim consecutivamente até à análise de todas as fotos.

No cálculo de  $\delta_n$  torna-se necessário determinar o valor de  $t_A^{CT}$  em unidades do SI. O seu valor em milímetros é dado por

$$t_A^{CT} = d \frac{|p_1 - p_2|}{|p_3 - p_4|}. \quad (9)$$

A distorção da lente é desprezável para fotos obtidas com câmaras digitais modernas (Campilho et al. 2013). Em todos os ensaios dos provetes foi fotografada uma região com o comprimento de aproximadamente  $d=45$  mm, conforme mostra a Figura 47.

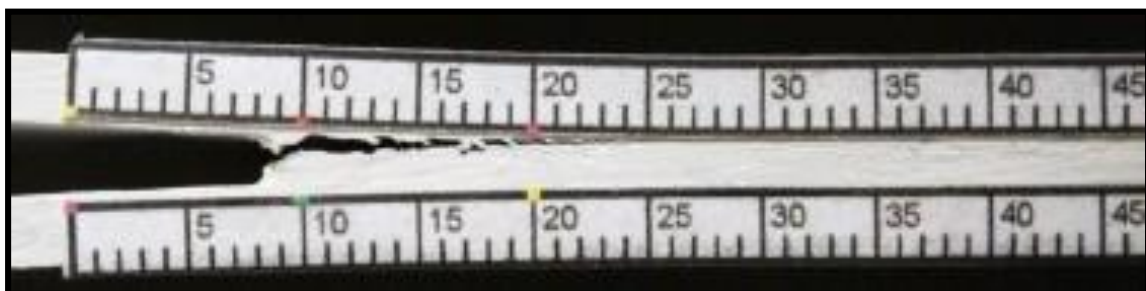


Figura 47 – Identificação da região fotografada nos ensaios (Constante 2014)

Em média, o tamanho do pixel era de 0,024 mm e, deste modo, o erro máximo estimado do processo de aquisição de imagens é de  $\pm 0012$  mm. Finalmente  $\delta_n$  pode ser definido como

$$\delta_n = t_A^{CT} - t_A. \quad (10)$$

O valor de  $\theta_0$  é calculado como o ângulo formado pelas retas  $l_1$  e  $l_2$ , conforme mostra a Figura 48. As retas são diretamente definidas pelos pontos  $(p_5, p_6)$  e  $(p_7, p_8)$ , respetivamente. Para minimizar as flutuações do processo e aumentar a resolução da deteção dos pontos, foi utilizado um algoritmo de processamento de imagem para traçar a reta no meio da aresta da régua que contém o par dos pontos (Campilho et al. 2013, Campilho et al. 2014). Com a aplicação de um filtro gaussiano é melhorado o contraste da borda da escala, resultando numa imagem em que os pixels pertencentes às arestas têm alta intensidade, enquanto os restantes são de baixa intensidade. Seguidamente, para as linhas horizontais da imagem entre  $p_5$  e  $p_6$  é calculado o ponto médio da aresta em cada linha. O primeiro ponto médio é extraído para a linha de  $p_5$ , e para tal são recolhidos todos os pixels possíveis de alcançar à esquerda e direita de  $p_5$  sem deixar cair a intensidade abaixo de um determinado limiar (10% para todos os ensaios). Usa-se uma ponderação da intensidade de todos os pixels recolhidos de modo a que os pixels com mais intensidade, ou seja, os pixels pertencentes à borda da escala, tenham um impacto maior no cálculo do ponto médio da linha. O processo torna-se assim eficaz em relação à desfocagem no método de identificação dos pontos, pelo que os pontos  $p_5$  e  $p_6$  não necessitam de ser identificados exatamente na linha média da borda. O processo é repetido para todas as linhas seguintes até atingir  $p_6$ , resultando num ponto de cada linha da imagem entre  $p_5$  e  $p_6$  que define a linha média da aresta da escala. Como estes pontos não estão necessariamente alinhados, é utilizada uma regressão linear para a obtenção de  $l_1$ . O mesmo processo é utilizado para os pontos  $(p_7, p_8)$  para obtenção de  $l_2$  e, finalmente, é obtido  $\theta_0$  como o ângulo formado pelas duas retas.



Figura 48 – Identificação das retas  $l_1$  e  $l_2$  usadas para determinar  $\theta_0$  (Constante 2014)

Após a montagem das maxilas na máquina de ensaios rodadas a 45°, procedeu-se à colocação dos provetes na posição em que os ensaios vão ser realizados. A colocação do provete na máquina de ensaios na posição indicada tem como finalidade facilitar o posicionamento e a calibração do meio ótico para capturar as fotografias (Figura 49).

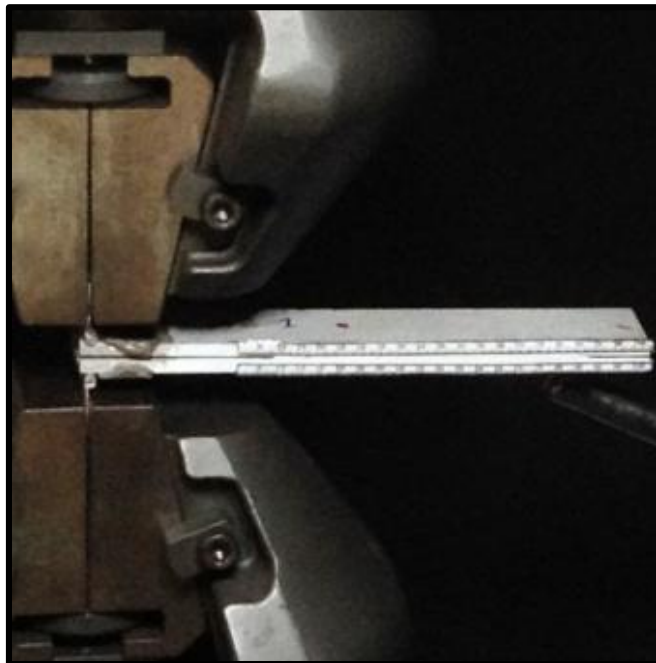


Figura 49 – Provete colocado nas maxilas da máquina de ensaios (Constante 2014)

Conforme já referido, a câmara fotográfica foi fixa a um suporte rígido a uma distância de aproximadamente 100 mm do provete. Houve o cuidado especial de garantir que a câmara estava paralela ao provete e que a distância entre estes era suficiente para garantir fotografar a zona de interesse do provete durante a totalidade do ensaio. A fixação da câmara garante que todas as mudanças entre as fotos do mesmo teste são devidas aos deslocamentos e deformações do provete.

### 3.2.2 Resultados obtidos

Neste capítulo são apresentados os resultados de  $G_{Ic}$  obtidos pelo ensaio DCB, referentes aos três adesivos estruturais mencionados anteriormente (Araldite® AV138 e Araldite® 2015 por Constante (2014) e Sikaforce® 7752 por Campilho et al. (2014)). Os adesivos abordados foram testados por diferentes métodos de obtenção do valor de  $G_{Ic}$ , nomeadamente *Compliance Calibration Method* (CCM), *Corrected Beam Theory* (CBT), *Compliance-Based Beam Method* (CBBM) e método direto (integral- $J$ ). No final são comparados os resultados de  $G_{Ic}$  obtidos entre os vários métodos.

### 3.2.2.1 Adesivo Araldite® AV138

Na Figura 50 encontram-se representadas as curvas  $P-\delta$  obtidas através dos ensaios realizados utilizando o adesivo Araldite® AV138. Constata-se que todas as curvas  $P-\delta$  apresentam o mesmo comportamento, com exceção das curvas AV\_1 e AV\_4. Os referidos provetes apresentam quebras abruptas de  $P$  durante a propagação da fenda, representativas de propagação instável da fenda. Por outro lado, como estes provetes apresentam zonas de propagação estáveis 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.

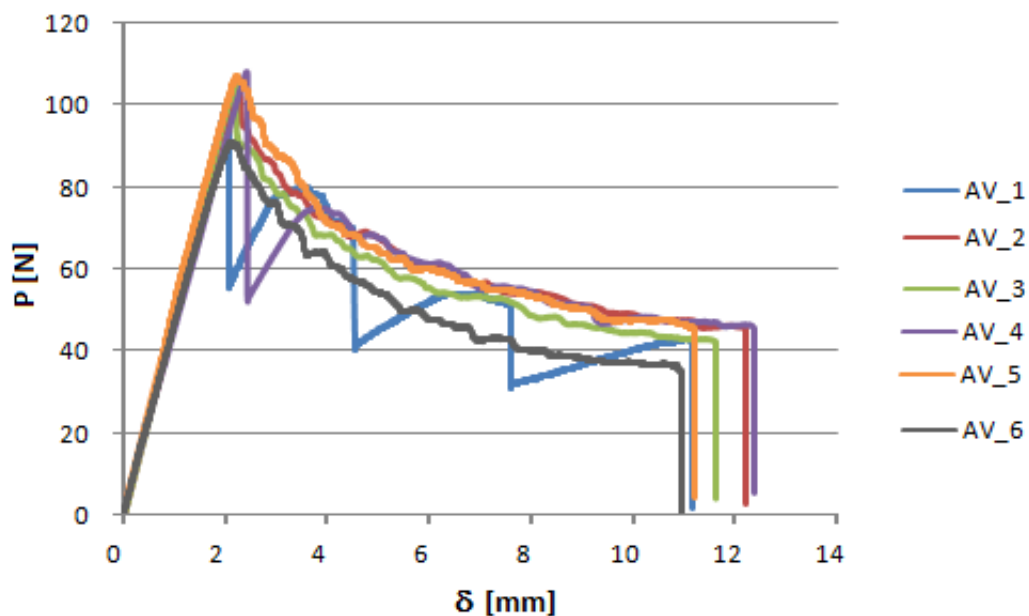


Figura 50 – Curvas  $P-\delta$  do adesivo Araldite® AV138 (Constante 2014)

As curvas  $P-\delta$  do adesivo Araldite® AV138 apresentam três fases distintas. Na primeira fase, têm um comportamento assumidamente reversível, isto é, um regime elástico em que a evolução da  $P-\delta$  é linear. A segunda fase resume-se à ocorrência de um processo irreversível no adesivo (formação da zona de processo de fratura (ZPF)), em que se verifica uma perda de linearidade perto de chegar a  $P_{máx}$ . A  $P_{máx}$  corresponde um deslocamento da carga máxima ( $\delta P_{máx}$ ). A energia armazenada no provete alcança o seu valor crítico,  $G_{Ic}$ , na vizinhança de  $P_{máx}$ , o que corresponde ao início de propagação da pré-fenda. A terceira fase ocorre após ser alcançado  $P_{máx}$ , e diz respeito à fase de propagação estável da fenda em que a força aplicada diminui progressivamente. No final há uma quebra abrupta, devido à rotura total do provete.

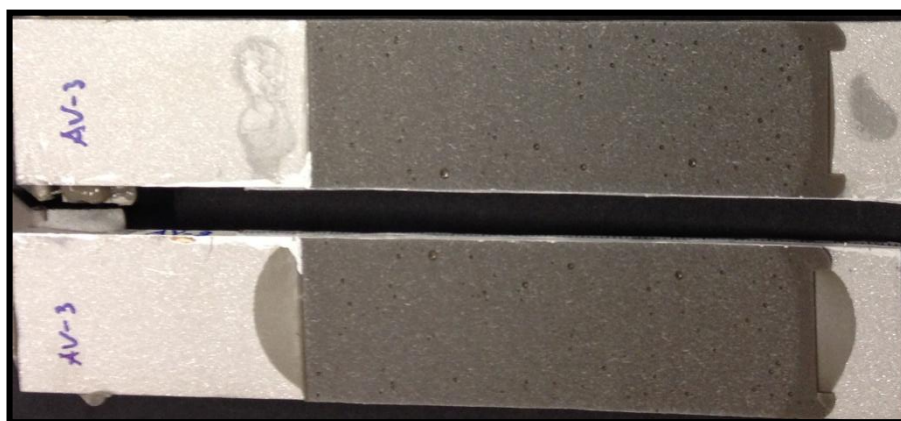


Figura 51 – Superfície de rotura do adesivo Araldite® AV138 (Constante 2014)

Como se pode evidenciar na Figura 51 o tipo de rotura foi coesiva pelo adesivo, ocorrendo do mesmo modo em todos os provetes.

### 3.2.2.1.1 Determinação do $G_{Ic}$

A Figura 52 apresenta as curvas- $R$  pelos métodos CCM, CBT e CBBM para um provete representativo dos seis ensaios realizados com o adesivo Araldite® AV138.

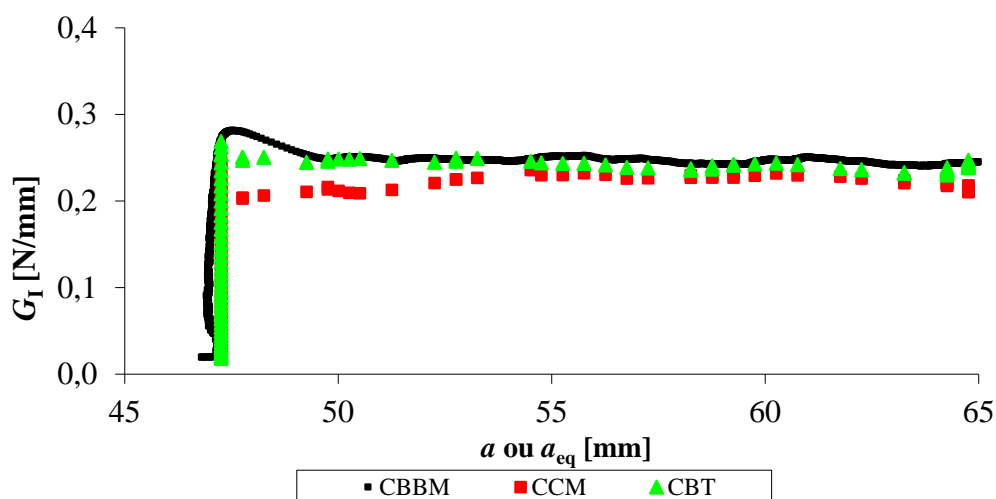


Figura 52 – Curvas- $R$  de um provete DCB com o adesivo Araldite® AV138 (Constante 2014)

Pode-se verificar que 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.

Tabela 9 – Valores de  $G_{Ic}$  (em N/mm) pelos métodos convencionais para o Araldite® AV138 (Constante 2014)

| Provete        | CBBM  | CCM   | CBT   |
|----------------|-------|-------|-------|
| AV_1           | 0,231 | 0,200 | 0,237 |
| AV_2           | 0,247 | 0,219 | 0,241 |
| AV_3           | 0,234 | 0,193 | 0,215 |
| AV_4           | 0,310 | ---   | 0,291 |
| AV_5           | 0,254 | 0,189 | 0,237 |
| AV_6           | 0,217 | 0,195 | 0,206 |
| Média:         | 0,249 | 0,199 | 0,238 |
| Desvio Padrão: | 0,033 | 0,012 | 0,030 |

A Tabela 9 representa os valores de  $G_{Ic}$  (N/mm) obtidos pelos métodos convencionais. Os dados da tabela, em conjunto com os dados apresentados previamente, revelaram que a coerência entre provetes é excelente. Assim sendo, os resultados dos seis provetes foram considerados na análise. Contudo, o valor médio de  $G_{Ic}$  com o CCM foi ligeiramente inferior aos outros métodos, o que se considerou estar relacionado com o ajuste polinomial de  $C^{1/3}=f(a)$ . Nos restantes dois métodos verificaram-se resultados médios muito similares, e também comparando os diferentes provetes de cada método.

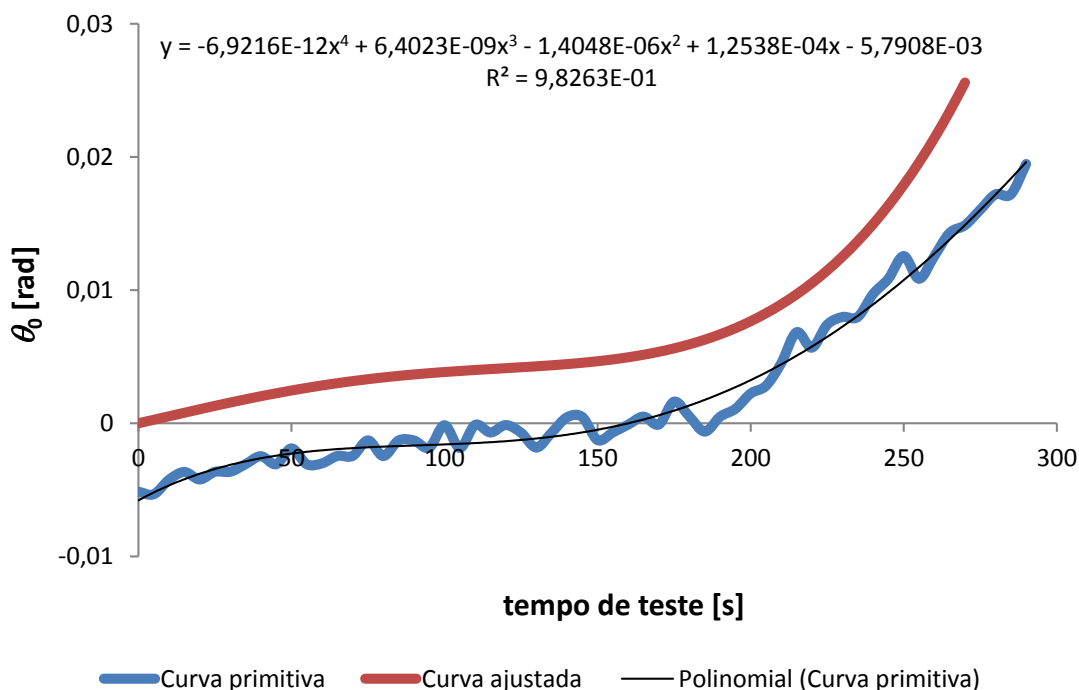


Figura 53 – Evolução de  $\theta_0$  no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® AV138: curva primitiva obtida a partir do método ótico, curva polinomial e curva polinomial ajustada (Constante 2014)

O método ótico leva a que inicialmente, e através da técnica descrita, se estime a evolução de  $\theta_0$  até ao início da propagação da fenda. A Figura 53 revela a evolução de  $\theta_0$  para um ensaio. Na referida figura está apresentada a curva primitiva, a curva polinomial de quarto grau para redução do ruído e a curva ajustada, adotando  $\theta_0=0$  no início do ensaio. Para cada ensaio realizado foi selecionado, entre polinómios de segundo a sexto grau, o grau mais apropriado à curva primitiva, sendo selecionado o melhor fator de correlação ( $R$ ). Este procedimento é válido para todas as curvas polinomiais apresentadas a partir deste ponto. Para os ensaios efetuados,  $R$  variou entre 0,81251 e 0,98263. O ajustamento à curva polinomial pretende anular o efeito do eventual desalinhamento inicial entre as escalas coladas nos aderentes, cujas marcas foram usadas para estimar  $\theta_0$ .

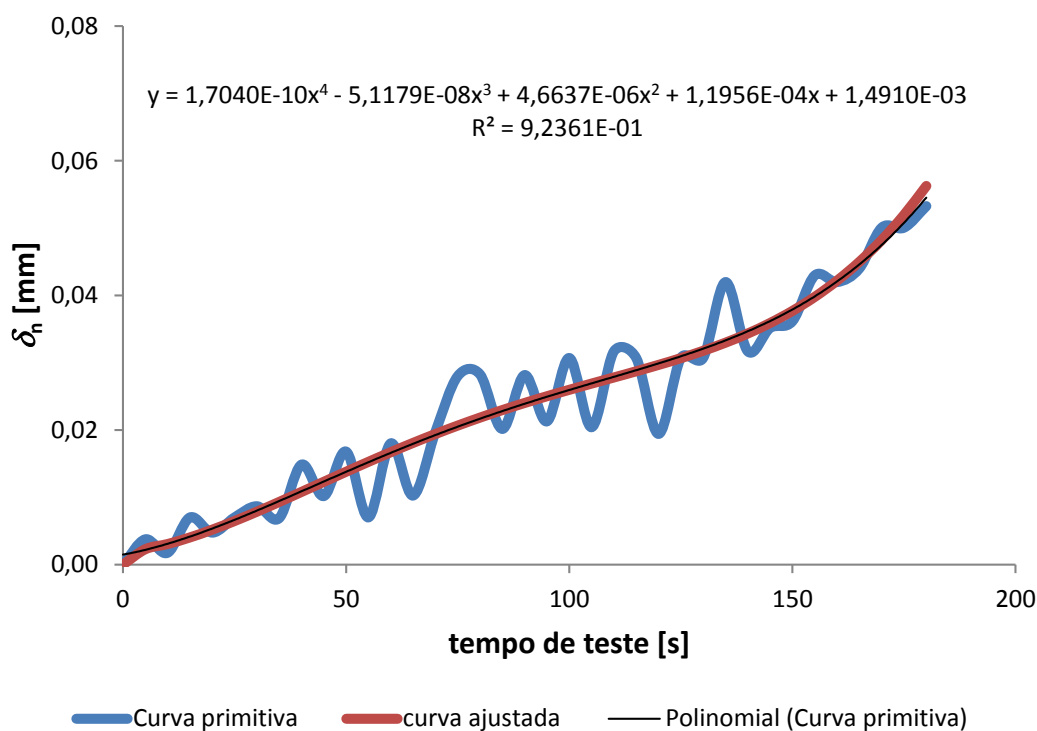


Figura 54 – Evolução de  $\delta_n$  no ensaio de um provete com o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138: curva primitiva obtida a partir do método ótico, curva polinomial e curva polinomial ajustada (Constante 2014)

A Figura 54 apresenta a evolução de  $\delta_n$  para um ensaio. O valor de  $\delta_n$  é determinado utilizando a técnica descrita anteriormente para cada provete ensaiado. Para que  $\delta_n=0$  coincida com o zero do tempo de teste foi fundamental realizar um ajuste final. Na Figura 54 está representada a curva primitiva a partir das medições óticas, a curva polinomial de

quarto grau e a curva ajustada. Para este adesivo, o valor de  $R$  variou entre 0,78523 e 0,95106.

Através da representação gráfica das curvas  $G_I-\delta_n$  foram definidos os valores de  $G_{Ic}$  para as amostras. Na Figura 55 observa-se a curva da lei experimental  $G_I-\delta_n$  e a curva polinomial correspondente ajustada ao sexto grau. No início deste ensaio,  $G_I$  aumenta lentamente com  $\delta_n$ , mas a taxa de crescimento de  $G_I$  aumenta rapidamente entre  $\delta_n=0,01$  e  $0,0375$  mm, sendo o seu valor estacionário obtido aproximadamente para  $\delta_n=0,04$  mm. Para este ensaio, o valor medido de  $G_{Ic}$  é de 0,252 N/mm. A lei experimental de  $G_I-\delta_n$  foi representada de forma semelhante para todos os ensaios ajustando a curva polinomial ao grau mais preciso ( $R$  variou entre 0,96346 e 0,99941).

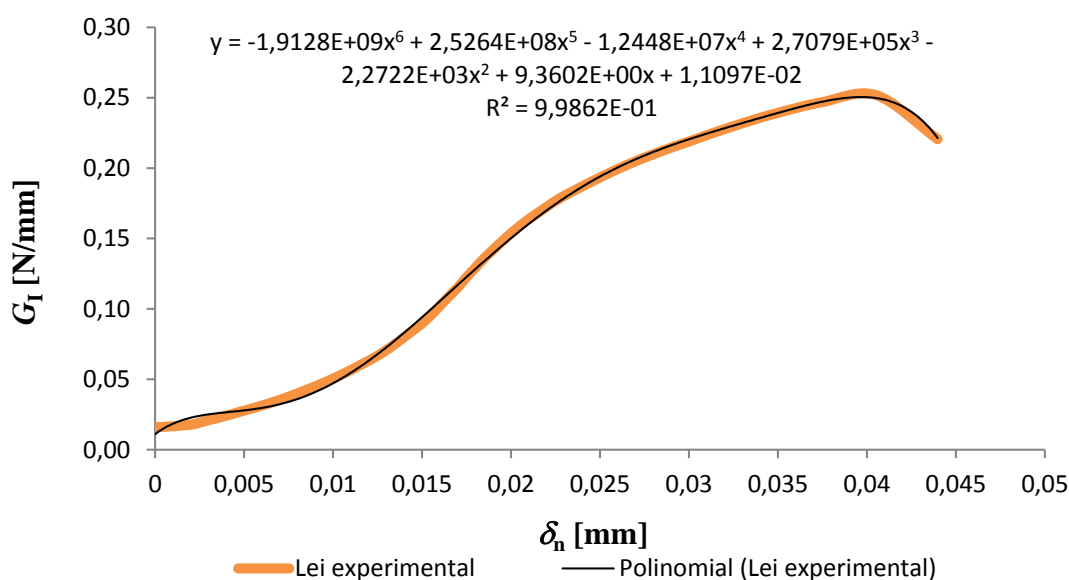


Figura 55 – Lei  $G_I-\delta_n$  experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® AV138 e ajuste de curva polinomial (Constante 2014)

Para o integral- $J$  obteve-se um valor de  $G_{Ic}$  de  $0,202 \pm 0,007$  N/mm, o que constitui um pequeno desvio por defeito relativamente aos valores obtidos pelo CBBM e CBT, anteriormente descritos na Tabela 9.

### 3.2.2.1.2 Determinação da lei coesiva em tração

Na Tabela 10 são apresentados os valores de  $t_n^0$  alcançados pelos provetes nos ensaios experimentais, os valores do fator de correção do comprimento de fenda ( $\Delta 2$ ) utilizados na

formulação da lei coesiva trapezoidal, assim como os valores de  $G_{Ic}$  obtidos pelo método do integral- $J$ . Pelo método direto foi obtida uma média de  $t_n^0$  e respetivo desvio padrão de  $35,1 \pm 0,2$  MPa, e uma média de  $\Delta 2$  de  $0,0052 \pm 0,0004$  mm. Sendo o valor de  $\Delta 2$  arbitrado para cada provete em função de  $t_n^0$  e  $G_{Ic}$ , os resultados de  $\Delta 2$  foram tipicamente os mesmos devido ao facto de não haver grande dispersão nos resultados dos parâmetros. Os dados apresentados na Tabela 10 permitem ajustar a lei coesiva para diferentes formas parametrizadas.

Tabela 10 – Parâmetros obtidos pelo método direto para as leis coesivas à tração do adesivo Araldite® AV138

| Provete        | $t_n^0$ (MPa) | $G_{Ic}$ (N/mm) | $\Delta 2$ (mm) |
|----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 1              | 35,37         | 0,212           | 0,0050          |
| 2              | 35,33         | 0,194           | 0,0050          |
| 3              | 34,78         | 0,209           | 0,0050          |
| 4              | 35,05         | 0,193           | 0,0050          |
| 5              | 35,03         | 0,203           | 0,0050          |
| 6              | 35,04         | 0,203           | 0,0060          |
| Média:         | 35,100        | 0,202           | 0,0052          |
| Desvio Padrão: | 0,200         | 0,007           | 0,0004          |

Na Figura 56 é representada a curva  $t_n$ - $\delta_n$  obtida experimentalmente para um provete do adesivo e as leis MDC triangular, trapezoidal e exponencial proposta.

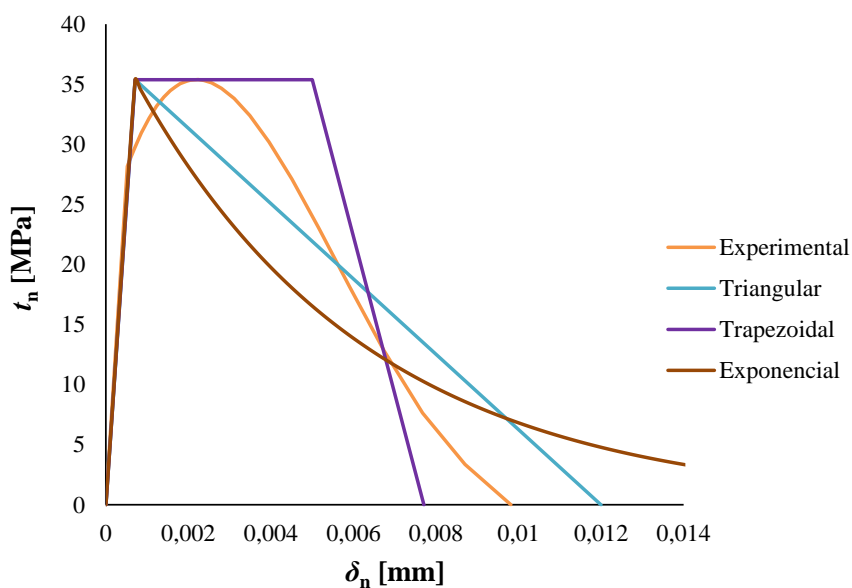


Figura 56 – Lei  $t_n$ - $\delta_n$  experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® AV138, e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial (Constante 2014)

Com base na Figura 56, tanto a lei MDC trapezoidal como a lei MDC triangular representam, com elevada aproximação, as características do adesivo. Sendo este adesivo frágil, a lei triangular também se revela apropriada. Por sua vez, a lei exponencial apresenta alguma diferenciação com as demais, sendo portanto a menos adequada para simulação deste tipo de adesivo. Para este provete foram encontrados, experimentalmente, os seguintes valores:  $t_n^0=35,37$  MPa e  $\delta_n^f=0,01$  mm.

### 3.2.2.2 Adesivo Araldite® 2015

Depois de ensaiar os provetes com o adesivo Araldite® 2015 e realizar o tratamento dos dados, obtiveram-se inicialmente as curvas  $P-\delta$ . Na Figura 57 estão reunidas todas as curvas  $P-\delta$  para os seis provetes com o adesivo Araldite® 2015. De uma forma geral, verificou-se que estas apresentam uma boa repetibilidade no que respeita à rigidez elástica, antes da propagação da fenda, à carga máxima, ao comportamento durante a propagação do dano e ao deslocamento máximo.

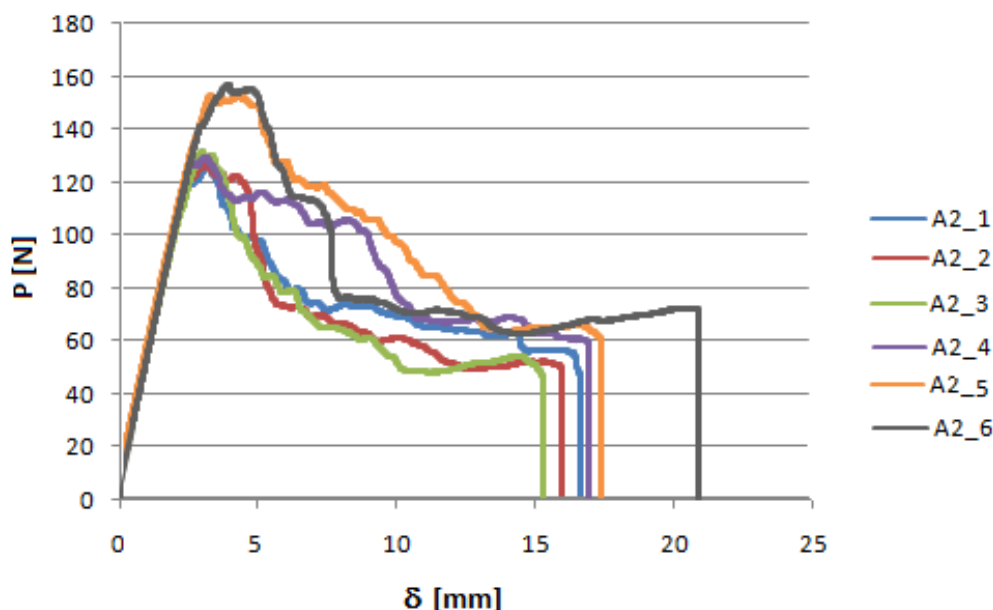


Figura 57 – Curvas  $P-\delta$  do adesivo Araldite® 2015 (Constante 2014)

Analisando as curvas apresentadas na Figura 57, verifica-se que a evolução é semelhante à registada para o Araldite® AV138, sendo que a propagação é mais estável pelo facto de este adesivo ser mais dúctil do que o adesivo anterior. Este adesivo também atinge maior valor de  $P_{máx}$  com uma rigidez semelhante em todos os provetes.

A Figura 58 apresenta um exemplo da superfície de rotura para este adesivo. Em cada ensaio ocorreu uma rotura coesiva do adesivo. A existência de roturas coesivas revela a boa adesão que ocorreu durante o processo de fabrico.



Figura 58 – Superfícies de rotura do adesivo Araldite® 2015 (Constante 2014)

### 3.2.2.2.1 Determinação do $G_{Ic}$

A Figura 59 representa as curvas- $R$ , determinadas pelo CCM, CBT e o CBBM, para um dos provetes testados, que representam os resultados globais obtidos com o adesivo Araldite® 2015. Verifica-se também neste caso uma boa correspondência entre os três métodos de obtenção de  $G_{Ic}$ .

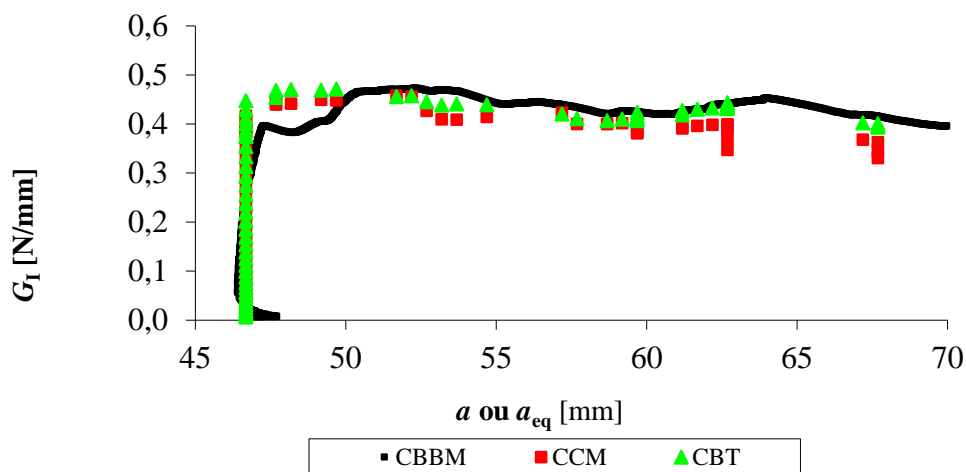


Figura 59 – Curvas- $R$  de um provete DCB com o adesivo Araldite® 2015 (Constante 2014)

A Tabela 11 resume os valores de  $G_{Ic}$  (N/mm) dos ensaios realizados aos provetes colados com o adesivo Araldite® 2015. Para este adesivo constata-se uma repetibilidade muito boa entre provetes, pelo que não se descarta nenhum resultado.

Tabela 11 – Valores de  $G_{Ic}$  (em N/mm) pelos métodos convencionais para o adesivo Araldite® 2015 (Constante 2014)

| Provete        | CBBM  | CCM   | CBT   |
|----------------|-------|-------|-------|
| A2_1           | 0,444 | 0,403 | 0,431 |
| A2_2           | 0,467 | 0,387 | 0,484 |
| A2_3           | 0,492 | 0,576 | 0,484 |
| A2_4           | 0,460 | 0,399 | 0,471 |
| A2_5           | 0,709 | 0,590 | 0,676 |
| A2_6           | 0,663 | 0,619 | 0,632 |
| Média:         | 0,539 | 0,496 | 0,530 |
| Desvio Padrão: | 0,116 | 0,110 | 0,099 |

Para cada provete a correlação entre os três métodos é bastante satisfatória, exceto em casos pontuais para o CCM, o que é devido a algumas dificuldades na determinação do polinômio de ajuste a  $C^{1/3}=f(a)$ . Entre os métodos a correspondência de valores também é excelente. Na Figura 60 está representada a evolução de  $\theta_0$  com o tempo de teste para um ensaio, necessária para o cálculo de  $G_{Ic}$  pelo integral- $J$ , onde se destaca a curva primitiva, a curva polinomial de quinto grau usada para diminuir o ruído e a curva ajustada, adotando  $\theta_0=0$  no início do ensaio. Considerando todos os ensaios,  $R$  variou entre 0,98571 e 0,99764.

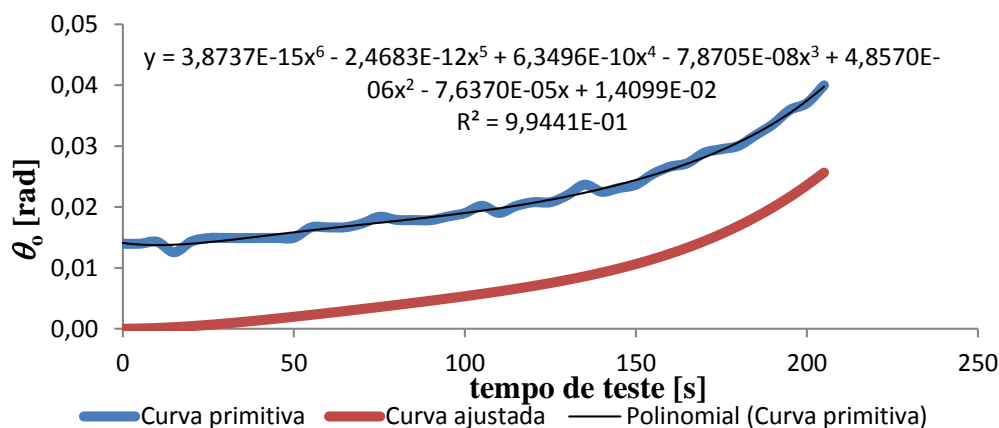


Figura 60 – Evolução de  $\theta_0$  no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® 2015: curva primitiva obtida a partir do método óptico, curva polinomial e curva polinomial ajustada (Constante 2014)

A Figura 61 mostra a evolução de  $\delta_n$  para um ensaio específico de uma amostra. Na figura está representada a curva primitiva a partir das medições óticas, a curva polinomial de quinto grau e a curva polinomial ajustada. Para este parâmetro,  $R$  variou entre 0,92009 e 0,95753.

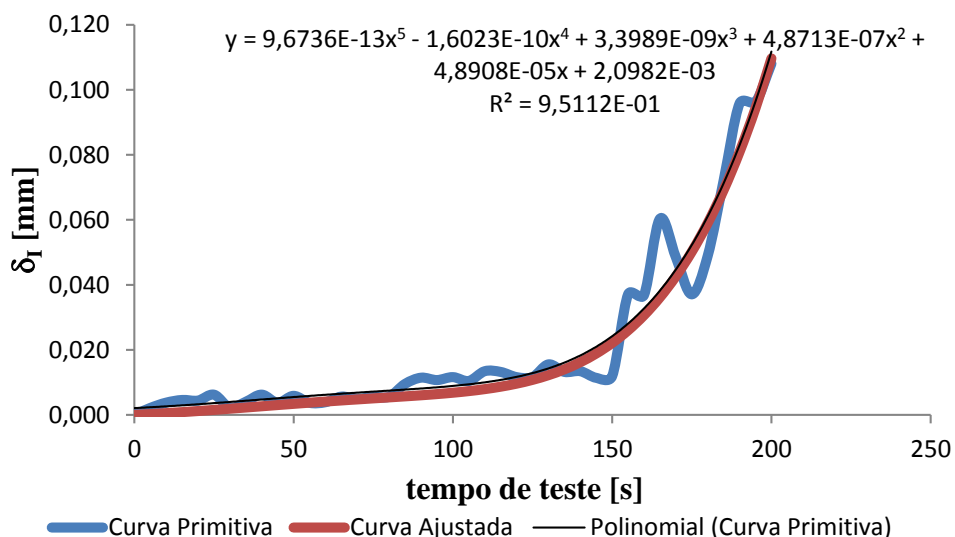


Figura 61 – Evolução de  $\delta_n$  no ensaio de um provete com o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015: curva primitiva obtida a partir do método ótico, curva polinomial e curva polinomial ajustada (Constante 2014)

O valor de  $G_{Ic}$  para cada amostra foi determinado através da representação gráfica da curva de  $G_I$ - $\delta_n$ . Para o provete considerado nas figuras anteriores, a Figura 62 representa a curva  $G_I$ - $\delta_n$  e a curva polinomial correspondente de sexto grau. Para este ensaio, o valor medido de  $G_{Ic}$  é de 0,437 N/mm. A lei experimental de  $G_I$ - $\delta_n$  foi obtida de forma semelhante para todos os ensaios ajustando a curva polinomial ao grau mais apropriado. O valor de  $R$  variou entre 0,96282 e 0,99817.

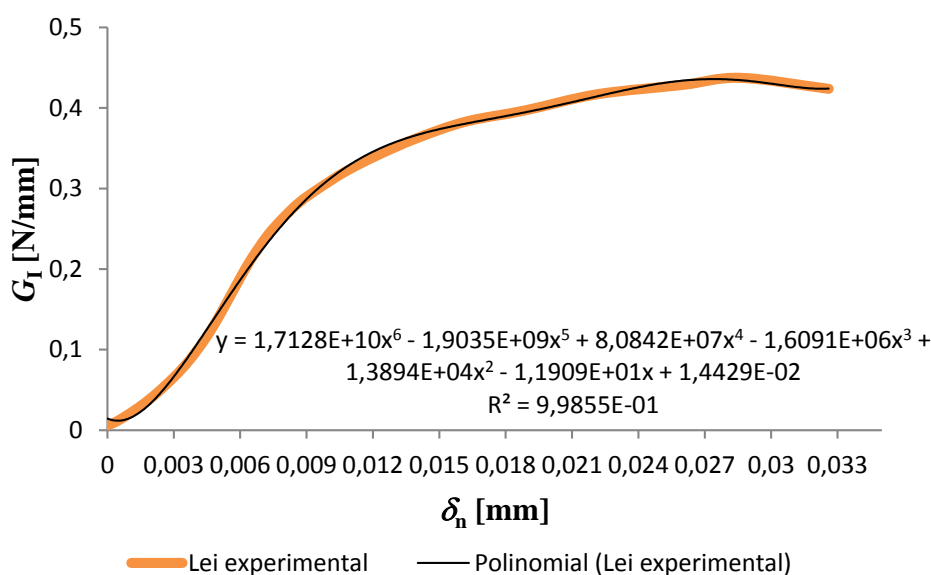


Figura 62 – Lei  $G_I$ - $\delta_n$  experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 e ajuste de curva polinomial (Constante 2014)

Pelo integral- $J$ , obteve-se um valor de  $G_{Ic}$  de  $0,533 \pm 0,112$  N/mm, bastante próximo dos valores obtidos na Tabela 11 comparação com CCM, CBT e CBBM. A descrição detalhada dos valores obtidos para cada provete é apresentada no capítulo seguinte.

### 3.2.2.2.2 Determinação da lei coesiva em tração

A Tabela 12 apresenta um sumário dos parâmetros para as leis coesivas à tração do Araldite® 2015, obtidas pelo método direto. Registou-se um valor médio de  $t_n^0$  de  $20,56 \pm 5,27$  MPa, para  $G_{Ic}$  registaram-se valores de  $0,533 \pm 0,112$  N/mm e para  $\Delta 2$  valores de  $0,026 \pm 0,007$  mm. Estes valores correspondem a um desvio percentual relativamente à média de 25,6%, 21,0% e 26,9%, pela mesma ordem. Apesar destes desvios apresentarem alguma significância, as leis coesivas apresentaram uma boa repetibilidade.

Tabela 12 – Parâmetros obtidos pelo método direto para as leis coesivas à tração do adesivo Araldite® 2015

| Provete        | $t_n^0$ (MPa) | $G_{Ic}$ (N/mm) | $\Delta 2$ (mm) |
|----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 1              | 23,00         | 0,437           | 0,020           |
| 2              | 20,00         | 0,434           | 0,025           |
| 3              | 20,95         | 0,494           | 0,020           |
| 4              | 17,85         | 0,456           | 0,025           |
| 5              | 29,54         | 0,665           | 0,025           |
| 6              | 12,05         | 0,712           | 0,040           |
| Média:         | 20,57         | 0,533           | 0,026           |
| Desvio Padrão: | 5,27          | 0,112           | 0,007           |

A Figura 63 exibe a curva  $t_n-\delta_n$  do adesivo Araldite® 2015 para um provete testado, obtida a partir da derivação da curva  $G_I-\delta_n$  experimental depois de ter atingido o valor máximo de  $t_n^0$ . No ensaio deste provete foram obtidos valores de  $t_n^0 = 20,95$  MPa e  $\delta_n^f = 0,035$  mm.

A lei coesiva trapezoidal para o adesivo Araldite® 2015 proposta e apresentada na Figura 63 é particularmente adequada, pois representa a ductilidade do adesivo de uma forma precisa, ao contrário de uma lei triangular e exponencial.

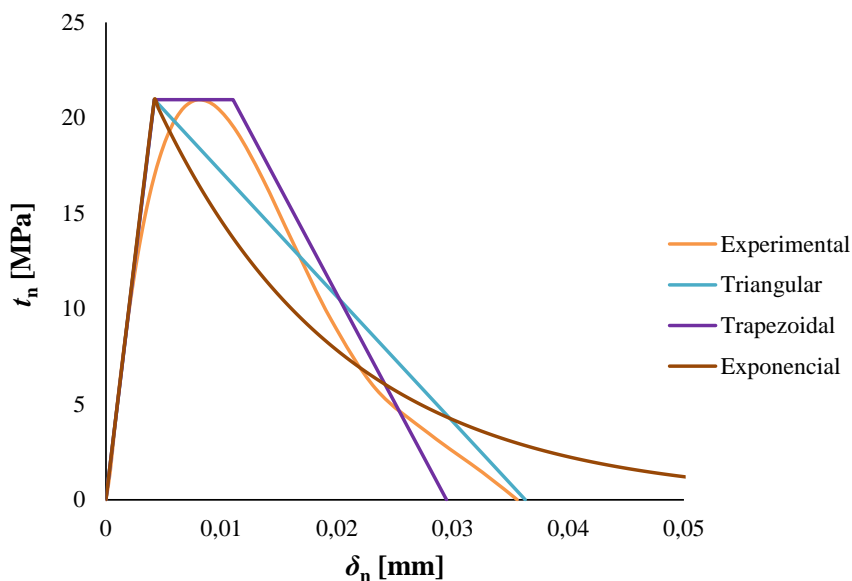


Figura 63 – Lei  $t_n$ - $\delta_n$  experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 e aproximação triangular, trapezoidal e exponencial (Constante 2014)

### 3.2.2.3 Adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752

Após os ensaios com os seis provetes e respetivo tratamento dos dados, obtiveram-se as curvas  $P$ - $\delta$  (Figura 64). Em geral, se pode constatar que as curvas revelaram uma boa coerência quanto à sua rigidez elástica, à sua carga máxima e ao seu comportamento durante a propagação do dano.

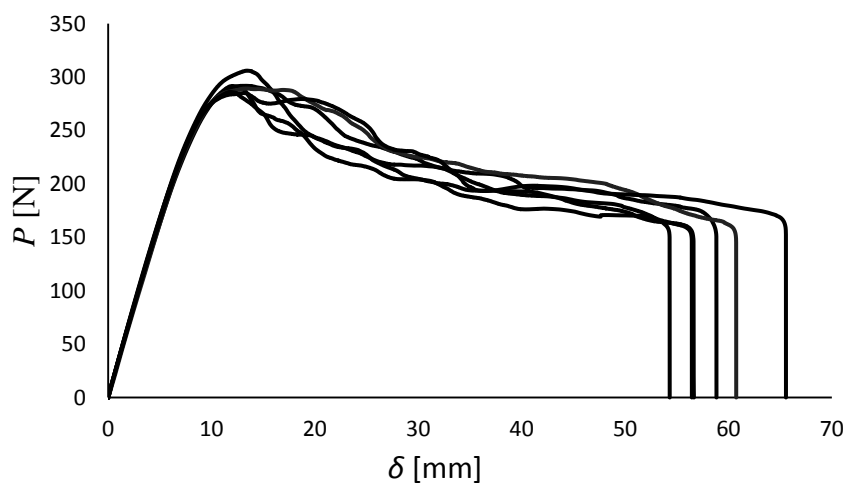


Figura 64 – Curvas  $P$ - $\delta$  do adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752 (Campilho et al. 2014)

### 3.2.2.3.1 Determinação do $G_{Ic}$

Na Figura 65 está representada a curva- $R$  de um provete pelo método CBBM. Para este adesivo, os dados disponíveis apenas contemplam este método de redução de  $G_{Ic}$  (Campilho et al. 2014).

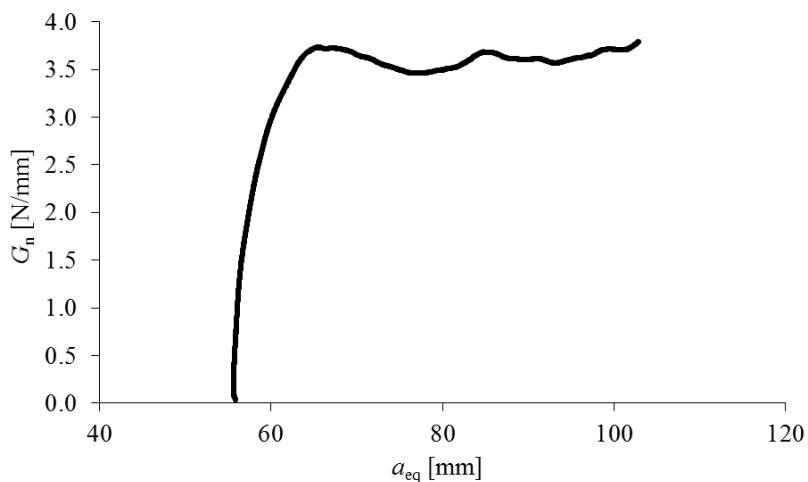


Figura 65 – Curva- $R$  de um provete DCB com o adesivo Sikaforce® 7752 (Campilho et al. 2014)

O procedimento para determinação das curvas que relacionam  $\theta_0$  com o tempo de teste foi o mesmo utilizado nos adesivos anteriores. A Figura 66 mostra uma curva representativa do conjunto de ensaios efetuados, considerando a curva primitiva, a curva polinomial e a curva polinomial ajustada. A forma da curva obtida é idêntica à descrita anteriormente para os outros adesivos, embora neste caso com valores de  $\theta_0$  mais elevados.

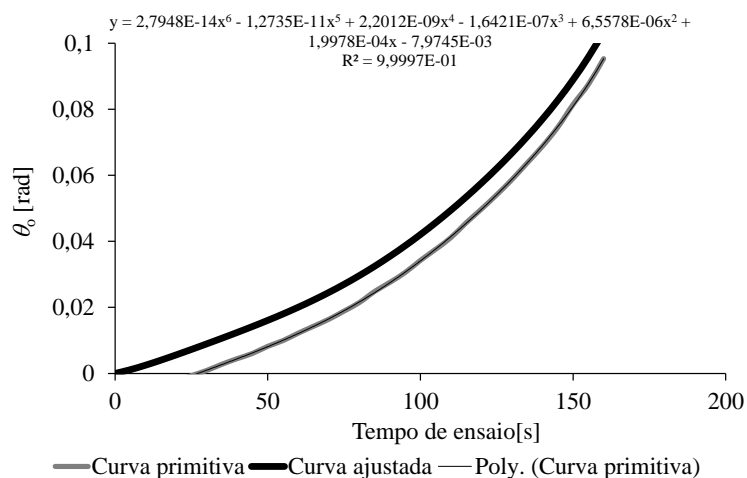


Figura 66 – Evolução de  $\theta_0$  no ensaio de um provete com o adesivo Sikaforce® 7752: curva primitiva obtida a partir do método ótico, curva polinomial e curva polinomial ajustada (Campilho et al. 2014)

A Figura 67 mostra, para o mesmo provete, as curvas que relacionam  $\delta_n$  com o tempo de ensaio. Também nesta figura se representam as três curvas anteriormente referidas.

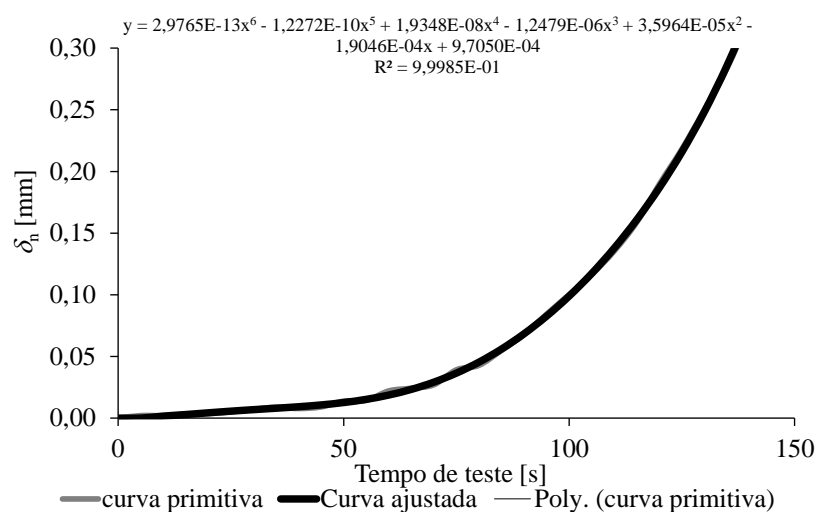


Figura 67 – Evolução de  $\delta_n$  no ensaio de um provete com o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752: curva primitiva obtida a partir do método ótico, curva polinomial e curva polinomial ajustada (Campilho et al. 2014)

Na Figura 68 está representada uma curva  $G_I$ - $\delta_n$  para o adesivo em estudo. A curva é constituída por três regiões distintas: numa primeira fase, o aumento de  $G_I$  com  $\delta_n$  é lento (zona não visível na figura), numa fase seguinte surge uma região de aumento aproximadamente constante de  $G_I$  com  $\delta_n$  e, finalmente a curva tende para um valor estacionário. A forma destas curvas é também descrita na literatura por Campilho et al. (2013) e Ji et al. (2010). Comparando a curva da Figura 68 com a Figura 55 (Araldite<sup>®</sup> AV138) e com a Figura 62 (Araldite<sup>®</sup> 2015), observa-se que para este adesivo a última fase da curva (a estabilização do valor de  $G_I$ ) apresenta uma grande preponderância relativamente às duas primeiras fases. Conforme descrito no trabalho de Campilho et al. (2014), esta diferença deve-se à grande ductilidade do Sikaforce<sup>®</sup> 7752, e também terá repercussões na forma da lei coesiva obtida pelo método direto.

O valor médio de  $G_{Ic}$  e respetivo desvio padrão pelo método CBBM foram de  $3,770 \pm 0,424$  N/mm (desvio percentual de 11,3%). O valor de  $G_{Ic}$  obtido é típico de um adesivo de grande ductilidade.

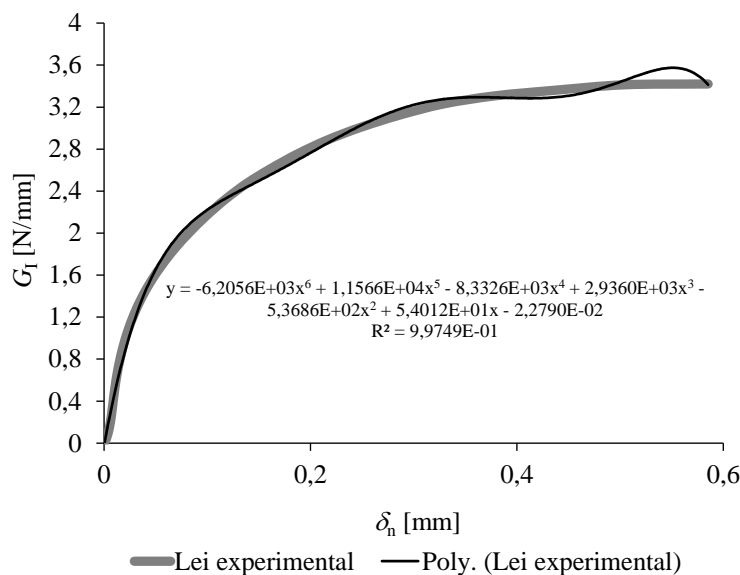


Figura 68 – Lei  $G_I$ - $\delta_n$  experimental no ensaio de um provete com o adesivo Sikaforce® 7752 (Campilho et al. 2014)

3.2.2.3.2 *Determinação da lei coesiva em tração*

A Tabela 13 apresenta o resumo dos parâmetros obtidos para as leis coesivas do Sikaforce® 7752 obtidas pelo método direto. Conforme se observa na tabela, o valor médio de  $t_n^0$  é de  $17,69 \pm 0,015$  MPa, de  $G_{Ic}$  é de  $3,702 \pm 0,231$  N/mm e de  $\Delta 2$  é de  $0,165 \pm 0,015$  mm. O desvio percentual relativo a estes valores é de 0,1%, 6,2% e 9,1%, respectivamente. Em função do exposto, considera-se que há um excelente acordo entre os diversos provetes.

Tabela 13 – Parâmetros obtidos pelo método direto para as leis coesivas à tração do adesivo Sikaforce® 7752

| Proвете        | $t_n^0$ (MPa) | $G_{Ic}$ (N/mm) | $\Delta 2$ (mm) |
|----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 1              | 17,69         | 3,420           | 0,150           |
| 2              | 17,71         | 3,900           | 0,180           |
| 3              | 17,67         | 3,840           | 0,180           |
| 4              | 17,68         | 4,000           | 0,180           |
| 5              | 17,70         | 3,400           | 0,150           |
| 6              | 17,71         | 3,650           | 0,150           |
| Média:         | 17,69         | 3,702           | 0,165           |
| Desvio Padrão: | 0,015         | 0,231           | 0,015           |

A Figura 69 apresenta um exemplo de curva  $t_n$ - $\delta_n$  obtida experimentalmente pelo método direto aplicado a um provete DCB com o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752 sujeito à tração, e a representação das três leis coesivas em análise.

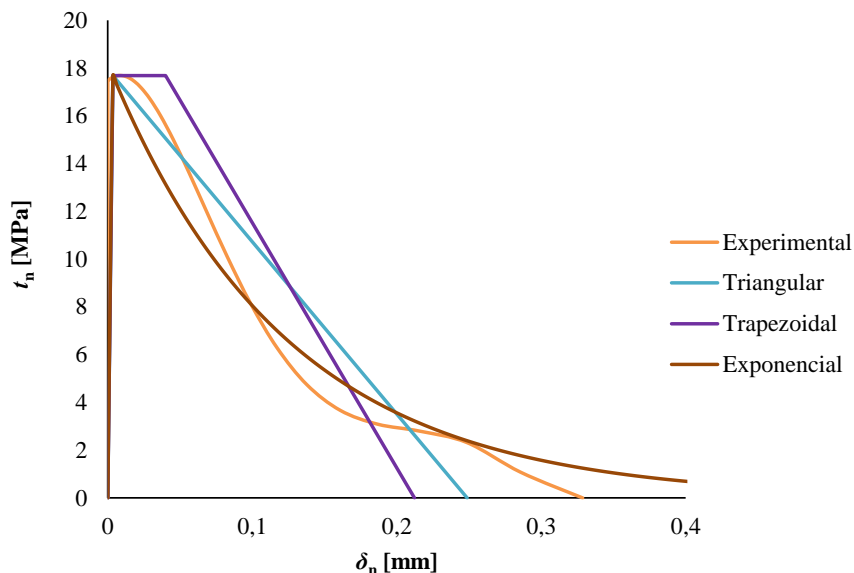


Figura 69 – Lei  $t_n$ - $\delta_n$  experimental no ensaio de um provete com o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752 e aproximação triangular, trapezoidal e exponencial (Campilho et al. 2014)

Relativamente às leis apresentadas na Figura 69 verifica-se que há uma aproximação entre as três leis e a lei obtida experimentalmente. Isto demonstra que estas leis devem ser adequadas para prever o comportamento deste adesivo.

#### 3.2.2.4 Análise e comparação dos resultados

Na Figura 70 pode-se visualizar os valores médios de  $G_{Ic}$  e desvios padrão, pelos quatro métodos e para os três adesivos estudados. Gráficamente verifica-se que existe uma boa concordância entre diferentes métodos para cada adesivo, embora por vezes com alguma disparidade nos resultados pelo CCM, devido ao ajuste polinomial de  $C^{1/3}=f(a)$ . A comparação entre os três adesivos mostra mais uma vez a grande diferença de ductilidade do Sikaforce<sup>®</sup> 7752 relativamente aos outros dois adesivos, enquanto o Araldite<sup>®</sup> 2015 apresenta um pouco mais do dobro do valor de  $G_{Ic}$  do que o Araldite<sup>®</sup> AV138.

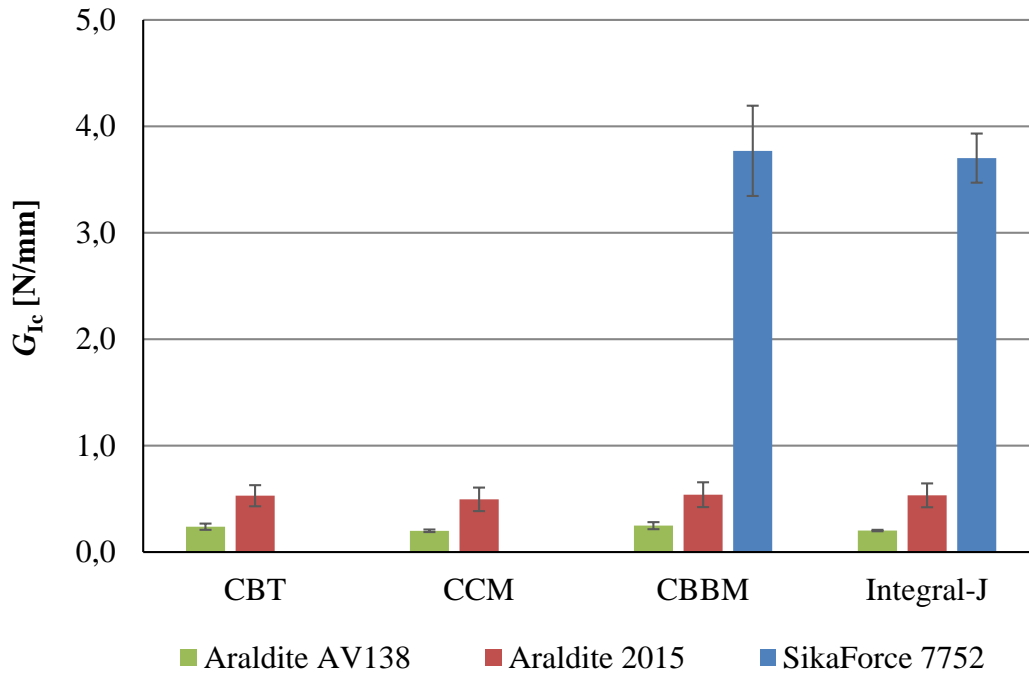


Figura 70 – Valor médio de  $G_{Ic}$  e desvios padrão pelos quatro métodos e para os três adesivos, adaptado de (Campilho et al. 2014, Constante 2014)

### 3.3 Ensaios ENF

O ensaio ENF caracteriza-se pelo facto de o provete estar disposto em posição de viga simplesmente apoiada nos seus extremos, sendo aplicada uma carga a meio vão. Este ensaio também é designado por ensaio de flexão em 3 pontos, e permite determinar o valor de  $G_{IIC}$ .

#### 3.3.1 Geometria, fabrico e teste dos provetes ENF

A geometria dos provetes ENF está representada na Figura 27. Foram produzidos 24 provetes, 8 para cada adesivo. As dimensões teóricas para a preparação dos provetes são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Dimensões teóricas dos provetes ENF (Azevedo 2014)

|                                  |                  |
|----------------------------------|------------------|
| Comprimento dos substratos, $2L$ | $230 \pm 0,5$ mm |
| Largura dos substratos, $B$      | $25 \pm 0,05$ mm |
| Espessura dos substratos, $h$    | $3 \pm 0,05$ mm  |
| Espessura do adesivo, $t_A$      | 0,2 mm           |
| Comprimento da pré-fenda, $a_0$  | 50 mm            |

Face à espessura de adesivo definido e de modo a garantir um valor de 0,2 mm ao longo dos provetes, foram utilizados espaçadores calibrados na extremidade dos provetes e na zona onde inicia a pré-fenda, e cujo procedimento foi semelhante ao usado para os ensaios DCB (Figura 38). O espaçador utilizado na extremidade dos provetes foi uma fita de aço calibrada com espessura de 0,2 mm e largura do provete. O outro espaçador, que viria a garantir a espessura de adesivo, assim como a pré-fenda do provete, foi preparando de forma idêntica ao exposto no ponto 3.2.1 na preparação dos provetes DCB (Figura 39).

O passo seguinte é a aplicação do adesivo sobre os substratos de acordo com o especificado anteriormente. Todo o processo seguiu o descrito para os provetes DCB. O processo de cura decorreu à temperatura ambiente, aproximadamente 20° C, durante o qual os substratos foram pressionados por grampos para garantir a espessura de adesivo (Figura 71).



Figura 71 – Processo de posicionamento durante a cura (Azevedo 2014)

Segundo Azevedo (2014), apesar de o método apresentado ser bastante utilizado na introdução de pré-fendas em juntas coladas, este possui uma desvantagem que se prende com o facto de a lâmina possuir um raio de curvatura na sua ponta que não pode ser considerado desprezável, algo que teoricamente uma fenda não possui. Para ultrapassar esta limitação, a fenda foi ligeiramente propagada de forma manual antes do início do ensaio, seguindo-se a medição do valor de pré-fenda para aplicação dos métodos de obtenção de  $G_{IIc}$ . O tratamento dos provetes após a cura foi semelhante ao exposto para os provetes DCB. As medições foram efetuadas utilizando um paquímetro digital, assim como expressa a Tabela 15.

Tabela 15 – Dimensões efetivas dos provetes ENF

| Adesivo             | Provete | Comprimento<br>$L$ [mm] | Largura<br>$B$ [mm] | Espessura<br>$h$ [mm] | Pré-fenda<br>$a_0$ [mm] |
|---------------------|---------|-------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|
| Araldite®<br>AV138* | AV_1    | 230                     | 25,8                | 3                     | 65,90                   |
|                     | AV_2    |                         |                     |                       | 51,65                   |
|                     | AV_3    |                         |                     |                       | 50,60                   |
|                     | AV_4    |                         |                     |                       | ANULADO                 |
|                     | AV_5    |                         |                     |                       | 66,10                   |
|                     | AV_6    |                         |                     |                       | 64,15                   |
|                     | AV_7    |                         |                     |                       | 67,80                   |
|                     | AV_8    |                         |                     |                       | 65,15                   |
| Araldite®<br>2015*  | A2_1    | 230                     | 25,8                | 3                     | 48,84                   |
|                     | A2_2    |                         |                     |                       | 53,87                   |
|                     | A2_3    |                         |                     |                       | 51,60                   |
|                     | A2_4    |                         |                     |                       | 48,76                   |
|                     | A2_5    |                         |                     |                       | 49,76                   |
|                     | A2_6    |                         |                     |                       | 48,93                   |
|                     | A2_7    |                         |                     |                       | 52,19                   |
|                     | A2_8    |                         |                     |                       | 51,22                   |
| Sikaforce®<br>7752* | SF_1    | 230                     | 25,8                | 3                     | 49,92                   |
|                     | SF_2    |                         |                     |                       | 60,13                   |
|                     | SF_3    |                         |                     |                       | 58,02                   |
|                     | SF_4    |                         |                     |                       | 58,84                   |
|                     | SF_5    |                         |                     |                       | 53,31                   |
|                     | SF_6    |                         |                     |                       | 51,49                   |
|                     | SF_7    |                         |                     |                       | 54,53                   |
|                     | SF_8    |                         |                     |                       | 55,97                   |

\*os valores  $L$ ,  $B$  e  $h$  não foram medidos individualmente

Os provetes ENF foram ensaiados numa máquina servo-hidráulica Shimadzu AG-X 100 equipada com uma célula de carga de 100 kN e pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP. A máquina foi configurada de forma a realizar ensaios de flexão em 3 pontos, usando velocidade de solitação constante. De cada ensaio obteve-se o registo de  $P$ ,  $\delta$ ,  $a$ , e tempo de ensaio. Os ensaios decorreram com condições de temperatura ambiente. Na Figura 72 pode-se visualizar a disposição de um provete ENF preparado para ensaio. Para o ensaio, o provete é colocado sob rolos de suporte, que se tratam de rolamentos que rodam sem atrito em torno de um veio fixo, para que o provete possa deformar livremente durante a aplicação da carga. Os rolos de suporte são distanciados de  $2L$  (Figura 27). Também devem ser garantidos o alinhamento e posição centrada dos provetes com o cilindro de aplicação da carga. Para auxílio nesta tarefa foi efetuada uma marcação na face lateral dos provetes, identificando a localização dos pontos de apoio, e no ponto de aplicação da carga.

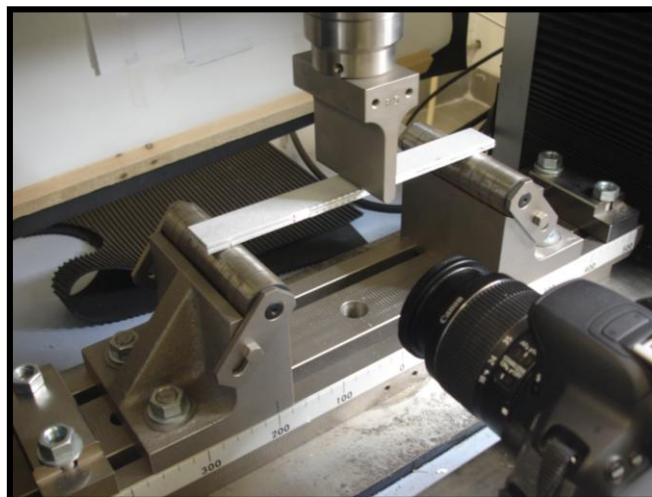


Figura 72 – Posicionamento do provete ENF na máquina de ensaio (Azevedo 2014)

A velocidade de teste deve ser suficientemente pequena para permitir a monitorização da fenda durante os ensaios. São sugeridas, pelo menos, 20-30 medições para construir a curva- $R$  (Campilho et al. 2014). A monitorização da propagação da fenda foi efetuada com o auxílio de uma câmara de alta resolução apoiada numa base sólida. Foi instalada uma câmara fotográfica de alta resolução a aproximadamente 120 mm do provete, de forma a capturar a face lateral do provete, e assim capturar fotos com intervalos de 5 s durante o ensaio, para documentar a propagação de fenda na região de medição de  $G_{IIc}$  (Figura 73).

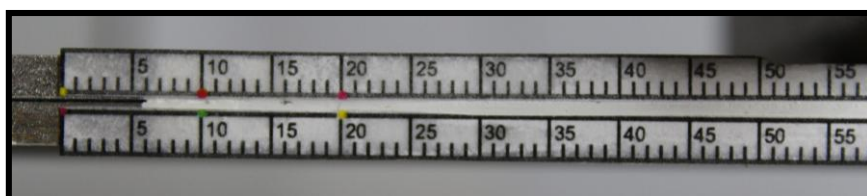


Figura 73 – Região do provete abrangida na medição (Azevedo 2014)

### 3.3.2 Resultados obtidos

Neste ponto estão representados os resultados obtidos nos ensaios ENF obtidos por Azevedo (2014) – métodos convencionais e por Leitão (2015) – método ótico/integral- $J$ , nomeadamente as curvas  $P-\delta$ , o tratamento de dados relativos à obtenção dos valores de  $G_{IIc}$  para os 3 adesivos, e ainda uma análise crítica dos resultados obtidos. O registo dos valores de  $P-\delta$  ao longo dos ensaios ENF foi realizado com uma taxa de aquisição de 5 Hz para as três séries de juntas adesivas de 8 provetes, obtendo-se as curvas  $P-\delta$ . Somente um ensaio em cada série de juntas adesivas foi rejeitado: AV138\_4, A2015\_2 e S7752\_8, por causa de

uma disparidade de resultados assinalável relativamente aos restantes provetes da respetiva série.

### 3.3.2.1 Adesivo Araldite® AV138

Na Figura 74 observa-se as curvas  $P-\delta$  obtidas para os sete provetes considerados válidos das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138. As curvas são indicativas de um adesivo com um comportamento de rotura frágil, onde se verifica uma rotura abrupta. Assim, o valor de  $P$  decresce abruptamente, originando uma propagação rápida da fenda, levando a uma maior dificuldade em monitorizar o crescimento de  $a$  e, conseqüentemente, de conseguir um significativo número de imagens para o tratamento de dados. Verifica-se uma diferença notória entre os provetes AV138\_2 e AV138\_3 e os restantes, facto que está relacionado com a existência de um valor de  $a_0$  inferior aos restantes. Porém, este efeito foi contabilizado no tratamento dos dados pelos diferentes métodos, pelo que não tem influência na medição de  $G_{IIc}$ .

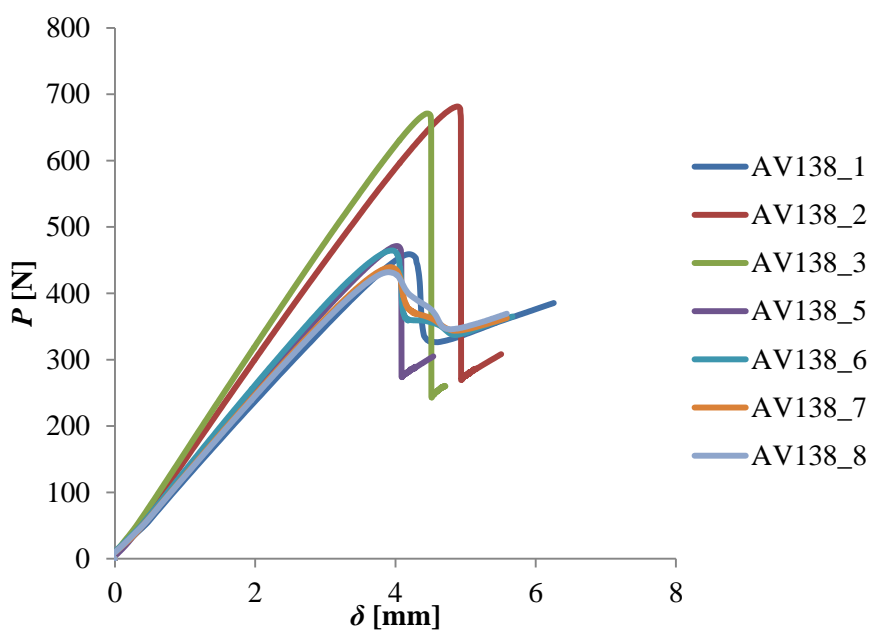


Figura 74 – Curvas  $P-\delta$  do adesivo Araldite® AV138 (Azevedo 2014)

#### 3.3.2.1.1 Determinação do $G_{IIc}$

A determinação de  $G_{IIc}$  baseia-se nas curvas de resistência, ou curvas- $R$ , tal como se observou no ensaio DCB. No caso do ensaio ENF é expectável que este parâmetro seja

constante entre o início da fenda e o ponto em que a propagação da fenda começa a ser afetada pelo cilindro de carregamento, o que induz efeitos de compressão que dificultam a propagação da fenda. Este valor de patamar corresponde ao valor de  $G_{IIc}$  do respectivo adesivo. De seguida apresentam-se as curvas- $R$  dos provetes, uma curva para cada adesivo, referentes aos três métodos utilizados, o CCM e CBT, que requerem a medição de  $a$ , e o CBBM, baseado no comprimento da fenda equivalente ( $a_{eq}$ ). Os resultados obtidos são considerados como representativos dos resultados globais para os ensaios realizados para cada adesivo.

A Figura 75 diz respeito às curvas- $R$  do provete escolhido para a representação da série de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, pelos métodos referenciados previamente, com e sem medição de  $a$ .

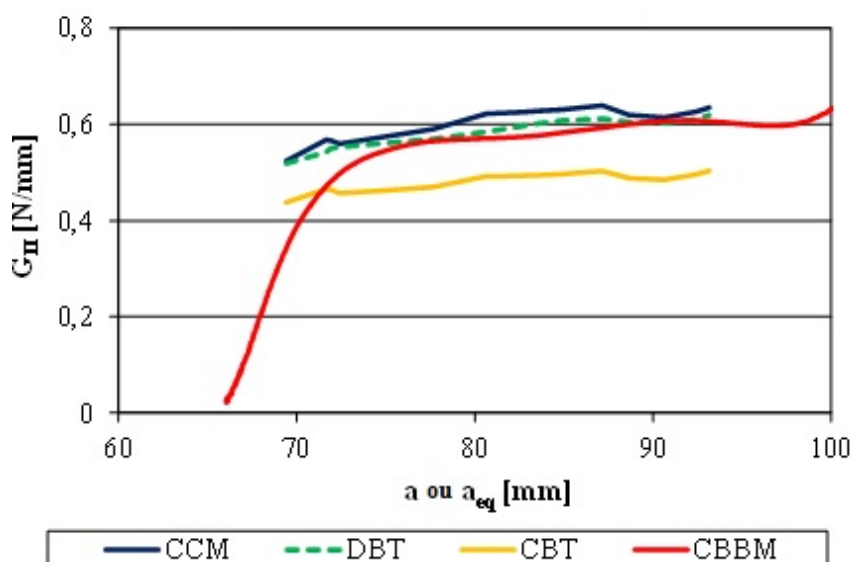


Figura 75 – Curvas- $R$  de um provete ENF com o adesivo Araldite® AV138 (Azevedo 2014)

Nas curvas- $R$  do adesivo Araldite® AV138 verificou-se o aumento de fenda a  $G_{II}$  aproximadamente constante para cada um dos métodos. Observou-se uma boa repetibilidade no valor de patamar de *Direct Beam Theory* (DBT), CCM e CBBM, à exceção do CBT, que subestima o valor de  $G_{IIc}$ . De salientar que a curva- $R$  do CBBM está deslocada para a direita porque o comprimento de fenda usado na representação da curva- $R$  é  $a_{eq}$  em vez de  $a$ , sendo  $a_{eq} = a + |\Delta| + \Delta_{aZPF}$  ( $\Delta_{aZPF}$  corresponde à contribuição da ZPF para  $a_{eq}$ ). Na Tabela 16 estão representados os valores de  $G_{IIc}$  (N/mm) dos sete ensaios válidos por todos os métodos, bem como a média e o desvio padrão de cada método.

Tabela 16 – Valores de  $G_{IIC}$  (em N/mm) pelos métodos convencionais para o Araldite® AV138  
(Azevedo 2014)

| Provete        | CCM   | DBT   | CBT   | CBBM  |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| 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 |

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

Verifica-se que, para os diferentes provetes, existe uma boa repetibilidade entre os valores obtidos, o que confirma a realização de provetes com condições idênticas e ajuda à veracidade dos resultados obtidos. As curvas seguem a mesma tendência, com acordo bastante bom entre os métodos CCM, DBT e CBBM, enquanto o CBT subestima  $G_{IIC}$  comparativamente aos restantes métodos. Considera-se o CBBM como valor de referência, devido ao facto de ser um método robusto e que traduz com precisão o valor de  $G_{IIC}$ . Em comparação com este, o CCM apresenta um valor inferior em 9,22%, o DBT em 1,94% e o CBT em 17,31%. Verifica-se que o CBT apresenta resultados substancialmente inferiores aos restantes.

O método direto, através do cálculo do integral- $J$ , permitiu obter os resultados de  $G_{IIC}$  que se seguem. O valor de  $\delta_s$  foi obtido com 5 s de intervalo para cada provete, através de uma sequência de extração de dados automáticos. No trabalho de Leitão (2015) obteve-se a curva exponencial da Figura 76. Utilizou-se um polinómio para ajuste da curva de  $\delta_s$ , que relaciona a evolução de  $\delta_s$  em função do tempo de ensaio [s], para remover o ruído observado nos dados experimentais. Neste adesivo em questão, o ruído é significativo devido ao facto de o Araldite® AV138 ser um adesivo frágil, o que se traduz em valores de  $\delta_s$  muito reduzidos. De notar que dependendo do ensaio foram adotados diferentes graus de polinómios (variando entre 2º e 6º grau) para cada provete, que foram escolhidos de forma a maximizar o valor de  $R$ . Na representação gráfica não se contabilizaram os dados a partir do início da fenda, já que esta informação não é relevante para estimar a lei coesiva. Para o provete

representado, o valor máximo obtido para  $\delta_s$  foi de 0,0623 mm para um período correspondente a 330 s (iniciação da fenda).

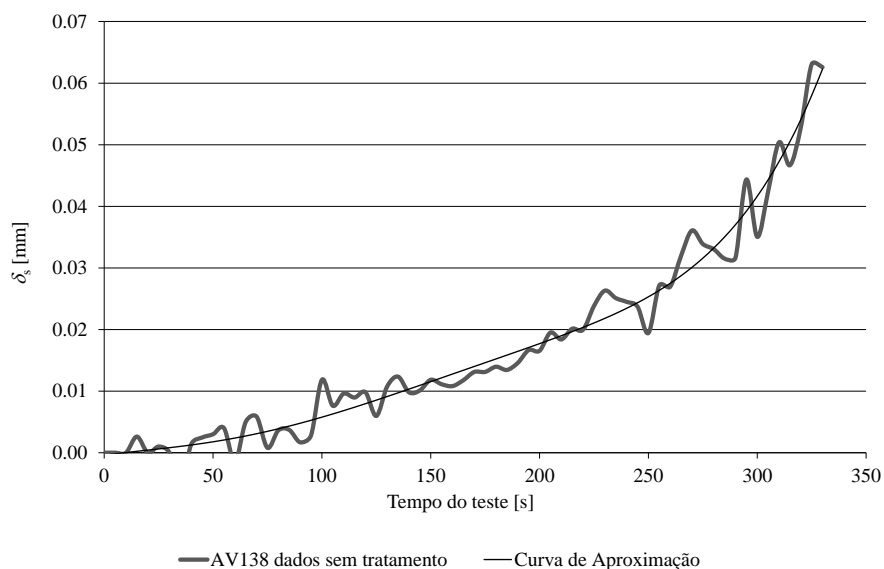


Figura 76 – Evolução de  $\delta_s$  no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® AV138: curva primitiva obtida a partir do método óptico e curva polinomial (Leitão 2015)

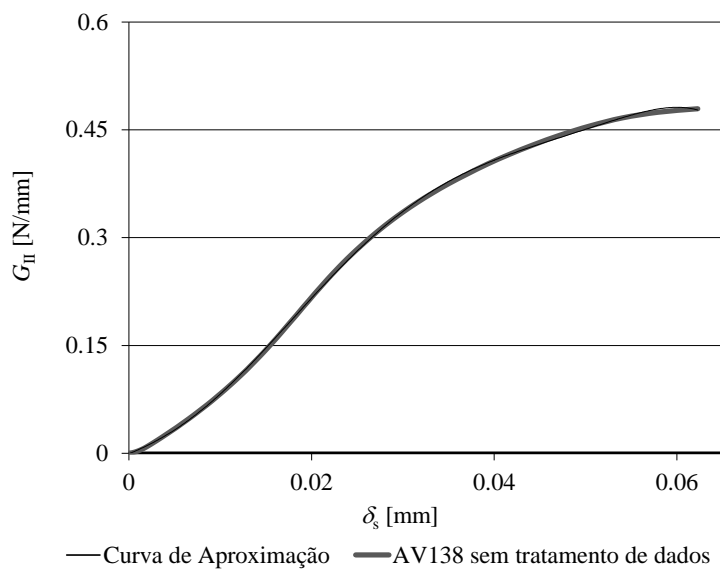


Figura 77 – Lei  $G_{II}$ - $\delta_s$  experimental no ensaio de um provete com adesivo Araldite® AV138 e ajuste de polinomial (Leitão 2015)

Na Figura 77 é dado um exemplo de curva  $G_{II}$ - $\delta_s$ , cuja forma coincide com os dados publicados na literatura (Campilho et al. 2011, Azevedo 2014). Tal como observado para o

ensaio DCB, no início do teste  $G_{II}$  aumenta muito lentamente, mas a sua taxa de crescimento aumenta rapidamente até que se atinge um valor estacionário de  $G_{II}$ . Como mencionado anteriormente, esta última fase corresponde ao início do crescimento da fenda e estimativa  $G_{IIc}$ . O método do integral- $J$  permitiu obter  $G_{IIc}$  sem grande disparidade valores entre os provetes deste adesivo, apresentando um valor médio de  $0,559 \pm 0,109$  N/mm. Os resultados são representados na Tabela 17, na medida que são analisados com maior detalhe no próximo capítulo.

### 3.3.2.1.2 Determinação da lei coesiva em corte

A Tabela 17 indica os valores relevantes das leis coesivas obtidas através da aplicação do integral- $J$ . Comparando o valor médio de  $G_{IIc}$  obtido pelo integral- $J$  (0,599 N/mm) com o do método CBBM, este apresenta um desvio percentual de 6,14 %. O desvio padrão percentual de  $G_{IIc}$  é de 30,4 % (integral- $J$ ). Como estamos perante um adesivo com um carácter frágil, na medida que torna este adesivo mais sensível quando solicitado, consideramos que os resultados obtidos pelo método direto são bastante semelhantes aos resultados obtidos pelos métodos tradicionais.

Tabela 17 – Parâmetros obtidos pelo método direto para as leis coesivas ao corte do Araldite® AV138

| Provete        | $t_s^0$ (MPa) | $G_{IIc}$ (N/mm) | $\Delta 2$ (mm) |
|----------------|---------------|------------------|-----------------|
| 1              | 14,69         | 0,550            | 0,030           |
| 2              | 17,75         | 0,790            | 0,025           |
| 3              | 17,01         | 0,740            | 0,025           |
| 4              |               | ANULADO          |                 |
| 5              | 15,43         | 0,570            | 0,020           |
| 6              | 15,36         | 0,530            | 0,020           |
| 7              | 15,23         | 0,520            | 0,020           |
| 8              | 13,97         | 0,490            | 0,025           |
| Média:         | 15,63         | 0,599            | 0,024           |
| Desvio Padrão: | 1,21          | 0,109            | 0,003           |

A Figura 78 apresenta uma curva  $t_s$ - $\delta$  experimental obtida pelo método direto e a representação das três leis coesivas analisadas no capítulo seguinte. Relativamente às curvas experimentais obtiveram-se os seguintes valores médios e desvios padrão para os parâmetros coesivos (entre parêntesis apresenta-se o desvio percentual): carga máxima em corte

$t_s^0=15,63\pm 1,21$  MPa (7,7%), deslocamento de carga máxima ao corte  $\delta_s^0=0,0167\pm 0,0016$  mm (9,6%) e deslocamento rotura ao corte  $\delta_s^f=0,0618\pm 0,0214$  mm (34,6%).

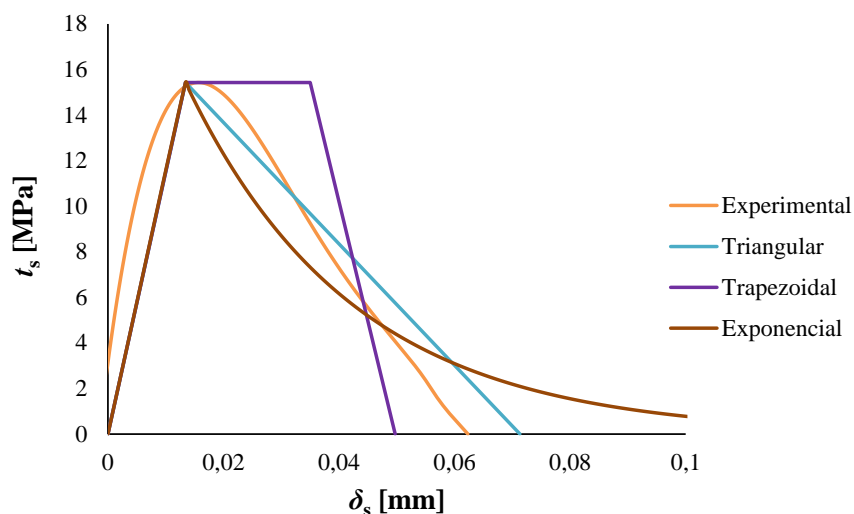


Figura 78 – Lei  $t_s$ - $\delta_s$  experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® AV138 e aproximação triangular, trapezoidal e exponencial

Relativamente às leis apresentadas na Figura 78 denota-se que à uma concordância entre as leis triangular e trapezoidal comparativamente à área da curva experimental. Enquanto a lei exponencial apresenta algumas diferenças relativamente à experimental.

### 3.3.2.2 Adesivo Araldite® 2015

Na Figura 79 estão apresentadas as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas para os oito provetes das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015. Consta-se uma grande repetibilidade dos ensaios realizados ao nível dos aspetos mais significativos, particularmente a rigidez elástica e o comportamento ao longo da propagação da fenda.

As curvas  $P$ - $\delta$  apresentadas revelam que se trata de um adesivo com um comportamento de alguma ductilidade, verificando-se uma rotura mais suave com valores de deslocamento por volta de 8,3 mm, e verifica-se aproximadamente o dobro do deslocamento de rotura comparando ao Araldite® AV138. O valor da carga máxima é ligeiramente superior ao dobro do Araldite® AV138.

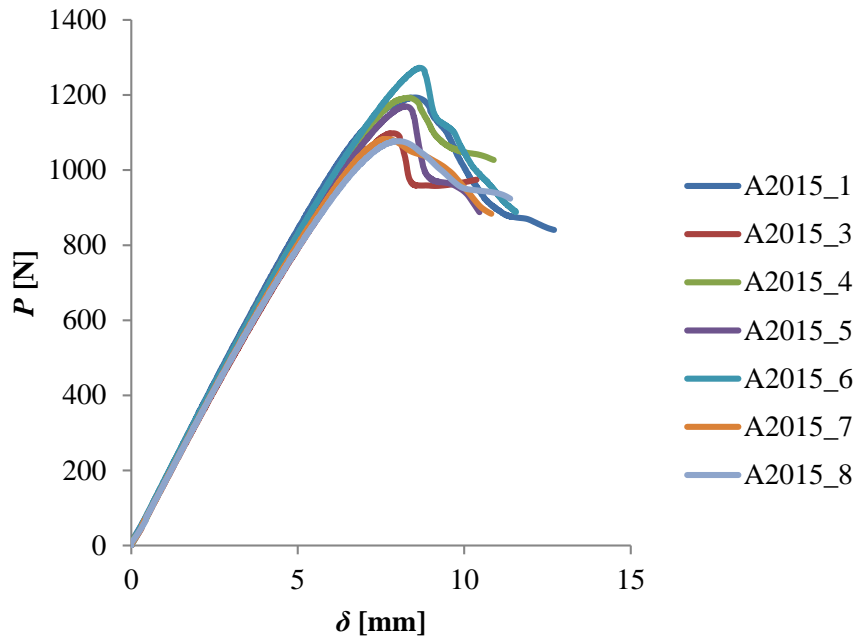


Figura 79 – Curvas  $P$ - $\delta$  do adesivo Araldite® 2015 (Azevedo 2014)

3.3.2.2.1 *Determinação do  $G_{IIc}$*

A Figura 80 apresenta as curvas- $R$  do ensaio escolhido para a representação da série de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015, pelos quatro métodos a considerar.

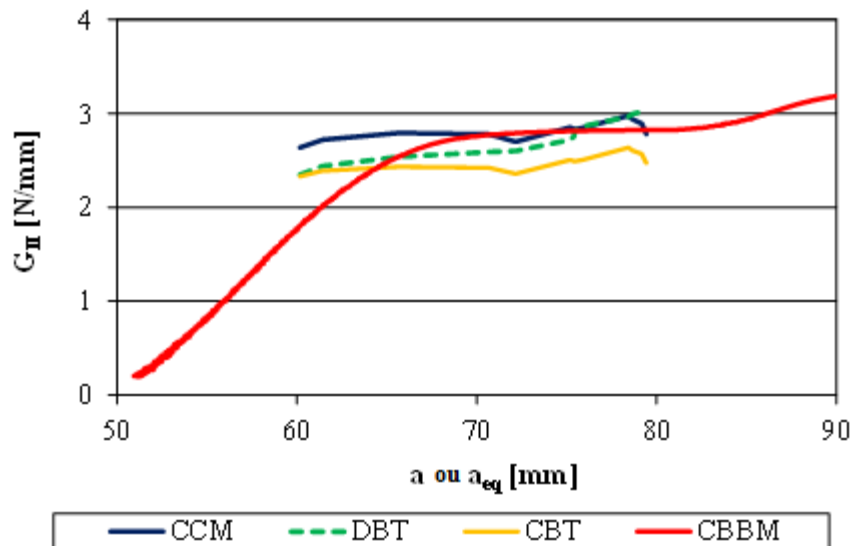


Figura 80 – Curvas- $R$  de um provete ENF com o adesivo Araldite® 2015 (Azevedo 2014)

Tal como tinha ocorrido com o adesivo Araldite® AV138, observou-se um patamar de evolução de  $G_{II}$  com  $a$  ou  $a_{eq}$  praticamente constante. No entanto, a extensão do patamar de medição de  $G_{IIc}$  é substancialmente inferior ao obtido para o Araldite® AV138, o que se deve à maior ductilidade do adesivo. Esta diferença faz com que a ZPF se estenda a um comprimento maior à frente da fenda, o que faz com que os efeitos compressivos do punção de carregamento se façam sentir antes do observado para o adesivo anterior. Observou-se uma boa repetibilidade no valor de patamar, exceto para o CBT. A Tabela 18 resume os valores de  $G_{IIc}$  (N/mm) dos sete ensaios válidos por todos os métodos, observando-se uma concordância entre as amostras razoavelmente boa.

Tabela 18 – Valores de  $G_{IIc}$  (em N/mm) pelos métodos convencionais para o do Araldite® 2015 (Azevedo 2014)

| <b>Provete</b> | <b>CCM</b> | <b>DBT</b> | <b>CBT</b> | <b>CBBM</b> |
|----------------|------------|------------|------------|-------------|
| 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      | 2,916      | 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       |

Verifica-se a existência de uma boa repetibilidade entre os valores obtidos para os vários provetes, o que comprova a realização de provetes com condições idênticas e ajuda à veracidade dos resultados obtidos. As curvas respeitantes a cada método seguem a mesma tendência, com um acordo bastante bom entre o DBT e o CBBM, enquanto o CBT subestima  $G_{IIc}$ . O CCM apresenta algumas oscilações, o que está relacionado com o ajuste do polinómio de  $C=f(a)$ . Utilizando o método CBBM como referência, verifica-se que o CCM expõe um valor superior em 4,92%, o DBT um valor inferior em 3,64% e o CBT um valor também inferior em 15,17%. De notar que o CBT apresenta resultados substancialmente inferiores aos restantes.

A Figura 81 mostra a evolução de  $\delta_s$  com o tempo de teste para um provete colado com o Araldite® 2015, mostrando um comportamento tipicamente exponencial. O valor de  $\delta_s$  obtido no início da propagação da fenda é de 0,340 mm para um tempo de teste de 378 s. O

valor de  $\delta_s$  superior ao obtido para o Araldite® AV138 (Figura 76) no início da propagação da fenda deve-se ao comportamento mais dúctil deste adesivo.

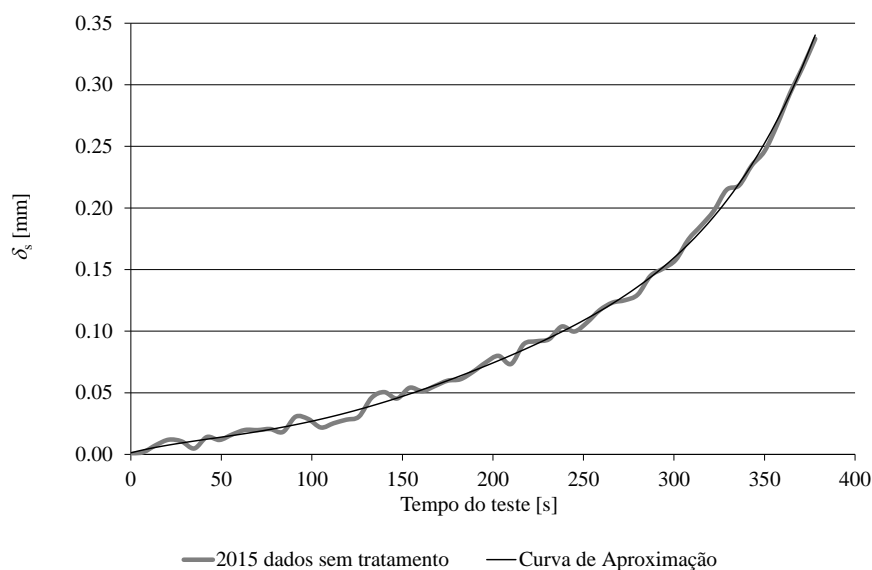


Figura 81 – Evolução de  $\delta_s$  no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® 2015: curva primitiva obtida a partir do método óptico e curva polinomial (Leitão 2015)

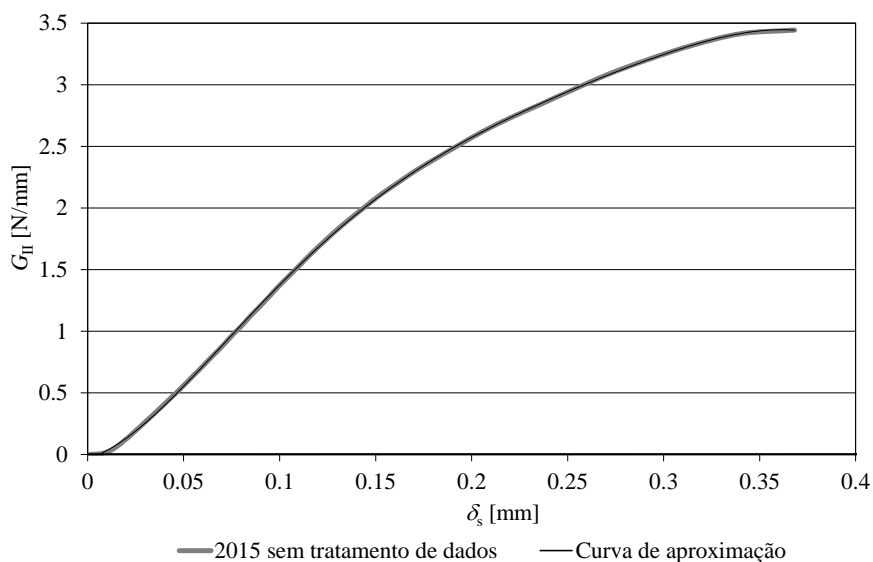


Figura 82 – Lei  $G_{II} - \delta_s$  experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® 2015 e ajuste de curva polinomial (Leitão 2015)

A Figura 82 apresenta a curva  $G_{II} - \delta_s$  de um provete. Comparando com o adesivo anterior, este apresenta um valor superior de  $\delta_s$  no início da propagação, pois se está perante um

adesivo dúctil, enquanto o Araldite® AV138 é um adesivo extremamente frágil. Para o provete representado na Figura 82 o valor de patamar obtido no início da propagação do dano, correspondente a  $G_{IIc}$ , foi de 3,44 N/mm. Relativamente à média e desvio padrão para o conjunto de provetes ensaiados obteve-se  $3,181 \pm 0,233$  N/mm. Em função destes valores o desvio percentual foi de 7,2%. Comparando com o método CBBM, verifica-se que o desvio percentual relativo à média é de 7,2%. Comparando o comportamento deste adesivo com o observado no Araldite® AV138 observa-se que o valor médio é superior em 431%, resultado representativo de um adesivo já com alguma ductilidade.

### 3.3.2.2 Determinação da lei coesiva em corte

A Tabela 19 apresenta os parâmetros obtidos para as leis coesivas do adesivo Araldite® 2015, obtidas pelo método direto. Para  $G_{IIc}$  registaram-se valores de  $3,181 \pm 0,233$  N/mm Estes valores correspondem a um desvio percentual de 7,2%. De uma maneira geral, constatou-se que as leis coesivas apresentaram uma boa repetibilidade e que a dispersão entre os provetes é aceitável e mostra alta correlação entre os diversos ensaios com o mesmo adesivo.

Tabela 19 – Parâmetros obtidos pelo método direto para as leis coesivas ao corte do adesivo Araldite® 2015

| Provete        | $t_s^0$ (MPa) | $G_{IIc}$ (N/mm) | $\Delta 2$ (mm) |
|----------------|---------------|------------------|-----------------|
| 1              | 16,783        | 3,444            | 0,080           |
| 2              | 15,831        | 3,585            | 0,090           |
| 3              | 15,554        | 2,873            | 0,070           |
| 4              | 14,881        | 3,298            | 0,090           |
| 5              | 15,497        | 3,123            | 0,070           |
| 6              | 14,482        | 3,140            | 0,120           |
| 7              | 15,351        | 3,080            | 0,090           |
| 8              | 15,762        | 2,901            | 0,090           |
| Média:         | 15,518        | 3,181            | 0,088           |
| Desvio Padrão: | 0,639         | 0,233            | 0,015           |

A Figura 83 mostra uma curva  $t_s$ - $\delta_s$  obtida pelo método direto para o adesivo Araldite® 2015. Os parâmetros coesivos foram os seguintes (média, desvio padrão, e desvio percentual em percentagem entre parêntesis): carga máxima em corte  $t_s^0=15,518 \pm 0,639$  MPa (4,1%), deslocamento de carga máxima ao corte  $\delta_s^0=0,0702 \pm 0,0122$  mm (17,40%) e deslocamento de rotura ao corte  $\delta_s^f=0,372 \pm 0,0246$  mm (6,6%).

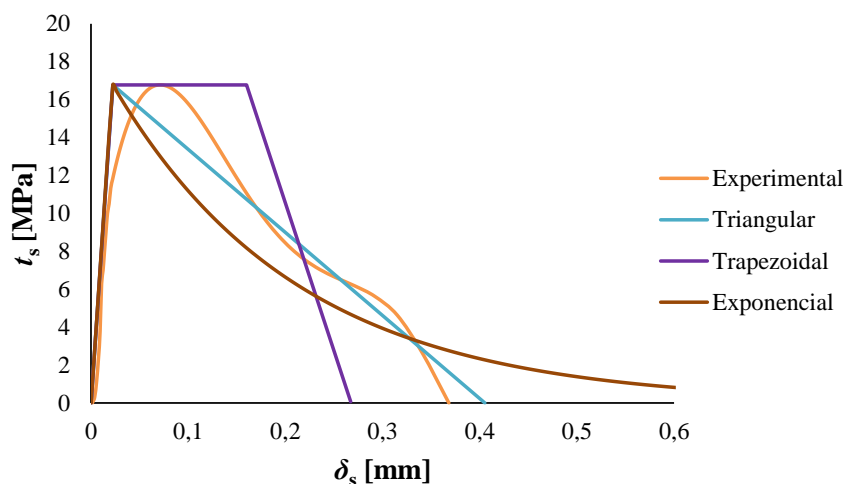


Figura 83 – Lei  $t_s$ - $\delta_s$  experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 e aproximação triangular, trapezoidal e exponencial

Em face das leis aproximadas expostas na Figura 83, em comparação com a lei experimental, observa-se o amaciamento na zona de pico da lei coesiva apenas é capturado pelo modelo trapezoidal. Por outro lado, a lei triangular e especialmente a exponencial registam um amaciamento excessivo na zona de início de plastificação, o que mostra que estas leis não são as mais adequadas para modelar este adesivo.

### 3.3.2.3 Adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752

A Figura 84 apresenta as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas para os sete provetes que foram considerados válidos das juntas coladas com o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752. Para estes ensaios, assim como observado nos casos anteriores, registou-se uma boa concordância entre as curvas  $P$ - $\delta$  dos vários provetes a nível de rigidez no domínio elástico, e valores de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$ . As curvas  $P$ - $\delta$  apresentadas pelo adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752 revelam que se trata de um adesivo com um comportamento dúctil, verificando-se uma rotura muito suavizada com valores de deslocamento aplicados de cerca de 14,4 mm, correspondentes a  $P_{\text{máx}}$ , obtendo-se um valor 3,4 vezes superior ao adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 e próximo de 1,6 vezes superior ao adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015. O valor de  $P_{\text{máx}}$  é ligeiramente superior ao dobro do apresentado pelo adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138, mas semelhante ao adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015.

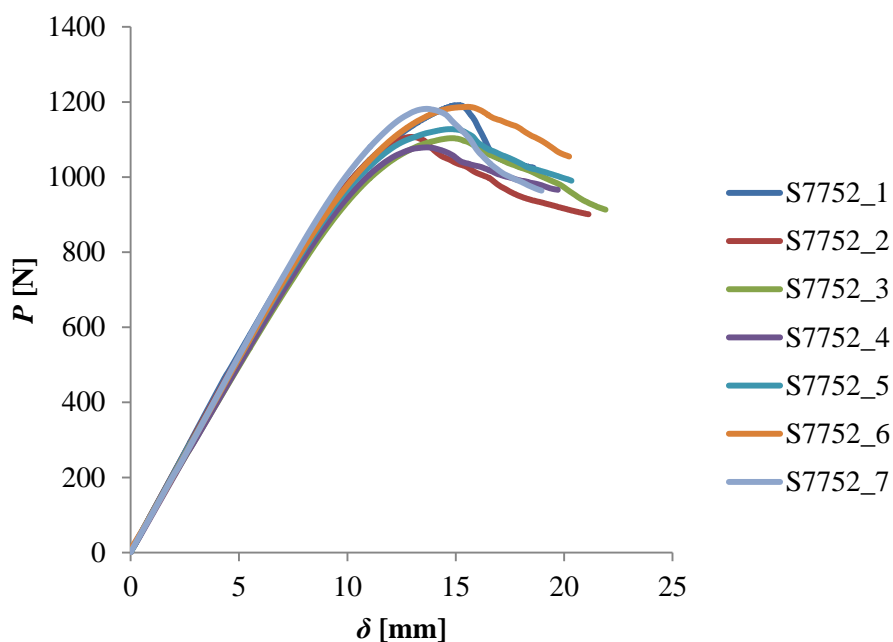


Figura 84 – Curvas  $P$ - $\delta$  do adesivo Sikaforce® 7752 (Azevedo 2014)

A partir dos ensaios com o adesivo Sikaforce® 7752 obteve-se, durante o ensaio, a aparente propagação da fenda medida pela rotura da camada de tinta branca que não correspondia à realidade. Isto ocorreu devido à uma grande ductilidade do adesivo, o que fez com que a camada de tinta quebrasse muito antes da propagação real da fenda. Como tal, para este adesivo, apenas se mediu  $G_{IIc}$  pelo método CBBM.

#### 3.3.2.3.1 Determinação do $G_{IIc}$

A Figura 85 mostra uma curva- $R$  obtida pelo método CBBM para um provete ENF colado com o adesivo Sikaforce® 7752, que é o único método que não necessita de medição de  $a$ . Apenas se apresenta esta curva, pois o adesivo revela um comportamento extremamente dúctil e, devido a este facto, a visualização da propagação da fenda não foi perceptível, acabando por estalar primeiramente a tinta corretora de auxílio da visualização, sem que a fenda se propagasse.

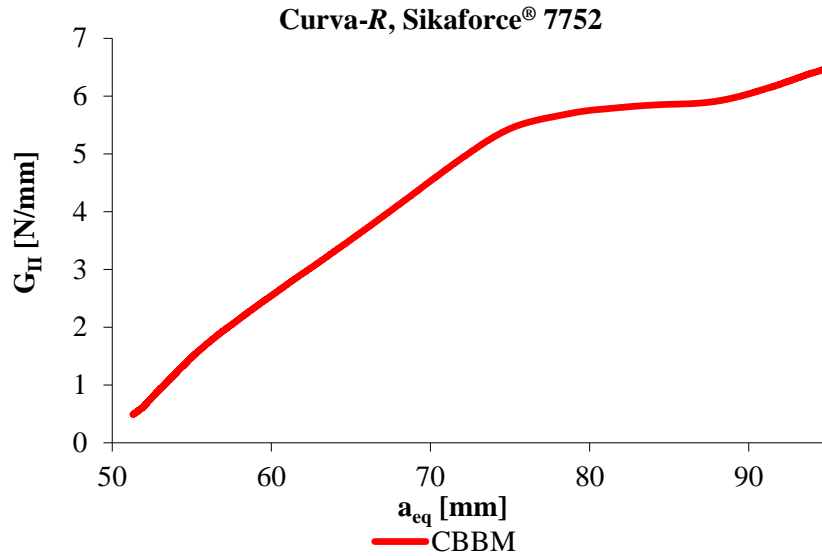


Figura 85 – Curva-R de um provete ENF com o adesivo Sikaforce® 7752 (Azevedo 2014)

Tabela 20 – Valores de  $G_{IIc}$  (em N/mm) pelo método convencional do Sikaforce® 7752 (Azevedo 2014)

| Provete        | CBBM  |
|----------------|-------|
| S7752_1        | 5,825 |
| S7752_2        | 5,877 |
| S7752_3        | 5,474 |
| S7752_4        | 4,813 |
| S7752_5        | 5,676 |
| S7752_6        | 5,648 |
| S7752_7        | 5,619 |
| S7752_8        | -     |
| Média:         | 5,562 |
| Desvio Padrão: | 0,356 |

Pode-se observar que a curva-R exibe um patamar de crescimento de fenda a  $G_{II}$  aproximadamente constante. Porém, este patamar tem uma extensão substancialmente inferior ao observado para os dois adesivos anteriormente referidos, pelo facto de este adesivo ter uma maior ductilidade. Mesmo assim, é claramente perceptível a existência de uma zona na qual é possível efetuar a medição de  $G_{IIc}$ . A Tabela 20 mostra os valores de  $G_{IIc}$  dos sete ensaios válidos pelo método CBBM, obtendo-se uma média de  $5,562 \pm 0,356$  N/mm, com um desvio percentual de 6,4%. Analisando estes resultados, verifica-se que a concordância entre as amostras é razoável, o que fica evidente pelo reduzido valor de desvio padrão dos ensaios.

A Figura 86 mostra a evolução de  $\delta_s$  com o tempo de teste para um provete colado com o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752. Para o provete representado, registou-se um valor máximo de  $\delta_s$  de 0,662 mm (início de propagação da fenda) para um tempo de ensaio de 435 s.

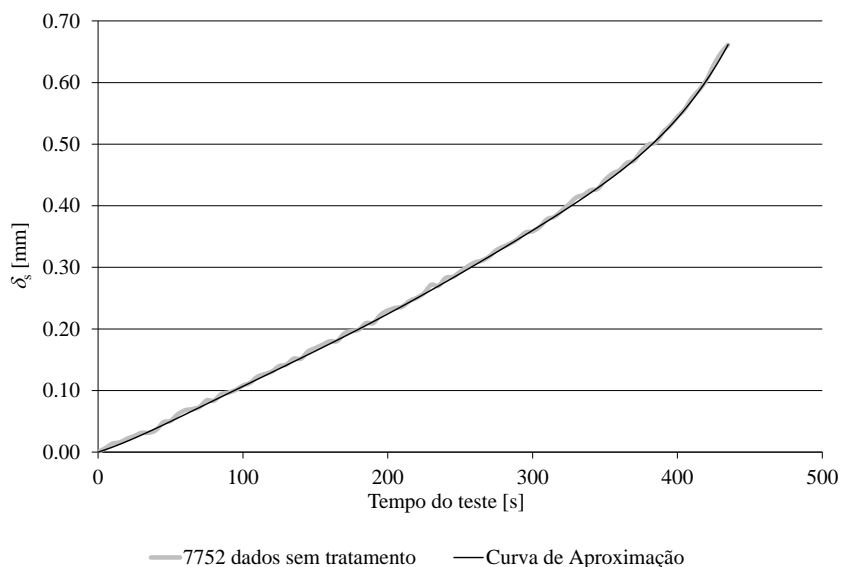


Figura 86 – Evolução de  $\delta_s$  no ensaio de um provete com o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752: curva primitiva obtida a partir do método ótico e curva polinomial (Leitão 2015)

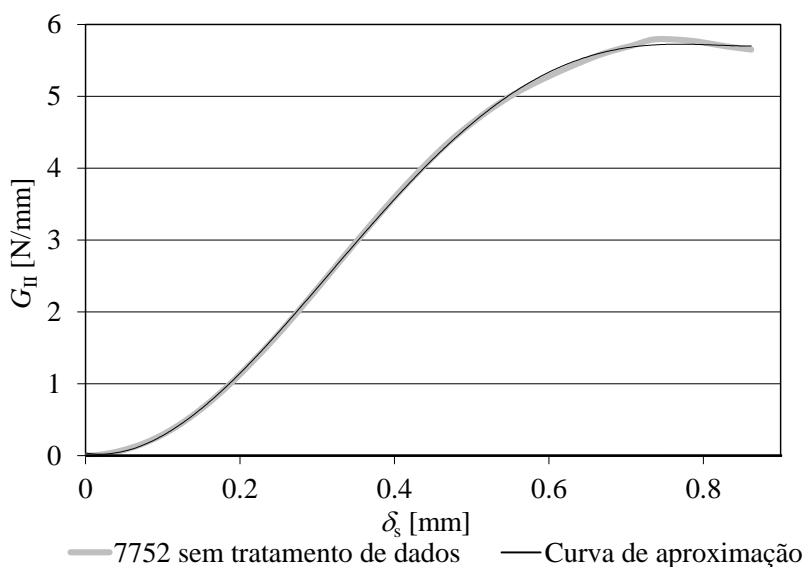


Figura 87 – Lei  $G_{II}$ - $\delta_s$  experimental no ensaio de um provete com o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752 e ajuste de curva polinomial (Leitão 2015)

Na Figura 87 é apresentada a curva  $G_{II}-\delta_s$  para um provete colado com o adesivo Sikaforce® 7752. Pelo integral- $J$ , obteve-se um valor de  $G_{IIc}$  de  $0,533\pm 0,112$  N/mm. Os valores obtidos através do integral- $J$  para a totalidade dos ensaios estão apresentados na Tabela 21. Efetuando a comparação entre valores médios do integral- $J$  e CBBM (Tabela 20), observa-se uma diferença percentual de 1,89%. A descrição detalhada dos valores obtidos para cada provete é apresentada no capítulo seguinte.

### 3.3.2.3.2 Determinação da lei coesiva em corte

Na Tabela 21 são expostos os parâmetros para as leis coesivas do Sikaforce® 7752, obtidos pelo método direto. Registrou um valor médio de  $t_s^0$  de  $11,731\pm 0,974$  MPa, para  $G_{IIc}$  registaram-se valores de  $5,631\pm 0,446$  N/mm e para  $\Delta 2$  valores de  $0,313\pm 0,033$  mm. Estes valores correspondem a um desvio percentual de 8,3%, 7,9% e 10,5%, pela mesma ordem. Apesar destes desvios apresentarem alguma significância, as leis coesivas apresentaram uma boa repetibilidade.

Tabela 21 – Parâmetros obtidos pelo método direto para as leis coesivas ao corte do adesivo Sikaforce® 7752

| Provete        | $t_s^0$ (MPa) | $G_{IIc}$ | $\Delta 2$ |
|----------------|---------------|-----------|------------|
| 1              | 10,284        | 6,100     | 0,300      |
| 2              | 12,646        | 4,950     | 0,300      |
| 3              | 10,919        | 6,050     | 0,300      |
| 4              | 11,776        | 5,360     | 0,300      |
| 5              | 10,501        | 5,750     | 0,400      |
| 6              | 12,152        | 5,030     | 0,300      |
| 7              | 12,569        | 5,650     | 0,300      |
| 8              | 13,000        | 6,160     | 0,300      |
| Média:         | 11,731        | 5,631     | 0,313      |
| Desvio Padrão: | 0,974         | 0,446     | 0,033      |

Na Figura 88 é apresentada uma curva  $t_s-\delta_s$  obtidas para o adesivo SikaForce® 7752. Pela lei experimental foram retirados os seguintes parâmetros coesivos apresentados com média e o desvio padrão (com o desvio percentual entre parenteses) foram os seguintes: deslocamento de carga máxima ao corte  $\delta_s^0=0,328\pm 0,0182$  mm (5,5%) e deslocamento de rotura ao corte  $\delta_s^f=0,781\pm 0,107$  mm (13,7%). Verifica-se que, comparando com o adesivo anterior, as curvas do adesivo SikaForce® 7752 apresentam valores menores relativamente a  $t_s^0$  e  $\delta_s^f$ , enquanto  $\delta_s^0$  é superior.

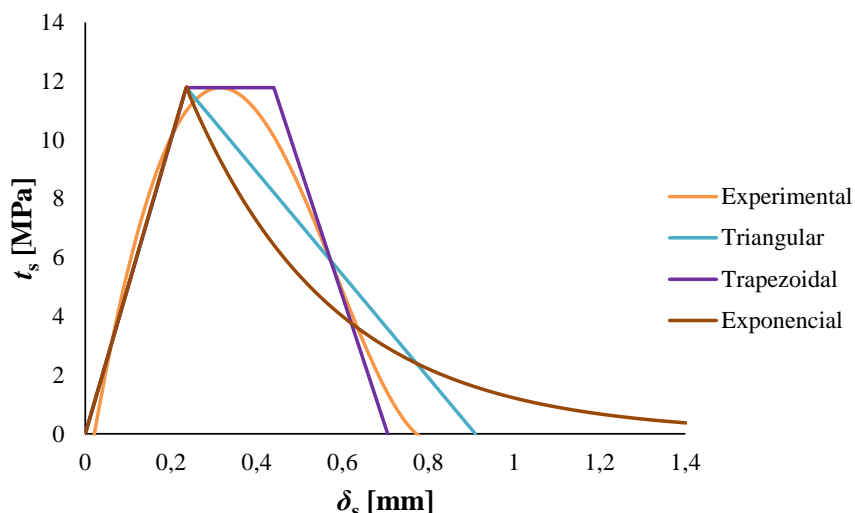


Figura 88 – Lei  $t_s$ - $\delta_s$  experimental no ensaio de um provete com o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752 e aproximação triangular, trapezoidal e exponencial

A lei coesiva trapezoidal para o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752 proposta e apresentada na Figura 88 é particularmente adequada, pois representa a ductilidade do adesivo de uma forma precisa, ao contrário de uma lei triangular e exponencial.

### 3.3.2.4 Análise e comparação dos resultados

Na Figura 89 observam-se os valores médios e o desvio padrão de  $G_{IIC}$ , pelos quatro métodos e para os três adesivos estudados.

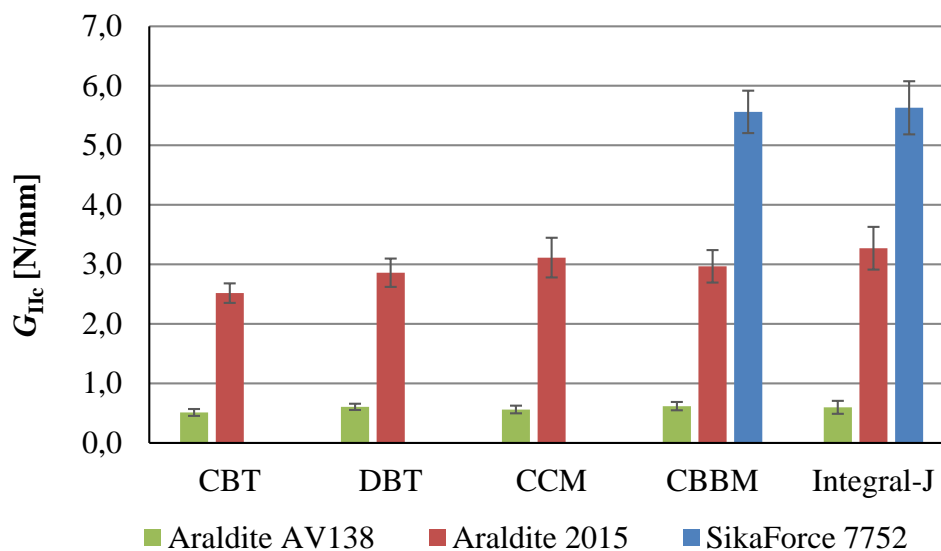


Figura 89 – Comparação dos valores de  $G_{IIC}$  dos adesivos ensaiados segundo os métodos utilizados, adaptado de (Azevedo 2014, Leitão 2015)

Destes resultados verifica-se que o Sikaforce® 7752 é sem dúvida o mais dúctil ao corte, sendo o Araldite® AV138 o mais frágil. Existe uma boa concordância entre os diferentes métodos (tradicional e integral-*J*) para cada adesivo. O adesivo Sikaforce® 7752 é obviamente o que apresenta resultados mais elevados de  $G_{IIc}$ , sendo desta forma o adesivo com maior ductilidade ao corte. Também apresenta os maiores valores de desvio padrão. Por sua vez, o adesivo Araldite® AV138 é claramente o adesivo mais frágil ao corte, apresentando os valores de  $G_{IIc}$  mais baixos. O adesivo Araldite® 2015 apresenta um resultado intermédio relativamente aos outros dois adesivos.

### 3.4 Análise do comportamento das juntas

Como é conhecido, as propriedades dos adesivos influenciam significativamente a resistência da junta. Porém, um adesivo mais resistente não significa que a resistência da junta será superior. De facto, um adesivo resistente mas frágil atinge localmente nos bordos da junta adesiva uma tensão elevada, mas não permite a redistribuição do esforço para o interior desta. Nestes casos, a tensão de corte média de rotura é muito baixa, sendo este o comportamento expectável do Araldite® AV138. Por outro lado, os adesivos com elevada ductilidade e de baixo módulo têm normalmente uma baixa resistência. No entanto, eles têm a capacidade de distribuir as tensões de uma forma mais uniforme ao longo da junta e devido à baixa rigidez, por deformação plástica tornando assim as juntas mais resistentes do que com os adesivos mais resistentes e frágeis (Henkel 2011). Ajusta-se nesta categoria o Araldite® 2015, que apresenta uma ductilidade moderada para adesivos estruturais e uma resistência à tração e corte inferiores ao Araldite® AV138.

Na Figura 90 observa-se que, para adesivos frágeis, com uma curva típica  $\sigma$ - $\varepsilon$  como indicado em (a), a rotura dá-se quando as tensões máximas nas extremidades da sobreposição alcançam os valores limite do adesivo (b). Em adesivos dúcteis, com uma curva típica de  $\sigma$ - $\varepsilon$  como apresentado em (c), a rotura tem lugar após plastificação do adesivo nas extremidades da sobreposição e aumento das tensões de corte na região intermédia (d), o que leva a uma tensão de corte média e a uma resistência global das juntas superiores.

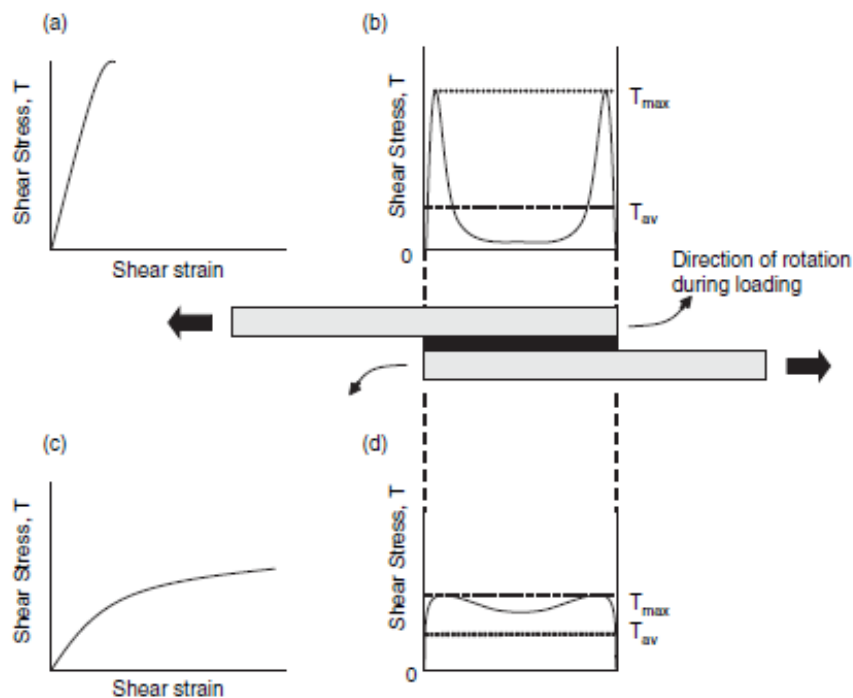


Figura 90 – Distribuição da tensão de corte em adesivos frágeis e dúcteis (Troughton 2008)

O Sikaforce® 7752 tem uma resistência inferior aos restantes dois adesivos, mas apresenta uma grande ductilidade. Como tal, é um adesivo que permite uma maior redistribuição de tensões na camada de adesivo depois do seu limite elástico ser alcançado. Para comprimentos de sobreposição reduzidos prevê-se uma resistência de junta inferior aos restantes dois adesivos, mas um melhor comportamento para os comprimentos de sobreposição mais elevados, para os quais a tenacidade tem um papel preponderante na resistência.

A resistência à fadiga de juntas coladas é tipicamente menor para adesivos frágeis. Esta diferença é explicada através da distribuição de tensões no adesivo mais uniformes e maior energia de amortecimento das juntas coladas com adesivos dúcteis (Petrie 2000). Os adesivos frágeis são muito sensíveis a defeitos, tais como espaços vazios e microfissuras (da Silva e Figueiredo 2006). Os adesivos dúcteis têm uma maior capacidade para suportar esforços de clivagem e de arrancamento, daí serem recomendados para unir chapas finas (ECSS 2011).

# 4 Trabalho numérico

Neste capítulo é abordada a análise numérica pelo MEF, utilizando o *software* de simulação Abaqus®. São inicialmente abordadas as condições de análise impostas, assim como descritas as malhas e as leis coesivas utilizadas (lei triangular, lei trapezoidal e lei exponencial). Como resultado da análise numérica, definiu-se qual a forma da lei coesiva mais adequada para modelar o comportamento de cada adesivo sujeito a uma solitação de corte. Foi também realizada uma análise de sensibilidade aos parâmetros coesivos  $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ , no sentido de averiguar o efeito da sua variação nas curvas  $P$ - $\delta$  respetivas, para cada um dos adesivos estudados.

## 4.1 Condições da análise numérica

A análise numérica nos dois tipos de provetes, DCB e ENF, foi levada a cabo no *software* Abaqus®, que possui um módulo integrado de MDC para prever o comportamento das juntas. Os modelos numéricos foram construídos individualmente para cada provete em função das dimensões medidas na Tabela 8 (ensaios DCB) e Tabela 15 (ensaios ENF). Considerou-se uma modelação dos provetes em 2D, e em estado plano de deformação, visto ser a condição mais adequada para a geometria em análise, nomeadamente a largura considerável da junta. Os aderentes de alumínio foram modelados por elementos contínuos como um material isotrópico de comportamento elástico-plástico com a lei  $\sigma$ - $\varepsilon$  da Figura 29. Para os elementos MDC utilizados para representar a camada de adesivo, apenas foi considerado um elemento na direção da espessura de adesivo. Na simulação de rotura por MDC foram consideradas malhas bastante refinadas, que permitem modelar com precisão suficiente o estado de tensão na região coesiva durante a propagação do dano. Na preparação numérica dos provetes configurou-se as propriedades dos materiais e das ligações de contacto de modo a garantir que os resultados obtidos, fruto das simulações numéricas, sejam devidamente credíveis mas

ao mesmo tempo não exijam demasiados recursos do simulador, daí ser importante a variação do número de elementos e a utilização do efeito *bias* na malha para diminuir o esforço computacional, permitindo assim reduzir o tempo de obtenção dos resultados, mas sem comprometer a precisão dos resultados nas zonas com grandes variações de tensões. Como se pode verificar na Figura 91, a malha dos provetes DCB apresenta maior refinamento na zona do adesivo e, nos aderentes, na proximidade da face inferior (adjacente à camada de adesivo), provocando uma variação da dimensão da malha e garantindo assim o maior refinamento nas zonas onde se esperam maiores gradientes de tensão (Campilho et al. 2013).



Figura 91 – Malha do provete DCB

Na Figura 92, que representa um detalhe da malha de MEF na extremidade da pré-fenda, é evidente a variação do tamanho de elementos referida anteriormente. A camada de adesivo ilustrada a vermelho é constituída de elementos de 1 mm por 1 mm, apresentando os elementos de alumínio adjacentes ao adesivo também o mesmo tamanho de elemento. Utilizou-se um efeito de gradação do tamanho da malha (efeito *bias*) na direção da espessura dos aderentes a partir da camada de adesivo até às superfícies superior e inferior, e horizontalmente nos aderentes desde a extremidade livre do provete até à zona da pré-fenda. As condições fronteira para os modelos DCB consistiram na fixação no plano de um nó do aderente inferior na extremidade esquerda do provete (na zona da pré-fenda) e na restrição horizontal e deslocamento vertical ascendente num nó da mesma extremidade do provete mas no aderente superior.

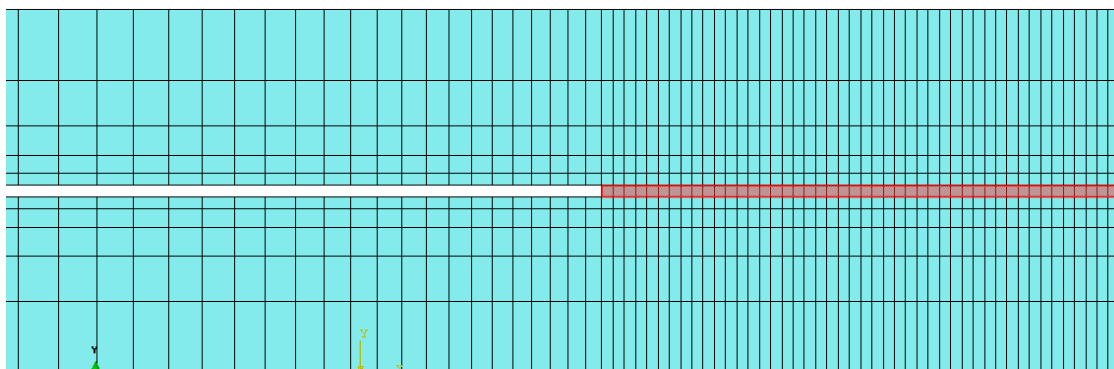


Figura 92 – Refinamento da malha do provete DCB na extremidade da pré-fenda

A Figura 93 mostra um exemplo de malha de provete ENF, onde é apresentada uma visão global da malha e as zonas mais refinadas, correspondendo estas aos pontos de apoios e carregamento pelos punções circulares, e também à zona útil de propagação da fenda (desde o início da camada de adesivo até ao punção intermédio de solicitação). Os elementos na camada de adesivo possuem dimensões de  $0,2 \times 0,2 \text{ mm}^2$ , utilizando elementos quadrangulares com aresta de comprimento igual à espessura de adesivo. Na zona do substrato em contacto com a camada de adesivo também se usaram elementos de dimensões idênticas.



Figura 93 – Malha do provete ENF

Na zona correspondente à pré-fenda, a malha não é tão refinada no sentido do comprimento do provete, já que esta zona não será sujeita a grandes gradientes de tensões. Na direção da espessura, foi utilizada uma gradação do tamanho dos elementos (efeito *bias*), com maior refinamento no sentido da proximidade do adesivo, devido à necessidade de modelar com maior precisão a zona da ligação adesiva, e também nas faces horizontais exteriores dos aderentes, para maior precisão das condições de contato entre os cilindros de suporte e carregamento com os aderentes. Na Figura 94 são visíveis as zonas mais refinadas do contacto dos cilindros de suporte e carregamento com o provete. Assim, foram utilizados elementos de malha com 0,05 mm de lado na zona que durante análise faz o respetivo contato com o cilindro. No contato do provete com o cilindro de carregamento, a malha do provete representa um refinamento idêntico ao descrito anteriormente, com exceção de a malha ser mais grosseira na zona de propagação de dano à direita do cilindro de solicitação, uma vez que esta região já excede os limites de análise do ensaio ENF.

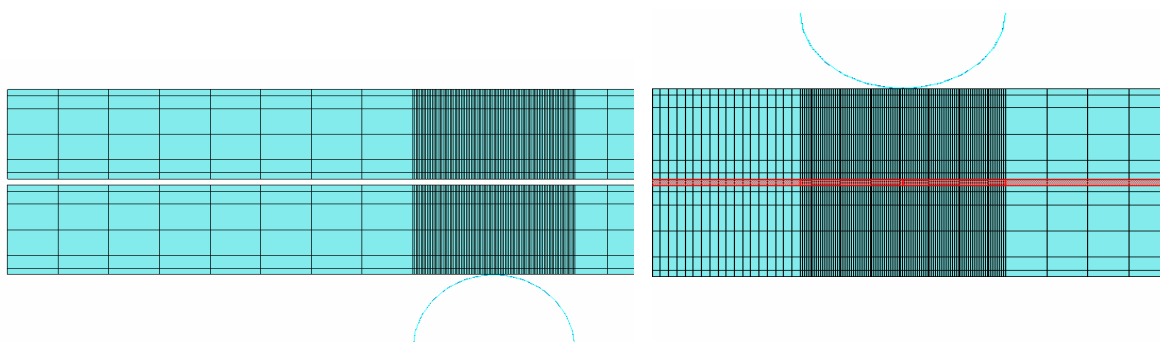


Figura 94 – Refinamento da malha ENF

Relativamente às condições de fronteira dos modelos ENF, a modelação foi preparada sempre com o intuito de aplicar as condições reais dos ensaios experimentais. Desta forma, os cilindros de suporte foram restringidos nas duas direções do plano e na rotação, o cilindro de carregamento foi restringido na direção horizontal e aplicou-se um deslocamento vertical com sentido descendente, e restringiu-se também um nó a meio do comprimento do provete na direção horizontal para evitar o seu deslocamento horizontal. Foi também necessário introduzir condições de contato entre cada um dos três cilindros e o provete, e também entre os dois substratos na zona da pré-fenda, para assim garantir o deslizamento sem atrito. Foi utilizada uma formulação com pequeno deslizamento do tipo *surface to surface*. Considerou-se um comportamento tangencial sem fricção e um comportamento normal do tipo *hard contact*.

## 4.2 Modelos de dano coesivo

Os MDC baseiam-se numa relação entre as tensões e deslocamentos relativos (tração ou corte) que ligam nós homólogos de elementos coesivos para assim simular o comportamento elástico até à resistência máxima ( $t_n^0$  em tração ou  $t_s^0$  em corte) e subsequentemente a degradação das propriedades dos materiais até à rotura (Turon et al. 2007). Neste trabalho consideraram-se leis triangulares, trapezoidais e exponenciais para reproduzir o comportamento à tração e ao corte da camada adesiva. Na Figura 95 estão representadas esquematicamente estas três formas de leis coesivas, com respetiva nomenclatura para as leis de tração e corte.

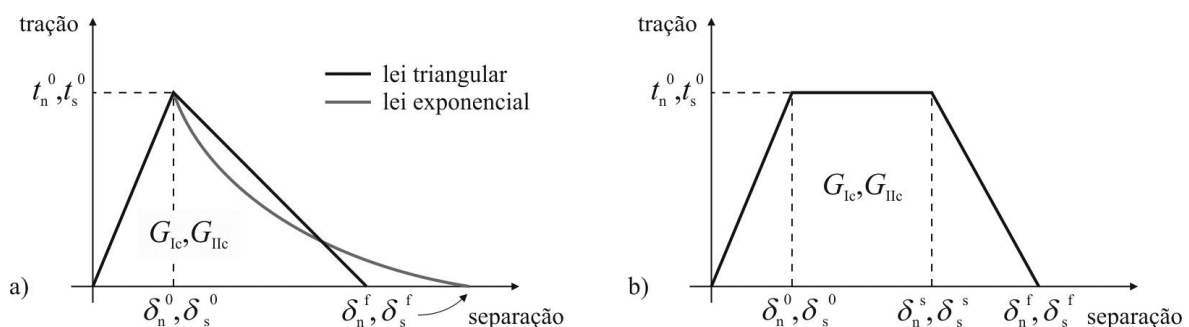


Figura 95 – Leis coesivas triangular e exponencial (a) e trapezoidal (b) (da Silva e Campilho 2011)

A formulação que se apresenta de seguida é válida para ambos os modos puros de carregamento, ou seja, tração e corte. Como pode ser visualizado na Figura 95 a), a lei exponencial é linear até  $t_n^0$  ou  $t_s^0$  e, a partir deste ponto, ocorre um amaciamento exponencial

até à rotura total. Esta forma de lei coesiva é uma aproximação da lei exponencial completa (Chandra et al. 2002). Utilizando esta aproximação, observa-se que a queda da tensão coesiva após a carga de pico é mais abrupta do que na lei triangular. Os valores de  $G_I$  e  $G_{II}$  são as áreas sob as leis do MDC em tração ou corte, respetivamente. Nas leis coesivas apresentadas, o comportamento elástico linear inicial é definido por uma matriz que relaciona trações normais e de corte da seguinte forma

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (11)$$

onde  $\varepsilon_n$  e  $\varepsilon_s$  são a deformação normal e de corte, pela mesma ordem. A matriz  $\mathbf{K}$ , representada na equação (11), apresenta os parâmetros de rigidez do adesivo. Segundo Campilho et al. (2011), a aproximação mais adequada para camada finas de adesivo consiste em fazer  $K_{nn}=E$ ,  $K_{ss}=G$  e  $K_{ns}=0$ , em que  $G$  o módulo de elasticidades transversal. As fases de amaciamento das leis MDC são definidas pelo *software* Abaqus<sup>®</sup> pela especificação da variável de dano ( $d_n$  para tração e  $d_s$  para corte), definida em função de  $\delta_n - \delta_n^0$  (tração) ou  $\delta_s - \delta_s^0$  (corte), ou seja, em função do deslocamento efetivo após a iniciação do dano ( $\delta_n^0$  e  $\delta_s^0$  representam o deslocamento correspondente a  $t_n^0$  e  $t_s^0$ , respetivamente). Esta formulação é descrita nas expressões seguintes, enquanto a Figura 96 permite visualizar o significado de  $d_n$  para a lei triangular, que pode ser extrapolado para o cálculo de  $d_s$  (Abaqus<sup>®</sup> 2013).  $t_n$  e  $t_s$  são definidos como

$$\begin{aligned} t_n &= (1 - d_n) t_n^{\text{und}} \\ t_s &= (1 - d_s) t_s^{\text{und}} \end{aligned} \quad (12)$$

onde  $t_n^{\text{und}}$  e  $t_s^{\text{und}}$  são os valores de tensão coesiva de tração e corte, respetivamente, sem degradação da rigidez. Nesta expressão, tem-se  $d_{n,s}=0$  para um material não danificado (na região elástica) e  $d_{n,s}=1$  para um material totalmente danificado.

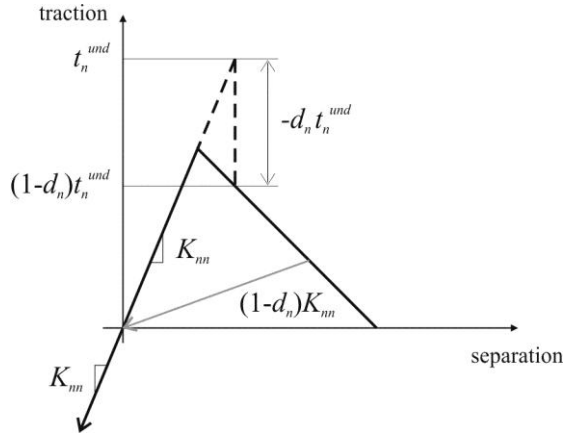


Figura 96 – Definição da variável de dano em tração,  $d_n$ , no Abaqus® (que pode ser extrapolada para  $d_s$ ).

Tendo como base estes pressupostos, a expressão genérica (em tração ou corte) de  $d_{n,s}$  para a lei triangular assume a forma (Abaqus® 2013)

$$d_{n,s} = \frac{\delta_{n,s}^f (\delta_{n,s} - \delta_{n,s}^0)}{\delta_{n,s} (\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^0)} \quad (13)$$

Para a lei exponencial, a expressão de  $d_{n,s}$  é (Abaqus® 2013)

$$d_{n,s} = 1 - \frac{\delta_{n,s}^0}{\delta_{n,s}} \left( 1 - \frac{1 - e^{-\alpha \left( \frac{\delta_{n,s} - \delta_{n,s}^0}{\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^0} \right)}}{1 - e^{-\alpha}} \right) \quad (14)$$

onde  $\alpha$  é um parâmetro adimensional definido em função do material, que estabelece a taxa de evolução do dano com  $t_{n,s}$  (obtem-se um lei triangular fazendo  $\alpha=0$ ). Neste trabalho considerou-se  $\alpha=7$  para proporcionar uma diferença significativa entre as leis triangular e exponencial, através de uma rápida degradação depois de atingido  $t_{n,s}^0$ . O valor de  $d_{n,s}$  é dividido na região de tensão constante ( $\delta_{n,s}^0 < \delta \leq \delta_{n,s}^s$ ; Figura 95) e na região de amaciamento ( $\delta_{n,s}^s < \delta \leq \delta_{n,s}^f$ ; Figura 95), como seguidamente se apresenta (Abaqus® 2013)

$$\left| \begin{array}{ll} d_{n,s} = 1 - \frac{\delta_{n,s}^0}{\delta_{n,s}} & \text{se } \delta_{n,s}^0 < \delta \leq \delta_{n,s}^s \\ d_{n,s} = 1 - \frac{m\delta_{n,s} + b}{K_{nn,ss} \delta_{n,s}} & \text{se } \delta_{n,s}^s < \delta \leq \delta_{n,s}^f \end{array} \right. \quad (15)$$

Os valores de  $m$  e  $b$  referem-se aos parâmetros da reta de decréscimo de  $t_{n,s}$  desde o fim do patamar até à rotura relativamente à origem da lei coesiva, e são dados por (Abaqus® 2013)

$$m = \frac{-t_{n,s}^0}{\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^s} \quad ; \quad b = t_{n,s}^0 - m\delta_{n,s}^s. \quad (16)$$

Os valores de  $\delta_{n,s}^f$  são obtidos considerando que a área abaixo da lei coesiva correspondente é igual a  $G_{n,s}^c$ . Por outro lado, podem ser utilizadas várias técnicas para definir  $\delta_{n,s}^s$  (lei trapezoidal), tais como razões pré-estabelecidas entre  $\delta_{n,s}^s$  e  $\delta_{n,s}^f$  (Yang et al. 1999), a utilização de dados experimentais de deformação de rotura (Campilho et al. 2008), ou uma inclinação pré-estabelecida da reta de degradação até  $\delta_{n,s}^f$  (por exemplo, inclinação idêntica entre as leis MDC de tração e de corte) (Carlberger e Stigh 2007). Neste trabalho, foi adotada a primeira abordagem, considerando  $\delta_{n,s}^s/\delta_{n,s}^f=0,7$ .

### 4.3 Validação das leis coesivas obtidas

A validação das leis coesivas triangular, trapezoidal e exponencial para a modelação da camada de cada adesivo em tração e corte consiste na comparação das curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais, nomeadamente no que concerne aos valores de  $P_{\text{máx}}$ , rigidez inicial e comportamento durante a propagação da fenda. Cada ensaio realizado (DCB ou ENF) foi modelado individualmente pela consideração das dimensões medidas do provete respetivo. Deste modo são expostos os resultados dos dois tipos de juntas estudadas, DCB e ENF, para os três tipos de adesivos e em função dos MDC abordados.

#### 4.3.1 Ensaios DCB

##### 4.3.1.1 Araldite® AV138

As curvas  $P-\delta$  obtidas numericamente para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 com os três tipos de leis coesivas, que podem ser observadas na Figura 97 para um provete representativo dos ensaios com este adesivo, apresentam uma boa aproximação aos resultados experimentais. De facto, todas as leis apresentam uma rigidez inicial semelhante ao valor experimental, ou seja, desde o início da aplicação da carga até ao início de propagação do dano. Contudo, a lei exponencial apresenta uma quebra de rigidez pouco

antes de ser atingido  $P_{\text{máx}}$ . Este comportamento deve-se ao facto de, na lei coesiva exponencial, ocorrer uma degradação muito significativa de  $t_n$  imediatamente a seguir a ser atingido o valor de  $t_n^0$ . As outras duas leis, triangular e trapezoidal, apresentam valores numéricos de  $P_{\text{máx}}$  bastante próximos do correspondente valor experimental, o que também se observou para os restantes provetes. O comportamento durante a fase de propagação foi idêntico para os três tipos de leis coesivas, o que se justifica pelo facto de a propagação do dano em ensaios DCB ser governada por  $G_{Ic}$ , enquanto a forma precisa da lei coesiva não apresenta influência visível (Constante et al. 2015).

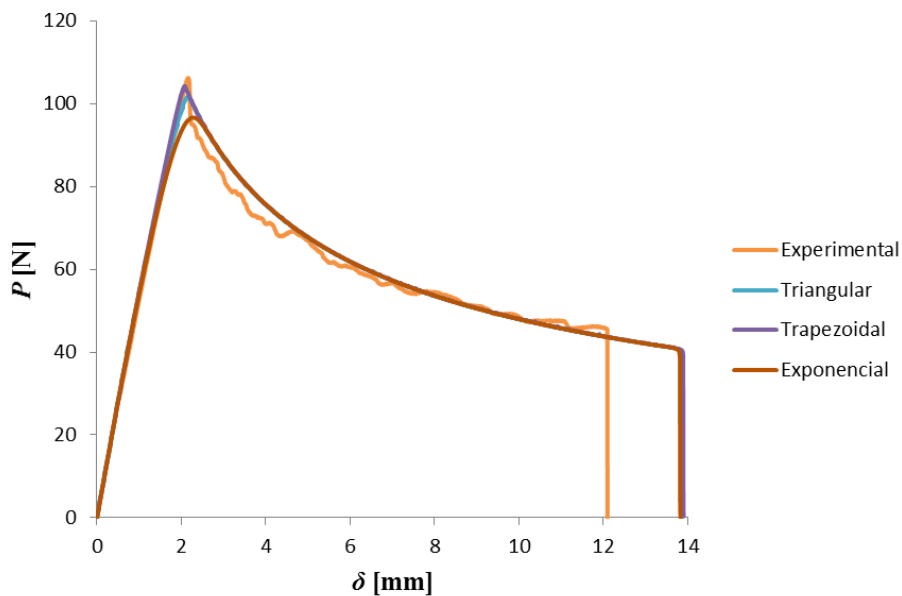


Figura 97 – Curvas  $P$ - $\delta$  de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete DCB

Na Tabela 22 são apresentados os resultados de  $P_{\text{máx}}$  e o respetivo  $\delta P_{\text{máx}}$  para cada provete ensaiado experimentalmente e respetiva comparação com a simulação numérica, em função de cada um dos três MDC.

Tabela 22 – Erros de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$  do adesivo Araldite® AV138 em provete DCB

| <b>LEI TRIANGULAR</b>  |                      |          |        |                              |          |        |
|------------------------|----------------------|----------|--------|------------------------------|----------|--------|
| Provete                | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|                        | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1                      | 101,566              | 95,613   | -5,86  | 1,965                        | 2,109    | 7,36   |
| 2                      | 106,192              | 101,800  | -4,14  | 2,161                        | 2,157    | -0,19  |
| 3                      | 105,190              | 96,536   | -8,23  | 2,110                        | 2,134    | 1,17   |
| 4                      | 108,051              | 98,409   | -8,92  | 2,323                        | 2,293    | -1,29  |
| 5                      | 107,193              | 94,753   | -11,60 | 2,198                        | 2,322    | 5,64   |
| 6                      | 90,933               | 84,212   | -7,39  | 2,111                        | 2,113    | 0,10   |
| Média:                 |                      |          | 7,69   | Média:                       |          | 2,62   |
| Desvio padrão:         |                      |          | 2,35   | Desvio padrão:               |          | 3,21   |
| <b>LEI TRAPEZOIDAL</b> |                      |          |        |                              |          |        |
| Provete                | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|                        | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1                      | 101,566              | 99,202   | -2,33  | 1,965                        | 1,974    | 0,49   |
| 2                      | 106,192              | 104,206  | -1,87  | 2,161                        | 2,073    | -4,10  |
| 3                      | 105,190              | 99,237   | -5,66  | 2,110                        | 2,030    | -3,79  |
| 4                      | 108,051              | 102,476  | -5,16  | 2,323                        | 2,129    | -8,34  |
| 5                      | 107,193              | 99,422   | -7,25  | 2,198                        | 2,128    | -3,16  |
| 6                      | 90,933               | 87,280   | -4,02  | 2,111                        | 1,967    | -6,84  |
| Média:                 |                      |          | 4,38   | Média:                       |          | 4,45   |
| Desvio padrão:         |                      |          | 1,88   | Desvio padrão:               |          | 2,81   |
| <b>LEI EXPONENCIAL</b> |                      |          |        |                              |          |        |
| Provete                | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|                        | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1                      | 101,566              | 89,466   | -11,91 | 1,965                        | 2,261    | 15,09  |
| 2                      | 106,192              | 96,608   | -9,03  | 2,161                        | 2,263    | 4,70   |
| 3                      | 105,190              | 90,549   | -13,92 | 2,110                        | 2,260    | 7,12   |
| 4                      | 108,051              | 91,601   | -15,22 | 2,323                        | 2,434    | 4,76   |
| 5                      | 107,193              | 88,054   | -17,85 | 2,198                        | 2,457    | 11,80  |
| 6                      | 90,933               | 78,781   | -13,36 | 2,111                        | 2,239    | 6,04   |
| Média:                 |                      |          | 13,55  | Média:                       |          | 8,25   |
| Desvio padrão:         |                      |          | 2,73   | Desvio padrão:               |          | 3,88   |

Da análise feita à tabela anterior, confirma-se que a lei triangular e trapezoidal são as que melhor representam os ensaios experimentais, tendo a lei trapezoidal um erro médio de  $P_{\text{máx}}$  de 4,38% e de  $\delta P_{\text{máx}}$  de 4,45%. A lei triangular também apresenta valores satisfatórios, tendo um erro médio de  $P_{\text{máx}}$  aos ensaios experimentais de 7,69%, e 2,62% no que concerne a  $\delta P_{\text{máx}}$ . A lei exponencial afasta-se um pouco das outras duas leis, obtendo erros maiores, nomeadamente um erro médio de  $P_{\text{máx}}$  de 13,55% e erro de  $\delta P_{\text{máx}}$  de 8,25%. Estes erros estão associados ao amaciamento excessivo da lei coesiva exponencial, imediatamente a seguir a  $t_n^0$ , o que se reflete nos valores de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$ .

### 4.3.1.2 Araldite® 2015

Apresenta-se na Figura 98 um exemplo de curvas  $P$ - $\delta$  obtidas experimentalmente e numericamente pelos MDC triangular, trapezoidal e exponencial, para o adesivo Araldite® 2015. A correlação geral entre as curvas numéricas e os ensaios experimentais foi bastante aceitável pela utilização das leis triangular e trapezoidal, em relação a  $P_{\text{máx}}$ ,  $\delta P_{\text{máx}}$  e rigidez no domínio elástico. A lei exponencial apresenta valores numéricos de  $P_{\text{máx}}$  ligeiramente inferiores aos obtidos experimentalmente. Esta previsão por defeito está relacionada, tal como se referiu para o Araldite® AV138, devido ao decréscimo abrupto de  $t_n$  a seguir a  $t_n^0$  e que não é representativo do comportamento real do adesivo. No entanto, tal como já tinha sido observado para o Araldite® AV138, a previsão do comportamento na zona de progressão da fenda é idêntica para as três leis coesivas.

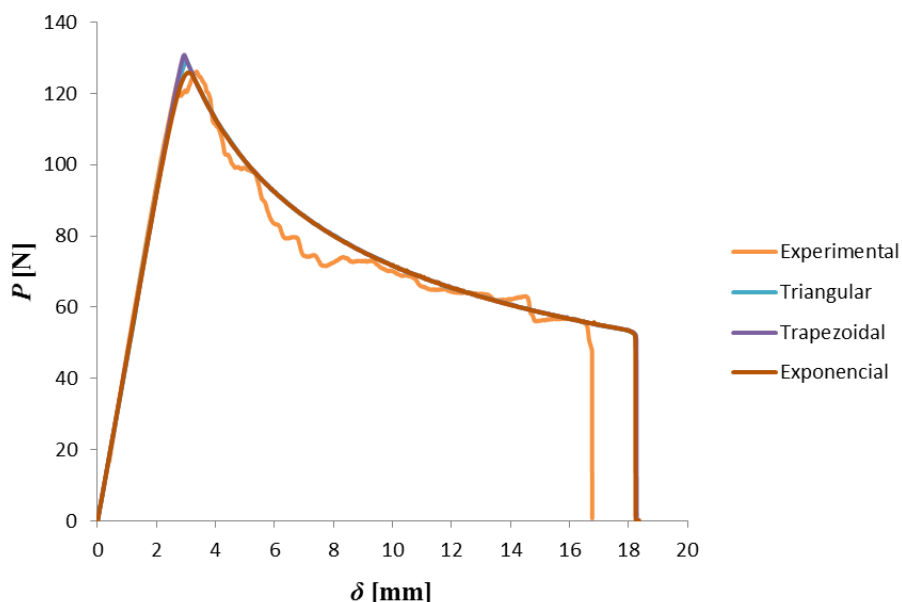


Figura 98 – Curvas  $P$ - $\delta$  de validação das leis coesivas do Araldite® 2015 em provete DCB

Na Tabela 23 são apresentados os resultados de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$  para cada um dos 6 provetes ensaiados experimentalmente, e respetiva comparação com as simulações numéricas em função dos três MDC abordados.

Tabela 23 – Erros de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$  do adesivo Araldite® 2015 em provete DCB

| <b>LEI TRIANGULAR</b>  |                      |          |        |                              |          |        |
|------------------------|----------------------|----------|--------|------------------------------|----------|--------|
| Provete                | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|                        | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1                      | 126,187              | 129,675  | 2,76   | 3,353                        | 3,000    | -10,52 |
| 2                      | 125,821              | 120,628  | -4,13  | 3,389                        | 2,795    | -17,54 |
| 3                      | 132,354              | 128,101  | -3,21  | 3,163                        | 3,080    | -2,62  |
| 4                      | 132,354              | 135,268  | 2,20   | 3,213                        | 3,250    | 1,16   |
| 5                      | 152,906              | 152,747  | -0,10  | 3,549                        | 3,565    | 0,44   |
| 6                      | 157,642              | 153,675  | -2,52  | 4,146                        | 3,783    | -8,77  |
|                        | Média:               |          | 2,49   | Média:                       |          | 6,84   |
|                        | Desvio Padrão:       |          | 2,65   | Desvio Padrão:               |          | 6,64   |
| <b>LEI TRAPEZOIDAL</b> |                      |          |        |                              |          |        |
| Provete                | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|                        | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1                      | 126,187              | 130,800  | 3,66   | 3,353                        | 2,950    | -12,01 |
| 2                      | 125,821              | 123,162  | -2,11  | 3,389                        | 2,709    | -20,08 |
| 3                      | 132,354              | 129,833  | -1,91  | 3,163                        | 2,970    | -6,10  |
| 4                      | 132,354              | 138,018  | 4,28   | 3,213                        | 3,125    | -2,73  |
| 5                      | 152,906              | 153,580  | 0,44   | 3,549                        | 3,450    | -2,80  |
| 6                      | 157,642              | 156,572  | -0,68  | 4,146                        | 3,616    | -12,80 |
|                        | Média:               |          | 2,18   | Média:                       |          | 9,42   |
|                        | Desvio Padrão:       |          | 2,52   | Desvio Padrão:               |          | 6,21   |
| <b>LEI EXPONENCIAL</b> |                      |          |        |                              |          |        |
| Provete                | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|                        | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1                      | 126,187              | 125,880  | -0,24  | 3,353                        | 3,050    | -9,03  |
| 2                      | 125,821              | 116,734  | -7,22  | 3,389                        | 2,838    | -16,27 |
| 3                      | 132,354              | 124,291  | -6,09  | 3,163                        | 3,190    | 0,86   |
| 4                      | 132,354              | 130,488  | -1,41  | 3,213                        | 3,375    | 5,05   |
| 5                      | 152,906              | 148,516  | -2,87  | 3,549                        | 3,680    | 3,68   |
| 6                      | 157,642              | 145,136  | -7,93  | 4,146                        | 3,949    | -4,75  |
|                        | Média:               |          | 4,30   | Média:                       |          | 6,61   |
|                        | Desvio Padrão:       |          | 2,94   | Desvio Padrão:               |          | 7,51   |

A análise detalhada da Tabela 23 permite concluir que a lei trapezoidal é a que melhor representa os ensaios experimentais, tendo um erro médio de 2,18% no valor de  $P_{\text{máx}}$ . O erro médio de  $\delta P_{\text{máx}}$  é de 9,42%. A lei triangular, cujos valores se aproximam muito da lei trapezoidal, apresenta um erro médio de  $P_{\text{máx}}$  face ao ensaio experimental de 2,49% e 2,84% de  $\delta P_{\text{máx}}$ . A lei exponencial representada na Figura 98 apresentou valores de  $P_{\text{máx}}$  ligeiramente abaixo da experimental, ou mesmo comparando com as outras leis. Assim sendo, o erro médio de  $P_{\text{máx}}$  foi de 4,30% e o erro de  $\delta P_{\text{máx}}$  foi de 6,61%.

Comparativamente com o Araldite® AV138 observa-se agora um melhor ajuste através da lei trapezoidal, o que se deve à maior ductilidade deste adesivo. Por outro lado, apesar de a lei exponencial se manter desadequada para a previsão de  $P_{\text{máx}}$ , a diferença observada é menor para este adesivo.

#### 4.3.1.3 Sikaforce® 7752

As curvas  $P$ - $\delta$  relativas ao adesivo Sikaforce® 7752 apresentam-se na Figura 99 para um provete representativo dos resultados obtidos com este adesivo, considerando as curvas experimentais e numéricas pelos MDC triangular, trapezoidal e exponencial. Das leis todas as curva  $P$ - $\delta$  numéricas apresentam uma rigidez inicial muito semelhante sendo que, na segunda metade da zona de crescimento de  $P$ , há uma quebra prematura na curva relativa à lei exponencial, obtendo-se assim um valor de  $P_{\text{máx}}$  mais reduzido. Este comportamento deve-se ao facto de, na lei coesiva exponencial, ocorrer uma degradação muito significativa de  $t_n$  imediatamente a seguir a ser atingido o valor de  $t_n^0$ . O comportamento durante a propagação do dano é ligeiramente diferente entre as três leis coesivas, na medida em que as curvas relativas às leis triangular e exponencial preveem por defeito o valor de  $P$  relativamente às curvas experimental e trapezoidal. Considera-se que esta discrepância está relacionada com o amaciamento excessivo das leis triangular e exponencial imediatamente após  $P_{\text{máx}}$ .

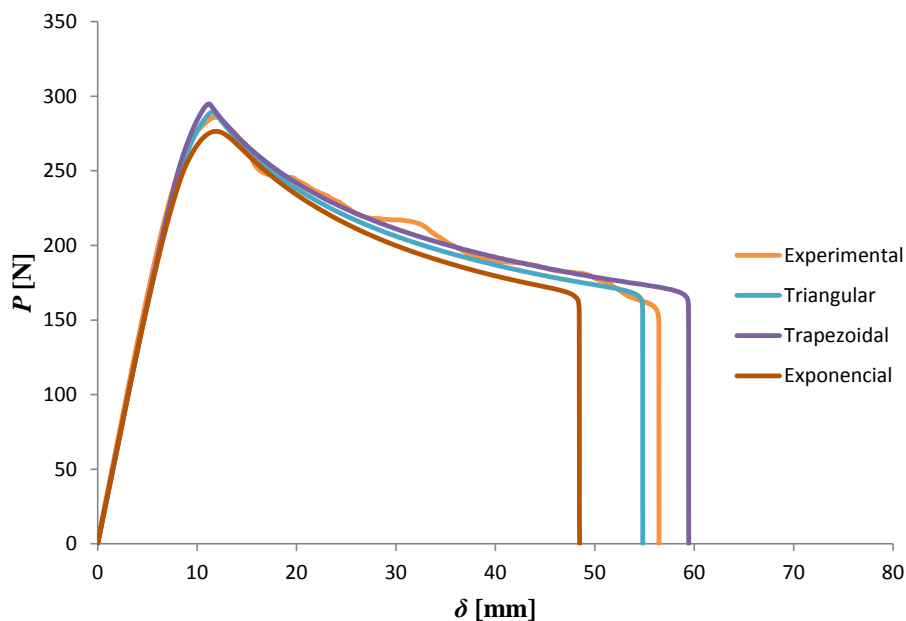


Figura 99 – Curvas  $P$ - $\delta$  de validação das leis coesivas do Sikaforce® 7752 em provete DCB

Na Tabela 24 são apresentados os resultados de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$  para os provetes ensaiados experimentalmente. Os resultados foram comparados individualmente com a simulação numérica em função de cada um dos três MDC.

Tabela 24 – Erros de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$  do adesivo Sikaforce® 7752 em provete DCB

| <b>LEI TRIANGULAR</b>  |                      |          |        |                              |          |        |
|------------------------|----------------------|----------|--------|------------------------------|----------|--------|
| Provete                | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|                        | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1                      | 291,627              | 294,098  | 0,85   | 12,018                       | 12,043   | 0,21   |
| 2                      | 305,979              | 297,906  | -2,64  | 13,435                       | 12,150   | -9,56  |
| 3                      | 291,820              | 290,214  | -0,55  | 12,956                       | 12,710   | -1,90  |
| 4                      | 289,288              | 302,010  | 4,40   | 13,247                       | 13,398   | 1,14   |
| 5                      | 286,063              | 289,573  | 1,23   | 11,831                       | 11,571   | -2,19  |
| 6                      | 285,048              | 294,528  | 3,33   | 13,060                       | 12,320   | -5,66  |
|                        | Média:               |          | 2,16   | Média:                       |          | 3,44   |
|                        | Desvio Padrão:       |          | 2,33   | Desvio Padrão:               |          | 3,64   |
| <b>LEI TRAPEZOIDAL</b> |                      |          |        |                              |          |        |
| Provete                | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|                        | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1                      | 291,627              | 299,635  | 2,75   | 12,018                       | 11,718   | -2,50  |
| 2                      | 305,979              | 302,889  | -1,01  | 13,435                       | 11,745   | -12,58 |
| 3                      | 291,820              | 295,120  | 1,13   | 12,956                       | 12,300   | -5,06  |
| 4                      | 289,288              | 307,078  | 6,15   | 13,247                       | 12,920   | -2,47  |
| 5                      | 286,063              | 294,733  | 3,03   | 11,831                       | 11,266   | -4,77  |
| 6                      | 285,048              | 298,623  | 4,76   | 13,060                       | 11,880   | -9,03  |
|                        | Média:               |          | 3,14   | Média:                       |          | 6,07   |
|                        | Desvio Padrão:       |          | 2,32   | Desvio Padrão:               |          | 3,64   |
| <b>LEI EXPONENCIAL</b> |                      |          |        |                              |          |        |
| Provete                | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|                        | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1                      | 291,627              | 280,688  | -3,75  | 12,018                       | 12,369   | 2,92   |
| 2                      | 305,979              | 286,982  | -6,21  | 13,435                       | 12,150   | -9,56  |
| 3                      | 291,820              | 279,534  | -4,21  | 12,956                       | 12,710   | -1,90  |
| 4                      | 289,288              | 291,329  | 0,71   | 13,247                       | 12,920   | -2,47  |
| 5                      | 286,063              | 276,423  | -3,37  | 11,831                       | 11,875   | 0,38   |
| 6                      | 285,048              | 282,069  | -1,05  | 13,060                       | 12,672   | -2,97  |
|                        | Média:               |          | 3,21   | Média:                       |          | 3,37   |
|                        | Desvio Padrão:       |          | 2,24   | Desvio Padrão:               |          | 3,83   |

Da análise feita à tabela anterior, as leis triangular, trapezoidal e exponencial apresentam resultados muito semelhantes aos ensaios experimentais, tendo um erro médio em valor absoluto de 2,16%, 3,14% e 3,21% em  $P_{\text{máx}}$ , respetivamente, e em  $\delta P_{\text{máx}}$  de 3,44%, 6,07% e

3,37%, pela mesma ordem. Confirma-se assim mais uma vez que, de uma forma geral, a lei exponencial prevê por defeito o valor de  $P_{\text{máx}}$  devido aos fatores anteriormente referidos.

De um modo geral, este adesivo obteve resultados muito semelhantes aos do adesivo Araldite® 2015, em que a lei triangular e trapezoidal são as que melhor preveem o comportamento da junta. No entanto, a utilização da lei exponencial não exhibe uma diferença muito acentuada.

### 4.3.2 Ensaios ENF

#### 4.3.2.1 Araldite® AV138

As curvas  $P$ - $\delta$  obtidas numericamente para as juntas ENF coladas com adesivo Araldite® AV138 estão representadas na Figura 100 para um provete representativo dos ensaios. A aproximação numérica com a lei triangular é a que melhor se ajusta aos resultados experimentais. As leis triangular e trapezoidal apresentam uma rigidez inicial semelhante aos valores experimentais, sendo que a lei trapezoidal apresenta um valor de  $P_{\text{máx}}$  superior e a lei exponencial exhibe uma quebra de rigidez antes de  $P_{\text{máx}}$  que não traduz o comportamento experimental. Este comportamento está relacionado com o já mencionado para os ensaios DCB, ou seja, amaciamento excessivo da lei coesiva, neste caso ao corte, após  $t_s^0$ .

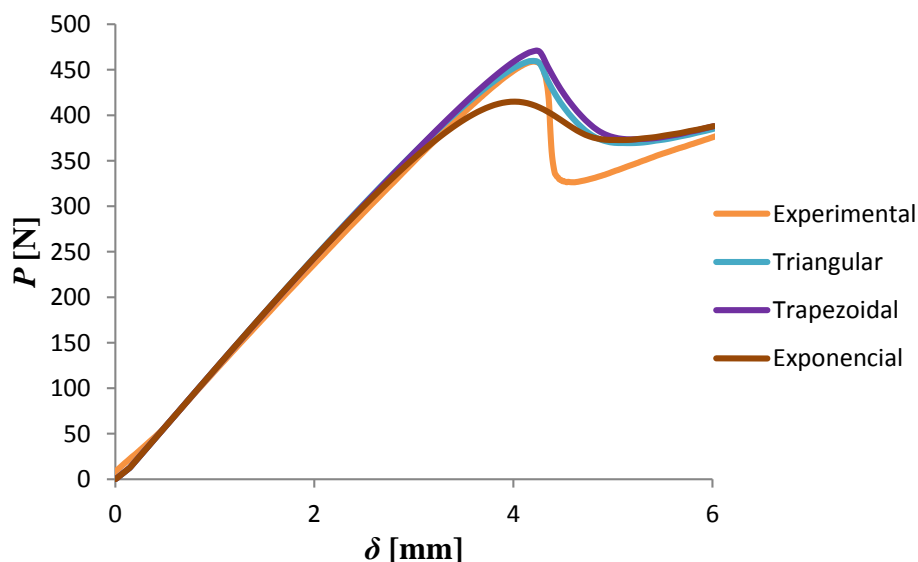


Figura 100 – Curvas  $P$ - $\delta$  de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete ENF

Tabela 25 – Média de erro de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$  do adesivo Araldite® AV138 em provete ENF

| <b>LEI TRIANGULAR</b>  |                      |          |        |                              |          |        |
|------------------------|----------------------|----------|--------|------------------------------|----------|--------|
| Provete                | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|                        | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1                      | 458,956              | 459,568  | 0,13   | 4,202                        | 4,181    | -0,49  |
| 2                      | 681,575              | 675,682  | -0,86  | 4,875                        | 4,873    | -0,04  |
| 3                      | 671,005              | 664,545  | -0,96  | 4,543                        | 4,534    | -0,20  |
| 4                      | ANULADO              |          |        |                              |          |        |
| 5                      | 471,290              | 467,956  | -0,71  | 4,068                        | 4,161    | 2,27   |
| 6                      | 464,535              | 465,508  | 0,21   | 4,075                        | 4,106    | 0,78   |
| 7                      | 439,533              | 439,198  | -0,08  | 4,056                        | 4,176    | 2,95   |
| 8                      | 431,887              | 438,051  | 1,43   | 4,028                        | 4,173    | 3,60   |
|                        | Média:               |          | 0,63   | Média:                       |          | 1,48   |
|                        | Desvio padrão:       |          | 0,77   | Desvio padrão:               |          | 1,53   |
| <b>LEI TRAPEZOIDAL</b> |                      |          |        |                              |          |        |
| Provete                | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|                        | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1                      | 458,956              | 469,755  | 2,35   | 4,202                        | 4,264    | 1,49   |
| 2                      | 681,575              | 699,099  | 2,57   | 4,875                        | 4,894    | 0,39   |
| 3                      | 671,005              | 688,915  | 2,67   | 4,543                        | 4,554    | 0,23   |
| 4                      | ANULADO              |          |        |                              |          |        |
| 5                      | 471,290              | 480,954  | 2,05   | 4,068                        | 4,080    | 0,29   |
| 6                      | 464,535              | 476,732  | 2,63   | 4,075                        | 4,022    | -1,28  |
| 7                      | 439,533              | 451,243  | 2,66   | 4,056                        | 4,053    | -0,08  |
| 8                      | 431,887              | 449,706  | 4,13   | 4,028                        | 3,999    | -0,70  |
|                        | Média:               |          | 2,72   | Média:                       |          | 0,64   |
|                        | Desvio padrão:       |          | 0,61   | Desvio padrão:               |          | 0,81   |
| <b>LEI EXPONENCIAL</b> |                      |          |        |                              |          |        |
| Provete                | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|                        | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1                      | 458,956              | 414,987  | -9,58  | 4,202                        | 4,015    | -4,45  |
| 2                      | 681,575              | 603,606  | -11,44 | 4,875                        | 4,543    | -6,81  |
| 3                      | 671,005              | 591,664  | -11,82 | 4,543                        | 4,178    | -8,04  |
| 4                      | ANULADO              |          |        |                              |          |        |
| 5                      | 471,290              | 423,465  | -10,15 | 4,068                        | 3,919    | -3,66  |
| 6                      | 464,535              | 420,553  | -9,47  | 4,075                        | 3,911    | -4,01  |
| 7                      | 439,533              | 398,326  | -9,38  | 4,056                        | 4,008    | -1,19  |
| 8                      | 431,887              | 391,872  | -9,27  | 4,028                        | 3,912    | -2,87  |
|                        | Média:               |          | 10,16  | Média:                       |          | 4,44   |
|                        | Desvio padrão:       |          | 0,97   | Desvio padrão:               |          | 2,15   |

Na Tabela 25 são apresentados os resultados de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$  para cada um dos 7 provetes ENF ensaiados experimentalmente, que são depois comparados individualmente com as respectivas simulações numéricas em função dos três MDC abordados. Neste adesivo foram

excluídos os resultados experimentais do provete 4, devido a disparidade de resultados assinalável relativamente aos restantes provetes.

Em consonância com o observado para o provete da Figura 100, constata-se que a lei triangular é a que melhor representa os ensaios experimentais, tendo um erro médio de 0,63% no valor de  $P_{\text{máx}}$ , e de  $\delta P_{\text{máx}}$  de 1,48%. A lei trapezoidal, cujas curvas  $P$ - $\delta$  também se consideram satisfatórias e muito próximas da lei triangular, apresenta um erro médio de  $P_{\text{máx}}$  face ao ensaio experimental de 2,72% e de 0,64% para o  $\delta P_{\text{máx}}$ . Os resultados da lei exponencial afastam-se das outras duas leis, obtendo erros maiores. De facto, esta lei prevê por defeito os valores de  $P_{\text{máx}}$  dos valores experimentais, apresentando um erro médio de  $P_{\text{máx}}$  de 10,16%. Apesar da diferença de erro apresentada, observou-se uma disparidade reduzida de desvio padrão. O valor médio de erro de  $\delta P_{\text{máx}}$  é de 4,44%. As causas desta discrepância já foi discutida anteriormente, e mostram que a lei exponencial não é adequada para adesivos frágeis.

#### 4.3.2.2 Araldite® 2015

A Figura 101 mostra a correlação típica entre as curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas pelas três leis coesivas (triangular, trapezoidal e exponencial) para o adesivo Araldite® 2015. A correlação geral entre as curvas numéricas e os ensaios experimentais foi excelente pela utilização da lei trapezoidal, em relação a  $P_{\text{máx}}$ ,  $\delta P_{\text{máx}}$  e rigidez no domínio elástico. O comportamento durante o início de propagação foi idêntico nos três tipos de leis coesivas sendo que, após a segunda metade da zona de crescimento de  $P$ , as curvas  $P$ - $\delta$  começam a divergir. A propagação da lei trapezoidal foi semelhante à gerada experimentalmente. A lei triangular apresentou uma ligeira quebra do valor de  $P_{\text{máx}}$ . A lei exponencial apresenta valores numéricos de  $P_{\text{máx}}$  mais reduzidos que as restantes leis. Esta quebra iniciou logo após a segunda metade do crescimento da curva, influenciando desta forma os valores finais de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$ . A quebra observada na curva das leis triangular e exponencial deve-se ao facto de ocorrer uma degradação significativa de  $t_s$  imediatamente a seguir a ser atingido o valor de  $t_s^0$ , o que não traduz da forma mais correta o comportamento de adesivos com alguma ductilidade.

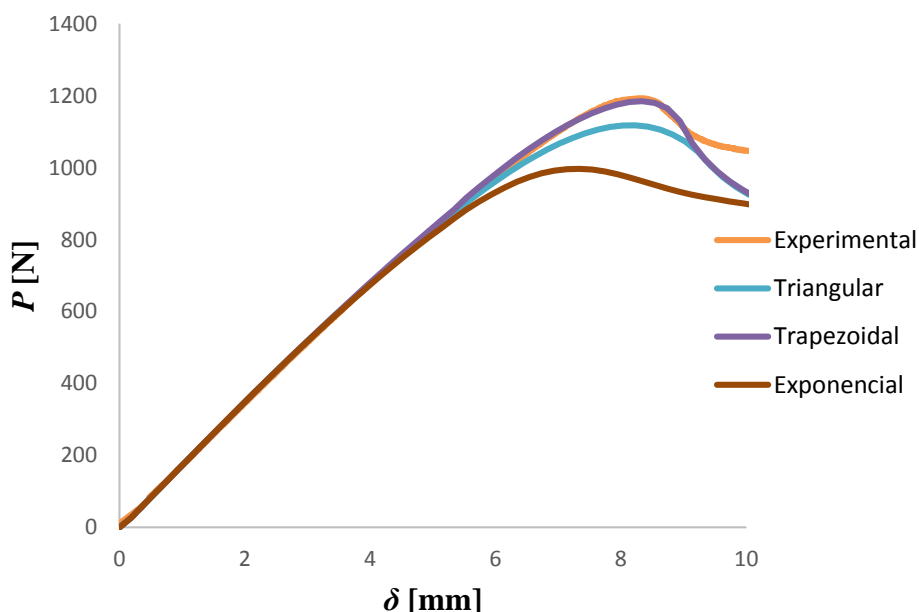


Figura 101 – Curvas  $P$ - $\delta$  de validação das leis coesivas do Araldite<sup>®</sup> 2015 em provete ENF

Na Tabela 26 são apresentados os resultados de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$  de cada um dos 8 provetes ENF ensaiados experimentalmente. É efetuada a comparação individual destes valores com as respetivas simulações numéricas obtidas usando as leis coesivas triangulares, trapezoidais e exponenciais.

Da análise feita à tabela anterior, onde são comparadas as três leis MDC, observa-se que a lei trapezoidal é a que melhor representa os ensaios experimentais, tendo um erro médio de 0,61% de  $P_{\text{máx}}$  e um erro médio de  $\delta P_{\text{máx}}$  de 1,01%. A lei triangular, cujos valores também se consideram satisfatórios, apresenta um erro médio de  $P_{\text{máx}}$  face ao valor experimental de 5,16%, e de 1,41% para  $\delta P_{\text{máx}}$ . A lei exponencial apresentou valores de  $P_{\text{máx}}$  inferiores às restantes leis, na medida em que os erros de  $P_{\text{máx}}$  resultantes foram muito semelhantes, obtendo-se assim um erro médio de  $P_{\text{máx}}$  percentual de 15,42%, e de  $\delta P_{\text{máx}}$  de 11,14%. Estes resultados são assim coerentes com a análise feita às curvas da Figura 101.

Em comparação com os resultados deste adesivo, verifica-se que o Araldite<sup>®</sup> AV138 obtém melhor previsão através da lei triangular. Por sua vez, no Araldite<sup>®</sup> 2015, a lei a trapezoidal é a que melhor representa a resistência da junta. Para ambos os adesivos, a lei exponencial não se adequa à análise realizada.

Tabela 26 – Média de erro de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$  do adesivo Araldite® 2015 em provete ENF

**LEI TRIANGULAR**

| Provete | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|---------|----------------------|----------|--------|------------------------------|----------|--------|
|         | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1       | 1193,221             | 1153,732 | -3,31  | 8,485                        | 8,401    | -0,99  |
| 2       | 1162,624             | 1109,535 | -4,57  | 9,300                        | 8,980    | -3,44  |
| 3       | 1097,854             | 1042,864 | -5,01  | 7,941                        | 7,879    | -0,77  |
| 4       | 1192,649             | 1117,527 | -6,30  | 8,324                        | 8,229    | -1,14  |
| 5       | 1170,063             | 1114,056 | -4,79  | 8,184                        | 8,091    | -1,14  |
| 6       | 1176,000             | 1095,748 | -6,82  | 8,417                        | 8,210    | -2,46  |
| 7       | 1082,770             | 1026,997 | -5,15  | 7,679                        | 7,740    | 0,80   |
| 8       | 1076,841             | 1019,263 | -5,35  | 7,876                        | 7,920    | 0,56   |
|         | Média:               |          | 5,16   | Média:                       |          | 1,41   |
|         | Desvio padrão:       |          | 1,00   | Desvio padrão:               |          | 1,31   |

**LEI TRAPEZOIDAL**

| Provete | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|---------|----------------------|----------|--------|------------------------------|----------|--------|
|         | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1       | 1193,221             | 1210,321 | 1,43   | 8,485                        | 8,627    | 1,68   |
| 2       | 1162,624             | 1159,603 | -0,26  | 9,300                        | 9,108    | -2,06  |
| 3       | 1097,854             | 1094,399 | -0,31  | 7,941                        | 7,873    | -0,85  |
| 4       | 1192,649             | 1184,697 | -0,67  | 8,324                        | 8,339    | 0,19   |
| 5       | 1170,063             | 1166,184 | -0,33  | 8,184                        | 8,171    | -0,15  |
| 6       | 1176,000             | 1183,652 | 0,65   | 8,417                        | 8,463    | 0,54   |
| 7       | 1082,770             | 1090,306 | 0,70   | 7,679                        | 7,713    | 0,44   |
| 8       | 1076,841             | 1082,339 | 0,51   | 7,876                        | 8,047    | 2,18   |
|         | Média:               |          | 0,61   | Média:                       |          | 1,01   |
|         | Desvio padrão:       |          | 0,67   | Desvio padrão:               |          | 1,25   |

**LEI EXPONENCIAL**

| Provete | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|---------|----------------------|----------|--------|------------------------------|----------|--------|
|         | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1       | 1193,221             | 1033,805 | -13,36 | 8,485                        | 7,631    | -10,06 |
| 2       | 1162,624             | 1001,402 | -13,87 | 9,300                        | 8,079    | -13,13 |
| 3       | 1097,854             | 927,972  | -15,47 | 7,941                        | 7,079    | -10,85 |
| 4       | 1192,649             | 996,588  | -16,44 | 8,324                        | 7,339    | -11,83 |
| 5       | 1170,063             | 987,044  | -15,64 | 8,184                        | 7,259    | -11,31 |
| 6       | 1176,000             | 976,004  | -17,01 | 8,417                        | 7,328    | -12,94 |
| 7       | 1082,770             | 913,948  | -15,59 | 7,679                        | 6,923    | -9,84  |
| 8       | 1076,841             | 904,983  | -15,96 | 7,876                        | 7,156    | -9,14  |
|         | Média:               |          | 15,42  | Média:                       |          | 11,14  |
|         | Desvio padrão:       |          | 1,15   | Desvio padrão:               |          | 1,35   |

### 4.3.2.3 Sikaforce® 7752

Apresenta-se na Figura 102 um exemplo de curvas  $P$ - $\delta$  obtidas experimentalmente e numericamente pelos MDC triangular, trapezoidal e exponencial, considerando neste caso os ensaios ENF com o adesivo Sikaforce® 7752. No provete representado, e de forma análoga ao observado para os restantes ensaios realizados com este adesivo, a lei trapezoidal permite obter um ajuste bastante preciso da curva experimental no que diz respeito à rigidez inicial até  $P_{\text{máx}}$ , e valores de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$ . A lei triangular e especialmente a exponencial preveem por defeito o valor de  $P_{\text{máx}}$  após perda de rigidez antes de se atingir este valor. De facto, uma vez que o Sikaforce® 7752 é bastante dúctil, estas leis coesivas degradam excessivamente  $t_s$  imediatamente a seguir a ser atingido o valor de  $t_s^0$ , o que leva ao comportamento observado.

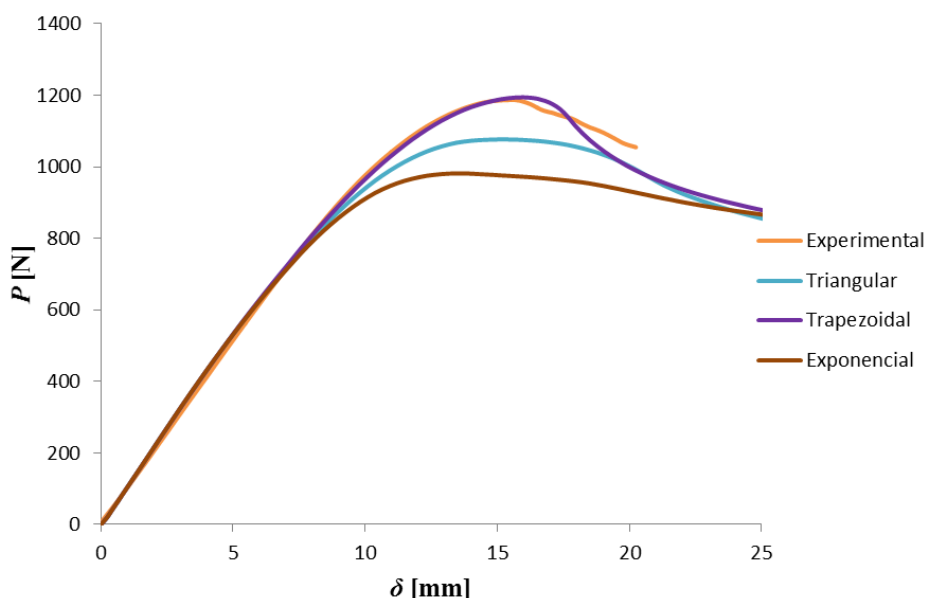


Figura 102 – Curvas  $P$ - $\delta$  de validação das leis coesivas do Sikaforce® 7752 em provete ENF

Na Tabela 27 detalha-se os resultados de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$  para cada um dos 8 provetes ENF ensaiados experimentalmente com o adesivo Sikaforce® 7752, que são também comparados individualmente com as respetivas simulações numéricas para os três tipos de leis coesivas.

Tabela 27 – Média de erro de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$  do adesivo Sikaforce® 7752 em provete ENF

| <b>LEI TRIANGULAR</b>  |                      |          |        |                              |          |        |
|------------------------|----------------------|----------|--------|------------------------------|----------|--------|
| Provete                | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|                        | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1                      | 1191,696             | 1123,292 | -5,74  | 15,049                       | 18,001   | 19,62  |
| 2                      | 1106,930             | 1013,357 | -8,45  | 12,884                       | 14,343   | 11,32  |
| 3                      | 1103,608             | 1034,142 | -6,29  | 14,841                       | 16,779   | 13,06  |
| 4                      | 1079,210             | 1014,249 | -6,02  | 13,689                       | 15,843   | 15,73  |
| 5                      | 1127,815             | 1041,949 | -7,61  | 14,685                       | 15,830   | 7,80   |
| 6                      | 1187,118             | 1076,673 | -9,30  | 15,586                       | 15,141   | -2,86  |
| 7                      | 1181,809             | 1091,578 | -7,63  | 13,664                       | 14,258   | 4,34   |
| 8                      | 1181,809             | 1107,558 | -6,28  | 13,664                       | 14,911   | 9,13   |
|                        | Média:               |          | 7,17   | Média:                       |          | 10,48  |
|                        | Desvio padrão:       |          | 1,20   | Desvio padrão:               |          | 6,51   |
| <b>LEI TRAPEZOIDAL</b> |                      |          |        |                              |          |        |
| Provete                | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|                        | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1                      | 1191,696             | 1198,060 | 0,53   | 15,049                       | 17,421   | 15,77  |
| 2                      | 1106,930             | 1098,659 | -0,75  | 12,884                       | 14,093   | 9,38   |
| 3                      | 1103,608             | 1098,095 | -0,50  | 14,841                       | 16,029   | 8,01   |
| 4                      | 1079,210             | 1090,905 | 1,08   | 13,689                       | 15,093   | 10,25  |
| 5                      | 1127,815             | 1145,131 | 1,54   | 14,685                       | 15,590   | 6,17   |
| 6                      | 1187,118             | 1194,445 | 0,62   | 15,586                       | 15,981   | 2,53   |
| 7                      | 1181,809             | 1185,984 | 0,35   | 13,664                       | 14,504   | 6,15   |
| 8                      | 1181,809             | 1188,510 | 0,57   | 13,664                       | 14,911   | 9,13   |
|                        | Média:               |          | 0,74   | Média:                       |          | 8,42   |
|                        | Desvio padrão:       |          | 0,70   | Desvio padrão:               |          | 3,60   |
| <b>LEI EXPONENCIAL</b> |                      |          |        |                              |          |        |
| Provete                | $P_{\text{máx}}$ (N) |          | Erro % | $\delta P_{\text{máx}}$ (mm) |          | Erro % |
|                        | Experimental         | Numérico |        | Experimental                 | Numérico |        |
| 1                      | 1191,696             | 1031,470 | -13,45 | 15,049                       | 16,551   | 9,99   |
| 2                      | 1106,930             | 937,814  | -15,28 | 12,884                       | 13,593   | 5,50   |
| 3                      | 1103,608             | 962,065  | -12,83 | 14,841                       | 15,529   | 4,64   |
| 4                      | 1079,210             | 939,134  | -12,98 | 13,689                       | 14,843   | 8,42   |
| 5                      | 1127,815             | 958,540  | -15,01 | 14,685                       | 15,110   | 2,90   |
| 6                      | 1187,118             | 981,825  | -17,29 | 15,586                       | 13,461   | -13,63 |
| 7                      | 1181,809             | 1003,524 | -15,09 | 13,664                       | 13,028   | -4,66  |
| 8                      | 1181,809             | 1023,599 | -13,39 | 13,664                       | 13,435   | -1,68  |
|                        | Média:               |          | 14,41  | Média:                       |          | 6,43   |
|                        | Desvio padrão:       |          | 1,43   | Desvio padrão:               |          | 7,29   |

Da análise feita à Tabela 27, é evidente a diferença entre as três leis MDC comparadas, sendo que a lei trapezoidal é a que melhor representa os ensaios experimentais, tendo um erro médio de 0,74% para  $P_{\text{máx}}$  e um erro médio de  $\delta P_{\text{máx}}$  de 8,42%. A lei triangular, cujos valores se afastam um pouco da lei trapezoidal, apresenta um erro médio de  $P_{\text{máx}}$  face ao valor experimental de 7,17%, e 10,48% relativamente a  $\delta P_{\text{máx}}$ . A lei exponencial apresentou um

erro percentual médio de  $P_{\text{máx}}$  de 14,41% e um erro de  $\delta P_{\text{máx}}$  de 6,43%. Os desvios da lei exponencial foram superiores aos das restantes leis, devido à ductilidade significativa deste adesivo, conforme anteriormente referido.

Concluiu-se que, tal como o Araldite<sup>®</sup> 2015, o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752 apresenta melhores resultados através da lei trapezoidal. Esta ocorrência deve-se ao comportamento dúctil destes dois adesivos. O Araldite<sup>®</sup> AV138, sendo um adesivo de comportamento frágil, apresenta melhores resultados através da lei triangular.

#### 4.4 Estudo da influência dos parâmetros coesivos

O estudo da influência dos parâmetros coesivos apresentados neste capítulo consiste na averiguação da influência de  $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  no comportamento dos modelos numéricos dos ensaios DCB e ENF. Pretende-se também verificar se existem diferenças dignas de registo induzidas pela variação destes parâmetros em função da ductilidade do adesivo. Nesta análise, consideraram-se variações de  $t_n^0$  e  $t_s^0$  entre -50% e +50% do valor médio de cada adesivo, obtido nos provetes em análise, e variações de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  de -25 e +25% do valor médio de cada adesivo. Os valores médios iniciais dizem respeito aos dados obtidos pela aplicação do método direto (Integral- $J$ ) para cada adesivo. A variação destes parâmetros assume que o outro parâmetro da lei é mantido igual, ou seja, é mantido o valor médio utilizado. Esta análise foi realizada através do *software* Abaqus<sup>®</sup>, de onde foram retiradas as curvas  $P$ - $\delta$  que permitiram a análise do efeito da variação destes parâmetros.

##### 4.4.1 Ensaios DCB

###### 4.4.1.1 Araldite<sup>®</sup> AV138

Na Figura 103 são apresentadas as curvas  $P$ - $\delta$  da análise de sensibilidade do parâmetro  $t_n^0$ , considerando uma variação de valores de +50% e -50% relativamente ao valor médio do adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138, patente na Tabela 10. Na Figura 103 pode-se observar que a rigidez inicial é idêntica para todos valores de  $t_n^0$  considerados. No entanto, a rigidez de todas as curvas com variação de  $t_n^0$  de -50% exibe uma redução assinalável antes de ser atingido  $P_{\text{máx}}$ . De facto, o valor de  $t_n^0$  afeta principalmente a rigidez da segunda metade das curvas  $P$ - $\delta$ , antes do pico ser alcançado. As curvas referentes à lei exponencial também

evidenciam um amaciamento prematuro significativo antes de  $P_{\text{máx}}$  devido à forma da lei coesiva, que induz a redução de  $t_n^0$  de forma muito abrupta. Por outro lado, com o aumento de  $t_n^0$  também se observa um aumento de  $P_{\text{máx}}$  associado ao aumento da rigidez elástica do provete. Esta variação causa um aumento mais acentuado na lei exponencial do que na lei trapezoidal, enquanto a lei triangular apresenta um comportamento intermédio. Esta diferença está diretamente relacionada com a rigidez das curvas originais até  $P_{\text{máx}}$ , na medida em que as leis que propiciam maior rigidez elástica inicial nas curvas  $P$ - $\delta$  têm menos margem de manobra para o aumento de rigidez. Por outro lado, nas três leis coesivas, a redução de  $t_n^0$  tem maior influência, quando comparada com o aumento de  $t_n^0$ . A variação deste parâmetro afeta mais também a lei exponencial. O comportamento das curvas  $P$ - $\delta$  para cada lei coesiva é idêntico durante a fase de propagação do dano, porque neste caso a rotura é governada pelo valor de  $G_{Ic}$ . Todas as leis apresentam uma rotura de adesivo semelhante.

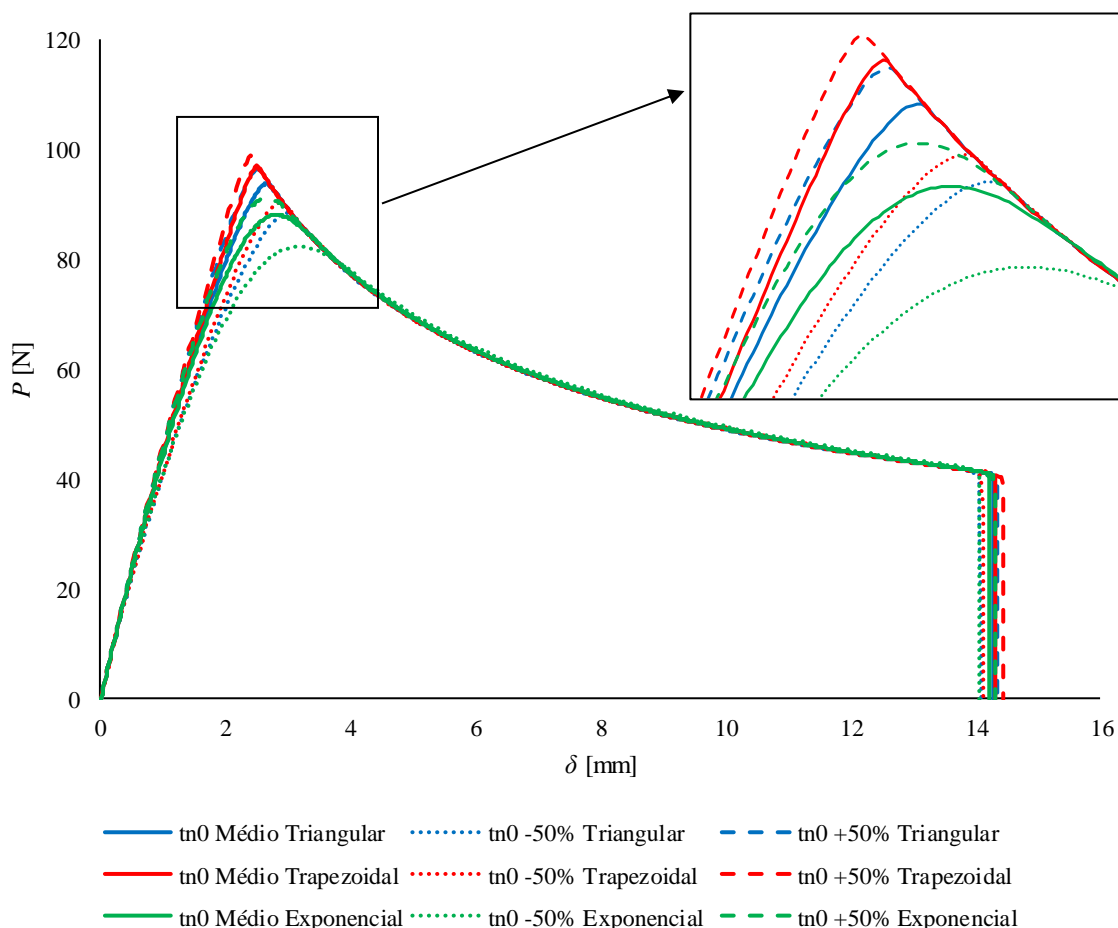


Figura 103 – Influência de  $t_n^0$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes DCB com o adesivo Araldite® AV138

Seguidamente são apresentadas na Figura 104 as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas pela variação de  $G_{Ic}$ , considerando para tal uma variação de +25% e de -25% do valor médio do adesivo Araldite® AV138 obtido na Tabela 10.

A variação do valor de  $G_{Ic}$  para o adesivo Araldite® AV138 tem um efeito idêntico nos três tipos de leis, tanto no aumento assim como na redução do parâmetro. Os resultados mostram que  $G_{Ic}$  tem um efeito claro no valor de  $P_{máx}$ , de tal forma que este aumenta ou diminui consoante a variação idêntica de  $G_{Ic}$ , mantendo aproximadamente a rigidez elástica do provete.

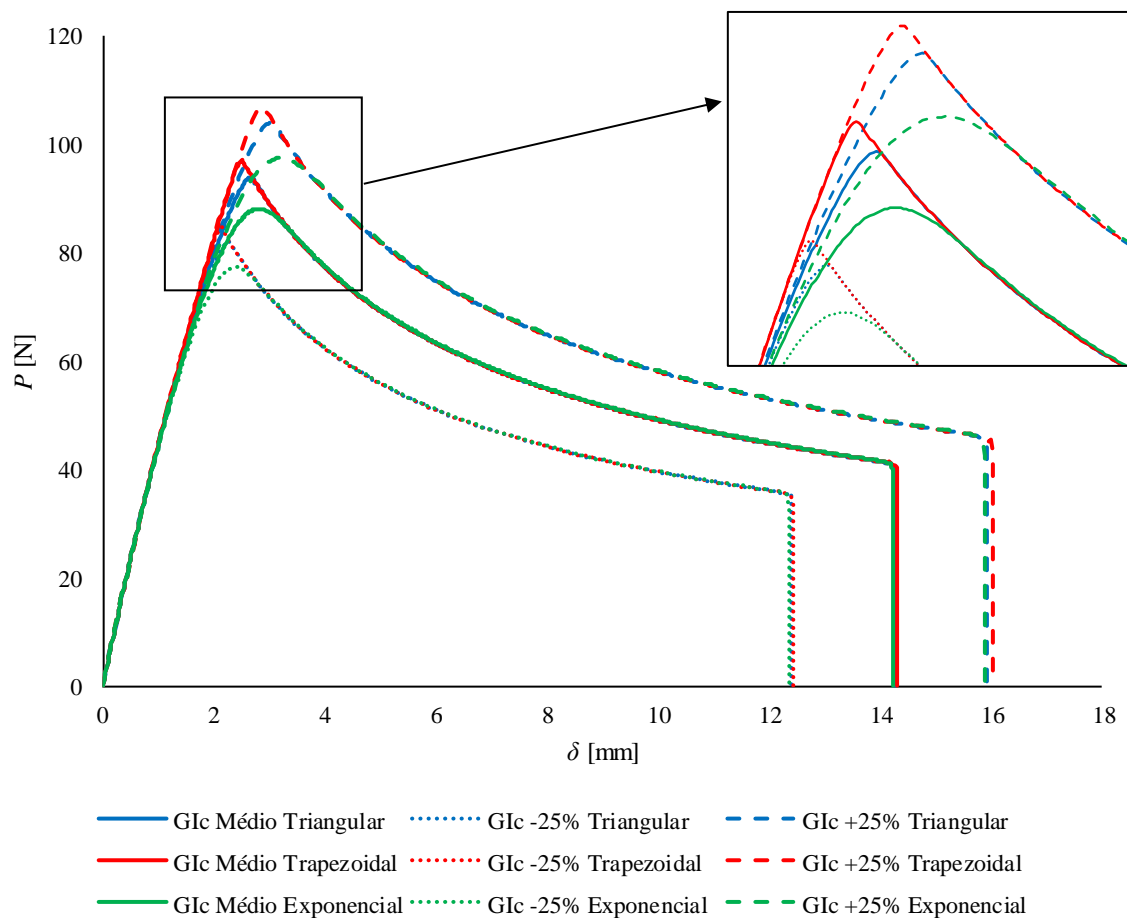


Figura 104 – Influência de  $G_{Ic}$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes DCB com o adesivo Araldite® AV138

#### 4.4.1.2 Araldite® 2015

As curvas  $P$ - $\delta$  relativas às diferentes leis coesivas para o adesivo Araldite® 2015, que permitem analisar a sensibilidade de  $t_n^0$ , são apresentadas na Figura 105. Considerou-se uma variação de valores de  $t_n^0$  de +50% e de -50% do valor médio do adesivo Araldite® 2015 obtido na Tabela 12.

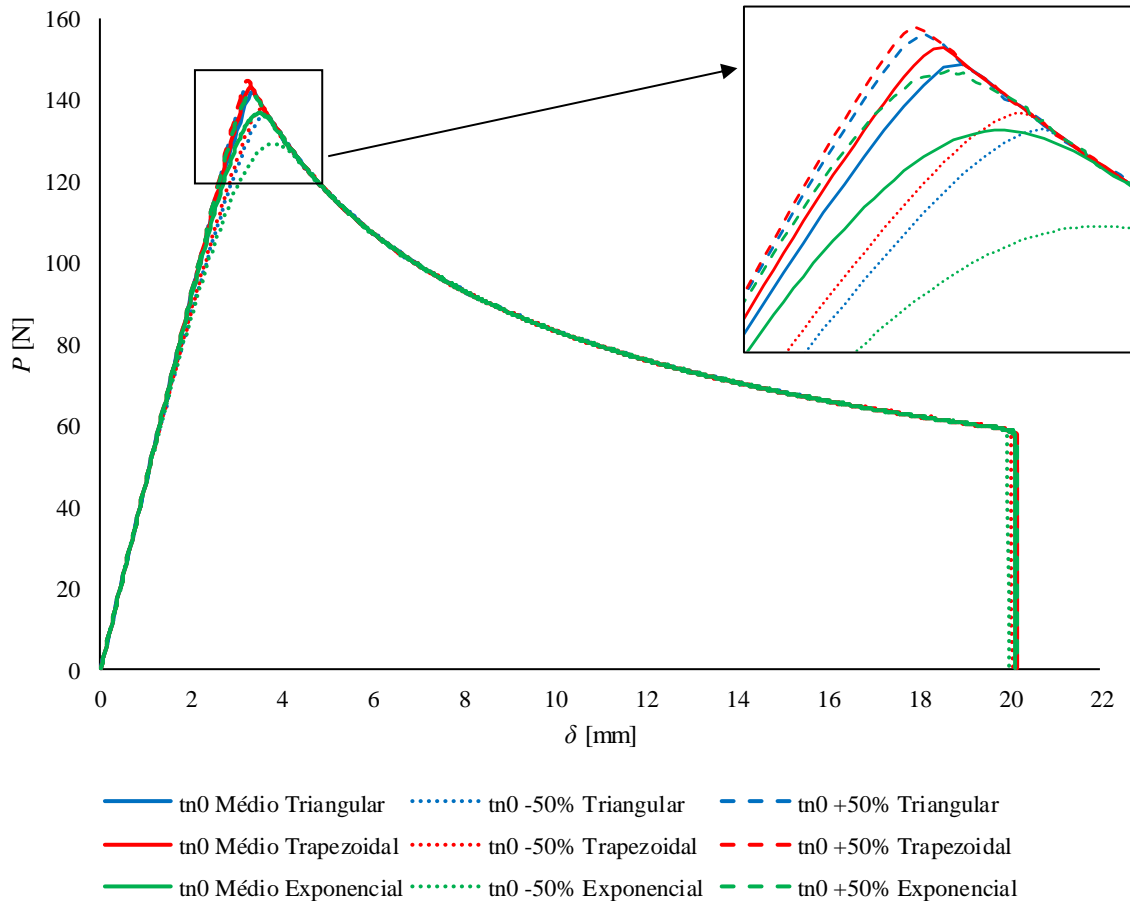


Figura 105 – Influência de  $t_n^0$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes DCB com o adesivo Araldite® 2015

A Figura 105 mostra que todas as curvas  $P$ - $\delta$  iniciam com a mesma rigidez. No entanto, a aproximadamente metade de  $P_{\text{máx}}$  pode-se verificar que as curvas  $P$ - $\delta$  referentes à lei exponencial iniciam um processo de amaciamento prematuro, enquanto os resultados das leis triangular e trapezoidal exibem uma rigidez quase linear até  $P_{\text{máx}}$ , como aliás já tinha sido referido anteriormente. O efeito da variação de  $t_n^0$  é algo idêntico ao observado para o Araldite® AV138, em que reduções deste parâmetro se refletem numa redução da rigidez excessiva antes de  $P_{\text{máx}}$  (de forma idêntica para as três leis), o que por sua vez se traduz no valor deste parâmetro. Por outro lado, o aumento de  $t_n^0$  em +50% traduz-se num aumento de

rigidez elástica até  $P_{\text{máx}}$ , de tal forma que esta evolução se torna praticamente linear, independentemente do tipo de lei.

Na Figura 106 comparam-se as curvas  $P$ - $\delta$  numéricas para as leis triangular, trapezoidal e exponencial em função de variações de  $G_{Ic}$  de +25% e -25%.

Observa-se que, independentemente do tipo de lei utilizada, a variação de  $P_{\text{máx}}$  tem um efeito idêntico, registrando-se aumentos e diminuições de  $P_{\text{máx}}$  em consonância com a variação de  $G_{Ic}$ . Os diferentes graus de amaciamento antes de  $P_{\text{máx}}$  que se observaram para as curvas originais também se registam de forma idêntica para as leis em que  $G_{Ic}$  foi modificado.

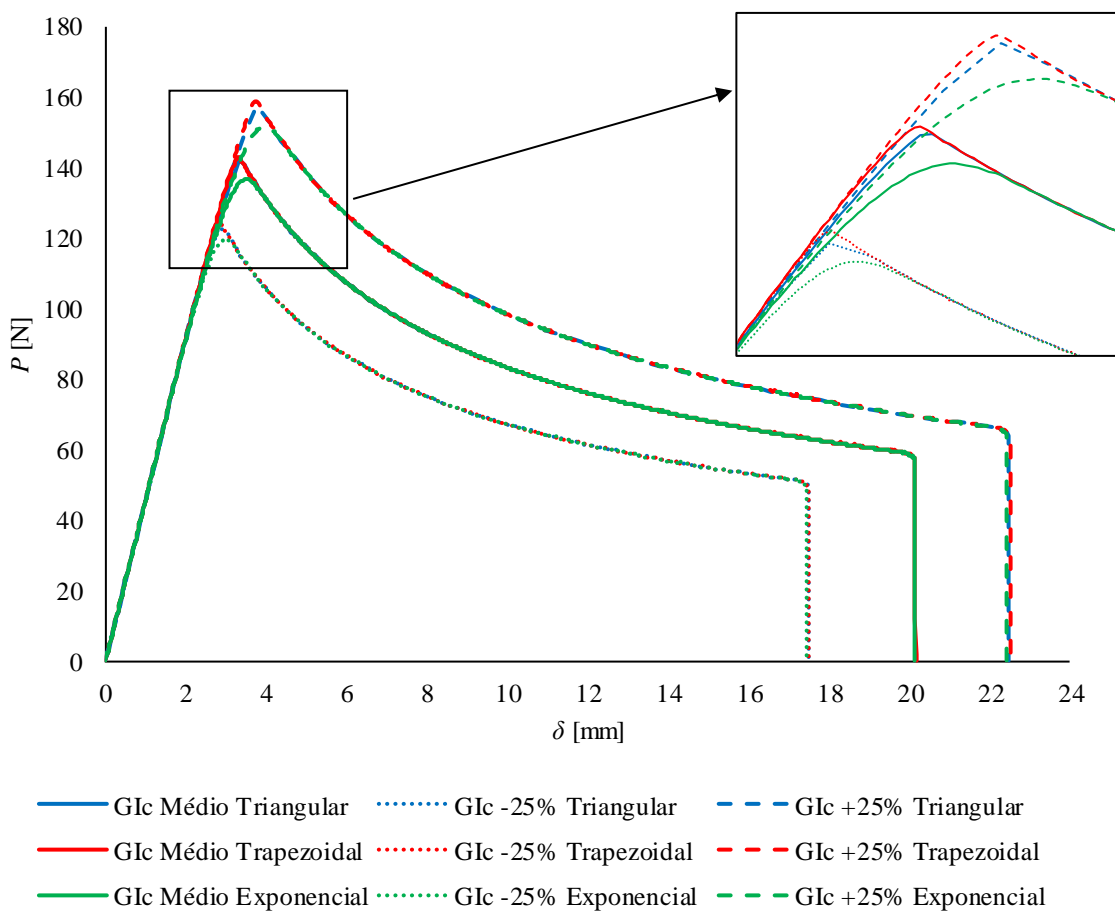


Figura 106 – Influência de  $G_{Ic}$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes DCB com o adesivo Araldite® 2015

4.4.1.3 Sikaforce® 7752

Na Figura 107 são apresentadas as curvas  $P$ - $\delta$  que permitem estudar o comportamento dos provetes DCB com o adesivo Sikaforce® 7752 após variação de  $t_n^0$  de +50% e -50% relativamente ao seu valor médio (Tabela 13), para as três leis coesivas abordadas.

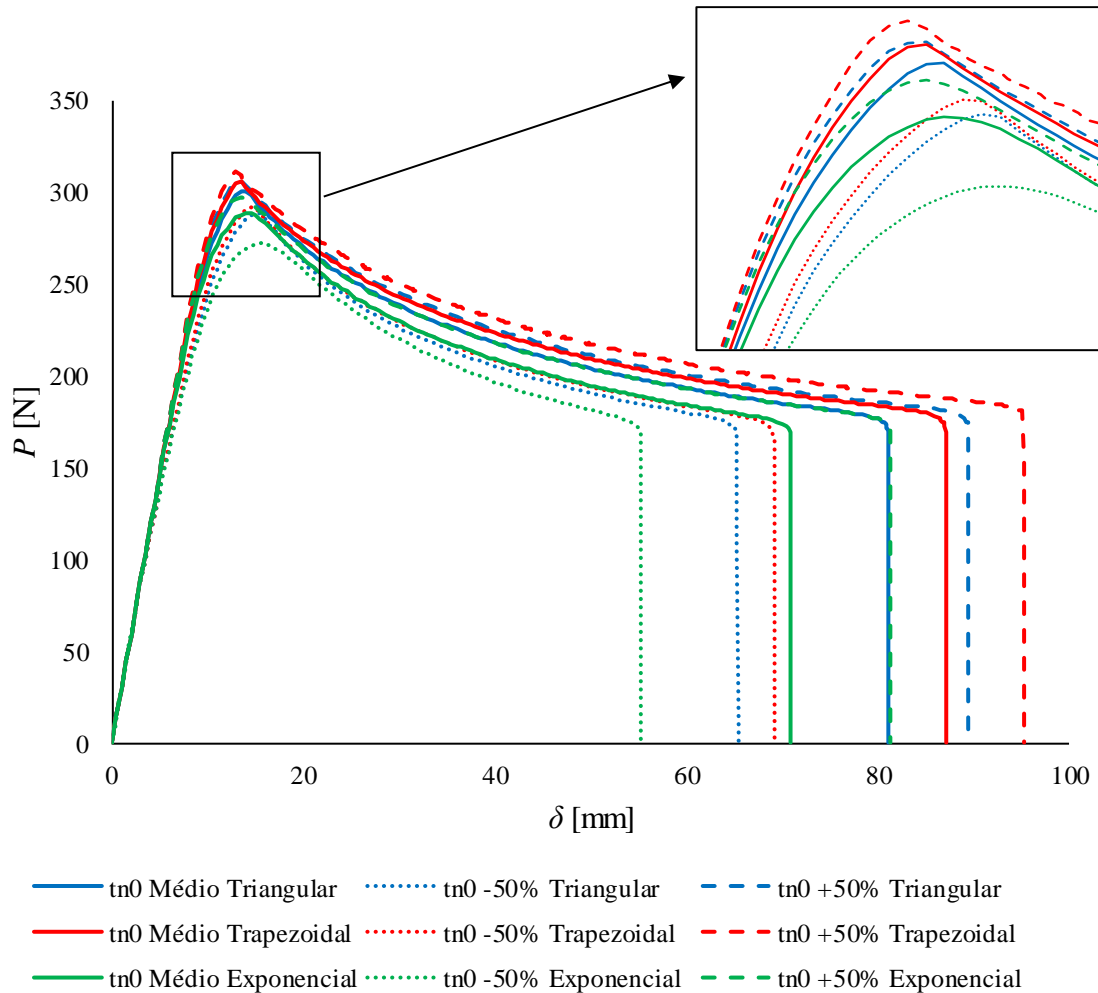


Figura 107 – Influência de  $t_n^0$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes DCB com o adesivo Sikaforce® 7752

Através da figura pode-se verificar que todas as leis iniciam com a mesma rigidez. No entanto, na segunda metade da curva antes de  $P_{\text{máx}}$ , há uma quebra de rigidez superior por parte das curvas com a lei exponencial. Como nos outros adesivos anteriormente discutidos, as curvas da lei trapezoidal mantêm a rigidez inicial praticamente até  $P_{\text{máx}}$ . Neste adesivo, as curvas  $P$ - $\delta$  apresentam um comportamento ligeiramente diferente em função da lei coesiva utilizada, na medida em que para o mesmo deslocamento, as leis triangular e exponencial tendem a apresentar menores do que  $P$ . Esta diferença também se reflete no

deslocamento de rotura final. Considera-se que este comportamento, que não se observou nos restantes dois adesivos, é induzido pelo grande grau de ductilidade deste adesivo. A variação de  $P_{\text{máx}}$  com  $t_n^0$  segue a tendência observada para os restantes dois adesivos, ou seja, maior redução de  $P_{\text{máx}}$  do que aumento com a variação análoga de  $t_n^0$ .

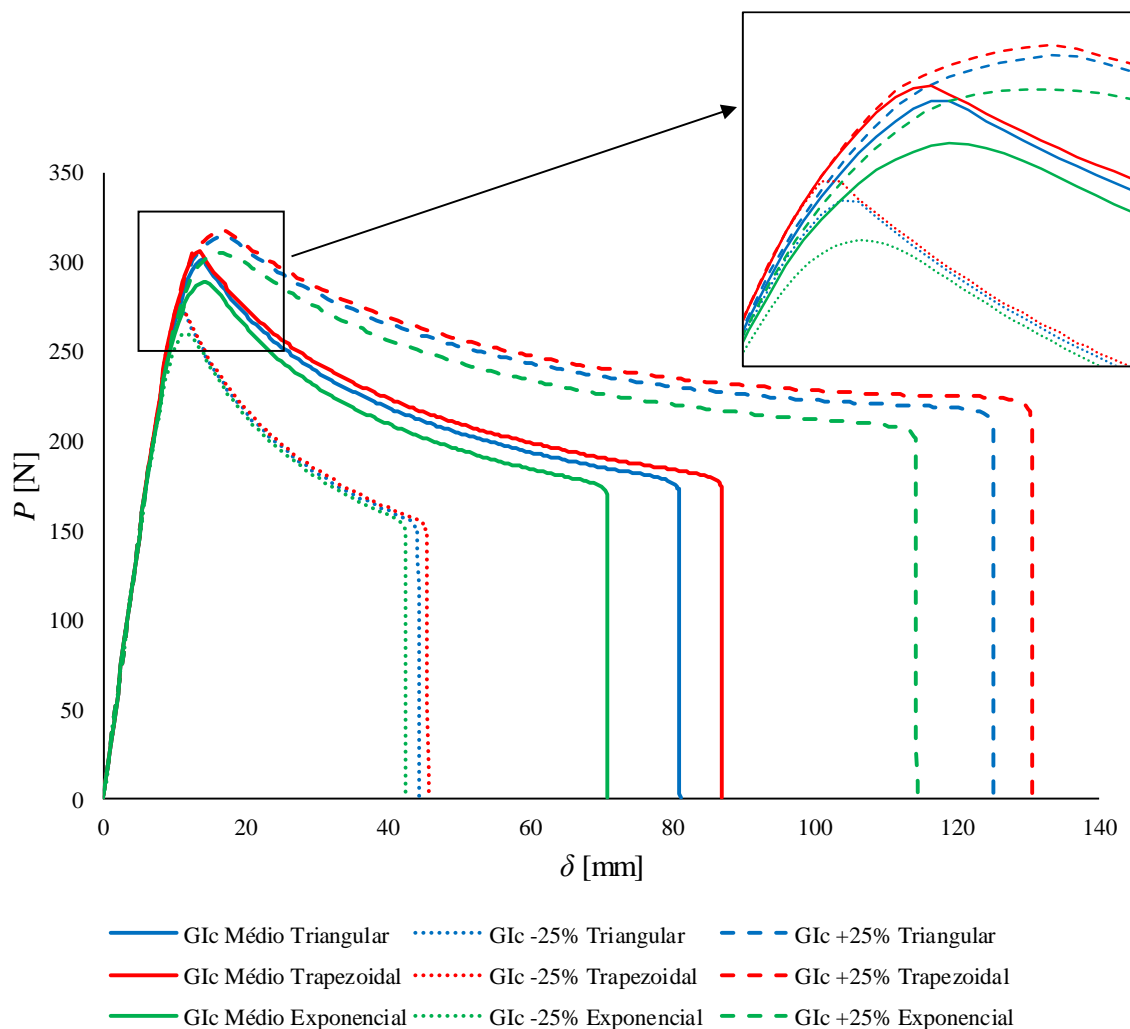


Figura 108 – Influência de  $G_{Ic}$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes DCB com o adesivo Sikaforce® 7752

As curvas  $P$ - $\delta$  apresentadas na Figura 108 representam a variação do parâmetro coesivo  $G_{Ic}$  relativamente ao valor médio de  $G_{Ic}$  obtido pelo método de integral- $J$  (ver Tabela 13), onde se comparam as três leis estudadas numericamente para este adesivo. A variação do valor médio de  $G_{Ic}$  tem um comportamento semelhante nos três tipos de leis abordados e para as duas variações realizadas, positivas e negativas. Os resultados mostram que  $G_{Ic}$  tem um efeito claro no deslocamento de  $P_{\text{máx}}$ , com o respetivo aumentar e diminuir do parâmetro, mantendo a rigidez até  $P_{\text{máx}}$ . Devido à grande ductilidade deste adesivo, o comportamento das curvas  $P$ - $\delta$  não é indiferente à forma da lei coesiva, de tal forma que a lei triangular e

especialmente a exponencial prevêem por defeito o valor de  $P$  na zona de propagação, conforme se verificou anteriormente com a variação de  $t_n^0$ . A diferença no amaciamento próximo de  $P_{máx}$  observada nas curvas originais mantém-se nas curvas obtidas pela variação de  $G_{Ic}$ .

#### 4.4.2 Ensaio ENF

##### 4.4.2.1 Araldite® AV138

Na Figura 109 é apresentado o estudo sobre a influência do parâmetro  $t_s^0$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de ensaios ENF utilizando o adesivo Araldite® AV138, considerando as leis coesivas triangular, trapezoidal e exponencial. Este estudo de sensibilidade consistiu na variação de +50% e -50% do valor de  $t_s^0$  médio representado na Tabela 17.

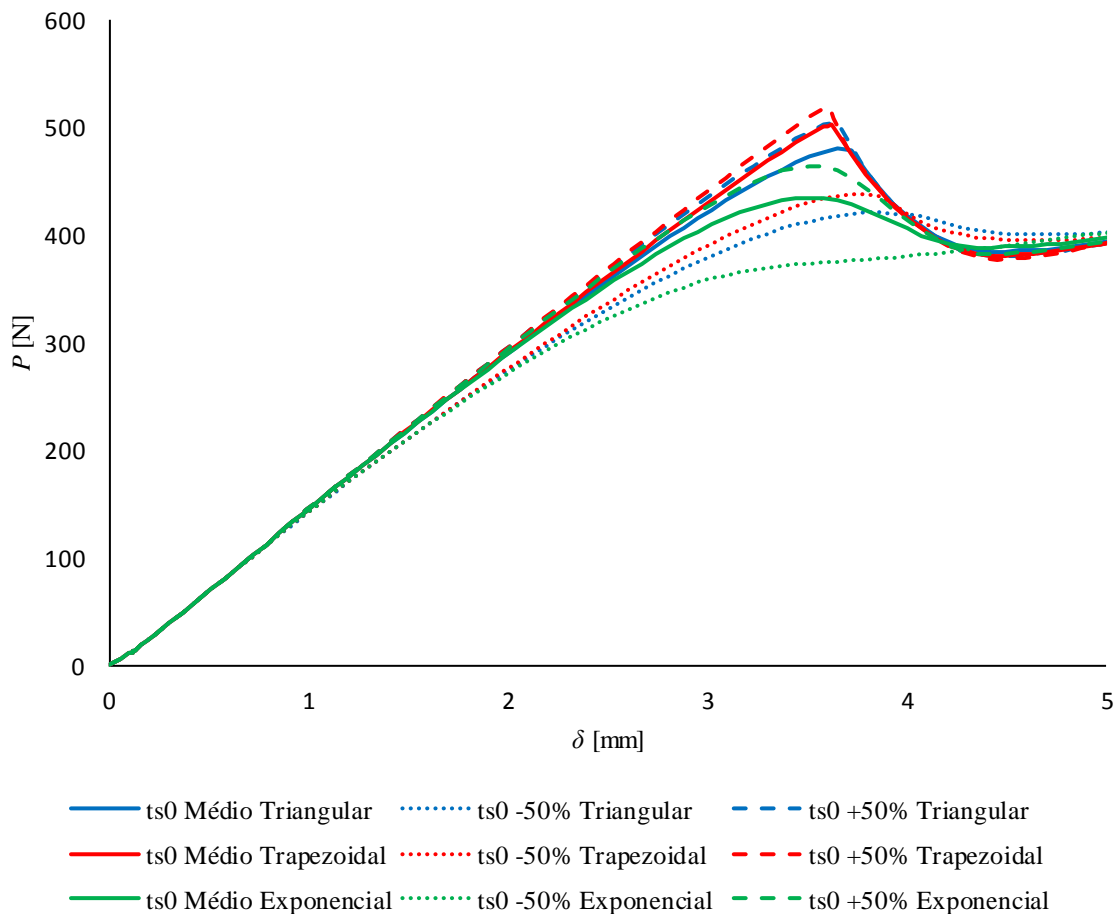


Figura 109 – Influência de  $t_s^0$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes ENF com o adesivo Araldite® AV138

Do gráfico da figura constata-se que influência de  $t_s^0$  afeta principalmente a rigidez da segunda metade da curva antes de  $P_{\text{máx}}$ , o que também se reflete neste valor. Nesta tipologia de provete também é claro que há mais influência na redução de  $t_s^0$  do que no seu aumento. De facto, o aumento de  $t_s^0$  tem um efeito muito menor, mas origina uma redução de  $P$  mais abrupta após  $P_{\text{máx}}$ , na região de propagação da fenda. As variações mencionadas são idênticas para as três leis consideradas.

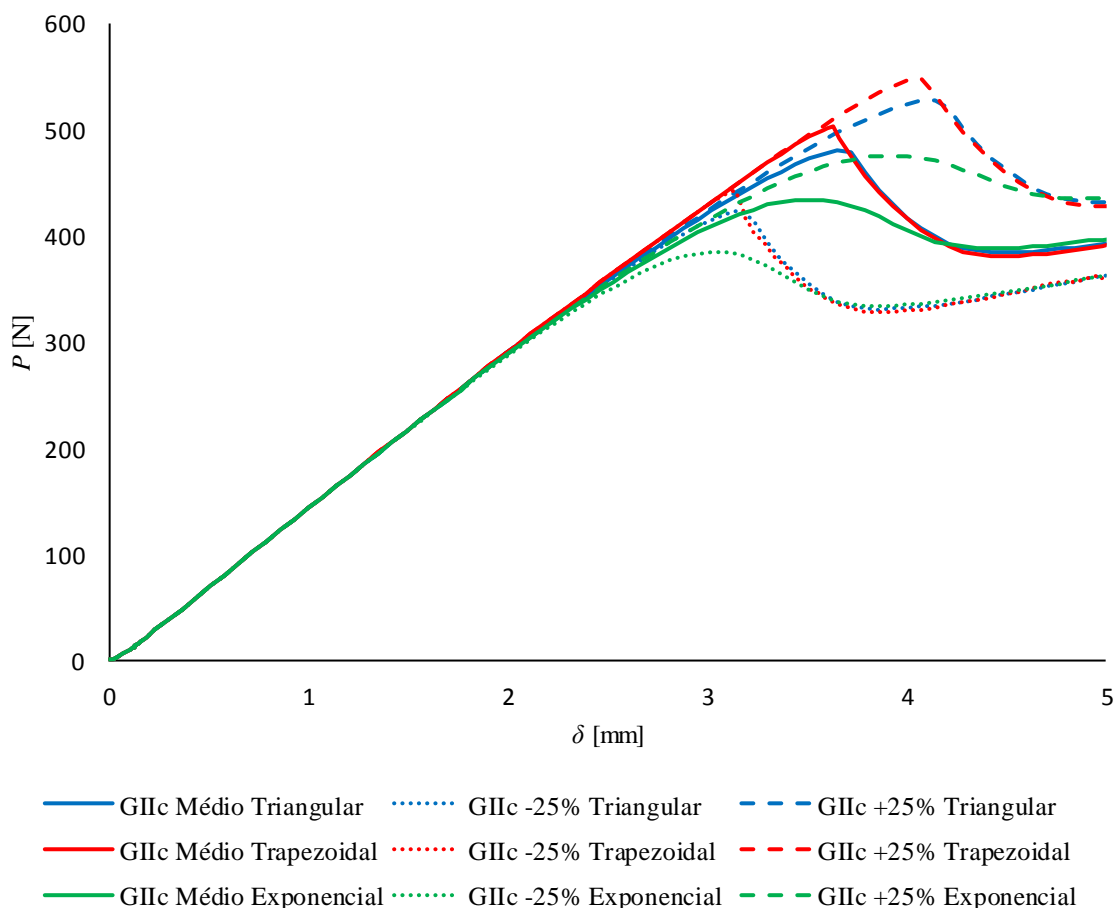


Figura 110 – Influência de  $G_{IIc}$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes ENF com o adesivo Araldite® AV138

A Figura 110 representa as curvas  $P$ - $\delta$  resultante da variação do valor de  $G_{IIc}$ , de -25% e +25% do valor médio de  $G_{IIc}$  descrito na Tabela 17. Assim, verifica-se que, independentemente da lei coesiva, a variação deste parâmetro se traduz na translação de  $P_{\text{máx}}$  paralelamente à rigidez inicial dos provetes sem modificação da rigidez até  $P_{\text{máx}}$ . Para as três leis coesivas, a redução de  $G_{IIc}$  provoca um amaciamento excessivo de  $P$  até  $P_{\text{máx}}$  e respetiva redução deste valor. Por outro lado, o aumento deste parâmetro traduz-se no aumento de rigidez elástica até  $P_{\text{máx}}$ , de tal forma que o comportamento até este ponto se torna

praticamente linear, e aumento ligeiro do valor de  $P_{\text{máx}}$ . Comparando as curvas  $P$ - $\delta$  para as diferentes leis coesivas, observa-se um comportamento idêntico para a redução e aumento de  $P_{\text{máx}}$ .

#### 4.4.2.2 Araldite® 2015

Na Figura 111 são analisados os resultados obtidos pelas curvas  $P$ - $\delta$  referentes aos provetes ENF com o adesivo Araldite® 2015, considerando leis triangulares, trapezoidais e exponenciais, e variações de  $t_s^0$  de -50% e +50%. O aumento de  $t_s^0$  traduz-se num aumento da rigidez elástica até  $P_{\text{máx}}$ , mais notória para a lei exponencial que apresenta um maior grau de amaciamento na proximidade de  $P_{\text{máx}}$ . Por outro lado, a redução de  $t_s^0$  afeta de forma mais significativa as curvas  $P$ - $\delta$  na medida em que se observa uma grande redução da rigidez elástica desde valores muito reduzidos de  $P$  o que também se reflete de forma direta no valor de  $P_{\text{máx}}$ .

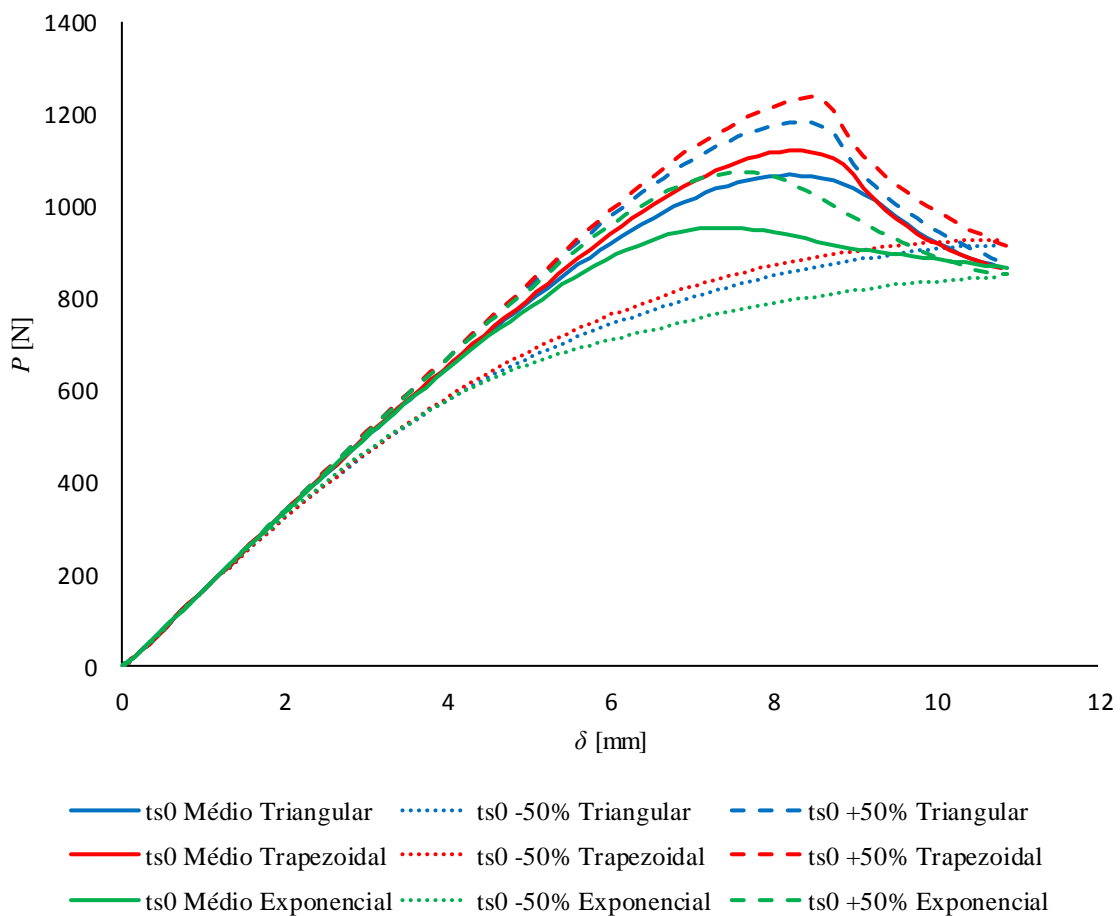


Figura 111 – Influência de  $t_s^0$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes ENF com o adesivo Araldite® 2015

A Figura 112 permite comparar as curvas  $P$ - $\delta$  para diferentes variações de  $G_{IIc}$ , de -25% e +25% do valor médio para este adesivo (Tabela 19). A variação de  $G_{IIc}$ , tal como observado nos adesivos anteriores, causa a translação de  $P_{máx}$  paralelamente à rigidez inicial das curvas. Independentemente da lei coesiva, a redução de  $G_{IIc}$  resulta num amaciamento de  $P$  antes de  $P_{máx}$  e respetiva redução de  $P_{máx}$ . Devido à ductilidade deste adesivo, observa-se também uma grande redução associada a  $\delta P_{máx}$ . O aumento de  $G_{IIc}$  resulta no acréscimo de rigidez elástica até  $P_{máx}$ , embora para este adesivo o comportamento não seja praticamente linear como era no Araldite® AV138. A acompanhar o aumento de rigidez elástica também se verifica um aumento ligeiro do valor de  $P_{máx}$ . As três leis coesivas apresentam um efeito similar nas curvas  $P$ - $\delta$  para as variações testadas de  $G_{IIc}$ .

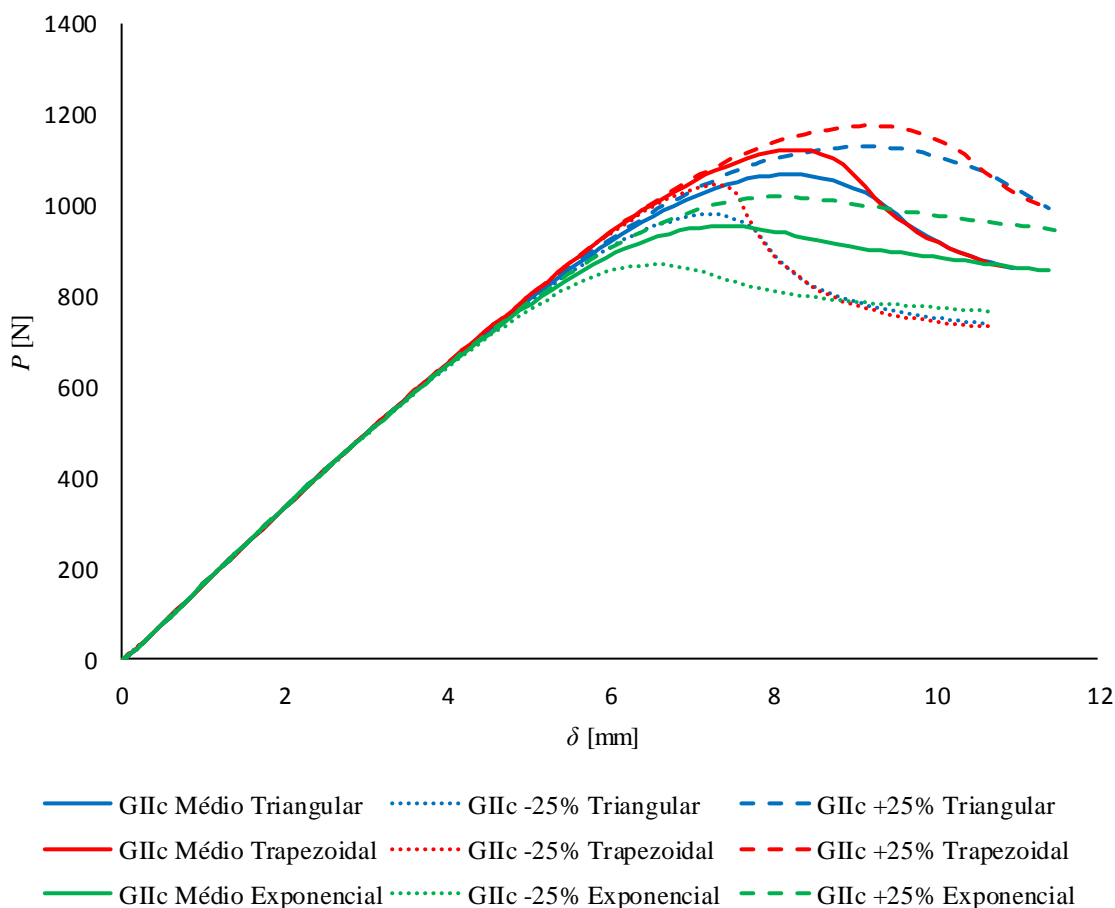


Figura 112 – Influência de  $G_{IIc}$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes ENF com o adesivo Araldite® 2015

### 4.4.2.3 Sikaforce® 7752

Na Figura 113 são apresentadas as curvas  $P-\delta$  dos provetes ENF com o adesivo Sikaforce® 7752 após variação de  $t_s^0$ , considerando o valor médio expresso na Tabela 21 e variações de +50% e -50% para as três leis coesivas abordadas. Observa-se que o efeito da variação da lei coesiva é basicamente idêntico aos adesivos anteriores, com a diferença do amaciamento significativo de  $P$  pouco antes de  $P_{\text{máx}}$  para este adesivo devido à sua ductilidade. Para este adesivo, o efeito da variação percentual idêntica positiva e negativa de  $t_s^0$  traduz-se em variações também elas muito similares no sentido do aumento de redução de  $P_{\text{máx}}$ , pela mesma ordem, o que é propiciado pela existência de amaciamento significativo, o que acontece em menor escala para os outros dois adesivos, especialmente o Araldite® AV138. O efeito é idêntico para as três leis coesivas.

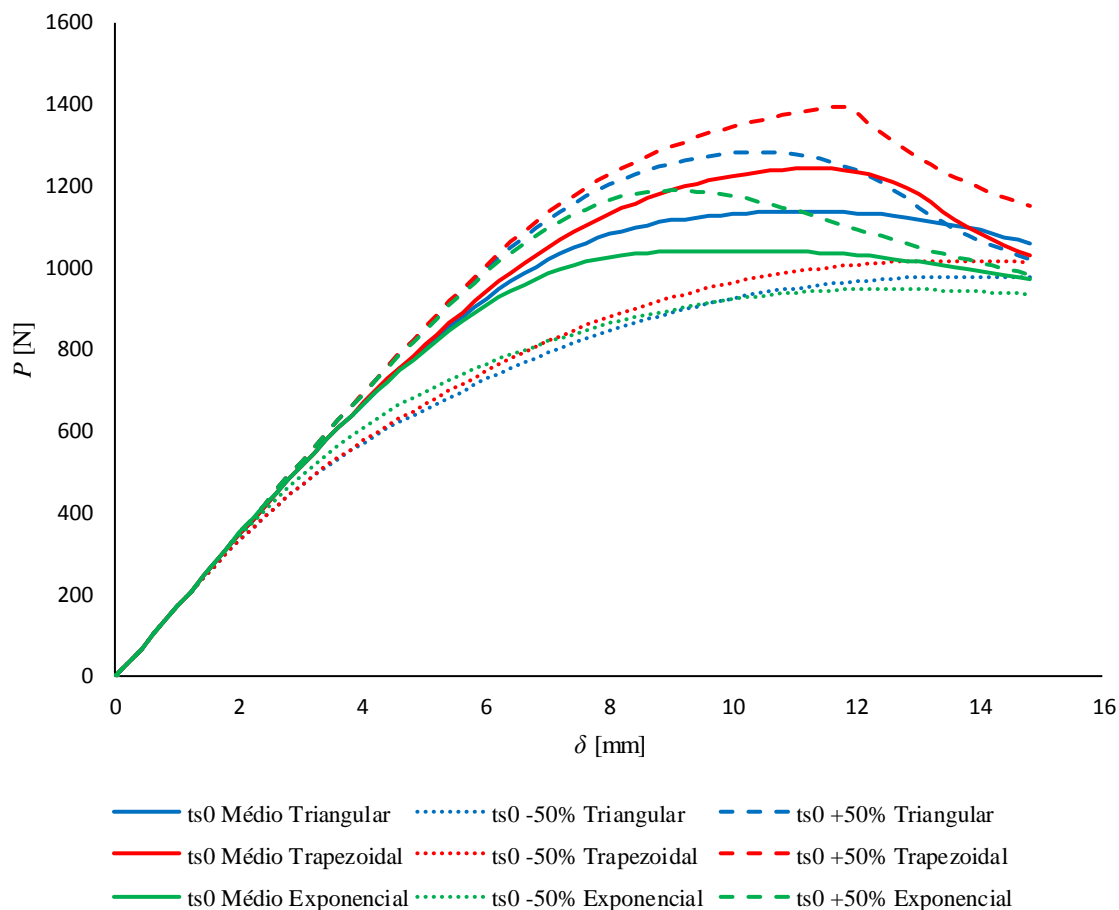


Figura 113 – Influência de  $t_s^0$  nas curvas  $P-\delta$  de provetes ENF com o adesivo Sikaforce® 7752

De seguida, estudou-se o efeito de  $G_{IIc}$  nas curvas  $P-\delta$ , considerando variações de +25% e -25% do valor médio expresso anteriormente na Tabela 21. A Figura 114 apresenta assim as curvas  $P-\delta$  para as três leis coesivas abordadas neste trabalho, onde se observa que as leis triangular e exponencial são afetadas por  $G_{IIc}$  na sua rigidez inicial antes de  $P_{máx}$ . Por outro lado, nas curvas  $P-\delta$  originais com as leis trapezoidais registam-se os valores de  $P_{máx}$  mais elevados, sem quebra de rigidez antes de  $P_{máx}$  induzida pela alteração de  $G_{IIc}$ . Nas curvas correspondentes às leis triangular e exponencial observa-se que  $G_{IIc}$  altera antes de  $P_{máx}$ . O aumento de  $G_{IIc}$  provoca o acréscimo do valor de  $P_{máx}$  assim como um aumento de  $\delta P_{máx}$ . Do mesmo modo, uma diminuição de  $G_{IIc}$  promove uma redução de  $P_{máx}$  e de  $\delta P_{máx}$ . Este comportamento é semelhante para todas as leis coesivas consideradas. O efeito da variação de  $G_{IIc}$  é semelhante entre as três leis coesivas estudadas.

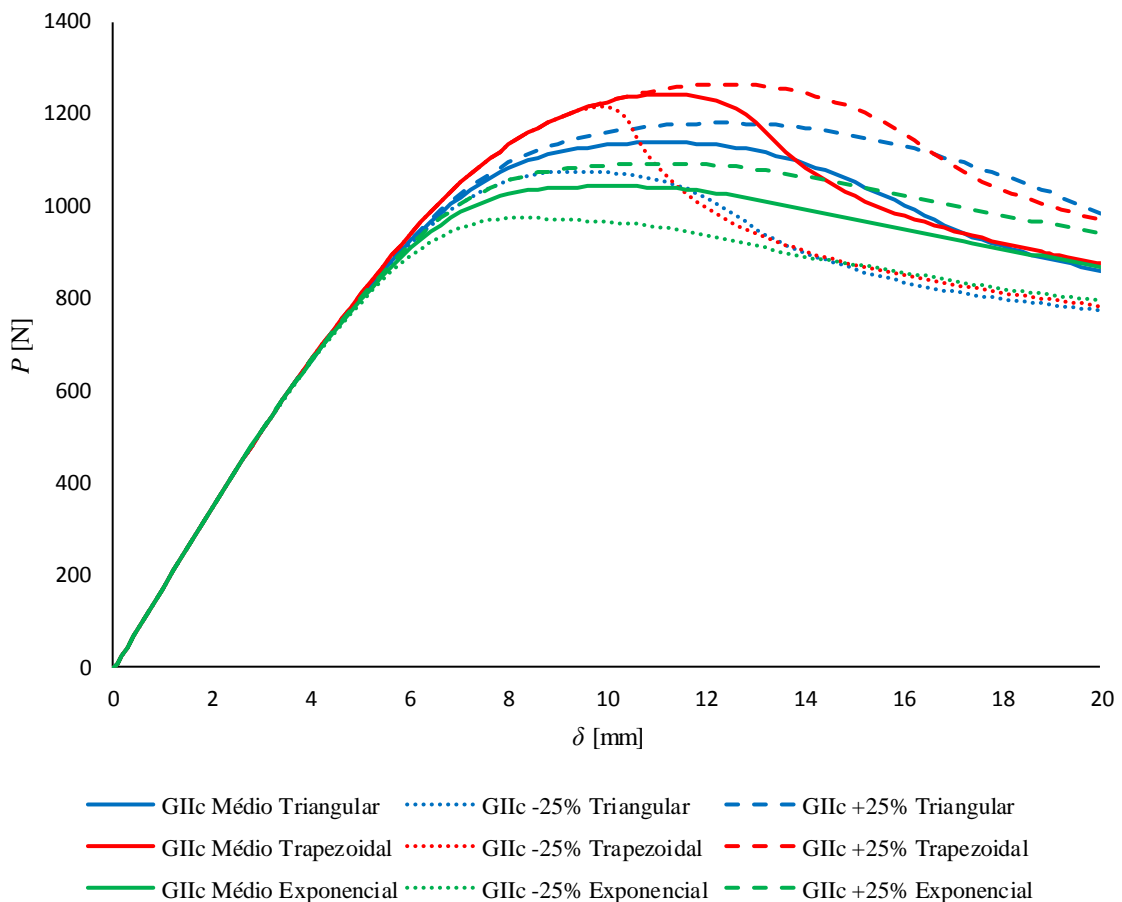


Figura 114 – Influência de  $G_{IIc}$  nas curvas  $P-\delta$  de provetes ENF com o adesivo Sikaforce® 7752



# 5 Conclusões

Esta dissertação foi realizada com o principal objetivo de estudar numericamente o efeito de três tipos de leis coesivas na previsão da resistência de juntas adesivas em provetes DCB e ENF, e respectiva comparação dos resultados obtidos com ensaios experimentais de trabalhos anteriores. Os adesivos selecionados para a determinação das leis coesivas foram o Araldite<sup>®</sup> AV138, que apresenta comportamento frágil, e os Araldite<sup>®</sup> 2015 e Sikaforce<sup>®</sup> 7752, de comportamento moderadamente dúctil e dúctil, respectivamente. A análise numérica realizada no *software* Abaqus<sup>®</sup> teve como propósito inicial a validação das leis coesivas obtidas pelo método direto, após aproximação destas a leis triangulares, trapezoidais e exponenciais. A comparação das curvas  $P$ - $\delta$  foi realizada em termos de rigidez inicial,  $P_{\text{máx}}$  e respectivo  $\delta P_{\text{máx}}$ .

Assim sendo, para os adesivos sujeitos à tração (DCB), para o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 as leis trapezoidal e triangular são as que melhor representam os resultados experimentais, registrando um erro percentual médio de  $P_{\text{máx}}$  de 4,38% e 7,69%, respectivamente, enquanto os valores  $\delta P_{\text{máx}}$  registam diferenças de 4,45% e 2,62%, pela mesma ordem. A lei exponencial apresentou resultados com grande discrepância, nomeadamente 13,55% para  $P_{\text{máx}}$  e 8,25% para  $\delta P_{\text{máx}}$ . No caso do Araldite<sup>®</sup> 2015, a lei triangular regista um erro percentual médio de  $P_{\text{máx}}$  de 2,49% e de  $\delta P_{\text{máx}}$  de 6,84%. As leis trapezoidais foram aquelas que se ajustaram mais a este adesivo, com erros percentuais médios de  $P_{\text{máx}}$  de 2,18%, e de  $\delta P_{\text{máx}}$  de 9,42%. A lei exponencial revelou erros ligeiramente superiores, que foram de 4,30% para  $P_{\text{máx}}$  e 6,61% para  $\delta P_{\text{máx}}$ . Quanto ao SikaForce<sup>®</sup> 7752, verifica-se, para a lei triangular, valores de erro percentual médio para  $P_{\text{máx}}$  de 2,16%, e de  $\delta P_{\text{máx}}$  de 3,44%. Para a lei trapezoidal registou-se um erro percentual médio para  $P_{\text{máx}}$  de 3,14% e, para  $\delta P_{\text{máx}}$ , de 6,07%. Pela lei exponencial regista-se um erro percentual médio para  $P_{\text{máx}}$  de 3,21% e, para  $\delta P_{\text{máx}}$ , de 3,37%.

As leis coesivas à tração obtidas pelo método direto confirmam o comportamento frágil do Araldite® AV138, cujo valor de  $P_{\text{máx}}$  pode ser modelado com alguma precisão com leis triangulares e trapezoidais, embora esta última seja mais adequada para adesivos dúcteis. Por outro lado, observou-se a discrepância dos resultados por modelação com lei exponencial. O Araldite® 2015 pode ser modelado por um MDC triangular ou trapezoidal com um grau de precisão aceitável. Tendo em conta a geometria da curva e a zona de  $P_{\text{máx}}$ , a lei trapezoidal é que se enquadra melhor na previsão de rotura do adesivo SikaForce® 7752.

Na previsão de adesivos sujeitos ao corte (ensaio ENF), para o adesivo Araldite® AV138, a lei triangular foi a que obteve melhores resultados na previsão da rotura, apresentando um erro percentual médio entre as curvas  $P$ - $\delta$  numéricas e experimentais de  $P_{\text{máx}}$  de 0,63% e de  $\delta P_{\text{máx}}$  de 1,48%. A lei trapezoidal resultou num desvio superior de  $P_{\text{máx}}$  (2,72%), embora o erro de  $\delta P_{\text{máx}}$  não registre a mesma tendência (0,64%). Ao contrário destas duas leis, a lei exponencial apresenta desvios assinaláveis de  $P_{\text{máx}}$  (10,16%) e de  $\delta P_{\text{máx}}$  (4,44%). No caso do Araldite® 2015, a lei trapezoidal foi a que se ajustou melhor aos dados experimentais, com erros percentuais médios de  $P_{\text{máx}}$  de 0,61%, e de 1,01% para  $\delta P_{\text{máx}}$ . A lei triangular apresentou erros de  $P_{\text{máx}}$  de 5,16% e de  $\delta P_{\text{máx}}$  de 1,41%. A lei exponencial registou os resultados mais díspares, nomeadamente 15,42% para  $P_{\text{máx}}$  e 11,14% para  $\delta P_{\text{máx}}$ . Quanto ao SikaForce® 7752, verifica-se também que os melhores resultados foram obtidos pela lei trapezoidal a lei trapezoidal, com um erro percentual médio para  $P_{\text{máx}}$  de 0,74% e, para  $\delta P_{\text{máx}}$ , de 8,42%. Já se observou alguma discrepância para a lei triangular (7,17% para  $P_{\text{máx}}$  e 10,48% para  $\delta P_{\text{máx}}$ ). No entanto, a maior discrepância ocorreu para a lei exponencial, com erro de  $P_{\text{máx}}$  de 14,41% e de  $\delta P_{\text{máx}}$  de 6,43%.

De acordo com os resultados ao corte, relativamente ao Araldite® AV138, a lei triangular volta a apresentar melhores resultados. Por outro lado, para adesivos dúcteis como é o caso do Araldite® 2015 e do SikaForce® 7752, lei trapezoidal é a que melhor prevê a rotura de forma mais aceitável, confirmando assim que esta é a lei que melhor caracteriza o comportamento de dano de adesivos tipicamente dúcteis.

Foi também realizada um análise de influência dos parâmetros coesivos, a fim a estudar a sensibilidade de cada lei coesiva, triangular, trapezoidal e exponencial, aplicada aos três adesivos em análise. Consideraram-se variações de  $t_n^0$  e  $t_s^0$  de +50% e -50% do valor inicial

médio de cada adesivo, e variações de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  de +25% e -25% igualmente do seu valor inicial médio. Para o ensaio DCB com o adesivo Araldite® AV138, com o aumento de  $t_n^0$  observa-se um aumento de  $P_{máx}$  associado ao aumento da rigidez elástica do provete, enquanto com a variação de  $t_n^0$  de -50%, se constata ocorrer uma redução assinalável de rigidez antes de ser atingido  $P_{máx}$ . Deste modo observou-se que a variação de  $t_n^0$  afeta principalmente a rigidez da segunda metade das curvas  $P-\delta$ , antes do pico ser alcançado. Este comportamento foi idêntico para os três tipos de leis coesivas testadas. Por outro lado, a variação de  $G_{Ic}$  teve um efeito idêntico nos três tipos de leis, tanto no aumento assim como na redução do parâmetro, na medida em que se observa um aumento ou diminuição de  $P_{máx}$  com variações análogas de  $G_{Ic}$  sem alteração da rigidez até  $P_{máx}$ . Para os restantes dois adesivos, as variações registadas foram bastantes semelhantes, embora com as diferentes decorrentes da maior ductilidade dos adesivos, o que teve influencia mais significativo no amaciamento próximo de  $P_{máx}$ .

Considerando agora o ensaio ENF, observou-se que  $t_s^0$  influencia principalmente a rigidez da segunda metade da curva antes de  $P_{máx}$ , o que também se reflete em  $P_{máx}$ . O aumento da rigidez e  $P_{máx}$  para o adesivo frágil foi bastante reduzido para aumentos de  $t_s^0$ , comparando com o comportamento oposto pela redução de  $t_s^0$ . Por outro lado, com o aumento da ductilidade do adesivo, o efeito para aumentos e diminuições de  $t_s^0$  torna-se mais uniforme. Este comportamento é transversal ao tipo de lei estudada.

O efeito da variação de  $G_{IIc}$ , independentemente da lei coesiva, traduz-se na translação de  $P_{máx}$  sem alteração da rigidez inicial dos provetes até  $P_{máx}$ . De uma forma geral, a redução de  $G_{IIc}$  provoca uma redução prematura da rigidez antes de  $P_{máx}$  e respetiva redução deste valor. O aumento de  $G_{IIc}$  resulta no acréscimo de rigidez elástica até  $P_{máx}$ , até uma relação praticamente linear entre  $P$  e  $\delta$ , com respetivo aumento de  $P_{máx}$ . O comportamento é idêntico para as curvas  $P-\delta$  das diferentes leis coesivas. Também entre adesivos de diferente ductilidade o comportamento se mantém inalterado, embora com adesivos mais dúcteis não seja possível obter as relações praticamente lineares entre  $P$  e  $\delta$  que se registaram para o adesivo frágil.

Com a realização desta dissertação, foi possível compreender em detalhe qual o tipo de lei coesiva mais adequada para modelar adesivos desde frágeis até dúcteis em tração e corte, bem como os desvios espectáveis pela utilização de leis que não são tao adequadas ao comportamento do adesivo.

Relativamente a trabalhos futuros, podem ser abordados os seguintes temas:

- Estudo numérico da adequação de diferentes tipos de leis coesivas na previsão da resistência de juntas adesivas por MDC em JSS;
- Estudo numérico da capacidade dos diferentes tipos de leis coesivas na previsão da resistência de juntas adesivas em modo misto por MDC, após a criação de um modelo de dano misto, em função das leis de tração e de corte;
- Estudo da influência de  $t_A$  nas leis coesivas obtidas pelo método direto;
- Estudo numérico de juntas adesivas DCB e ENF por MEFX, para tentativa de calibração dos parâmetros das leis de dano e respetiva reprodução dos resultados experimentais.

## Referências

- Campilho et al. (2014)Abaqus® (2013). Documentation. D. Systèmes, Vélizy-Villacoublay.
- Adams, R. D., Comyn, J. e Wake, W. C. (1997). *Structural Adhesive Joints in Engineering*, Springer.
- Adams, R. D. e Peppiatt, N. A. (1974). "Stress analysis of adhesive-bonded lap joints." *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* **9**(3): 185-196.
- Alfano, G. e Crisfield, M. A. (2001). "Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues." *International Journal for Numerical Methods in Engineering* **50**(7): 1701-1736.
- Allix, O. e Corigliano, A. (1996). "Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens." *International Journal of Fracture* **77**(2): 111-140.
- Andersson, T. e Stigh, U. (2004). "The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces." *International Journal of Solids and Structures* **41**(2): 413-434.
- ASTM (2002). *The Composite Materials Handbook-MIL 17: Polymer matrix composites: materials usage, design, and analysis*, ASTM Int.
- ASTM D3433-99 (2012). *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- ASTM D5573-99 (2012). *Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints* ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- ASTM E8M (2004). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials* ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Azevedo, J. C. S. A. (2014). *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Noched Flexure (ENF)*. Tese de mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Barenblatt, G. I. (1959). "The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks." *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* **23**(3): 622-636.
- Bartczak, B., Mucha, J. e Trzepieciński, T. (2013). "Stress distribution in adhesively-bonded joints and the loading capacity of hybrid joints of car body steels for the automotive industry." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **45**: 42-52.
- Belytschko, T. e Black, T. (1999). "Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing." *International Journal for Numerical Methods in Engineering* **45**(5): 601-620.
- Blackman, B. R. K., Brunner, A. J. e Williams, J. G. (2006). "Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem." *Engineering Fracture Mechanics* **73**(16): 2443-2455.

- Campilho, R. D. S. G., Banea, M. D., Neto, J. A. B. P. e da Silva, L. F. M. (2012). "Modelling of Single-Lap Joints Using Cohesive Zone Models: Effect of the Cohesive Parameters on the Output of the Simulations." *The Journal of Adhesion* **88**(4-6): 513-533.
- Campilho, R. D. S. G., Banea, M. D., Neto, J. A. B. P. e da Silva, L. F. M. (2013). "Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **44**: 48-56.
- Campilho, R. D. S. G., Banea, M. D., Pinto, A. M. G., da Silva, L. F. M. e de Jesus, A. M. P. (2011). "Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **31**(5): 363-372.
- Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F. e Domingues, J. J. M. S. (2005). "Modelling single and double-lap repairs on composite materials." *Composites Science and Technology* **65**(13): 1948-1958.
- Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F. e Domingues, J. J. M. S. (2007). "Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model." *Journal of Adhesion Science and Technology* **21**(9): 855-870.
- Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F. e Domingues, J. J. M. S. (2008). "Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs." *International Journal of Solids and Structures* **45**(5): 1497-1512.
- Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F., Pinto, A. M. G., Morais, J. J. L. e Domingues, J. J. M. S. (2009). "Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs." *Composites Part B: Engineering* **40**(2): 149-157.
- Campilho, R. D. S. G., Moura, D. C., Banea, M. D. e da Silva, L. F. M. (2014). "Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **53**: 15-22.
- Campilho, R. D. S. G., Moura, D. C., Banea, M. D. e da Silva, L. F. M. (2015). "Adhesive thickness effects of a ductile adhesive by optical measurement techniques." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **57**: 125-132.
- Campilho, R. D. S. G., Moura, D. C., Gonçalves, D. J. S., da Silva, J. F. M. G., Banea, M. D. e da Silva, L. F. M. (2013). "Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites." *Composites Part B: Engineering* **50**: 120-126.
- Campilho, R. D. S. G., Pinto, A. M. G., Banea, M. D. e da Silva, L. F. M. (2012). "Optimization study of hybrid spot-welded/bonded single-lap joints." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **37**: 86-95.
- Carlberger, T. e Stigh, U. (2007). "An explicit FE-model of impact fracture in an adhesive joint." *Engineering Fracture Mechanics* **74**(14): 2247-2262.
- Carlberger, T. e Stigh, U. (2010). "Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study." *The Journal of Adhesion* **86**(8): 816-835.
- Chai, H. (1992). "Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds." *Experimental Mechanics* **32**(4): 296-303.
- Chandra, N., Li, H., Shet, C. e Ghonem, H. (2002). "Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces." *International Journal of Solids and Structures* **39**(10): 2827-2855.

- Chen, J. (2002). "Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models." *Journal of Thermoplastic Composite Materials* **15**(5): 429-442.
- Chen, Z., Adams, R. D. e da Silva, L. F. M. (2011). "Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion." *Engineering Fracture Mechanics* **78**(6): 990-1007.
- Constante, C. J. (2014). Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Constante, C. J., Campilho, R. D. S. G. e Moura, D. C. (2015). "Tensile fracture characterization of adhesive joints by standard and optical techniques." *Engineering Fracture Mechanics* **136**: 292-304.
- Curiel Sosa, J. L. e Karapurath, N. (2012). "Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method." *Composites Science and Technology* **72**(7): 788-791.
- da Silva, L. F. e Figueiredo, M. (2006). "Influence of the adhesive, the adherend and the overlap on the single lap shear strength." *Journal of Adhesion and Interface* **7**(4): 1-9.
- da Silva, L. F. M. e Campilho, R. D. S. G. (2011). *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*, Springer.
- da Silva, L. F. M., de Magalhães, A. G. e de Moura, M. F. S. F. (2007). *Juntas Adesivas Estruturais*. Porto, Publindústria.
- da Silva, L. F. M., Magalhães, A. G. e Moura, M. F. S. F. (2007). *Juntas Adesivas Estruturais*. Porto, Publindústria.
- Daudeville, L. e Ladevèze, P. (1993). "A damage mechanics tool for laminate delamination." *Composite Structures* **25**(1): 547-555.
- de Moura, M., Gonçalves, J., Marques, A. e De Castro, P. (2000). "Prediction of compressive strength of carbon–epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model." *Composite Structures* **50**(2): 151-157.
- de Moura, M. F. S. F., Campilho, R. D. S. G. e Gonçalves, J. P. M. (2008). "Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading." *Composites Science and Technology* **68**(10–11): 2224-2230.
- de Moura, M. F. S. F., Campilho, R. D. S. G. e Gonçalves, J. P. M. (2009). "Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints." *International Journal of Solids and Structures* **46**(6): 1589-1595.
- Devries, K. L. e Adams, D. O. (2002). Chapter 6 - Mechanical testing of adhesive joints. *Adhesion Science and Engineering*. M. C. V. Pocius. Amsterdam, Elsevier Science B.V.: 193-234.
- Duan, K., Hu, X. e Mai, Y.-W. (2004). "Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints." *Journal of Adhesion Science and Technology* **18**(1): 39-53.
- Dugdale, D. S. (1960). "Yielding of steel sheets containing slits." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **8**(2): 100-104.
- ECSS (2011). *Space engineering - Adhesive bonding handbook*. Noordwijk, The Netherlands, ECSS - European Cooperation For Space.

- Faneco, T. M. d. S. (2014). Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Fernlund, G. e Spelt, J. K. (1991). "Failure load prediction of structural adhesive joints." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **11**(4): 221-227.
- Flinn, B. D., Lo, C. S., Zok, F. W. e Evans, A. G. (1993). "Fracture Resistance Characteristics of a Metal-Toughened Ceramic." *Journal of the American Ceramic Society* **76**(2): 369-375.
- Gonçalves, J. P. M., de Moura, M. F. S. F. e de Castro, P. M. S. T. (2002). "A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **22**(5): 357-365.
- Griffith, A. A. (1921). "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **221**(582-593): 163-198.
- Gustafson, P. A. e Waas, A. M. (2009). "The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints." *International Journal of Solids and Structures* **46**(10): 2201-2215.
- Harris, J. A. e Adams, R. A. (1984). "Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **4**(2): 65-78.
- Henkel, C. (2011). *Design Guide for Bonding Plastics*, Henkel Corporation.
- Hua, Y., Crocombe, A. D., Wahab, M. A. e Ashcroft, I. A. (2008). "Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **28**(6): 302-313.
- Hutchinson, J. (1968). "Plastic stress and strain fields at a crack tip." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **16**(5): 337-342.
- Imanaka, M., Hamano, T., Morimoto, A., Ashino, R. e Kimoto, M. (2003). "Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive." *Journal of Adhesion Science and Technology* **17**(7): 981-994.
- Ji, G., Ouyang, Z., Li, G., Ibekwe, S. e Pang, S.-S. (2010). "Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints." *International Journal of Solids and Structures* **47**(18-19): 2445-2458.
- Jung Lee, M., Min Cho, T., Seock Kim, W., Chai Lee, B. e Ju Lee, J. (2010). "Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **30**(5): 322-328.
- Kafkalidis, M. S. e Thouless, M. D. (2002). "The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints." *International Journal of Solids and Structures* **39**(17): 4367-4383.
- Kattan, P. I. e Voyiadjis, G. Z. (2001). *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*, Springer Berlin Heidelberg.
- Khoramishad, H., Crocombe, A. D., Katnam, K. B. e Ashcroft, I. A. (2010). "Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model." *International Journal of Fatigue* **32**(7): 1146-1158.

- Lee, D.-B., Ikeda, T., Miyazaki, N. e Choi, N.-S. (2004). "Effect of Bond Thickness on the Fracture Toughness of Adhesive Joints." *Journal of Engineering Materials and Technology* **126**(1): 14-18.
- Leffler, K., Alfredsson, K. S. e Stigh, U. (2007). "Shear behaviour of adhesive layers." *International Journal of Solids and Structures* **44**(2): 530-545.
- Leger, R., Roy, A. e Grandidier, J. C. (2013). "A study of the impact of humid aging on the strength of industrial adhesive joints." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **44**: 66-77.
- Leitão, A. C. C. (2015). Aplicação de um método de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fratura em corte de adesivos estruturais. Tese de mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Li, S., Thouless, M. D., Waas, A. M., Schroeder, J. A. e Zavattieri, P. D. (2005). "Use of a cohesive-zone model to analyze the fracture of a fiber-reinforced polymer–matrix composite." *Composites Science and Technology* **65**(3–4): 537-549.
- Liljedahl, C. D. M., Crocombe, A. D., Wahab, M. A. e Ashcroft, I. A. (2006). "Damage modelling of adhesively bonded joints." *International Journal of Fracture* **141**(1-2): 147-161.
- Mello, A. W. e Liechti, K. M. (2004). "The Effect of Self-Assembled Monolayers on Interfacial Fracture." *Journal of Applied Mechanics* **73**(5): 860-870.
- Moës, N., Dolbow, J. e Belytschko, T. (1999). "A finite element method for crack growth without remeshing." *International Journal for Numerical Methods in Engineering* **46**(1): 131-150.
- Mohammadi, S. (2008). *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*, Wiley.
- Montes, J. R., Martinez, L. C. e Romero, J. C. R. (2006). *Procesos industriales para materiales no metálicos*, Editorial Visión Libros.
- Neto, J. A. B. P., Campilho, R. D. S. G. e da Silva, L. F. M. (2012). "Parametric study of adhesive joints with composites." *International Journal of Adhesion and Adhesives* **37**: 96-101.
- Owens, J. F. P. (1998). *Studies on Stiffness and Fracture Behaviour in Adhesively Bonded Composite-to-metal Shear Joints*.
- Packham, D. E. (2005). *Handbook of Adhesion*. Handbook of Adhesion, John Wiley & Sons, Ltd.
- Pandya, K. C. e Williams, J. G. (2000). "Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene." *Polymer Engineering & Science* **40**(8): 1765-1776.
- Panigrahi, S. K. e Pradhan, B. (2007). "Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* **26**(2): 183-201.
- Pardoen, T., Ferracin, T., Landis, C. M. e Delannay, F. (2005). "Constraint effects in adhesive joint fracture." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **53**(9): 1951-1983.
- Petrie, E. W. (2000). *Handbook of Adhesives and Sealants* 2nd ed, New York, N.Y.
- Pinto, A. M. G. (2007). *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. Tese de doutoramento.

- Pinto, A. M. G., Magalhães, A. G., Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F. e Baptista, A. P. M. (2009). "Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive." *The Journal of Adhesion* **85**(6): 351-376.
- Raghavan, P. e Ghosh, S. (2005). "A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding." *Mechanics of Materials* **37**(9): 955-979.
- Rice, J. R. (1968). "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks." *Journal of Applied Mechanics* **35**(2): 379-386.
- Shenoy, V., Ashcroft, I. A., Critchlow, G. W. e Crocombe, A. D. (2010). "Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue." *Engineering Fracture Mechanics* **77**(7): 1073-1090.
- Stigh, U., Alfredsson, K. S., Andersson, T., Biel, A., Carlberger, T. e Salomonsson, K. (2010). "Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers." *International Journal of Fracture* **165**(2): 149-162.
- Troughton, M. (2008). *Handbook of plastics joining: a practical guide*. United States of America, William Andrew Inc.
- Turon, A., Costa, J., Camanho, P. P. e Dávila, C. G. (2007). "Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **38**(11): 2270-2282.
- Turon, A., Dávila, C. G., Camanho, P. P. e Costa, J. (2007). "An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models." *Engineering Fracture Mechanics* **74**(10): 1665-1682.
- Volkersen, O. (1938). "Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten." *Luftfahrtforschung* **15**: 41-47.
- Wahab, M. M. A., Ashcroft, I. A., Crocombe, A. D. e Shaw, S. J. (2001). "Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics." *Journal of Adhesion Science and Technology* **15**(7): 763-781.
- Williams, M. L. (1959). "The stresses around a fault or crack in dissimilar media." *Bulletin of the Seismological Society of America* **49**(2): 199-204.
- Yang, Q. D. e Thouless, M. D. (2001). "Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints." *International Journal of Fracture* **110**(2): 175-187.
- Yang, Q. D., Thouless, M. D. e Ward, S. M. (1999). "Numerical simulations of adhesively-bonded beams failing with extensive plastic deformation." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **47**(6): 1337-1353.
- Yoshihara, H. (2004). "Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test." *Engineering Fracture Mechanics* **71**(13-14): 2065-2077.
- Zhu, Y., Liechti, K. M. e Ravi-Chandar, K. (2009). "Direct extraction of rate-dependent traction-separation laws for polyurea/steel interfaces." *International Journal of Solids and Structures* **46**(1): 31-51.