

# Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido

João Pedro Martins da Silva

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

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



Outubro 2012



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

Candidato: João Pedro Martins da Silva, N°1090071, 1090071@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Professor Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto, AGP@isep.ipp.pt

Coorientação: Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho,  
RDS@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo Construções Mecânicas

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



Outubro 2012



*Aos meus Pais e Irmãos...*



## *Agradecimentos*

Eu gostaria de agradecer à minha família e aos meus amigos pelo apoio durante estes anos pela privação de convívio que por vezes lhes possa ter causado. Também gostaria de aproveitar esta secção para expressar os meus sinceros agradecimentos às seguintes pessoas, pela orientação ou contribuição técnica e apoio em algum momento deste trabalho.

- Professor Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto (orientador)
- Professor Doutor Duarte Salgueiral Gomes Campilho (coorientador)
- Engenheiro Vítor Ribeiro
- Engenheiro Victor Moreira
- Carlos Costa
- David Silva
- Isabel Da Cunha
- Nuno Ribeiro
- Sylvie Da Cunha

Gostaria também de agradecer ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) e ao Laboratório de Adesivos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) pela disponibilização do espaço e equipamentos que se revelaram fundamentais para a realização do trabalho.



## *Resumo*

A reparação de estruturas é um tema de primordial importância, por forma a evitar a sua substituição após a existência de dano, na medida em que permite uma redução substancial de custos associados. Entre os métodos mais comuns de reparação encontram-se a aplicação de remendos aparafusados ou as reparações adesivas. Estas últimas permitem uma diminuição das concentrações de tensões e uma aplicação mais simples, entre outras vantagens.

O objetivo do tema de mestrado proposto é o estudo experimental e numérico de reparações adesivas para estruturas de alumínio pela técnica do remendo embebido. A parte experimental do trabalho consiste na fabricação e teste à tração de reparações em escala reduzida em função de alguns parâmetros pré-definidos como o ângulo das superfícies de contacto e o adesivo a utilizar, no sentido de otimização das respetivas reparações. O trabalho numérico consiste na simulação em software de Elementos Finitos ABAQUS<sup>®</sup> das várias soluções testadas, para avaliação da distribuição de campos de tensões e previsão da rotura das reparações por remendo embebido.

No global, observou-se uma elevada correlação entre os resultados experimentais e as previsões numéricas, o que valida a ferramenta numérica utilizada para efeitos de previsão da rotura para reparações de remendo embebido e a utilização do mesmo para a escolha do melhor ângulo a utilizar em função da restituição de resistência pretendida.

### *Palavras-Chave*

Reparações adesivas, Adesivos epóxico, Simulação numérica.



## *Abstract*

The repair of structures is an issue of paramount importance to avoid their replacement after sustaining damage allowing a substantial cost reduction. Among the most common repair methods are the mechanically fastened and bonded repairs. The latter allow a reduction in stress concentrations and a simpler implementation, between other advantages.

The objective of the present thesis is the experimental and numerical study of adhesively-bonded repairs to aluminum structures by the *scarf* repair technique. The experimental part of the work consists in manufacturing and tensile testing of small-scale repairs with variation of some pre-defined parameters such as the scarf angle, in order to optimize the respective repairs. The numerical work consists in the simulation by the ABAQUS<sup>®</sup> finite element software of the various solutions tested, to assess the distribution of stress fields and prediction of failure of the scarf repairs.

Overall, there was a good correlation between the experimental results and numerical predictions, which validates the numerical tool used for the strength prediction of scarf repairs and the use thereof this technique for choosing the best scarf angle to be used according to the required strength..

### ***Keywords***

Adhesive repairs, Epoxy adhesives, Numerical analysis.



## *Résumé*

La réparation de structures est un thème d'importance primordiale, de manière à éviter leur remplacement après l'existence d'un dommage, dans la mesure où cela permet une réduction substantiel des coûts associés. Entre les méthodes plus communes de réparations, se trouvent l'application de rustines vissées ou les réparations adhésives. Ces dernières permettent une diminution des concentrations de tensions et une application plus simple, entre autres avantages.

L'objectif du thème de master proposé est l'étude expérimentale et numérique de réparations adhésives pour des structures d'aluminium avec la technique également en rampe. La partie expérimentale de ce travail consiste en sa fabrication et teste la traction des réparations à échelle réduite en fonction de quelques paramètres pré-définis comme l'angle des superficies de contact et l'adhésif à utiliser, dans le sens de l'optimisation des respectives réparations. Le travail numérique consiste dans la simulation avec le logiciel software Éléments Finis ABAQUS® des différentes solutions testées, pour l'évaluation de la distribution des champs de tensions et la prévision de la rupture des réparations par également en rampe.

Dans l'ensemble, il a été observé une forte corrélation entre les résultats expérimentaux et les prévisions numériques, ce qui valide l'outil numérique utilisé pour les effets de prévision de rupture pour les réparations de également en rampe et son utilisation pour le choix du meilleur angle à utiliser en fonction de la restitution de la résistance souhaitée.

### ***Mots-clés***

Réparations adhésives, Adhésifs epoxy, Simulation numérique.



# Índice

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Agradecimentos .....</b>                                     | <b>i</b>    |
| <b>Resumo .....</b>   | <b>iii</b>  |
| <b>Abstract .....</b>   | <b>v</b>    |
| <b>Résumé.....</b>  | <b>vii</b>  |
| <b>Índice .....</b>   | <b>ix</b>   |
| <b>Índice de figuras .....</b>                                  | <b>xi</b>   |
| <b>Índice de tabelas .....</b>                                  | <b>xvii</b> |
| <b>Nomenclatura.....</b>  | <b>xix</b>  |
| <b>Abreviaturas .....</b>                                       | <b>xxi</b>  |
| <b>1. Introdução.....</b>                                       | <b>1</b>    |
| <b>2. Revisão Bibliográfica .....</b>                           | <b>3</b>    |
| 2.1. Introdução às ligações adesivas .....                      | 4           |
| 2.2. Tipos de reparações com ligações adesivas .....            | 8           |
| 2.3. Previsão numérica da resistência em ligações adesivas..... | 11          |
| <b>3. Trabalho Experimental.....</b>                            | <b>15</b>   |
| 3.1. Materiais .....  | 16          |
| 3.1.1. Substratos e remendos .....                              | 16          |
| 3.1.2. Adesivos .....   | 17          |
| 3.2. Reparções 2D .....   | 18          |
| 3.2.1. Dimensões e geometria .....                              | 18          |
| 3.2.2. Maquinagem.....  | 18          |
| 3.2.3. Fabrico dos provetes.....                                | 20          |
| 3.3. Reparções 3D .....   | 22          |
| 3.3.1. Dimensões e geometria .....                              | 22          |
| 3.3.2. Maquinagem.....  | 22          |
| 3.3.3. Fabrico dos provetes.....                                | 22          |

---

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 3.4.      | Condições de ensaio .....  | 25        |
| 3.5.      | Resultados e comentários das reparações .....  | 26        |
| 3.5.1.    | Reparações 2D com Araldite® 2015 - Condição 1 .....  | 26        |
| 3.5.2.    | Reparações 2D com Araldite® AV138 - Condição 2.....  | 28        |
| 3.5.3.    | Comparação dos resultados obtidos para as reparações 2D .....  | 30        |
| 3.5.4.    | Reparação 3D com Araldite® 2015 - Condição 3 e Reparação 3D com Araldite®<br>AV138 - Condição 4..... | 31        |
| <b>4.</b> | <b>Trabalho Numérico.....</b>  | <b>35</b> |
| 4.1.      | Condições da análise numérica.....   | 36        |
| 4.2.      | Modelo de dano coesivo .....   | 37        |
| 4.2.1.    | Modelo de dano triangular.....   | 37        |
| 4.2.2.    | Determinação dos parâmetros coesivos.....  | 39        |
| 4.3.      | Análise de tensões das reparações 2D .....   | 41        |
| 4.3.1.    | Tensões axiais normais.....  | 41        |
| 4.3.2.    | Tensões de arrancamento .....  | 44        |
| 4.3.3.    | Tensões de corte .....   | 46        |
| 4.4.      | Previsão do comportamento das reparações 2D .....  | 49        |
| 4.4.1.    | Modo de Rotura.....  | 49        |
| 4.4.2.    | Curvas $P$ - $\delta$ .....  | 50        |
| 4.4.3.    | Resistência das reparações .....   | 51        |
| <b>5.</b> | <b>Conclusões .....</b>  | <b>55</b> |
|           | <b>Referências documentais .....</b>   | <b>59</b> |
|           | <b>Anexo A. Tabelas de apoio .....</b>   | <b>65</b> |
|           | <b>Anexo B. Ficha técnica do adesivo Araldite® 2015.....</b>   | <b>67</b> |
|           | <b>Anexo C. Ficha técnica do adesivo Araldite® AV138.....</b>  | <b>73</b> |
|           | <b>Anexo D. Resultados experimentais Araldite® 2015 .....</b>  | <b>78</b> |
|           | <b>Anexo E. Resultados experimentais Araldite® AV138.....</b>  | <b>83</b> |
|           | <b>Anexo F. Resultados das tensões normais.....</b>  | <b>88</b> |
|           | <b>Anexo G. Resultados das tensões arrancamento .....</b>  | <b>90</b> |
|           | <b>Anexo H. Resultados das tensões de corte.....</b>   | <b>92</b> |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Distribuição da tensão numa juntas rebitada (a) e numa junta colada (b) [3]. ....  | 5  |
| Figura 2 - Geometria da técnica de reparação SS.....  | 9  |
| Figura 3 - Geometria da técnica de reparação SD.....  | 10 |
| Figura 4 - Geometria da técnica de reparação <i>scarf</i> 3D (a) e 2D (b). ....   | 10 |
| Figura 5 - Curva ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) da liga de alumínio AW6082 T651 e respetiva aproximação numérica para análise através dos elementos finitos [52]..... | 16 |
| Figura 6 - Dados do fornecedor para a liga de alumínio AW6082 T651.....   | 16 |
| Figura 7 - Curvas $\sigma$ - $\varepsilon$ para os adesivos Araldite <sup>®</sup> AV138 (a) e Araldite <sup>®</sup> 2015 (b) [52]....                               | 17 |
| Figura 8 - Dimensões e geometria do provete 2D [32]. ....   | 18 |
| Figura 9 - Substratos e remendo após a maquinagem. ....   | 19 |
| Figura 10 - Processo de fresagem das rampas.....  | 19 |
| Figura 11 - Substratos e remendo pós tratamento da superfície.....  | 20 |
| Figura 12 - Montagem da barra de suporte com os substratos. ....  | 20 |
| Figura 13 - Substrato com o fio de pesca. ....  | 20 |
| Figura 14 - Provete após a aplicação do adesivo.....  | 21 |
| Figura 15 - Aspeto final de um provete 2D.....  | 21 |
| Figura 16 - Dimensões e geometria do provete 3D [53]. ....  | 22 |
| Figura 17 - Provete 3D e respetivo remendo após a granalhagem. ....   | 23 |
| Figura 18 - Substrato 3D sobre teflon e com fio de pesca para garantir a espessura. ....  | 23 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 19 - Substrato 3D após a aplicação do adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 (a) e Substrato 3D após a colocação do remendo (b).....                                      | 24 |
| Figura 20 - Aspeto final de um provete 3D.....   | 24 |
| Figura 21 - Máquina Shimadzu – Autograph AG-X (a) e provete fixo nas maxilas da máquina de tração (b).....   | 25 |
| Figura 22 - Curvas $P$ - $\delta$ para as reparações 2D com $\alpha$ igual a 10° (a) e a 45° (b), coladas com Araldite <sup>®</sup> 2015.....                                | 26 |
| Figura 23 - Superfícies de rotura para as reparações 2D com $\alpha$ igual a 10° (a) e a 45° (b), coladas com Araldite <sup>®</sup> 2015.....                                | 27 |
| Figura 24 - Comparação da média das $P_{\text{máx}}$ para cada valor de $\alpha$ nas reparações 2D coladas com Araldite <sup>®</sup> 2015.....                               | 27 |
| Figura 25 - Curvas $P$ - $\delta$ para as reparações 2D com $\alpha$ igual a 10° (a) e a 45° (b), coladas com Araldite <sup>®</sup> AV138.....                               | 28 |
| Figura 26 - Superfícies de rotura para as reparações 2D com $\alpha$ igual a 10° (a) e a 45° (b), coladas com Araldite <sup>®</sup> AV138.....                               | 29 |
| Figura 27 - Comparação da média das $P_{\text{máx}}$ para cada valor de $\alpha$ nas reparações 2D coladas com Araldite <sup>®</sup> AV138.....                              | 29 |
| Figura 28 - Comparação da média das $P_{\text{máx}}$ para cada valor de $\alpha$ nas reparações 2D coladas com Araldite <sup>®</sup> 2015 e Araldite <sup>®</sup> AV138..... | 30 |
| Figura 29 - Curvas $P$ - $\delta$ para as reparações 3D coladas com os adesivos Araldite <sup>®</sup> 2015 (a) e Araldite <sup>®</sup> AV138 (b). ....                       | 31 |
| Figura 30 - Exemplo da superfície de rotura para as reparações 3D coladas com Araldite <sup>®</sup> 2015 (a) e Araldite <sup>®</sup> AV138 (b).....                          | 32 |
| Figura 31 - Comparação da média das $P_{\text{máx}}$ entre a condição 3 e 4 para as reparações 3D.   | 33 |
| Figura 32 - Esquema com as dimensões 2D utilizado na parte numérica.....   | 36 |
| Figura 33 - Exemplo da malha utilizada, para a junta com $\alpha = 20^\circ$ . ....  | 37 |

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 34 - Lei de tração-separação com amaciamento linear disponível no ABAQUS® ..   | 38 |
| Figura 35 - Tensões normais com o adesivo Araldite® 2015 para valores de $\alpha$ de 10° (a) e de 45° (b).  | 42 |
| Figura 36 - Tensões normais com o adesivo Araldite® AV138 para valores de $\alpha$ de 10° (a) e de 45° (b).   | 43 |
| Figura 37 - Tensões de arrancamento com o adesivo Araldite® 2015 para valores de $\alpha$ de 10° (a) e de 45° (b).  | 44 |
| Figura 38 - Tensões de arrancamento com o adesivo Araldite® AV138 para valores de $\alpha$ de 10° (a) e de 45° (b).   | 45 |
| Figura 39 - Tensões de corte com o adesivo Araldite® 2015 para valores de $\alpha$ de 10° (a) e de 45° (b).   | 47 |
| Figura 40 - Tensões de corte com o adesivo Araldite® AV138 para valores de $\alpha$ de 10° (a) e de 45° (b).  | 48 |
| Figura 41 - Processo progressivo da rotura desde o início até à rotura final para $\alpha$ igual a 10°.   | 49 |
| Figura 42 - Curvas $P$ - $\delta$ numéricas e experimentais para todos os valores de $\alpha$ , para os adesivos Araldite® 2015 (esquerda) e Araldite® AV138 (direita).           | 51 |
| Figura 43 - Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos valores de $P_{\text{máx}}$ para os diferentes valores de $\alpha$ , no caso do adesivo Araldite® 2015.  | 52 |
| Figura 44 - Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos valores de $P_{\text{máx}}$ para os diferentes valores de $\alpha$ , no caso do adesivo Araldite® AV138. | 53 |
| Figura 45 - Composição química da série 6000 das ligas standard da Lanema.  | 65 |
| Figura 46 - Equivalências Internacionais da série 6000 das ligas de alumínio da Lanema.   | 65 |
| Figura 47 - Propriedades típicas da série 6000 das ligas de alumínio da Lanema.   | 66 |
| Figura 48 - Curvas $P$ - $\delta$ para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a 10°, coladas com Araldite® 2015.  | 78 |

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 49 - Superfície de rotura para as reparações com valores de $\alpha$ igual a $10^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> 2015.....      | 78 |
| Figura 50 - Curvas $P$ - $\delta$ para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $15^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> 2015. .... | 79 |
| Figura 51 - Superfície de rotura para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $15^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> 2015.....   | 79 |
| Figura 52 - Curvas $P$ - $\delta$ para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $20^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> 2015. .... | 80 |
| Figura 53 - Superfície de rotura para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $20^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> 2015.....   | 80 |
| Figura 54 - Curvas $P$ - $\delta$ para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $30^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> 2015. .... | 81 |
| Figura 55 - Superfície de rotura para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $30^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> 2015.....   | 81 |
| Figura 56 - Curvas $P$ - $\delta$ para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $45^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> 2015. .... | 82 |
| Figura 57 - Superfície de rotura para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $45^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> 2015.....   | 82 |
| Figura 58 - Curvas $P$ - $\delta$ para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $10^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> AV138..... | 83 |
| Figura 59 - Superfície de rotura para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $10^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> AV138.....  | 83 |
| Figura 60 - Curvas $P$ - $\delta$ para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $15^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> AV138..... | 84 |
| Figura 61 - Superfície de rotura para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $15^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> AV138.....  | 84 |

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 62 - Curvas $P$ - $\delta$ para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $20^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> AV138..... | 85 |
| Figura 63 - Superfície de rotura para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $20^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> AV138.....  | 85 |
| Figura 64 - Curvas $P$ - $\delta$ para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $30^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> AV138..... | 86 |
| Figura 65 - Superfície de rotura para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $30^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> AV138.....  | 86 |
| Figura 66 - Curvas $P$ - $\delta$ para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $45^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> AV138..... | 87 |
| Figura 67 - Superfície de rotura para as reparações 2D com valores de $\alpha$ igual a $45^\circ$ , coladas com Araldite <sup>®</sup> AV138.....  | 87 |
| Figura 68 - Tensões normais com Araldite <sup>®</sup> AV138 para os ângulos de $15^\circ$ (a), $20^\circ$ (b) e $30^\circ$ (c).....               | 88 |
| Figura 69 - Tensões normais com Araldite <sup>®</sup> 2015 para os ângulos de $15^\circ$ (a), $20^\circ$ (b) e $30^\circ$ (c).....                | 89 |
| Figura 70 - Tensões de arrancamento com Araldite <sup>®</sup> AV138 para os ângulos de $15^\circ$ (a), $20^\circ$ (b) e $30^\circ$ (c).....       | 90 |
| Figura 71 - Tensões de arrancamento com Araldite <sup>®</sup> 2015 para os ângulos de $15^\circ$ (a), $20^\circ$ (b) e $30^\circ$ (c).....        | 91 |
| Figura 72 - Tensões de corte com Araldite <sup>®</sup> AV138 para os ângulos de $15^\circ$ (a), $20^\circ$ (b) e $30^\circ$ (c).....              | 92 |
| Figura 73 - Tensões de corte com Araldite <sup>®</sup> 2015 para os ângulos de $15^\circ$ (a), $20^\circ$ (b) e $30^\circ$ (c).....               | 93 |



## *Índice de tabelas*

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1- Propriedades mecânicas dos adesivos Araldite <sup>®</sup> AV138 e Araldite <sup>®</sup> 2015 [52].                                | 18 |
| Tabela 2 - Parâmetros coesivos em modo I e II puros para uma camada de adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 com uma espessura de 0,2 mm.....  | 40 |
| Tabela 3 - Parâmetros coesivos em modo I e II puros para uma camada de adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 com uma espessura de 0,2 mm..... | 41 |
| Tabela 4 - Tensões normais máximas em MPa para todas as condições estudadas.....  | 41 |
| Tabela 5 - Tensões de arrancamento máximas em MPa para todas as condições estudadas.<br>.....   | 46 |
| Tabela 6 - Tensões de corte máximas em MPa para todas as condições estudadas.....   | 48 |



## *Nomenclatura*

$b$ : Largura

$d$ : Diâmetro do furo

$e$ : Comprimento do dano

$E$ : Módulo de Young

$G$ : Módulo de corte

$G_n$ : Taxa de libertação de energia de deformação em tração

$G_n^c$ : Taxa crítica de libertação de energia de deformação em tração

$G_s$ : Taxa de libertação de energia de deformação em corte

$G_s^c$ : Taxa crítica de libertação de energia de deformação em corte

$L$ : Comprimento

$L_s$ : Comprimento do chanfro 3D

$L_t$ : Comprimento do chanfro 2D

$P$ : Força

$P_{\text{máx}}$ : Força máxima

$t_p$ : Espessura do substrato

$t_A$ : Espessura de adesivo

$t_m^0$ : Tensão máxima em modo misto

$t_n^0$ : Resistência coesiva em tração

$t_s^0$ : Resistência coesiva em corte

$\alpha$ : Ângulo

$\nu$ : Coeficiente de Poisson

$\varepsilon_f$ : Deformação à tração

$\delta$ : Deslocamento

$\delta_n^f$ : Deslocamentos de rotura em tração

$\delta_s^f$ : Deslocamentos de rotura em corte

$\sigma$ : Tensão

$\sigma_y$ : Tensões de arrancamento ou tensão de cedência

$\sigma_f$ : Tensão máxima de tração

$\tau_{xy}$ : Tensões de corte

$\tau_y$ : Tensão de cedência ao corte

$\tau_f$ : Tensão máxima de corte

$\gamma_f$ : Deformação final ao corte

## *Abreviaturas*

TAMDC: Técnicas Alternativas aos Modelos de Dano Coesivo

DCB: Double Cantilever Beam

BIC: Borda interior do chanfro

BEC: Borda exterior do chanfro

EF: Elementos Finitos

*ENF: End-Notched Flexure*

FEUP: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

ISEP: Instituto Superior de Engenharia do Porto

MDC: Modelos de Dano Coesivos

MEF: Método de Elementos Finitos

MEFX: Método dos Elementos Finitos Expandido

MFLE: Mecânica da Fratura Linear Elástica

SD: Reparações por sobreposição dupla

SS: Reparações por Sobreposição simples

*TAST: Thick Adherend Shear Test*

TFFV: Técnica do Fecho da Fenda Virtual



# 1. Introdução

Neste primeiro capítulo começa-se por enquadrar e definir os objetivos do trabalho sendo na parte final realizado um pequeno resumo dos principais assuntos abordados em cada um dos cinco capítulos desta dissertação.

A dissertação apresentada foi realizada durante o ano letivo de 2011/2012 no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica Ramo de Construções Mecânicas, do Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP, e tem como objetivo principal o estudo experimental e numérico de reparações adesivas de estruturas de alumínio pela técnica de remendo embebido. A parte experimental do trabalho consiste na fabricação e teste à tração de reparações em escala reduzida em função de alguns parâmetros pré-definidos como o ângulo das superfícies de contacto, no sentido de otimização das respetivas reparações. O trabalho numérico consiste na simulação em *software* de elementos finitos ABAQUS® das várias soluções testadas, incluindo a distribuição de campos de tensões e previsão da rotura por métodos adequados. Na atualidade este tema tem particular importância, principalmente devido a questões económicas, onde há todo o interesse em reparar estruturas de alumínio, e em prever o seu comportamento antes da aplicação definitiva.

Com o intuito de alcançar os objetivos referidos, esta dissertação, desenvolveu-se por cinco capítulos, incluindo este. Neste **primeiro capítulo**, além de se definir os objetivos do trabalho, são dados a conhecer assuntos abordados em cada um dos capítulos desta dissertação.

O **capítulo dois** é iniciado com uma introdução às ligações adesivas, começando por apresentar as suas principais aplicações, vantagens e desvantagens. São também apresentados os tipos de reparações adesivas existentes, focando principalmente as reparações por sobreposição simples (SS), sobreposição dupla (SD) e as reparações por remendo embebido (*Scarf*). O capítulo termina com o estado da arte das técnicas de previsão numérica da resistência das ligações adesivas, dando ênfase ao modelo de dano coesivo (MDC), modelo de dano utilizado.

O **capítulo três** descreve o trabalho experimental desenvolvido começando com uma descrição e apresentação das propriedades experimentais dos substratos e dos adesivos. Também são apresentadas as dimensões e geometria dos dois tipos de provetes (2D e 3D), de seguida são descritos os processos de fabricação dos provetes, desde o processo de maquinaria dos substratos e remendos, até ao processo de colagem e cura. No final são descritas as condições de ensaio e são apresentados os resultados, através de gráficos e de fotos com os modos de rotura, seguido dos comentários sobre os mesmos.

O **capítulo quatro** é dedicado à análise numérica da resistência das reparações pela técnica de remendo embebido para as juntas 2D. No início do capítulo são descritas as condições da análise numérica utilizadas no programa de elementos finitos ABAQUS<sup>®</sup> CAE. De seguida é descrito o modelo de dano utilizado para previsão da resistência das reparações, e é também feita uma descrição da forma como foram determinadas as propriedades coesivas dos adesivos. É também feita uma análise das tensões axiais normais, tensões de arrancamento e tensões de corte. No final é feita a descrição do modelo de rotura e a comparação das cargas máximas obtidas nos resultados experimentais e nos numéricos.

No **capítulo cinco** são sintetizadas as conclusões fundamentais obtidas ao longo do desenvolvimento da dissertação e no final é feita uma perspetiva para trabalhos futuros.

## 2. Revisão Bibliográfica

O segundo capítulo é iniciado com uma introdução às ligações adesivas, começando por referir um pouco da história deste tipo de ligações, sendo que depois são apresentadas as principais aplicações e as suas vantagens e desvantagens. São também apresentados os tipos de reparações adesivas existentes, focando principalmente as SS, SD e as *Scarf*. O capítulo termina com o estado da arte das técnicas de previsão numérica da resistência das ligações adesivas.

## 2.1. Introdução às ligações adesivas

A ligação adesiva não é uma técnica recente de ligação de materiais pois a sua utilização remonta a um passado muito longínquo. Os Egípcios, quinze séculos antes de Jesus Cristo, já empregavam colas à base de gelatina, ovo e resinas extraídas de árvores que aplicavam em trabalhos feitos em madeira e em pedra. A decoração dos caixões Egípcios em madeira (Sarcófagos) era feita com pigmentos colados com gesso. A fabricação de papyrus, desde os tempos primitivos, era feita recorrendo a um processo de adesão entre canas de bambu e uma pasta de farinha e água. Sabe-se também que no tempo de Theophilus já utilizavam colas para fixar objetos de madeira com carácter permanente, elaboradas a partir de chifres de veado, peixes e de queijo [1].

A primeira patente atribuída a um adesivo ocorreu em 1750 na Inglaterra e tratou-se de uma cola elaborada a partir de peixe. Nos primeiros anos do século XX surgiram fábricas de adesivos por todo o mundo. A primeira e segunda guerra mundial, através da indústria aeronáutica, promoveram um incremento na utilização da ligação adesiva. As patentes seguintes foram para colas à base de borracha natural, leite, caseína e goma [2].

As aeronaves do início do século XX usaram adesivos baseados em caseína (material polimérico natural derivado do leite). Esses adesivos naturais funcionavam bem exceto quando submetidos a ambientes húmidos, tornando-se muito fracos e exalavam odores desagradáveis devido à absorção da água. O problema da fraca durabilidade dos adesivos baseados em produtos naturais foi ultrapassado pela introdução de adesivos sintéticos poliméricos durante segunda guerra mundial onde, por exemplo, o famoso caça britânico Mosquito usava uma resina de ureia-formaldeído para colar a sua estrutura de madeira. Tal como este as resinas fenólicas, eram utilizadas para ligação de metais, no entanto esses tipos de adesivos eram bastante frágeis e fraturavam com facilidade. Este problema da fragilidade dos primeiros adesivos foi ultrapassado ainda nos anos 40 por Bruyne e seus colegas, que modificaram a química dos adesivos adicionando polímeros com uma boa tenacidade. Esta invenção representou um desenvolvimento muito importante na tecnologia dos adesivos e permitiu a ligação de materiais metálicos e de madeira com muito sucesso. Os trabalhos pioneiros de engenheiros britânicos nos anos 40 e 50 levaram à construção de aviões modernos que dependem da utilização de adesivos [3].

Ao longo da história, observa-se que os sistemas adesivos têm substituído os sistemas de fixação mecânica em aplicações de interesse industrial. Vantagens técnicas relacionadas

com o desempenho de reparações adesivas, associadas aos fatores de produtividades e menor custo dos adesivos, são os fatores determinantes [2].

Atualmente todos os adesivos são baseados em polímeros sintéticos tais como os fenólicos, os epóxicos, os acrílicos e os uretanos. Estes adesivos podem ser modificados para melhorar a sua tenacidade. Os adesivos de epóxico foram um marco fundamental nas primeiras colagens estruturais metal-metal na indústria aeronáutica e são atualmente aplicados em situações críticas de elevada responsabilidade como, por exemplo, nas indústrias automóvel, construção civil, aeroespacial, aeronáutica e desporto.

As ligações adesivas, devido às suas diversas vantagens, tem vindo progressivamente a substituir os métodos tradicionais de ligação tais como a soldadura, brasagem, aparafusagem, rebiteagem e outras ligações mecânicas. As principais vantagens apontadas às ligações adesivas estruturais são [3]:

- Distribuição mais uniforme das tensões, o que permite uma maior rigidez e uma maior transferência de carga, levando a uma redução do peso;

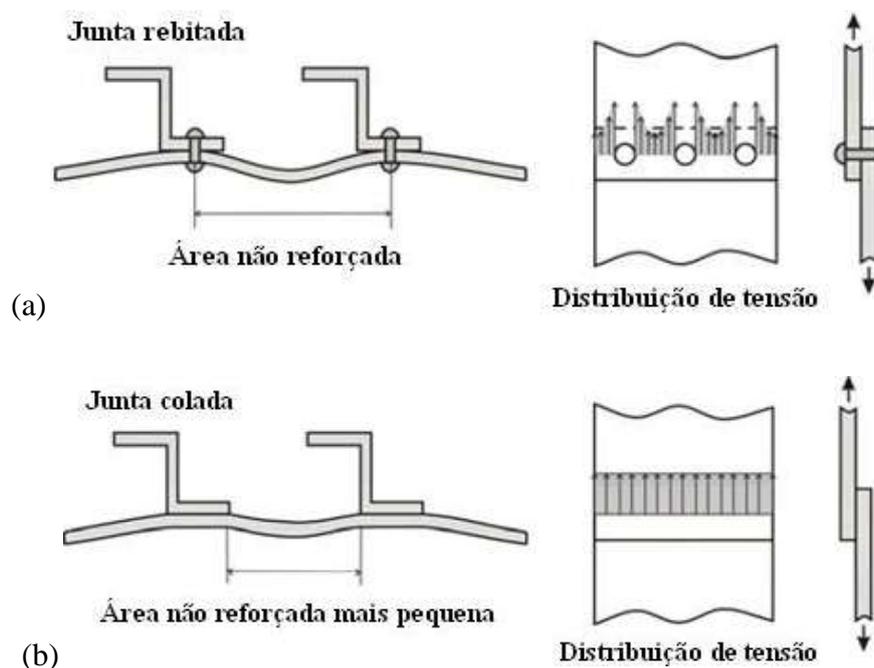


Figura 1 - Distribuição da tensão numa juntas rebiteada (a) e numa junta colada (b) [3].

- Resistência à fadiga superior, devido à melhor distribuição de tensões da junta colada observada na Figura 1 em prejuízo da distribuição de tensão observada nas juntas rebiteadas;

- Elevada capacidade de amortecimento de vibrações, melhorando a resistência à fadiga dos componentes ligados;
- Admite a fixação de diferentes tipos de materiais e com distintos coeficientes de expansão;
- Globalmente o custo é inferior devido ao processo de fabricação mais económico e pela facilidade em ser automatizado;
- Possibilitam uma melhor aparência e aerodinâmica dada a variedade de projetos possíveis;
- Resistência à corrosão galvânica no caso de juntas de substratos incompatíveis;
- Permitem ligar e vedar simultaneamente, aumentando também o isolamento acústico.

Apesar das ligações adesivas oferecerem um grande número de vantagens, é necessário ter em atenção algumas desvantagens que este tipo de ligações apresenta [3]:

- Fraca resistência ao arrancamento, clivagem e impacto, para isso é necessário projetar ligações que eliminem ao máximo estas forças;
- É necessário que a ligação trabalhe ao corte e evitar as tensões localizadas;
- Reduzida resistência a condições extremas tais como a temperatura e a humidade;
- É indispensável uma cuidada preparação superficial, sendo necessário um tratamento das superfícies a ligar;
- É difícil fazer a inspeção de qualidade e segurança nas juntas adesivas para verificação da qualidade da ligação;
- A ligação não é normalmente realizada instantaneamente, o que leva à utilização de ferramentas de fixação para manter as peças em posição. Isto pode ser uma grande desvantagem económica;
- Frequentemente os adesivos são curados a elevadas temperaturas (forno, prensa, etc.);

- Podem ser mais caras que a fixação mecânica e impossível ou difícil de desmontar;
- Problemas de inflamabilidade, toxicidade, fraca resistência à propagação de fissuras e tempo de vida limitado de alguns adesivos.

Para além da larga utilização das ligações adesivas nas mais diversas áreas, estas também têm um papel importante na reparação de estruturas na construção civil, indústrias automóvel, naval e aeronáutica.

Durante a vida operacional de uma aeronave, o revestimento da fuselagem é sujeito a falhas e danos estruturais. As falhas podem ser fissuras que ocorrem devido a esforços aos quais o revestimento é submetido durante os levantamentos, voos e aterragens da aeronave e danos que geralmente ocorrem devido a algum fator externo durante a operação e manutenção das aeronaves. Caso o dano ou falha na estrutura não seja tolerável, é necessário, então, a instalação de uma reparação estrutural ou troca do painel. A reparação estrutural é feita de chapas metálicas ou de material compósito unidas mecanicamente ao revestimento da aeronave através de adesivos estruturais [4].

A reparação e o reforço de estruturas de madeira é um exemplo da crescente utilização das ligações adesivas na construção civil. Este tipo de utilização tem aumentado devido ao seu impacto económico e social. A utilização de colas epoxídicas associadas a varões de aço ou perfis compósitos, principalmente de fibras de vidro, constitui uma das técnicas de reforço ou consolidação mais interessantes e promissoras, dada a rapidez e o carácter pouco intrusivo do processo, que permite a manutenção das estruturas em serviço com o mínimo de substituição da estrutura original [5].

Outro exemplo da utilização de adesivos na reparação de estruturas na construção civil é a reparação de fendas com adesivo epóxico. Esta técnica de reparação de fendas consiste na injeção de resinas epoxídicas de baixa viscosidade, a baixa pressão, na fenda. Após a polimerização, esta zona apresentará um comportamento idêntico ao do resto da secção. Esta técnica é aplicada na reparação de fendas de topo, ou fendas interiores longitudinais. É também utilizada esta técnica para as reparações e colagens de estruturas de betão com resinas quando há fissuras no betão ou quando aparecem defeitos durante a construção destas estruturas. Os polímeros são materiais que se comportam bem em trabalhos de reparação e de colagem devido à sua elevada aderência o que torna possível a ligação betão

endurecido-betão endurecido, betão endurecido-betão fresco e betão endurecido-materiais metálicos por colagem [6,7].

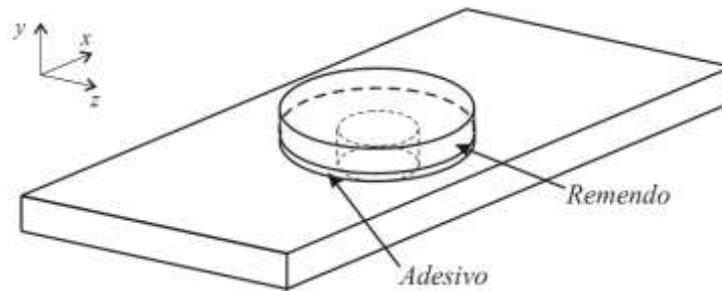
Também na indústria automóvel existem determinados materiais plásticos onde se utiliza a reparação por colagem através da aplicação de adesivos. A reparação por colagem pode ser efetuada com ou sem inserção de tela de reforço, no seu interior, de acordo com a necessidade de reparação.

Os produtos utilizados para reparação por colagem são as resinas de poliéster, resinas epóxi, massas de poliéster reforçado, adesivos acrílicos e poliuretanos. Também são utilizados adesivos para a reparação dos vidros dos automóveis, dependendo do tipo de dano, o processo consiste em injeção à pressão de uma resina, que apresenta as mesmas propriedades óticas que o vidro e com a qual se preenchem os espaços vazios, tornando o dano impercetível [8].

As ligações adesivas já são atualmente consideradas como método de reparação alternativo utilizadas pela indústria naval. Alguns componentes estruturais possíveis de serem usados em estruturas marítimas aos quais a ligação por adesivos é uma tecnologia aplicável são a aplicação de barras de reforço ou substituição de perfis danificados [9].

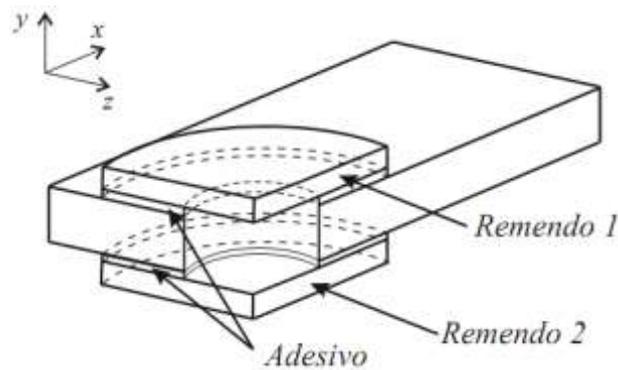
## **2.2. Tipos de reparações com ligações adesivas**

A maior parte dos materiais usados em componentes de aviões e estruturas são bastante dispendiosos, fazendo com que a frequência das substituições dessas estruturas danificadas por novas seja pouco económico. Uma metodologia alternativa é a utilização de técnicas de reparação eficazes para corrigir a estrutura danificada a um custo reduzido, sem comprometer a integridade estrutural. Existem diversas configurações de reparações adesivas que são utilizadas na reparação de estruturas em engenharia, essas reparações podem ser reparações por sobreposição simples (SS), reparações por sobreposição dupla (SD) e as reparações com remendo embebido (*scarf*). A técnica de reparação por SS, é um tipo de reparação que é utilizado após uma peça ou uma estrutura sofrer um dano numa secção intermédia. Este dano é subsequentemente removido pela perfuração da zona danificada, e é colado por intermédio de um adesivo, um remendo circular concêntrico com o furo numa das faces da zona afetada (Figura 2).



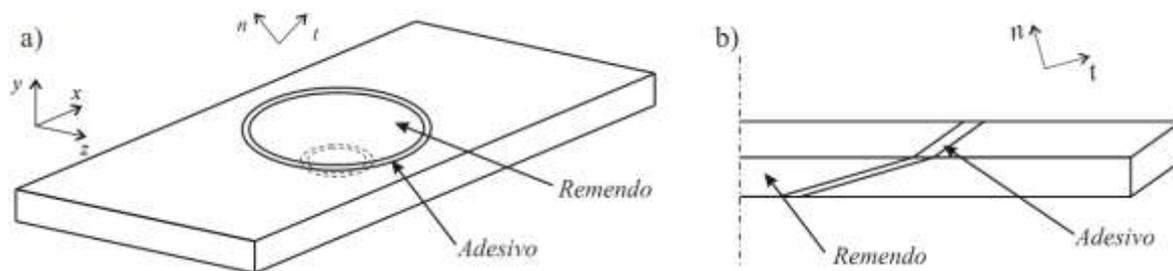
**Figura 2 - Geometria da técnica de reparação SS.**

Esta técnica de reparação, que é representativa das reparações típicas encontradas em muitas aplicações estruturais [10] foi estudada por Hu et al. [11]. Na investigação destes autores, concluiu-se que os picos de tensão de corte e arrancamento perto do centro do furo levam à rotura. As reparações SS são caracterizadas por uma fácil execução e uma excentricidade da carga transmitida, o que leva a uma flexão significativa na região da reparação e consequentes picos de tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição [12-16]. Estes picos, adicionados ao desenvolvimento de picos de tensão de corte nas mesmas regiões, devido à deformação diferencial dos componentes da reparação [17-20], levam à pouca eficiência das reparações de SS. Consequentemente, esta técnica de reparação não é utilizada como uma reparação permanente, nem em estruturas de alta responsabilidade ou sujeitas a esforços elevados [14, 21 e 22]. Nestes casos, tanto as reparações SS como as SD (que vão ser apresentadas de seguida) são consideradas reparações temporárias, com o objetivo de restabelecer a força necessária que apenas permita o funcionamento até uma reparação permanente poder ser realizada [23]. A técnica de reparação SD é baseada na mesma geometria das reparações de SS. No entanto, são colados dois remendos de forma concêntrica com a perfuração do furo, ou seja, um em cada face na zona danificada (Figura 3).



**Figura 3 - Geometria da técnica de reparação SD.**

As reparações SD são mais eficientes que as reparações SS, devido à duplicação da área de corte de adesivo e da eliminação da flexão do substrato, uma vez que as cargas são simétricas [14, 21 e 24]. Isto reduz o pico das tensões de arrancamento ( $\sigma_y$ ) e aumenta significativamente a resistência da reparação [14, 25 e 26]. Por outro lado, as tensões de corte ( $\tau_{xy}$ ) também se tornam mais niveladas ao longo de todo o comprimento da ligação [14, 18 e 27]. Ainda assim, ocorre alguma flexão nos remendos, dando origem a esforços de arrancamento no exterior da camada de adesivo, e esforços de compressão no interior da camada de adesivo [14, 18, 27-29]. A aplicação deste tipo de reparação (SD) pode não ser executável em todas as situações, dependendo da disponibilidade de acesso a ambas as faces da zona danificada [13]. Nesta situação, pode ser necessária a desmontagem parcial da estrutura. As reparações *scarf*, representadas na Figura 4, são a última técnica abordada neste subcapítulo. O procedimento deste tipo de reparação consiste na remoção do dano por perfuração de um furo em forma cônica com um ângulo pré definido. O remendo pode ser aplicado, por exemplo, colando com adesivo um remendo cônico de forma a complementar a zona danificada [30-32].



**Figura 4 - Geometria da técnica de reparação *scarf* 3D (a) e 2D (b).**

Comparando com reparações anteriores, as reparações *scarf* tem algumas vantagens, como por exemplo, a maior eficiência e a ausência de perturbação na aerodinâmica. Estas

vantagens tornam este tipo de reparação numa reparação permanente, pois por norma restabelecem a força original antes do dano [33, 36]. A elevada eficiência deste tipo de reparação deve-se à eliminação das excentricidades existentes nas reparações SS e SD, que vão concentrando as tensões à medida que a carga vai aumentando [31, 37 e 38]. Além disso, neste tipo de reparações, a distribuição de tensões ao longo do comprimento de ligação é mais uniforme, isto deve-se ao efeito da redução gradual da espessura dos aderentes [32]. Esta técnica de reparação tornou-se, nas últimas décadas, num tipo de reparação particularmente importante devido ao aumento do uso de painéis sandwich em estruturas das aeronaves [35, 39]. No entanto, este tipo de reparações é mais difícil de executar, devido à sua geometria, o que se reflete em custos de fabrico mais elevados. Além disso, este tipo de reparação necessita de uma área de reparação maior, uma vez que são necessários ângulos relativamente pequenos, para se obter resultados de resistência idênticos aos que se observava antes do dano [34, 36 e 37].

Neste trabalho realizou-se um estudo experimental e numérico de reparações adesivas com substratos e remendos de alumínio, pela técnica do remendo embebido, utilizando geometrias 2D e 3D, dois adesivos estruturais e diferentes ângulos.

### **2.3. Previsão numérica da resistência em ligações adesivas**

No passado, devido à inexistência de critérios adequados de rotura e de modelos de materiais, as juntas adesivas eram sobredimensionadas, o que levava a estruturas mais pesadas e mais caras. Com o decorrer dos anos, foram realizados estudos que tornaram possível melhorar a eficiência das juntas coladas. Ao mesmo tempo, muitos desses estudos testaram e validaram metodologias de previsão de resistência, por análise analítica ou métodos numéricos. Inicialmente os métodos de previsão para análise de estruturas coladas, baseavam-se em formulações analíticas, e os trabalhos de Volkersen [17] e Goland e Reissner [40] foram pioneiros de uma série de estudos teóricos que tinham a vantagem da simplicidade, pois utilizavam hipóteses simplificativas para obtenção dos campos de tensões nas estruturas coladas, nomeadamente em termos de geometria das estruturas, carregamentos, e condições de fronteira, dando soluções analíticas elásticas eficientes. O método analítico de Volkersen [17], por exemplo, considera que os materiais são totalmente elásticos e a deformação do adesivo acontece somente em corte. Desta forma, cada estrutura colada pode ser analisada rapidamente, embora com um lote de suposições incorporadas [41]. No entanto, a formulação analítica das juntas adesivas,

torna-se mais complexa se o adesivo deformar plasticamente, se for utilizado um aderente de compósito, ou se forem utilizados diferentes materiais nos aderentes. Atualmente, estes estudos foram substituídos por análises numéricas sendo o método de elementos finitos (MEF) o mais utilizado para as juntas adesivas. Adams et al. foram pioneiros na utilização desta técnica nas ligações adesivas [29]. Assim que foram disponibilizados o MEF e a programação em computadores [42], a abordagem da mecânica contínua foi imediatamente aplicada em juntas coladas para aplicações estruturais. As vantagens desta técnica incluem uma expedita análise das estruturas coladas, com ou sem dano inicial, e sob uma carga arbitrária. No entanto, uma limitação destes critérios é que as estruturas coladas são propensas a concentrações de tensões significativas no final das zonas de sobreposição, o que leva à dependência do refinamento da malha numa análise do MEF a uma estrutura colada [41]. O MEF também pode ser utilizado para a previsão da resistência juntamente com critérios da mecânica da fratura, quer pelo fator de intensidade das tensões ou por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Nas estruturas as fendas são os defeitos mais comuns, para os quais a mecânica da fratura foi desenvolvida.

No entanto, torna-se complicado utilizar esta técnica de modelação, devido à necessidade de redesenhar a malha durante a análise e os respetivos custos computacionais associados [43]. Atualmente as técnicas de modelação avançada disponíveis garantem previsões precisas da rotura, superando as limitações das abordagens anteriores. Recentemente foram feitos desenvolvimentos importantes como, por exemplo, a modelação de dano por combinação de elementos finitos com elementos coesivos. Esta técnica combina o MEF convencional para as zonas onde não são esperados danos e uma abordagem da mecânica fratura para simular o crescimento da fenda, através dos elementos coesivos. Algumas décadas atrás, a implementação no computador dos métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) obteve grande sucesso. No entanto, estes métodos são limitados a comportamentos elásticos na proximidade da fenda. Além disso, atualmente os adesivos de elevada tenacidade desenvolvem sob a carga aplicada zonas plásticas que podem ser mais largas do que a espessura dos aderentes. Os Modelos de Dano Coesivos (MDC) foram desenvolvidos, nos finais dos anos 50 início dos anos 60 [44], para descrever o dano na zona do processo fratura na frente da fenda sob efeito de cargas estáticas, dando uma solução promissora para métodos mais refinados para avaliar eventuais danos em estruturas coladas. O método MDC foi amplamente testado desde então para simular o início e a propagação da fenda em problemas de rotura coesiva, interfacial ou

delaminações em compósitos. Os MDC podem ser baseados em elementos de mola ou coesivos [45], e podem ser facilmente incorporados na análise convencional por MEF para modelar o comportamento de fratura em vários materiais, incluindo juntas adesivas [46]. O conceito principal dos MDC é que uma ou múltiplas interfaces de fratura ou regiões podem ser artificialmente introduzidas em estruturas, em que o crescimento do dano é permitido pela introdução de uma descontinuidade possível no campo dos deslocamentos. Isto é possível pela definição de leis de tração-separação para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis do MDC são aplicadas entre nós homólogos dos elementos coesivos, e eles podem ligar os nós sobrepostos de elementos representando diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos, ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina, por exemplo para simular uma ligação adesiva. O MDC permite a modelação macroscópica do dano através de uma lei tração-deslocamento relativo, entre nós homólogos ao longo do comprimento da fenda, que se baseia em parâmetros que regem o processo de crescimento da fenda como as energias da fratura. É modelada a evolução da força e amaciamento até a rotura, para descrever a degradação gradual das propriedades dos materiais. As leis da tração-separação são tipicamente construídas por uma relação linear em cada uma das fases de carregamento [47], embora uma ou mais fases possam ser definidas de maneira diferente para uma representação mais precisa do comportamento de materiais.

Existem técnicas alternativas aos modelos de dano coesivo mais vulgarmente chamadas por TAMDC. Nestas metodologias, é estabelecido um parâmetro de dano para modificar a resposta característica dos materiais pela diminuição gradual da rigidez ou resistência, por exemplo para ligações finas de adesivo [48], delaminações ou rotura da matriz em compósitos [49], para representar a evolução do dano durante o carregamento do material. Nas TAMDC, o crescimento do dano é definido como uma função da carga aplicada para a modelação estática ou a contagem do número de ciclos para análises de fadiga. No entanto, no campo das juntas coladas, foram publicados poucos trabalhos. O método dos elementos finitos expandido (MEFX) é outra alternativa recente aos modelos de dano coesivos, que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo. Este método é uma extensão do MEF, cujas características fundamentais foram apresentadas no final dos anos 90 [50]. O MEFX ganha vantagem em relação à modelação MDC uma vez que não requer que a fenda siga um caminho pré-definido. Na realidade, existe a possibilidade de crescimento livre de fendas no interior de uma região

contínua sem a necessidade da geometria das descontinuidades coincidir com a malha e sem que seja necessário refazer a malha na proximidade da fenda [51].

Neste trabalho a análise numérica foi realizada pelo MEF utilizando o programa de elementos finitos ABAQUS<sup>®</sup> CAE. As reparações estudadas foram modeladas como problemas 2D em estado plano de deformação, considerando as mesmas dimensões utilizadas nos provetes experimentais. A previsão da resistência das reparações foi realizada pela utilização de um MDC associado à técnica de EF. Este estudo será apresentado no Capítulo 4.

## 3. Trabalho Experimental

O capítulo três descreve o trabalho experimental desenvolvido começando com uma apresentação dos materiais utilizados para o fabrico dos provetes (substratos, remendos e adesivos). Apresenta-se também as dimensões e geometria dos provetes bem como o procedimento para a sua fabricação. No final são descritas as condições de ensaio, apresentados os resultados obtidos e os comentários sobre os mesmos.

### 3.1. Materiais

#### 3.1.1. Substratos e remendos

A liga de alumínio selecionada para os substratos e remendos foi a AW6082 T651, caracterizada por uma elevada resistência à tração (340 MPa, como é especificado pelo fabricante), obtida através de envelhecimento artificial, a uma temperatura de aproximadamente 180 C. A escolha desta liga deve-se especificamente à sua ampla utilização na Europa para diversas aplicações estruturais sob diferentes formas extrudidas. Os resultados de tensão-deformação ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) da liga de alumínio AW6082 T651, obtido de acordo com a norma ASTM-E8M-04, são apresentados na Figura 5. Este alumínio tem um módulo de Young ( $E$ ) de  $70,07 \pm 0,83$  GPa, uma tensão de cedência ( $\sigma_y$ ) de  $261,67 \pm 7,65$  MPa, uma tensão máxima de tração ( $\sigma_t$ ) de  $324 \pm 0,16$  MPa e uma deformação ( $\varepsilon_f$ ) de  $21,70 \pm 4,24$  %. A aproximação bilinear da Figura 5 foi utilizada para a entrada nas simulações [52].

A liga de Alumínio foi fornecida pela empresa Lanema, os dados fornecidos pela empresa para a liga AW6082 T651 estão apresentados na Figura 6.

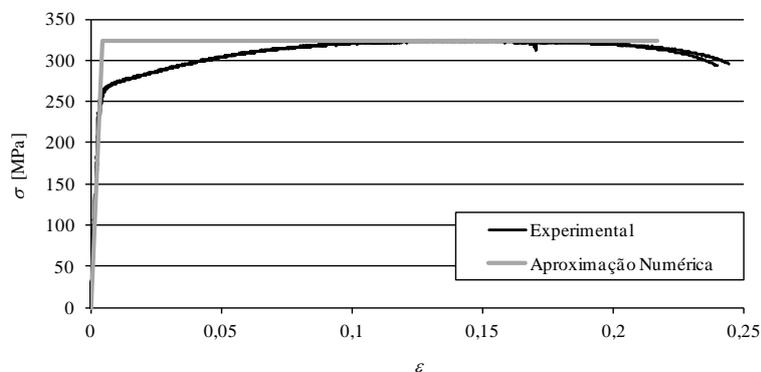


Figura 5 - Curva ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) da liga de alumínio AW6082 T651 e respetiva aproximação numérica para análise através dos elementos finitos [52].

| LIGAS | ESTADO  | CARGA DE ROTURA<br>$R_m - N / mm^2$ | LIMITE ELÁSTICO<br>$R_p 0,2 - N / mm^2$ | ALARGAMENTO<br>A 5,65 %           | LIMITE DE FADIGA<br>$N / mm^2$                     | DUREZA<br>BRINELL<br>HB        | DUREZA<br>VICKERS<br>HV                           |                                      |
|-------|---------|-------------------------------------|---|-----------------------------------|--|--------------------------------|---|--------------------------------------|
| 6082  | T6/T651 | 340                                 | 310                                     | 11                                | 210  | 95                             | 100   |                                      |
|       |         | MÓDULO ELÁSTICO<br>$N / mm^2$       | PESO ESPECÍFICO<br>$g / cm^3$           | INTERVALO DE FUSÃO<br>$^{\circ}C$ | COEFICIENTE DE<br>DILATAÇÃO LINEAR<br>$1 / 10^6 K$ | CALOR ESPECÍFICO<br>$J / Kg K$ | RESISTIVIDADE<br>ELÉCTRICA<br>$20 - \mu\Omega cm$ | CONDUTIVIDADE<br>ELÉCTRICA<br>% IACS |
|       |         | 70.000                              | 2,71                                    | 575-650                           | 23,1   | 894                            | 39,0  | 44,0                                 |

Figura 6 - Dados do fornecedor para a liga de alumínio AW6082 T651.

### 3.1.2. Adesivos

Os dois adesivos utilizados, Araldite<sup>®</sup> 2015 e Araldite<sup>®</sup> AV138, também têm que ser caracterizados para a entrada posterior na análise dos Elementos Finitos onde se fará a comparação com os resultados experimentais. Foram utilizados estes dois adesivos por se tratarem: de um adesivo dúctil, Araldite<sup>®</sup> 2015, e de um adesivo frágil, Araldite<sup>®</sup> AV138, para assim se poder fazer uma comparação do comportamento dos dois através dos resultados. A Figura 7 serve como uma indicação, para mostrar as curvas típicas de  $\sigma$ - $\epsilon$  no modo I puro dos adesivos Araldite<sup>®</sup> AV138 (a) e Araldite<sup>®</sup> 2015 (b). A diferença entre os dois adesivos no que se refere à ductilidade permitida é notória, uma vez que o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 tem uma zona de plastificação antes da rotura, enquanto o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 é extremamente frágil. No adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 também foi encontrado um maior desvio entre os provetes porque, devido à sua fragilidade, este adesivo é mais sensível a defeitos de fabrico. A tensão de rotura do adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 é quase o dobro da do adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015. A Tabela 1 resume os dados recolhidos sobre estes materiais. Estes dados serão posteriormente utilizados para as simulações de Elementos Finitos e previsões de força máxima. A tensão de cedência inicial foi calculada para uma deformação plástica de 0,2% para ambos os adesivos [52].

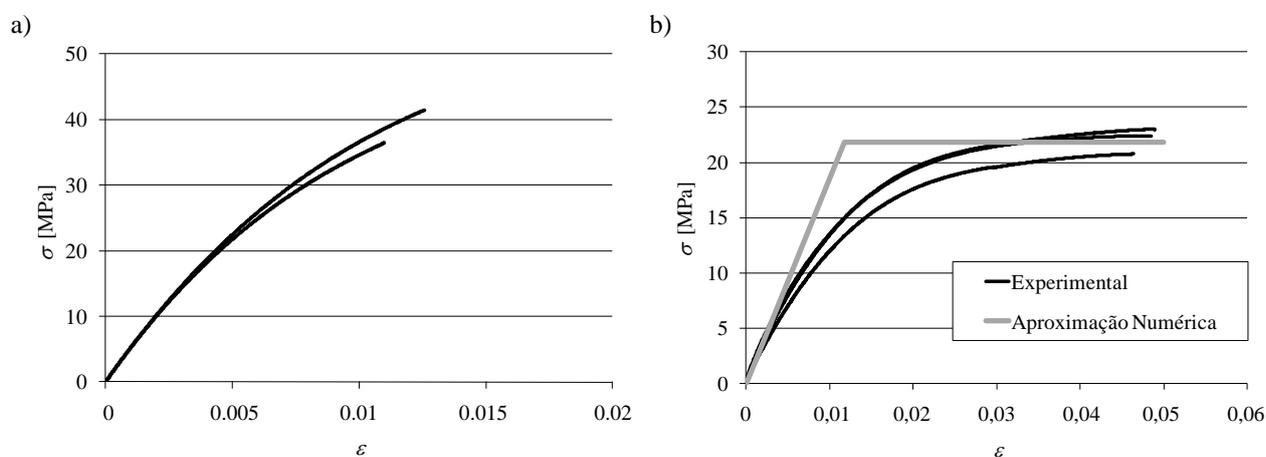


Figura 7 - Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  para os adesivos Araldite<sup>®</sup> AV138 (a) e Araldite<sup>®</sup> 2015 (b) [52].

Tabela 1- Propriedades mecânicas dos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 [52].

| Propriedades                                | AV138      | 2015       |
|---|------------|------------|
| Módulo de Young, $E$ [GPa]                  | 4,89±0,81  | 1,85±0,21  |
| Coefficiente de Poisson, $\nu^*$            | 0,35       | 0,33       |
| Tensão de Cedência, $\sigma_y$ [MPa]        | 36,49±2,47 | 12,63±0,61 |
| Tensão máxima, $\sigma_f$ [MPa]             | 39,45±3,18 | 21,63±1,61 |
| Deformação, $\varepsilon_f$ [%]             | 1,21±0,10  | 4,77±0,15  |
| Módulo de corte, $G$ [GPa]                  | 1,56±0,01  | 0,56±0,21  |
| Tensão de Cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa] | 25,1±0,33  | 14,6±1,3   |
| Tensão máxima de corte, $\tau_f$ [MPa]      | 30,2±0,40  | 17,9±1,8   |
| Deformação ao corte, $\gamma_f$ [%]         | 7,8±0,7    | 43,9±3,4   |

\* Dados do Fabricante.

## 3.2. Reparções 2D

### 3.2.1. Dimensões e geometria

As dimensões e a geometria dos provetes com remendo embebido para reparações 2D são apresentadas na Figura 8. As dimensões características do provete para as reparações 2D são o comprimento ( $L$ ), largura ( $b$ ), espessura ( $t_p$ ), comprimento do dano ( $e$ ), espessura de adesivo ( $t_A$ ) e ângulo ( $\alpha$ ). O comprimento do dano ( $e$ ) ficou definido como um valor fixo enquanto o comprimento do chanfro ( $L_t$ ) está intimamente relacionado com a escolha dos valores do ângulo  $\alpha$  e da espessura ( $t_p$ ) do provete. Para a realização do trabalho experimental e análise numérica foram consideradas as seguintes dimensões:  $L = 200$  mm,  $b = 25$  mm,  $t_p = 3$  mm,  $t_A = 0,2$  mm,  $e = 10$  mm e  $\alpha = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  e  $45^\circ$ .

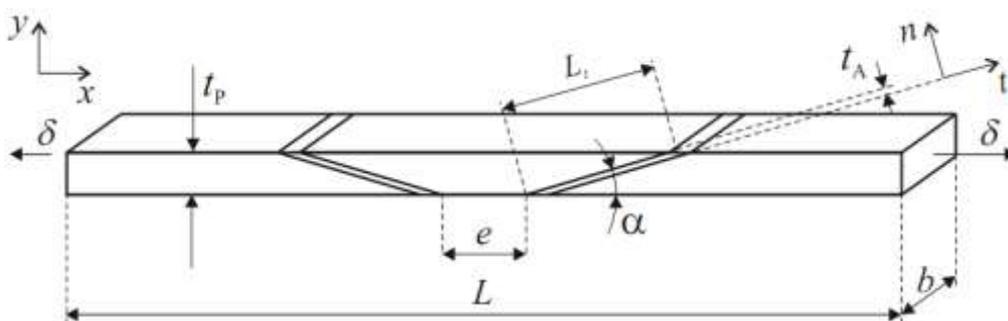


Figura 8 - Dimensões e geometria do provete 2D [32].

### 3.2.2. Maquinagem

Para o fabrico de cada provete são necessários dois substratos e um remendo. Os substratos foram obtidos a partir de barras de alumínio com cerca de 90 mm de comprimento, 25 mm de largura e 3 mm de espessura. Uma das extremidades dos substratos foi maquinada numa

fresadora para obter a rampa com valores de  $\alpha$  de  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$ . Para fazer os remendos foram cortadas placas com a mesma largura e espessura mas com um comprimento de 46 mm, 35 mm, 29 mm, 23 mm e 18 mm que posteriormente foram fresadas de ambos os lados para obter as rampas com os mesmos valores de  $\alpha$ . A Figura 9 apresenta um exemplo de substrato e remendo após a maquinagem.



**Figura 9 - Substratos e remendo após a maquinagem.**

As rampas dos substratos e remendos foram realizadas nas Oficinas Mecânicas do ISEP, através de uma fresadora que trabalhou com um avanço de 10 mm/min e uma velocidade de rotação de 1120 rot/min e utilizando a fresa “Dormer S142 Alu. S.D.S Carbide 12.00 K10 Micrograin”. Para garantir o ângulo desejado e para fixar o substrato ou remendo foi utilizada uma prensa sobre a mesa da fresadora, como se pode observar na Figura 10.



**Figura 10 - Processo de fresagem das rampas.**

### 3.2.3. Fabrico dos provetes

Depois de finalizar a fresagem, e antes de se proceder a colagem, todas as rampas foram sujeitas a uma limpeza com acetona, que é um processo passivo químico que tem como objetivo o desgorduramento da superfície. Antes da colagem as rampas foram submetidas a um processo de granalhagem. Neste processo utilizou-se granalha de alumina e foi realizado no laboratório de adesivos da FEUP. Antes da aplicação do adesivo as superfícies de colagem foram novamente limpas com acetona. Na Figura 11 pode observar-se os substratos e os remendos no final dos tratamentos da superfície.



**Figura 11 - Substratos e remendo pós tratamento da superfície.**

Depois de limpas as superfícies procedeu-se à colagem. Na colagem das reparações 2D foram utilizados dois adesivos, para a condição 1 foi utilizado o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 enquanto para a condição 2 foi utilizado o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138. Para obter um provete completamente alinhado, colocaram-se previamente os substratos e o remendo numa barra de suporte, presos por molas na posição correta, sob estes colocou-se uma tira de teflon para não colarem à barra de suporte (Figura 12). Para garantir a espessura do adesivo foram colocados na zona de sobreposição fios de pesca com 0,2 mm de diâmetro (Figura 13).



**Figura 12 - Montagem da barra de suporte com os substratos.**



**Figura 13 - Substrato com o fio de pesca.**

Por fim, através de uma pistola no caso do adesivo Araldite® 2015 e através de uma espátula no caso do adesivo Araldite® AV138, foi aplicado o adesivo nas rampas dos substratos que estavam na barra de suporte, à temperatura ambiente de 20 °C a 25 °C. Após aplicação do adesivo colocou-se, entre os dois substratos, os respectivos remendos. No final voltou-se a conferir o alinhamento das três partes do provete (Figura 14).



**Figura 14 - Provete após a aplicação do adesivo.**

A cura realizou-se à temperatura ambiente e 60 minutos após a colagem removeram-se os fios de pesca com a ajuda de um alicate. Nesta altura foi também removido o excesso de adesivo com auxílio de um x-ato. A Figura 15 apresenta o aspeto final de um provete. Os ensaios foram realizados uma semana após a colagem e durante este tempo os provetes permaneceram à temperatura ambiente (as fichas técnicas dos adesivos encontram-se no Anexo B e Anexo C).



**Figura 15 - Aspeto final de um provete 2D.**

### 3.3. Reparações 3D

#### 3.3.1. Dimensões e geometria

A Figura 16 mostra as dimensões características e a geometria de um provete com remendo embebido para as reparações 3D. As Dimensões características do provete para as reparações 3D são o comprimento ( $a$ ), largura ( $b$ ), espessura ( $t_p$ ), diâmetro do furo ( $d$ ), espessura de adesivo ( $t_A$ ) e ângulo ( $\alpha$ ). A borda exterior do chanfro (BEC) e a borda interior do chanfro (BIC) que estão identificadas na figura. O parâmetro  $\alpha$  pode ser definido como o ângulo que o chanfro do furo faz com o plano horizontal do provete. O diâmetro do furo ( $d$ ) ficou definido como um valor fixo enquanto o comprimento do chanfro ( $L_s$ ) está intrinsecamente relacionado com a escolha dos valores do ângulo  $\alpha$  e da espessura ( $t_p$ ) do provete. Para a realização do trabalho experimental foram consideradas as seguintes dimensões:  $a = 200$  mm,  $b = 50$  mm,  $t_p = 3$  mm,  $t_A = 0,2$  mm,  $d = 10$  mm e  $\alpha = 10^\circ$ .

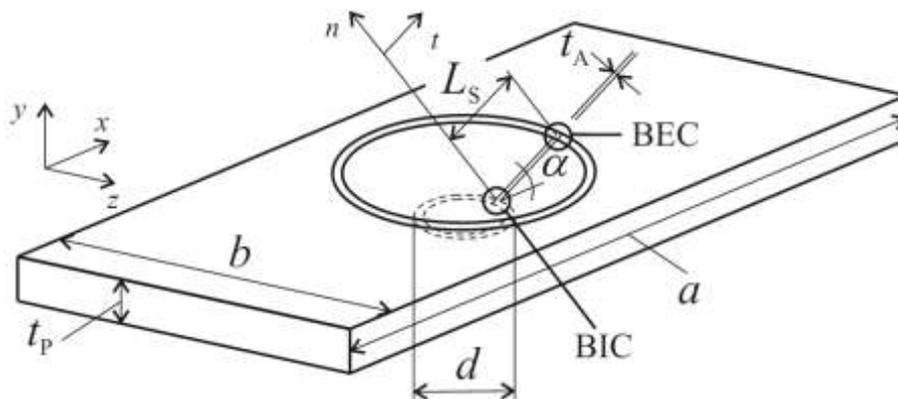


Figura 16 - Dimensões e geometria do provete 3D [53].

#### 3.3.2. Maquinagem

A maquinagem dos substratos e remendos 3D foi realizada na Lanema, tendo-se encomendado dez substratos e dez remendos com as dimensões e geometria indicadas anteriormente.

#### 3.3.3. Fabrico dos provetes

Antes de se proceder à colagem, e tal como nas reparações 2D, todos os furos e remendos foram sujeitas a dois tratamentos de superfície. Inicialmente os furos e remendos foram limpos com acetona e em seguida foram sujeitos a uma granalhagem. No final todas as

rampas voltaram a ser limpas com acetona antes de se proceder à colagem. Na Figura 17 pode observar-se os substratos e os remendos no final dos tratamentos da superfície.



**Figura 17 - Provetes 3D e respetivo remendo após a granalhagem.**

Depois de limpas as superfícies procedeu-se à colagem. Na colagem para as reparações 3D foram utilizados dois adesivos, para a condição 3 foi utilizado o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 enquanto para a condição 4 foi utilizado o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138. Para proceder à colagem dos provetes 3D colocaram-se os substratos sobre uma barra de suporte, sob estes colocou-se uma tira de teflon para não colarem a barra de suporte. Para garantir a espessura do adesivo foram colocados, na zona de sobreposição, fios de pesca com 0,2 mm de diâmetro (Figura 18).



**Figura 18 - Substrato 3D sobre teflon e com fio de pesca para garantir a espessura.**

Após aplicação do adesivo (Figura 19 a) colocou-se sobre o substrato o respetivo remendo. O conjunto foi pressionado e imobilizado por ação de uma mola (Figura 19 b).

a)



b)



**Figura 19 - Substrato 3D após a aplicação do adesivo Araldite® 2015 (a) e Substrato 3D após a colocação do remendo (b).**

Tal como aconteceu para os provetes 2D a cura realizou-se à temperatura ambiente e 60 minutos após a colagem removeram-se os fios de pesca com a ajuda de um alicate. Nesta altura foi também removido o excesso de adesivo com auxílio de um x-ato. A Figura 20 apresenta o aspeto final de um provete. Os ensaios foram realizados uma semana após a colagem e durante este tempo os provetes permaneceram à temperatura ambiente (tal como já foi referido as fichas técnicas dos adesivos encontram-se no Anexo B e Anexo C).

a)



**Figura 20 - Aspeto final de um provete 3D.**

### 3.4. Condições de ensaio

Passado o tempo de cura, todos os provetes foram tracionados até à rotura obtendo-se os dados de força e deslocamento que posteriormente foram utilizados para a construção dos gráficos com as curvas força-deslocamento ( $P-\delta$ ).

Os ensaios de tração foram realizados na máquina Shimadzu – Autograph AG-X com uma célula de carga de 100 kN (Figura 21). As condições de ensaio foram as seguintes:

- Temperatura: ambiente (aproximadamente 23 °C);
- Humidade relativa de 80%;
- Velocidade de ensaio: 1 mm/min;
- Distância entre maxilas: 220 mm.

Foram obtidos, para os ensaios realizados às reparações 2D com dois adesivos e para todos os valores de  $\alpha$  (10°, 15°, 20°, 30° e 45°), um mínimo de quatro resultados válidos. Enquanto no caso das reparações 3D com as mesmas condições, foram obtidos um mínimo de três ensaios válidos. Para o provete 3D sem remendo realizou-se apenas um ensaio. Os modos de rotura foram avaliados por inspeção visual.

a)



b)



Figura 21 - Máquina Shimadzu – Autograph AG-X (a) e provete fixo nas maxilas da máquina de tração (b).

### 3.5. Resultados e comentários das reparações

#### 3.5.1. Reparções 2D com Araldite® 2015 - Condição 1

Na Figura 22 são apresentadas as curvas  $P$ - $\delta$  das reparações com valores de  $\alpha$  igual a  $10^\circ$  e  $45^\circ$  na condição 1 (reparações 2D com adesivo Araldite® 2015). Observa-se que a junta com  $\alpha$  igual a  $10^\circ$  atinge valores de  $P$  muito superiores aos atingidos pelas reparações com  $\alpha$  igual a  $45^\circ$ , a explicação desta observação será mais detalhada no Capítulo 4. Também se observa que os resultados apresentam uma concordância aceitável entre todas as curvas, apresentando um comportamento linear até a rotura e mostrando apenas pequenos sinais de plastificação do adesivo antes da  $P_{\text{máx}}$  ser atingida. No Anexo D são apresentadas as curvas  $P$ - $\delta$  para todos os valores de  $\alpha$  na condição 1 (Figura 48, Figura 50, Figura 52, Figura 54 e Figura 56).

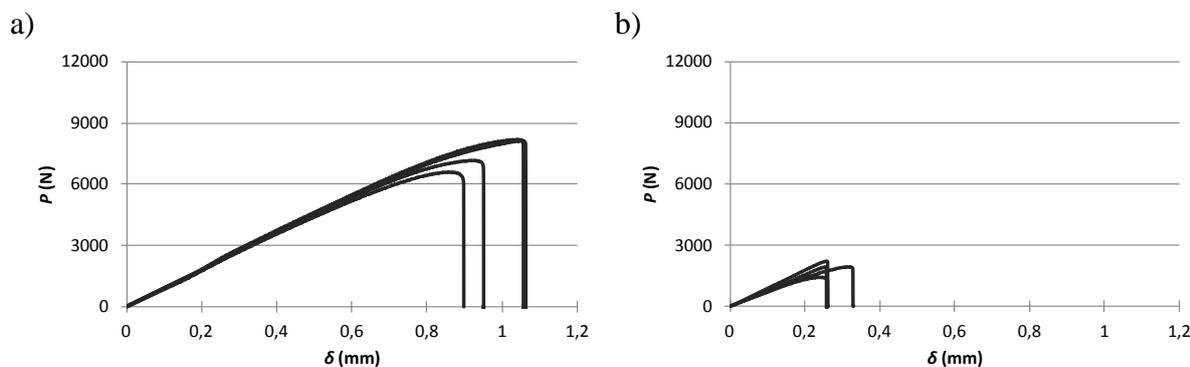
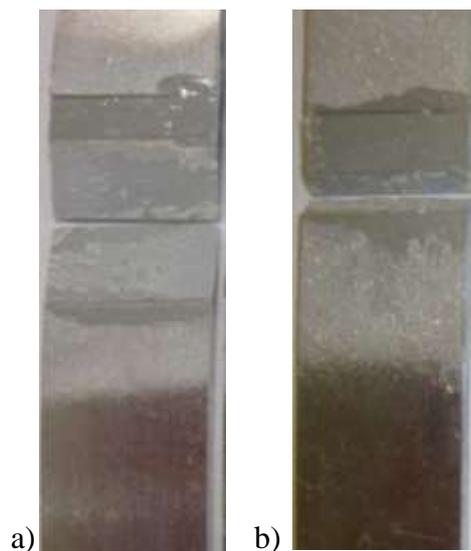


Figura 22 - Curvas  $P$ - $\delta$  para as reparações 2D com  $\alpha$  igual a  $10^\circ$  (a) e a  $45^\circ$  (b), coladas com Araldite® 2015.

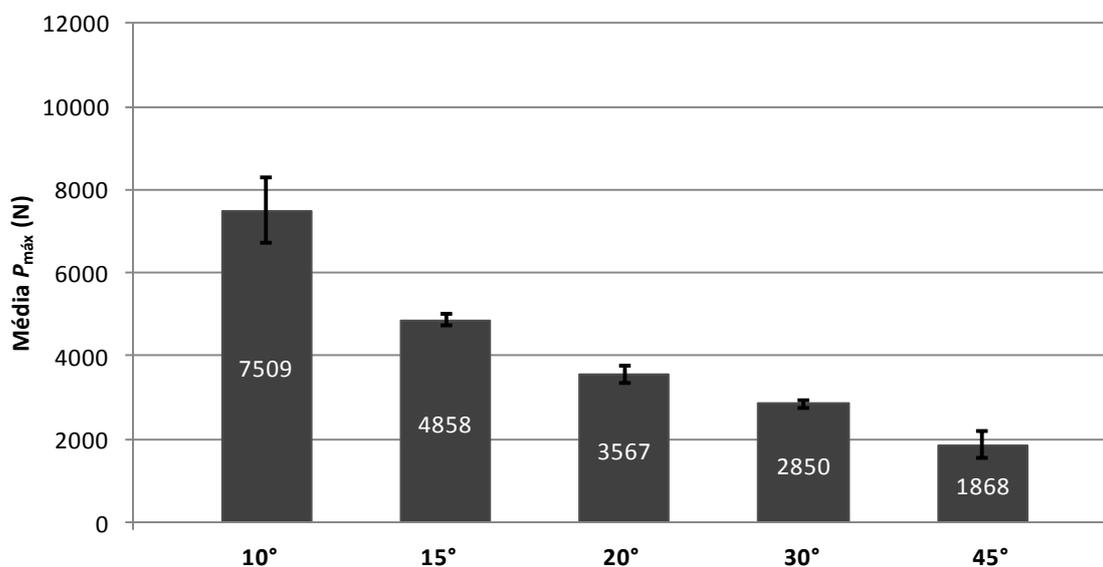
A Figura 23 mostra as superfícies de rotura para as reparações com valores de  $\alpha$  igual a  $10^\circ$  e  $45^\circ$  na condição 1. Depois de observar por inspeção visual todas as superfícies de rotura verificou-se que a rotura das reparações no geral ocorreu por rotura coesiva do adesivo, o que aprova a metodologia da preparação das reparações descritas na secção 3.2.3.

No Anexo D são apresentadas as superfícies de rotura para todos os valores de  $\alpha$  na condição 1 (Figura 49, Figura 51, Figura 53, Figura 55 e a Figura 57).



**Figura 23 - Superfícies de rotura para as reparações 2D com  $\alpha$  igual a  $10^\circ$  (a) e a  $45^\circ$  (b), coladas com Araldite® 2015.**

A Figura 24 apresenta a média e o desvio padrão da  $P_{\text{máx}}$  para todos os valores de  $\alpha$ , das reparações na condição 1. Observa-se por comparação dos valores de  $P_{\text{máx}}$ , que a diminuição de  $\alpha$  tem um efeito muito benéfico na eficiência da junta, a explicação desta observação será mais detalhada no Capítulo 4. Pode observar-se para ângulo  $10^\circ$  em relação à junta de  $45^\circ$ , um aumento percentual da carga máxima suportada de 302,1 %, que em termos absolutos corresponde a um aumento de 5641 N.

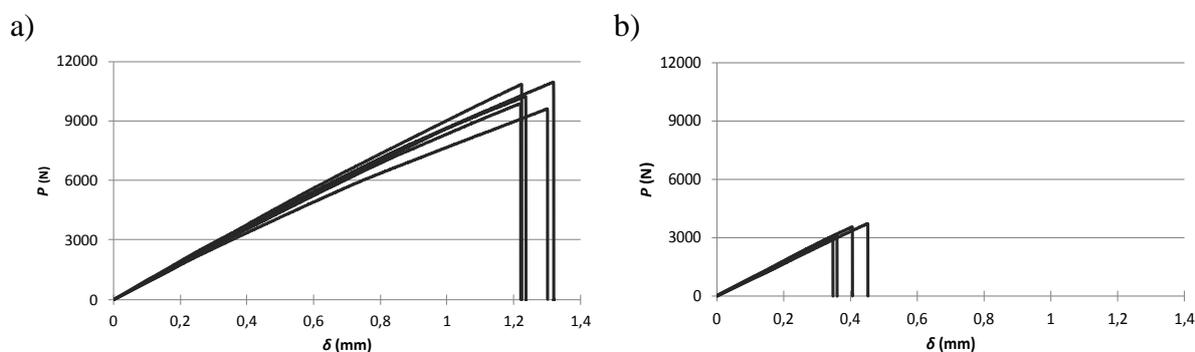


**Figura 24 - Comparação da média das  $P_{\text{máx}}$  para cada valor de  $\alpha$  nas reparações 2D coladas com Araldite® 2015.**

### 3.5.2. Reparações 2D com Araldite® AV138 - Condição 2

Na Figura 25 são apresentadas as curvas  $P$ - $\delta$  das reparações com valores de  $\alpha$  igual a  $10^\circ$  e  $45^\circ$  na condição 2 (reparações 2D com o adesivo Araldite® AV138), tal como aconteceu na condição 1, observa-se que a junta com  $\alpha$  igual a  $10^\circ$  atinge valores de  $P$  muito superiores aos atingidos pelas reparações com  $\alpha$  igual a  $45^\circ$ , a explicação desta observação será mais detalhada no Capítulo 4. Também se observa que os resultados apresentam uma concordância aceitável entre todas as curvas, e que devido à sua fragilidade apresentam um comportamento linear até a rotura.

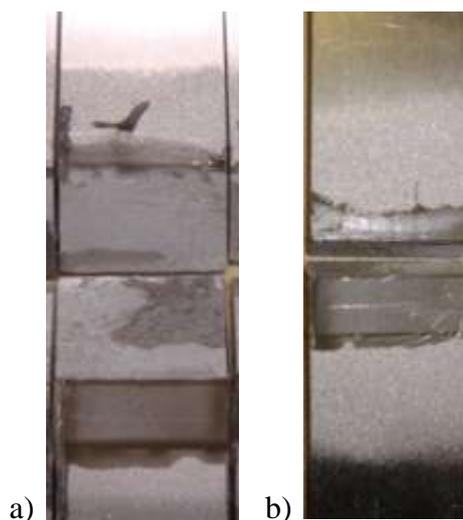
No Anexo E são aprestadas as curvas  $P$ - $\delta$  para todos os valores de  $\alpha$  na condição 2. (Figura 58, Figura 60, Figura 62, Figura 64 e a Figura 66).



**Figura 25 - Curvas  $P$ - $\delta$  para as reparações 2D com  $\alpha$  igual a  $10^\circ$  (a) e a  $45^\circ$  (b), coladas com Araldite® AV138.**

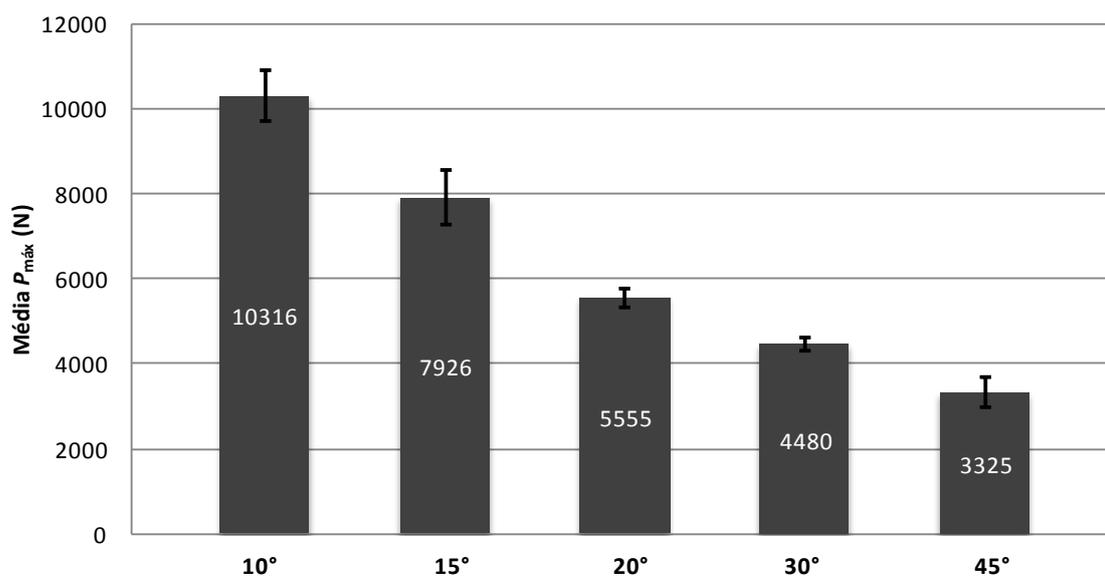
A Figura 26 mostra as superfícies de rotura para as reparações com valores de  $\alpha$  igual a  $10^\circ$  e  $45^\circ$  na condição 2. Depois de observar por inspeção visual todas as superfícies de rotura verificou-se que a rotura das reparações no geral ocorreu por rotura coesiva do adesivo, o que aprova a metodologia da preparação das reparações descritas na secção 3.2.3 para este adesivo. Nos provetes em que isto não aconteceu não foram considerados válidos esses dados para o tratamento dos resultados.

No Anexo E são aprestadas as superfícies de rotura de todos os valores de  $\alpha$  para a condição 2 (Figura 59, Figura 61, Figura 63, Figura 65 e a Figura 67).



**Figura 26 - Superfícies de rotura para as reparações 2D com  $\alpha$  igual a  $10^\circ$  (a) e a  $45^\circ$  (b), coladas com Araldite® AV138.**

A Figura 27 apresenta a média e o desvio padrão da  $P_{\text{máx}}$  para todos os valores de  $\alpha$ , das reparações na condição 2. Nesta figura também é notória uma diferença significativa entre todos os valores de  $\alpha$ , cujo rácio é semelhante à condição 1, o que significa mais uma vez, que o ângulo tem influência neste tipo de ligação e que a diminuição deste trás um melhoramento à junta, como já foi referido a explicação desta observação será mais detalhada no Capítulo 4. Pode observar-se para  $\alpha$  igual a  $10^\circ$  em relação á junta com  $\alpha$  igual a  $45^\circ$ , um aumento percentual da carga máxima suportada de 210,2 % que corresponde em termos absolutos a uma diferença de 6991 N.



**Figura 27 - Comparação da média das  $P_{\text{máx}}$  para cada valor de  $\alpha$  nas reparações 2D coladas com Araldite® AV138.**

### 3.5.3. Comparação dos resultados obtidos para as reparações 2D

A Figura 28 apresenta a média e o desvio padrão das  $P_{\text{máx}}$  nas condições 1 e 2 para todos os valores de  $\alpha$ . Nesta figura verifica-se que o adesivo Araldite® AV138 obteve valores de  $P_{\text{máx}}$  muito superiores para todos os valores de  $\alpha$  quando comparado com o adesivo Araldite® 2015. Isto acontece porque o adesivo Araldite® AV138, embora seja um adesivo frágil, tem maior resistência ao corte, que é o esforço que mais afeta este tipos de reparação uma vez que as tensões de arrancamento são muito inferiores.

A maior diferença de  $P_{\text{máx}}$  entre os dois adesivos dá-se para o ângulo de 45°, no qual se observa um aumento da  $P_{\text{máx}}$  do adesivo Araldite® 2015 para o adesivo Araldite® AV138 de 78,0%, enquanto a menor diferença se dá para o ângulo de 10°, onde se observa um aumento da  $P_{\text{máx}}$  entre os mesmos adesivos de 37,4%.

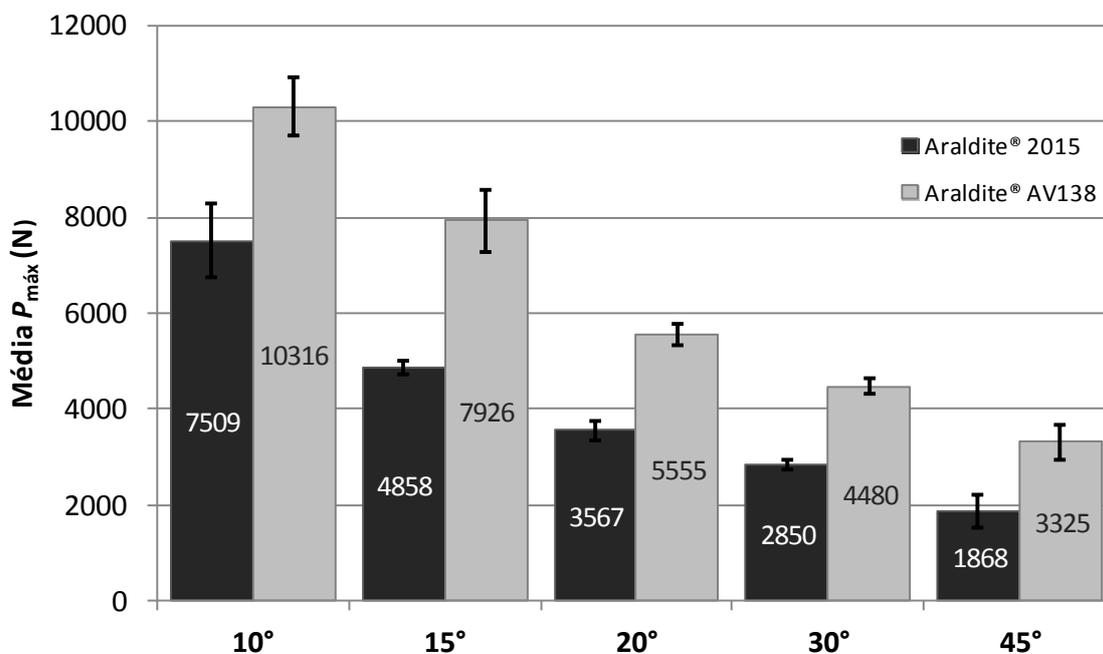


Figura 28 - Comparação da média das  $P_{\text{máx}}$  para cada valor de  $\alpha$  nas reparações 2D coladas com Araldite® 2015 e Araldite® AV138.

De facto, a diferença de  $P_{\text{máx}}$  entre os dois adesivos diminuiu progressivamente com a redução do ângulo, o que pode ser explicado pela distribuição das tensões de corte, que são mais preponderantes na resistência das reparações *scarf* do que as tensões de arrancamento, devido à sua maior magnitude [57]. Mais especificamente, para valores de ângulo mais elevados as tensões de corte são praticamente constantes ao longo do comprimento de ligação e vão progressivamente gerando picos de tensões de corte com a

redução deste ângulo. Assim, para os ângulos mais elevados, o valor de  $P_{\text{máx}}$  é quase exclusivamente dependente das resistências do adesivo à tração e corte. Por este motivo, para o ângulo de  $45^\circ$  observou-se a maior diferença de  $P_{\text{máx}}$ . Com a redução do ângulo os picos de tensão de corte aumentam e permitem nas reparações com o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 a plastificação antes da rotura, o que não acontece com o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 devido à sua fragilidade, o que reduz a diferença relativa entre o valor de  $P_{\text{máx}}$  para os dois tipos de adesivos.

### 3.5.4. Reparação 3D com Araldite<sup>®</sup> 2015 - Condição 3 e Reparação 3D com Araldite<sup>®</sup> AV138 - Condição 4

A Figura 29 mostra as curvas  $P$ - $\delta$  para as reparações 3D coladas com os adesivos Araldite<sup>®</sup> 2015 e Araldite<sup>®</sup> AV138 (condições 3 e 4 respetivamente). Para estas reparações apenas foram utilizados, como já foi referido, valores de  $\alpha$  igual a  $10^\circ$ . Nesta figura pode-se verificar que todas as curvas apresentam uma concordância aceitável. O comportamento de cada adesivo foi idêntico, observando-se no geral um comportamento linear até à rotura do adesivo. Podem observar-se dois picos nas curvas de cada provete, o primeiro pico representa a  $P_{\text{máx}}$  suportada pela reparação e corresponde à rotura do adesivo. Enquanto o segundo pico representa a rotura do substrato.

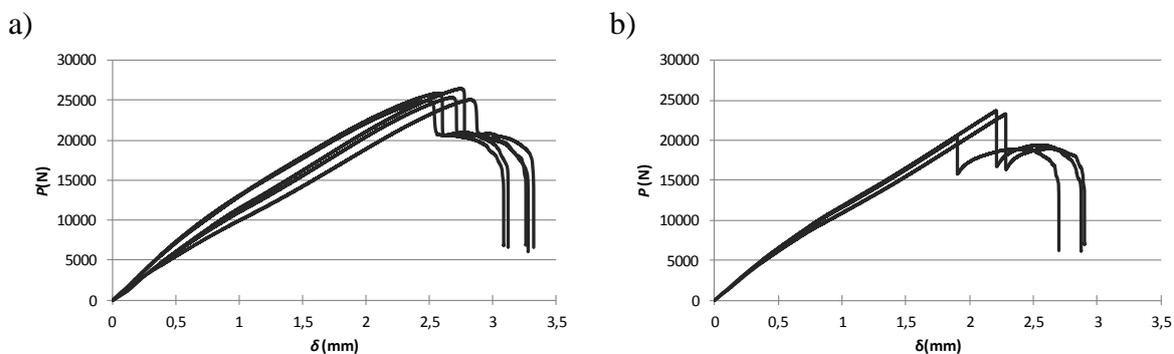
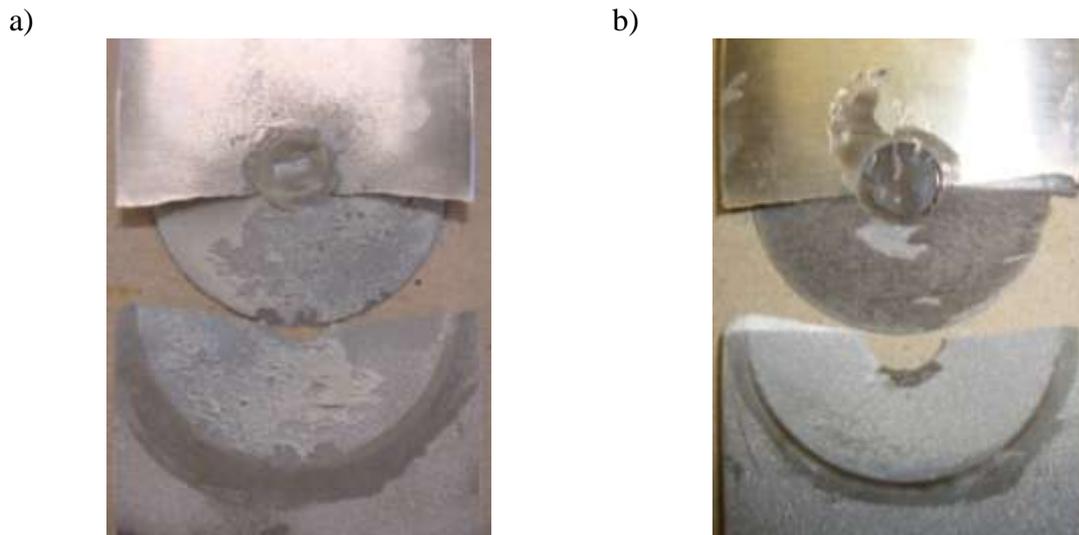


Figura 29 - Curvas  $P$ - $\delta$  para as reparações 3D coladas com os adesivos Araldite<sup>®</sup> 2015 (a) e Araldite<sup>®</sup> AV138 (b).

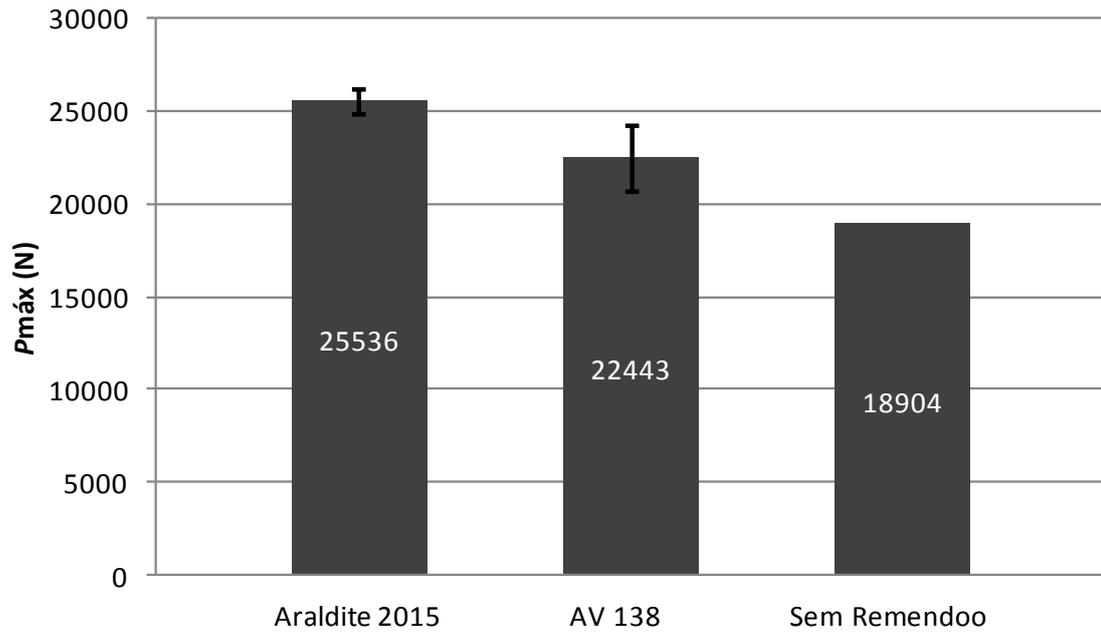
A Figura 30 mostra um exemplo para cada adesivo das superfícies de rotura para as condições 3 e 4. Depois de observar por inspeção visual todas as superfícies de rotura verificou-se que a rotura das reparações no geral, tal como aconteceu para as reparações 2D, ocorreu por rotura coesiva do adesivo.



**Figura 30 - Exemplo da superfície de rotura para as reparações 3D coladas com Araldite® 2015 (a) e Araldite® AV138 (b).**

A Figura 31 apresenta os valores de  $P_{\text{máx}}$  suportados pelas reparações e para um provete com o furo cónico mas sem remendo permitindo, assim, comparar a resistência das reparações, com os dois adesivos utilizados, e com o provete sem remendo. Verifica-se que a utilização do adesivo Araldite® AV138, relativamente à reparação sem remendo, originou um aumento de  $P_{\text{máx}}$  de 18,7%. Enquanto com o adesivo Araldite® 2015 este aumento foi ainda mais considerável (35,1%).

Como já foi referido para o caso das reparações 2D, para ângulos pequenos os picos de tensão de corte aumentam e permitem nas reparações com o adesivo Araldite® 2015 a plastificação antes da rotura, o que não acontece com o adesivo Araldite® AV138 devido à sua fragilidade. Para a reparação 3D testada ( $\alpha = 10^\circ$ ) o ângulo é pequeno e a área de colagem é significativamente maior que para a reparação 2D permitindo, assim, uma plastificação mais generalizada do adesivo Araldite® 2015, o que resulta na obtenção de valores de  $P_{\text{máx}}$  superiores aos obtidos com o adesivo Araldite® AV138, observando-se um aumento de  $P_{\text{máx}}$  de 13,8% para o Araldite® 2015.



**Figura 31 - Comparação da média das  $P_{máx}$  entre a condição 3 e 4 para as reparações 3D.**



## 4. Trabalho Numérico

O capítulo quatro é dedicado à análise numérica da resistência das reparações 2D pela técnica de remendo embebido. No início do capítulo são descritas as condições da análise numérica utilizadas no programa de elementos finitos ABAQUS® CAE. De seguida é descrito o modelo de dano utilizado para previsão da resistência das reparações, e é feita uma descrição da forma como foram determinadas as propriedades coesivas dos adesivos. É também feita uma análise das tensões axiais normais, tensões de arrancamento e tensões de corte para permitir uma análise mais substanciada dos resultados obtidos. Segue-se a descrição dos modos de rotura e para terminar o capítulo é feita uma comparação das cargas máximas entre os resultados experimentais e numéricos, o que permitiu a obtenção de algumas conclusões importantes.

#### 4.1. Condições da análise numérica

A análise pelo MEF foi realizada no programa de elementos finitos ABAQUS<sup>®</sup> CAE. As reparações estudadas foram modeladas como problemas 2D em estado plano de deformação, considerando as mesmas dimensões utilizadas nos provetes experimentais (Capítulo 3.2.1), embora considerando simetria vertical a meio do comprimento do provete (Figura 32). Os aderentes de alumínio foram modelados por elementos contínuos e foram considerados como um material homogéneo e isotrópico de comportamento elástico perfeitamente plástico, como está definido na Figura 5. Quanto aos adesivos, estes foram modelados por elementos coesivos com uma lei de tração-separação triangular, apresentada no capítulo seguinte. As propriedades mecânicas utilizadas para os aderentes são descritas no Capítulo 3.1.1, enquanto as propriedades coesivas dos adesivos, utilizadas nos modelos estão descritas na Tabela 2 para o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 e na Tabela 3 para o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138.

Com o objetivo de aproximar a simulação à realidade de um ensaio de tração, foi definido para as condições fronteira, que a extremidade mais próxima da junta (secção A-A da Figura 32) se encontra restringida horizontalmente e que a outra extremidade é submetida a um deslocamento de tração de 0,5 mm, ao mesmo tempo que um nó nesta extremidade se encontra restringido verticalmente, para evitar movimento de corpo rígido do modelo.

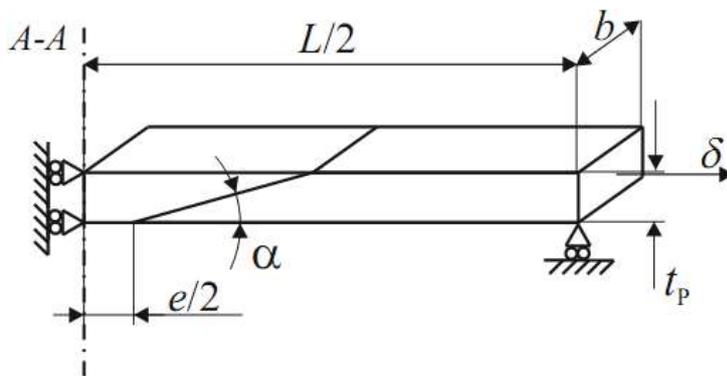
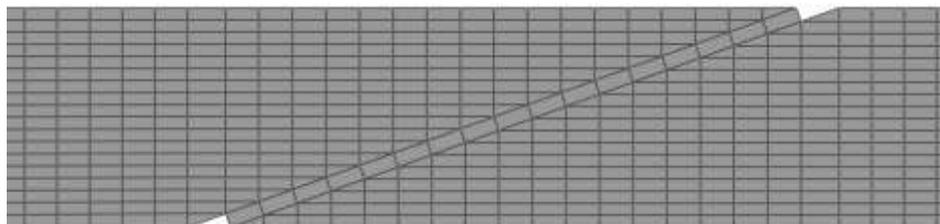


Figura 32 - Esquema com as dimensões 2D utilizado na parte numérica.

A Figura 33 mostra um exemplo do aspeto da malha utilizada, para a junta com  $\alpha$  igual a 20°. Em todos os casos foi considerada uma malha homogénea no tamanho dos elementos, com dois tipos de elementos sólidos para modelação dos substratos. Na fronteira inclinada do modelo junto à camada de adesivo, foram considerados elementos contínuos de três nós de estado plano de deformação (elementos CPE3 do ABAQUS<sup>®</sup>) e para o resto do

substrato e remendo foram considerados elementos contínuos de quatro nós de estado plano de deformação (elementos CPE4R do ABAQUS®). A camada de adesivo foi modelada por uma única fila de elementos coesivos de quatro nós (COH2D4 do ABAQUS®).



**Figura 33 - Exemplo da malha utilizada, para a junta com  $\alpha = 20^\circ$ .**

Na Figura 33 pode observar-se na extremidade do adesivo um entalhe, que foi considerado nos modelos numéricos, devido a impossibilidade de utilização de elemento coesivos distorcidos, que ocorreriam caso houvesse a ligação entre os pares de nós da mesma linha horizontal na zona do entalhe. Na Figura 33 também se pode observar que, apesar das concentrações de tensões existentes na proximidade da extremidade do adesivo, não se considerou gradação da malha, isto devido à inviabilidade/dificuldade de criação da malha devido à inclinação na fronteira com a zona do adesivo.

A formulação proposta para modelação das reparações inclui um modelo triangular de propagação de dano em modo misto, para consideração simultânea dos esforços de arrancamento e de corte, tal como definido mais adiante neste trabalho. A técnica de modelação proposta está implementada no ABAQUS® CAE e será descrita de forma sucinta no Capítulo seguinte.

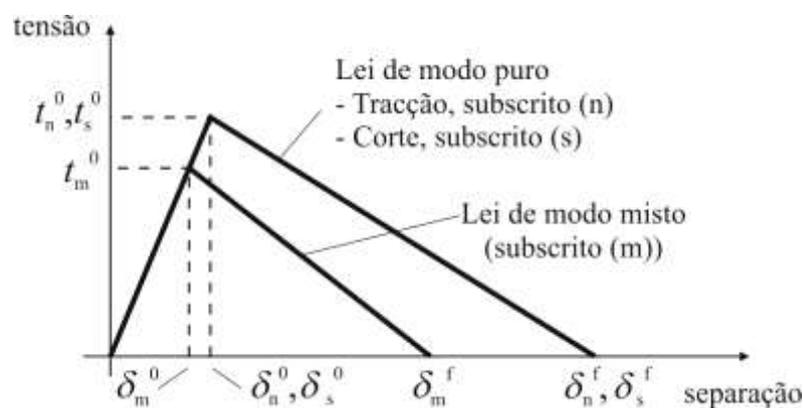
## **4.2. Modelo de dano coesivo**

### **4.2.1. Modelo de dano triangular**

A previsão da resistência das reparações foi realizada pela utilização de um MDC associado à técnica de EF. Os MDC baseiam-se na definição de uma relação entre tensões e deslocamentos relativos (Figura 34) entre nós homólogos dos elementos coesivos (em tração e corte). Os MDC são utilizados para simular o comportamento elástico de meios contínuos ou interfaces até à resistência coesiva em tração ( $t_n^0$ ) ou corte ( $t_s^0$ ) e o amaciamento consequente, o que permite reproduzir a degradação gradual até a rotura final

dos materiais. As áreas sob as leis coesivas representam respetivamente os valores de taxa de libertação de energia de deformação em tração ( $G_n$ ) ou corte ( $G_s$ ), que são igualados aos correspondentes valores críticos em tração ( $G_n^c$ ) ou corte ( $G_s^c$ ), permitindo assim definir os deslocamentos de rotura em tração ( $\delta_n^f$ ) e corte ( $\delta_s^f$ ), que correspondem à anulação completa dos esforços entre o par de nós em questão.

Quando em modo puro de solitação as tensões são anuladas na lei coesiva em tração ou corte, a propagação de dano ocorre num determinado par de nós. Quando a zona do dano se encontra sob uma solitação de modo misto, isto é, combinação de tração e corte, são tipicamente utilizados critérios de deslocamentos relativos, tensões ou energéticos para criação de uma lei coesiva de modo misto que combine estes esforços.



**Figura 34 - Lei de tração-separação com amaciamento linear disponível no ABAQUS®.**

Na formulação seguida neste trabalho, o comportamento elástico dos elementos coesivos em tração ou corte (isto é, até  $t_n^0$  ou  $t_s^0$ , respetivamente) é definido por uma matriz constitutiva,  $\mathbf{K}$ , que relaciona as tensões e deformações instantâneas em tração e em corte (subscritos  $n$  e  $s$ , respetivamente).

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

A matriz  $\mathbf{K}$  contém os parâmetros de rigidez da camada fina de adesivo, dados pelos módulos elásticos respetivos. Uma aproximação adequada para camadas adesivas finas é conseguida fazendo  $K_{nn} = E$ ,  $K_{ss} = G$ ,  $K_{ns} = 0$  [54, 55];  $E$  e  $G$  são respetivamente os módulos elásticos de tração e de corte. A iniciação do dano pode ser especificada por critérios distintos. Neste trabalho, considerou-se um critério quadrático de tensões, testado

por diversos autores, e que se revelou adequado para simulação do comportamento de camadas adesivas [32].

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

$\langle \rangle$  representam os parenteses de Macaulay, que indicam que o esforço normal de compressão não conduz à existência de dano [56]. Depois de alcançada a tensão máxima em modo misto ( $t_m^0$  na Figura 34, correspondendo a um valor de  $\delta$  de  $\delta_m^0$ ) devido ao cumprimento da expressão (2), a rigidez material inicia um processo de degradação. A separação completa e o deslocamento relativo em modo misto correspondente à rotura ( $\delta_m^f$  na Figura 34) são previstos por um critério linear energético.

$$\frac{G_n}{G_n^c} + \frac{G_s}{G_s^c} = 1 \quad (3)$$

Os valores introduzidos no ABAQUS<sup>®</sup> para as leis de dano correspondentes à camada fina de adesivo (para os adesivos Araldite<sup>®</sup> 2015 e Araldite<sup>®</sup> AV138) serão apresentados no Capítulo seguinte em conjunto com o respetivo método de estimativa de cada parâmetro [57, 58].

#### 4.2.2. Determinação dos parâmetros coesivos

Para a caracterização das leis coesivas, em tração e corte, é necessário conhecer as resistências coesivas ( $t_n^0$  e  $t_s^0$ ) e as energias de fratura ( $G_n^c$  e  $G_s^c$ ). No passado foram publicados alguns estudos que assumiam por aproximação que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios *bulk* [24, 54, 59]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias e propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material em bruto e como camada fina [60 - 62]. Como tal, é necessária a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

Para o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015, as leis coesivas da camada de adesivo foram determinadas por um método inverso para a determinação de  $t_n^0$  e  $t_s^0$ . Uma descrição mais detalhada desta metodologia é apresentada no estudo de Moura et al. [63], que basicamente consiste na determinação de  $G_n^c$  e  $G_s^c$  através de ensaios DCB e ensaios ENF, respetivamente,

usando um método ou teoria adequados para a sua obtenção. O valor de  $G_n^c$  ou  $G_s^c$  é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de  $t_n^0$  ou  $t_s^0$ , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de  $t_n^0$  ou  $t_s^0$  é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas  $P$ - $\delta$  numéricas e experimentais do teste respectivo de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 numa lei coesiva em modo misto. Os valores de  $E$  e  $G$ , módulo de elasticidade em tensão e corte da camada de adesivo, foram determinados experimentalmente [64] com ensaios *bulk* de adesivo e ensaio de corte (TAST - Thick adherend shear test)), respectivamente ( $E = 1850\text{MPa}$ ;  $G = 650\text{MPa}$ ) [65].

**Tabela 2 - Parâmetros coesivos em modo I e II puros para uma camada de adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 com uma espessura de 0,2 mm.**

|                |      |                |      |
|----------------|------|----------------|------|
| $E$ (MPa)      | 1850 | $G$ (MPa)      | 650  |
| $t_n^0$ (MPa)  | 23,0 | $t_s^0$ (MPa)  | 22,8 |
| $G_n^c$ (N/mm) | 0,43 | $G_s^c$ (N/mm) | 4,7  |

Tal como no caso anterior, para a determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138, foi utilizado um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [66]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente. Foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios *bulk* e ensaio de corte TAST, respectivamente para a definição de  $t_n^0$  e o  $t_s^0$ . Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de  $G_n^c$  e  $G_s^c$  para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a junta de sobreposição simples com comprimento de sobreposição de 20 mm), e as leis do adesivo foram estimadas de forma idêntica ao caso anterior por ajuste das curvas  $P$ - $\delta$  numéricas e experimentais. Os valores obtidos, foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de  $E$  e  $G$  foram determinados experimentalmente com ensaios *bulk* e ensaios de

corde (TAST). A Tabela 3 mostra os valores introduzidos no ABAQUS<sup>®</sup> para as simulações de crescimento de danos na camada adesiva [66].

**Tabela 3 - Parâmetros coesivos em modo I e II puros para uma camada de adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 com uma espessura de 0,2 mm.**

|                |       |                |      |
|----------------|-------|----------------|------|
| $E$ (MPa)      | 4890  | $G$ (MPa)      | 1560 |
| $t_n^0$ (MPa)  | 39,45 | $t_s^0$ (MPa)  | 30,2 |
| $G_n^c$ (N/mm) | 0,2   | $G_s^c$ (N/mm) | 0,38 |

### 4.3. Análise de tensões das reparações 2D

Com o intuito de estudar o efeito do valor de  $\alpha$  no campo de tensões gerado ao longo da junta colada, foram considerados os valores de  $\alpha$  limite da gama analisada experimentalmente ( $\alpha = 10$  e  $45^\circ$ ). Este estudo trata os campos de tensões normais, de arrancamento e de corte, para os adesivos Araldite<sup>®</sup> 2015 e Araldite<sup>®</sup> AV138. Para a determinação do campo de tensões, para todas as componentes de tensão, foi considerado para todos os casos o primeiro incremento nos resultados do ABAQUS<sup>®</sup>, correspondendo a um deslocamento de tração de 0,005 mm, para permitir a comparação dos valores obtidos.

#### 4.3.1. Tensões axiais normais

A Tabela 4 apresenta os valores de tensões axiais normais máximas para todas as condições estudadas. Observa-se que estes valores das tensões normais máximas são da mesma ordem de grandeza independentemente do adesivo utilizado ou da configuração do ângulo utilizado. Estes valores de tensões máximas foram obtidos no substrato/remendo nas extremidades que fazem fronteira com o adesivo.

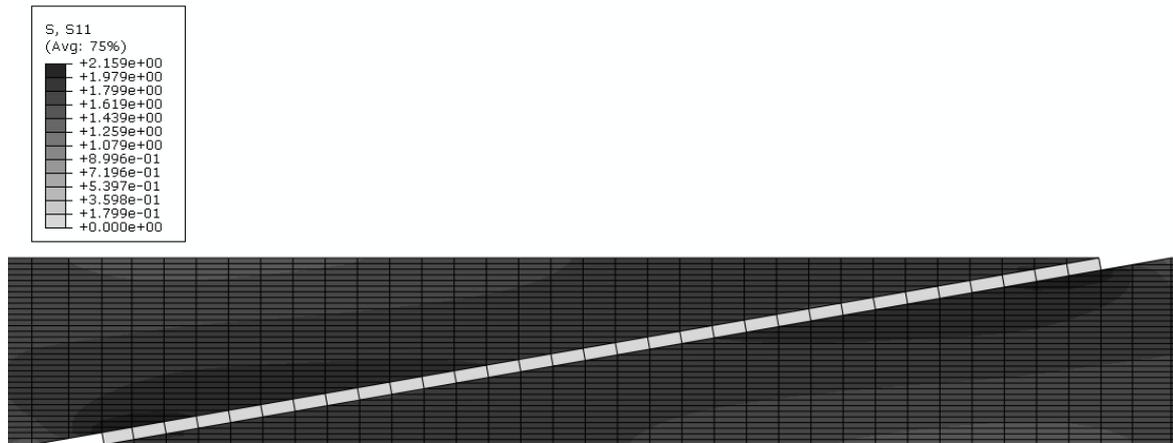
**Tabela 4 - Tensões normais máximas em MPa para todas as condições estudadas.**

|            | Araldite <sup>®</sup><br>2015 | Araldite <sup>®</sup><br>AV138 |
|------------|-------------------------------|--------------------------------|
| <b>10°</b> | 2,1590                        | 2,4040                         |
| <b>15°</b> | 2,1970                        | 2,3020                         |
| <b>20°</b> | 2,1720                        | 2,1930                         |
| <b>30°</b> | 2,6250                        | 2,7790                         |
| <b>45°</b> | 2,5140                        | 2,9640                         |

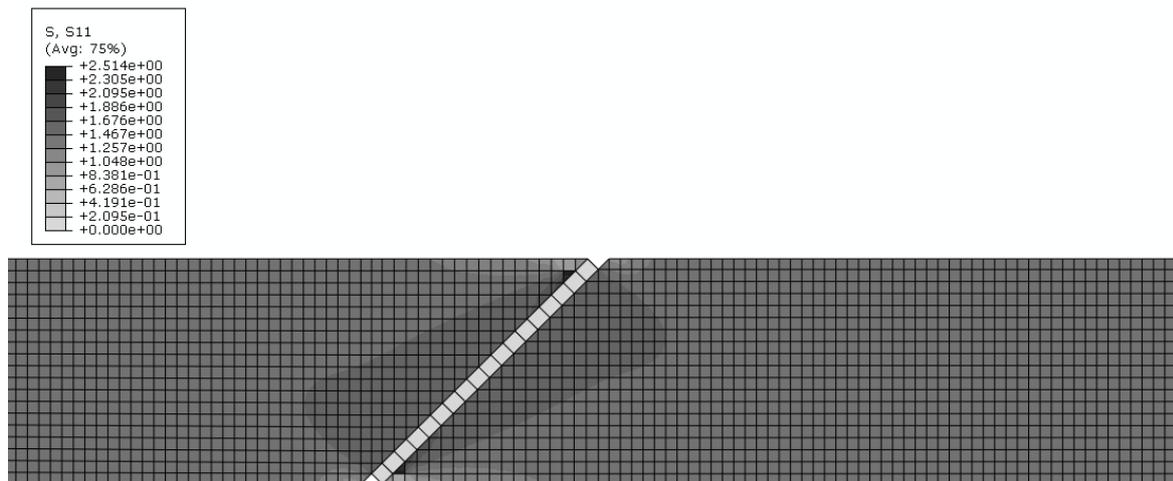
As figuras seguintes apresentam as tensões normais ao longo dos substratos e remendos. As distribuições das tensões normais do maior e menor ângulo ( $10^\circ$  e  $45^\circ$ ) são apresentadas

nas figuras seguintes: em primeiro lugar para o adesivo Araldite® 2015 (Figura 35), e em segundo lugar para o adesivo Araldite® AV138 (Figura 36).

a)



b)

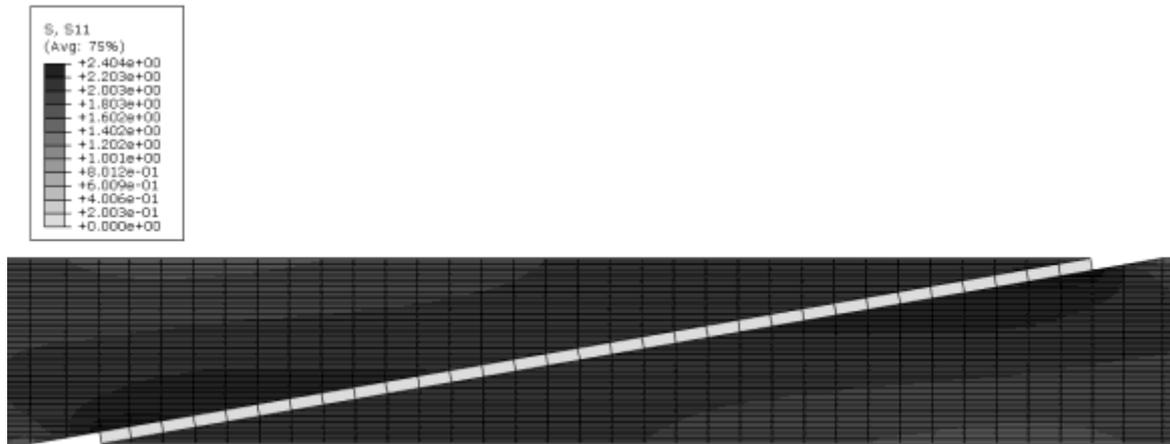


**Figura 35 - Tensões normais com o adesivo Araldite® 2015 para valores de  $\alpha$  de 10° (a) e de 45° (b).**

Observando a Figura 35 e a Figura 36, nota-se que para os dois valores de  $\alpha$ , os maiores valores de tensões normais ocorrem nos substratos e remendos, e que os valores máximos ocorrem na proximidade do adesivo.

No Anexo F são apresentadas distribuições das tensões normais de todos os valores de  $\alpha$  para os dois adesivos.

a)



b)

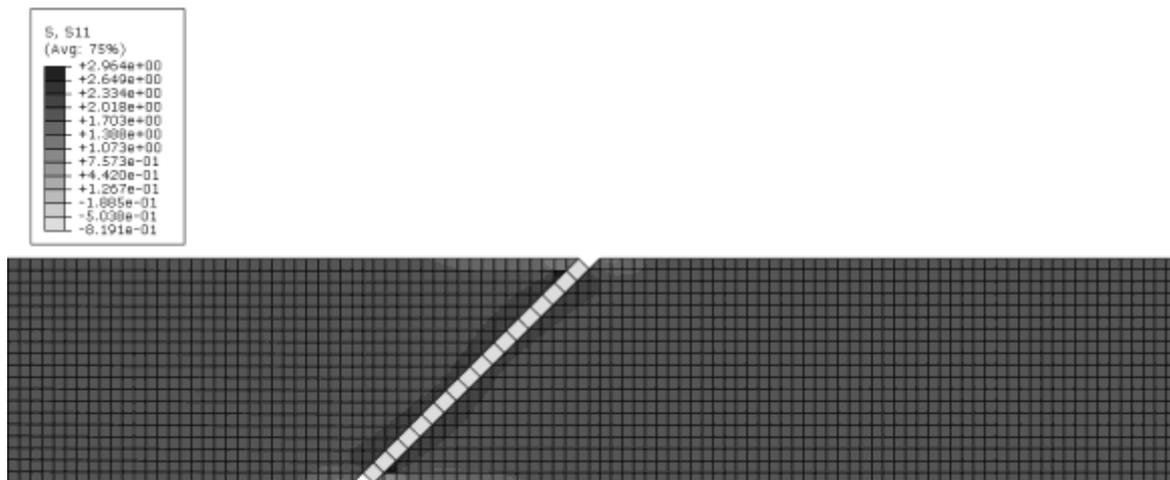
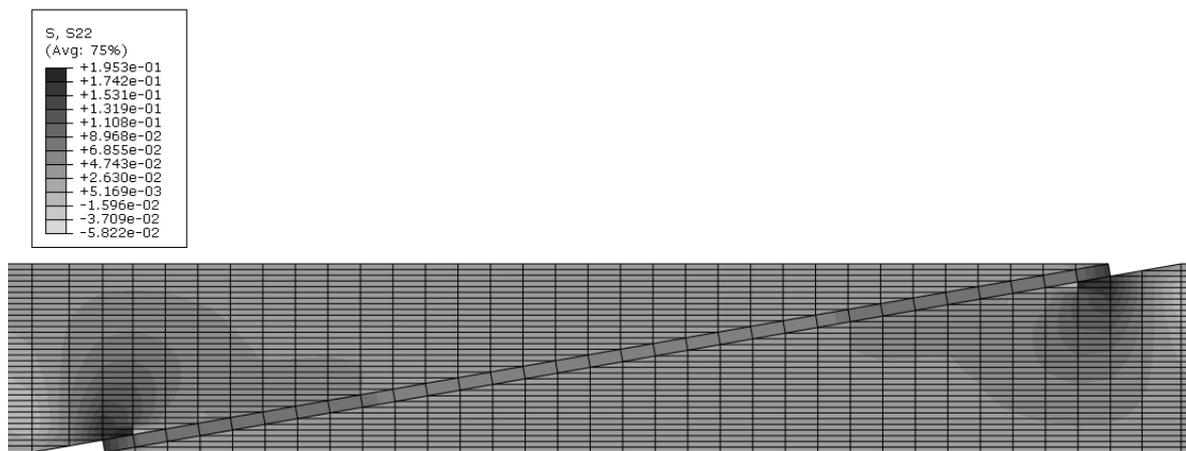


Figura 36 - Tensões normais com o adesivo Araldite® AV138 para valores de  $\alpha$  de  $10^\circ$  (a) e de  $45^\circ$  (b).

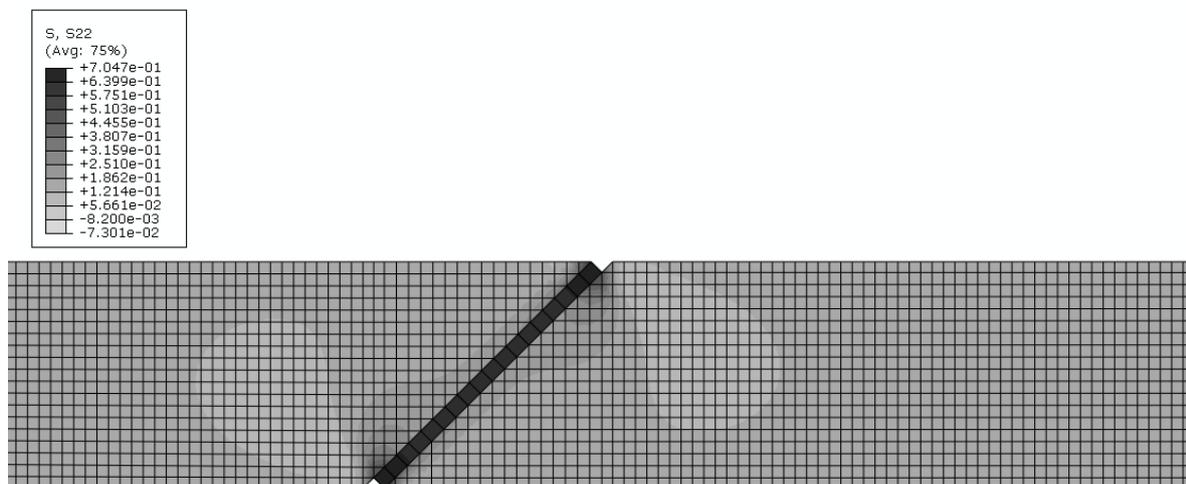
### 4.3.2. Tensões de arrancamento

As figuras seguintes apresentam as tensões de arrancamento na zona da reparação: para o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 (Figura 37), e em segundo lugar para o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 (Figura 38). No Anexo G são aprestadas distribuições das tensões de arrancamento com todos os valores de  $\alpha$  para os dois adesivos.

a)



b)

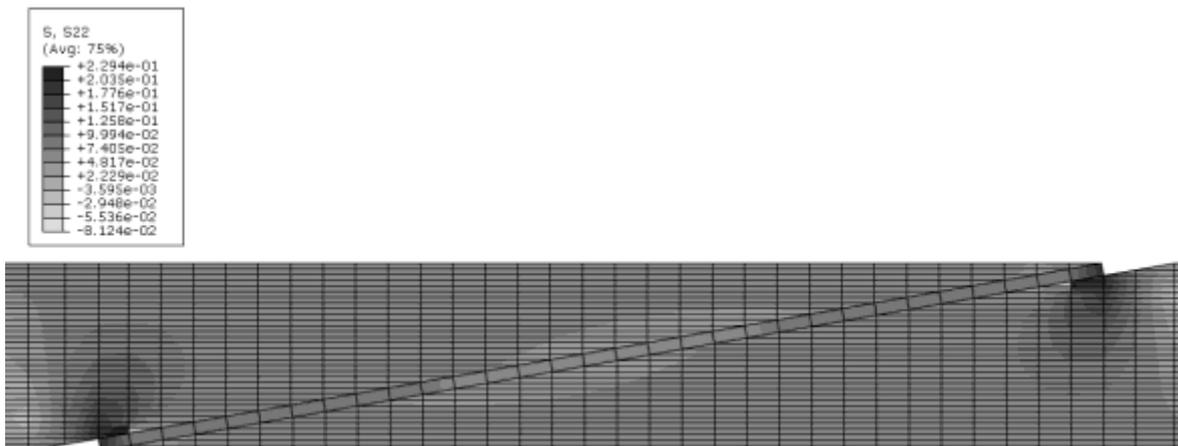


**Figura 37 - Tensões de arrancamento com o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 para valores de  $\alpha$  de 10° (a) e de 45° (b).**

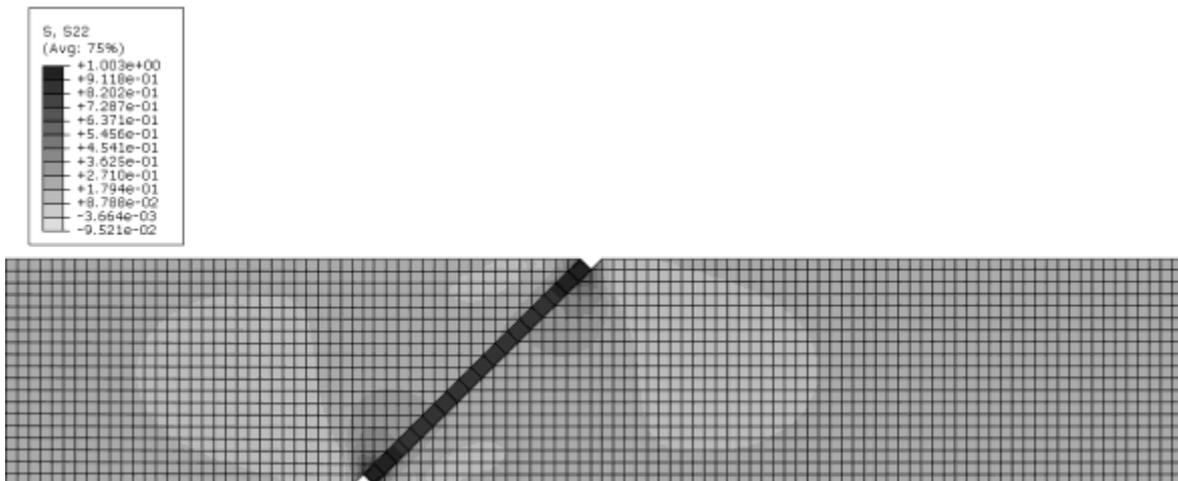
Pela comparação da Figura 37 a) e Figura 38 a), nota-se que as distribuições de tensões para  $\alpha = 10^\circ$ , são visualmente semelhantes para os dois adesivos. Observam-se para os dois casos na extremidade do adesivo e no aderente na fronteira com a extremidade da ligação concentração das tensões de arrancamento, enquanto na zona intermédia são praticamente

nulas. Ao comparar a Figura 37 b) e Figura 38 b), que correspondem a  $\alpha = 45^\circ$ , pode observar-se que os picos de tensão de arrancamento se mantêm na extremidade da ligação, mas ao contrário do que acontecia para  $\alpha$  igual a  $10^\circ$ , verifica-se que as tensões de arrancamento se tornaram mais homogêneas ao longo da camada de adesivo e também são de magnitude muito superior. De facto, sabe-se que para  $\alpha$  igual a  $45^\circ$ , a magnitude das tensões de arrancamento é da mesma ordem de grandeza das tensões de corte.

a)



b)



**Figura 38 - Tensões de arrancamento com o adesivo Araldite® AV138 para valores de  $\alpha$  de  $10^\circ$  (a) e de  $45^\circ$  (b).**

A Tabela 5 apresenta os valores de tensões de arrancamento máximas para todas as condições estudadas. Ao comparar os dois adesivos observa-se que os valores das tensões de arrancamento máximas são inferiores para o adesivo Araldite® 2015.

Também se observa, para os dois adesivos estudados, que os valores das tensões máximas vão diminuindo com a diminuição do ângulo. Ao fazer uma comparação entre os valores máximos de tensão de arrancamento para o adesivo Araldite® 2015 obtém-se uma diminuição em termos percentuais de 78,93 % (desde 45° até 10°), que corresponde em termos absolutos a 0,5562 MPa. Um resultado semelhante ocorre para o Araldite® AV138 onde se obtém uma diminuição percentual de 81,87 %, correspondente em termos absolutos a 0,8212 MPa.

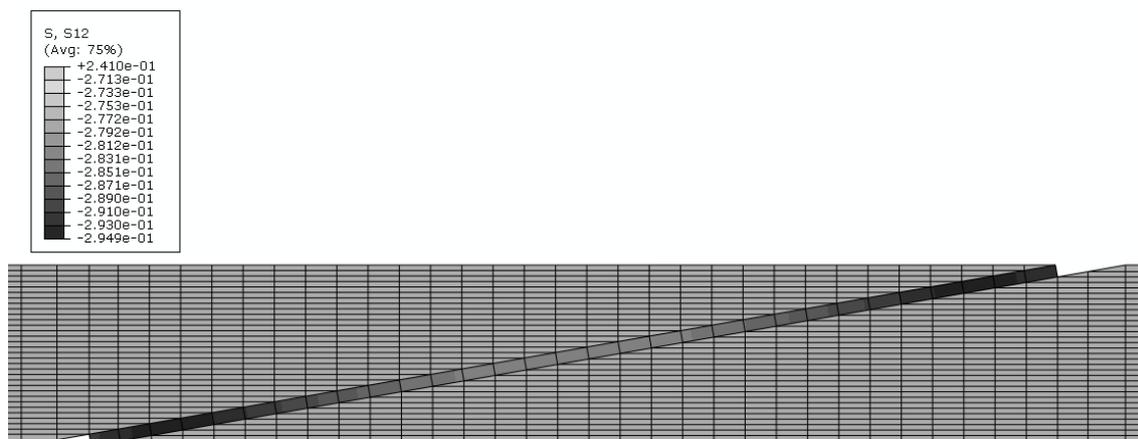
**Tabela 5 - Tensões de arrancamento máximas em MPa para todas as condições estudadas.**

|     | Araldite®<br>2015 | Araldite®<br>AV138 |
|-----|-------------------|--------------------|
| 10° | 0,1485            | 0,1818             |
| 15° | 0,2168            | 0,2752             |
| 20° | 0,2908            | 0,3847             |
| 30° | 0,4588            | 0,6464             |
| 45° | 0,7047            | 1,0030             |

#### 4.3.3. Tensões de corte

As figuras seguintes apresentam as tensões de corte ao longo da linha média do adesivo. São mostradas as distribuições das tensões de corte: em primeiro lugar para o adesivo Araldite® 2015 (Figura 39), e em segundo lugar para o adesivo Araldite® AV138 (Figura 40). De notar que para as tensões de corte a legenda deve ser lida pelos valores negativos, sendo o maior valor de tensão de corte o valor mais negativo. No Anexo H são apresentadas distribuições das tensões de corte com todos os valores de  $\alpha$  para os dois adesivos.

a)



b)

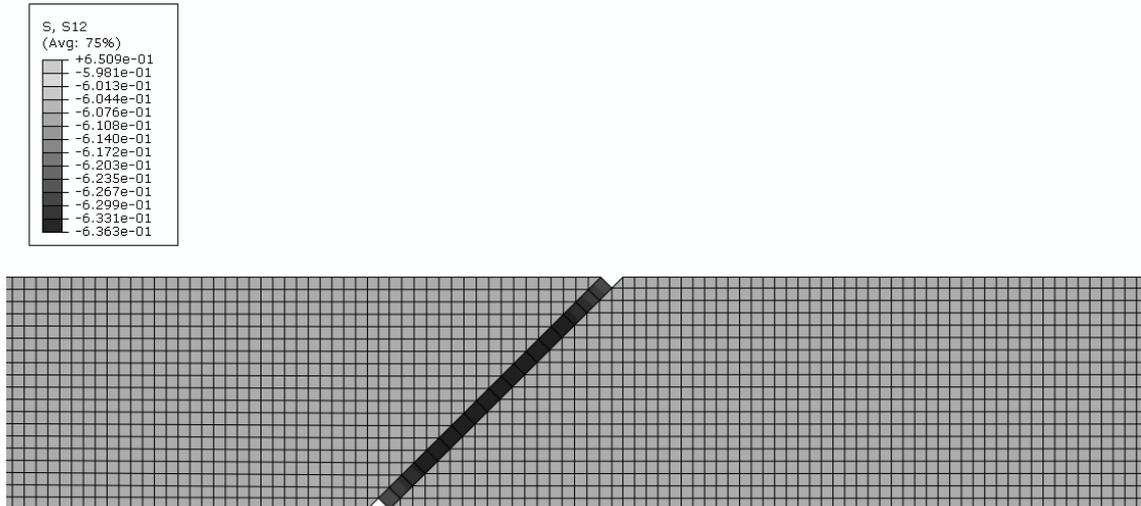
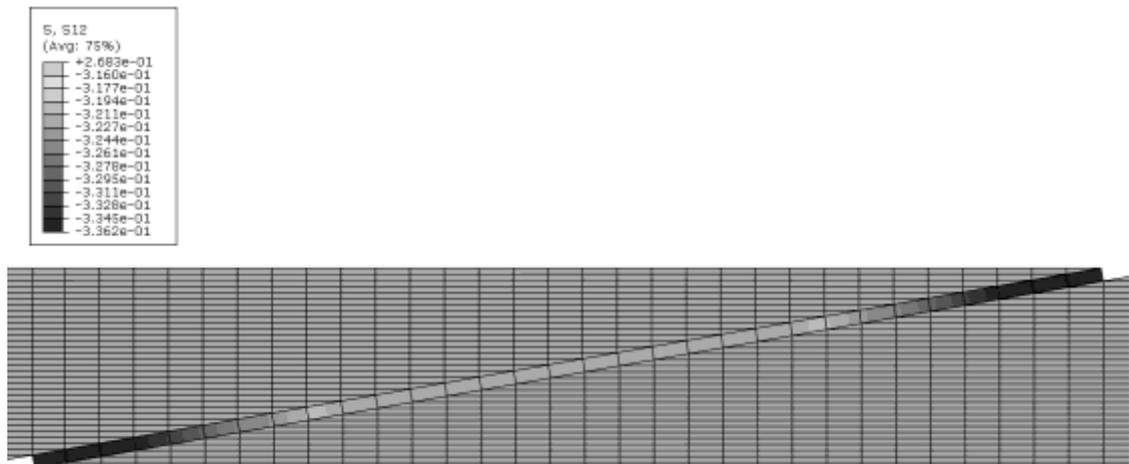


Figura 39 - Tensões de corte com o adesivo Araldite® 2015 para valores de  $\alpha$  de  $10^\circ$  (a) e de  $45^\circ$  (b).

Observando a Figura 39 a) e a Figura 40 a), nota-se que as distribuições de tensões, para  $\alpha$  igual a  $10^\circ$ , são qualitativamente idênticas para os dois adesivos, observando-se em ambos os casos grandes concentrações de tensão perto das extremidades da ligação. Com o aumentando o ângulo de inclinação para  $45^\circ$ , pode observar-se na Figura 39 b) e Figura 40 b), que as tensões de corte se tornam mais homogêneas ao longo da camada de adesivo.

a)



b)

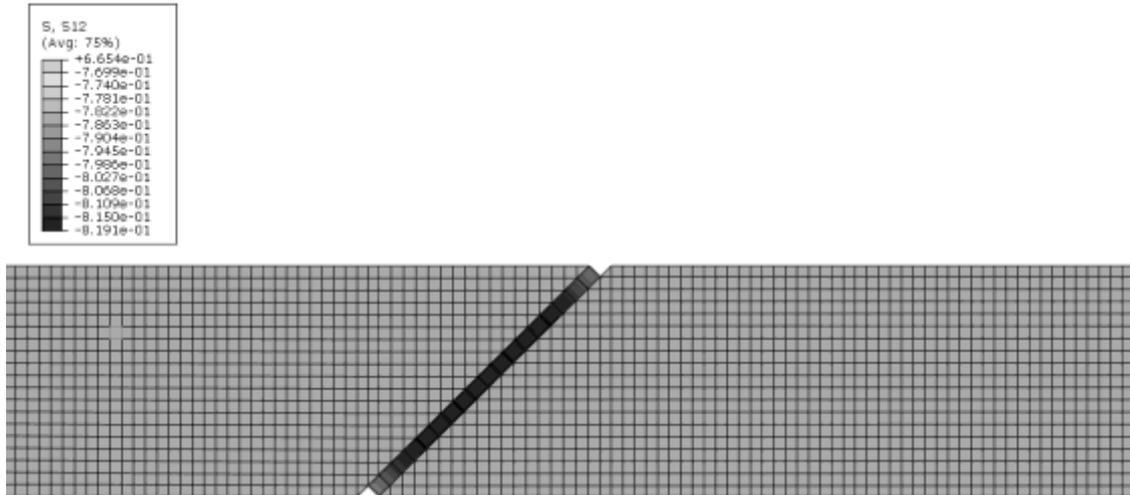


Figura 40 - Tensões de corte com o adesivo Araldite® AV138 para valores de  $\alpha$  de 10° (a) e de 45° (b).

A Tabela 6 apresenta os valores de tensões de corte máximas para todas as condições estudadas. Para os dois adesivos observa-se que, com a diminuição de  $\alpha$  os valores das tensões de corte também diminuem. Ao comparar os valores máximos de tensão de corte para o adesivo Araldite® 2015 obtém-se uma diminuição em termos percentuais de 53,65% (entre 45° e 10°), o que corresponde em termos absolutos a 0,3414 MPa. Um resultado semelhante ocorre para o Araldite® AV138, onde se obtém um diminuição percentual de 58,95% (entre 45° e 10°), o que corresponde em termos absolutos a 0,4829 MPa.

Ao comparar os dois adesivos é possível observar que os valores das tensões de corte máximas são ligeiramente inferiores para o adesivo Araldite® 2015.

Tabela 6 - Tensões de corte máximas em MPa para todas as condições estudadas.

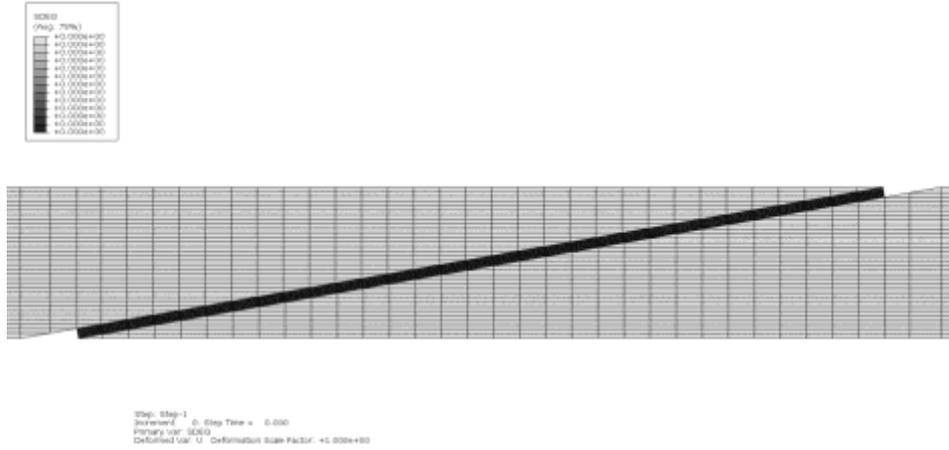
|     | Araldite®<br>2015 | Araldite®<br>AV138 |
|-----|-------------------|--------------------|
| 10° | 0,2949            | 0,3362             |
| 15° | 0,3934            | 0,4626             |
| 20° | 0,4714            | 0,5693             |
| 30° | 0,5810            | 0,7285             |
| 45° | 0,6363            | 0,8191             |

## 4.4. Previsão do comportamento das reparações 2D

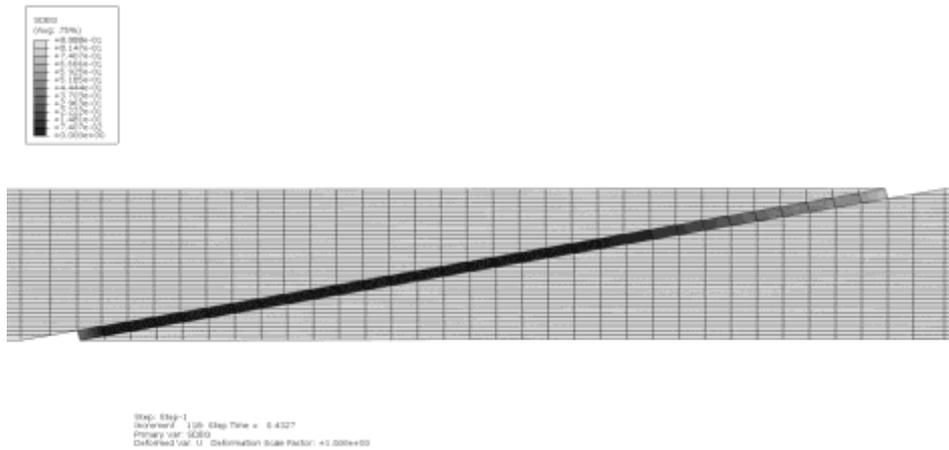
### 4.4.1. Modo de Rotura

A Figura 41 mostra várias ilustrações da rotura em ABAQUS®, pretendendo mostrar o processo progressivo da rotura desde o início até propagação e rotura final.

a)



b)



c)

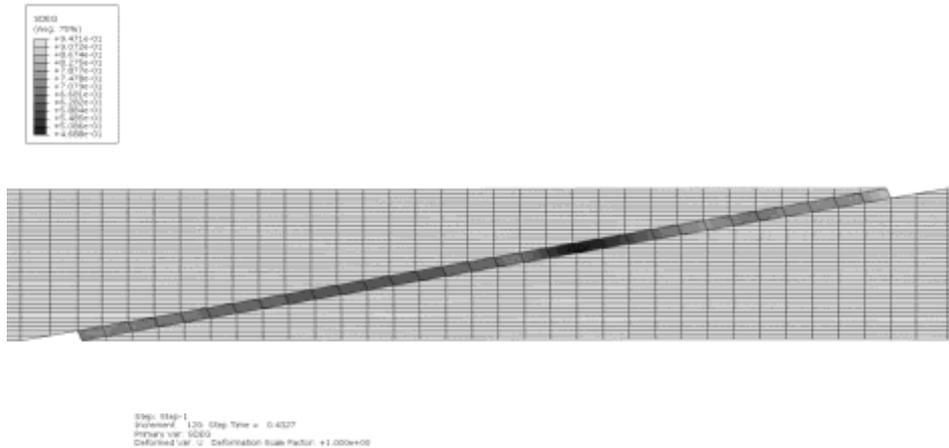
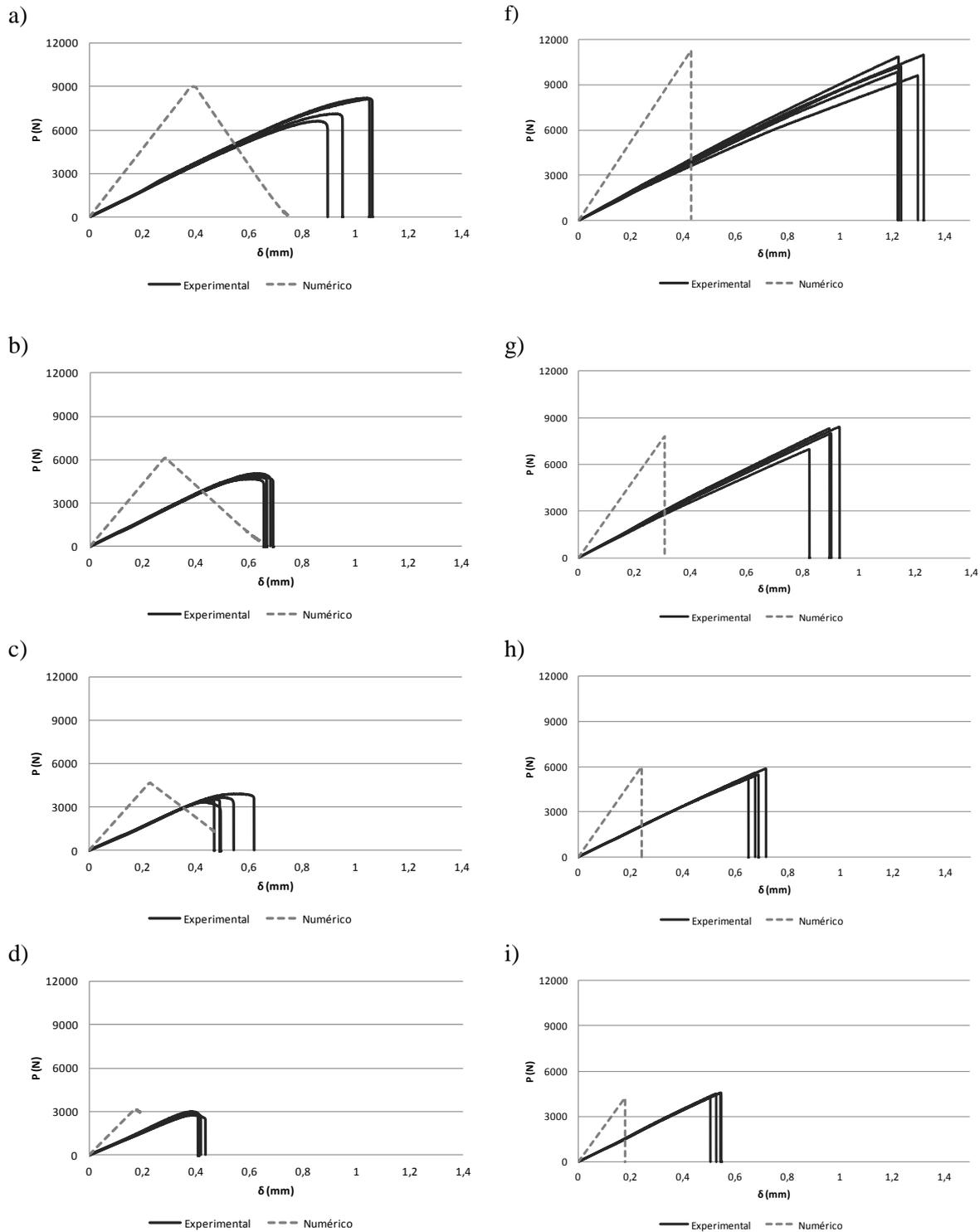
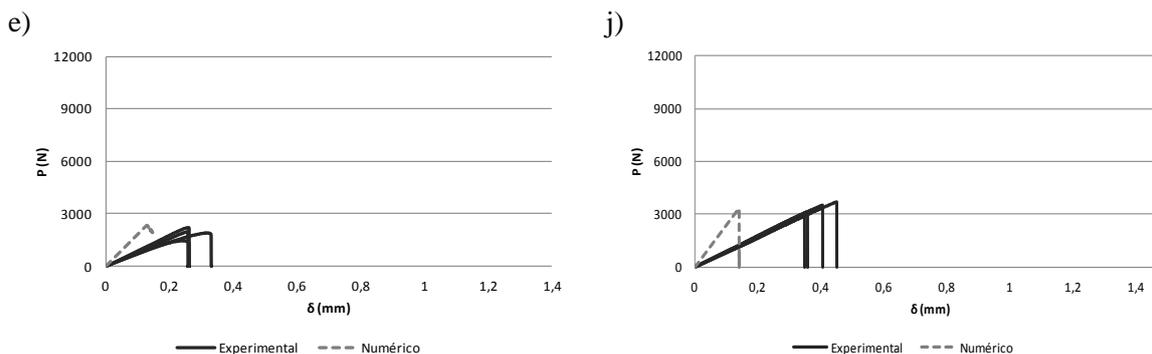


Figura 41 - Processo progressivo da rotura desde o início até à rotura final para  $\alpha$  igual a  $10^\circ$ .

#### 4.4.2. Curvas $P-\delta$

A Figura 42 mostra as curvas  $P-\delta$ , numéricas (a traço interrompido) e experimentais (linha contínua) para todas as condições simuladas em ABAQUS<sup>®</sup>, na coluna da esquerda estão representadas as curvas  $P-\delta$  para o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 com valores de  $\alpha$  10° (a), 15° (b), 20° (c), 30° (d) e 45° (e), enquanto na coluna da direita estão representadas as curvas  $P-\delta$  para o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 nos ângulos 10° (f), 15° (g), 20° (h), 30° (i) e 45° (j).



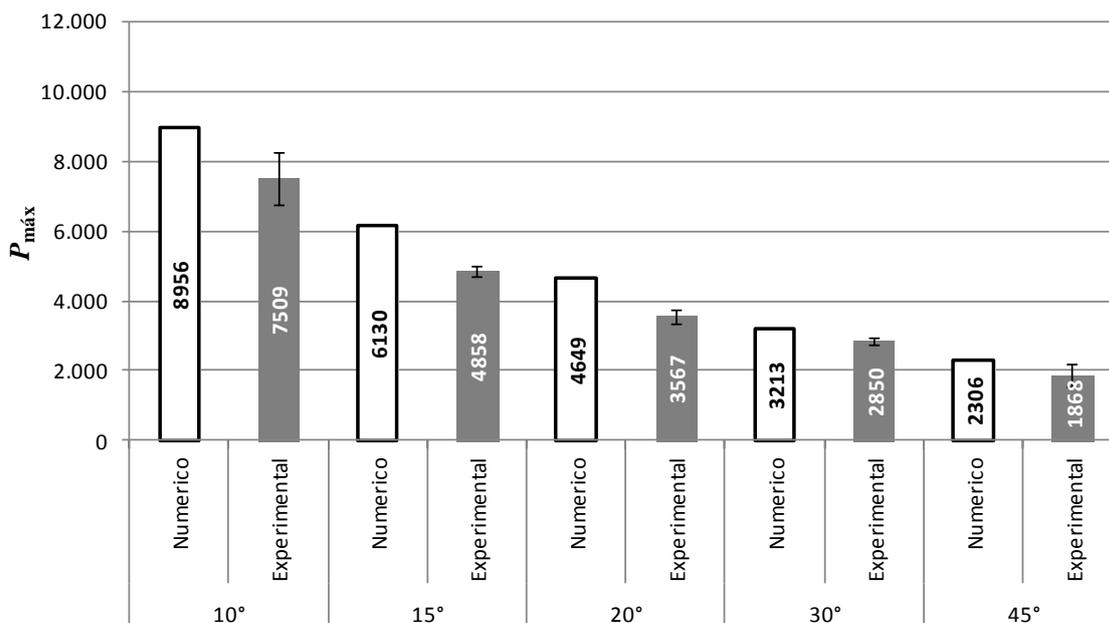


**Figura 42 - Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas e experimentais para todos os valores de  $\alpha$ , para os adesivos Araldite<sup>®</sup> 2015 (esquerda) e Araldite<sup>®</sup> AV138 (direita).**

Os resultados observados mostram que os valores de carga máxima dos modelos de  $EF$  estão razoavelmente próximos dos valores da carga máxima suportada pelas reparações ( $P_{\text{máx}}$ ) experimentais. É de realçar que os valores de deslocamento, nos modelos numéricos, não são idênticos aos valores experimentais, isto acontece devido principalmente ao deslocamento das amarras de fixação nos provetes, originado assim um maior deslocamento nos resultados experimentais.

#### 4.4.3. Resistência das reparações

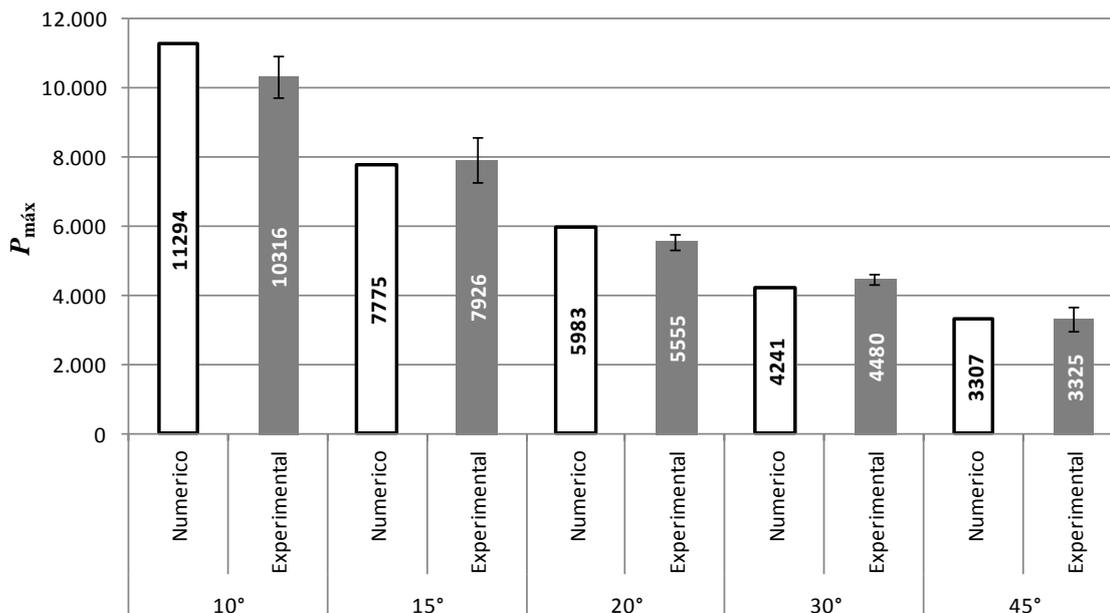
A Figura 43 mostra os valores de  $P_{\text{máx}}$  em função do ângulo para o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015, mostrando um aumento da  $P_{\text{máx}}$  com a diminuição de  $\alpha$ . Também se pode observar na Figura 43 que os valores de  $P_{\text{máx}}$  aumentam à medida que o ângulo se vai tornando menor. Por exemplo, quando se compara os valores numéricos observa-se um aumento de  $P_{\text{máx}}$  de aproximadamente 288,4 % entre  $\alpha$  igual a  $10^\circ$  e  $45^\circ$ . Para as mesmas condições mas considerando os resultados experimentais verifica-se um aumento de  $P_{\text{máx}}$  de aproximadamente 302,1 %, que é bastante próximo do obtido na análise numérica. Este comportamento pode ser explicado pelo aumento exponencial da área de colagem com a diminuição de  $\alpha$ , mas também pela elevada rigidez dos substratos e grande ductilidade deste adesivo, que ajudam à rotura em condição de plastificação generalizada, onde a totalidade ou maior parte do adesivo se encontra solicitado na altura da rotura. Outro motivo para este comportamento deve-se ao facto dos valores das tensões máximas de arrancamento e de corte diminuírem com a diminuição do ângulo. A metodologia EF/MDC utilizada, é aprovada também pela pequena diferença entre os valores de  $P_{\text{máx}}$  numéricos e experimentais em todas as situações, observando-se a maior diferença percentual de 30,3 % para o  $\alpha$  igual a  $20^\circ$ .



**Figura 43 - Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos valores de  $P_{\text{máx}}$  para os diferentes valores de  $\alpha$ , no caso do adesivo Araldite® 2015.**

A Figura 44 mostra os valores de  $P_{\text{máx}}$  em função do ângulo para o adesivo Araldite® AV138, mostrando, tal como para o adesivo Araldite® 2015, um aumento de  $P_{\text{máx}}$  com a diminuição de  $\alpha$ . É observado este comportamento, principalmente, devido ao aumento exponencial da área da ligação. Quando se compara as duas figuras (Figura 43 e Figura 44), pode observar-se que para os mesmos ângulos os valores de  $P_{\text{máx}}$  são superiores para o adesivo Araldite® AV138. Para este adesivo pode observar-se na Figura 44, por exemplo, um aumento de 241,5 % quando se compara os valores numéricos de  $P_{\text{máx}}$  entre os valores de  $\alpha$  de 10° e 45°. Estes valores são comprovados pelos resultados experimentais semelhantes, com um aumento de 210,2 %. Embora o adesivo Araldite® AV138 se trate de um adesivo frágil também aqui tal como aconteceu com o adesivo Araldite® 2015, observa-se um aumento da resistência a tração com a diminuição de  $\alpha$ , que como já foi referido, pode ser explicado pelo aumento exponencial da área de colagem e pelo facto das tensões de corte, serem mais preponderantes na resistência das reparações *scarf* para valores de  $\alpha$  igual a 10° do que as tensões de arrancamento, devido à sua maior magnitude.

Estes resultados tal como os obtidos para o outro adesivo, vêm aprovar a metodologia EF/MDC utilizada, observando-se resultados próximos dos experimentais em todas as situações, sendo a maior diferença percentual de 9,5 % para o  $\alpha$  igual a 10°.



**Figura 44 - Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos valores de  $P_{\max}$  para os diferentes valores de  $\alpha$ , no caso do adesivo Araldite® AV138.**

Dos resultados obtidos para ambos os adesivos, verifica-se que a diminuição do ângulo provoca uma maior resistência da reparação adesiva. Contudo, as reparações com valores de  $\alpha$  inferiores são mais difíceis de maquinar e fabricar, principalmente no que diz respeito aos remendos. No global, os resultados experimentais descritos no Capítulo 3 e as previsões numéricas descritas no Capítulo 4, são uteis para a previsão da rotura para reparações de remendo embebido e para a escolha do melhor ângulo a utilizar em função da restituição de resistência pretendida, bem como na validação da ferramenta numérica utilizada para efeitos de previsão.



## 5. Conclusões

O trabalho apresentado tem como objetivo principal o estudo experimental e numérico de reparações adesivas para estruturas de alumínio pela técnica do remendo embebido. Foram testados dois adesivos de características distintas: o adesivo dúctil Araldite<sup>®</sup> 2015 e o adesivo frágil Araldite<sup>®</sup> AV138, considerando-se valores de  $\alpha$  de 10, 15, 20, 30, e 45°. O trabalho numérico foi realizado no software de EF ABAQUS<sup>®</sup>, em que se usou a formulação embebida deste software de elementos coesivos de análise das distribuições de tensões na zona da ligação e para previsão da resistência das reparações.

Os modelos numéricos construídos em ABAQUS<sup>®</sup> foram apenas bidimensionais, que representam adequadamente os modelos bidimensionais realizados experimentalmente. No entanto, representam apenas uma aproximação das geometrias tridimensionais realizadas experimentalmente.

O estudo experimental para as reparações 2D permitiu analisar que o ângulo tem bastante influência neste tipo de ligação e que a diminuição deste melhora o comportamento mecânico da reparação, observando-se que a diminuição do valor de  $\alpha$  leva a um aumento exponencial dos valores de  $P_{\text{máx}}$ . Também nas reparações 2D verifica-se que o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 obteve valores de  $P_{\text{máx}}$  muito superiores para todos os valores de  $\alpha$  quando comparado com o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015. Nesta comparação também se observou que a maior diferença entre estes dois adesivos se dá para os maiores valores de  $\alpha$ . O estudo experimental das reparações 3D demonstrou que as reparações com ambos os adesivos melhoraram a resistência do provete quando comparada com um provete com dano mas sem reparação. Também se observou que, contrariamente ao que aconteceu para

as reparações 2D, este tipo de reparação obteve valores de  $P_{\text{máx}}$  superiores para o adesivo Araldite® 2015.

O estudo numérico de distribuição de tensões permitiu concluir que as tensões normais axiais máximas ocorreram no substrato e remendo, na proximidade do adesivo. Na observação das tensões de arrancamento, para os menores valores de  $\alpha$  existe concentração das tensões nas extremidades da camada de adesivo e no aderente na fronteira com as extremidades da ligação, enquanto na zona intermédia da camada de adesivo as tensões de arrancamento são praticamente nulas. Por outro lado, para os maiores valores de  $\alpha$ , verifica-se que as tensões de arrancamento tendem a uniformizar-se ao longo da camada de adesivo e também são de magnitude crescente com o aumento de  $\alpha$ . Para  $\alpha$  igual a  $45^\circ$ , a magnitude das tensões de arrancamento é inclusivamente da mesma ordem de grandeza das tensões de corte. As tensões de corte aumentam ligeiramente com o aumento do ângulo de inclinação. Para  $\alpha$  igual a  $45^\circ$  observar-se que as tensões de corte se tornam mais uniformes ao longo da camada de adesivo. Com a diminuição de  $\alpha$  verifica-se que a concentração de tensão aumenta perto das extremidades da ligação. Ou seja, para ambos os adesivos observa-se uma diminuição dos valores das tensões de corte com a diminuição de  $\alpha$ .

Após comparação numérica e experimental do comportamento das reparações, constata-se que os resultados numéricos reproduziram de forma satisfatória as resistências experimentais para a totalidade dos valores de  $\alpha$  estudados, pelo que se conclui que o MEF com modelos coesivos de propagação de dano consegue dar uma resposta adequada para a precisão do comportamento e projeto deste tipo de reparação adesiva.

No estudo sobre a resistência das reparações observou-se, para ambos os adesivos, um aumento da  $P_{\text{máx}}$  com a diminuição de  $\alpha$ . Este comportamento pode ser explicado pelo aumento substancial da área de colagem com a diminuição de  $\alpha$ . No caso do adesivo Araldite® 2015, a grande ductilidade deste adesivo ajuda à rotura em condição de plastificação generalizada, onde a totalidade ou maior parte do adesivo se encontra solicitado na altura da rotura.

Embora dos resultados obtidos se conclua que, para ambos os adesivos, a diminuição  $\alpha$  resulta numa maior resistência a tração, as reparações com valores de  $\alpha$  inferiores são mais difíceis de maquinar e fabricar, principalmente no que diz respeito aos remendos, pelo que

este aspeto também deve ser considerado no projeto de uma reparação, em função da restituição da resistência pretendida.

Como perspetivas de trabalho futuro, sublinha-se a necessidade de efetuar modelos tridimensionais numéricos das reparações no sentido de comprovar algumas das conclusões obtidas experimentalmente com as reparações 3D.

Será também importante testar outros valores de  $\alpha$ , em particular valores abaixo dos 10°, no sentido de se verificar de uma forma mais evidente a curva exponencial observada com os valores da  $P_{\text{máx}}$  à medida que o ângulo vai diminuindo.

Por outro lado, na análise numérica realizada observou-se a existência de picos de tensão de corte e especialmente de arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição. Para os adesivos dúcteis como o Araldite® 2015, esta ocorrência não é tão crítica, devido à plastificação antes da rotura, mas as reparações com adesivos frágeis são altamente penalizadas por estes picos de tensão. Como tal, considera-se importante a análise de técnicas que permitam a supressão deste fenómeno como por exemplo a utilização de reforços externos na zona de sobreposição, colados à estrutura, para diminuir as concentrações de tensões que se observam nessa zona.



## Referências documentais

- 1 Sharpe, L.H. *Some fundamental issues in adhesion: A conceptual view*. Journal of Adhesion 1998; 67: 277-289.
- 2 Pinto A.M.G. *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto 2007.
- 3 Silva L.F.M., Magalhães A.G., Moura M.F.S.F. *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007 Porto: Publindústria.
- 4 Reis C.S. *Estudo comparativo entre técnicas de reparos de orifícios em juntas mecânicas de compósitos laminados*. Tese de Mestrado. Engenharia Aeronáutica e Mecânica. Instituto Tecnológico de Aeronáutica: 2006.
- 5 Cruz H., Custódio J., Nascimento J., Empis M.. *Execução e controlo de qualidade da reparação de estruturas de madeira com colas epóxicas e FRPS*. Projeto Europeu Craft: LICONS (CRAFT-1999-71216).
- 6 Reis M.L.B.C., Branco F.G. *Técnicas de reabilitação em estruturas de madeira* 2008.
- 7 <http://www.engenhariacivil.com/reabilitacao-estruturas-betao-resinas-epoxy> . data da consulta: 13/07/2012.
- 8 CEPRA. *Manual Técnico de Formador - Reparação de Plásticos e Vidros* 2005 Edição 1.0.
- 9 J. M. Gordo, I. S. Carvalho e C. Guedes Soares. *Potencialidades de processos tecnológicos avançados de corte e união de aço em reparação naval* 2006.
- 10 Zhang Y., Keller T. *Progressive failure process of adhesively bonded joints composed of pultruded GFRP*. Composites Science and Technology 2008; 68: 461-470.
- 11 Hu F.Z., Soutis C., Edge E.C. *Inter laminar stresses in composite laminates with a circular hole*. Composite Structures 1997; 37: 223-232.

- 12 Li G., Lee-Sullivan P., Thring R.W. *Nonlinear finite element analysis of stress and strain distributions across the adhesive thickness in composite single-lap joints*. Composite Structures 1999; 46: 395-403.
- 13 Osnes H., Andersen A. *Computational analysis of geometric nonlinear effects in adhesively bonded single lap joints*. Composites: Part B – Engineering 2003; 34: 417-427.
- 14 Campilho R.D.S.G., Moura M.F.S.F., Domingues J.J.M.S. *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology 2005; 65: 1948-1958.
- 15 Radice J., Vinson J. *On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structures: analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation*. Composites Science and Technology 2006; 66: 2528-2547.
- 16 Luo Q., Tong L. *Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints*. International Journal of Solids and Structures 2007; 44: 2349-2370.
- 17 Volkersen O. *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung 1938; 15: 41-47.
- 18 Adams R.D., Comyn J.C., Wake W.C. *Structural adhesive joints in engineering. Second Edition*. Chapman & Hall: London, UK; 1997.
- 19 Zou G.P., Shalin K., Taheri F. *An analytical solution for the analysis of symmetric composite adhesively bonded joints*. Composite Structures 2004; 65: 499-510.
- 20 Hu F.Z., Soutis C. *Strength prediction of patch repaired CFRP laminates loaded in compression*. Composites Science and Technology 2000; 60: 1103-1114.
- 21 Owens J.F.P., Sullivan P.L. *Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminium joints I. Theoretical model*. International Journal of Adhesion & Adhesives 2000; 20: 39-45.
- 22 Owens J.F.P., Sullivan P.L. *Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminium joints II. Experimental*. International Journal of Adhesion & Adhesives 2000; 20: 47-58.
- 23 Soutis C., Duan D.M., Goutas P. *Compressive behaviour of CFRP laminates repaired with adhesively bonded external repairs*. Composite structures 1999; 45: 289-301.

- 24 Campilho R.D.S.G. *Modelação da Execução de Reparações em Materiais Compósitos*. M.Sc. Thesis. Porto, Portugal: Department of Mechanical Engineering and Industrial Management, Engineering Faculty of Porto University: 2005.
- 25 Fernlund G., Papini M., McCammond D., Spelt J.K. *Fracture load predictions for adhesive joints*. Composites Science and Technology 1994; 51: 587-600.
- 26 Tong L., Sheppard A., Kelly D. *Relationship between surface displacement and adhesive peel stress in bonded double lap joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives 1995; 15: 43-48.
- 27 Kinloch A.J. *Adhesion and adhesives*. Chapman & Hall: London, UK; 1990.
- 28 Volkersen O. *Recherches sur la theorie des asssemblages collés*. Construction Metallique 1965; 4: 3-13.
- 29 Adams R.D., Peppiatt N.A. *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of Strain Analysis 1974; 9: 185-196.
- 30 Helms J.E., Li G., Pang S.S. *Buckling analysis of a taper-taper adhesive-bonded composite joint*. Polymer Composites 2003; 24: 45-52.
- 31 Kumar S.B., Sridhar I., Sivashanker S., Osiyemi S.O., Bag A. *Tensile failure of adhesively bonded CFRP composite scarf joints*. Materials Science and Engineering: B 2006; 132: 113-120.
- 32 Campilho R.D.S.G., de Moura M.F.S.F., Pinto A.M.G., Morais J.J.L., Domingues J.J.M.S. *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites: Part B – Engineering 2009; 40: 149-157.
- 33 Mortensen F., Thomsen O.T. *Simplified linear and non-linear analysis of stepped and scarfed adhesive-bonded lap-joints between composite laminates*. Composite Structures 1997; 38: 281-294.
- 34 Kumar S.B., Sivashanker S., Bag A., Sridhar I. *Failure of aerospace composite scarf-joints subjected to uniaxial compression*. Materials Science and Engineering: A 2005; 412 :117-122.
- 35 Das M., Madenci E., Ambur D.R. *Three-dimensional nonlinear analyses of scarf repair in composite laminates and sandwich panels*. Journal of the Mechanics of Materials and Structures 2008; 3:1 641-1658.
- 36 Wang C.H., Gunnion A.J. *On the design methodology of scarf repairs to composite laminates*. Composites Science and Technology 2008; 68: 35-46.

- 37 Campilho R.D.S.G, Moura M.F.S.F, Domingues J.J.M.S. *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology 2007; 21: 855-970.
- 38 Fredrickson B.M., Schoepner G.A., Mollenhauer D.H., Palazotto A.N. *Application of three-dimensional spline variational analysis for composite repair*. Composite Structures 2008; 83: 119-130.
- 39 Tomblin J.S., Salah L., Welch J.M., Borgman M.D. *Bonded repair of aircraft composite sandwich structures*. Report PB2004-105463. Wichita, USA. Boeing Co 2004.
- 40 Goland M., Reissner E. *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics 1944; 66: 17-27.
- 41 Panigrahi S.K., Pradhan B. *Three dimensional failure analysis and damage propagation behavior of adhesively bonded single lap joints in laminated FRP composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites 2007; 26:183-201.
- 42 Harris J.A., Adams R.D. *Strength prediction of bonded single-lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion & Adhesives 1984; 4: 65-78.
- 43 Sosa J.L.C., Karapurath N. *Delamination modeling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology 2012; 72: 788-791.
- 44 Barenblatt G.I. *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics 1959; 23:622–636.
- 45 Feraren P., Jensen H.M. *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. Engineering Fracture Mechanics 2004; 71: 2125-2142.
- 46 Ji G., Ouyang Z., Li G., Ibekwe S., Pang S.S. *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures 2010; 47: 2445-2458.
- 47 Yang Q.D., Thouless M.D. *Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture 2001; 110: 175-187.
- 48 Khoramishad H., Crocombe A.D., Katnam K.B., Ashcroft I.A. *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue 2010; 32: 1146-1158.

- 49 Daudeville L., Ladeveze P. *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Journal of Composite Structures 1993; 25: 547-555.
- 50 Belytschko T., Black T. *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering 1999; 45: 601-620.
- 51 Mohammadi S. *Extended finite element method for fracture analysis of structures*. Blackwell Publishing, New Jersey 2008.
- 52 Campilho R.D.S.G., Pinto A.M.G., Banea M.D., Silva R.F., da Silva L.F.M. *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology 2011;25: 2351-2368.
- 53 Pinto A.M.G., Campilho R.D.S.G., Moura M.F.S.F., Mendes I.R. *Numerical evaluation of three-dimensional scarf repairs in carbon-epoxy structures*. International Journal of Adhesion & Adhesives 2010; 30:329-337.
- 54 Campilho R.D.S.G., Moura M.F.S.F., Domingues J.J.M.S. *Using a cohesive damage model to predict the tensile behavior of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures 2008; 45: 1497-1512.
- 55 Campilho R.D.S.G., de Moura M.F.S.F., Ramantani D.A., Morais J.J.L., Domingues J.J.M.S. *Buckling strength of adhesively-bonded single and double-strap repairs on carbon-epoxy structure*. Composites Science and Technology 2010; 70:371-379.
- 56 Jing, J., Gao F., Johnson J., Liang F. Z., Williams R.L., Qu J. *Simulation of dynamic fracture along solder-pad interfaces using a cohesive zone model*. Engineering Failure Analysis 2009; 16:1579-1586.
- 57 Campilho R.D.S.G., Banea M.D., Neto J.A.B.P., Silva L.F.M. *Modeling of single-lap joints using cohesive zone models: effect of the cohesive parameters on the output of the simulations*. The Journal of Adhesion 2012; 88: 513-533.
- 58 Campilho R.D.S.G. *Juntas de Sobreposição Simples adesivas, soldadas e adesivas-soldadas: Modelo numérico para previsão da resistência*. Ciência e Tecnologia dos Materiais 2012; Vol. 24 N°1/2.
- 59 Gonçalves J.P.M., Moura M.F.S.F., Magalhães A.G., Castro P.M.ST. *Application of interface finite elements to three-dimensional progressive failure analysis of adhesive joints*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 2003; 26:479-86.

- 
- 60 Andersson T., Stigh U. *The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures 2004; 41:413–34.
- 61 Leffler K., Alfredsson K.S., Stigh U. *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids and Structures 2007; 44:530–45.
- 62 Hogberg J.L., Stigh U. *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics 2006; 73:2541–56.
- 63 Moura M.F.S.F., Gonçalves J.P.M., Chousal J.A.G., Campilho R.D.S.G. *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives 2008; 28:419–26.
- 64 Marques E.A.S., Silva L.F.M. *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. International Journal of Adhesion & Adhesives 2008; 84:917–36.
- 65 Campilho, R.D.S.G., Moura M.F.S.F., Ramantani D.A., Morais J.J.L., Domingues J.J.M.S. *Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single- and double-strap repairs*. International Journal of Adhesion & Adhesives 2009; 29: 678–686.
- 66 Campilho R.D.S.G., Banea M.D., Pinto A.M.G., Silva L.F.M., de Jesus A.M.P. *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modeling*. International Journal of Adhesion & Adhesives 2011; 31:363-372.

## Anexo A. Tabelas de apoio

|               | % Si      | % Fe      | % Cu      | % Mn      | % Mg      | % Zn | % Ti | % Pb      | % Cr      | %            | % Outros | % Al  |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|------|-----------|-----------|--------------|----------|-------|
| <b>6005 A</b> | 0.50-0.90 | 0.35      | 0.10      | 0.30      | 0.40-0.70 | 0.20 | 0.10 | -         | 0.30      | 0.12-0.5Me-G | 0.15     | RESTO |
| <b>6012</b>   | 0.60-1.40 | 0.50      | 0.10      | 0.40-1.00 | 0.60-1.20 | 0.30 | 0.30 | 0.40-2.0  | 0.30      | 0.07         | 0.15     | -     |
| <b>6060</b>   | 0.30-0.60 | 0.10-0.30 | 0.10      | 0.10      | 0.35-0.60 | 0.15 | 0.10 | -         | 0.05      | -            | 0.15     | -     |
| <b>6061</b>   | 0.40-0.80 | 0.70      | 0.15-0.40 | 0.15      | 0.80-1.20 | 0.25 | 0.15 | -         | 0.04-0.35 | -            | 0.15     | -     |
| <b>6063</b>   | 0.20-0.60 | 0.35      | 0.10      | 0.10      | 0.45-0.90 | 0.10 | 0.10 | -         | 0.10      | -            | 0.15     | -     |
| <b>6082</b>   | 0.70-1.30 | 0.50      | 0.10      | 0.40-1.00 | 0.60-1.20 | 0.20 | 0.10 | -         | 0.25      | -            | 0.10     | -     |
| <b>6101</b>   | 0.30-0.70 | 0.50      | 0.10      | 0.03      | 0.35-0.80 | 0.10 | -    | -         | -         | -            | 0.15     | -     |
| <b>6106</b>   | 0.30-0.60 | 0.35      | 0.25      | 0.05-0.20 | 0.40-0.80 | 0.20 | 0.10 | -         | 0.20      | -            | 0.15     | -     |
| <b>6181</b>   | 0.80-1.20 | 0.45      | 0.10      | 0.15      | 0.60-1.00 | 0.20 | -    | -         | 0.10      | -            | 0.15     | -     |
| <b>6262</b>   | 0.40-0.80 | 0.70      | 0.15-0.40 | 0.15      | 0.80-1.20 | 0.25 | -    | 0.40-0.70 | 0.04-0.14 | 0.04-0.7     | 0.15     | -     |
| <b>6351</b>   | 0.70-1.30 | 0.50      | 0.10      | 0.40-0.80 | 0.40-0.80 | 0.20 | 0.20 | -         | -         | -            | 0.15     | -     |

Figura 45 - Composição química da série 6000 das ligas standard da Lanema.

| LANEMA        | E.U.          | ESPAÑA        | FRANÇA             | ALEMANHA   | G.B.   | SUÉCIA | SUIÇA     | CANADA      | ITÁLIA  | C.E.I.      | AUSTRIA     |
|---------------|---------------|---------------|--------------------|------------|--------|--------|-----------|-------------|---------|-------------|-------------|
| NORMAS E.N.   | NORMAS U.N.E. | AFNOR         | D.I.M. (1712-1725) | B.S.       | S.I.S. | C.S.A. | U.N.I.    | GOST        | ONORM   |             |             |
| <b>6005 A</b> | AW 6005A      | L-3454 38.349 | A-SG0.5            | AlMgSi0.7  | 3.3210 | -      | AlMgSi0.7 | -           | -       | 9006/6      | -           |
| <b>6060/3</b> | AW 6060/3     | L-3441 38.337 | A-G5               | AlMgSi0.5  | 3.3206 | H 9    | 4104      | AlMgSi0.5   | 50 S    | 3669 9006/1 | AlMgSi0.5   |
| <b>6061</b>   | AW 6061       | L-3420 38.342 | A-SG0C             | AlMg1Si1Cu | 3.3211 | H 20   | -         | -           | G 11 N  | 6170 9006/2 | 1330        |
| <b>6081</b>   | AW 6081       | L-3451 38.334 | A-SGMO.3           | AlMgSi1    | 3.2315 | -      | AlMgSi1   | G 1 S       | -       | -           | AlMgSi0.8Mn |
| <b>6082</b>   | AW 6082       | L-3453 38.348 | A-SGMO.7           | AlMgSi1    | 3.2315 | H 30   | 4212      | AlMgSi1Mn   | 56 11 R | 3571 9006/4 | AlMgSi1     |
| <b>6101</b>   | AW 6101       | L-3431 38.343 | A-GSL              | AlMgSi     | 3.2307 | E 91 E | -         | E AlMgSi0.4 | -       | -           | AlSi1Mg     |
| <b>6261</b>   | AW 6261       | L-3420 38.342 | -                  | -          | -      | -      | 4102      | -           | -       | -           | -           |
| <b>6012</b>   | AW 6012       | L-3452 38.344 | -                  | AlMgSiPb   | 3.0615 | -      | -         | -           | -       | -           | 1350        |
| <b>6262</b>   | AW 6262       | -             | -                  | -          | -      | -      | -         | -           | -       | 9006/7      | -           |
| <b>6351</b>   | AW 6351       | L-3451 38.334 | A-SGM              | AlMgSi1    | 3.2318 | H 30   | -         | -           | -       | -           | -           |

Figura 46 - Equivalências Internacionais da série 6000 das ligas de alumínio da Lanema.

| LIGAS  | ESTADO  | CARGA DE ROTURA<br>Rm - N / mm <sup>2</sup> | LIMITE ELÁSTICO<br>Rp 0,2 - N / mm <sup>2</sup> | ALARGAMENTO<br>A 5,65 % | LIMITE DE FADIGA<br>N / mm <sup>2</sup> | DUREZA<br>BRINELL<br>HB | DUREZA<br>VICKERS<br>HV | MÓDULO ELÁSTICO<br>N / mm <sup>2</sup> | PESO ESPECÍFICO<br>g / cm <sup>3</sup> | INTERVALO DE FUSÃO<br>°C | COEFICIENTE DE<br>DILATAÇÃO LINEAR<br>1 / 10 <sup>3</sup> K | CALOR ESPECÍFICO<br>J / Kg K | RESISTIVIDADE<br>ELÉCTRICA<br>20 - μΩ cm | CONDUTIVIDADE<br>ELÉCTRICA<br>% IACS |
|--------|---------|---|---|-------------------------|---|-------------------------|-------------------------|--|--|--------------------------|---|------------------------------|--|--------------------------------------|
| 6005 A | T1      | 200   | 100   | 25                      | -                                       | -                       | -                       | 69.500                                 | 2,71                                   | 605-655                  | 23,3  | 892                          | -  | -                                    |
| 6005 A | T4      | 210   | 110   | 16                      | -                                       | -                       | -                       | 69.500                                 | 2,71                                   | 605-655                  | 23,3  | 892                          | -  | -                                    |
| 6005 A | T5      | 270   | 240   | 13                      | -                                       | -                       | -                       | 69.500                                 | 2,71                                   | 605-655                  | 23,3  | 892                          | -  | -                                    |
| 6005 A | T6      | 285   | 260   | 12                      | 190                                     | 90                      | 95                      | 69.500                                 | 2,71                                   | 605-655                  | 23,3  | 892                          | 35,0                                     | 49,5                                 |
| 6060   | O       | 100   | 50  | 27                      | 110                                     | 25                      | 25                      | 69.500                                 | 2,70                                   | 610-655                  | 23,4  | 898                          | -  | -                                    |
| 6060   | T1      | 150   | 90  | 25                      | -                                       | 45                      | 45                      | 69.500                                 | 2,70                                   | 610-655                  | 23,4  | 898                          | 35,0                                     | 49,5                                 |
| 6060   | T4      | 160   | 90  | 20                      | -                                       | 50                      | 55                      | 69.500                                 | 2,70                                   | 610-655                  | 23,4  | 898                          | 36,0                                     | 48,0                                 |
| 6060   | T5      | 220   | 185   | 13                      | 160                                     | 75                      | 80                      | 69.500                                 | 2,70                                   | 610-655                  | 23,4  | 898                          | 32,0                                     | 54,0                                 |
| 6060   | T6      | 245   | 215   | 13                      | 160                                     | 85                      | 90                      | 69.500                                 | 2,70                                   | 610-655                  | 23,4  | 898                          | 32,0                                     | 54,0                                 |
| 6061   | O       | 125   | 55  | 27                      | 120                                     | 30                      | 30                      | 70.000                                 | 2,70                                   | 580-650                  | 23,3  | 895                          | 37,0                                     | 46,5                                 |
| 6061   | T4      | 235   | 140   | 21                      | 180                                     | 65                      | 70                      | 70.000                                 | 2,70                                   | 580-650                  | 23,3  | 895                          | 43,0                                     | 40,0                                 |
| 6061   | T6/T651 | 310   | 270   | 14                      | 190                                     | 95                      | 100                     | 70.000                                 | 2,70                                   | 580-650                  | 23,3  | 895                          | 40,0                                     | 43,0                                 |
| 6063   | O       | 100   | 50  | 27                      | 110                                     | 25                      | 25                      | 69.500                                 | 2,70                                   | 615-655                  | 23,5  | 898                          | 30,0                                     | 57,5                                 |
| 6063   | T1      | 150   | 90  | 26                      | 150                                     | 45                      | 45                      | 69.500                                 | 2,70                                   | 615-655                  | 23,5  | 898                          | 34,0                                     | 50,5                                 |
| 6063   | T4      | 160   | 90  | 21                      | 150                                     | 50                      | 50                      | 69.500                                 | 2,70                                   | 615-655                  | 23,5  | 898                          | 35,0                                     | 49,5                                 |
| 6063   | T5      | 215   | 175   | 14                      | 150                                     | 60                      | 65                      | 69.500                                 | 2,70                                   | 615-655                  | 23,5  | 898                          | 31,0                                     | 55,5                                 |
| 6063   | T6      | 245   | 210   | 14                      | 150                                     | 75                      | 80                      | 69.500                                 | 2,70                                   | 615-655                  | 23,5  | 898                          | 33,0                                     | 52,0                                 |
| 6063   | T8      | 260   | 240   | -                       | -                                       | 80                      | 85                      | 69.500                                 | 2,70                                   | 615-655                  | 23,5  | 898                          | 33,0                                     | 52,0                                 |
| 6082   | O       | 130   | 60  | 27                      | 120                                     | 35                      | 35                      | 70.000                                 | 2,71                                   | 575-650                  | 23,1  | 894                          | 31,0                                     | 55,5                                 |
| 6082   | T1      | 260   | 170   | 24                      | 200                                     | 70                      | 75                      | 70.000                                 | 2,71                                   | 575-650                  | 23,1  | 894                          | -  | -                                    |
| 6082   | T4      | 260   | 170   | 19                      | 200                                     | 70                      | 75                      | 70.000                                 | 2,71                                   | 575-650                  | 23,1  | 894                          | 41,0                                     | 42,0                                 |
| 6082   | T5      | 325   | 275   | 11                      | 210                                     | 90                      | 95                      | 70.000                                 | 2,71                                   | 575-650                  | 23,1  | 894                          | -  | -                                    |
| 6082   | T6/T651 | 340   | 310   | 11                      | 210                                     | 95                      | 100                     | 70.000                                 | 2,71                                   | 575-650                  | 23,1  | 894                          | 39,0                                     | 44,0                                 |

Figura 47 - Propriedades típicas da série 6000 das ligas de alumínio da Lanema.

# Anexo B. Ficha técnica do adesivo Araldite® 2015



## Advanced Materials

### Araldite® 2015

Structural Adhesives

#### TECHNICAL DATA SHEET

### Araldite® 2015 Two component epoxy paste adhesive

#### Key properties

- Toughened paste
- Ideal for bonding GRP, SMC and dissimilar substrates
- Low shrinkage
- Gap filling, non sagging up to 10mm thickness
- High shear and peel strength

#### Description

Araldite 2015 is a two component, room temperature curing paste adhesive giving a resilient bond. It is thixotropic and non sagging up to 10mm thickness. It is particularly suitable for SMC and GRP bonding.

#### Product data

| Property                  | 2015 A        | 2015 B        | Mixed Adhesive  |
|---------------------------|---------------|---------------|-----------------|
| Colour (visual)           | neutral paste | neutral paste | neutral paste   |
| Specific gravity          | 1.4           | 1.4           | 1.4             |
| Viscosity at 25°C (Pas)   | thixotropic   | thixotropic   | thixotropic     |
| Pot Life (100 gm at 25°C) | -             | -             | 30 - 40 minutes |

#### Processing

##### Pretreatment

The strength and durability of a bonded joint are dependent on proper treatment of the surfaces to be bonded. At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone, iso-propanol (for plastics) or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt. Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used. The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment.

| Mix ratio       | Parts by weight | Parts by volume |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| Araldite 2015/A | 100             | 100             |
| Araldite 2015/B | 100             | 100             |

Araldite 2015 is available in cartridges incorporating mixers and can be applied as ready to use adhesive with the aid of the tool recommended by Huntsman Advanced Materials.

#### Application of adhesive

The resin/hardener mix may be applied manually or robotically to the pretreated and dry joint surfaces. Huntsman's technical support group can assist the user in the selection of a suitable application method as well as suggest a variety of reputable companies that manufacture and service adhesive dispensing equipment.

A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint. Huntsman stresses that proper adhesive joint design is also critical for a durable bond. The joint components should be assembled and secured in a fixed position as soon as the adhesive has been applied.

For more detailed explanations regarding surface preparation and pretreatment, adhesive joint design, and the dual syringe dispensing system, visit [www.araldite2000plus.com](http://www.araldite2000plus.com).

#### Equipment maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

#### Times to minimum shear strength

| Temperature        | °C      | 10 | 15  | 23 | 40 | 60 | 100 |
|--------------------|---------|----|-----|----|----|----|-----|
| Cure time to reach | hours   | 12 | 7.5 | 4  | 1  | -  | -   |
| LSS > 1MPa         | minutes | -  | -   | -  | -  | 17 | 6   |
| Cure time to reach | hours   | 21 | 13  | 6  | 2  | -  | -   |
| LSS > 10MPa        | minutes | -  | -   | -  | -  | 35 | 7   |

LSS = Lap shear strength.

#### Typical cured properties

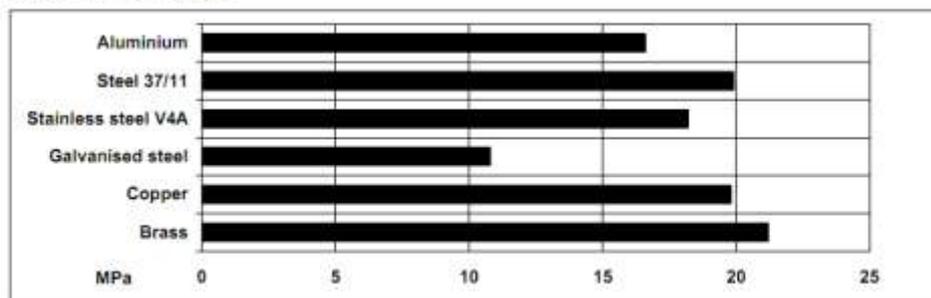
Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

#### Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587)

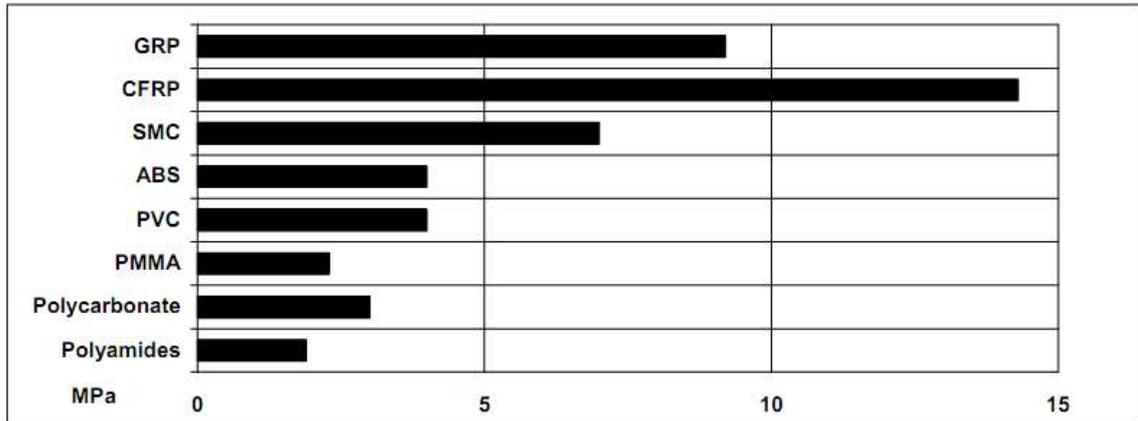
Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C.

Pretreatment - Sand blasting



**Average lap shear strengths of typical plastic-to-plastic joints (ISO 4587)**

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment – Lightly abrade and alcohol degrease.



Tensile strength at 23°C (ISO 527)

30 MPa

Tensile modulus

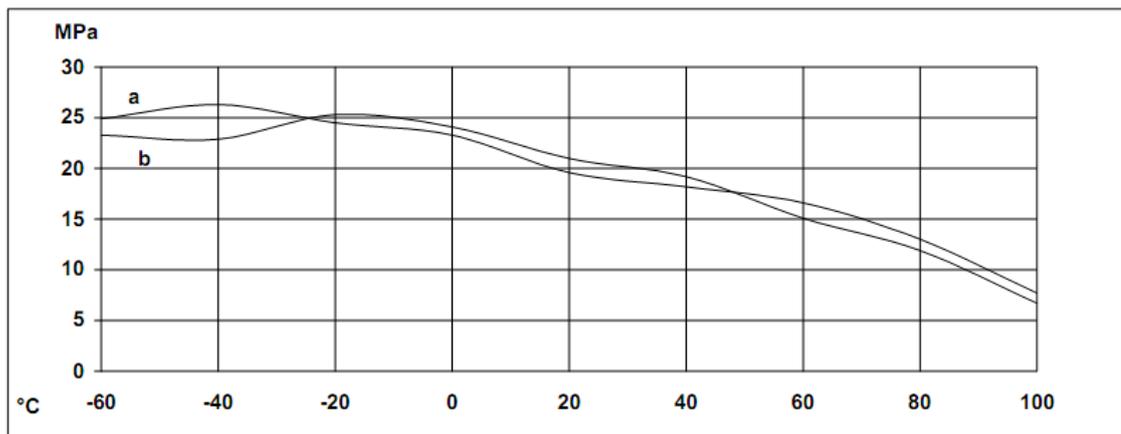
2 GPa

Elongation at break

4.4 %

**Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)**

Cure: (a) = 7 days at 23°C; (b) = 24 hours at 23°C + 30 minutes at 80°C



**Roller peel test (ISO 4578)**

Cured: 16 hours at 40°C

4 N/mm

**Glass transition temperature**

Cure: 16 hours at 40°C

67°C by DSC

Cure: 1 hour at 80°C

87 by shear modulus

DIN 53445

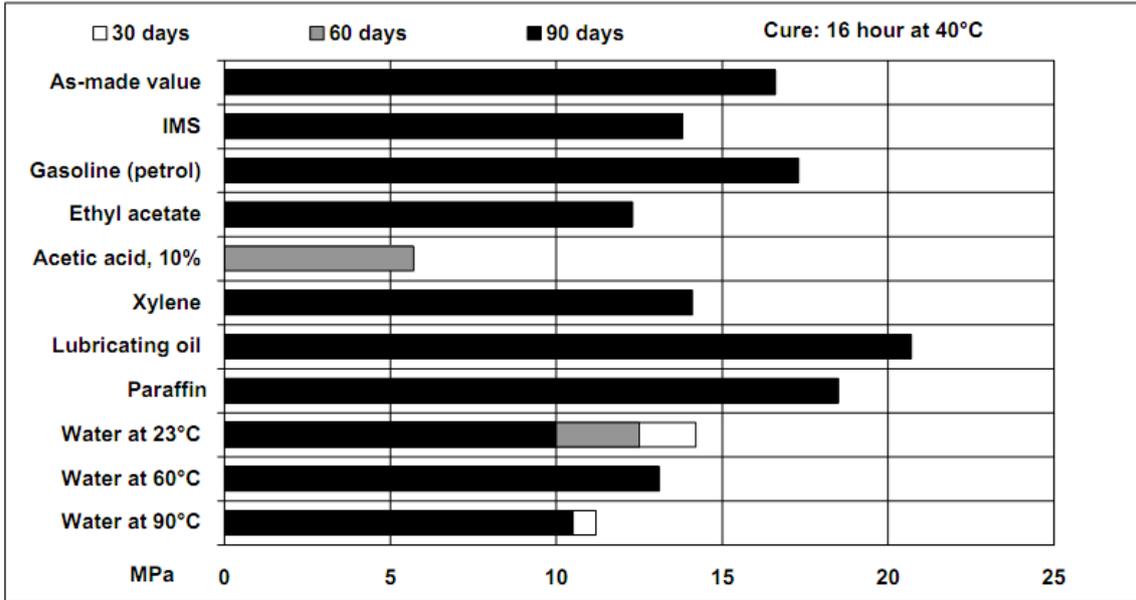
Dielectric constant (500v at 25°C)

5.6 at 1 kHz



**Lap shear strength versus immersion in various media (typical average values)**

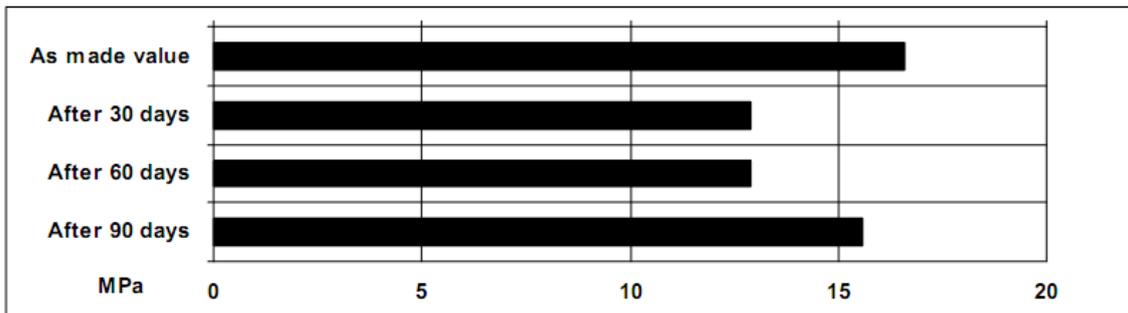
Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 90 days at 23°C



**Lap shear strength versus tropical weathering**

(40/92, DIN 50015; typical average values)

Cure: 16 hours at 40°C      Test: at 23°C

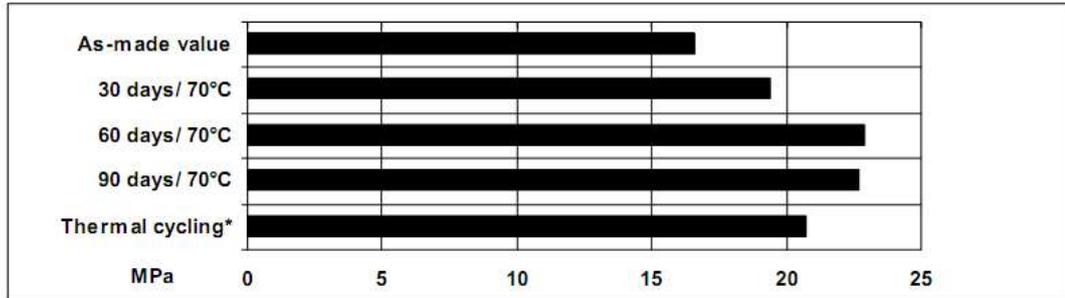




Enriching lives through innovation

**Lap shear strength versus heat ageing**

Cure: 16 hours at 40°C



\*25 cycles -30°C to + 70°C

**Shear modulus (DIN 53445)**

Cure: 1 hour at 80°C

| Temperature | G'      | Δ    |
|-------------|---------|------|
| 0°C         | 1.0 Gpa | 0.25 |
| 25°C        | 0.9 Gpa | 0.25 |
| 50°C        | 0.8 Gpa | 0.35 |
| 75°C        | 0.2 Gpa | 1.9  |
| 100°C       | 2 MPa   | 0.5  |

**Flexural Properties (ISO 178) Cure 16 hours/ 40°C tested at 23°C**

Flexural Strength 42.7 MPa

Flexural Modulus 1813.6 MPa

**Resistance to fatigue (40 Hz at 23°C) (quoted as cycles to failure)**

| Maximum applied load       | Sandblasted aluminium | Chromate pickled aluminium |
|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 20% of static failing load | >10 <sup>7</sup>      | >10 <sup>7</sup>           |
| 25% of static failing load | >10 <sup>7</sup>      | 10 <sup>7</sup>            |
| 30% of static failing load | 3 x 10 <sup>6</sup>   | 8 x 10 <sup>5</sup>        |

(Static failing load 16 MPa)

**Storage** Araldite 2015/A and Araldite 2015/B may be stored for up to 3 years at room temperature provided the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

**Handling precautions** **Caution**  
Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.

**Huntsman Advanced Materials** All recommendations for the use of our products, whether given by us in writing, verbally, or to be implied from the results of tests carried out by us, are based on the current state of our knowledge. Notwithstanding any such recommendations the Buyer shall remain responsible for satisfying himself that the products as supplied by us are suitable for his intended process or purpose. Since we cannot control the application, use or processing of the products, we cannot accept responsibility therefor. The Buyer shall ensure that the intended use of the products will not infringe any third party's intellectual property rights. We warrant that our products are free from defects in accordance with and subject to our general conditions of supply.



**Huntsman Advanced Materials**  
(Switzerland) GmbH  
Klybeckstrasse 200  
4057 Basel  
Switzerland

Tel: +41 (0)61 966 33 33  
Fax: +41 (0)61 966 35 19  
[www.huntsman.com/advanced\\_materials](http://www.huntsman.com/advanced_materials)

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the buyer. Typical properties, where stated, are to be considered as representative of current production and should not be treated as specifications.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of our knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, NOTHING HEREIN IS TO BE CONSTRUED AS A WARRANTY, EXPRESS OR OTHERWISE.

IN ALL CASES, IT IS THE RESPONSIBILITY OF THE USER TO DETERMINE THE APPLICABILITY OF SUCH INFORMATION AND RECOMMENDATIONS AND THE SUITABILITY OF ANY PRODUCT FOR ITS OWN PARTICULAR PURPOSE.

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

[Araldite® 2015] is a registered trademark of Huntsman Corporation or an affiliate thereof.

Copyright © 2007 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.

## Anexo C. Ficha técnica do adesivo Araldite® AV138

Huntsman Advanced Materials Americas Inc.  
5121 San Fernando Road West  
Los Angeles, CA 90039  
818.247.6210

Customer Service Hotline: 800.367.8793  
Customer Service Faxline: 517.351.6255  
Technical Inquiries: 800.817.8260



website: [www.araldite.com](http://www.araldite.com)  
e-mail: [adhesives\\_group@huntsman.com](mailto:adhesives_group@huntsman.com)

### Product Data

## ARALDITE® AV 138M Resin Hardener HV 998 EPOXY ADHESIVE

**DESCRIPTION:** Araldite AV 138M resin/Hardener HV 998 epoxy adhesive is a two-component, room-temperature curing paste with high strength and toughness. The cured epoxy adhesive performs well at elevated temperatures and features high chemical resistance. Araldite AV 138M resin/Hardener HV 998 epoxy adhesive is designed for bonding a wide variety of substrates including metals, ceramics, glass, rubbers and rigid plastics. The system is well suited for industrial applications requiring resistance to aggressive and/or warm environments. Araldite AV 138M resin/Hardener HV 998 epoxy adhesive also is a low out-gassing material that is suitable for use in specialized electronic telecommunication and aerospace applications.

### ADVANTAGES:

- Low out-gassing/volatile loss
- Good chemical resistance
- Temperature resistant to 248°F (120°C)
- Cures at temperatures as low as 41°F (5°C)
- Thixotropic, gap-filling

### TYPICAL PROPERTIES:

| <u>Property</u>                               | <u>Test Method</u> | <u>Resin</u> | <u>Test Values<sup>1</sup></u><br><u>Hardener</u> | <u>Mixed</u> |
|---|--------------------|--------------|---|--------------|
| Color/appearance                              | Visual             | Beige        | Gray  | Gray         |
| Specific Gravity                              | ASTM D-792         | 1.7          | 1.7   | 1.7          |
| Viscosity (cP) at 77°F (25°C)                 | ASTM D-2393        | Paste        | Paste   | Paste        |
| Pot Life, minutes at 77°F (25°C), 100 gm mass | ASTM D-2471        | --           | --  | 35           |

**PROCESSING:****Pretreatment**

The strength and durability of a joint depend on the proper treatment of the surfaces to be bonded. At a minimum, joint surfaces should be cleaned with a good-quality degreasing agent such as acetone, trichloroethylene or a proprietary formulation to ensure the complete removal of oil, grease and dirt. Alcohol, gasoline or paint thinners should **never** be used.

For added joint strength, degreased surfaces should be mechanically abraded or chemically etched (pickled). After abrasion, surfaces should be degreased again.

**MIX  
RATIO**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| Resin/hardener (by weight) | 100R/40H |
| Resin/hardener (by volume) | 100R/40H |

Resin and hardener should be blended until they are homogeneously mixed.

**Adhesive Application**

The mixed epoxy adhesive should be applied with a spatula to the pretreated, dry joint surfaces.

A layer of adhesive 0.002 to 0.004-inches (0.05 to 0.10-mm) thick will normally impart the greatest lap shear strength to a joint.

Joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. Even contact pressure throughout the joint area will ensure proper cure.

**Mechanical Processing**

For bulk processing, metering, mixing and spreading equipment is available. Consult your Huntsman Advanced Materials representative for more information about equipment to meet specific requirements.

**Equipment Maintenance**

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesive residues cure. (The removal of cured residues is a difficult and time-consuming process.) If solvents such as acetone are used for cleaning, technicians should take the appropriate precautions to avoid skin and eye contact.

**RECOMMENDED  
CURE SCHEDULES:**

| <u>Temperature</u> | <u>Minimum Cure<br/>Time</u> | <u>Lap Shear Strength<br/>at 75°F (23°C),<br/>psi (MPa)</u> |
|--------------------|------------------------------|---|
| 50°F (10°C)        | 48 hours                     | 1,450 (10)  |
| 59°F (15°C)        | 36 hours                     | 1,595 (11)  |
| 75°F (23°C)        | 24 hours                     | 1,885 (13)  |
| 104°F (40°C)       | 16 hours                     | 2,030 (14)  |
| 140°F (60°C)       | 1 hour                       | 2,175 (15)  |
| 176°F (80°C)       | 15 minutes                   | 2,320 (16)  |
| 212°F (100°C)      | 10 minutes                   | 2,610 (18)  |

**TYPICAL CURED PROPERTIES:**

Unless otherwise stated, the figures given below were determined by testing standard specimens made by lap-jointing 6.5-inch x 1-inch x 0.06-inch (170-mm x 25-mm x 1.5-mm) strips of aluminum. The joint area was 0.5 inch x 1 inch (12.5 mm x 25 mm) in each case. The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

**Lap Shear Strength, psi (MPa)*****Metal-to-Metal Substrates***

(Cured 16 hours at 104°F/40°C)

Pretreatment: Sand blasting

ISO 4587

(typical average values)

| <b>Metal</b>        | <b>Shear Strength,<br/>psi (MPa)</b> |
|---------------------|--------------------------------------|
| Aluminum            | 2,030 (14)                           |
| Steel 37/11         | 2,175 (15)                           |
| Stainless Steel V4A | 2,900 (20)                           |
| Galvanized Steel    | 2,320 (16)                           |
| Copper              | 2,320 (16)                           |
| Brass               | 2,175 (15)                           |

**Shear Modulus (DIN 53445)**

(Cured 16 hours at 104°F/40°C)

| <b>Temperature</b> | <b>Modulus,<br/>psi (MPa)</b> |
|--------------------|-------------------------------|
| 77°F (25°C)        | 435,000 (3,000)               |
| 122°F (50°C)       | 290,000 (2,000)               |
| 167°F (75°C)       | 58,000 (400)                  |
| 212°F (100°C)      | 14,500 (100)                  |
| 257°F (125°C)      | 435 (3)                       |
| 302°F (150°C)      | 290 (2)                       |

**Lap Shear Strength, psi (MPa)**

ISO 4587

(typical average values)

***Effects of Test Temperature***

Cured 16 hours at 104°F (40°C)

**Test Temp.****Test Values**

|               |              |
|---------------|--------------|
| -76°F (-60°C) | 1,812 (12.5) |
| -40°F (-40°C) | 1,812 (12.5) |
| -4°F (-20°C)  | 1,885 (13)   |
| 32°F (0°C)    | 1,958 (13.5) |
| 68°F (20°C)   | 2,030 (14)   |
| 104°F (40°C)  | 2,175 (15)   |
| 140°F (60°C)  | 2,204 (15.2) |
| 176°F (80°C)  | 2,320 (16)   |
| 212°F (100°C) | 1,885 (13)   |
| 248°F (120°C) | 1,232 (8.5)  |
| 284°F (140°C) | 870 (6)      |

**Lap Shear Strength, psi (MPa)****Effect of Immersion** (typical average values)

(Cured 16 hours at 104°F/40°C). Immersion for 90 days at 73°F/23°C in media listed.)

| <b>Properties</b>      | <b>Test Values</b> |
|------------------------|--------------------|
| Standard - As prepared | 2,030 (14)         |
| Methanol               | 1,885 (13)         |
| Gasoline               | 2,320 (16)         |
| Ethyl Acetate          | 2,030 (14)         |
| Acetic Acid, 10%       | 1,740 (12)         |
| Trichloroethylene      | 2,030 (14)         |
| Lubricating Oil        | 2,030 (14)         |
| Kerosene               | 2,030 (14)         |
| Water @ 73°F (23°C)    | 2,175 (15)         |
| Water @ 194°F (90°C)   | 2,320 (16)         |

| <b>Property</b>   | <b>Test Method</b> | <b>Test Values<sup>(1)</sup></b>                      |
|---|--------------------|---|
| Roller Peel <sup>2</sup> , pli (N/mm)   | ISO 4578           | (1.8)   |
| Hardness, Shore D   |                    | 84-86   |
| Elongation at break, %  |                    | 1.2   |
| Tensile Strength <sup>2</sup> , psi (MPa)   |                    | (43)  |
| Tensile Modulus, psi (MPa)  |                    | (4,700)   |
| Coefficient of Thermal Expansion <sup>2</sup> , in/in/°C<br>(64°F – 200°F/18°C – 93°C)  | VSM 77110          | 67 x 10 <sup>-6</sup>                                 |
| Fatigue Test <sup>2</sup> , simple lap joints @ 90-130 Hz<br>25% of static failing load, cycles to failure<br>30% of static failing load, cycles to failure | DIN 532852         | >10 <sup>7</sup><br>10 <sup>5</sup> – 10 <sup>6</sup> |
| Volume Resistivity, ohms-cm @ 50 Hz   | VSDE 0303          | 1.8x10 <sup>17</sup>                                  |
| Electric Strength, kV (instantaneous value)   | VSM 7710           | 45.8  |
| Electrolytic Corrosion <sup>2</sup> , after 4 days at<br>104°F/40°C/92% RH  | DIN 53489          | Rated AN1   |
| <sup>1</sup> At 73°F (23°C) unless otherwise noted.   |                    |   |
| <sup>2</sup> Cured 16 hours at 104°F/40°C   |                    |   |

**Lap Shear Strength, psi (MPa)**

DIN 50015

**Effect of Tropical Exposure**

(typical average values)

(Cured 16 hours at 104°F/40°C/92% R.H.)

| <b>Exposure Time</b>        | <b>Test Values<sup>(1)</sup></b> |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Standard - As prepared      | 2,030 (14)                       |
| 30 days                     | 2,175 (15)                       |
| 60 days                     | 2,320 (16)                       |
| 90 days                     | 2,465 (17)                       |
| <sup>1</sup> At 73°F (23°C) |                                  |

**Lap Shear Strength, psi (MPa)****Effect of Heat Aging**

(Cured 16 hours @ 104°F/40°C)

| <b>Exposure Time</b>    | <b>Test Values</b> |
|-------------------------|--------------------|
| Standard - As prepared  | 2,030 (14)         |
| 5 years at 104°F(40°C)  | 2,030 (14)         |
| 5 years at 176°F(80°C)  | 2,465 (17)         |
| 60 days at 302°F(150°C) | 2,465 (17)         |

**CAUTION:**

Huntsman Advanced Materials Americas Inc. maintains up-to-date Material Safety Data Sheets (MSDS) on all of its products. These sheets contain pertinent information that you may need to protect your employees and customers against any known health or safety hazards associated with our products. Users should review the latest MSDS to determine possible health hazards and appropriate precautions to implement prior to using this material. Copies of the latest MSDS may be requested by calling our customer service group at 800-367-8793 or emailing your request to [adhesives\\_group@huntsman.com](mailto:adhesives_group@huntsman.com).

**FIRST AID!**

Eyes and skin: Flush eyes with water for 15 minutes. Contact a physician if irritation persists. Wash skin thoroughly with soap and water. Remove and wash contaminated clothing before reuse.

Inhalation: Remove subject to fresh air.

Swallowing: Dilute by giving water to drink and contact a physician promptly. Never give anything to drink to an unconscious person.

**KEEP OUT OF REACH OF CHILDREN****FOR PROFESSIONAL AND INDUSTRIAL USE ONLY****IMPORTANT LEGAL NOTICE:**

Sales of a referenced product ("Product") are subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials Americas Inc. ("Huntsman").

WARRANTY: Huntsman warrants to the Buyer that the Product will conform to the published specifications for that Product at the time of manufacture.

DISCLAIMER AND LIMITATION OF LIABILITY: EXCEPT AS SET FORTH ABOVE, HUNTSMAN MAKES NO WARRANTY OR REPRESENTATION, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Huntsman cannot control Buyer's application and use of the Product and accepts no responsibility therefore. No statement or recommendation contained in any Product literature may be construed as a representation about the suitability of a Product for the particular application of Buyer or user or as an inducement to infringe any relevant patent. Buyer is responsible to ensure that its intended use of the Product does not infringe any third-party's intellectual property rights. Huntsman neither assumes, nor authorizes any representative or other person to assume for it, any obligation or liability other than as is expressly set forth herein. UNDER NO CIRCUMSTANCES SHALL HUNTSMAN BE LIABLE FOR INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL, SPECIAL OR OTHER INDIRECT DAMAGES AS A RESULT OF A BREACH OF ANY WARRANTY OR THE FAILURE OF A PRODUCT OR ANY CLAIM THAT IS ESSENTIALLY BASED UPON SUCH BREACH OR FAILURE. Any claim by Buyer, whether arising in contract, tort, negligence, breach of warranty, strict liability, or otherwise, related to a Product shall be limited to, and the sole liability of Huntsman and the sole remedy of Buyer for any claims shall be for, the purchase price of the Product in respect of which such claim is made. The foregoing DISCLAIMER AND LIMITATION OF LIABILITY supersedes Buyer's documents.

WARNING: Technical data and results are based upon tests under controlled laboratory conditions and must be confirmed by Buyer by testing for its intended conditions of use. The Product has not been tested for, and therefore is not recommended or suitable for, uses for which prolonged contact with mucous membranes, abraded skin, or blood is intended or likely, or for uses for which implantation within the human body is intended, and Huntsman assumes no liability for any such uses.

© 2004 Huntsman Advanced Materials Americas Inc.  
Araldite is a registered trademark of Huntsman LLC or an affiliate thereof in one or more, but not all, countries.

## Anexo D. Resultados experimentais Araldite<sup>®</sup> 2015

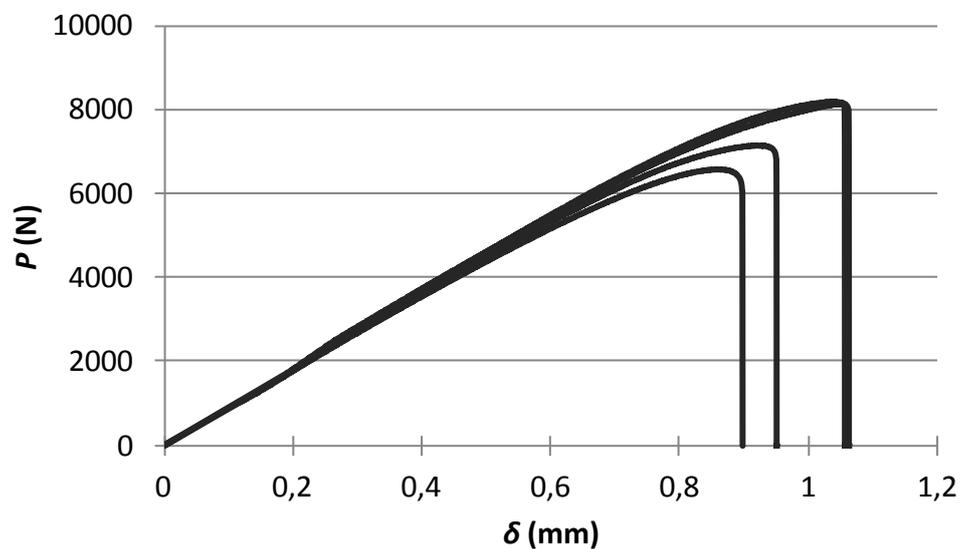


Figura 48 - Curvas  $P$ - $\delta$  para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $10^\circ$ , coladas com Araldite<sup>®</sup> 2015.



Figura 49 - Superfície de ruptura para as reparações com valores de  $\alpha$  igual a  $10^\circ$ , coladas com Araldite<sup>®</sup> 2015.

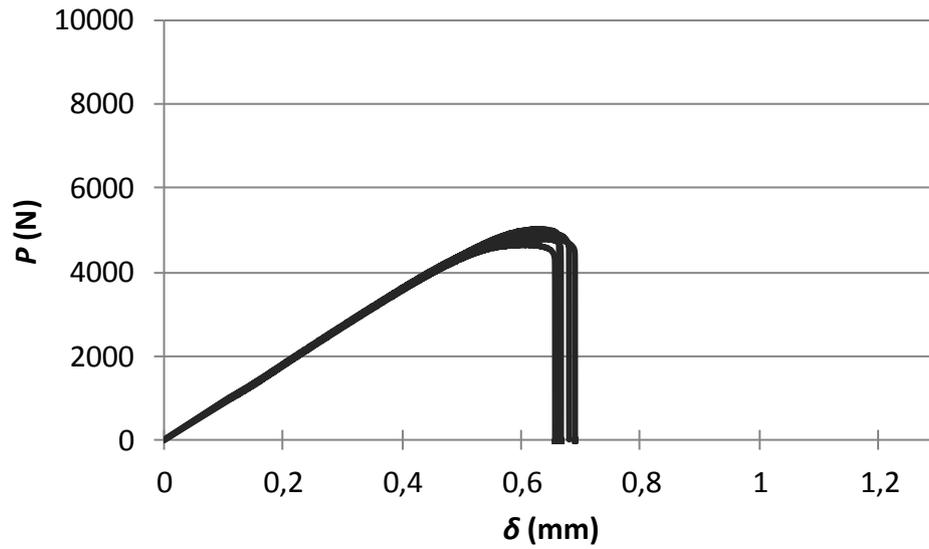


Figura 50 - Curvas  $P$ - $\delta$  para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $15^\circ$ , coladas com Araldite<sup>®</sup> 2015.

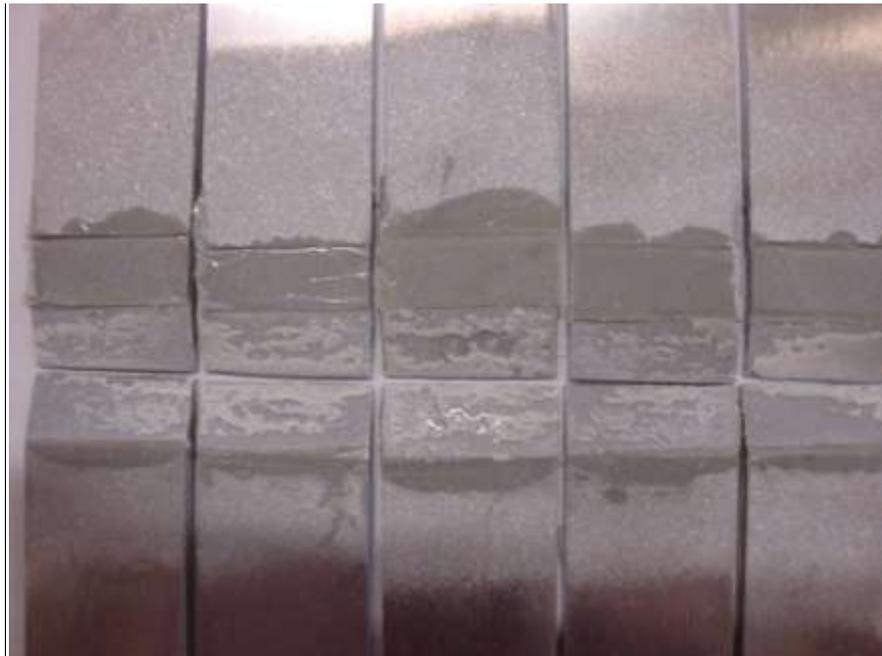


Figura 51 - Superfície de ruptura para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $15^\circ$ , coladas com Araldite<sup>®</sup> 2015.

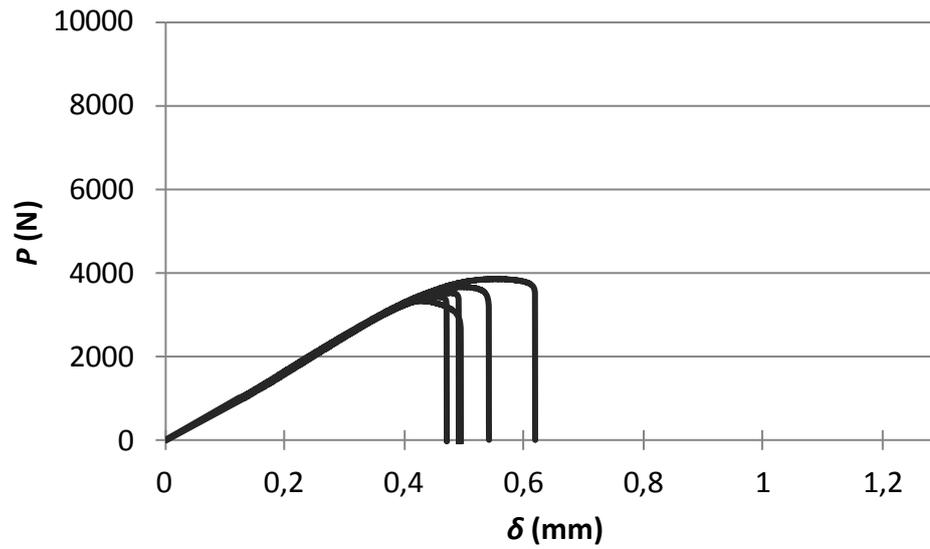


Figura 52 - Curvas  $P$ - $\delta$  para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $20^\circ$ , coladas com Araldite® 2015.

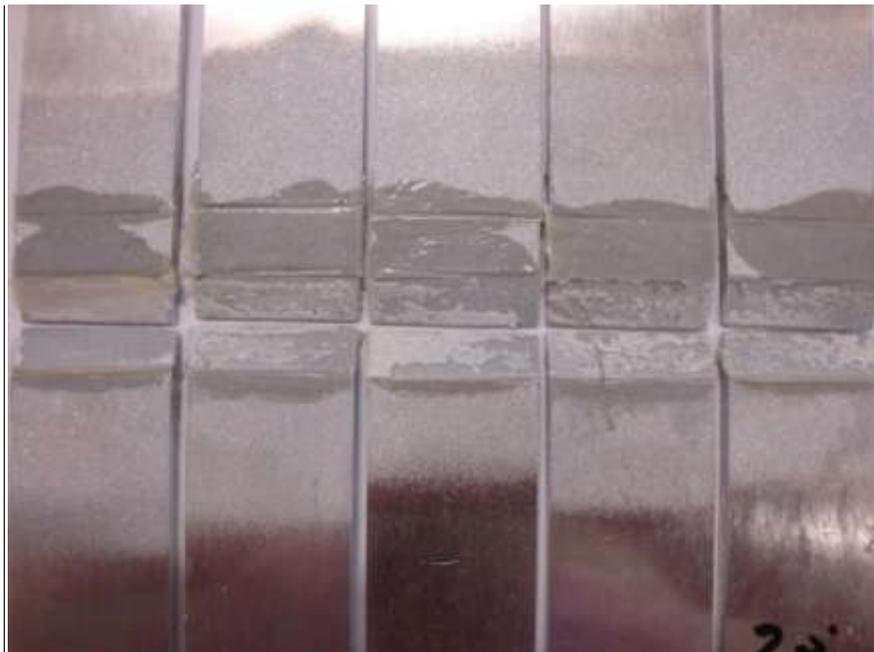
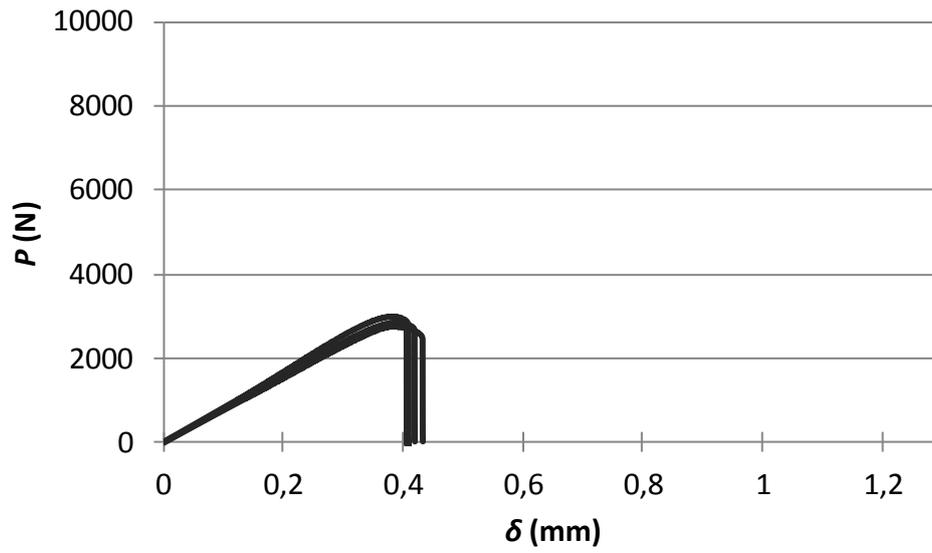
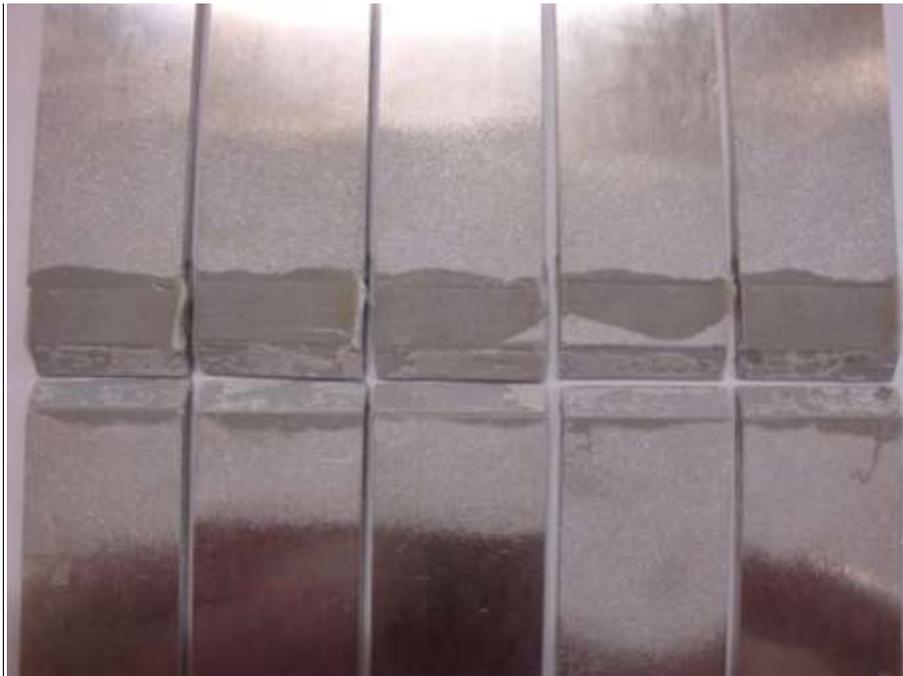


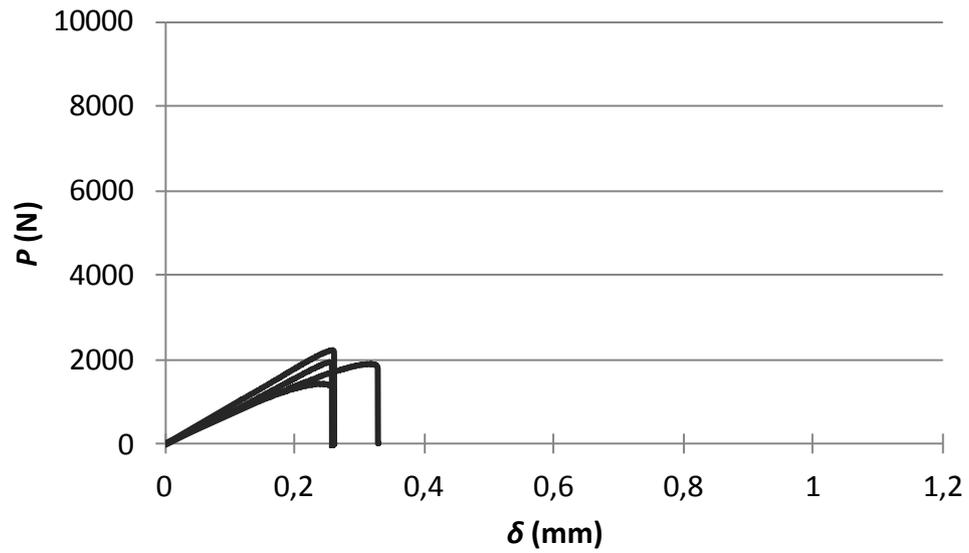
Figura 53 - Superfície de ruptura para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $20^\circ$ , coladas com Araldite® 2015.



**Figura 54 - Curvas  $P$ - $\delta$  para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $30^\circ$ , coladas com Araldite<sup>®</sup> 2015.**



**Figura 55 - Superfície de rotura para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $30^\circ$ , coladas com Araldite<sup>®</sup> 2015.**



**Figura 56 - Curvas  $P$ - $\delta$  para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $45^\circ$ , coladas com Araldite® 2015.**



**Figura 57 - Superfície de ruptura para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $45^\circ$ , coladas com Araldite® 2015.**

## Anexo E. Resultados experimentais Araldite® AV138

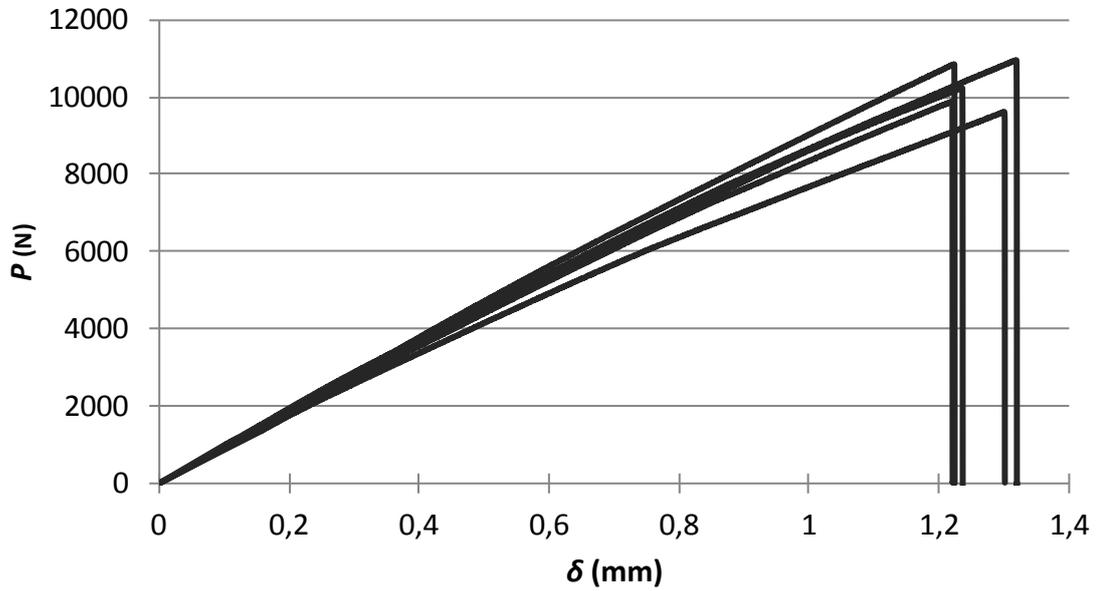


Figura 58 - Curvas  $P$ - $\delta$  para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $10^\circ$ , coladas com Araldite® AV138.

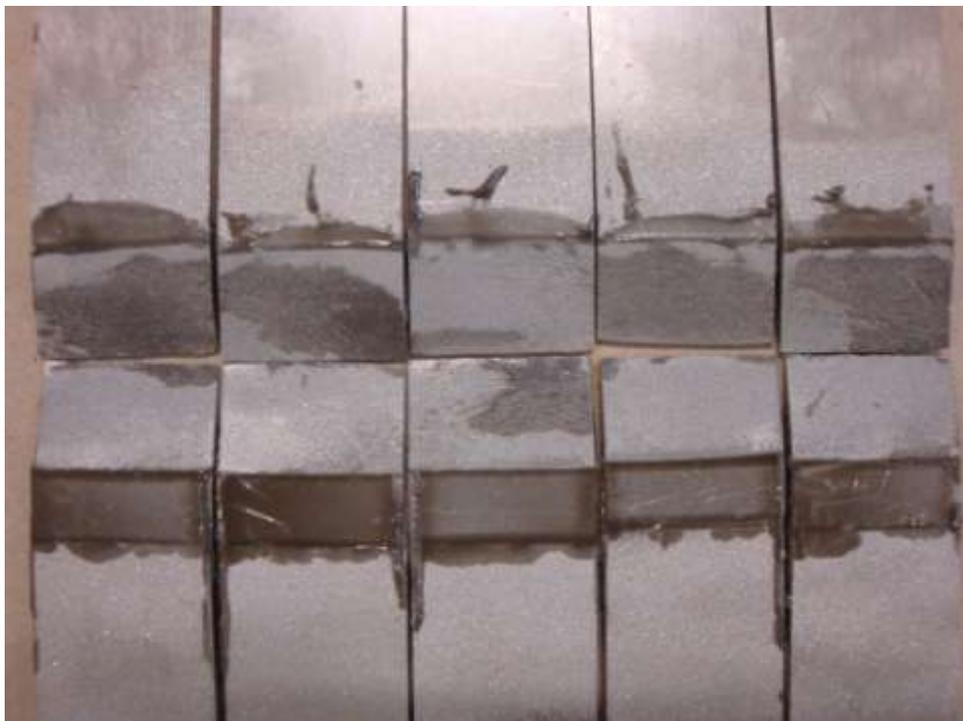


Figura 59 - Superfície de ruptura para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $10^\circ$ , coladas com Araldite® AV138.

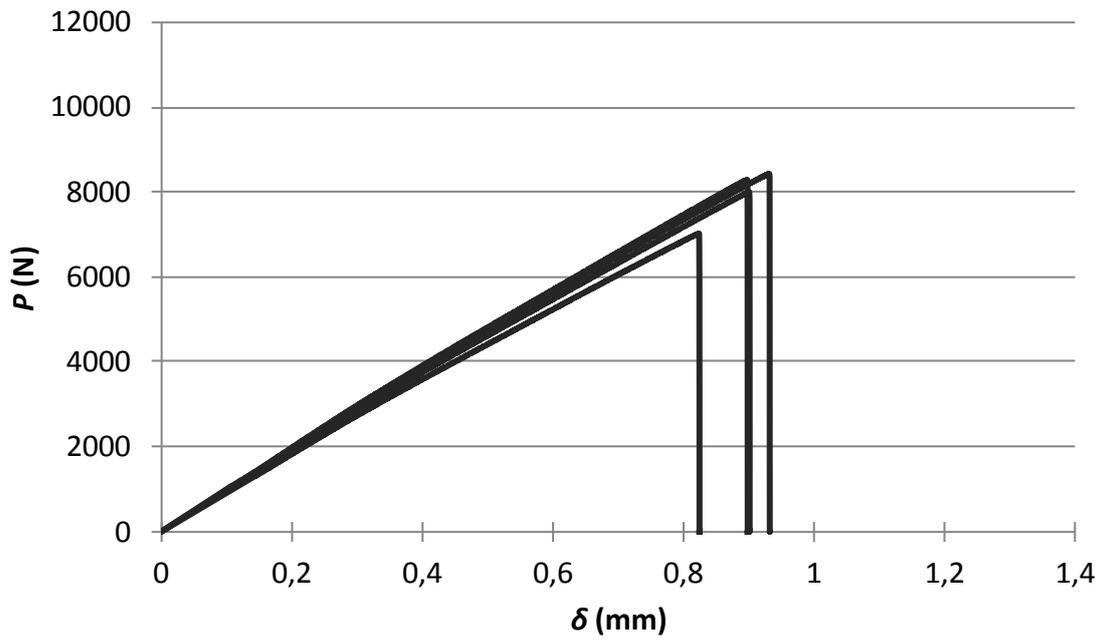
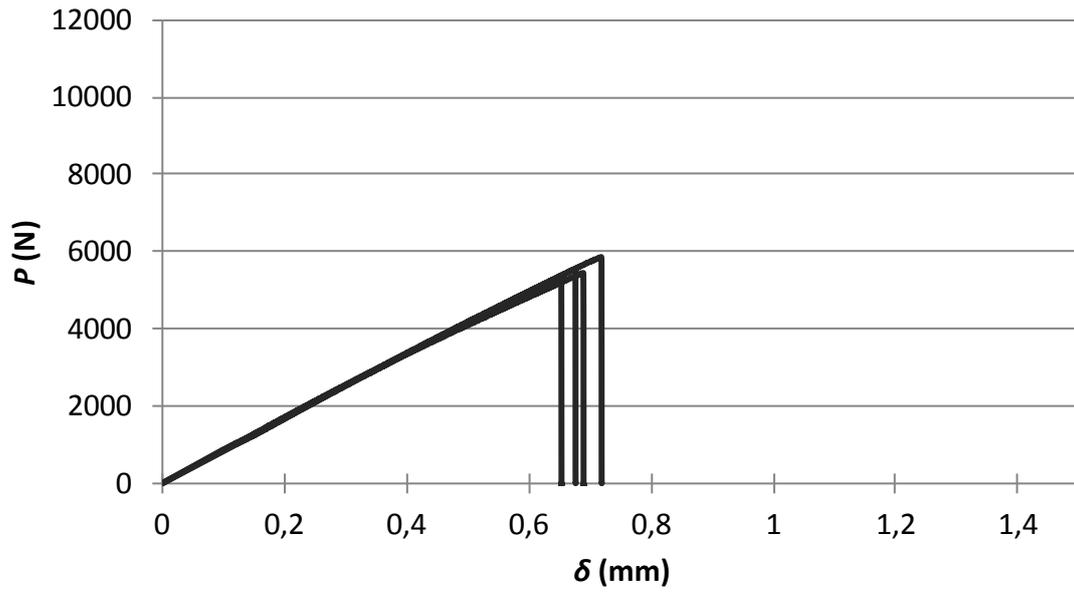


Figura 60 - Curvas  $P$ - $\delta$  para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $15^\circ$ , coladas com Araldite<sup>®</sup> AV138.



Figura 61 - Superfície de ruptura para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $15^\circ$ , coladas com Araldite<sup>®</sup> AV138.



**Figura 62 - Curvas  $P$ - $\delta$  para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $20^\circ$ , coladas com Araldite® AV138.**



**Figura 63 - Superfície de rotura para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $20^\circ$ , coladas com Araldite® AV138.**

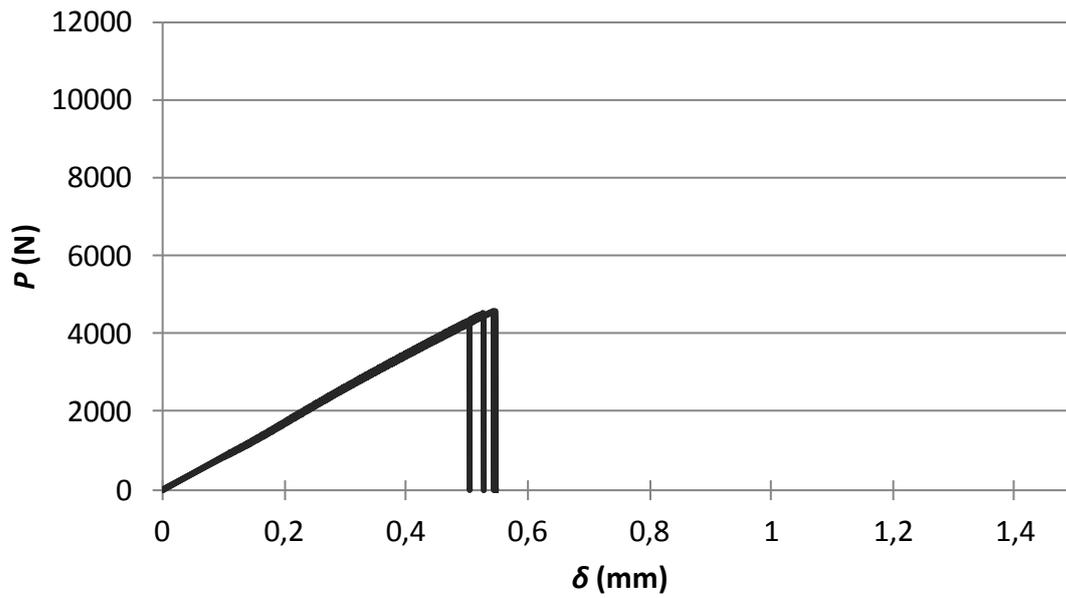


Figura 64 - Curvas  $P$ - $\delta$  para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $30^\circ$ , coladas com Araldite® AV138



Figura 65 - Superfície de ruptura para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $30^\circ$ , coladas com Araldite® AV138.

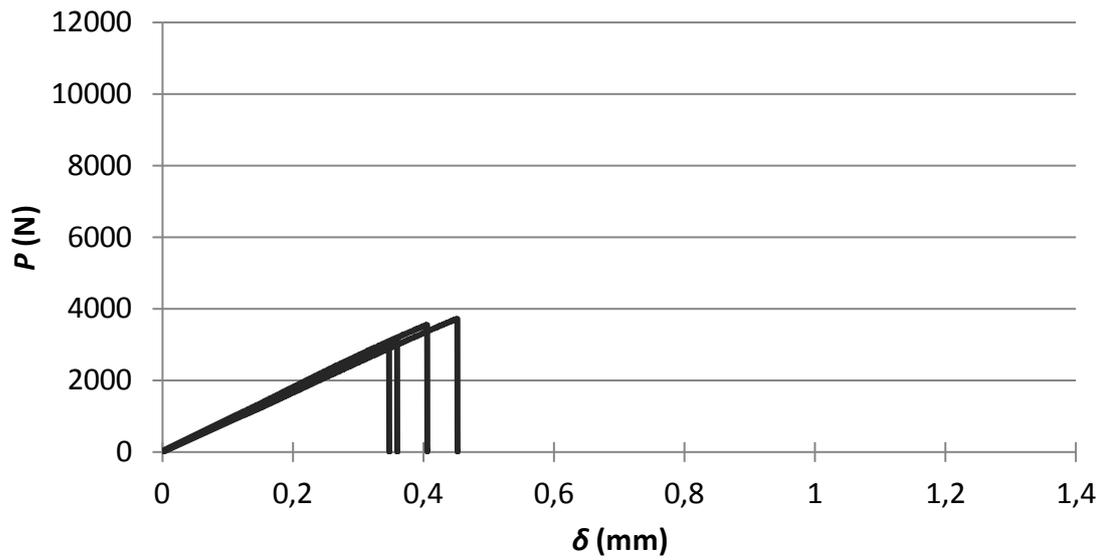


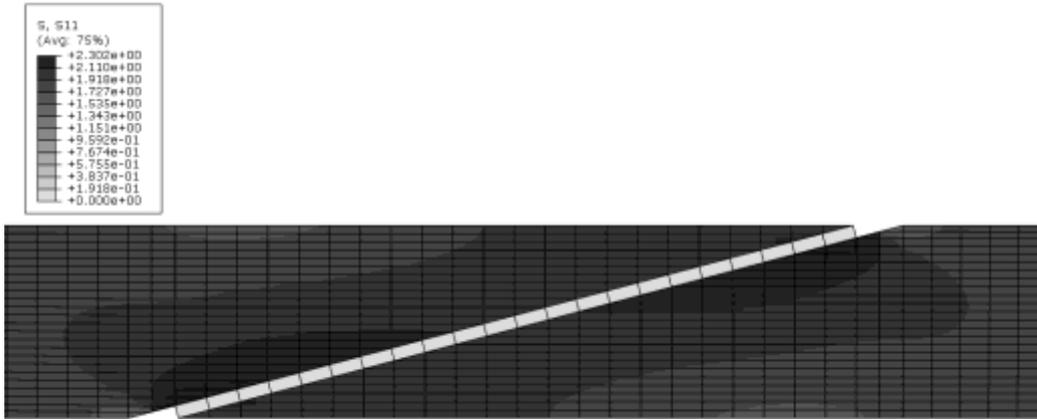
Figura 66 - Curvas  $P$ - $\delta$  para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $45^\circ$ , coladas com Araldite<sup>®</sup> AV138.



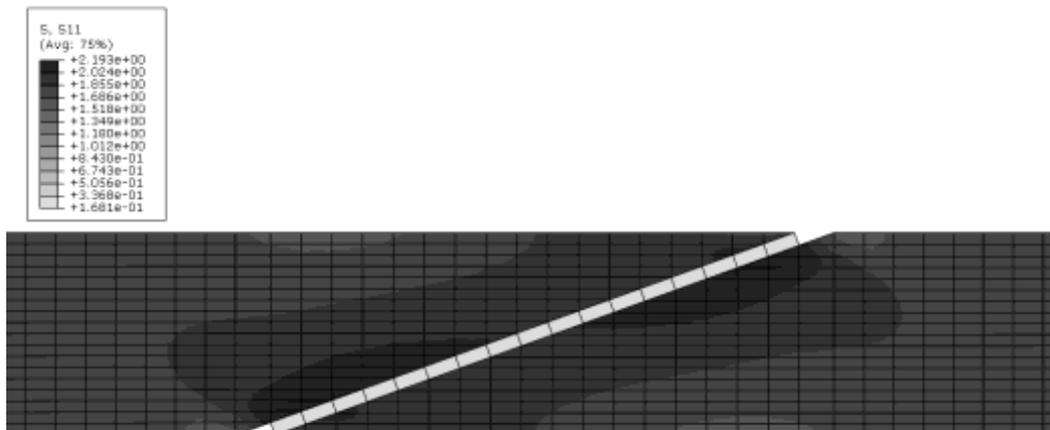
Figura 67 - Superfície de rotura para as reparações 2D com valores de  $\alpha$  igual a  $45^\circ$ , coladas com Araldite<sup>®</sup> AV138.

## Anexo F. Resultados das tensões normais

a)



b)



c)

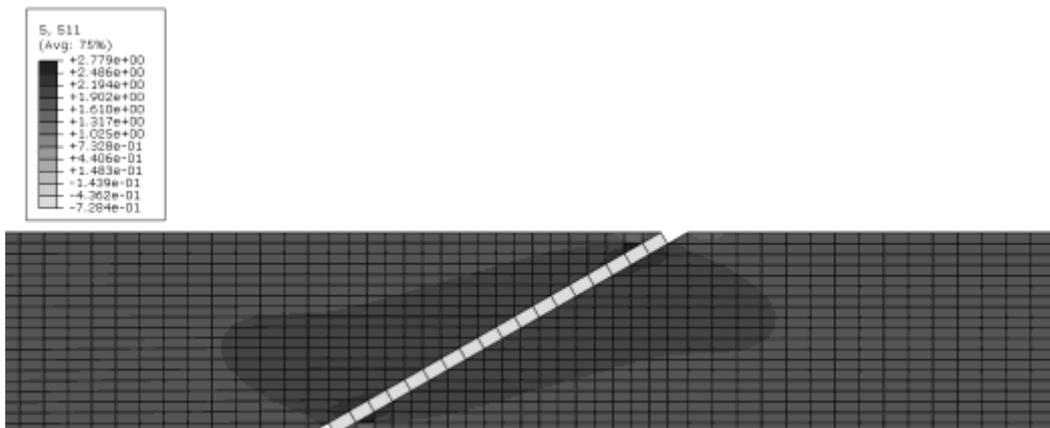
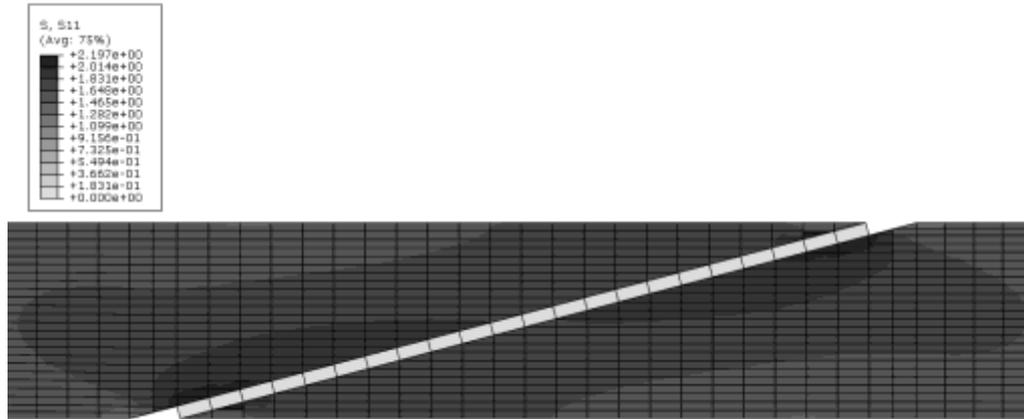
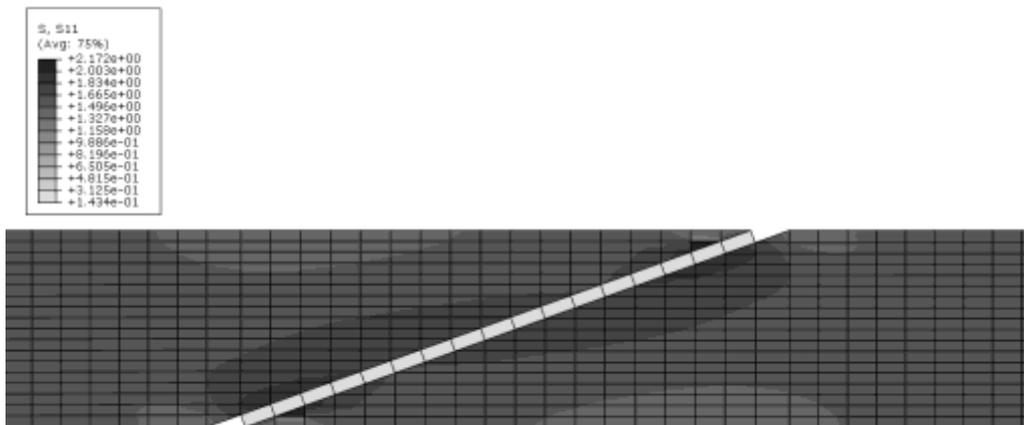


Figura 68 - Tensões normais com Araldite® AV138 para os ângulos de 15° (a), 20° (b) e 30° (c).

a)



b)



c)

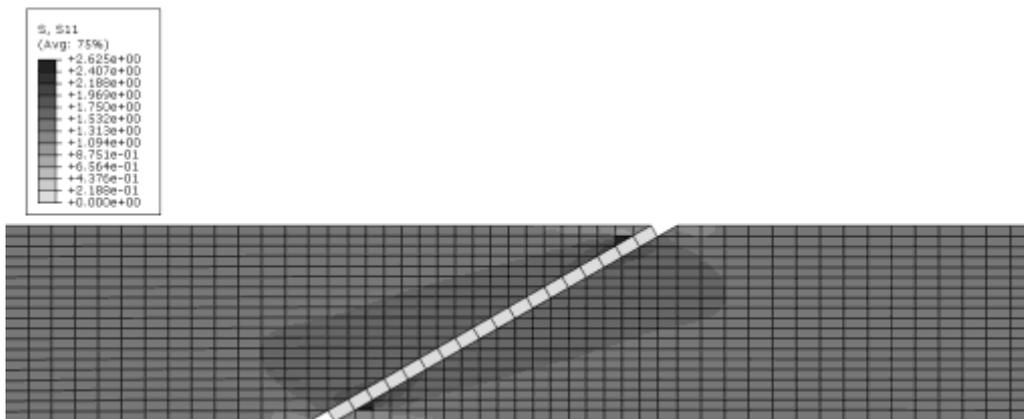
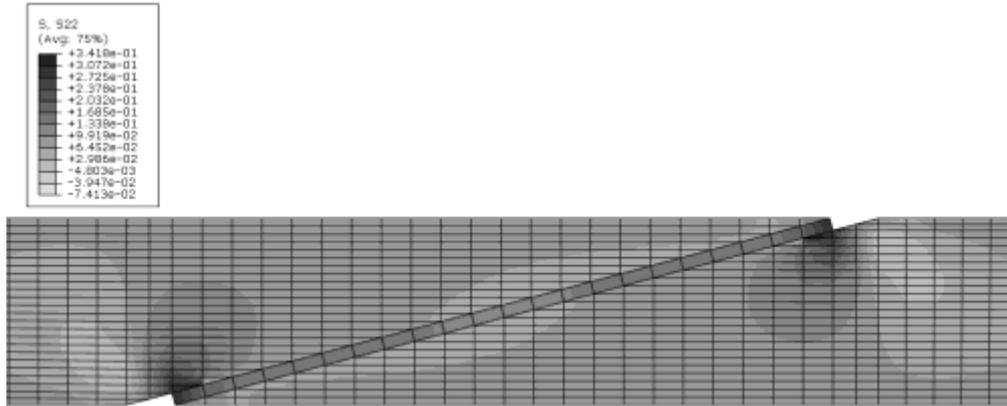


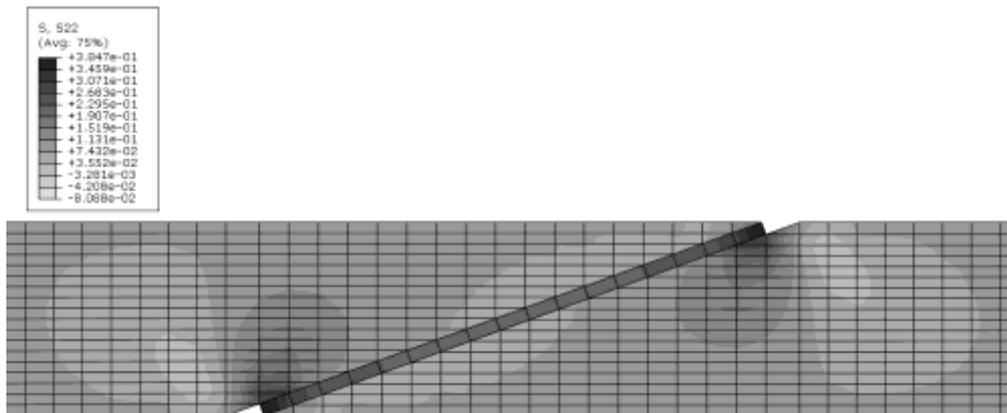
Figura 69 - Tensões normais com Araldite® 2015 para os ângulos de 15° (a), 20° (b) e 30° (c).

## Anexo G. Resultados das tensões arrancamento

a)



b)



c)

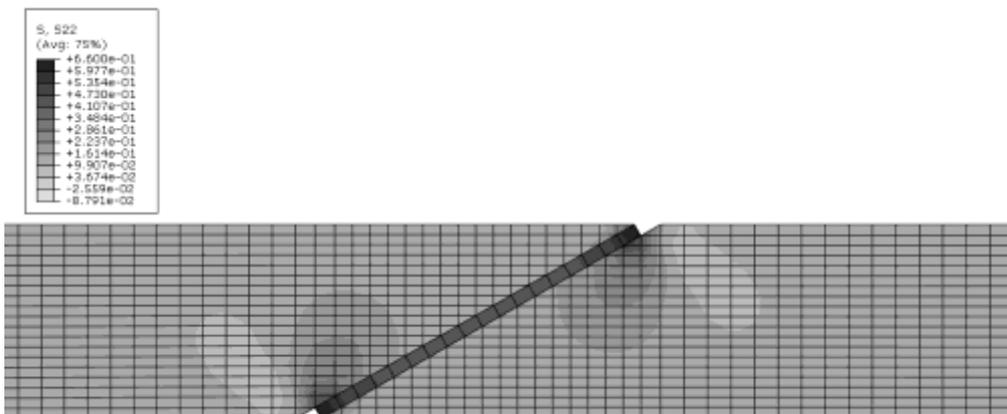
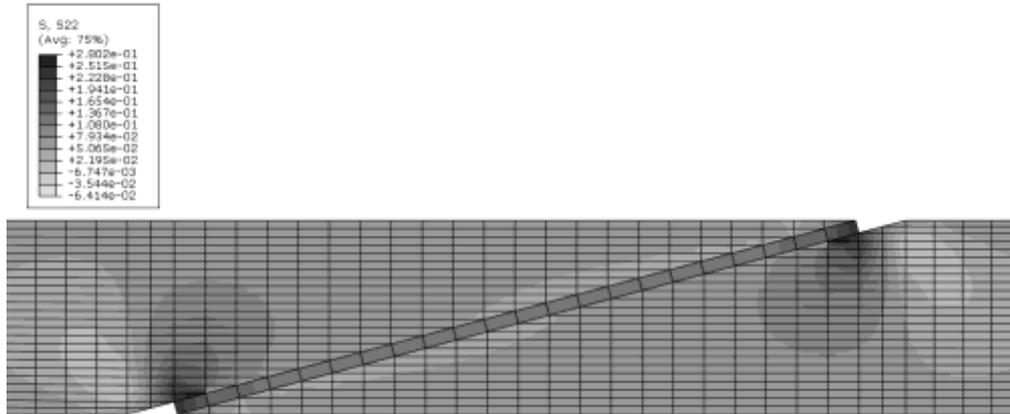
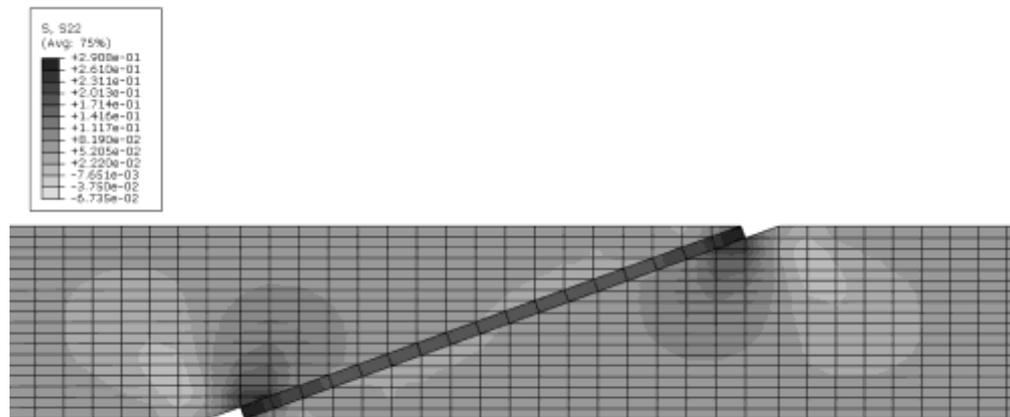


Figura 70 - Tensões de arrancamento com Araldite® AV138 para os ângulos de 15° (a), 20° (b) e 30° (c).

a)



b)



c)

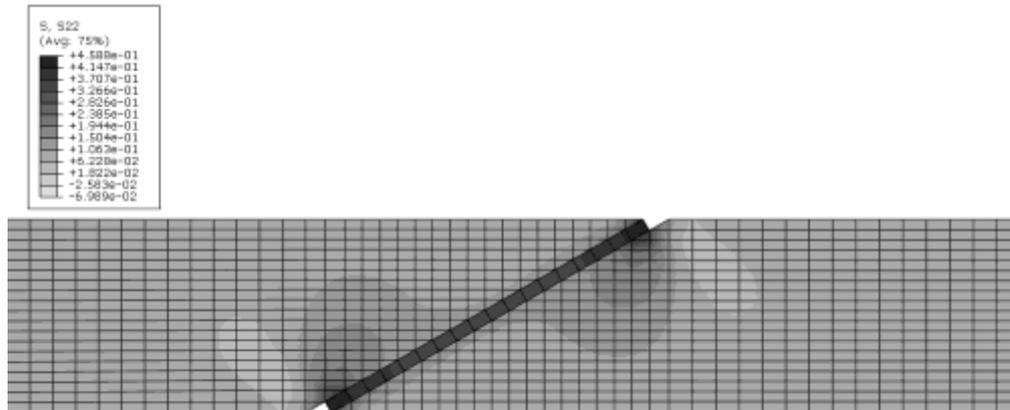
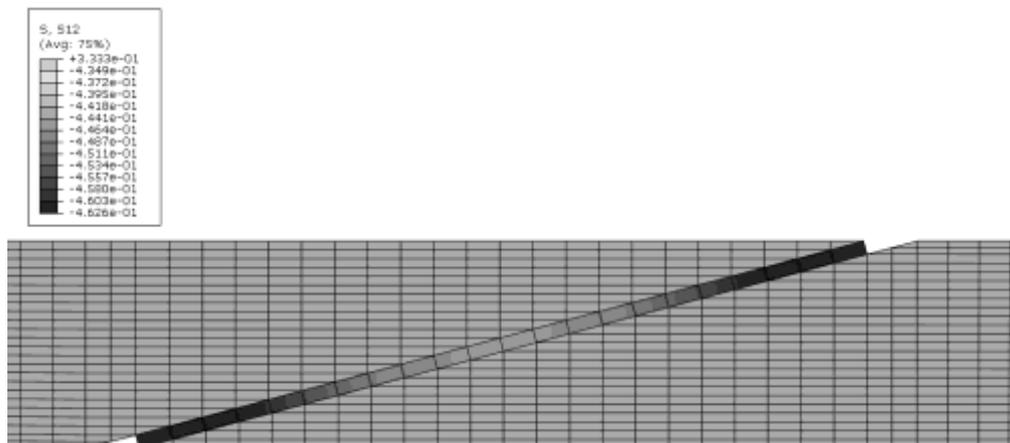


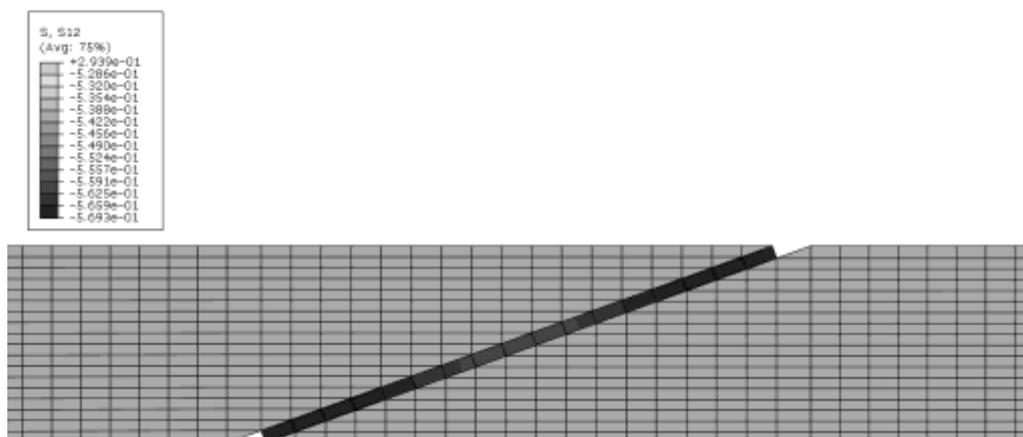
Figura 71 - Tensões de arrancamento com Araldite® 2015 para os ângulos de 15° (a), 20° (b) e 30° (c).

## Anexo H. Resultados das tensões de corte

a)



b)



c)

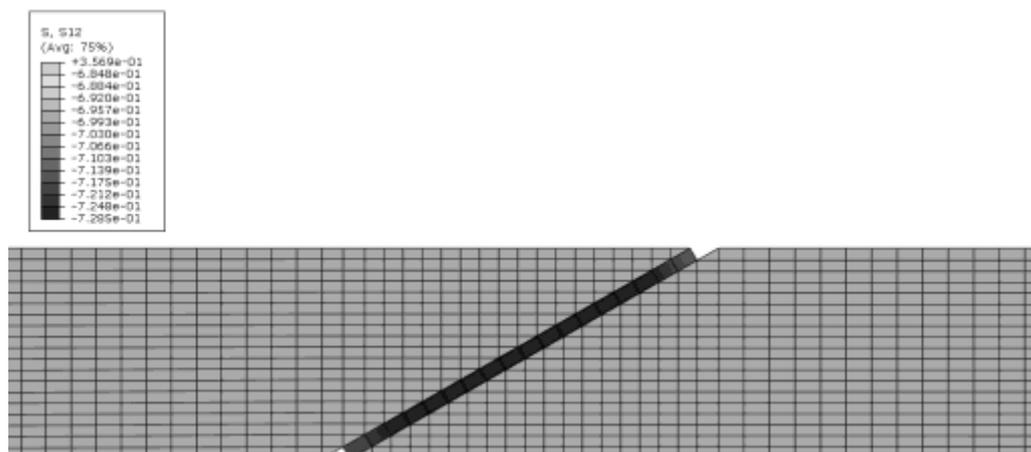
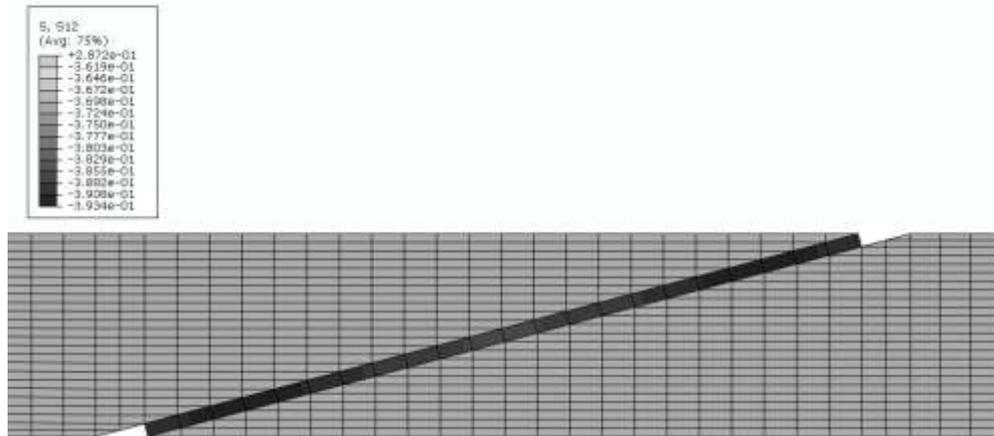
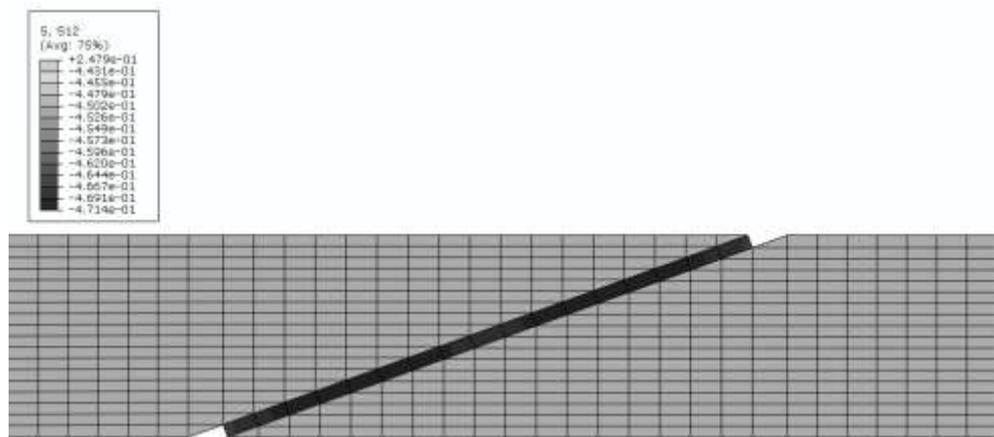


Figura 72 - Tensões de corte com Araldite® AV138 para os ângulos de 15° (a), 20° (b) e 30° (c).

a)



b)



c)

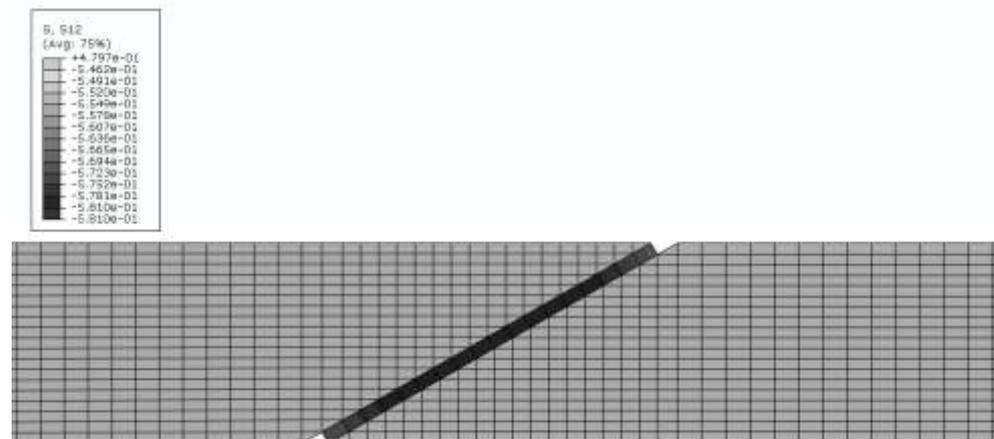


Figura 73 - Tensões de corte com Araldite® 2015 para os ângulos de 15° (a), 20° (b) e 30° (c).