

Efeito de alterações geométricas na resistência de  
juntas de sobreposição

Nuno Fernando Queiroz Reis Ribeiro

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

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



Outubro de 2012



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

Candidato: Nuno Fernando Queiroz Reis Ribeiro, N°1100092, 1100092@isep.ipp.pt

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

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

Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo Construções Mecânicas  
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



Outubro de 2012



## *Agradecimentos*

Desejo expressar o meu agradecimento a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho. No entanto, devo especial referência às seguintes individualidades e instituições:

Começo por agradecer aos Professores Doutores Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e Arnaldo Manuel Guedes Pinto, meu orientador e co-orientador, respetivamente, pela oportunidade que me concederam e pela orientação e compreensão durante a realização deste trabalho. Agradecer também pela preciosa ajuda e apoio na parte da simulação numérica, na realização de ensaios experimentais e na revisão do texto.

Ao Professor Doutor Francisco Gomes da Silva pela disponibilidade das oficinas de mecânica do ISEP para a realização da maquinagem dos substratos.

À Eng<sup>a</sup>. Maria de Fátima Andrade pela ajuda disponibilizada na realização dos ensaios de tração no laboratório de ensaios do ISEP.

Ao Laboratório de Adesivos da FEUP por permitir a granalhagem dos provetes utilizados nos ensaios de tração.

Às oficinas de Mecânica do ISEP em particular ao Eng. Vitor Ribeiro e Eng. Victor Moreira pela ajuda na maquinagem dos provetes.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), pela oportunidade que me concedeu para realizar este trabalho.



## *Resumo*

A utilização de juntas coladas em aplicações industriais tem vindo a aumentar nos últimos anos, em detrimento dos métodos tradicionais de ligação tais como a soldadura, brasagem, ligações aparafusadas e rebitadas. As juntas de sobreposição simples são o tipo de juntas mais frequentemente utilizadas em aplicações industriais, porque são as mais simples de fabricar. No entanto, a aplicação descentrada da carga neste tipo de junta provoca efeitos de flexão que originam o aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo (arrancamento), reduzindo assim a resistência da junta colada. De uma maneira geral, existem dois tipos de métodos para reduzir as concentrações de tensões. O primeiro é utilizar alterações no próprio material, otimizando as propriedades do adesivo e do substrato, enquanto o segundo método envolve alterar a geometria da junta, como por exemplo utilizando filetes de adesivo, chanfros nas extremidades dos substratos, aplicar uma geometria ondulada ou dobrar os substratos na zona de sobreposição, ou ainda utilizar rasgos nos substratos ao longo da sobreposição.

Neste trabalho é realizado um estudo experimental e numérico por Elementos Finitos de duas alterações efetuadas à geometria de juntas de sobreposição simples, de modo a aumentar a sua resistência comparativamente às juntas sem alteração geométrica. A primeira condição efetuada foi a utilização de rasgos nas extremidades do comprimento de sobreposição e a segunda foi a utilização de rasgos a meio do comprimento de sobreposição. No final do estudo experimental, verificou-se que a resistência da ligação foi significativamente melhorada com algumas das configurações testadas para cada alteração, e foi possível estabelecer em ambos os casos a configuração ótima.

Numa fase posterior, procedeu-se à simulação numérica, que incluiu uma análise de tensões e previsão do comportamento das juntas através de modelos de dano coesivo. A análise permitiu obter os modos de rotura, as curvas força-deslocamento e a resistência das juntas. Obteve-se uma concordância bastante boa com os resultados experimentais, o que mostrou a adequabilidade do método de previsão proposto para estimar o comportamento das juntas.





## *Abstract*

The use of bonded joints in industrial applications has been increasing in recent years over traditional joining methods such as welding, brazing, bolting and riveting. Single-lap joints are the most frequently used in industrial applications because they are the easiest to manufacture. However, the load eccentricity causes bending effects, which gives rise to normal stresses in the adhesive thickness (peel stresses), thereby reducing the strength of the bonded joint. Generally, two techniques are available to reduce stress concentrations. The first one involves changes in the material itself, by optimization of the adhesive and substrate properties, and the second one is accomplished by modifying the joint geometry, as for example applying adhesive fillet chamfers at the ends of the overlap, applying wavy or bend geometries at the overlapping regions, or even introducing slots between the overlap ends.

This work consists on an experimental and numerical study (by Finite Elements) of two changes to the joint geometry in order to increase the strength of single-lap joints over the un-modified joints. The first change consisted on machining slots at the ends of the overlapping length, and in the second one, they consisted on machining slots were applied at the middle of the overlap length. At the end of the experimental study, it was found that the bond strength was significantly improved.

At a later stage, a numerical simulation was performed to provide a stress analysis and to predict the joints behavior regarding the failure modes, load-displacement curves and joint strength.



**Índice**

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 1.    | Introdução .....  | 1   |
| 2.    | Revisão bibliográfica .....                                     | 3   |
| 2.1   | Juntas adesivas .....   | 4   |
| 2.1.1 | Esforços e tipos de rotura nas ligações adesivas .....          | 8   |
| 2.1.2 | Tipos de juntas mais comuns .....                               | 11  |
| 2.1.3 | Espessura do adesivo .....                                      | 13  |
| 2.1.4 | Espessura do substrato .....                                    | 14  |
| 2.2   | Classificações possíveis dos adesivos .....                     | 15  |
| 2.2.1 | Caraterização dos adesivos estruturais .....                    | 16  |
| 2.2.2 | Tipos de adesivos estruturais .....                             | 18  |
| 2.3   | Materiais de base.....  | 27  |
| 2.4   | Técnicas para aumento da resistência em juntas adesivas .....   | 33  |
| 2.4.1 | Modificação nos materiais .....                                 | 33  |
| 2.4.2 | Modificação na geometria .....                                  | 41  |
| 2.5   | Técnicas de previsão de resistência em juntas adesivas .....    | 50  |
| 2.5.1 | Métodos analíticos .....  | 51  |
| 2.5.2 | Métodos numéricos.....  | 52  |
| 3.    | Trabalho Experimental .....                                     | 56  |
| 3.1   | Materiais .....   | 57  |
| 3.1.1 | Substratos .....  | 57  |
| 3.1.2 | Adesivo.....  | 58  |
| 3.2   | Geometrias estudadas.....                                       | 59  |
| 3.2.1 | Dimensões e configurações de juntas .....                       | 59  |
| 3.2.2 | Maquinagem dos substratos.....                                  | 61  |
| 3.2.3 | Fabrico dos provetes.....                                       | 63  |
| 3.3   | Condições de ensaio.....  | 66  |
| 3.4   | Resultados e comentários das juntas .....                       | 66  |
| 3.4.1 | Condição 1.....   | 66  |
| 3.4.2 | Condição 2.....   | 72  |
| 4.    | Trabalho Numérico .....   | 77  |
| 4.1   | Condições da análise numérica .....                             | 78  |
| 4.2   | Modelo de dano coesivo .....                                    | 81  |
| 4.2.1 | Modelo de dano triangular .....                                 | 82  |
| 4.2.2 | Determinação das propriedades coesivas .....                    | 83  |
| 4.3   | Análise de tensões e previsão do comportamento das juntas ..... | 84  |
| 4.3.1 | Condição 1.....   | 84  |
| 4.3.2 | Condição 2.....   | 92  |
| 5.    | Conclusões.....   | 99  |
| 6.    | Referências documentais .....                                   | 102 |



**Índice de Figuras**

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 Aspeto junta de sobreposição simples.....  | 4  |
| Figura 2 Exemplos de Ligações Adesivas nos painéis interiores em aviões [2].....  | 5  |
| Figura 3 Exemplo de aplicações adesivas na ligação entre vigas de madeira na indústria de construção [3]. ..  | 5  |
| Figura 4 Alguns exemplos de aplicações no interior das portas e tabliers de um veículo [3]. .....   | 6  |
| Figura 5 Aspecto de ligação adesiva através da adesão e coesão [4]. .....   | 6  |
| Figura 6 Distribuição de tensões em juntas carregadas [5].....  | 8  |
| Figura 7 Esquema representativo dos vários esforços de uma ligação adesiva [6]. .....   | 9  |
| Figura 8 Representação dos modos de rotura em juntas de sobreposição [5].....   | 10 |
| Figura 9 Tipos de juntas mais comuns [5].....   | 12 |
| Figura 10 Distribuição das tensões de corte para diferentes espessuras de adesivo [5].....  | 14 |
| Figura 11 Representação geométrica do fator momento fletor numa junta sobreposição simples [8]. .....   | 14 |
| Figura 12 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais fenólicos nas ligações entre metais e madeiras [3].  | 19 |
| Figura 13 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais acrílicos anaeróbicos em todo o tipo de peças cilíndricas [13]. .....  | 20 |
| Figura 14 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais acrílicos cianoacrilatos nas ligações de fixação de uma maquete [14]. .....                                  | 21 |
| Figura 15 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais acrílicos metacrilatos numa fissura [15].....  | 21 |
| Figura 16 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais de poliuretano na fixação da manta de aramida (Kevlar), utilizado para blindagem automobilística [16]. ..... | 22 |
| Figura 17 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais de poliimida nos fios de um eletroímã [17]. .....  | 23 |
| Figura 18 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais epóxico-poliamida em laminados [18]. .....   | 24 |
| Figura 19 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais epóxico-polisulfido nas juntas das portas em automóveis [19]. .....  | 25 |
| Figura 20 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais epóxico-vinílico no forro do capô em automóveis [19]. .....  | 26 |
| Figura 21 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais epóxico-poliuretano na ligação entre o parabrisas e a carroceria em automóveis [20]. .....                   | 26 |
| Figura 22 Painel em alumínio [22]. .....  | 28 |
| Figura 23 Suporte Porta facas em alumínio [23]. .....   | 28 |
| Figura 24 Portão em alumínio [24]. .....  | 28 |
| Figura 25 Vaso decorativo em alumínio [25]. .....   | 28 |
| Figura 26 Bandeja de alumínio [26]. .....   | 28 |
| Figura 27 Cadeira de alumínio [27]. .....   | 28 |
| Figura 28 Esqueleto da carroçaria de um veículo em alumínio [28]. .....   | 29 |
| Figura 29 Painel lateral da frente em alumínio [28]. .....  | 29 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 30 Coletor de admissão de alumínio [29].   | 29 |
| Figura 31 Jantes em alumínio [30].  | 29 |
| Figura 32 Aplicação de alumínio na indústria aeronáutica [31].  | 30 |
| Figura 33 Barco em alumínio [32].   | 30 |
| Figura 34 Exemplo de caixilharia em alumínio [33].  | 31 |
| Figura 35 Escadas em alumínio [34].   | 32 |
| Figura 36 Treliça em liga de alumínio AW6082 T651 [35].   | 32 |
| Figura 37 Suspensão de moto em liga de alumínio AW6082 T651 [36].   | 33 |
| Figura 38 Juntas de sobreposição simples com gradação de $E$ [38-39].   | 34 |
| Figura 39 Tensões de corte e normais segundo $y$ para a distribuição de tensões linear [38].  | 35 |
| Figura 40 Junta de sobreposição simples mostrando a relação dos comprimentos utilizados para os dois adesivos epóxicos [40].                              | 36 |
| Figura 41 Distribuição das tensões de corte ao longo do comprimento de sobreposição para $L_1/L_2=0,5$ , $E_1=0,28$ e $E_2=2,8$ GPa [40].                 | 36 |
| Figura 42 Distribuição das tensões de corte ao longo do comprimento de sobreposição, para diferentes comprimentos de rácio $L_1/L_2$ [40].                | 37 |
| Figura 43 Efeito da variação do comprimento de cada tipo de adesivo nas tensões de corte [41].  | 38 |
| Figura 44 Efeito da variação do comprimento de cada tipo de adesivo nas tensões de arrancamento [41].   | 38 |
| Figura 45 Geometrias das juntas estudadas no trabalho de Marques et al. [42].   | 39 |
| Figura 46 Distribuição das tensões de Von Mises para o adesivo Araldite 2015 [42].  | 39 |
| Figura 47 Distribuição das tensões de Von Mises para o adesivo AV138 [42].  | 40 |
| Figura 48 Distribuição das tensões de Von Mises para a combinação bi-adesivo [42].  | 41 |
| Figura 49 Exemplos de algumas alterações de geometria no adesivo nas extremidades do comprimento de sobreposição numa junta de sobreposição simples [50]. | 42 |
| Figura 50 Chanfros Exteriores e Interiores aplicados nos aderentes [54].  | 43 |
| Figura 51 Diferentes geometrias de chanfros exteriores aplicadas nos aderentes [38].  | 44 |
| Figura 52 Distribuições de tensões em juntas de sobreposição simples (a) e onduladas (b) [56].  | 44 |
| Figura 53 Exemplo de aplicação geometria ondulada numa junta de sobreposição simples [58].  | 45 |
| Figura 54 Junta de Sobreposição simples (a) e junta com aderentes dobrados nas extremidades (b) [9].  | 46 |
| Figura 55 Distribuição das tensões de arrancamento na camada adesiva para diferentes valores de $K$ [9].  | 46 |
| Figura 56 Distribuição das tensões de corte na camada adesiva para diferentes valores de $K$ [9].   | 47 |
| Figura 57 $P_m$ para diferentes valores de $K$ em juntas coladas com Araldite® AV138 e 2015 [9].  | 47 |
| Figura 58 Geometria de junta de sobreposição simples com ranhuras paralelas nos aderentes [60].   | 48 |
| Figura 59 Efeito das ranhuras paralelas na distribuição de tensões da junta [60].   | 48 |
| Figura 60 Efeito do comprimento das ranhuras paralelas na tensão de corte $\tau_{xy}$ nas juntas [60].  | 49 |
| Figura 61 Efeito do comprimento das ranhuras paralelas na tensão de arrancamento $S_y$ nas juntas [60].   | 49 |
| Figura 62 Efeito da profundidade das ranhuras paralelas na distribuição das tensões de longitudinais $\sigma_{yy}$ na junta [60].                         | 50 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 63 Efeito da profundidade das ranhuras paralelas na distribuição das tensões de corte $\tau_{xy}$ na junta [60].<br>.....                            | 50 |
| Figura 64 Curva $\sigma$ - $\epsilon$ da liga de alumínio AW6082 T651 e respetiva aproximação para análise pelo MEF [10].<br>.....                          | 57 |
| Figura 65 Curva $\sigma$ - $\epsilon$ para o Araldite® AV138 [10].....  | 58 |
| Figura 66 Dimensões e geometria da junta de sobreposição simples sem alteração geométrica.....  | 59 |
| Figura 67 Detalhe de junta de sobreposição simples com alteração geométrica nos substratos nas extremidades da sobreposição (condição 1). ....              | 59 |
| Figura 68 Detalhe da junta de sobreposição simples com alteração geométrica nos substratos a meio da sobreposição (condição 2). ....                        | 60 |
| Figura 69 Processo de fresagem para obtenção dos rasgos nos substratos (condição 2). ....   | 62 |
| Figura 70 Rasgos nos substratos (condição 2) obtidos através do processo de fresagem.....   | 62 |
| Figura 71 Granalhadora SABBATRICE Sand Blaster utilizada para efetuar a granalhagem. ....   | 63 |
| Figura 72 Aspeto dos substratos previamente colocados na barra de suporte com grampos de mola. ....   | 64 |
| Figura 73 Aspeto das juntas após o processo de montagem. ....   | 64 |
| Figura 74 Alguns exemplos do aspeto final dos provetes para a condição 1.....   | 65 |
| Figura 75 Alguns exemplos do aspeto final dos provetes para a condição 2.....   | 65 |
| Figura 76 Máquina Shimadzu - Autograph AG-X utilizada para realização dos ensaios à tração. ....  | 66 |
| Figura 77 Gráficos das curvas $P$ - $\delta$ para as configurações JSS-15-0-0 (a) e JSS-15-15-1 (b).....  | 67 |
| Figura 78 Gráficos das curvas $P$ - $\delta$ para as configurações JSS-30-0-0 (a) e JSS-30-45-1 (b).....  | 67 |
| Figura 79 Comparação dos valores experimentais de $P_m$ para juntas de sobreposição simples sem alteração geométrica para as configurações $L_0$ -0-0. .... | 68 |
| Figura 80 Superfícies de rotura para a configuração JSS-30-30-1 (condição 1). ....  | 68 |
| Figura 81 Valores $P_m$ experimentais para as configurações $L_0=15\text{mm}$ da condição 1.....  | 69 |
| Figura 82 Valores $P_m$ experimentais para as configurações $L_0=30\text{mm}$ da condição 1. ....   | 70 |
| Figura 83 Valores $P_m$ experimentais para as configurações $L_0=45\text{mm}$ da condição 1.....  | 71 |
| Figura 84 Valores $P_m$ experimentais para as configurações $L_0=60\text{mm}$ da condição 1. ....   | 72 |
| Figura 85 Gráficos das curvas $P$ - $\delta$ para as configurações JSS-15-0-0 (a) e JSS-15-10-1 (b).....  | 73 |
| Figura 86 Gráficos das curvas $P$ - $\delta$ para as configurações JSS-30-0-0 (a) e JSS-30-20-1 (b).....  | 73 |
| Figura 87 Superfície de rotura para a configuração JSS-15-10-1 (condição 2).....  | 74 |
| Figura 88 Aspeto da plastificação ocorrida nos substratos para a configuração JSS-60-40-2 (condição 2)....  | 74 |
| Figura 89 Valores $P_m$ experimentais para cada configuração da condição 2.....   | 76 |
| Figura 90 Detalhes da malha para o modelo da condição 1 com $L_0=15\text{mm}$ , $L_{01}=15\%*L_0$ e $t_{s1}=1\text{mm}$ . ....                              | 78 |
| Figura 91 Detalhes da malha para o modelo da condição 2 com $L_0=15\text{mm}$ , $L_{01}=2/3*L_0$ e $t_{s1}=1\text{mm}$ .....                                | 79 |
| Figura 92 Pormenor do refinamento da malha na zona do entalhe e extremidade do comprimento de sobreposição. ....  | 80 |
| Figura 93 Pormenor do refinamento da malha na zona do rasgo e extremidade da sobreposição.....  | 81 |
| Figura 94 Lei de tração-separação triangular disponível no ABAQUS®.....   | 82 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 95 Deformação plástica dos aderentes para a junta JSS-60-45-2, detetada nas arestas vivas nos degraus dos rebaixos.....             | 85 |
| Figura 96 Gráficos das curvas $P-\delta$ para as configurações JSS-15-0-0 (a) e JSS-15-15-1 (b). .....                                     | 85 |
| Figura 97 Gráficos das curvas $P-\delta$ para as configurações JSS-30-0-0 (a) e JSS-30-45-1 (b). .....                                     | 86 |
| Figura 98 Comparação dos valores experimentais e numéricos de $P_m$ para juntas de sobreposição simples com configuração $L_0-0-0$ . ..... | 87 |
| Figura 99 Comparação experimental/MEF dos valores de $P_m/P_{m0}$ para as configurações $L_0=15\text{mm}$ . .....                          | 88 |
| Figura 100 Distribuição das tensões de arrancamento na zona de sobreposição para as juntas JSS-15-0-0 (a) e JSS-15-45-1 (b). .....         | 89 |
| Figura 101 Distribuição das tensões de arrancamento na zona de sobreposição para as juntas JSS-15-15-2 (a) e JSS-15-45-2 (b). .....        | 89 |
| Figura 102 Comparação experimental/MEF dos valores de $P_m/P_{m0}$ para as configurações com $L_0=30\text{mm}$ . ...                       | 90 |
| Figura 103 Comparação experimental/MEF dos valores de $P_m/P_{m0}$ para as configurações com $L_0=45\text{mm}$ . ...                       | 91 |
| Figura 104 Comparação experimental/MEF dos valores de $P_m/P_{m0}$ para as configurações com $L_0=60\text{mm}$ . ...                       | 92 |
| Figura 105 Deformação plástica dos aderentes para a junta JSS-60-40-2, detetada nas arestas vivas nos degraus dos rebaixos. ....           | 93 |
| Figura 106 Gráficos das curvas $P-\delta$ para as configurações JSS-15-10-1 (a) e JSS-15-10-2 (b). .....                                   | 93 |
| Figura 107 Gráficos das curvas $P-\delta$ para as configurações JSS-30-20-1 (a) e JSS-30-20-2 (b). .....                                   | 94 |
| Figura 108 Comparação experimental/MEF dos valores de $P_m/P_{m0}$ para as configurações da condição 2.....                                | 95 |
| Figura 109 Distribuição das tensões de arrancamento na zona de sobreposição para as juntas JSS-15-0-0 (a) e JSS-15-10-2 (b). .....         | 96 |



***Índice de Tabelas***

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 Classificação dos adesivos segundo o seu desempenho [8].....   | 16  |
| Tabela 2 Adesivos estruturais e suas formas físicas no estado não curado [11].....  | 17  |
| Tabela 3 Propriedades dos adesivos estruturais [13].....  | 18  |
| Tabela 4 Redução em percentagem da tensão máxima entre as várias geometrias de filetes nas extremidades da sobreposição [48]..... | 42  |
| Tabela 5 Propriedades típicas das ligas Série 6xxx [81].....  | 57  |
| Tabela 6 Composição química das ligas Série 6xxx [81].....  | 108 |
| Tabela 7 Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [9].....   | 58  |
| Tabela 8 Configurações estudadas para a condição 1 e condição 2.....  | 60  |
| Tabela 9 Propriedades do adesivo Araldite® AV138 para a modelação MDC.....  | 83  |
| Tabela 10 Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2mm.....        | 84  |



# *Nomenclatura*

## **Caracteres Romanos**

$E$  – Modulo Young

$K$  – Matriz Constitutiva

$G$  – Módulo de Corte

$t_s$  – Espessura do Aderente

$t_a$  – Espessura do Adesivo

$P$  – Força

$L_0$  – Comprimento de Sobreposição

$W$  – Largura dos Substratos

$L_T$  – Comprimento entre Tabs

$L_{01}$  – Comprimento dos Rasgos

$t_{s1}$  – Profundidade dos Rasgos

## **Caracteres Gregos**

$\tau_{xy}$  – Tensão de Corte

$\sigma_{yy}$  – Tensão de Arrancamento

$\sigma_{xx}$  – Tensão Normal

$\theta$  – Ângulo

- $\sigma$  – Tensão
- $\varepsilon$  – Deformação
- $\delta$  – Deslocamento
- $G_n^c$  – Tenacidade à Tração
- $G_s^c$  – Tenacidade ao Corte
- $t_n^0$  – Resistência máxima em Tração
- $t_s^0$  – Resistência máxima em Corte
- $G_n$  – Taxa de Libertação de Energia de Deformação em Tração
- $G_s$  – Taxa de Libertação de Energia de Deformação em Corte
- $\sigma_y$  – Tensão de Cedência
- $\sigma_f$  – Tensão Máxima de tração

## **Abreviaturas**

- ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto
- PVC – Policloreto de Vinilo
- AlMg – Liga Alumínio Magnésio
- CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*
- EF – Elementos Finitos
- MEF – Método de Elementos Finitos
- TFFV – Técnica do Fecho de Fenda Virtual
- MEFX – Método de Elementos Finitos Extendido

MFLE – Mecânica da Fratura Linear Elástica

MDC – Modelo do Dano Coesivo

AMDC – Modelo do Dano Coesivo Alternativo

XFEM – Método de Elementos Finitos Extendidos

JSS – Junta de Sobreposição Simples



# 1. Introdução

A dissertação apresentada foi realizada durante o ano letivo de 2011/2012 no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica-Ramo de Construções Mecânicas, ministrado no Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP. O trabalho apresentado tem como objetivo estudar dois tipos de alterações geométricas aplicadas nos substratos, de modo a aumentar a resistência das juntas coladas e permitir o uso deste tipo de ligações em aplicações mais rigorosas e severas em termos de cargas suportadas. As alterações geométricas estudadas ao longo deste trabalho são a junta de sobreposição simples com rasgo nas extremidades do comprimento de sobreposição (condição 1) e as juntas de sobreposição simples com rasgo a meio do comprimento de sobreposição (condição 2). Para cada condição, são estudadas várias configurações com comprimentos de sobreposição ( $L_0$ ) de 15, 30, 45 e 60mm, variando-se o comprimento do rasgo ( $L_{01}$ ) e profundidade do rasgo ( $t_{s1}$ ).

O trabalho é composto por componente experimental e numérica, sendo esta última realizada no software ABAQUS<sup>®</sup>, permitindo a análise das distribuições de tensões e previsão da resistência das juntas, através da aplicação de várias alterações geométricas nos substratos. A validação dos resultados obtidos é efetuada pela comparação com os resultados experimentais. O tema proposto assume particular importância nos dias de hoje devido à necessidade de aumento da resistência /diminuição do peso dos métodos de ligação entre componentes, e existência de métodos otimizados de transferência de esforços que permitam maximizar a eficiência das juntas adesivas, já que estas têm vindo

progressivamente a substituir as ligações tradicionais como as aparafusadas ou rebitadas nas aplicações estruturais.

A descrição do estado da arte na área das ligações adesivas é objeto de uma revisão bibliográfica detalhada no capítulo 2. Esta descrição encontra-se dividida em vários subcapítulos, nos quais é realizada uma breve descrição das juntas adesivas, dos vários tipos de adesivos, do material base utilizado neste trabalho, das técnicas de aumento da resistência e das técnicas de previsão de resistência em juntas adesivas.

Ao longo do capítulo 3, é realizada uma breve descrição dos materiais utilizados neste trabalho, das várias configurações para cada geometria estudada, do processo de maquinagem e fabrico dos provetes, bem como das condições utilizadas para a realização dos ensaios de tração. No final são apresentados e discutidos os resultados das juntas para cada condição testada.

No capítulo 4, é realizada uma breve descrição das condições da análise numérica utilizadas neste trabalho, do modelo do dano coesivo e respetiva metodologia para estimativa das propriedades coesivas. É realizada uma análise de tensões com o objetivo de permitir uma análise sustentada dos resultados obtidos em termos de resistência obtida, e finalmente comparados e discutidos os resultados numéricos com os experimentais.

No final, no capítulo 5, são elaboradas as conclusões finais obtidas através do estudo numérico e experimental deste trabalho para as condições testadas e trabalhos futuros.



## 2. Revisão Bibliográfica

Ao longo deste capítulo é realizada uma breve descrição das juntas adesivas, dos vários tipos de adesivos, do material base utilizado, das técnicas existentes atualmente para aumento da resistência e das técnicas de previsão disponíveis para estimar a resistência de juntas adesivas. A descrição das juntas adesivas, incide com particular detalhe nas vantagens e desvantagens deste tipo de ligação, as suas aplicações mais frequentes, quais os esforços a que estão sujeitas, tipos de rotura possíveis, as juntas mais utilizadas, quais as vantagens e desvantagens das várias configurações e a importância da espessura do adesivo e substratos. De seguida, é realizada uma breve introdução aos vários tipos de adesivos, nomeadamente aos adesivos estruturais e não estruturais, mas dando mais importância à caracterização dos adesivos estruturais. Nos adesivos estruturais, é efetuada uma descrição mais pormenorizada dos adesivos epóxicos. De seguida, é feita uma breve descrição do material de base, o Alumínio, quais as suas propriedades mais importantes, relativamente aos outros metais, o porquê de ser o metal não ferroso mais utilizado mundialmente e também são indicadas algumas das vastas aplicações que este tipo de material abrange. Após este subcapítulo, são descritas as modificações dos materiais e das geometrias das juntas atualmente disponíveis para aumento da resistência nas juntas adesivas. Para finalizar, são descritos os vários modelos analíticos e numéricos existentes, dando mais importância ao modelo numérico de dano coesivo nas técnicas de previsão de resistência em juntas adesivas por ser o utilizado neste trabalho.

## 2.1 Juntas adesivas

Ao longo dos anos, desde o século XX até ao presente século XXI, pode-se verificar que existe um aumento progressivo na utilização de ligações com adesivos. Devido aos desenvolvimentos na tecnologia dos adesivos, que resultaram numa maior resistência ao corte e ao arrancamento e também devido ao aumento da ductilidade até à rotura, este tipo de ligações tem vindo a substituir progressivamente os sistemas de fixação mecânica convencionais, como por exemplo os parafusos, a brasagem, a rebiteagem, a soldadura, entre outros, permitindo o uso de ligações mais fortes e leves.

As juntas de sobreposição simples (Figura 1) são muito utilizadas, por serem de fácil e rápido fabrico e apresentarem custos baixos, além disso, também devido à sua relação entre a elevada força e baixo peso da ligação. No entanto, este tipo de ligação apresenta uma geometria não linear, causando uma significativa concentração de tensões nas extremidades da junta colada, podendo causar fendas e levar à rotura da ligação colada.

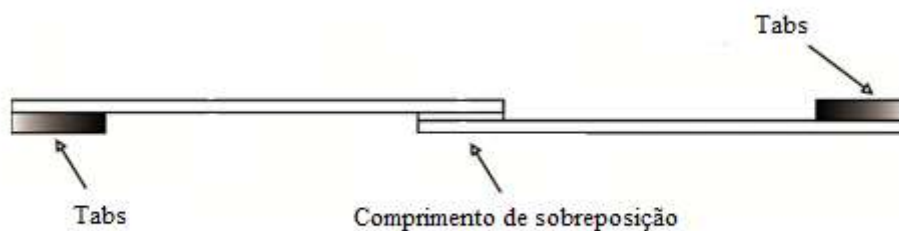


Figura 1 Aspeto junta de sobreposição simples.

Para ultrapassar estas limitações, tem sido realizada uma pesquisa considerável durante estes anos recentes, para desenvolver técnicas mais eficientes das ligações adesivas para permitir suprimir as concentrações de tensões (ver com mais pormenor capítulo 2.4).

As ligações adesivas têm sido muito utilizadas em vários campos da indústria. Este tipo de ligações é muito utilizado na indústria aeroespacial, ver Figura 2, na construção do Boeing 787 e do Airbus A350, em que estes tipos de aviões contêm mais de 50% de ligações adesivas. Este tipo de ligações também são muito utilizados na indústria astronáutica [2], na indústria de construção, ver Figura 3, na construção de máquinas e também na indústria automóvel, ver Figura 4, chegando a ser utilizado por média em

cada veículo cerca de 20 kg de adesivos e durante os próximos anos, estima-se que o aumento do uso de ligações adesivas, seja de 7% [1].



Figura 2 Exemplos de Ligações Adesivas nos painéis interiores em aviões [2].



Figura 3 Exemplo de aplicações adesivas na ligação entre vigas de madeira na indústria de construção [3].



Figura 4 Alguns exemplos de aplicações no interior das portas e tabliers de um veículo [3].

Os adesivos são substâncias de natureza polimérica que são utilizadas para unir dois ou mais materiais sólidos ao longo da respectiva superfície de contato. Como se pode verificar na Figura 5 este tipo de ligação é definido como um processo de união que utiliza uma substância não metálica (adesivo) que ao curar, através de uma reação de polimerização, promove a ligação dos aderentes (substratos) ao longo das suas superfícies de contato (adesão) e adquire resistência interna (coesão).

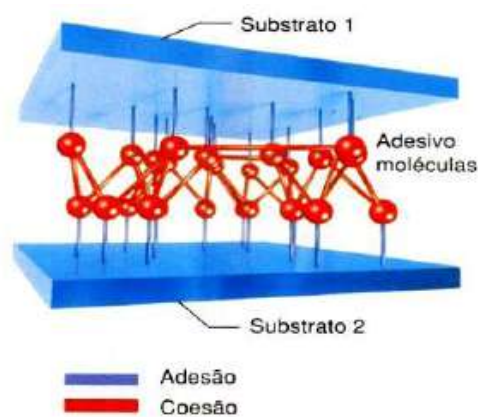


Figura 5 Aspecto de ligação adesiva através da adesão e coesão [4].

Atualmente é cada vez mais utilizada a ligação por adesivos estruturais, substituindo ou usada em conjunto com os sistemas de fixação mecânica convencionais, devido às inúmeras vantagens que este tipo de ligação apresenta. Algumas das vantagens das juntas adesivas são:

- Redução ou eliminação de concentração de tensões (especialmente ao longo da largura);
  - Distribuição mais uniforme das tensões sobre o total da área colada;
  - Redução do peso da estrutura;
  - Melhoria da resistência à fadiga;
  - Elevada capacidade de amortecimento de vibrações;
  - Incremento da rigidez e também do isolamento acústico;
  - Ligação e vedação simultânea;
  - Capacidade de ligar substratos sensíveis ao choque e materiais diferentes sem problemas de corrosão;
    - Capacidade de ligar metais suscetíveis de desenvolver corrosão galvânica;
    - Fácil de automatizar;
    - Capacidade para unir formas complexas;
    - Capacidade para unir superfícies irregulares;
    - Obtenção de contornos suaves (aspeto estético ou aerodinâmico).

Como já foi referido anteriormente, as ligações adesivas apresentam uma distribuição de tensões mais uniforme ao longo da área colada, comparativamente com os sistemas de fixação mecânica convencionais (parafusos, rebites, etc.). Na Figura 6 (esquerda), correspondente a uma ligação rebitada/aparafusada, podem-se observar picos de tensão perto da zona das furações, enquanto na Figura 6 (direita), que corresponde a uma ligação adesiva, pode-se visualizar uma distribuição de tensão uniforme ao longo da largura da área colada. Refere-se que, no entanto, ao longo da sobreposição, as tensões apresentam em geral variações não desprezáveis.

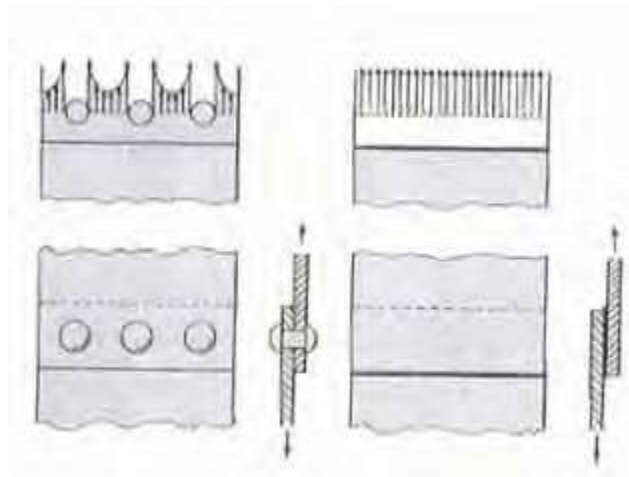


Figura 6 Distribuição de tensões em juntas carregadas [5].

Apesar das ligações adesivas apresentarem um grande número de vantagens, é necessário ter em atenção algumas limitações que este tipo de ligação apresenta, nomeadamente:

- Necessidade de um tratamento das superfícies a ligar;
- Morosidade do processo de endurecimento;
- Resistência e durabilidade fortemente dependentes das condições de processamento;
- Durabilidade limitada em condições extremas de serviço;
- Difícil inspeção para verificação da qualidade da ligação;
- Desmontagem impossível ou difícil;
- Flamabilidade e toxicidade de alguns adesivos;
- Fraca resistência à propagação de fissuras de alguns adesivos e fraca resistência ao arrancamento.

### 2.1.1 Esforços e Tipos de Rotura nas Ligações Adesivas

Numa ligação adesiva, o principal objetivo é que a junta colada seja o mais resistente possível, ou seja, para uma determinada aplicação a junta deve suportar as cargas a que vai estar sujeita. Para isso, é importante entender e determinar os vários tipos de esforços a que uma ligação adesiva pode estar sujeita, como por exemplo [6]:

- **Esforços de Tração** – As tensões de tração desenvolvem-se quando as forças atuam perpendicularmente ao plano de colagem.

- **Esforço de Compressão** – São forças que tendem a comprimir um aderente contra o outro;
- **Esforço de Corte** – Na tensão de corte tende a haver deslizamento entre duas superfícies ao longo uma da outra;
- **Esforços de Clivagem** – São provocados por forças perpendicularmente ao plano da junta e na extremidade de substratos rígidos e;
- **Esforços de Arrancamento** – É um caso bastante idêntico em relação aos esforços de clivagem. No entanto, no caso do arrancamento um ou os dois aderentes são bastante flexíveis e podem deformar plasticamente por ação das forças aplicadas.

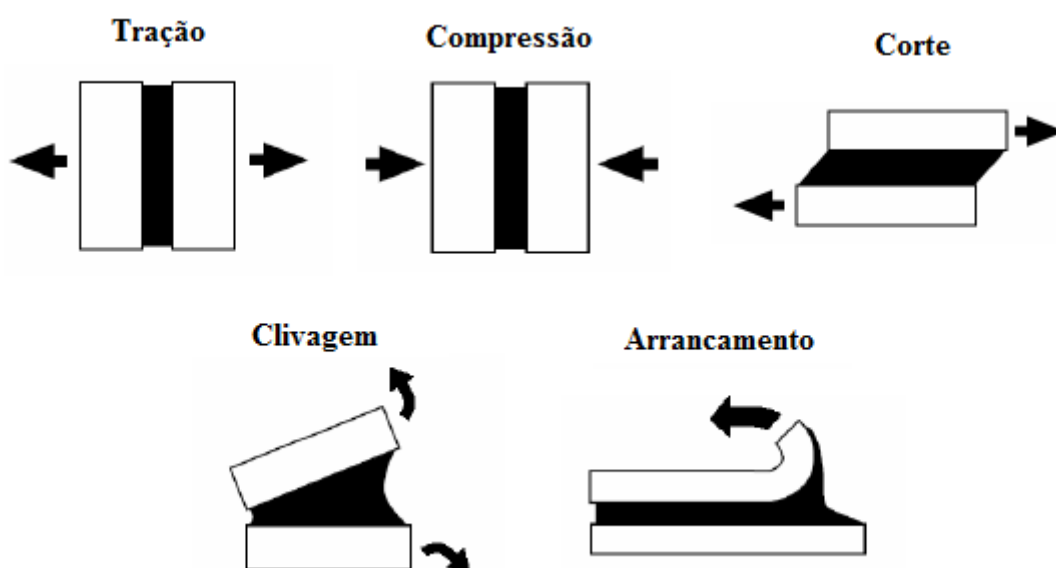


Figura 7 Esquema representativo dos vários esforços de uma ligação adesiva [6].

Os esforços de clivagem e arrancamento devem, sempre que possível, ser evitados em juntas coladas, devendo-se utilizar configurações que suportem maioritariamente esforços de corte. Este princípio não é respeitado em juntas de sobreposição simples, que exibem tensões de arrancamento acentuadas nas extremidades da ligação, devido à flexão significativa que sofrem sob tração. Desta forma, conclui-se que a rigidez dos aderentes afeta consideravelmente o nível de tensões de arrancamento. Os esforços de clivagem podem também acontecer em juntas de topo a topo sob carregamento axial, se as forças não forem rigorosamente axiais. De uma forma geral, as juntas sujeitas a este tipo de tensões são menos resistentes do que as solicitadas principalmente ao corte, porque as tensões de clivagem e arrancamento se concentram normalmente em zonas mais localizadas da ligação adesiva (numa ou nas duas extremidades da ligação). Assim,

facilmente se compreende que as juntas de sobreposição dupla são mais favoráveis do que as de sobreposição simples, já que, devido à simetria dos esforços e diminuição drástica da flexão, o adesivo é fundamentalmente sujeito a esforços de corte [7].

Tal como já foi referido anteriormente, pretende-se que a junta colada seja o mais resistente possível e por isso, relativamente à rotura, espera-se que esta ocorra sempre pelo substrato e nunca na interface ou no meio do adesivo. O modo de rotura é um fator importante na análise de uma junta, visto que evidencia a zona menos resistente da mesma e permite ao projetista avaliar eventuais erros de projeto e implementar alterações dos procedimentos de fabrico. Os quatro principais modos de rotura para uma junta adesiva são os seguintes (Figura 8):

- *Rotura Coesiva no Adesivo*: rotura interna na região do adesivo, indicando que a resistência do adesivo é menor do que a resistência dos substratos e da ligação entre adesivo e substratos;
- *Rotura Coesiva no Substrato*: rotura ocorre pelo substrato. No caso de materiais compósitos, indica que a resistência interlaminar do material compósito é inferior à do adesivo e da ligação;
- *Rotura Adesiva*: rotura na interface entre substrato e adesivo. É geralmente associada a uma má preparação das superfícies dos substratos e;
- *Rotura Mista (coesiva/adesiva)*: consiste numa combinação de rotura adesiva e rotura coesiva. Por vezes este modo de rotura deve-se à limpeza ineficaz numa dada região das superfícies a ligar, ou mesmo do próprio adesivo.

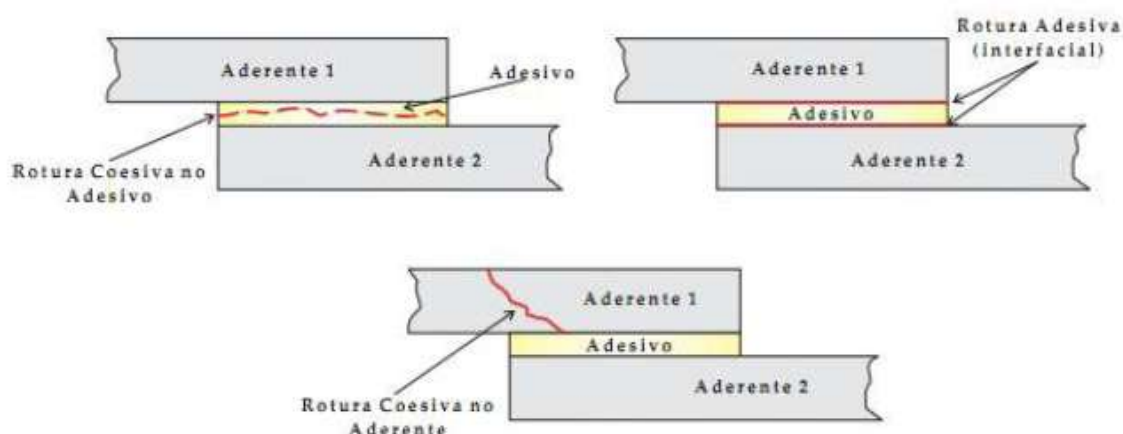


Figura 8 Representação dos modos de rotura em juntas de sobreposição [5].



### 2.1.2 Tipos de juntas mais comuns

Como se pode observar na Figura 9, os tipos de juntas mais utilizados são as juntas de sobreposição simples, sobreposição dupla, juntas com chanfros exteriores e interiores, junta de ressalto, cobre-junta e cobre-junta dupla, juntas topo a topo e juntas de degrau [5].

A **junta de sobreposição simples** é a mais frequentemente usada em aplicações industriais, porque é a mais simples de fabricar. Todavia, a aplicação descentrada da carga provoca efeitos de flexão, que originam o aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo (arrancamento), reduzindo a resistência da junta. Também existem concentrações de tensões de corte nas extremidades da sobreposição devido à deformação gradual dos aderentes ao longo da sobreposição. Para eliminar a flexão dos substratos, pode-se recorrer a **juntas de sobreposição dupla**, em que as tensões de arrancamento são consideravelmente inferiores. Este facto, aliado à diminuição dos gradientes de deformação dos aderentes na zona da sobreposição, leva a que as juntas de sobreposição dupla excedam o dobro da resistência das juntas de sobreposição simples (relação de áreas dos dois tipos de juntas). No entanto, a fabricação deste tipo de junta é mais morosa.

As **juntas topo a topo planas** são as mais simples de fabricar. No entanto, não apresentam uma eficácia elevada, devido à solicitação de arrancamento e área colada reduzida. Além disso, este tipo de juntas não suporta esforços de flexão porque o adesivo, neste caso, estaria sujeito a clivagem.

A utilização de **juntas com chanfro interior ou em degraus** permite a diminuição dos gradientes de tensões ao longo do adesivo, o que leva à elevada resistência destas juntas. A significativa diminuição da excentricidade dos esforços também contribui para este facto. No entanto, devido à dificuldade de maquinar os degraus ou as rampas neste tipo de juntas, o processo de fabrico tem custos superiores às restantes juntas. No caso das juntas em degrau, com substratos em compósito, é comum e mais económico executar os degraus durante o empilhamento antes da cura, evitando assim a danificação das fibras.

Nas **juntas com chanfro exterior** a resistência depende do ângulo do chanfro na zona da sobreposição, ou seja, quanto maior for a extensão do chanfro, maior será a resistência das juntas (embora limitada pela resistência dos aderentes, fragilizados devido à existência dos chanfros). Este comportamento deve-se à diminuição das tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição e dos gradientes de tensões de corte. No entanto, tal como as juntas anteriores (com chanfro interiores ou em degraus), também o processo de fabrico das juntas com chanfro exterior tem custos superiores às restantes juntas, devido à dificuldade de maquinar as rampas neste tipo de juntas.

A solução mais simples e eficaz para garantir um alinhamento das forças numa junta de sobreposição simples é a utilização da **junta de ressalto**, apesar deste tipo de junta apresentar dificuldades de fabricação acrescidas, especialmente para substratos frágeis ou de elevada resistência.

As cobre-juntas e cobre-juntas duplas são comumente associadas à ligação expedita de aderentes que devem permanecer colineares ou à reparação de estruturas danificadas. Neste último caso, o processo de reparação é levado a cabo pela criação de caminhos alternativos de transferência de esforços, através de um ou dois remendos colados na zona da descontinuidade. Em termos de características, pode ser feita a analogia às juntas de sobreposição simples e dupla, sendo de realçar que no caso de reparação de uma cobre-junta dupla pode não ser possível aceder a ambos os lados da estrutura para aplicação do remendo [7].

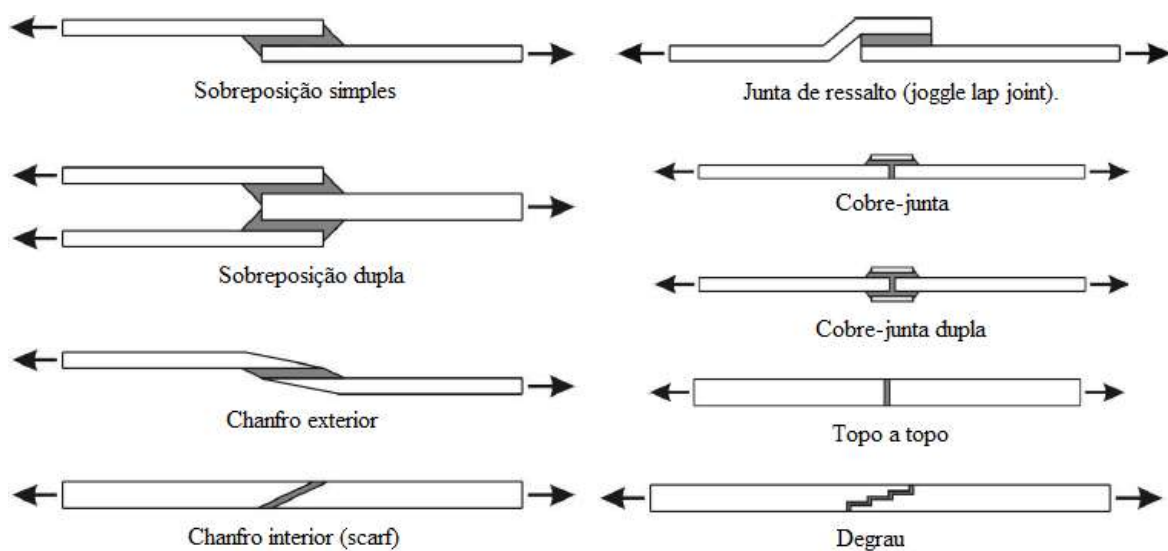


Figura 9 Tipos de juntas mais comuns [5].

Em resumo, há vários fatores que o Engenheiro deve considerar quando projeta uma junta adesiva, como por exemplo:

- Minimizar as concentrações de tensões no adesivo;
- Sempre que possível, projetar a junta de modo a que a transferência de carga se processe principalmente por corte;
- Minimizar as forças de arrancamento e clivagem;
- Distribuição das tensões o mais uniforme possível sobre toda a área de ligação;

- Ter em conta que a resistência da ligação é diretamente proporcional à largura da ligação. O aumento da largura aumenta sempre a resistência da ligação. Aumentar o comprimento da zona colada nem sempre aumenta a resistência da ligação;
  - Geralmente, adesivos rígidos são melhores ao corte, e adesivos flexíveis são melhores ao arrancamento;
  - Apesar de, tipicamente um adesivo com propriedades mecânicas mais elevadas produzir uma junta mais resistente, um adesivo com uma resistência coesiva menor, mas com elevada capacidade de deformação pode levar a uma junta mais resistente em certos casos (em aplicações onde os gradientes de tensões são elevados);
  - A rigidez dos aderentes e adesivos influenciam a resistência de uma junta. De uma forma geral, quanto mais rígido o aderente relativamente ao adesivo, mais uniforme é a distribuição dos esforços na junta e maior é a resistência da ligação;
  - Quanto maior é o produto entre o módulo de Young e a espessura do aderente, menor é a deformação durante o carregamento e mais resistente é a junta e;
- Uma espessura uniforme da junta e uma camada de adesivo isenta de vazios são uma das características mais importantes [7].

### 2.1.3 Espessura do Adesivo

A espessura da camada de adesivo é um fator importante quando se trata de adesivos estruturais. Deve-se garantir uma espessura ótima para o adesivo, para se obter o melhor desempenho da junta. As espessuras mais usadas e recomendadas pelos fabricantes estão compreendidas entre 0,1 e 0,2mm. Para espessuras inferiores a 0,1mm, existe uma queda abrupta da resistência da junta, possivelmente devido ao facto de existir o risco de falhas de colagem. A diminuição da resistência da junta com o aumento da espessura pode ser explicada por diferentes efeitos [8]:

- Para elevadas espessuras de adesivo aumenta o risco de defeitos na junta, tais como bolhas de ar ou micro fendas;
- Nas extremidades da junta o momento fletor aumenta (dependendo da espessura do adesivo e do substrato), o que se traduz numa diminuição da resistência da junta devido ao aumento das tensões de arrancamento;
- A plastificação de camadas de adesivo dúcteis ocorre mais facilmente em juntas de elevado valor de  $t_A$  (Figura 10) e propaga-se mais rapidamente até à rotura, logo originando uma menor resistência da junta e;

- As propriedades coesivas de uma camada de adesivo (resistência e tenacidade) geralmente atingem o seu valor máximo para valores de  $t_A$  à volta de 0,1 ou 0,2mm e diminuem gradualmente com o aumento de  $t_A$  [8].

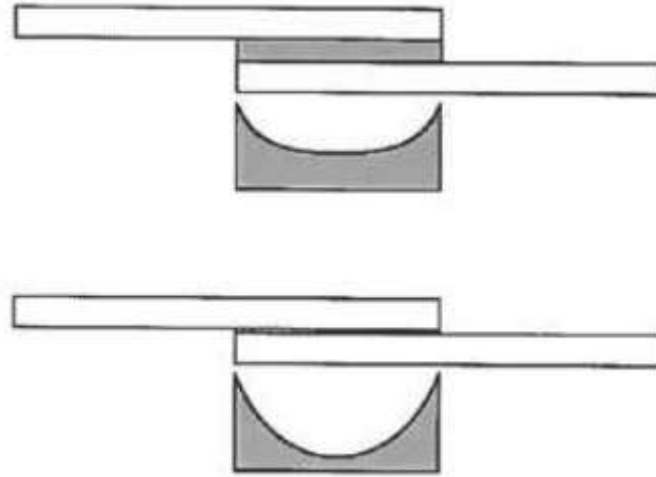


Figura 10 Distribuição das tensões de corte para diferentes espessuras de adesivo [5].

#### 2.1.4 Espessura do Substrato

A variação da espessura dos substratos é um aspeto a ter em atenção, uma vez que a sua má seleção pode diminuir a resistência da junta. Para as juntas de sobreposição simples, devido à sua geometria, verifica-se a existência de um momento fletor devido ao desalinhamento da carga transmitida pelos substratos decorrente da ausência de simetria horizontal da junta, e cujo valor depende de  $t_A$  e de  $t_s$  (ver Figura 11).

Quando  $t_s$  aumenta, o momento fletor também aumenta, fazendo com que haja um aumento de tensões normais na direção da espessura do adesivo (tensões de arrancamento), reduzindo assim a resistência da junta.



Figura 11 Representação geométrica do fator momento fletor numa junta sobreposição simples [8].

## 2.2 Classificações possíveis dos adesivos

Existem muitos tipos de adesivos e diversos critérios para os agrupar. Os adesivos podem ser classificados segundo a sua natureza, tipo de estrutura molecular, composição química, modo de apresentação e de aplicação, modo de endurecimento, tipo de aderente em que podem ser utilizados, custos, desempenho ou função, etc.

Uma classificação possível dos adesivos será efetuar a sua separação em grupos que apresentem propriedades semelhantes e que estão intrinsecamente ligadas às características da estrutura molecular do material. Assim, segundo este critério, pode-se classificar os adesivos de acordo com as três famílias características dos materiais poliméricos: as resinas termoplásticas, resinas termoendurecíveis e elastómeros.

Outra classificação possível para adesivos é segundo a origem. Segundo este critério, os adesivos podem ser classificados em naturais, sintéticos e semi-sintéticos.

Na classificação segundo o processo de endurecimento, pode-se considerar os adesivos que endurecem por reação química, evaporação de um solvente e arrefecimento desde o estado líquido (após fusão). Alternativamente, os adesivos podem ser agrupados em função do tempo necessário para completar o processo de cura: adesivos cujo processo de cura se efetua em pouco tempo (alguns segundos a poucos minutos) e adesivos cujo processo de cura leva algum tempo a se efetuar (alguns minutos a várias horas).

Na classificação em função da durabilidade e da resistência dos adesivos, estes podem ser classificados em adesivos resistentes a ácidos, resistentes a altas temperaturas, resistentes a baixas temperaturas, resistentes à humidade, etc.

Os adesivos também podem ser classificados em função do material a colar, como por exemplo: adesivos para madeira, adesivos para metais, adesivos para plásticos, etc.

Na classificação segundo o seu modo de apresentação, os adesivos podem ser classificados da seguinte forma: líquidos de um ou vários componentes com ou sem solventes, emulsões, pastosos (gel), mono ou policomponentes com ou sem solventes, adesivos em barra, filme ou pó.

Os adesivos também podem ser classificados segundo o seu desempenho. Esta classificação é uma das mais importantes para o utilizador, pois baseia-se no desempenho apresentado pelos adesivos. Esta classificação permite a criação de dois grandes grupos: os

adesivos estruturais e os adesivos não estruturais (Tabela 1; [7]). Nesta revisão bibliográfica, é efetuada uma análise com maior detalhe aos adesivos estruturais, pois estes são os mais representativos na atualidade.

Tabela 1 Classificação dos adesivos segundo o seu desempenho [7].

| <b>ADESIVOS</b>    |                          |                             |                          |
|--------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| <b>Estruturais</b> |                          | <b>Não estruturais</b>      |                          |
| <b>Fenólicos</b>   | fenólicos-vinílicos      | <b>Borrachas sintéticas</b> | silicone                 |
|                    | fenólicos-nitrilo        |                             | policloropreno e nitrilo |
|                    | fenólicos-policloropreno |                             | polisulfureto            |
| <b>Acrílicos</b>   | anaeróbicos              | <b>Poliésteres</b>          |                          |
|                    | cianocrilatos            |                             |                          |
| <b>Poliuretano</b> |                          | <b>Termofusíveis</b>        |                          |
| <b>Poliimida</b>   |                          | <b>Inorgânicos</b>          |                          |
| <b>Epóxido</b>     | epóxido-poliamida        |                             |                          |
|                    | epóxido-polisulfureto    |                             |                          |
|                    | epóxido-fenólicos        |                             |                          |
|                    | epóxido-poliuretano      |                             |                          |
|                    | epóxido-nitrilo          |                             |                          |

### 2.2.1 Caracterização dos adesivos estruturais

Os adesivos estruturais apresentam elevada resistência mecânica, e são tipicamente utilizados em aplicações com grau de exigência e responsabilidade significativas. Segundo Pocius [10], um adesivo estrutural pode ser definido como sendo um material utilizado para unir outros materiais de elevada resistência, como por exemplo madeira, compósitos, ou metal, permitindo que a resistência da ligação adesiva ao corte exceda os 6,9MPa à temperatura ambiente. Também se considera o adesivo estrutural como um material que não sofre fluência sob ação de cargas significativas. Em muitas aplicações, são necessários adesivos estruturais para garantir uma boa ligação adesiva em ambientes adversos e que resista durante anos ou mesmo décadas.

Segundo Gauthier [11], um adesivo estrutural é definido como um material capaz de transferir as forças aplicadas à junta em condições de serviço ou, alternativamente, como um material com elevada fiabilidade em aplicações nas quais a ligação deve ser

mantida, sem ocorrência de rotura, mesmo quando sujeita a solicitações significativas por um longo período de tempo.

Os adesivos estruturais estão disponíveis como produtos industriais, para aplicação industrial, ou como produtos de consumo, para aplicações domésticas. Na Tabela 2, pode-se visualizar a forma de apresentação no estado não curado e a temperatura de cura de alguns destes tipos de adesivos. A Tabela 3 apresenta as propriedades de alguns adesivos estruturais.

Tabela 2 Adesivos estruturais e suas formas físicas no estado não curado [11].

| <b>Tipo</b>      | <b>Forma</b>                     | <b>Temperatura de cura aproximada [°C]</b> |
|------------------|----------------------------------|--|
| Fenólico         | Filmes e pastas de cura a quente | 171  |
| Epóxido          | Filmes e pastas de cura a quente | 82, 121, 171                               |
| Epóxido          | Um componente ativado por luz    | 25   |
| Epóxido          | Pastas de dois componentes       | 25   |
| Acrílico         | Líquido de um componente         | 25   |
| Acrílico         | Um componente ativado por luz    | 25   |
| Acrílico         | Ativado por um primário          | 25   |
| Acrílico         | Pastas de dois componentes       | 25   |
| Uretano          | Pastas de dois componentes       | 25   |
| Poliimida        | Filmes de cura a quente          | 220  |
| Cianato de éster | Filmes e pastas de cura a quente | 171  |
| Bismaleimida     | Filmes e pastas de cura a quente | 200  |

Tabela 3 Propriedades dos adesivos estruturais [12].

| Tipo                    | Apresentação                | Temp. máxima de utilização em contínuo [°C] | Resistência |          |              |          |           |
|-------------------------|-----------------------------|---|-------------|----------|--------------|----------|-----------|
|                         |                             |   | Corte [Mpa] | Fluência | Arrancamento | Choques  | Solventes |
| Fenólico-vinílico       | Líquido monocomponente      | 100 a 130                                   | 17 a 35     | boa      | média        | boa      | mediocre  |
|                         | Líquido + pó                |   |             |          |              |          |           |
|                         | Filme                       |   |             |          |              |          |           |
| Fenólico-Nitrilo        | Líquido monocomponente      | 140 a 170                                   | 15 a 30     | boa      | média        | boa      | boa       |
|                         | Filme                       |   |             |          |              |          |           |
| Anaeróbicos (acrílicos) | Líquido monocomponente      | 120 a 150                                   | 10 a 40     | média    | boa          | boa      | média     |
| Cianocrilato            | Líquido monocomponente      | 80  | 10 a 35     | má       | mediocre     | má       | má        |
| Poliuretano             | Líquido de dois componentes | 90  | 8 a 15      | boa      | média        | boa      | boa       |
| Poliimida               | Filme                       | 250 a 300                                   | 10 a 15     | má       | boa          | mediocre | boa       |
| Epóxido                 | Diversa                     | 80 a 150                                    | 15 a 45     | mediocre | boa          | má       | boa       |
| Epóxido-Poliamida       | Líquido de dois componentes | 80  | 15 a 25     | boa      | mediocre     | boa      | mediocre  |
| Epóxido-Polisulfido     | Líquido de dois componentes | 80  | 15 a 25     | boa      | mediocre     | boa      | boa       |
| Epóxido-Fenólico        | Líquido monocomponente      | 200 a 250                                   | 20          | mediocre | boa          | má       | boa       |
| Epóxido-nitrilo         | Filme                       | 100 a 120                                   | 10 a 46     | média    | boa          | boa      | boa       |

### 2.2.2 Tipos de Adesivos Estruturais

Como se pode verificar na Tabela 1, no grupo dos adesivos estruturais, existem diferentes tipos de adesivos, tais como os adesivos fenólicos, os adesivos acrílicos, os poliuretanos, poliimidias e os adesivos epóxicos.

- **Adesivos Fenólicos**

Os adesivos fenólicos foram os primeiros adesivos estruturais utilizados para metais e têm uma longa história na ligação entre metais e madeira (ver Figura 12). Durante o processo de cura, que deve realizar-se a altas temperaturas, ocorre libertação de água. Por este motivo, os substratos devem ser porosos ou deve-se impor uma elevada pressão para evitar o aparecimento de vazios na zona de colagem. Os adesivos fenólicos em geral apresentam um baixo custo e possuem boa resistência mecânica e boa resistência a temperaturas elevadas e aos agentes ambientais. Como principais limitações, apontam-se a baixa resistência à corrosão por solventes, baixa resistência ao impacto e fragilidade. Para a resolução destes problemas têm sido desenvolvidos adesivos que combinam a resina



fenólica com uma resina vinílica ou um elastômero (nitrilo ou policloropreno). Nestes adesivos fenólicos modificados o processo de cura efetua-se a quente e sob pressão.

Os adesivos **Fenólicos-Vinílicos** têm uma temperatura máxima de utilização de 130°C e apresentam elevada resistência ao corte e ao arrancamento, sendo a sua resistência à fadiga elevada devido às propriedades plastificantes da fase vinílica. Geralmente são comercializadas como emulsões e filmes ou sob a forma de dois componentes (líquido + pó).

Os adesivos **Fenólicos com nitrilo** têm características mecânicas ligeiramente inferiores aos adesivos fenólicos-vinílicos, mas apresentam uma melhor estabilidade térmica (podem ser utilizados em contínuo até temperaturas de 160°C). São geralmente apresentados sob a forma de filme ou de líquido monocomponente.

Os adesivos **Fenólicos com cloropreno** têm uma apresentação comercial idêntica à dos adesivos com nitrilo. Podem ser utilizados a baixa temperatura (até aos -50°C) e são mais sensíveis aos agentes químicos que os dois adesivos anteriormente apresentados [7].



Figura 12 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais fenólicos nas ligações entre metais e madeiras [3].

- **Adesivos Acrílicos**

Nos adesivos acrílicos incluem-se os adesivos anaeróbicos, os cianoacrilatos e os acrílicos modificados.

Os adesivos **acrílicos anaeróbicos** têm uma grande aplicação na indústria mecânica na fixação de peças estriadas e roscadas, fixação de rolamentos e, de uma forma geral, na ligação de peças de geometria cilíndrica, ver exemplo na Figura 13. São geralmente líquidos monocomponentes que podem ser curados à temperatura ambiente e são de fácil utilização. Também podem ser comercializados na forma de pastas ou líquidos tixotrópicos. O processo de endurecimento dá-se por uma reação de polimerização do tipo radical-livre, uma vez eliminado o oxigênio. O adesivo fora da junta normalmente não cura, uma vez que se encontra em contato com o oxigênio, facilitando a sua remoção assim que seja possível manusear o conjunto. Apresentam uma resistência bastante variável podendo ser da ordem da dos epóxidos, uma boa resistência a solventes e, em geral, a sua temperatura máxima de utilização situa-se próximo dos 150°C. Aplicam-se na colagem de diversos materiais como por exemplo o acetal, as poliolefinas, o nylon e o policloreto de vinilo (PVC).



Figura 13 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais acrílicos anaeróbicos em todo o tipo de peças cilíndricas [13].

Os adesivos **acrílicos cianoacrilatos** são considerados adesivos instantâneos, pois permitem colagens muito rápidas e apresentam-se sob a forma de líquidos monocomponentes ou na versão tixotrópica sem solventes. Estes adesivos são conhecidos como colas instantâneas, super colas ou, ainda, por cola tudo. O processo de cura destes adesivos é influenciado pela humidade, pelo teor em pH do meio e pela espessura da junta colada. A humidade e a presença de grupos aniónicos são os principais responsáveis pelo rápido processo de cura destes adesivos. Apresentam excelente resistência à tração mas

baixa resistência ao arrancamento, fragilidade e custo elevados. São adequados para colar pequenas partes de plásticos e borrachas, ver um exemplo de aplicação na Figura 14.



Figura 14 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais acrílicos cianoacrilatos nas ligações de fixação de uma maquete [14].

Os adesivos **acrílicos modificados e metacrilatos** apresentam elevada resistência à humidade, boa resistência ao arrancamento e ao impacto. Possuem baixa contração durante o processo de cura e permitem ligações fortes, tolerando uma preparação mínima das superfícies, e podem ser aplicados para unir uma grande variedade de materiais, ver exemplo de uma aplicação na Figura 15. Como desvantagens, citam-se a baixa resistência mecânica a altas temperaturas e elevada flamabilidade [7].



Figura 15 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais acrílicos metacrilatos numa fissura [15].

- **Adesivos Poliuretanos**

Estes adesivos resultam da reação de um polioliol (ou poliéter-polioliol) com um isocianato, apresentam-se geralmente sob a forma de dois componentes. A cura processa-se lentamente à temperatura ambiente e a distância entre as superfícies a colar pode ir até os 25mm. Apresentam boa flexibilidade, bom comportamento a baixas temperaturas, boa resistência ao arrancamento, à abrasão, a choques e vibrações, boa tenacidade e bom comportamento a condições ambientais adversas. Estes adesivos podem apresentar uma resistência de rotura ao corte da ordem dos 20MPa, possibilitando a utilização em aplicações estruturais, como se pode verificar na Figura 16 [7].



Figura 16 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais de poliuretano na fixação da manta de aramida (Kevlar), utilizado para blindagem automobilística [16].

- **Adesivos de poliimida**

São os adesivos mais estáveis a altas temperaturas (superiores a 200°C). Estão disponíveis sob a forma de líquidos e filmes, mas são relativamente caros e difíceis de manusear. Requerem longos tempos de cura com ciclos de pressão e temperatura elevada, pelo que a sua aplicação é complexa. Contudo, são os que apresentam maior retenção de resistência a longo prazo a temperaturas elevadas [6]. Os adesivos de poliimida podem ser utilizados em aplicações que requerem baixo peso e temperaturas de uso contínuo mais elevadas, como por exemplo placas de chips, semicondutores e conetores para ambientes

agressivos. Pode-se visualizar na Figura 17 a utilização dos adesivos de poliimida nos fios de um eletroímã [17].



Figura 17 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais de poliimida nos fios de um eletroímã [17].

- **Adesivos de epóxido**

Os adesivos de epóxido têm boa resistência química e mecânica, não produzem substâncias voláteis durante a cura, têm baixa contração e, em juntas convenientemente projetadas, formam ligações extremamente fortes e duráveis com a maioria dos materiais.

Estes adesivos permitem uma grande versatilidade na sua formulação uma vez que existem diversas resinas e diferentes endurecedores. Estão disponíveis numa grande variedade de formas que vão desde adesivos líquidos de baixa viscosidade até pastas sólidas ou filmes. São comercializados sob a forma de um só componente ou de vários componentes (normalmente dois). O desenvolvimento de formulações apresentando elevada rigidez aumentou fortemente o uso destes adesivos em muitas indústrias. Estes adesivos apresentam uma enorme diversidade de aplicações, podendo ser empregues na ligação de quase todos os materiais utilizados na construção mecânica.

Nos adesivos epóxidos de um só componente o processo de cura efetua-se normalmente a quente utilizando temperaturas a partir dos 120°C. A resina e o endurecedor estão pré-misturados mas o processo de cura não ocorre porque o catalisador, à temperatura ambiente, está inativo.

Para os adesivos de dois componentes a cura pode ser processada a partir dos 5°C. O processo de cura pode ser acelerado por ação da temperatura. Geralmente, um aumento de temperatura na ordem dos 10°C provoca uma duplicação na velocidade da reação, ou seja, se um adesivo epóxido a 20°C demora 1 hora para curar então para uma temperatura de 40°C curará em 15 minutos. O tempo necessário para terminar o processo de cura à temperatura ambiente pode variar de aproximadamente 10 minutos a vários dias [6].

No caso dos sistemas de dois componentes é importante garantir as quantidades exatas de resina e endurecedor, pelo que é necessário cuidado na relação entre a resina e o endurecedor, sendo também necessário garantir uma adequada mistura entre os componentes. Sem isto, não se formará o polímero corretamente podendo originar propriedades inferiores (propriedades mecânicas e resistência ao ambiente).

O processo de cura destes adesivos não necessita da aplicação de pressão, pelo que basta o simples posicionamento das peças a serem coladas. As propriedades dos adesivos epóxicos podem ser modificadas pela adição de outras resinas (poliamida, polisulfido, fenólico, etc.) ou elastómeros (poliuretano ou nitrilo).

Nos adesivos **Epóxido-poliâmida** a resina de poliamida tem a função de endurecedor e de agente flexibilizante. O adesivo será tanto mais flexível quanto maior for a razão entre a quantidade de resina poliamida e a resina epóxido. Estes adesivos curam lentamente à temperatura ambiente (12 a 16 horas) e apresentam maior flexibilidade e uma resistência ao arrancamento significativamente maior à dos adesivos epóxicos não modificados. Os adesivos comercialmente conhecidos por adesivos de epóxido-nylon são normalmente fornecidos em forma de filmes suportados, ou não, por um tecido de fibras de vidro. Apresentam boas características a baixas temperaturas (da ordem dos  $-70^{\circ}\text{C}$ ) e boa resistência à fadiga e ao impacto. O principal inconveniente pode ser a sua baixa resistência à água e ao álcool. São utilizados, por exemplo, na fabricação de laminados à base de vidro ou carbono. Na Figura 18, pode-se visualizar a aplicação dos adesivos epóxido-poliâmida em laminados.



Figura 18 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais epóxido-poliâmida em laminados [18].

Os adesivos **Epóxico-polisulfido** apresentam boa resistência química, bom comportamento na exposição a intempéries e boa resistência ao impacto, sendo vocacionados para aplicações sujeitas a choques e vibrações. São também especialmente recomendados para ligar materiais com coeficientes de dilatação térmica diferentes. Como se pode visualizar na Figura 19, uma das aplicações do adesivo epóxico-polisulfido é na colagem e vedação nas janelas dos automóveis.



Figura 19 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais epóxico-polisulfido nas juntas das portas em automóveis [19].

Nos adesivos **Epóxico-fenólicos** a resina fenólica melhora a resistência a altas temperaturas, mantendo boa estabilidade e resistência ao corte para temperaturas da ordem dos 200°C. São apresentados comercialmente sob a forma de filmes ou líquidos que são curados sob pressão a temperaturas da ordem dos 170°C. A baixa resistência ao arrancamento e ao impacto e o custo relativamente elevado são as limitações principais destes adesivos. Uma das aplicações deste tipo de adesivo é nas pastilhas dos travões de disco.

Para os adesivos **Epóxico-vinílico**, as resinas vinílicas melhoram a resistência ao impacto e ao arrancamento. Contudo, prejudicam a resistência a altas temperaturas. Uma das aplicações deste tipo de adesivo, como se pode ver na Figura 20, é a colagem do forro do capô.



Figura 20 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais epóxico-vinílico no forro do capô em automóveis [19].

Os adesivos **Epóxico-poliuretano** foram desenvolvidos com o objetivo de se obter um adesivo com uma resistência ao arrancamento idêntica à dos adesivos epóxico-poliamida, e uma boa resistência a choques e vibrações. Apresentam também boa resistência à fadiga. Como se pode verificar na Figura 21, os adesivos epóxico-poliuretano, são utilizados nos veículos de hoje, fazendo a ligação do parabrisas com a carroceria.



Figura 21 Exemplo de aplicação de adesivos estruturais epóxico-poliuretano na ligação entre o parabrisas e a carroceria em automóveis [20].

Os adesivos **Epóxico-nitrilo** são adesivos com boa resistência ao arrancamento e permitem temperaturas de utilização entre  $-55$  e  $120^{\circ}\text{C}$ . São comercializados sob a forma de filmes. Têm grande aplicação na construção e manutenção de aviões comerciais a jacto [7].



## 2.3 Materiais de base

Neste capítulo é descrito o material de base que é utilizado neste trabalho para os substratos. O material de base utilizado é o alumínio, mais especificamente a liga de alumínio AW6082 T651 (esta liga de alumínio é descrita com mais pormenor no capítulo 3).

Neste capítulo, é feita uma breve descrição do material de base, o alumínio, bem como algumas aplicações deste tipo de material.

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre. Este tipo de metal começou a ser produzido comercialmente há cerca de 150 anos. Atualmente a sua produção supera a soma de todos os outros metais não ferrosos. Os maiores produtores mundiais deste tipo de metal não ferroso são os Estados Unidos e o Canadá, e os que têm as maiores reservas de minério do mundo, o Brasil, a Austrália e a Guiné [21].

A variedade de aplicações deste tipo de metal está relacionada com as suas características físico-químicas, com destaque para o seu baixo peso específico, comparando com outros metais de grande consumo, resistência à corrosão e alta condutibilidade elétrica e térmica e reciclabilidade. De facto, após muitos anos de vida útil, segura e eficiente, o alumínio pode ser reaproveitado, com recuperação de parte significativa do investimento e economia de energia, como já acontece no caso de latas de alumínio. Além disso, o meio ambiente é beneficiado pela redução de resíduos e economia de matérias-primas [21].

O alumínio é amplamente utilizado na indústria em diversas formas. Devido às suas propriedades, excelente desempenho específico e preços bastante competitivos, este metal é utilizado em vários setores, como por exemplo: nos utensílios alimentares e bens de consumo, na indústria automóvel, na construção civil, na indústria elétrica, em máquinas e equipamentos, etc.

Nos utensílios alimentares e bens de consumo, o alumínio conseguiu conquistar a confiança dos consumidores e conseguiu acompanhar as exigências da vida moderna. Em ambientes domésticos, o alumínio, além de ser leve, é resistente à corrosão, tem alta durabilidade e é de fácil manutenção [21]. Nas figuras abaixo pode-se visualizar algumas das aplicações do alumínio em utensílios alimentares e bens de consumo.



Figura 22 Panela em alumínio [22].

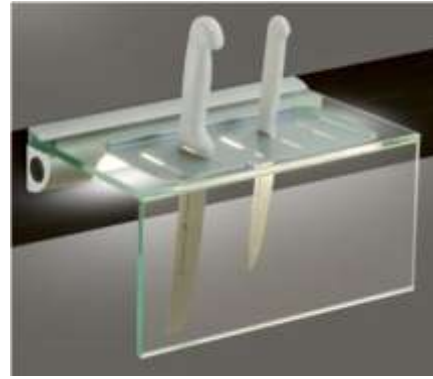


Figura 23 Suporte Porta facas em alumínio [23].



Figura 24 Portão em alumínio [24].



Figura 25 Vaso decorativo em alumínio [25].



Figura 26 Bandeja de alumínio [26].



Figura 27 Cadeira de alumínio [27].

Na indústria automóvel, a aplicação do alumínio tem evoluído bastante, pois este tipo de material oferece um conjunto de vantagens aos fabricantes na conceção dos seus projetos e na fabricação dos seus produtos. Aplicados em tetos, revestimentos exteriores e interiores, pisos, tampas laterais, portas, tanques de combustível e rodas, os produtos de alumínio têm as características ideais para o transporte de carga. O seu peso específico é três vezes menor do que o do aço e ainda amplia a capacidade de carga, reduz o custo do transporte, garante maior segurança e diminui a emissão de poluentes. O uso do alumínio garante a economia de combustível e de manutenção e aumenta a vida útil do veículo, que

pode chegar a 25 anos (contra 15 anos em materiais como o aço ao carbono) [21]. Podem-se observar alguns exemplos nas imagens em baixo de aplicação do alumínio na indústria automóvel.



Figura 28 Esqueleto da carroçaria de um veículo em alumínio [28].



Figura 29 Painel lateral da frente em alumínio [28].



Figura 30 Coletor de admissão de alumínio [29].



Figura 31 Jantes em alumínio [30].

Também na indústria aeronáutica o alumínio tem sido um material considerado até 80% em peso das estruturas, devido ao desenvolvimento de ligas com resistência mecânica mais elevada [21], ver Figura 32.

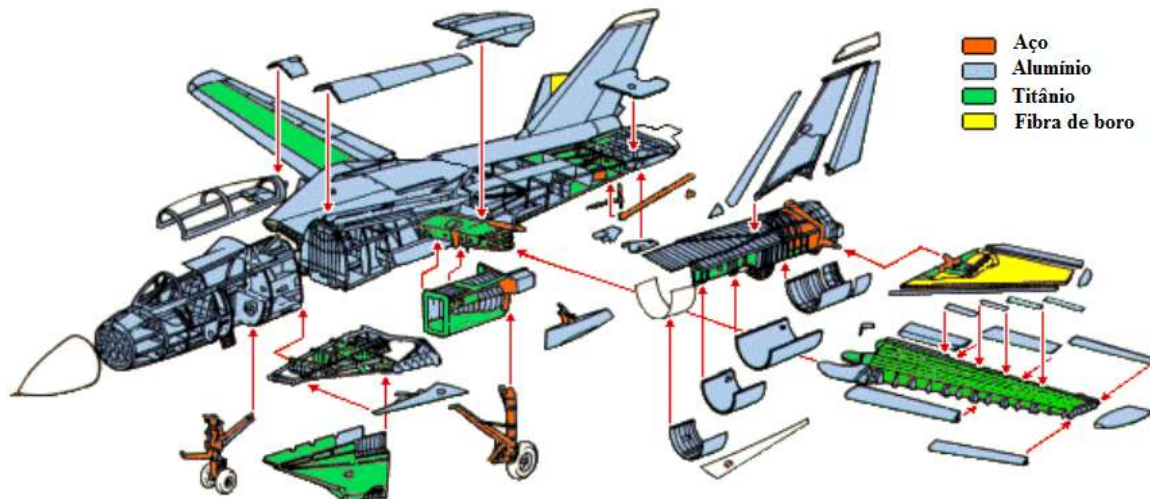


Figura 32 Aplicação de alumínio na indústria aeronáutica [31].

Nas embarcações o alumínio tem sido muito utilizado, devido à melhoria das técnicas de soldadura e ao desenvolvimento das ligas de AlMg, que resistem à corrosão da água salgada, permitindo a confecção de barcos, ver Figura 33, lanchas, navios e submarinos [21].

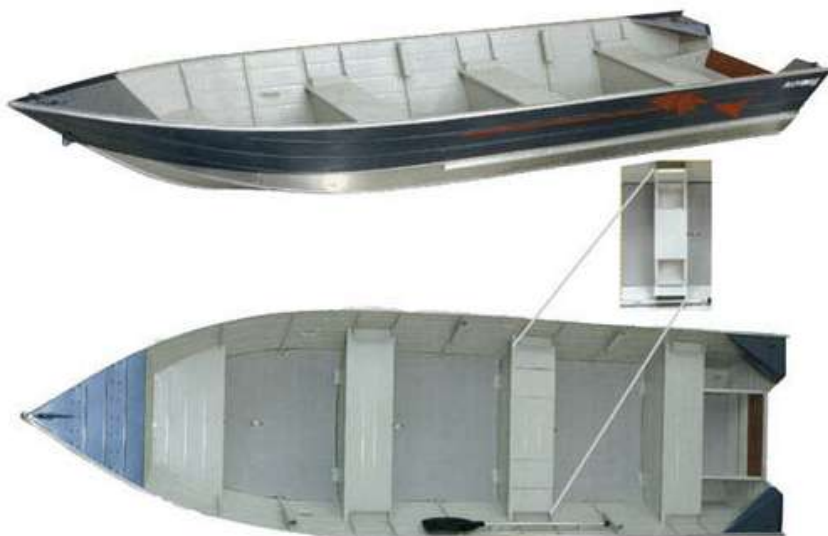


Figura 33 Barco em alumínio [32].

Na construção civil, o alumínio é amplamente utilizado nas mais variadas aplicações, devido a ser um material leve, versátil, resistente e durável, sendo capaz de agradar a arquitetos e consumidores pelo seu acabamento perfeito e função decorativa. Antes encontrado apenas em esquadrias e telhas, tornou-se numa tendência na arquitetura, como opção para revestimentos internos e de fachadas, sendo encontrado ainda em peças de acabamento. Hoje o alumínio está presente em telhas, revestimentos, caixilharia, ver Figura 34, divisórias, forros e em muitos detalhes de concepções arquitetônicas modernas, com facilidade de manutenção, o que reflete diretamente na projeção de custos de uma obra [21].



Figura 34 Exemplo de caixilharia em alumínio [33].

No setor das máquinas e equipamentos, o alumínio também é utilizado em diversas aplicações, como por exemplo no setor agrícola. No setor gráfico, o alumínio é largamente utilizado em chapas litográficas para impressão. Em empresas de serviços como lavandarias, garagens, computadores, instrumentos de medição e controlo, o metal está presente em diversas máquinas e equipamentos. O mesmo se aplica a sistemas e tubos de irrigação e em acessórios como escadas, ver Figura 35, ferramentas, matrizes e moldes.



Figura 35 Escadas em alumínio [34].

Relativamente ao tipo de aplicações da liga AW6082 T651, esta é utilizada em aplicações como por exemplo em treliças, ver Figura 36, pontes, guindastes, algumas aplicações em transportes, ver Figura 37, reservatórios de leite, etc.



Figura 36 Treliça em liga de alumínio AW6082 T651 [35].



Figura 37 Suspensão de moto em liga de alumínio AW6082 T651 [36].

## 2.4 Técnicas para aumento da resistência em juntas adesivas

As juntas adesivas apresentam uma vasta aplicação em quase todos os setores, devido à sua relação entre a elevada força e baixo peso da ligação. Devido à sua geometria não linear, ocorre uma significativa concentração de tensões nas extremidades da junta colada, podendo causar fendas e levar à rotura da ligação colada.

De uma maneira geral, existem dois tipos de métodos para reduzir essa concentração de tensões. O primeiro é utilizar alterações nos próprios materiais (por exemplo na sua rigidez) e o segundo método é alterando a geometria da junta.

### 2.4.1 Modificação nos materiais

Ganesh et al. 2002 [37] analisaram o efeito da utilização de reparações por sobreposição simples em que as placas apresentavam um módulo  $E$  variável segundo a direção de solicitação e ao longo do comprimento de sobreposição, ver Figura 38. Esta gradação de rigidez é conseguida variando o ângulo segundo o qual as fibras de carbono se encontram entrelaçadas entre si nas camadas de tecido de carbono que constituem as placas. São comparadas as distribuições de tensões ao longo da junta para vários tipos de gradação do módulo  $E$ . Os resultados obtidos foram comparados com os relativos a juntas em que as placas apresentavam módulo  $E$  constante.



Figura 38 Juntas de sobreposição simples com graduação de  $E$  [38-39].

As distribuições de tensões de corte obtidas para as juntas sem graduação corresponderam fielmente àsquelas comuns para este tipo de juntas, ou seja, com picos de tensões nas extremidades da sobreposição e uma zona central praticamente sem solicitação. A utilização do conceito de graduação do módulo  $E$  permitiu uma diminuição dos picos de tensões de corte nas extremidades do comprimento de sobreposição que chegou aos 20% o que levou a um ligeiro aumento das tensões de corte na zona intermédia do adesivo. Analisando as tensões normais segundo a espessura não se observou variação significativa (<5%) nos respetivos picos. As tensões normais segundo  $x$  também apresentam picos nas extremidades e uma zona intermédia não solicitada. A utilização da graduação do módulo  $E$  provoca nestas tensões um aumento quer dos picos de tensão nas extremidades, quer das tensões nas zonas intermédias, facto que no entanto não é grave, uma vez que estas tensões são uma ordem de grandeza inferiores. O método apresentado foi considerado válido no sentido de reduzir os picos de tensões nas extremidades do comprimento de sobreposição, e assim aumentar não só a resistência estática da junta, mas também aumentar a sua resistência à fadiga.

Um trabalho semelhante mas mais detalhado do que o anterior é descrito em Boss et al. [38]. É estudado o efeito da utilização de juntas cujas placas, em CFRP, possuem rigidez variável. Esta rigidez variável é conseguida de duas formas distintas. Na primeira, as placas apresentam um módulo  $E$  variável ao longo do seu comprimento, ao passo que na segunda a variação de rigidez é obtida variando a própria espessura das placas (ver capítulo seguinte). A primeira solução é conseguida variando o ângulo segundo o qual as fibras se encontram entrelaçadas entre si. Para o estudo realizado, é utilizado o MEF para obter as distribuições de tensões que permitem comparar as duas soluções. De uma forma geral, a graduação de rigidez apresenta uma maior redução das tensões de corte no adesivo. No entanto, observou-se ser possível combinar as duas soluções propostas para a obtenção de uma junta de características mecânicas superiores. A Figura 39 compara as distribuições de



tensões de corte ( $\tau_{xy}$ ) e de arrancamento ( $\sigma_{yy}$ ) no adesivo para variações lineares de ângulo das fibras e da geometria das placas com a junta com  $E$  uniforme.

Analisando a Figura 39, observa-se que existem picos em ambas as componentes de tensões apresentadas nas extremidades do comprimento de sobreposição. Considerando em primeiro lugar as distribuições de  $\tau_{xy}$ , observa-se que os picos de tensões diminuem utilizando as duas soluções em estudo, sendo os valores de picos de tensão idênticos para gradação geométrica e de módulo  $E$ . Considerando  $\sigma_{yy}$ , observa-se que a solução de gradação geométrica das placas conduz a picos de tensão de magnitude inferiores, quando comparada com a solução original e a alteração por gradação do módulo  $E$ .

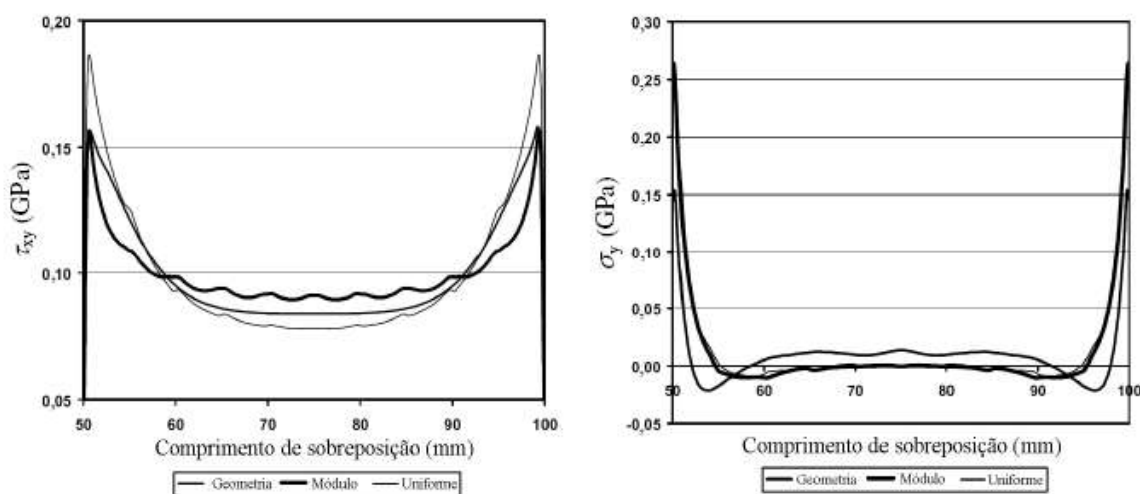


Figura 39 Tensões de corte e normais segundo  $y$  para a distribuição de tensões linear [38].

Outra das técnicas utilizadas para aumento da resistência de uma junta colada, através da modificação nos materiais, é a utilização de um sistema bi-adesivo. Esta técnica começou por ser estudada há mais de 40 anos através de Raphael et al. [39]. No estudo de Pires et al. [40] estudou-se o comportamento das tensões em JSS de alumínio com o uso de um sistema bi-adesivo. Os adesivos utilizados foram dois adesivos epóxicos DP490 (adesivo flexível produzido pela 3M) e ESP110 (adesivo rígido produzido pela Permabond). Nas juntas com a união bi-adesiva, o adesivo ESP110 foi aplicado a meio da sobreposição (comprimento  $L_2$ ) e o adesivo DP490 foi aplicado nas extremidades da sobreposição (comprimento  $L_1$ ), ver Figura 40.

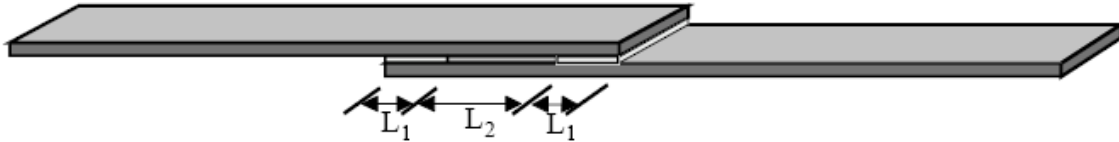


Figura 40 Junta de sobreposição simples mostrando a relação dos comprimentos utilizados para os dois adesivos epóxicos [40].

Na Figura 41 mostra a distribuição das tensões de corte ao longo do comprimento de sobreposição de uma junta de sobreposição simples, para o caso  $L_1/L_2=0,5$  e com um módulo de Young para o adesivo DP490 e ESP110 de 0,28 e 2,8 GPa, respetivamente. A carga nominal axial aplicada foi de 52N/mm. Como se pode verificar na Figura 41, a distribuição das tensões de corte para o adesivo DP490 são mais uniformes do que para o adesivo mais rígido ESP110. Os picos das tensões de corte nas extremidades da sobreposição com a utilização do sistema bi-adesivo, são mais baixos quando comparados nos casos em que os adesivos DP490 e ESP110 são utilizados separadamente. Como a tensão de corte média é superior para a junta bi-adesiva, no caso em estudo, esta apresenta uma maior resistência do que as juntas com os adesivos aplicados separadamente.

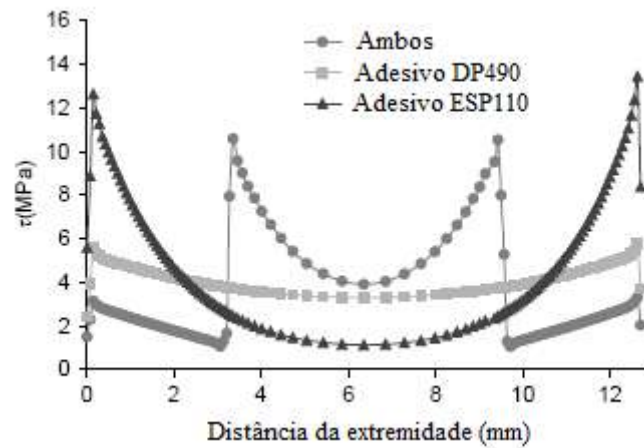


Figura 41 Distribuição das tensões de corte ao longo do comprimento de sobreposição para  $L_1/L_2=0,5$ ,  $E_1=0,28$  e  $E_2=2,8$  GPa [40].

Pires et al. [40] também estudaram o efeito do rácio  $L_1/L_2$  na distribuição das tensões em juntas bi-adesivas. Para isso, foram considerados diferentes rácios  $L_1/L_2$  para análise do seu efeito na distribuição de tensões. Como se pode verificar na Figura 42, os picos das tensões de corte diminuíram com o aumento do rácio e atingiram o mínimo valor para cerca de  $L_1/L_2=0,5$ . Para rácios  $L_1/L_2$  maiores, os picos das tensões aumentaram novamente.

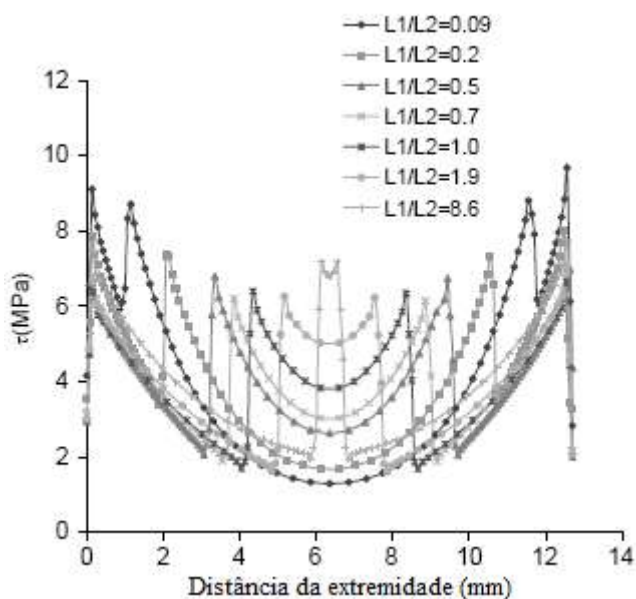


Figura 42 Distribuição das tensões de corte ao longo do comprimento de sobreposição, para diferentes comprimentos de rácio  $L_1/L_2$  [40].

Fitton e Broughton [41] estudaram o efeito da variação, para diferentes comprimentos de cada tipo de adesivo ao longo do comprimento de sobreposição, para otimização do desempenho da junta colada. Por exemplo, um 5-40-5, significa que tem 5mm de comprimento de adesivo de baixo módulo, em cada extremidade e 40mm de comprimento de adesivo de módulo elevado na zona central. Na Figura 43 pode-se visualizar o efeito de diferentes comprimentos para cada adesivo na distribuição das tensões de corte. Pode-se verificar que quanto menor for o comprimento do adesivo flexível nas extremidades, maiores serão as tensões aplicadas, enquanto quanto maior for este comprimento, menor serão as tensões aplicadas ao longo da sobreposição.

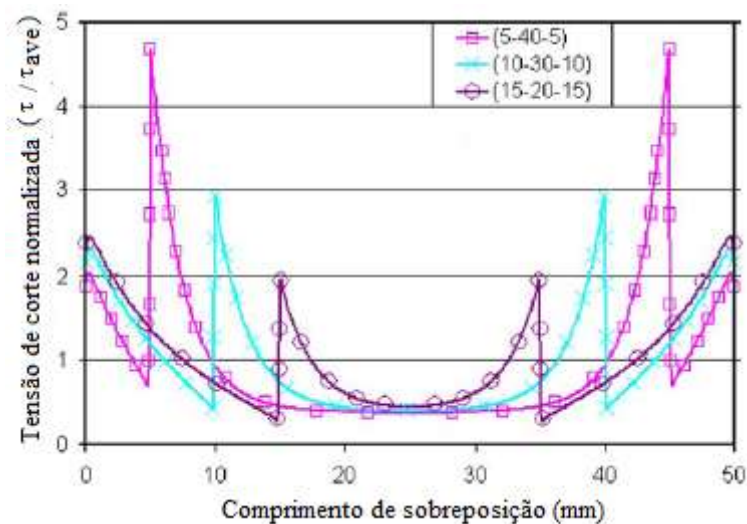


Figura 43 Efeito da variação do comprimento de cada tipo de adesivo nas tensões de corte [41].

A Figura 44 mostra o pequeno efeito nos picos das tensões de arrancamento na zona de transição entre adesivos. As principais diferenças ocorrem quando o adesivo está sujeito à compressão, sendo de pouca importância para a rotura da junta.

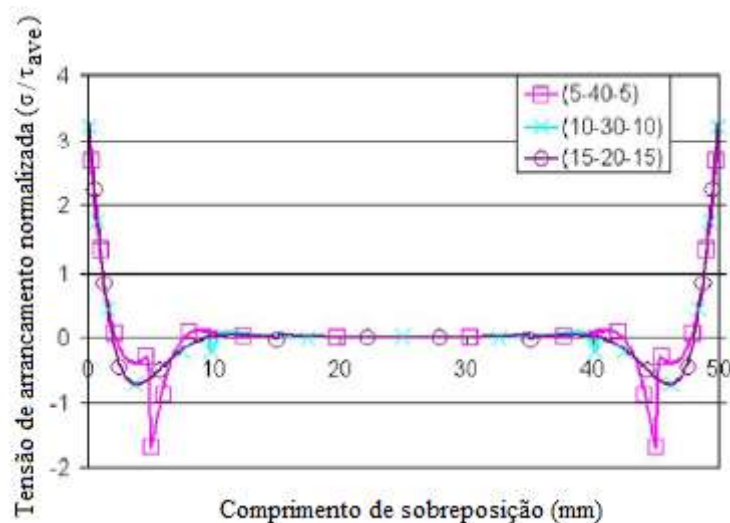


Figura 44 Efeito da variação do comprimento de cada tipo de adesivo nas tensões de arrancamento [41].

Devido a reduzirem a concentração de tensões nas extremidades de uma junta colada, Marques et al. [42] estudaram a utilização de chanfros e de filetes nas extremidades da junta e a utilização de um bi-adesivo, em que aplicaram um adesivo mais dúctil (Araldite 2015) nas extremidades da sobreposição e um adesivo mais frágil (Araldite AV138) a meio da sobreposição. Na Figura 45, pode-se visualizar as geometrias estudadas, bem como as suas dimensões.

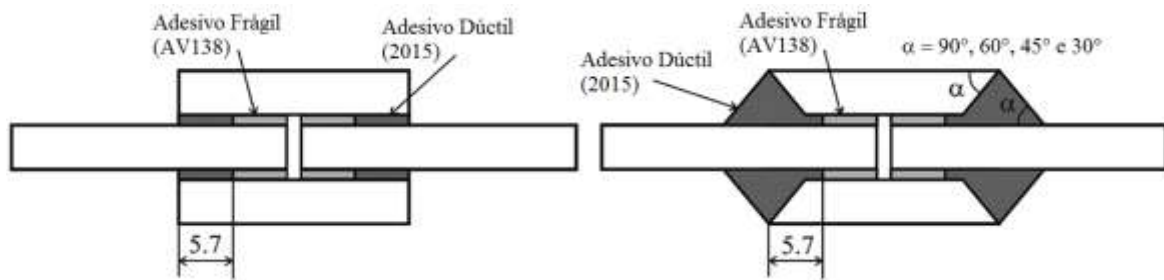


Figura 45 Geometrias das juntas estudadas no trabalho de Marques et al. [42].

A Figura 46, mostra a distribuição das tensões de Von Mises para o adesivo Araldite 2015 ( $E = 1850\text{MPa}$ ). Pode-se visualizar que para a junta sem aplicação de qualquer ângulo, as tensões nas extremidades da sobreposição são extremamente altas e concentradas. Com a aplicação de vários ângulos nas extremidades da sobreposição, pode-se visualizar que as tensões são praticamente zero nas extremidades e há medida que o ângulo é cada vez maior e menos profundo, as tensões são transferidas para o centro da junta. Como se pode visualizar, os ângulos ideais para este tipo de configuração configuração são de  $60^\circ$  e  $45^\circ$ .

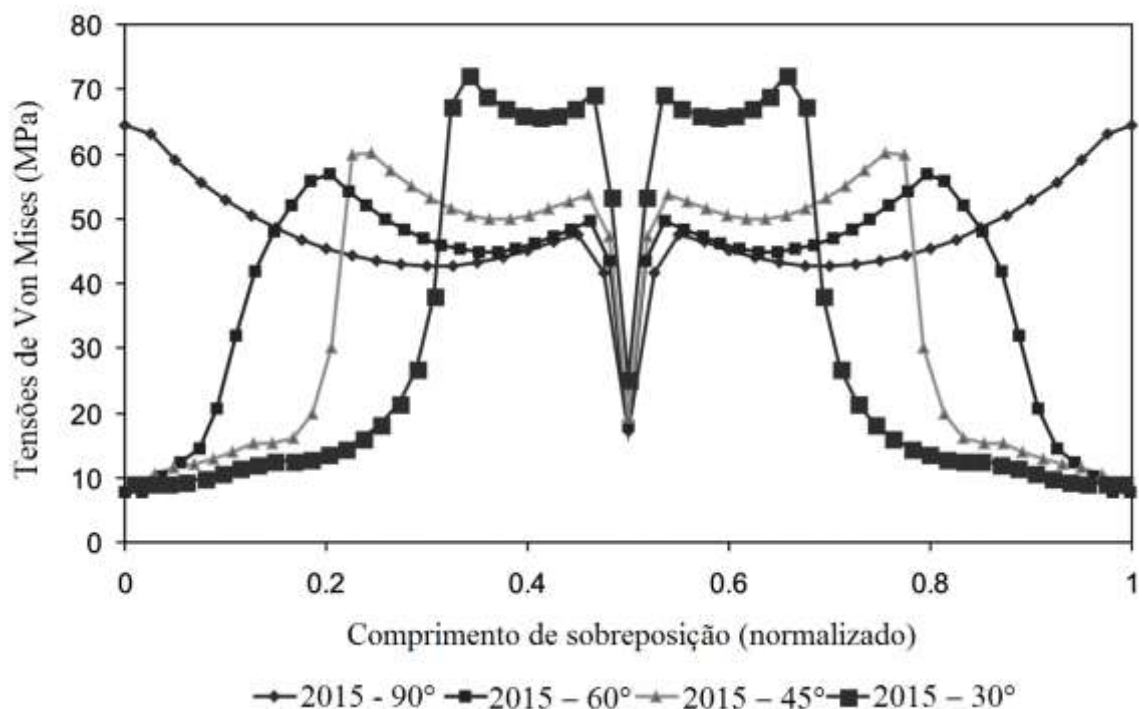


Figura 46 Distribuição das tensões de Von Mises para o adesivo Araldite 2015 [42].

Na Figura 47, mostra a distribuição das tensões de Von Mises para o adesivo AV138 ( $E = 4590\text{MPa}$ ). Para a junta sem aplicação de qualquer ângulo, a tensão máxima é

40% maior do que nas outras configurações. Isto demonstra que com a aplicação dos vários ângulos no adesivo e aderentes, é mais útil para adesivos frágeis. Para este tipo de configurações, os ângulos ideais são os 45° e 60°.

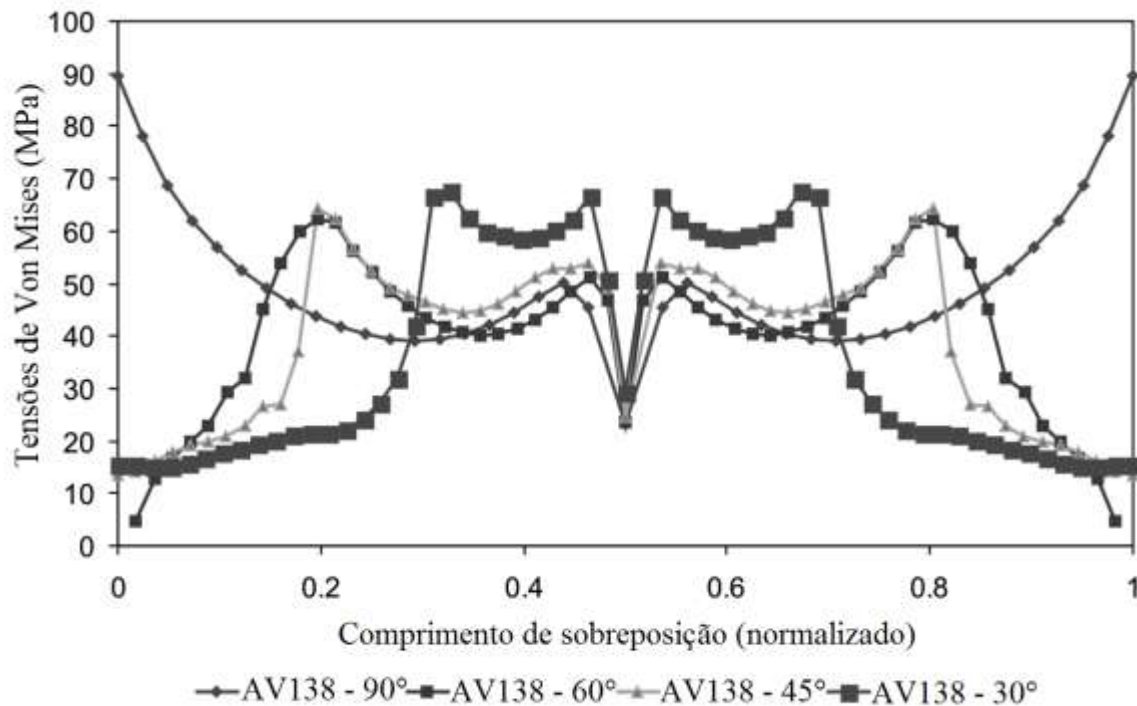


Figura 47 Distribuição das tensões de Von Mises para o adesivo AV138 [42].

Na Figura 48, mostra a combinação dos dois adesivos (Araldite AV138 e Araldite 2015). O adesivo frágil (AV138) foi utilizado no centro da sobreposição enquanto o adesivo dúctil (2015) foi utilizado nas extremidades da sobreposição. Através da utilização do sistema bi-adesivo, permitiu tensões mais baixas nas extremidades, levando a uma menor concentração de tensões. Para a junta simples, ou seja, sem aplicação de qualquer ângulo na extremidade da junta, as tensões nas extremidades observadas, são muito idênticas às tensões observadas com a aplicação só com o adesivo 2015, mas com a utilização de um adesivo mais forte (AV138) no centro da sobreposição, resulta numa junta com uma resistência mais elevada.

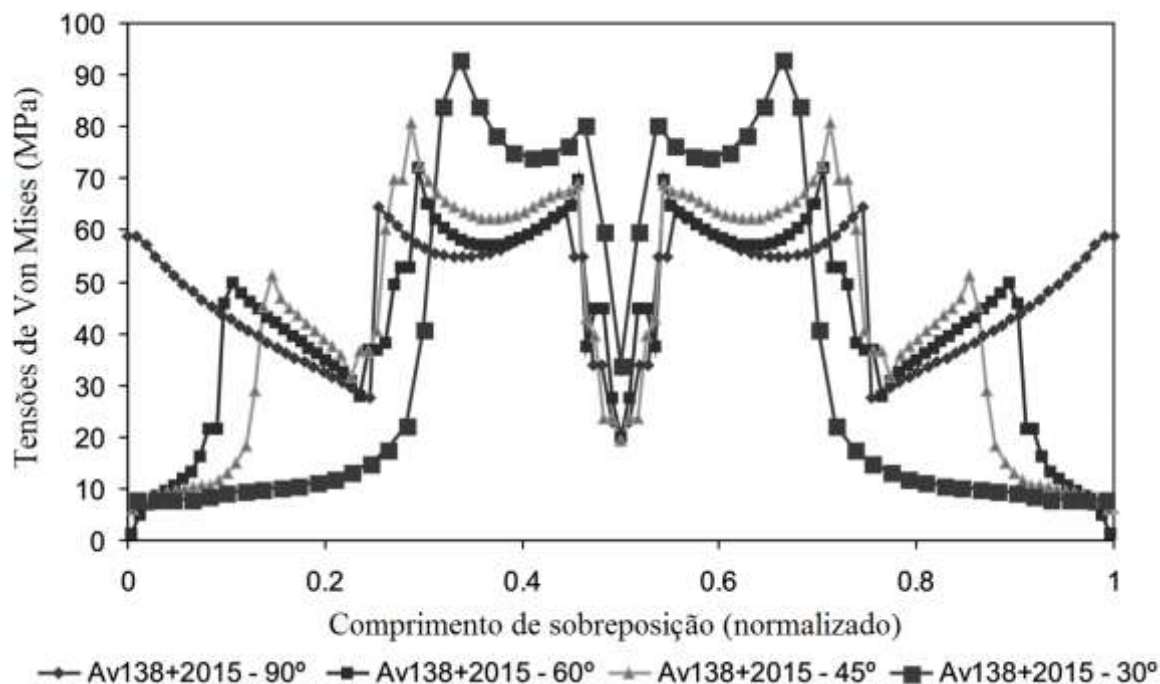


Figura 48 Distribuição das tensões de Von Mises para a combinação bi-adesivo [42].

#### 2.4.2 Modificação na geometria

Uma das modificações de geometria mais aplicadas é a utilização de filetes nos adesivos, nas extremidades da sobreposição. Os filetes permitem a redistribuição das tensões nas regiões das extremidades da sobreposição, aumentando a resistência das uniões coladas [43-44-45]. São normalmente aplicados na totalidade da espessura dos aderentes, minimizando as tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da sobreposição [46]. Risper et al. [47] desenvolveram um algoritmo numérico para encontrar a forma ideal de um filete para reforçar a ligação adesiva numa placa reforçada. A solução ideal (um filete com um ângulo de 45°) foi obtida quando todos os elementos representativos do filete foram carregados com pelo menos 20% da tensão máxima da estrutura. Lang e Mallick [48] estudaram através do MEF o efeito da forma do filete nas tensões de corte de arrancamento numa junta de sobreposição simples carregada com tensão. Foram obtidas reduções nas extremidades do comprimento de sobreposição, nos picos das tensões de arrancamento e de corte de 87% e 60%, com a utilização de um filete curvo. Estes resultados coincidem com o trabalho de Quaresimin e Ricotta [49], cujos dados experimentais revelaram uma melhoria da resistência de 11,6% a 25,2% através da utilização de um filete de 45°, dependendo do comprimento de sobreposição. Na Figura 49

pode-se visualizar alguns exemplos de alterações geométricas aplicadas nos adesivos, nas extremidades do comprimento de sobreposição numa junta de sobreposição simples.

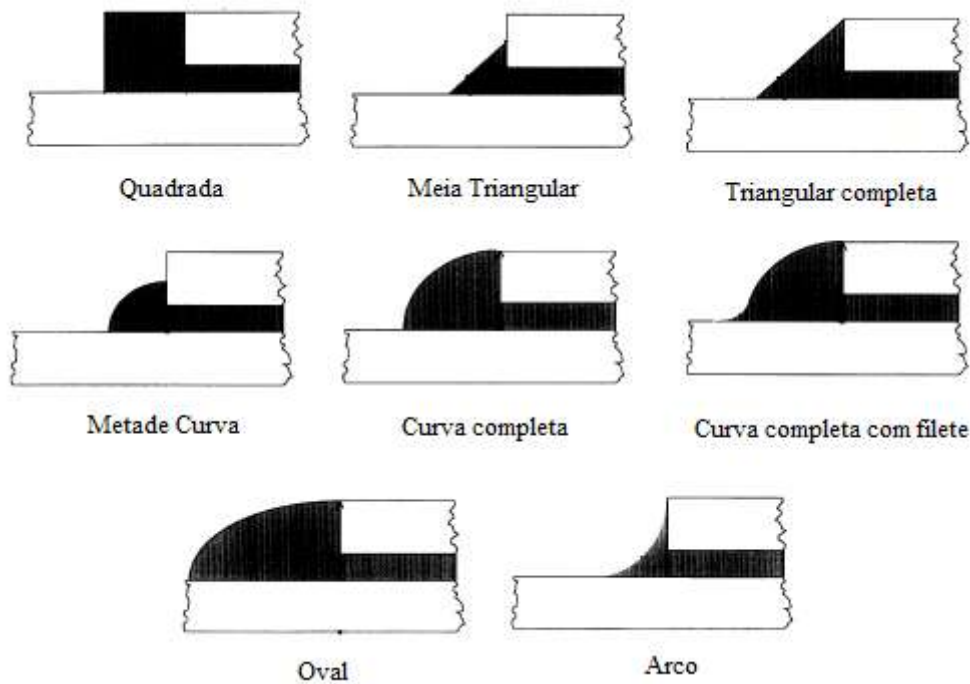


Figura 49 Exemplos de algumas alterações de geometria no adesivo nas extremidades do comprimento de sobreposição numa junta de sobreposição simples [50].

Foi realizado um estudo numérico por MEF para determinar os efeitos da geometria do adesivo no estado de tensões numa junta de sobreposição simples.

Na Tabela 4 pode-se verificar a redução em percentagem das tensões máximas das várias geometrias aplicadas nas extremidades do comprimento de sobreposição, em comparação com a geometria de adesivo quadrada (ver Figura 49). Pode-se verificar que as alterações geométricas no adesivo têm um impacto significativo na redução das tensões na junta, nomeadamente nas tensões  $\sigma_{yy}$ , sendo benéficas para o aumento da resistência das juntas.

Tabela 4 Redução em percentagem da tensão máxima entre as várias geometrias de filetes nas extremidades da sobreposição [50].

| Alterações Geométricas Adesivo          | $\tau_{xy}$ (%) | $\sigma_{yy}$ (%) | $\sigma_{xx}$ (%) |
|---|-----------------|-------------------|-------------------|
| Meia triangular $\theta = 45^\circ$     | 45              | 71                | 28                |
| Triangular completa $\theta = 45^\circ$ | 50              | 73                | 31                |
| Metade curva                            | 29              | 33                | 15                |



|                           |    |    |    |
|---------------------------|----|----|----|
| Curva completa            | 37 | 42 | 20 |
| Curva completa com filete | 54 | 82 | 36 |
| Oval                      | 49 | 65 | 32 |
| Quadrada                  | 37 | 40 | 19 |
| Arco (raio = 6mm)         | 60 | 87 | 35 |

Chanfros exteriores e interiores nos aderentes também podem ser eficazes na redução dos picos das tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição [43-50-51], eventualmente aumentando a resistência da junta. Kaye e Heller [52] concluíram que o chanfro exterior nos remendos distribui a carga de forma mais uniforme entre os aderentes, o que se reflete numa melhoria da resistência das estruturas ligadas. Hu e Soutis [53] mostraram que o pico da tensão de corte pode ser reduzido pelo aumento da  $t_A$  nas extremidades da sobreposição do chanfro interior dos aderentes. Como tal, considerou-se uma junta com chanfros interiores nos aderentes para reduzir as concentrações de tensões na camada adesiva e conseqüentemente para aumentar a resistência da junta. Na Figura 50 observa-se a aplicação de chanfros exteriores e interiores nas extremidades da sobreposição nos aderentes, e na Figura 51 pode-se visualizar diferentes geometrias de chanfros exteriores aplicados nas extremidades da sobreposição nos aderentes.



Figura 50 Chanfros Exteriores e Interiores aplicados nos aderentes [54].

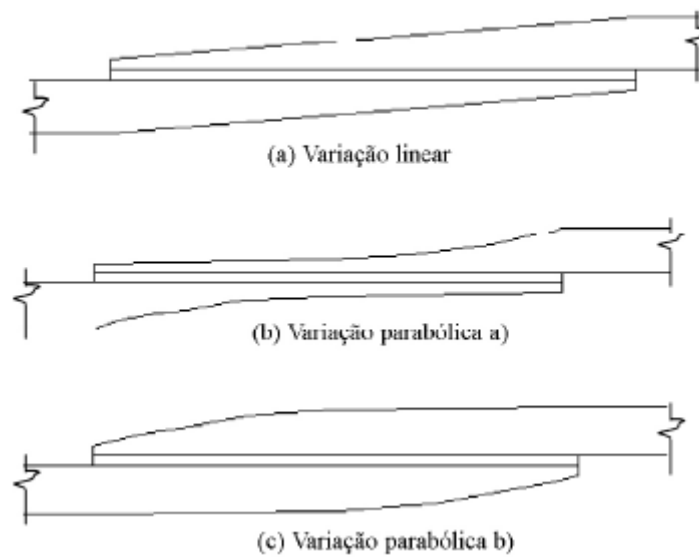


Figura 51 Diferentes geometrias de chanfros exteriores aplicadas nos aderentes [38].

Cherry et al. [55] e Ávila e Bueno [56] testaram juntas de compósito com geometria ondulada dos substratos na zona de sobreposição (*wavy geometry*), ver Figura 53. Esta abordagem aumentou a resistência do conjunto em cerca de 40%, o que foi justificado pela uniformização das tensões de arrancamento e de corte na camada adesiva.

A junta ondulada, segundo os autores, não só evita a excentricidade da carga transmitida, comum nas juntas de sobreposição simples, como também permite o aparecimento de tensões compressivas nas extremidades da camada de adesivo. Como tal, a eficiência do adesivo é melhorada, e consequentemente o rendimento da junta será superior. A Figura 52 representa as distribuições de  $\tau_{xy}$  e  $\sigma_{yy}$  na linha média do adesivo para as juntas de sobreposição simples convencionais (a) e onduladas (b).

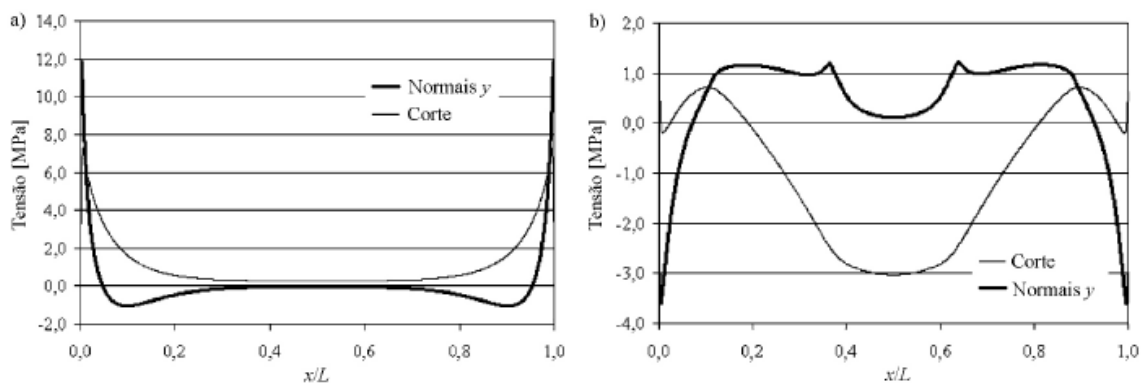


Figura 52 Distribuições de tensões em juntas de sobreposição simples (a) e onduladas (b) [56].

As juntas de sobreposição simples convencionais (a) exibem as distribuições de tensões já extensivamente documentadas com picos de ambas as tensões nas extremidades da sobreposição. Os picos de tensões  $\sigma_{yy}$  são responsáveis por início do dano prematuro nas extremidades da sobreposição, ao passo que os picos de  $\tau_{xy}$  podem causar roturas nas placas. Para as juntas onduladas (b) as  $\sigma_{yy}$  são tensões compressivas nas extremidades do adesivo, embora sejam de tração na zona intermédia do mesmo. Como as referidas tensões são um dos fatores de maior importância na rotura da junta, e como a resistência de adesivos à compressão é razoável, a utilização de juntas onduladas leva a um aumento na resistência da junta. Outro facto de interesse encontra-se relacionado com a distribuição de tensões de corte, pois a maior parte da transferência de carga por corte faz-se pela zona central do adesivo. Estes dois fatores combinados podem levar à rotura da junta por delaminação entre camadas adjacentes dos substratos de compósito.

Zeng e Sun [57], mostraram que esta técnica permite uma grande melhoria na capacidade de carga das juntas, principalmente devido ao desenvolvimento de tensões de compressão nas extremidades da sobreposição.

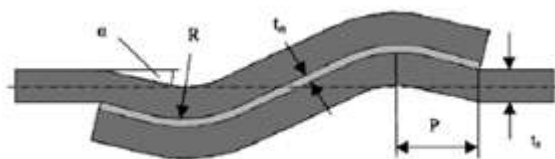


Figura 53 Exemplo de aplicação geometria ondulada numa junta de sobreposição simples [58].

O trabalho de McLaren e MacInnes [59] é considerado como o trabalho pioneiro das juntas dobradas na zona da sobreposição (*bent geometry*), para otimização das distribuições de tensões por eliminação da excentricidade das juntas. Esta alteração geométrica foi estudada por fotoelasticidade, mostrando a eficácia desta técnica para reduzir os gradientes de tensão ao longo do adesivo. Os resultados mais expressivos foram obtidos para determinados valores negativos de excentricidade dos aderentes.

Campilho et al. [9], realizaram um estudo numérico e experimental para avaliar a resistência de juntas de sobreposição simples de alumínio com substratos dobrados, colados com adesivos dúcteis (Araldite<sup>®</sup> 2015) e frágeis (Araldite<sup>®</sup> AV138). Neste trabalho, foram estudadas diferentes excentricidades, incluindo juntas sem excentricidade, para desta forma se proceder a uma comparação da resistência entre as várias juntas, ver Figura 54.

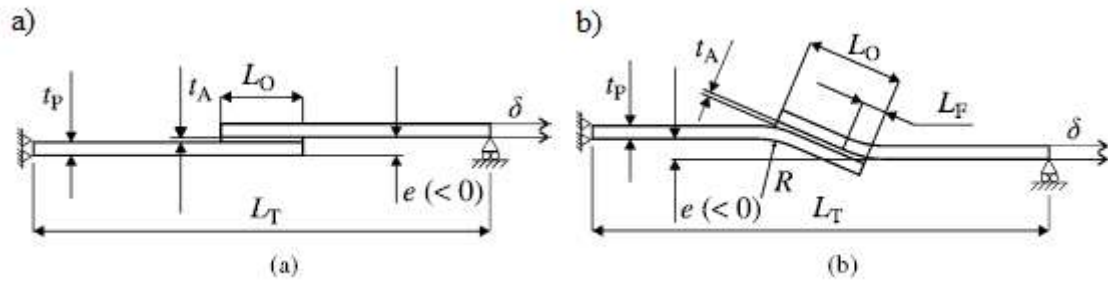


Figura 54 Junta de Sobreposição simples (a) e junta com aderentes dobrados nas extremidades (b) [9].

Um dos principais objetivos da geometria com os aderentes dobrados é prevenir a rotação dos aderentes e suprimir o pico das tensões de arrancamento nas extremidades da junta colada. Na Figura 55 e na Figura 56 pode-se verificar para diferentes geometrias (diferentes excentricidades  $K$ , de  $K=1$  a  $K=-1$ ) as distribuições de tensões, com redução dos picos de tensões para as juntas modificadas. Pode-se verificar que para uma junta de sobreposição simples convencional,  $K=1$  (Figura 54(a)), as tensões de arrancamento e de corte, nas extremidades da junta, são muito superiores em relação a uma junta de sobreposição simples com sobreposição  $K=-1$  (Figura 54 (b)).

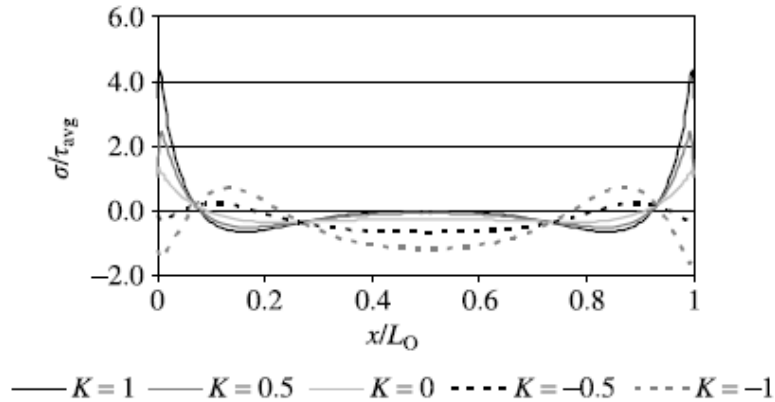


Figura 55 Distribuição das tensões de arrancamento na camada adesiva para diferentes valores de  $K$  [9].

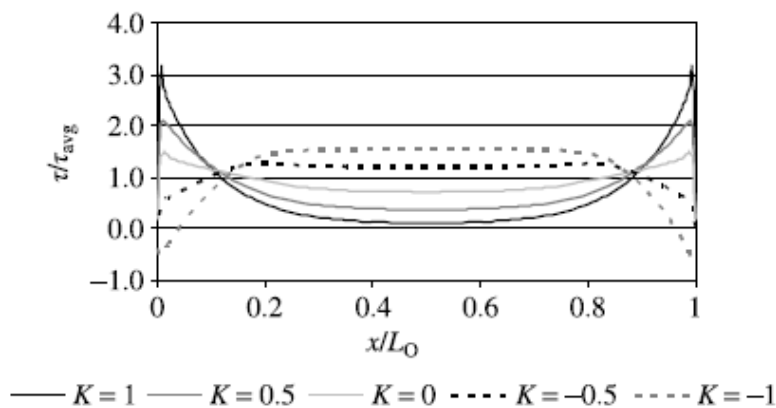


Figura 56 Distribuição das tensões de corte na camada adesiva para diferentes valores de  $K$  [9].

Na Figura 57 pode-se comparar os resultados experimentais de resistência ( $P_m$ ) para diferentes valores de  $K$ . Em termos de resistência obteve-se para um adesivo frágil (Araldite® AV138), um aumento de 162%, enquanto para um adesivo dúctil (Araldite® 2015), o aumento é de 27%. Esta diferença deve-se ao facto do adesivo frágil ser extremamente sensível aos picos de tensões nas extremidades da junta colada e não permitir plastificação antes da rotura.

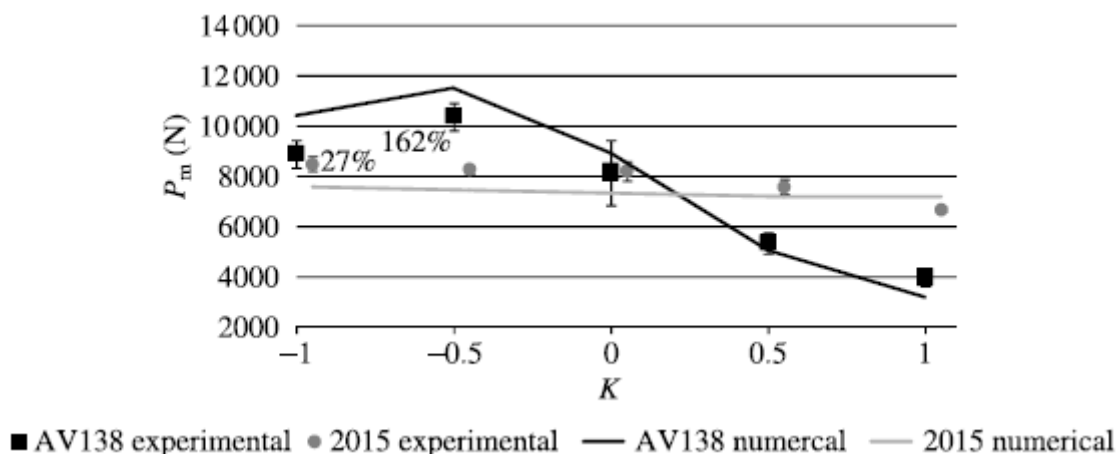


Figura 57  $P_m$  para diferentes valores de  $K$  em juntas coladas com Araldite® AV138 e 2015 [9].

Fessel et al. [58] realizaram um estudo experimental e um estudo de MEF de juntas de sobreposição simples incluindo as geometrias onduladas e dobradas. Estas modificações geométricas permitiram diminuir  $\sigma_{yy}$  e  $\tau_{xy}$  no adesivo. Os testes experimentais mostraram melhorias de resistência para a geometria dobrada de 8 a 40%, em comparação com a geometria plana.

Zhan-Mou et al. [60] estudaram por MEF a distribuição de tensões em juntas de sobreposição simples com ranhuras paralelas na zona de sobreposição (ver Figura 58).

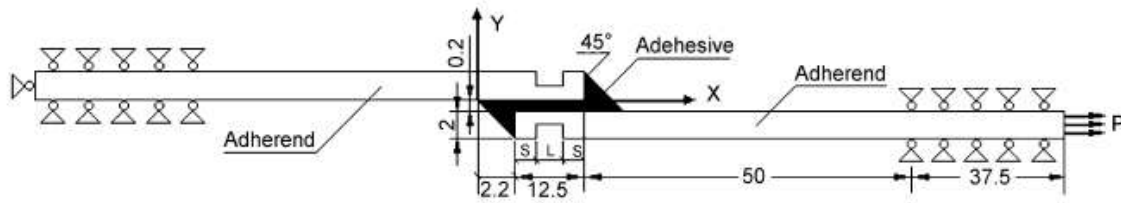


Figura 58 Geometria de junta de sobreposição simples com ranhuras paralelas nos aderentes [60].

Como se pode verificar na Figura 59, este tipo de alteração geométrica resulta numa diminuição significativa do pico de tensões  $\sigma_{xx}$  e  $\sigma_{yy}$  nas extremidades do comprimento de sobreposição. Na zona central da junta colada, as tensões  $\sigma_{xx}$  e  $\sigma_{yy}$  aumentam. Em relação às tensões  $\tau_{xy}$ , mantêm-se praticamente as mesmas nas extremidades da sobreposição e diminuem na zona central da junta colada. Isto deve-se à diminuição da rigidez na zona central da sobreposição, devido à remoção de material através das ranhuras paralelas, fazendo com que a concentração de tensões nas extremidades diminua, enquanto na zona central estas vão aumentando.

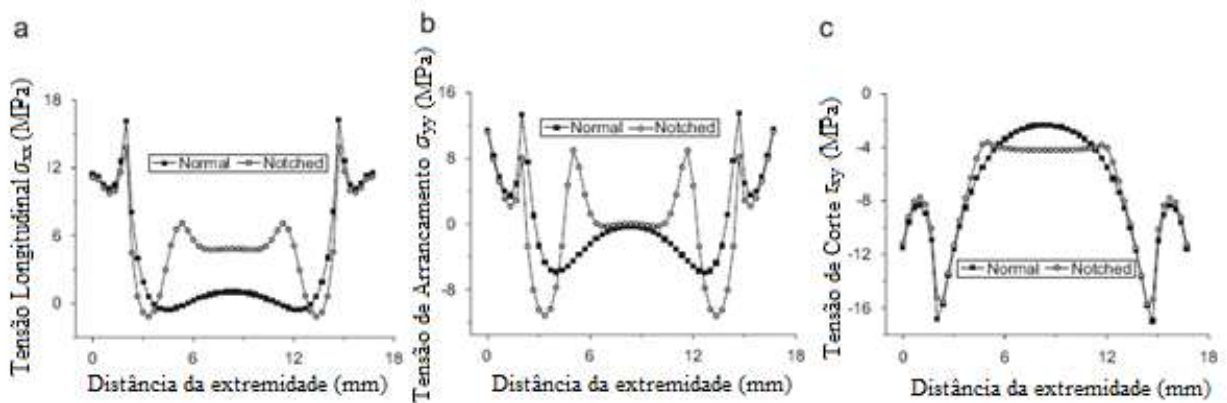


Figura 59 Efeito das ranhuras paralelas na distribuição de tensões da junta [60].

Em Zhan-Mou et al. [60] estudou-se uma alteração semelhante à anterior, com destaque em diferentes comprimentos de ranhura (1, 7 e 12mm). Relativamente à distribuição das tensões de corte  $\tau_{xy}$ , ver Figura 60, com o aumento do comprimento das ranhuras paralelas, o pico das tensões  $\tau_{xy}$  ao longo da sobreposição diminuem. O menor

valor do pico de  $\tau_{xy}$  é atingido quando o comprimento das ranhuras paralelas é aproximadamente de 7mm.

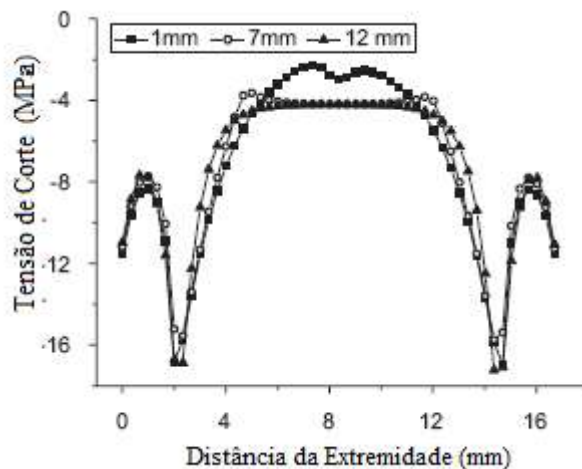


Figura 60 Efeito do comprimento das ranhuras paralelas na tensão de corte  $\tau_{xy}$  nas juntas [60].

As tensões  $\sigma_{yy}$  também sofrem uma variação considerável, com uma diminuição dos picos de tensão para dimensões mais elevadas da ranhura, ver Figura 61.

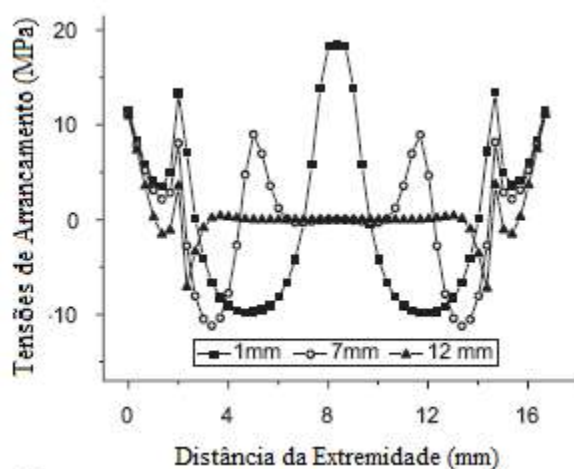


Figura 61 Efeito do comprimento das ranhuras paralelas na tensão de arrancamento  $S_y$  nas juntas [60].

No estudo Zhan-Mou et al. [60] também se verificou a influência da profundidade das ranhuras paralelas (1, 1,5 e 1,7mm). Para as tensões  $\sigma_{yy}$ , os picos das tensões no início da ranhura aumentam significativamente com a profundidade das ranhuras, enquanto nas extremidades da sobreposição as tensões  $\sigma_{yy}$  diminuem, ver Figura 62.

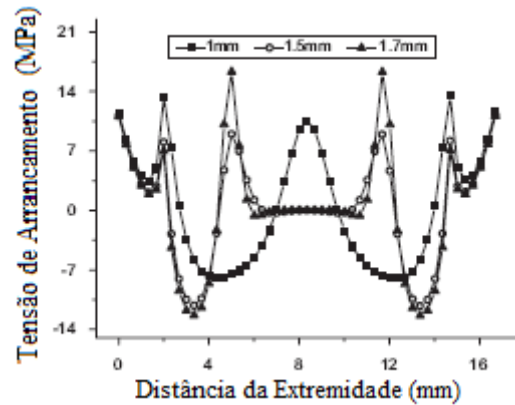


Figura 62 Efeito da profundidade das ranhuras paralelas na distribuição das tensões de longitudinais  $\sigma_{yy}$  na junta [60].

Nas tensões  $\tau_{xy}$ , os picos das tensões nas fronteiras das ranhuras aumentam significativamente com a profundidade das mesmas. Na zona central das ranhuras, as tensões diminuem à medida que se vai aumentando a profundidade das mesmas, ver Figura 63.

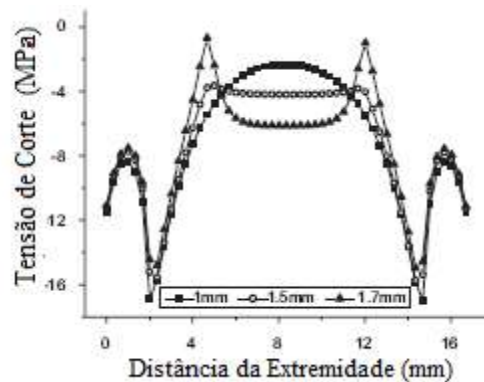


Figura 63 Efeito da profundidade das ranhuras paralelas na distribuição das tensões de corte  $\tau_{xy}$  na junta [60].

## 2.5 Técnicas de previsão de resistência em juntas adesivas

Inicialmente, devido à inexistência de modelos de materiais e de critérios adequados de rotura, as juntas adesivas eram sobredimensionadas, originando estruturas mais pesadas e mais caras. Ao longo dos tempos, foram sendo desenvolvidas metodologias de previsão (analíticas e numéricas), tornando possível melhorar a eficiência das juntas coladas. Estes estudos começaram nos anos 30 com o modelo analítico de Volkersen [61], que considera que os materiais são totalmente elásticos e a deformação do adesivo acontece somente em



corde e têm vindo a ser melhorados desde então. Contudo, a formulação analítica das juntas adesivas torna-se mais complexa se o adesivo deforma plasticamente, se for utilizado um aderente de compósito, ou se forem utilizados materiais diferentes nos aderentes. Adams e os colegas de trabalho são pioneiros na técnica numérica mais utilizada para juntas adesivas, o MEF [62]. Efeitos como a rotação da junta, os aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes foram estudados inicialmente por Harris e Adams [63]. O MEF também pode ser utilizado juntamente com critérios da mecânica da fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões ou por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). No entanto, estas técnicas carecem da necessidade de reconstruir a malha durante a propagação do dano, o que aumenta de forma considerável o esforço computacional [64]. Desenvolveu-se a modelação por dano por combinação do MEF com elementos coesivos. Esta técnica junta a modelação convencional por MEF para as regiões onde não se espera a ocorrência de dano e a técnica de modelos de dano para simular o crescimento das fendas. Uma alternativa recente aos modelos de dano coesivos é o método dos elementos finitos estendido (MEFX), que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

### 2.5.1 Métodos analíticos

Inicialmente, na análise de estruturas adesivas, os métodos de previsão consistiam em formulações analíticas. Os trabalhos de Volkersen [61] e Goland e Reissner [65] foram os pioneiros de uma série de estudos teóricos que tinham a vantagem da simplicidade para atingir os campos de tensões nas estruturas coladas. No entanto, estes modelos incluíam muitas hipóteses simplificativas em termos de geometria das estruturas, carregamentos, e condições fronteira. Nestes casos, a resistência era tipicamente prevista por critérios baseados na tensão ou deformação máximas. Atualmente, estes estudos são substituídos por análises numéricas, embora os estudos teóricos também tenham sido alvo de aperfeiçoamento ao longo dos anos em termos de capacidades de modelação, nomeadamente a consideração de não linearidade material [66] ou geométrica [67].

## 2.5.2 Métodos numéricos

### 2.5.2.1 Modelação contínua

Na mecânica contínua, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos pela análise de MEF, são geralmente usados num critério de rotura para estimar a resistência da ligação. As vantagens desta técnica incluem a análise expedita das estruturas coladas, com ou sem dano inicial, e sob uma carga arbitrária. No entanto, estes critérios têm uma grande limitação quando aplicados a juntas adesivas, uma vez que estas são propensas a concentrações de tensões nas extremidades da sobreposição, devido aos entalhes e variações abruptas de geometria. Como resultado, numa análise do MEF a uma estrutura colada, as tensões numa zona singular aumentam com o refinamento da malha e não se consegue obter convergência, o que resulta em previsões dependentes do refinamento da malha [68]. Ao longo dos anos, foram introduzidas melhorias a estas técnicas de previsão, tais como a definição de critérios de rotura baseados em tensões ou deformações mais refinados para diferentes materiais e mecanismos de fratura, ou combinação com modelos contínuos de material mais realistas, mas mesmo assim, sem resolver a dependência da malha.

### 2.5.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica contínua assume que a estrutura e o seu material são contínuos. A existência de defeitos ou dois materiais com cantos reentrantes, obviamente não se enquadram nesta hipótese. Nas estruturas as fendas são os defeitos mais comuns, para os quais a mecânica da fratura foi desenvolvida. Na mecânica da fratura, é bem aceite que as tensões são singulares (infinito) na ponta da fenda e não podem ser calculadas usando a mecânica contínua. Com as atuais teorias na mecânica, existe sempre tal singularidade quando o ângulo da fissura é inferior a  $180^\circ$ . Este resultado foi descoberto por Williams [69] para singularidades de tensão num defeito em cunha. A mecânica da fratura foi nos últimos anos aplicada com sucesso em muitos problemas de engenharia. A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia,  $G$ , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura,  $G_c$  [70], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. No entanto, a fratura de juntas adesivas ocorre normalmente em modo misto por causa da complexidade do estado de tensão e do efeito dos substratos. Os critérios de rotura na fratura em modo misto podem ser desenvolvidos de uma maneira idêntica aos

critérios de rotura clássicos, embora deva ser introduzido o conceito da superfície de fratura.

### 2.5.2.3 Mecânica do dano

As técnicas de modelação avançadas, que são atualmente utilizadas, garantem previsões precisas de rotura, e permitem superar as limitações dos métodos anteriormente descritos. A simulação por MEF baseada na utilização de elementos de sólidos contínuos prevê de forma errada que os elementos sofrem plasticidade generalizada sem evolução do dano, enquanto os modelos da mecânica do dano podem induzir dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Como resultado, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [71]. Embora estes métodos estejam disponíveis há muito tempo, a sua utilização em juntas adesivas só se tornou generalizada à relativamente pouco tempo. Apesar deste facto, este campo ainda é inovador com um desenvolvimento intenso, que procura técnicas de modelação mais precisas, confiáveis e com métodos de estimação simples dos parâmetros dos materiais, aumentando a eliminação e robustez dos problemas de convergência [72].

As técnicas de modelação de dano podem ser locais ou contínuas. Dentro da modelação do dano local, o dano ocorre numa linha ou numa superfície (análise 2D ou 3D, respetivamente), simulando uma rotura interfacial entre dois materiais, por exemplo entre a ligação adesiva e aderente, a fratura interlaminar de um laminado compósito ou da interface entre as fases sólidas de materiais. Pela modelação contínua, o dano estende-se ao longo uma área ou volume (análise 2D ou 3D, respetivamente), para simular uma rotura num material em bruto ou para modelar uma fratura coesiva do adesivo.

### 2.5.2.4 Modelos de dano coesivos

A implementação em computador de métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) obteve grande sucesso há algumas décadas atrás, mas estes eram 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 no final dos anos 1950 por Barenblatt [73] para descrever o dano na zona do processo da fratura na frente da fenda sob efeito de cargas estáticas, dando o primeiro passo para métodos mais refinados para avaliar eventuais danos em estruturas.

Os métodos MDC foram amplamente testados desde então para simular o início e a propagação de dano em problemas de rotura coesiva, interfacial ou delaminações em compósitos. Os MDC podem ser baseados em elementos de mola ou coesivos [74], e podem ser facilmente incorporados numa análise convencional por MEF para modelar a fratura em vários materiais, incluindo juntas adesivas [8]. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente uma ou múltiplas interfaces de fratura em estruturas, em que o crescimento do dano é permitido pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. Isto é possível pela definição de leis de tração-separação para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre nós homólogos de elementos coesivos, e podem ligar 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. Os MDC baseiam-se 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 rutura, 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 [75], embora uma ou mais fases possa ser definida de maneira diferente para uma representação mais precisa do comportamento de materiais.

#### **2.5.2.5 Modelos alternativos aos modelos do dano coesivos**

Neste texto são descritas as técnicas alternativas aos modelos de dano coesivo (AMDC), que podem ser caracterizadas dentro do âmbito da mecânica do dano. Nestas metodologias, é estabelecido um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais pela depreciação da rigidez ou resistência. Estas técnicas podem ser usadas para modelar o dano em ligações adesivas [76], delaminações ou rotura de matriz em compósitos [77]. Este parâmetro pode ser usado numa lei de evolução de dano para modelar tanto a evolução do dano antes da iniciação da fenda como o crescimento da mesma. As variáveis dos danos podem ser classificadas em dois grupos: (1) variáveis que prevêm a quantidade de dano pela redefinição das propriedades dos materiais, mas que não se relacionam diretamente com o mecanismo de dano, (2) variáveis relacionadas com a definição física de um tipo específico de dano, tais como dimensão das porosidades ou área relativa de micro cavidades [78]. Pelas AMDC, o crescimento do dano é definido em

aplicações estáticas como uma função da carga aplicada ou em análises de fadiga pela contagem do número de ciclos. No campo das juntas coladas, no entanto, não há muitos trabalhos disponíveis que utilizem estes métodos. As técnicas de fadiga por AMDC, quando comparados com os MDC, não fornecem uma distinção clara entre o início da fadiga e as fases de propagação [76]. Por outro lado, a modelação do dano à fadiga por MDC é limitada ao percurso pré-definido da fenda e, em aplicações mais específicas, as AMDC podem ser recomendadas se o dano for mais generalizado ou se o percurso da fenda não for conhecido à partida [79].

#### 2.5.2.6 Método de elementos finitos estendido

O MEFX é uma recente melhoria do método MEF para a modelação do crescimento do dano em estruturas. Este método também utiliza leis de dano para a previsão da fratura, que se baseiam na resistência dos materiais para a iniciação do dano e deformação para a avaliação da rotura (definido pelo  $G_n^c$ ), em vez dos valores de  $t_n^0/t_s^0$  ou  $\delta_n^0/\delta_s^0$  utilizados pelos MDC. O MEFX ganha uma vantagem sobre a modelação MDC uma vez que não é obrigatório que a fenda siga um caminho pré-definido. Na realidade, existe a possibilidade de crescimento livre das fendas no interior de uma região sem o requisito da geometria das descontinuidades coincidir com a malha e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [80]. Este método é uma extensão do MEF, cujas características fundamentais foram apresentadas no final dos anos 90 por Belytschko e Black [81]. O MEFX baseia-se no conceito de partição de unidade e pode ser implementado no método tradicional MEF pela introdução de funções de enriquecimento locais para os deslocamentos nodais perto da fenda para permitir o seu crescimento e separação entre as faces da fenda [82]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos à volta do percurso/extremidade da fenda.



## 3. Trabalho Experimental

Inicialmente é feita uma descrição aos materiais utilizados nos substratos e no adesivo, indicando as suas propriedades. Após esta descrição, são indicadas as várias dimensões e geometrias utilizadas para a realização deste trabalho (condição 1 e condição 2). De seguida, é feita uma descrição do processo utilizado para a maquinagem dos substratos, indicando as várias fases até ao processo da colagem da junta (fresagem, limpeza, granalhagem e limpeza). De seguida, é indicado o procedimento para a realização do processo de colagem, bem como o tempo de cura antes da realização dos ensaios de tração. São indicadas as condições utilizadas para a realização dos ensaios de tração. Para finalizar, são apresentados os resultados obtidos experimentalmente, sendo comentados estes resultados pelos gráficos das curvas  $P-\delta$ , pelas superfícies de rotura e pelos gráficos das forças de rotura.

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Substratos

O material utilizado para os substratos é a liga de alumínio AW6082 T651. Foi escolhida especificamente esta liga devido à sua ampla utilização na Europa sob diferentes formas extrudidas para diversas aplicações estruturais. Os resultados de tensão-deformação ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) da liga de alumínio AW6082 T651, obtidos de acordo com a norma ASTM-E8M-04, são apresentados na Figura 64 [10]. Apresenta-se também a aproximação que vai ser usada posteriormente na análise numérica. A liga de alumínio 6082 é uma liga de resistência média, sendo a liga com a maior resistência das ligas da série 6000 e apresentando uma excelente resistência à corrosão. Apresenta um  $E$  de  $70,07 \pm 0,83$  GPa, uma tensão de cedência ( $\sigma_y$ ) de  $261,67 \pm 7,65$ MPa, uma tensão de rotura ( $\sigma_f$ ) de  $324 \pm 0,16$ MPa e uma deformação de rotura ( $\varepsilon_f$ ) de  $21,70 \pm 4,24\%$ . Apresenta uma elevada resistência à tração (340MPa, como é especificado pelo fabricante, ver nos anexos a Tabela 9), obtido através do envelhecimento artificial, a uma temperatura de aproximadamente 180°C. Quando é soldada entre materiais deste tipo de liga, é recomendado o uso do fio de arame da liga 4043 [83]. Na Tabela 10 (ver anexos), pode-se visualizar a composição química deste tipo de liga.

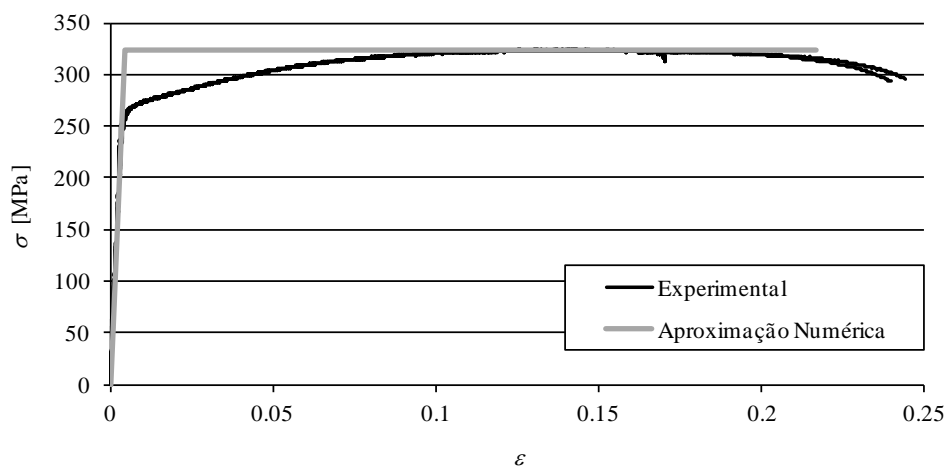


Figura 64 Curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  da liga de alumínio AW6082 T651 e respetiva aproximação para análise pelo MEF [10].



### 3.1.2 Adesivo

O adesivo utilizado neste trabalho foi o adesivo epóxico frágil Araldite<sup>®</sup> AV138. Este adesivo foi caracterizado anteriormente [10], e os resultados mais pertinentes são apresentados para a análise pelo MEF das juntas.

Na Figura 65 podem-se visualizar curvas típicas  $\sigma$ - $\varepsilon$  em tração para o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138, que mostram que este adesivo é extremamente frágil, devido ao valor reduzido de  $\varepsilon_f$  e ausência de plastificação antes da rotura. Devido à sua fragilidade, este adesivo é também mais sensível a defeitos de fabrico. Na Tabela 5 apresentam-se os parâmetros relevantes do adesivo.

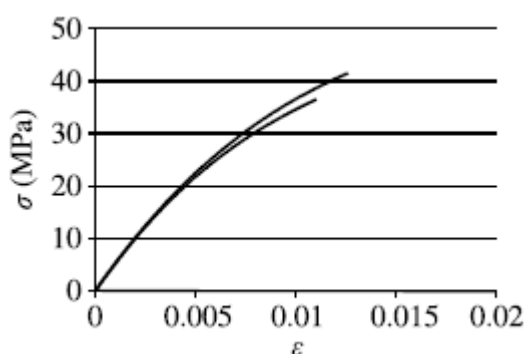


Figura 65 Curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  para o Araldite<sup>®</sup> AV138 [10].

Tabela 5 Propriedades do adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 [10].

| Propriedades                                  | AV138            |
|---|------------------|
| Módulo de Young, $E$ [GPa]                    | $4,89 \pm 0,81$  |
| Coefficiente de Poisson, $\nu$                | 0,35             |
| Tensão de Cedência, $\sigma_y$ [MPa]          | $36,49 \pm 2,47$ |
| Tensão de Rotura, $\sigma_f$ [MPa]            | $39,45 \pm 3,18$ |
| Deformação de Rotura, $\varepsilon_f$ [%]     | $1,21 \pm 0,10$  |
| Módulo de corte, $G$ [GPa]                    | $1,56 \pm 0,01$  |
| Tensão de Cedência ao corte $\tau_y$ [MPa]    | $25,1 \pm 0,33$  |
| Tensão de Rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]     | $30,2 \pm 0,40$  |
| Deformação de Rotura ao corte, $\gamma_f$ [%] | $7,8 \pm 0,7$    |

## 3.2 Geometrias estudadas

### 3.2.1 Dimensões e configurações de juntas

Foram testados dois tipos de alterações geométricas nos aderentes, para além da junta de sobreposição simples sem alteração geométrica (ver Figura 66): a junta de sobreposição simples com rasgo nos substratos nas extremidades da sobreposição, ver Figura 67 (condição 1), e a junta de sobreposição simples com rasgo nos substratos a meio da sobreposição, ver Figura 68 (condição 2). A junta de sobreposição simples sem alterações geométricas foi testada para servir de modelo de comparação com as alterações geométricas efetuadas.

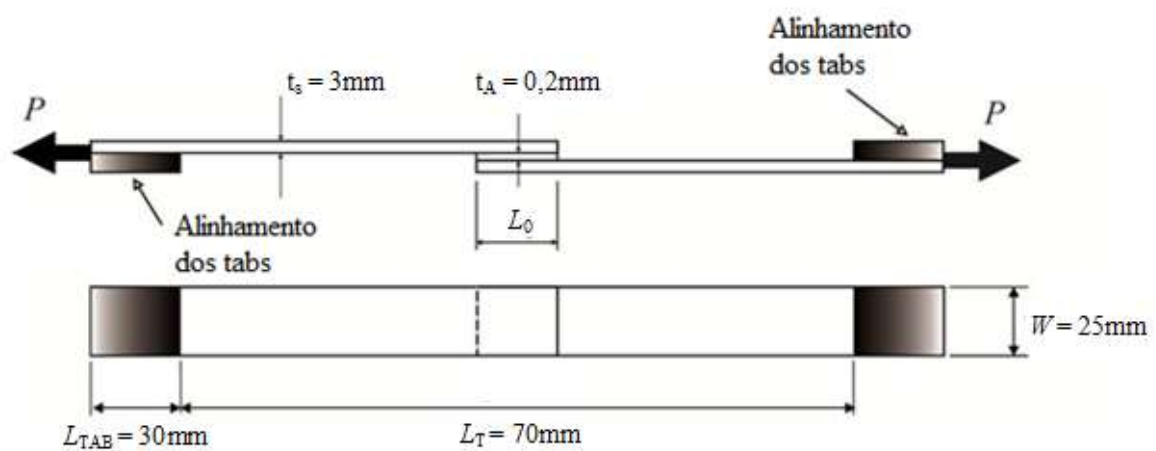


Figura 66 Dimensões e geometria da junta de sobreposição simples sem alteração geométrica.

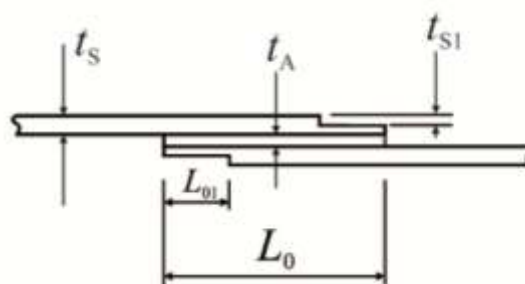


Figura 67 Detalhe de junta de sobreposição simples com alteração geométrica nos substratos nas extremidades da sobreposição (condição 1).

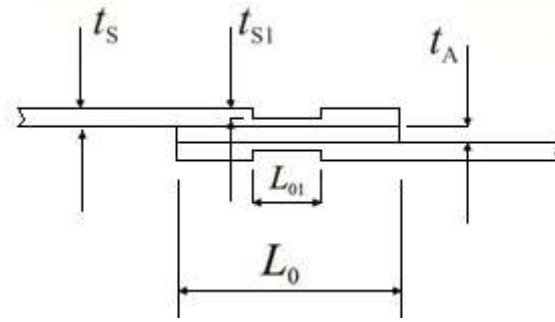


Figura 68 Detalhe da junta de sobreposição simples com alteração geométrica nos substratos a meio da sobreposição (condição 2).

Todas as juntas foram fabricadas com um valor idêntico de comprimento entre os pontos de amarração ( $L_T=170\text{mm}$ ), a espessura dos aderentes ( $t_S=3\text{mm}$ ), espessura de adesivo ( $t_A=0,2\text{mm}$ ), comprimento dos tabs ( $L_{TAB}=30\text{mm}$ ) e largura da junta ( $W=25\text{mm}$ ). Os tabs foram colados nas extremidades das juntas para garantir o alinhamento correto na máquina de ensaios.

Para a condição 1, foram estudados quatro valores de comprimento de sobreposição ( $L_0$ ): 15, 30, 45 e 60 mm. Para cada valor de  $L_0$ , foram estudadas combinações de rasgos com três comprimentos ( $L_{01}$ ) e duas profundidades ( $t_{s1}$ ). Os valores de  $t_{s1}$  foram de 1 e 2 mm e os valores de  $L_{01}$  foram de 15%, 30% e 45% do valor de  $L_0$ .

Para a condição 2, foram estudados quatro valores  $L_0$ : 15, 30, 45 e 60 mm. Para cada  $L_0$ , foram estudadas combinações de rasgos com um valor de  $L_{01}$  e dois valores de  $t_{s1}$ . Os valores de  $t_{s1}$  foram de 1 e 2 mm e os valores de  $L_{01}$  foram  $2/3 * L_0$ . A Tabela 6 resume as configurações estudadas para a condição 1 e condição 2.

Tabela 6 Configurações estudadas para a condição 1 e condição 2.

|                                       | $L_0$ [mm]      | $L_{01}$ [% - mm]     | $t_{s1}$ [mm] |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------------|---------------|
| Sem alteração geométrica              | 15, 30, 45 e 60 | -                     | -             |
| Com alteração geométrica (condição 1) | 15              | 15% * $L_0$ - 2,25mm  | 1, 2mm        |
|                                       |                 | 30% * $L_0$ - 4,5mm   |               |
|                                       |                 | 45% * $L_0$ - 6,75mm  |               |
|                                       | 30              | 15% * $L_0$ - 4,5mm   | 1, 2mm        |
|                                       |                 | 30% * $L_0$ - 9,0mm   |               |
|                                       |                 | 45% * $L_0$ - 13,5mm  |               |
|                                       | 45              | 15% * $L_0$ - 6,75mm  | 1, 2mm        |
|                                       |                 | 30% * $L_0$ - 15,75mm |               |

|                                       |    |  |        |
|---------------------------------------|----|--|--------|
|                                       |    | 45%* $L_0$ - 20,25mm   |        |
|                                       | 60 | 15%* $L_0$ - 9,0mm<br>30%* $L_0$ - 18,0mm<br>45%* $L_0$ - 27,0mm | 1, 2mm |
| Com alteração geométrica (condição 2) | 15 | $2/3 * L_0 = 10\text{mm}$  |        |
|                                       | 30 | $2/3 * L_0 = 20\text{mm}$  |        |
|                                       | 45 | $2/3 * L_0 = 30\text{mm}$  | 1, 2mm |
|                                       | 60 | $2/3 * L_0 = 40\text{mm}$  |        |

Neste trabalho, as várias configurações das juntas são representadas por JSS- $L_0$ - $L_{01}$ - $t_{s1}$  para cada condição. Para a condição 1, o valor de  $L_{01}$  é considerado, corresponde ao valor da percentagem do  $L_0$  em questão. Por exemplo, para a junta com  $L_0=15\text{mm}$ ,  $L_{01}=\mathbf{30\% * }L_0=4,5\text{mm}$  e  $t_{s1}=1\text{mm}$ , a sua representação á dada por JSS-15-**30**-1, enquanto para a condição 2, o valor de  $L_{01}$  corresponde ao valor de  $2/3 * L_0$ . Por exemplo, para a junta com  $L_0=15\text{mm}$ ,  $L_{01}=\mathbf{2/3 * }L_0=\mathbf{10\text{mm}}$  e  $t_{s1}=1\text{mm}$ , a sua representação á dada por JSS-15-**10**-1.

### 3.2.2 Maquinagem dos substratos

Os substratos foram cortados em barras de alumínio com cerca de 90 mm de comprimento, 25 mm de largura e 3 mm de espessura. Depois de cortados os substratos, foram maquinados numa fresadora para se obter os rasgos para a condição 1 e condição 2. Estes rasgos foram realizados nas oficinas do Instituto Superior de Engenharia do Porto, através de uma fresadora “Gambin” que trabalhou com um avanço de 10 mm/min. e uma velocidade de rotação de 1120 rot./min. Na Figura 69 e na Figura 70, pode-se observar como exemplo a fresagem para obtenção dos rasgos nos substratos (condição 2). Para a obtenção dos rasgos no aderente no final do comprimento de sobreposição, condição 1, o processo de fresagem foi idêntico.



Figura 69 Processo de fresagem para obtenção dos rasgos nos substratos (condição 2).



Figura 70 Rasgos nos substratos (condição 2) obtidos através do processo de fresagem.

Após se ter finalizado o processo de fresagem, e antes de se proceder à colagem dos substratos, todos os substratos foram sujeitos a dois tratamentos de superfície. Inicialmente os substratos foram limpos no seu todo com acetona, que é um processo passivo químico que tem como objetivo a limpeza de poeiras ou substâncias indesejadas e desgorduramento da superfície, e em seguida, os substratos foram sujeitos a uma projeção de alumina, ou seja, foram sujeitos a uma granalhagem, ver Figura 71, no Laboratório de Adesivos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. A granalhagem é um processo passivo mecânico que tem como objetivo remover camadas de óxido e aumentar a rugosidade da superfície e assim melhorar o processo de colagem. Após a granalhagem, os substratos voltaram a ser limpos com acetona na zona da ligação para eliminar poeiras indesejadas na superfície de colagem.



Figura 71 Granalhadora SABBIATRICE Sand Blaster utilizada para efetuar a granalhagem.

### 3.2.3 Fabrico dos provetes

Após a limpeza das superfícies dos substratos procedeu-se à colagem. Na colagem, tanto para a condição 1, como para a condição 2, foi utilizado o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138. Para se obter um provete completamente alinhado, colocaram-se previamente os substratos numa barra de suporte, presos por grampos de molas na posição correta, ver Figura 72. Entre os substratos e as barras de suporte colocaram-se tiras de teflon<sup>®</sup> para facilitar a remoção dos provetes após colagem. Para garantir a espessura da junta foi colado nas extremidades da sobreposição fio calibrado de pesca com 0,2mm através de fita-cola.



Figura 72 Aspeto dos substratos previamente colocados na barra de suporte com grampos de mola.

Por fim, através de uma espátula, foi aplicado o adesivo nos substratos que estavam na barra de suporte à temperatura ambiente de 20°-25°C. Assim que o adesivo foi aplicado, procedeu-se à montagem dos substratos na posição final, garantindo o correto alinhamento entre os mesmos, ver Figura 73.



Figura 73 Aspeto das juntas após o processo de montagem.

Após este processo foi necessário deixar a junta secar durante uns 30 minutos para se poder manusear o provete. De seguida, através de um alicate retirou-se o fio de pesca e com um x-ato retirou-se o excesso de adesivo, ficando o provete com o seu aspeto final, ver Figura 74 (condição 1) e Figura 75 (condição 2). Finalizado o processo de colagem foram deixados os provetes a curar, a uma temperatura ambiente, durante um período de uma semana, ficando depois prontos para a realização dos ensaios.

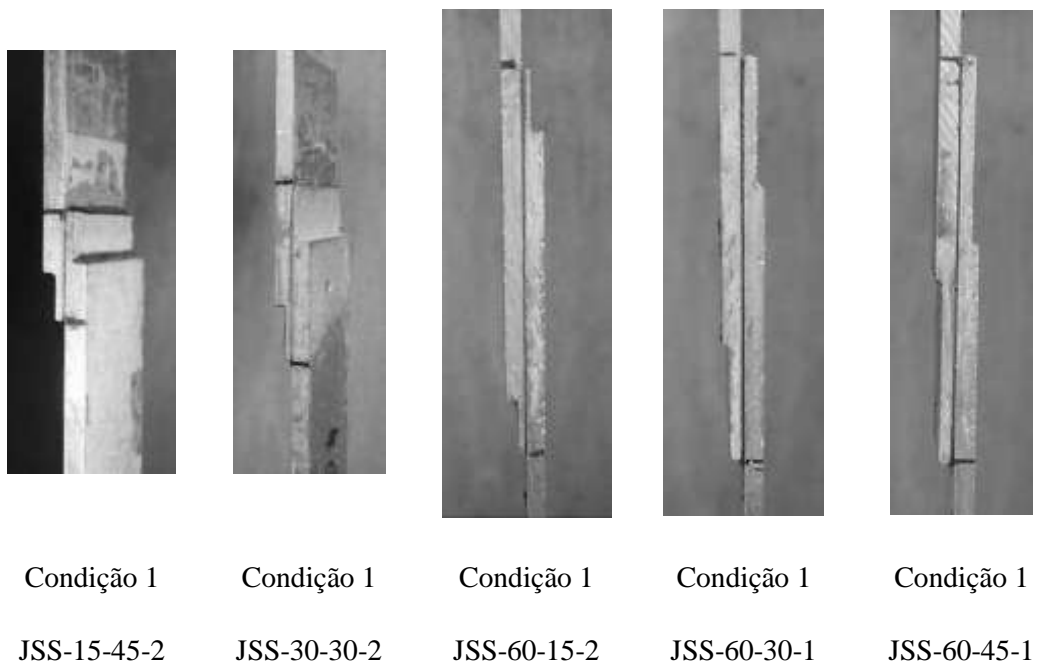


Figura 74 Alguns exemplos do aspeto final dos provetes para a condição 1.

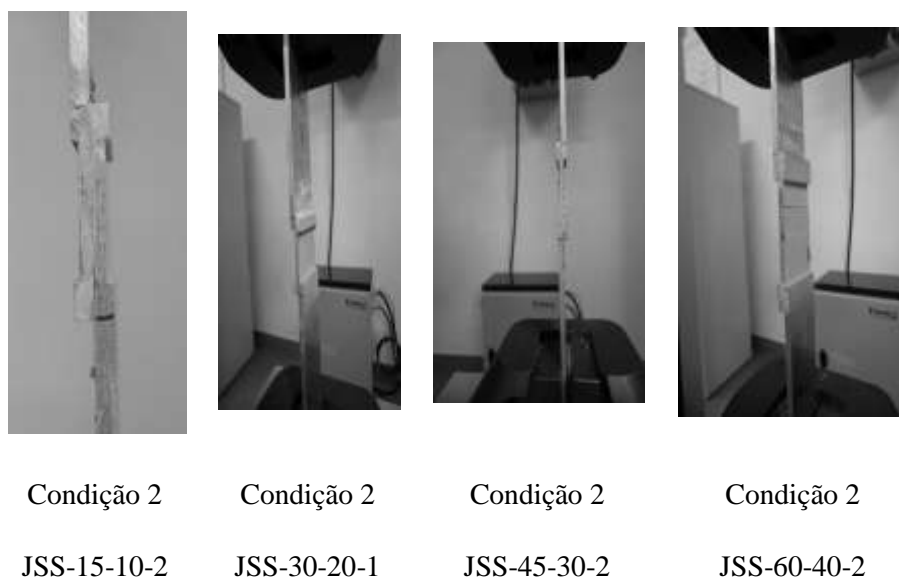


Figura 75 Alguns exemplos do aspeto final dos provetes para a condição 2.



### 3.3 Condições de ensaio

Passado o tempo necessário para a cura do adesivo, todos os provetes foram tracionados até à rotura obtendo-se as curvas  $P-\delta$ . Os ensaios de tração foram realizados numa máquina Shimadzu – Autograph AG-X com uma célula de carga de 100 kN, ver Figura 76, e os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, aproximadamente 22°C, a uma velocidade de ensaio de 1 mm/min e com uma distância de maxilas de 170 mm. Para cada configuração testada, foram obtidos no mínimo 4 ensaios validados.



Figura 76 Máquina Shimadzu - Autograph AG-X utilizada para realização dos ensaios à tração.

### 3.4 Resultados e comentários das juntas

#### 3.4.1 Condição 1

Na Figura 77 e Figura 78 pode-se observar as curvas  $P-\delta$  para algumas das configurações da condição 1 (junta de sobreposição simples com rasgo na extremidade da sobreposição). Como se pode verificar, as curvas  $P-\delta$  apresentam um comportamento linear até à rotura devido à fragilidade do adesivo utilizado e ausência de plastificação dos aderentes. Também se observa uma pequena variação para todas as configurações analisadas, em relação à força máxima atingida e ao deslocamento máximo até ocorrer a rotura da junta, o que comprova a boa repetibilidade dos ensaios.

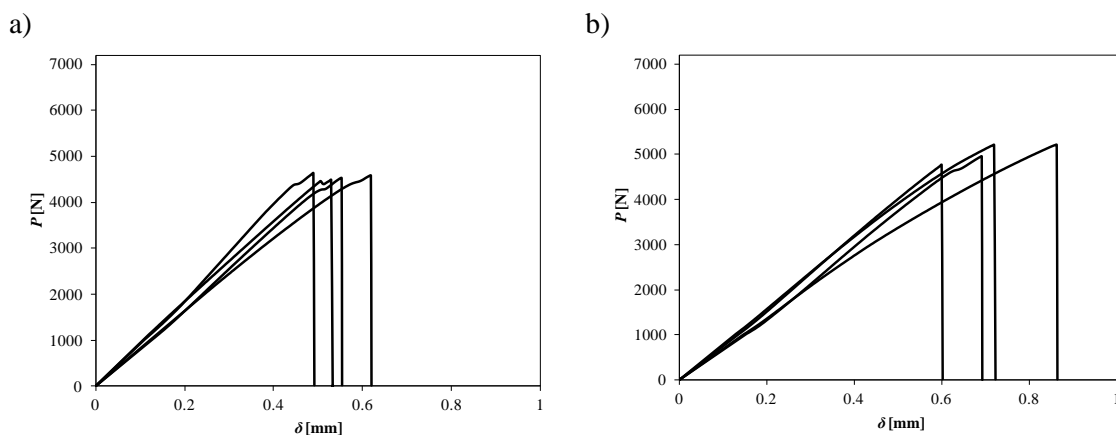


Figura 77 Gráficos das curvas  $P$ - $\delta$  para as configurações JSS-15-0-0 (a) e JSS-15-15-1 (b).

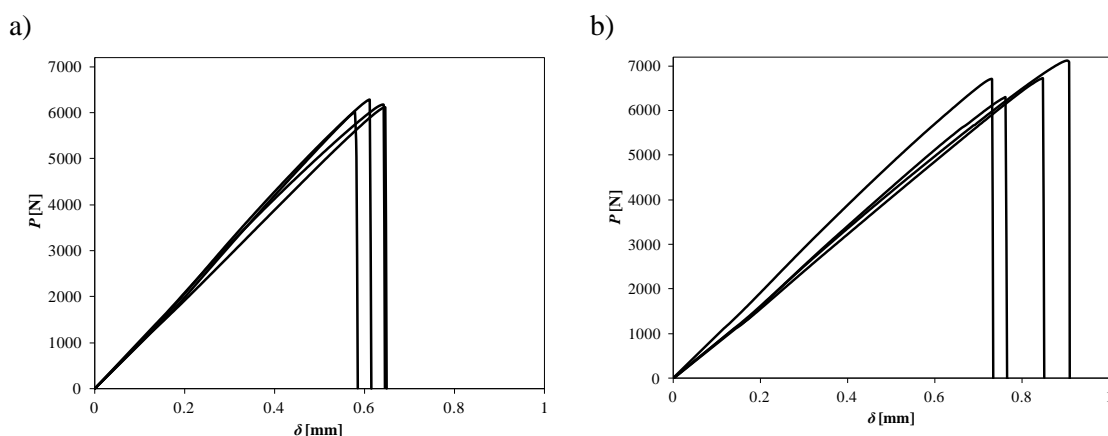


Figura 78 Gráficos das curvas  $P$ - $\delta$  para as configurações JSS-30-0-0 (a) e JSS-30-45-1 (b).

A Figura 79 mostra os valores de  $P_m$  e respectivos valores de desvio para as juntas de sobreposição simples sem alteração geométrica (configurações  $L_0$ -0-0). Como se pode observar, à medida que se vai aumentando  $L_0$ , o valor de  $P_m$  aumenta de forma aproximadamente linear, mas não proporcional.

Para JSS-15-0-0, JSS-30-0-0, JSS-45-0-0 e JSS-60-0-0, obteve-se uma força máxima de 4584,75N, 6186,18N, 7589,18N e 9253N, respetivamente. Comparando com o comprimento de sobreposição menor ( $L_0=15$ mm), para  $L_0=30$ mm obteve-se uma melhoria de 34,93%, o que corresponde em termos absolutos a 1601N. Para  $L_0=45$ mm, obteve-se uma melhoria de 65,53%, correspondendo em termos absolutos a 3004N e para  $L_0=60$ mm, obteve-se aproximadamente o dobro da resistência de JSS-15-0-0, o que corresponde em termos absolutos a uma melhoria de 4668,25N.

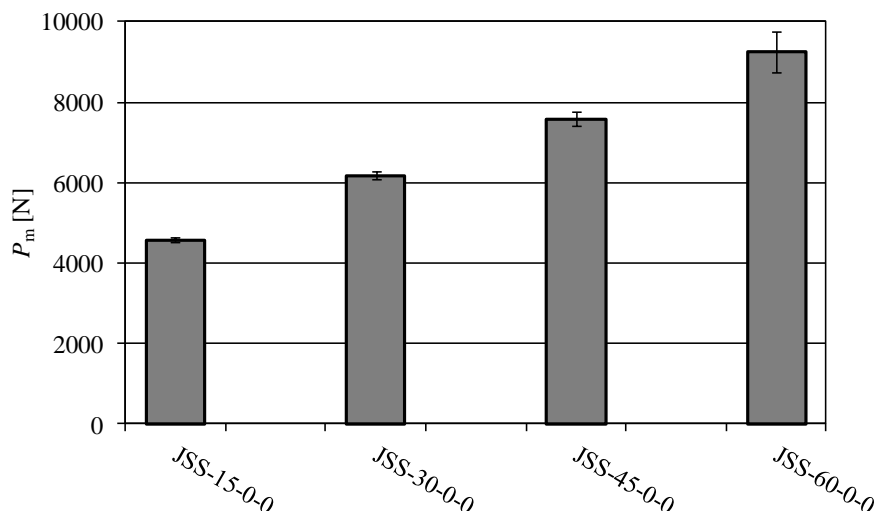


Figura 79 Comparação dos valores experimentais de  $P_m$  para juntas de sobreposição simples sem alteração geométrica para as configurações  $L_0-0-0$ .

A Figura 80 mostra a superfície de rotura para a condição 1 com a configuração JSS-30-30-1, correspondente a rotura coesiva no adesivo. Este tipo de rotura ocorreu em geral, para todas as configurações da condição 1, o que comprova a correta preparação das juntas, cujos princípios gerais são descritos na secção 3.2.3.



Figura 80 Superfícies de rotura para a configuração JSS-30-30-1 (condição 1).

Na Figura 81, Figura 82, Figura 83 e Figura 84 pode-se observar os valores médios de  $P_m$  e respetivos desvios (correspondentes a 4 ensaios para cada configuração), para todas as configurações da condição 1. A justificação dos comportamentos obtidos para todos os valores deste capítulo será discutida em detalhe no capítulo 4.3.1.3, após a

descrição dos campos de tensões nas diferentes juntas, para uma justificação adequada dos valores e tendências obtidos.

Começando por  $L_0=15\text{mm}$ , ver Figura 81, os resultados mostram uma ligeira melhoria para  $t_{s1}=1\text{mm}$ . Para as juntas JSS-15-15-1, JSS-15-30-1 e JSS-15-45-1, a  $P_m$  obtida foi de 4976N, 5124N e 5110N, respetivamente, o que significa que em relação à junta JSS-15-0-0, obteve-se uma melhoria em termos percentuais de 8,53%, 11,76% e 11,46%, respetivamente. Em termos absolutos, o maior incremento de resistência corresponde a 539,25N, quando comparado com a junta não modificada.

Com o aumento da profundidade do rasgo, ou seja, para  $t_{s1}=2\text{mm}$ , existe uma melhoria mais acentuada para as juntas testadas, comparativamente com a JSS-15-0-0. Para as juntas JSS-15-15-2, JSS-15-30-2 e JSS-15-45-2, os valores de  $P_m$  foram de 5242N, 5640N e 5956N, respetivamente, correspondendo a um aumento percentual de 14,33%, 23,02% e 29,91%, respetivamente. De todas as configurações testadas para  $L_0=15\text{mm}$ , a JSS-15-45-2 foi a que em termos absolutos obteve um maior incremento no valor de  $P_m$  (1371,25N).

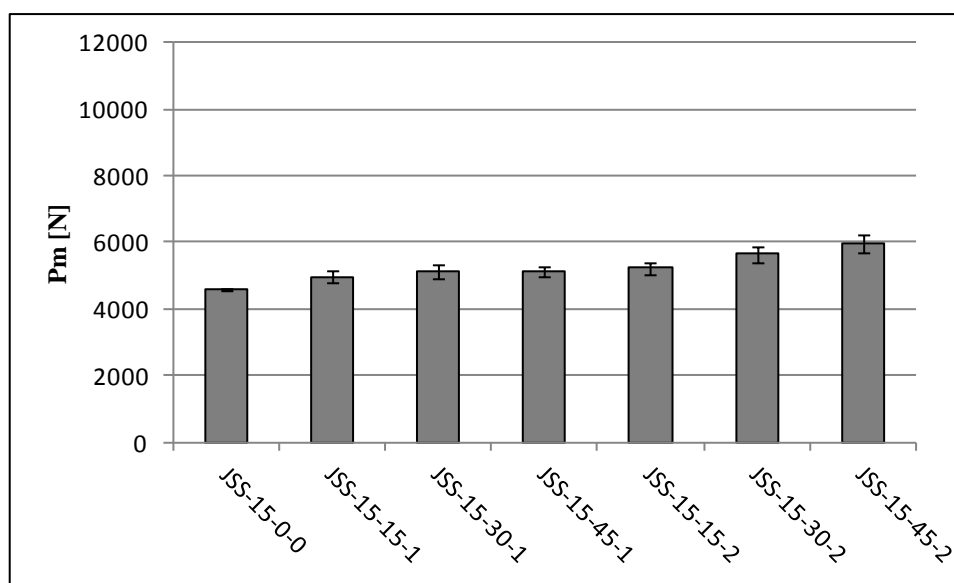


Figura 81 Valores  $P_m$  experimentais para as configurações  $L_0=15\text{mm}$  da condição 1.

Relativamente ao comprimento de sobreposição  $L_0=30\text{mm}$ , ver Figura 82, tal como para a condição anterior ( $L_0=15\text{mm}$ ), com as modificações aplicadas nos aderentes foi possível obter um aumento de  $P_m$ . Para uma profundidade  $t_{s1}=1\text{mm}$  e para as juntas JSS-30-15-1, JSS-30-30-1 e JSS-30-45-1 obteve-se valores de  $P_m$  de 6528N, 6677N e 6710N,

respetivamente, o que corresponde a uma melhoria em termos percentuais de 5,53%, 7,94% e 8,48%, respetivamente. Em termos absolutos, o maior incremento de  $P_m$  foi o da junta JSS-30-45-1, em que se obteve uma melhoria de 524,26N.

Com a profundidade do rasgo  $t_{s1}=2\text{mm}$ , obteve-se melhorias mais acentuadas para as juntas testadas. Para as juntas JSS-30-15-2, JSS-30-30-2 e JSS-30-45-2 obteve-se valores de  $P_m$  de 7538N, 7752N e 7839N, respetivamente, o que corresponde a uma melhoria em termos percentuais de 21,85%, 25,32% e 26,71%, respetivamente. De todas as configurações testadas para  $L_0=30\text{mm}$ , a JSS-30-45-2 foi a que em termos absolutos obteve um maior aumento do valor de  $P_m$  (1652,57N).

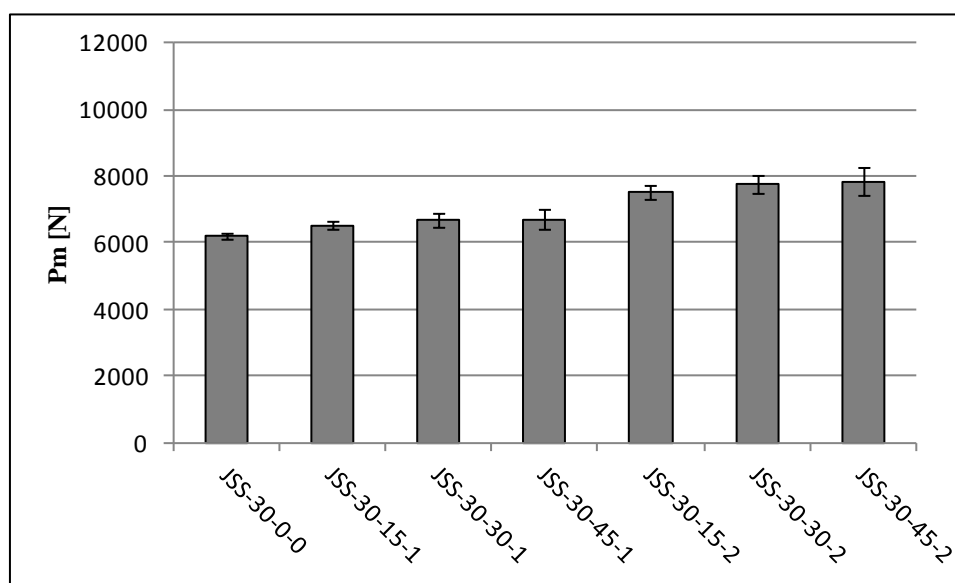


Figura 82 Valores  $P_m$  experimentais para as configurações  $L_0=30\text{mm}$  da condição 1.

Com um comprimento de sobreposição  $L_0=45\text{mm}$ , ver Figura 83, obtiveram-se melhorias bastante significativas para a totalidade das alterações geométricas testadas. Para  $t_{s1}=1\text{mm}$ , nas juntas JSS-45-15-1, JSS-45-30-1 e JSS-45-45-1 obteve-se valores de  $P_m$  de 7584N, 8003N e 8065N, respetivamente. Para a junta JSS-45-15-1, o valor obtido é praticamente o mesmo que para a junta JSS-45-0-0, enquanto para as juntas JSS-45-30-1 e JSS-45-45-1 houve uma melhoria em termos percentuais de 5,45% e 6,26%, respetivamente. Em termos absolutos, o maior incremento no valor de  $P_m$  obtido foi de 475,36N para a junta JSS-45-45-1 (comparando com  $L_0=0-0$ ).

Com a profundidade do rasgo  $t_{s1}=2\text{mm}$ , obteve-se melhorias ainda mais acentuadas para as juntas testadas. Para as juntas JSS-45-15-2, JSS-45-30-2 e JSS-45-45-2, obteve-se

valores de  $P_m$  de 8970N, 9368N e 9730N, respectivamente, o que corresponde a uma melhoria em termos percentuais de 18,20%, 23,44% e 28,21%, pela mesma ordem. De todas as configurações testadas para  $L_0=45\text{mm}$ , a JSS-45-45-2 foi a que em termos absolutos obteve um maior aumento do valor de  $P_m$  (2140N).

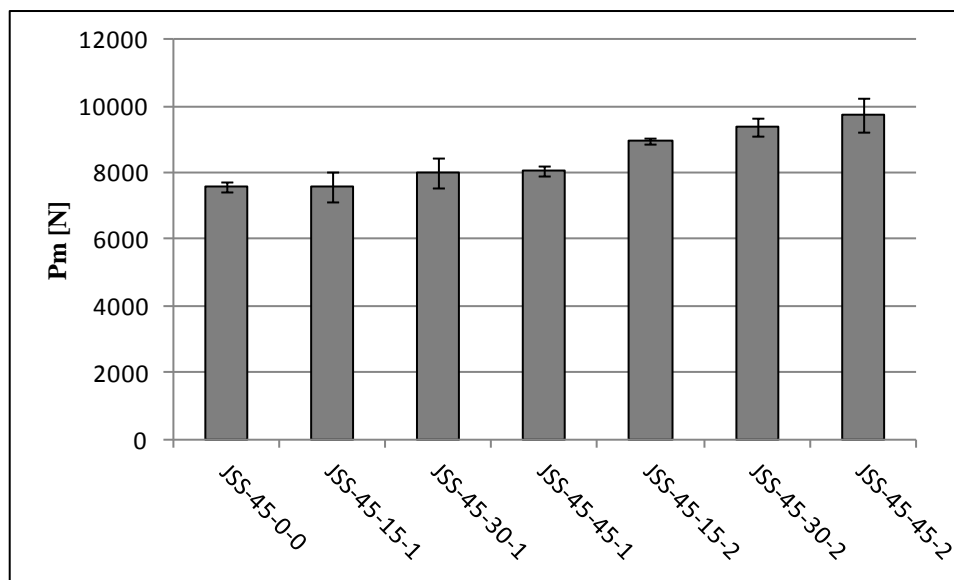


Figura 83 Valores  $P_m$  experimentais para as configurações  $L_0=45\text{mm}$  da condição 1.

Para as configurações modificadas com  $L_0=60\text{mm}$  (Figura 84), obteve-se melhorias bastante significativas com a aplicação da alteração geométrica nos aderentes, no entanto, ocorreram algumas oscilações nos resultados obtidos, nomeadamente para a JSS-60-30-1, JSS-60-45-1 e JSS-60-30-2, devido à existência de alguns problemas na preparação das juntas, como por exemplo, a força das molas não ter sido suficiente para manter a pressão constante e suficiente num comprimento de sobreposição tão elevado, o que poderá ter levado à obtenção de valores de  $t_A$  diferentes de 0,2mm, prejudicando assim a ligação colada. Para a profundidade  $t_{s1}=1\text{mm}$ , para as juntas JSS-60-15-1, JSS-60-30-1 e JSS-60-45-1, obteve-se valores de  $P_m$  de 10052N, 9688N e 8663N, respectivamente. Devido à existência de alguns problemas na preparação das juntas, para a junta JSS-60-45-1, houve uma diminuição da resistência em cerca de 10%, enquanto para as juntas JSS-60-15-1 e JSS-60-30-1 obteve-se uma melhoria em termos percentuais de 5,56% e 4,5%, respectivamente. Em termos absolutos, o maior incremento de  $P_m$  foi de 529N, correspondente à junta JSS-60-15-1 (comparativamente a  $L_0=0-0$ ).

Com a profundidade do rasgo  $t_{s1}=2\text{mm}$ , obteve-se melhorias mais acentuadas para as juntas testadas. Para as juntas JSS-60-15-2, JSS-60-30-2 e JSS-60-45-2, obteve-se

valores de  $P_m$  de 10651N, 10477N e 10874N, respetivamente, o que corresponde a uma melhoria em termos percentuais de 11,84%, 10,02% e 14,19%, pela mesma ordem. De todas as configurações testadas para  $L_0=60\text{mm}$ , a JSS-60-45-2 foi a que em termos absolutos obteve um maior incremento de  $P_m$  (1351N).

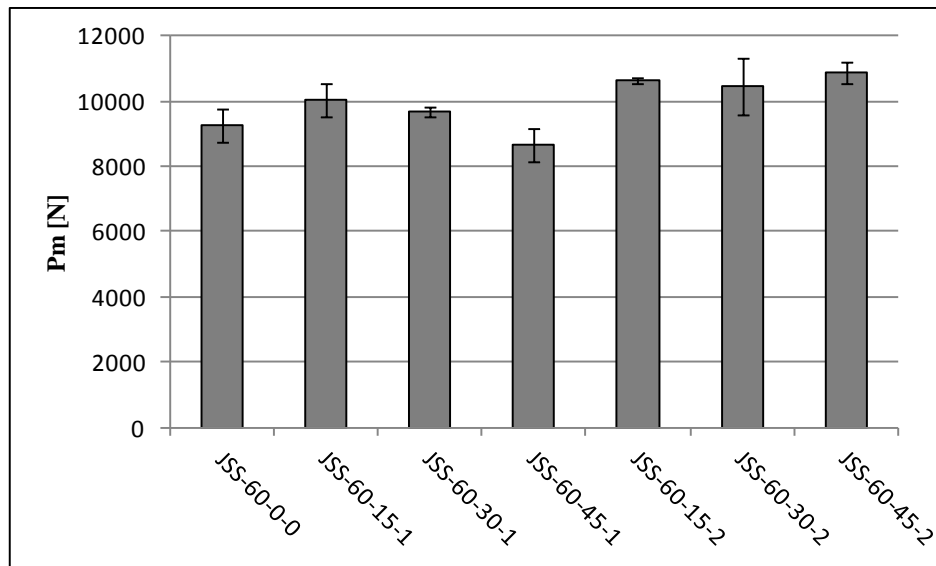


Figura 84 Valores  $P_m$  experimentais para as configurações  $L_0=60\text{mm}$  da condição 1.

### 3.4.2 Condição 2

Na Figura 85 e na Figura 86 podem-se observar as curvas  $P-\delta$  para algumas das configurações analisadas para a condição 2 (junta de sobreposição simples com rasgo a meio do comprimento de sobreposição). Tal como na condição 1, também para a condição 2 estes gráficos apresentam um comportamento linear até à rotura devido à fragilidade do adesivo utilizado e ausência de plastificação dos aderentes. Como também se pode verificar, as curvas  $P-\delta$  apresentam uma variação reduzida para todas as configurações analisadas, em relação à força máxima atingida e ao deslocamento máximo até ocorrer a rotura da junta, o que comprova a boa repetibilidade dos ensaios.

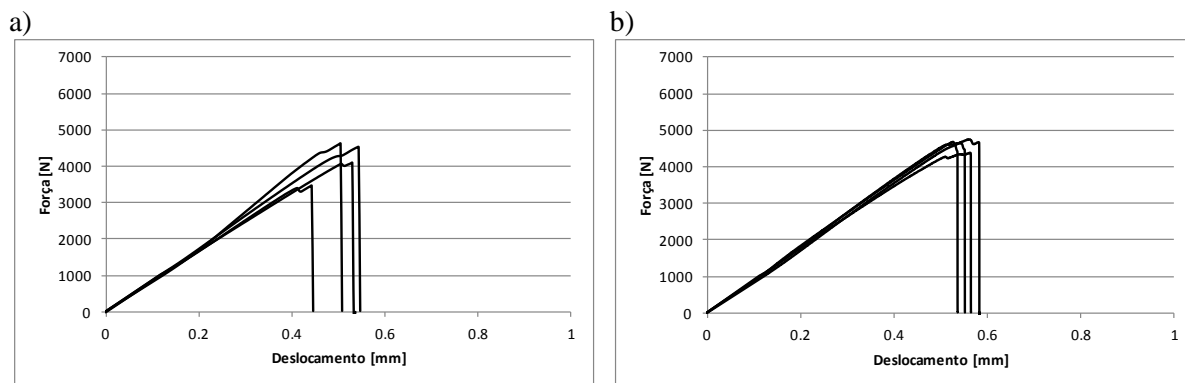


Figura 85 Gráficos das curvas  $P-\delta$  para as configurações JSS-15-0-0 (a) e JSS-15-10-1 (b).

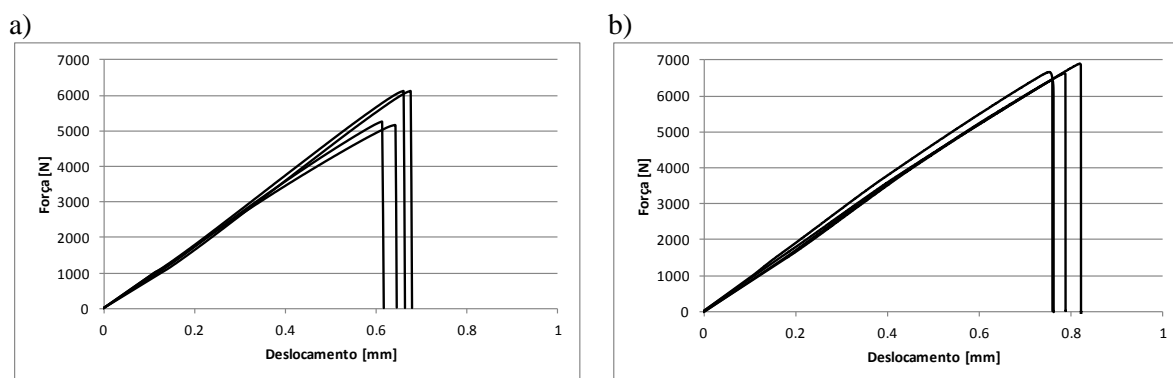


Figura 86 Gráficos das curvas  $P-\delta$  para as configurações JSS-30-0-0 (a) e JSS-30-20-1 (b).

A Figura 87 mostra a superfície de rotura para a JSS-15-10-1. A rotura ocorreu por falha coesiva no adesivo. Este tipo de rotura ocorreu em geral para todas as configurações da condição 2, o que comprova a correta preparação das juntas, cujos princípios gerais são descritos na secção 3.2.3.

Para algumas configurações, nas combinações com valores de  $L_0$  e  $L_{01}$  mais elevados, nomeadamente para JSS-45-30-2, JSS-60-40-1 e JSS-60-40-2, ocorreu na zona de menor espessura (na zona do degrau) uma ligeira deformação plástica nos aderentes, ver Figura 88.





Figura 87 Superfície de rotura para a configuração JSS-15-10-1 (condição 2).



Figura 88 Aspecto da plastificação ocorrida nos substratos para a configuração JSS-60-40-2 (condição 2).

Na Figura 89 pode-se observar os valores de  $P_m$  para todas as configurações da condição 2. Pode-se afirmar que houve sempre um aumento da resistência com o aumento de  $L_0$  e  $t_{s1}$ .

Para o comprimento de sobreposição  $L_0=15\text{mm}$  sem alteração geométrica, JSS-15-0-0, a  $P_m$  obtida foi de 4584,75N. Para este  $L_0$  não houve grande aumento de resistência

com as alterações efetuadas nos remendos, já que para a alteração geométrica JSS-15-10-1 a resistência foi de 4613,26N e para JSS-15-10-2 de 4633,26N, originando melhorias de 0,62% e 1,06%, respetivamente. Com o aumento de  $t_{s1}$  também não se alterou de forma significativa o valor de  $P_m$ . Como exemplo, comparando as configurações JSS-15-10-1 a JSS-15-10-2, obteve-se apenas um aumento de  $P_m$  de 0,45%, o que corresponde em termos absolutos a 20N.

Relativamente ao comprimento de sobreposição  $L_0=30\text{mm}$ , obteve-se para JSS-30-0-0 um valor de  $P_m$  de 6186,18N, e para as alterações geométricas JSS-30-20-1 e JSS-30-20-2, obteve-se valores de 6654,79N e 8411,26N, respetivamente, o que corresponde a uma melhoria de 7,58% para JSS-30-20-1 e 35,97% para JSS-30-20-2, ambas em relação a JSS-30-0-0. Para este comprimento de sobreposição, com o aumento da profundidade do rasgo, de  $t_{s1}=1\text{mm}$  para  $t_{s1}=2\text{mm}$  (JSS-30-20-1 para JSS-30-20-2), obteve-se uma melhoria significativa de  $P_m$  (28,39%), o que corresponde a um aumento de 1756,47N.

Com  $L_0=45\text{mm}$ , para JSS-45-0-0, obteve-se o valor de  $P_m$  de 7589,18N e com as alterações geométricas JSS-45-30-1 e JSS-45-30-2, obteve-se valores de  $P_m$  de 8748,57N e 10173,62N, respetivamente, originando um aumento da resistência de 15,28% para JSS 45-30-1 e 34,05% para JSS 45-30-2 ambos em relação a JSS-45-0-0. Com o aumento da profundidade do rasgo de  $t_{s1}=1\text{mm}$  para  $t_{s1}=2\text{mm}$  (JSS-45-30-1 para JSS-45-30-2), obteve-se uma melhoria bastante significativa da força máxima de 18,77%, o que corresponde a um aumento de 1425,05N.

Para o comprimento de sobreposição  $L_0=60\text{mm}$ , para JSS-60-0-0, obteve-se uma  $P_m$  de 9253N e com as alterações geométricas JSS-60-40-1 e JSS-60-40-2, obteve-se valores de  $P_m$  de 10238,48N e 10452,79N, respetivamente. Com a alteração geométrica JSS-60-40-1 o valor de  $P_m$  manteve-se praticamente inalterado relativamente a JSS-60-0-0, enquanto para a alteração geométrica JSS-60-40-2 houve um aumento da resistência de 12,97%, (comparativamente com a junta JSS-60-0-0). Com o aumento da profundidade do rasgo de  $t_{s1}=1\text{mm}$  para  $t_{s1}=2\text{mm}$  (JSS-60-40-1 para JSS-60-40-2), obteve-se uma melhoria de 2,32%, o que corresponde a um aumento absoluto de 214,31N.

Do conjunto de configurações testadas, a junta JSS-45-30-2 foi a que obteve o maior aumento de resistência relativamente à junta não modificada correspondente com 34,05% (2584,44N), e a junta JSS-15-10-1 foi a que obteve um menor aumento de resistência (comparativamente à junta sem alteração geométrica correspondente  $L_0=0-0$ ), com 0,62% (28,51N).

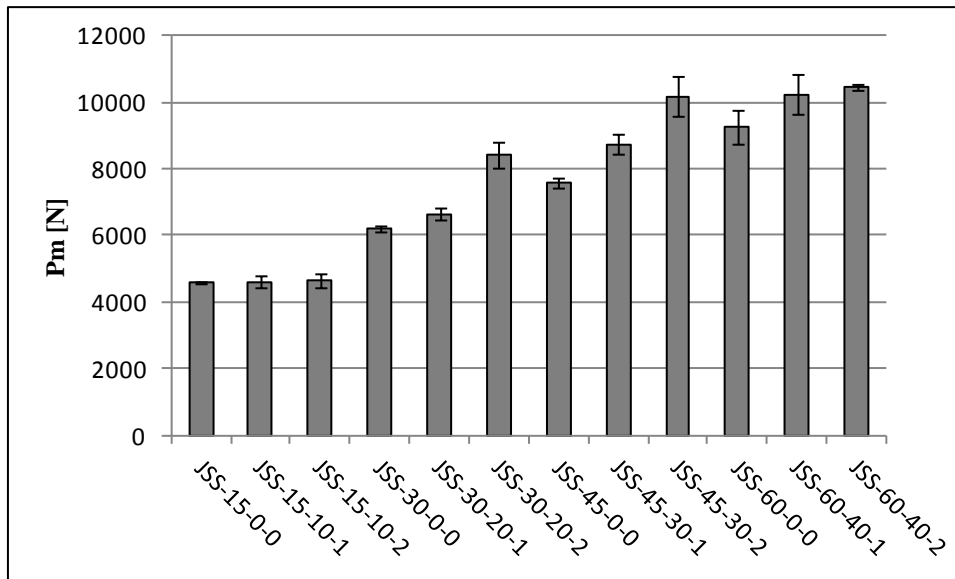


Figura 89 Valores  $P_m$  experimentais para cada configuração da condição 2.



## 4. Trabalho Numérico

Inicialmente neste capítulo é feita uma descrição das condições da análise numérica que foram utilizadas neste trabalho, como por exemplo, quais os elementos utilizados, o refinamento da malha e as condições fronteira utilizadas. Após esta descrição, procedeu-se à explicação do MDC utilizado na análise numérica, mais especificamente o modelo do dano triangular, e quais as propriedades coesivas utilizadas. Neste subcapítulo, é também descrita a forma como se procede à determinação das propriedades coesivas do adesivo. Para finalizar, para cada condição estudada, é realizada uma análise de tensões e uma previsão do comportamento das juntas, através dos modos de rotura, das curvas  $P-\delta$  e da resistência das juntas.

#### 4.1 Condições da análise numérica

As simulações pelo MEF foram realizadas no software ABAQUS® e foram consideradas não linearidades geométricas nos modelos, para representar adequadamente as deformações transversais significativas nas juntas [8, 83]. Os aderentes de alumínio foram modelados por elementos contínuos como um material isotrópico de comportamento elástico-perfeitamente plástico definido na Figura 64. O comportamento do adesivo foi modelado por elementos coesivos. As análises de elementos finitos foram realizadas em duas dimensões e considerando o estado plano de deformação, como sendo a condição mais adequada para a geometria em análise, nomeadamente a largura considerável da junta em comparação  $t_s$ , ver Figura 66.

A Figura 90 mostra uma malha representativa para a condição 1, ou seja, para uma junta de sobreposição simples com rasgo nas extremidades do comprimento de sobreposição, com comprimento de sobreposição  $L_0=15\text{mm}$ , comprimento do rasgo  $L_{01}=15\%*L_0$  e profundidade do rasgo  $t_{s1}=1\text{mm}$  e a Figura 91 mostra uma malha representativa para a condição 2, ou seja, para uma junta de sobreposição simples com rasgo a meio do comprimento de sobreposição, com  $L_0=15\text{mm}$ ,  $L_{01}=2/3*L_0$  e  $t_{s1}=1\text{mm}$ .

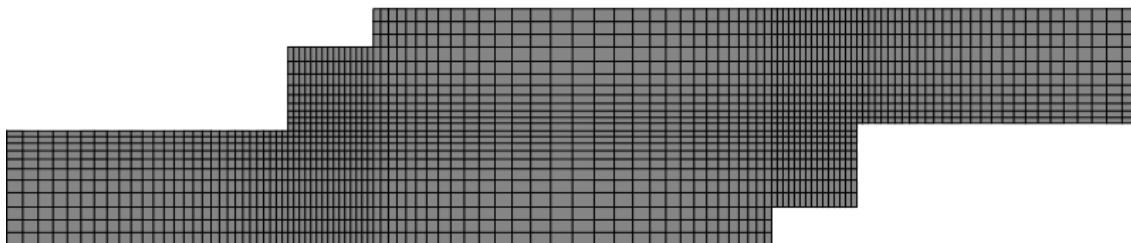


Figura 90 Detalhes da malha para o modelo da condição 1 com  $L_0=15\text{mm}$ ,  $L_{01}=15\%*L_0$  e  $t_{s1}=1\text{mm}$ .

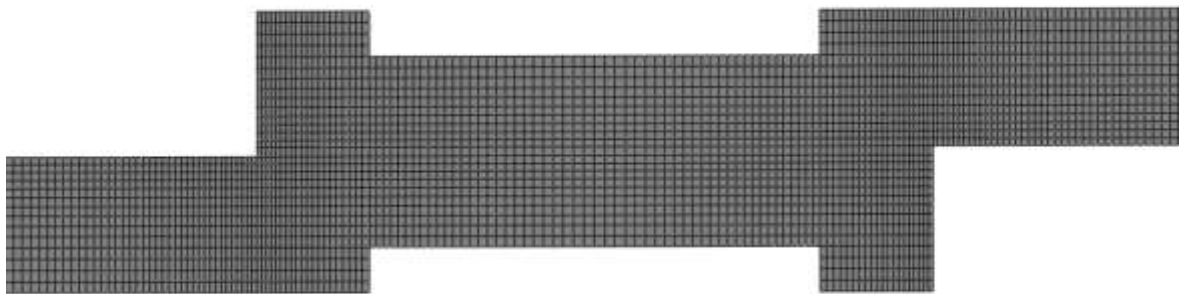


Figura 91 Detalhes da malha para o modelo da condição 2 com  $L_0=15\text{mm}$ ,  $L_{01}=2/3*L_0$  e  $t_{s1}=1\text{mm}$ .

As malhas foram construídas com gradação do tamanho dos elementos, com um maior refinamento nas extremidades da junta, na região do entalhe e na direção da camada de adesivo, para representar com precisão os gradientes de tensão esperados nessas regiões. Este processo foi realizado na ABAQUS® através da criação de “sementes” com espaçamento pré-definidos, nas arestas dos modelos, e que serviram de base à geração da malha. Na Figura 92 pode-se visualizar com mais detalhe para a condição 1 a zona do entalhe na extremidade da sobreposição. Esta figura foi separada por zonas (Zona 1, Zona 2 e Zona 3) onde a Zona 1 corresponde à zona do entalhe, a Zona 2 à transição entre as regiões de sobreposição e aderente e a Zona 3 à região da sobreposição. Como já foi referido anteriormente, a malha foi mais refinada nas zonas 1 e 2. Na zona 1, na direção H1 (direção horizontal do entalhe), foram utilizadas 15 sementes igualmente espaçadas entre si, e na direção V1 (direção vertical do entalhe), 3 sementes igualmente espaçadas. Em relação à zona 2, na direção H2 (direção horizontal desde a extremidade de um dos aderentes da junta, até à extremidade da sobreposição), consideraram-se 80 sementes, com maior refinamento na direção da extremidade da sobreposição. Na direção V2 (direção vertical da extremidade da sobreposição), a malha contém 8 sementes, com refinamento crescente na direção da seta V2, como se pode observar na Figura 92. Na zona 3, direção H3 a malha contém 30 sementes, com aumento de refinamento na direção da zona do entalhe.

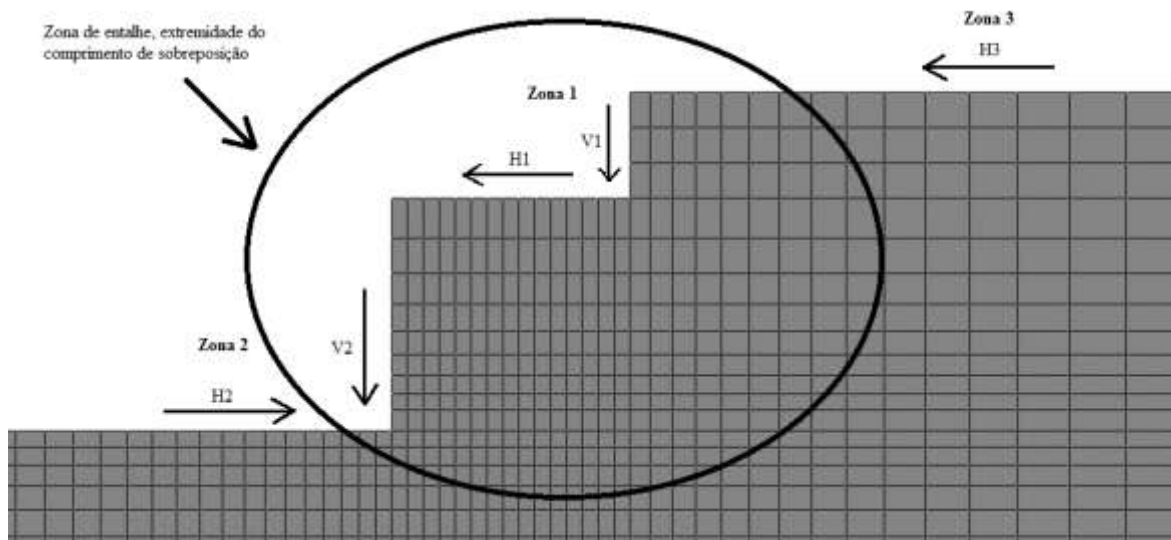


Figura 92 Pormenor do refinamento da malha na zona do entalhe e extremidade do comprimento de sobreposição.

Na Figura 93 pode-se visualizar com mais detalhe, para a condição 2 a zona do rasgo na extremidade da sobreposição. Esta figura também foi separada por zonas (Zona 1, Zona 2 e Zona 3), onde a Zona 1 corresponde à zona entre o rasgo e a extremidade da sobreposição, a Zona 2 à transição entre as regiões de sobreposição e do aderente e a Zona 3 corresponde à zona do rasgo a meio da sobreposição. Tal como a condição 1, para a condição 2 a malha foi mais refinada nas zonas 1 e 2 já que a malha apresenta um maior refinamento à medida que se vai aproximando da extremidade do comprimento de sobreposição. Na zona 1, na direção H1 (direção horizontal desde o rasgo até à extremidade do comprimento de sobreposição), consideraram-se 20 sementes com aumento do refinamento na direção da extremidade da sobreposição. Em relação à zona 2, na direção H2 (direção horizontal desde a extremidade de um dos aderentes da junta, até à extremidade do comprimento de sobreposição), existem 160 sementes, igualmente com gradação de tamanho para maior refinamento nas extremidades da sobreposição. Na direção V2 (direção vertical da extremidade do comprimento de sobreposição), a malha contém 14 sementes, com aumento de refinamento na direção do adesivo. Na zona 3, na direção H3 (direção horizontal no rasgo), a malha contém 32 sementes, com gradação de tamanho na direção da extremidade da sobreposição. Na direção V3 (direção vertical no rasgo), a malha contém 4 sementes igualmente espaçadas entre si.



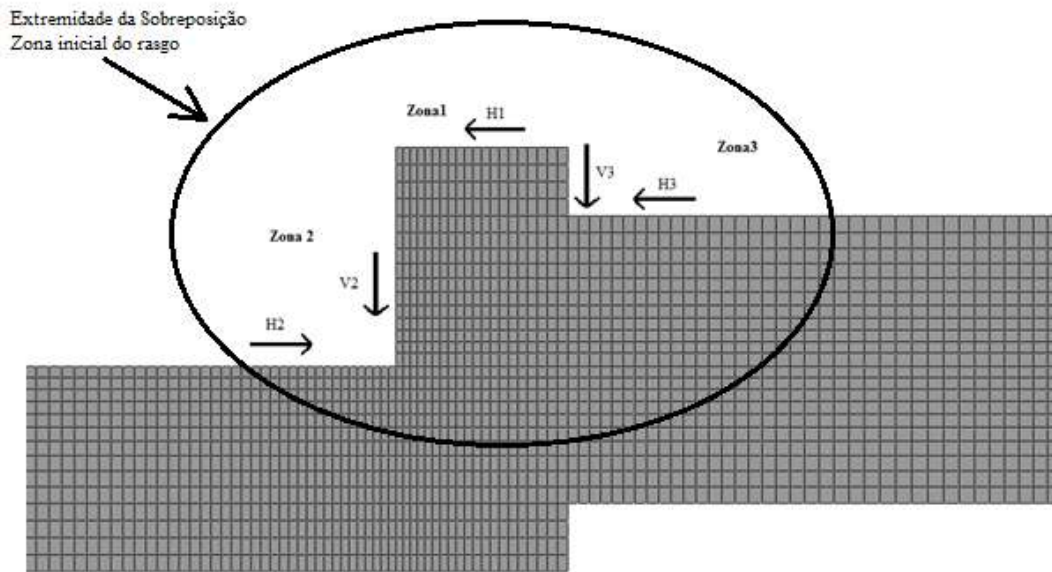


Figura 93 Pormenor do refinamento da malha na zona do rasgo e extremidade da sobreposição.

Para ambas as condições, os modelos de elementos finitos foram construídos com elementos sólidos de 4 nós (CPE4 do ABAQUS<sup>®</sup>) e elementos coesivos (COH2D4 do ABAQUS<sup>®</sup>). As condições fronteira foram definidas de forma a simular o mais real possível as condições de teste na máquina de tração, e como tal, as juntas foram encastradas numa das extremidades e submetidas a um deslocamento de tração juntamente com restrição vertical na extremidade oposta [87]. A camada de adesivo foi modelada por uma linha de elementos coesivos baseados num modelo triangular de tração-separação, apresentado no capítulo seguinte. A formulação proposta inclui um modelo de propagação de dano em modo misto, para ter em conta o efeito conjunto dos esforços de arrancamento e de corte, tal como definido mais adiante neste trabalho. A técnica de modelação proposta está implementada no ABAQUS<sup>®</sup> CAE e será descrita de forma sucinta na secção seguinte.

## 4.2 Modelo de dano coesivo

Os MDC baseiam-se numa relação entre as tensões e os deslocamentos relativos (tração ou corte) que ligam os nós homólogos dos elementos coesivos, ver Figura 94, para simular o comportamento elástico até à resistência máxima ( $t_n^0$  em tração ou  $t_s^0$  em corte) e subsequentemente degradação das propriedades dos materiais até à rotura. A forma da lei coesiva na zona de degradação também pode ser ajustada para reproduzir de forma fiel o comportamento de materiais distintos. As áreas sob as leis de tração-separação em tensão ou corte ( $G_n$  ou  $G_s$ , respetivamente) são igualadas à tenacidade à fratura em tração ( $G_n^c$ ) ou

em corte ( $G_s^c$ ), pela respetiva ordem, para aferir a propagação do dano. Sob uma solitação de tração ou corte puros, o comportamento dos materiais segue a lei respetiva até à rotura. Sob uma carga combinada (tração e corte), são usualmente utilizados critérios de tensões ou energéticos para combinar os dois modos de solitação, dando origem a uma lei de modo misto (Figura 94).

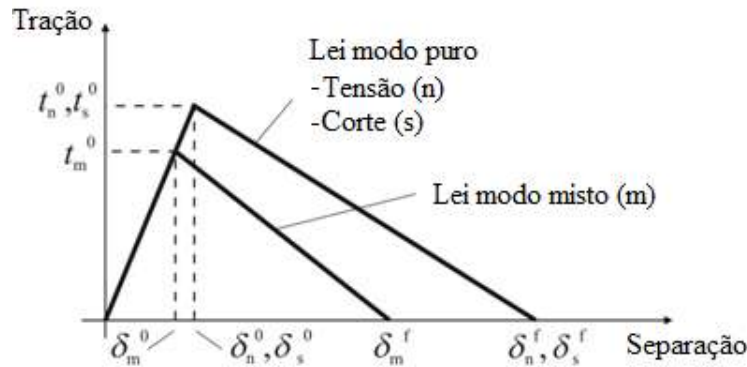


Figura 94 Lei de tração-separação triangular disponível no ABAQUS®.

#### 4.2.1 Modelo de dano triangular

A lei triangular, ver Figura 94, assume inicialmente um comportamento linear elástico, seguido de degradação linear. A elasticidade é definida por um matriz constitutiva ( $\mathbf{K}$ ), que contém os parâmetros de rigidez, para relacionar as tensões e deformações em tração e corte ao longo dos elementos coesivos (subscritos n e s, respetivamente).

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

Para camadas finas de adesivo, uma aproximação viável é dada por  $K_{nn} = E$ ,  $K_{ss} = G$  e  $K_{ns} = 0$ . A iniciação do dano pode ser especificada por diferentes critérios. Neste trabalho, foi considerado o critério quadrático de tensões que se segue para a iniciação do dano, por já ter sido provada a sua fiabilidade [88], e dado por

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

$\langle \rangle$  são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto ( $t_m^0$  na Figura 94), através da equação acima, a rigidez do material é degradada. A separação completa é prevista por um critério linear energético da forma

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

A Tabela 7 mostra as propriedades coesivas do adesivo utilizado neste trabalho, que foram estabelecidas a partir dos dados da Tabela 5, considerando-se os valores médios dos valores medidos experimentalmente.

Tabela 7 Propriedades do adesivo Araldite® AV138 para a modelação MDC.

| Propriedades   | AV138 |
|----------------|-------|
| $E$ [GPa]      | 4.89  |
| $G$ [GPa]      | 1.56  |
| $t_n^0$ [MPa]  | 39.45 |
| $t_s^0$ [MPa]  | 30.2  |
| $G_n^c$ [N/mm] | 0.20  |
| $G_s^c$ [N/mm] | 0.38  |

#### 4.2.2 Determinação das propriedades coesivas

A determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138, foi realizado um trabalho antes [85], através de um método inverso, em que não se realizaram ensaios de caracterização à fratura. O procedimento consistiu na utilização dos valores de resistência à tração e corte obtidos através de ensaios de adesivo maciço e TAST (Thick Adherend Shear Test), respetivamente, 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  $L_0 = 20$  mm), e os valores de  $G_n^c$  e  $G_s^c$  foram estimados por ajuste da curva  $P$ - $\delta$  numérica relativamente às experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas, e mostraram ser representativos do comportamento do adesivo. Os valores de  $E$  e  $G$  foram igualmente determinados a partir de ensaios de adesivo maciço e TAST. No trabalho referido [85] conclui-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel o adesivo. A Tabela 8 mostra os valores introduzidos no ABAQUS® para a simulação de crescimento do dano na camada adesiva [85].

Tabela 8 Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2mm.

|                |       |                |      |
|----------------|-------|----------------|------|
| $E$ [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 e previsão do comportamento das juntas

#### 4.3.1 Condição 1

##### 4.3.1.1 Modo de rotura

Depois do programa de testes ter sido completo, a fratura de todas as amostras testadas mostraram rotura coesiva da camada de adesivo. No entanto, para algumas configurações de reparação (ou seja, com as combinações valores mais elevados de  $L_0$  e  $L_{01}$ ), para as juntas JSS-60-30-2, JSS-60-45-1 e JSS-60-45-2, foi detetado visualmente perto das extremidades da sobreposição uma deformação plástica reduzida nos aderentes, o que mostra a necessidade de incluir a plasticidade do alumínio nos modelos numéricos. Nas simulações MEF, estes fenómenos podem ser claramente detetados após a rutura das juntas (ver exemplo da Figura 95, onde é mostrada a deformação plástica equivalente, ou PEEQ). Para todas as configurações, observou-se que os modos de fratura experimentais foram simulados com precisão.

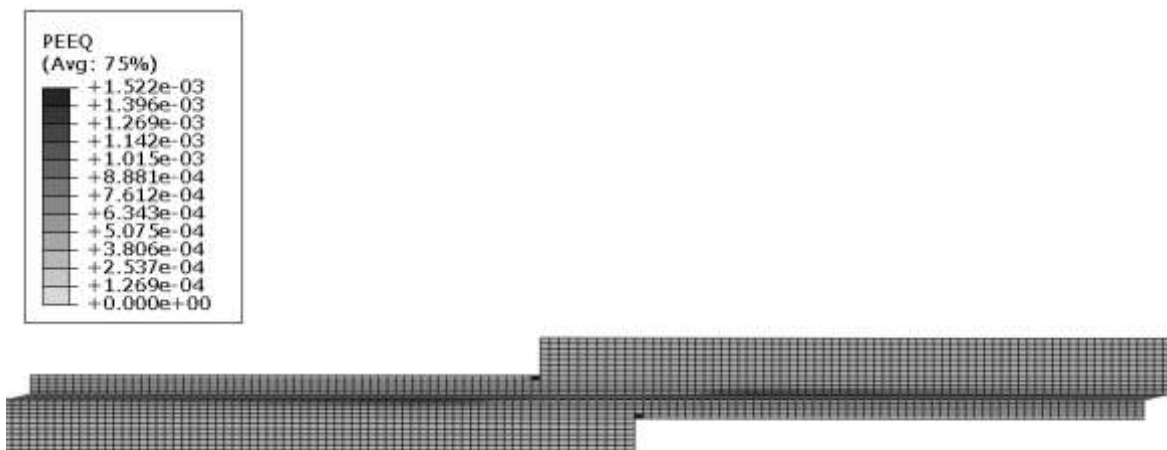


Figura 95 Deformação plástica dos aderentes para a junta JSS-60-45-2, detetada nas arestas vivas nos degraus dos rebaixos.

### 4.3.1.2 Curvas Força-Deslocamento

Para comparação entre os dados experimentais e numéricos, na Figura 96 e Figura 97 podem-se visualizar as curvas  $P-\delta$ , para várias configurações: a Figura 96 diz respeito a uma junta JSS-15-0-0 (a) e JSS-15-15-1 (b), enquanto a Figura 97 apresenta as configurações JSS-30-0-0 (a) e JSS-30-45-1 (b).

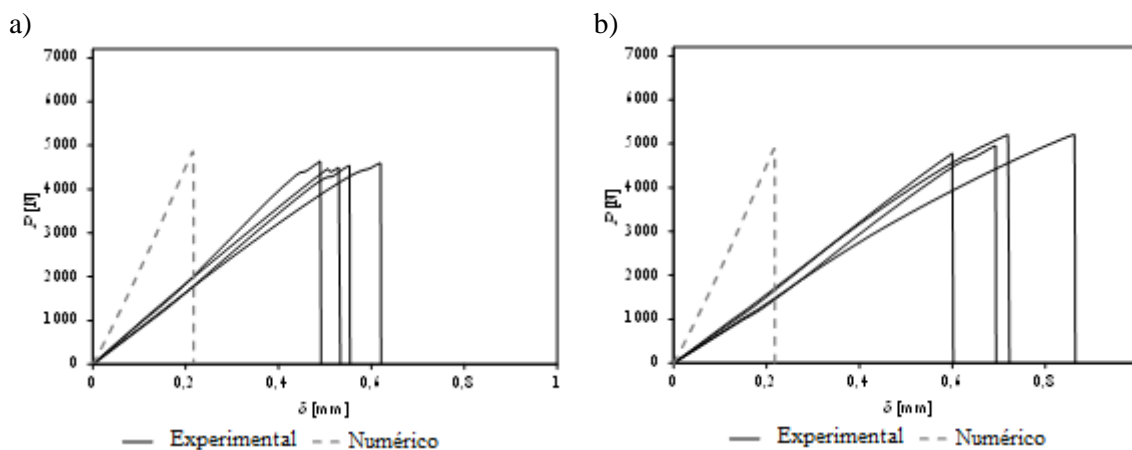


Figura 96 Gráficos das curvas  $P-\delta$  para as configurações JSS-15-0-0 (a) e JSS-15-15-1 (b).

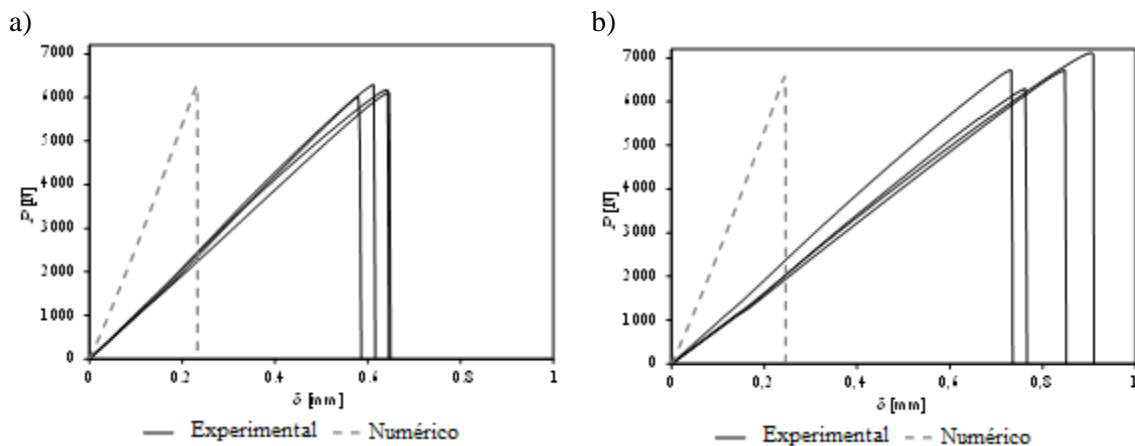


Figura 97 Gráficos das curvas  $P$ - $\delta$  para as configurações JSS-30-0-0 (a) e JSS-30-45-1 (b).

Os resultados apresentados mostram uma precisão razoável em relação a  $P_m$ , embora a rigidez seja sobrestimada nos modelos de MEF. Esta é uma situação algo comum em comparações MEF/experimental e está relacionada com a medição dos deslocamentos pelo travessão móvel da máquina de ensaios, o que resulta na acumulação das deformações da máquina e do modelo de ensaio e ainda eventual escorregamento dos provetes nas maxilas [10].

#### 4.3.1.3 Resistência das juntas

A Figura 98 mostra a evolução de  $P_m$  com  $L_0$  para as juntas sem alteração geométrica, ou seja, com configurações  $L_0$ -0-0, com indicação do desvio padrão para cada condição. Os resultados mostram um aumento de  $P_m$  a uma taxa decrescente com  $L_0$ . Isto resulta da combinação de dois fatores: resistência dos aderentes e fragilidade do adesivo. De facto, por um lado, a não existência de um patamar na curva  $P_m$ - $L_0$  significa que a resistência à tração dos aderentes de alumínio nunca é atingida (apesar da plastificação reduzida dos aderentes para os valores maiores de  $L_0$ ). Por outro lado, a fragilidade do adesivo leva à rotura das juntas praticamente sem plastificação do mesmo, o que faz com que  $P_m$  seja fortemente dependente dos picos de tensão. Uma vez que tanto o pico de tensões de arrancamento como o de tensões de corte aumentam em magnitude com  $L_0$ , o aumento deste parâmetro é extremamente prejudicial para a resistência da junta e resulta numa melhoria não proporcional de  $P_m$  com  $L_0$  [89]. Ao contrário, poderia ser esperado um comportamento mais ou menos proporcional com adesivos dúcteis [90].

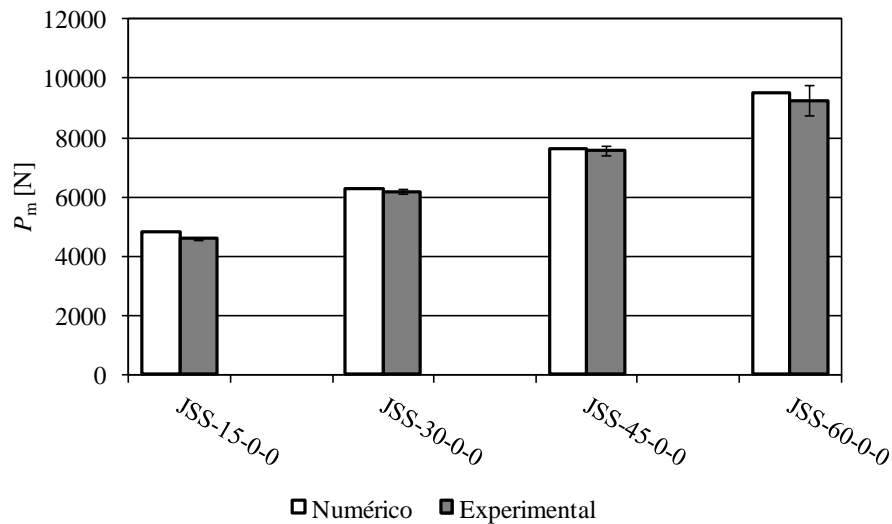


Figura 98 Comparação dos valores experimentais e numéricos de  $P_m$  para juntas de sobreposição simples com configuração  $L_0$ -0-0.

A influência da alteração geométrica (rasgo na extremidade do comprimento de sobreposição) na junta de sobreposição simples, com as várias combinações de  $L_0$ ,  $L_{01}$  e  $t_{s1}$ , está resumida na Figura 99, Figura 102, Figura 103 e Figura 104. É feita uma normalização de  $P_m$  por  $P_{m0}$ , que representa o valor de  $P_m$  para a junta de sobreposição simples sem alteração geométrica, para o valor de  $L_0$  respetivo. Os resultados por MEF/MDC foram razoavelmente precisos para todas as configurações testadas. Nas próximas descrições, apenas os valores de MEF são mencionados para permitir uma comparação mais simples entre as configurações das juntas. Começando por  $L_0=15\text{mm}$ , ver Figura 99, os resultados mostram uma melhoria ligeira para  $t_{s1}=1\text{mm}$ . No entanto, existe uma clara tendência de melhoria para valores maiores de  $L_{01}$  (melhoramento máximo de 5,8% para a junta de sobreposição simples com rasgo JSS-15-45-1). A análise de tensões para as geometrias referidas anteriormente mostra que esta melhoria se deve à redução do pico de tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição, o que é razoável de aceitar tendo em conta o aumento da flexibilidade dos aderentes nas extremidades da sobreposição. Como tal, e devido à elevada sensibilidade do adesivo às tensões de arrancamento (devido à sua fragilidade e valor reduzido de  $G_n^c$ ), esta modificação conduz a um aumento da resistência das juntas.

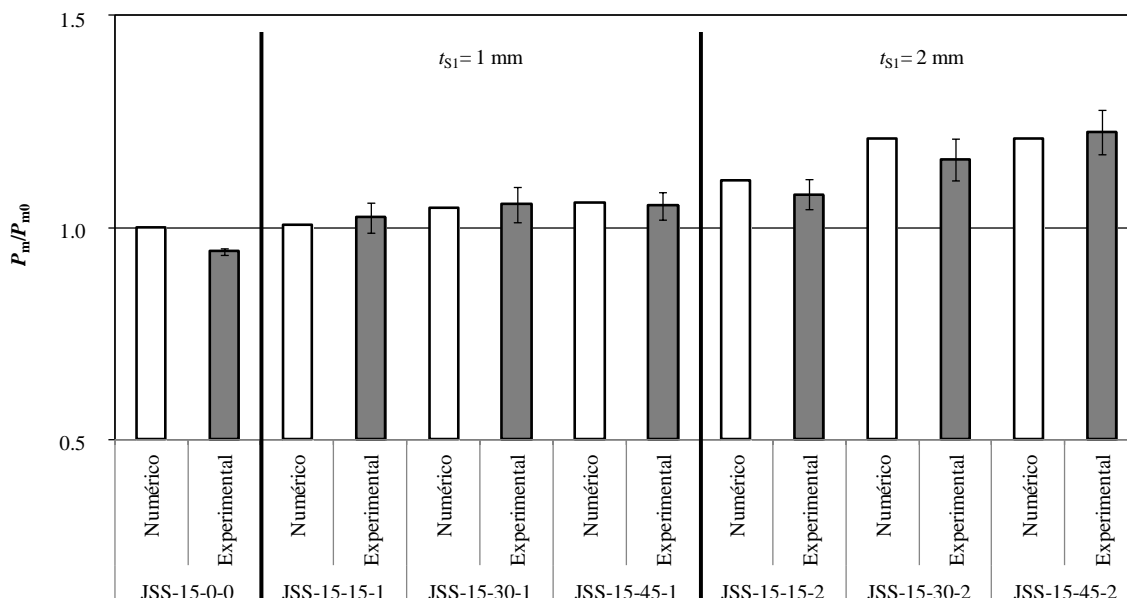


Figura 99 Comparação experimental/MEF dos valores de  $P_m/P_{m0}$  para as configurações  $L_0=15\text{mm}$ .

A Figura 100 evidencia as diferenças nas tensões de arrancamento, considerando as geometrias JSS-15-0-0 (a) e JSS-15-45-1 (b), sujeitas a um deslocamento de 0,01mm. Este deslocamento é usado em toda esta secção para comparação das tensões entre as várias configurações. Como é claramente visível, o pico da tensão de arrancamento na extremidade da sobreposição reduz desde 1.747MPa até 1.404MPa, o que corresponde a uma redução de 19.6%. Por outro lado, os picos das tensões de corte permanecem praticamente inalterados por esta modificação. Por outro lado, considerando  $L_0=15\text{mm}$  e  $t_{s1}=2\text{mm}$ , existe uma melhoria de resistência acentuada, com uma melhoria máxima de 11,0% para JSS-15-15-2, e uma melhoria semelhante para JSS-15-30-2 e JSS-15-45-2, de aproximadamente 20,9%. Estes resultados acompanham a tendência obtida para  $t_{s1}=1\text{mm}$ , devido ao aumento da flexibilidade nas extremidades da sobreposição, o que reduz o pico das tensões de arrancamento até 1,162MPa para JSS-15-15-2, ver Figura 101 (a) (redução de 35,5% em relação à junta de sobreposição simples sem alteração geométrica) e até aproximadamente 0,977MPa para JSS-15-30-2 e JSS-15-45-2, ver Figura 101 (b) (redução de aproximadamente de 44,1% em relação à junta de sobreposição simples sem alteração geométrica). Os picos das tensões de corte não sofreram alterações dignas de registo e, assim, o seu efeito não foi associado à tendência dos resultados.



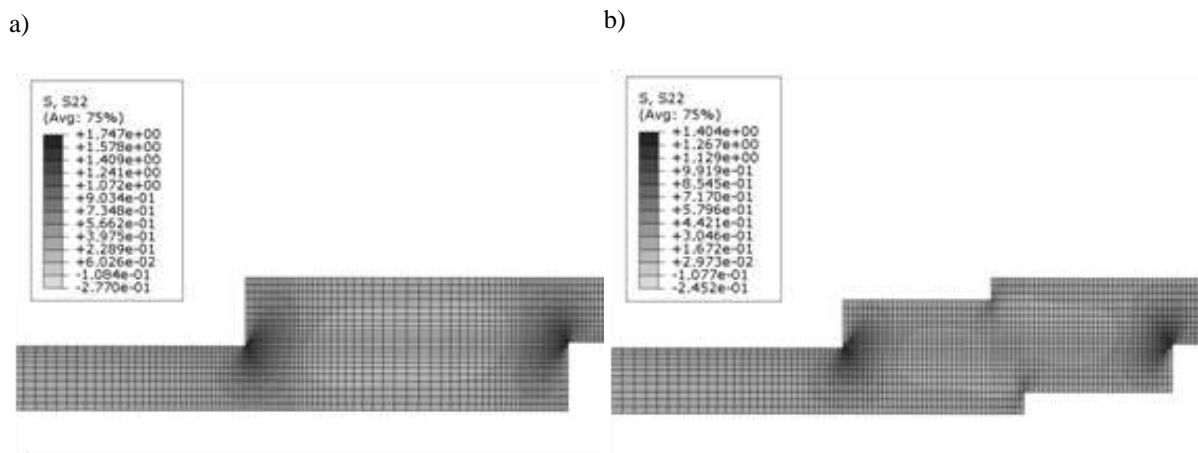


Figura 100 Distribuição das tensões de arrancamento na zona de sobreposição para as juntas JSS-15-0-0 (a) e JSS-15-45-1 (b).

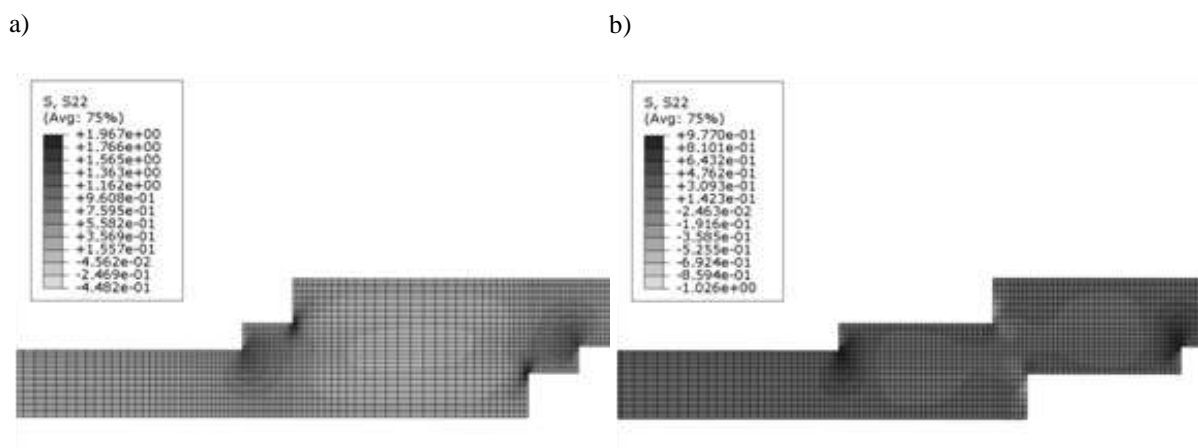


Figura 101 Distribuição das tensões de arrancamento na zona de sobreposição para as juntas JSS-15-15-2 (a) e JSS-15-45-2 (b).

Os resultados para  $L_0=30\text{mm}$ , ver Figura 102, demonstram uma melhoria semelhante entre todas as configurações com  $t_{s1}=1\text{mm}$  (entre 4,3% para JSS-30-15-1 e 5,5% para JSS-30-30-1). Esta variação deve-se igualmente à redução do pico das tensões de arrancamento de 1,557 para 1,453MPa (JSS-30-15-1) e para 1,304MPa (JSS-30-30-1), o que corresponde a uma redução de 6,7 e 16,2%, respetivamente, sobre o valor da junta de sobreposição simples sem alteração geométrica. O pico das tensões de corte não foram muito afetados por estas modificações. A análise das juntas com  $t_{s1}=2\text{mm}$  também revelou resultados idênticos entre todos os valores de  $L_{01}$  (melhoria máxima de 21,0% para JSS-30-15-2, embora as juntas com outros valores de  $L_{01}$  tenham revelado valores idênticos). Nesta

configuração, os picos das tensões de arrancamento foram reduzidos a 1,022MPa (34,4%). Para as outras configurações, as reduções encontradas foram ligeiramente menores. Este comportamento pode ser explicado pela pequena influência de  $L_{01}$  no pico das tensões de arrancamento, uma vez que para estas juntas  $L_{01}=15\%$  é suficiente para que a extremidade da sobreposição seja flexível, e como tal valores maiores de  $L_{01}$  não proporcionam um melhoramento significativo.

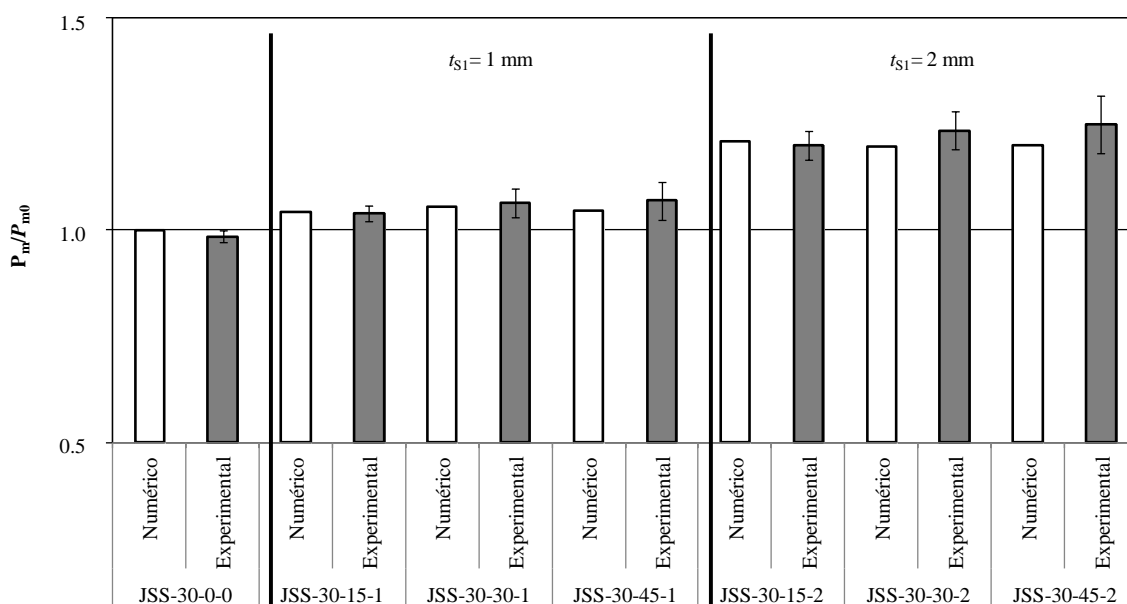


Figura 102 Comparação experimental/MEF dos valores de  $P_m/P_{m0}$  para as configurações com  $L_0=30\text{mm}$ .

Na Figura 103 pode-se visualizar a comparação experimental/MEF para as configurações com  $L_0=45\text{mm}$ . As configurações com rasgo com  $t_{s1} = 1\text{mm}$  mostraram uma melhoria entre 1,2% (JSS-45-15-1) e 5,0% (idêntica para as configurações JSS-45-30-1 e JSS-45-45-1), também devido à redução do pico das tensões de arrancamento. Na verdade, para JSS-45-15-1, a redução percentual foi de 2,9% (1,568-1,523MPa), enquanto para JSS-45-30-1 e JSS-45-45-1, houve uma redução de 17,5 e 18,9%, respetivamente (pela mesma ordem, as reduções do pico das tensões para 1,294MPa e 1,271MPa). De forma idêntica, o pico das tensões de corte foram mantidos praticamente com o mesmo valor. Para  $t_{s1} = 2\text{mm}$  já se observa um aumento significativo de  $P_m/P_{m0}$  com  $L_{01}$ : 18,6% para JSS-45-15-2, 20,0% para JSS-45-30-2 e 21,2% para JSS-45-45-2. Para estas configurações, a redução do pico das tensões de arrancamento foi da ordem de grandeza dos 40,0%. A justificação para as pequenas diferenças entre os valores de  $L_{01}$  é idêntico à apresentada para as juntas com  $L_0=30\text{mm}$ .

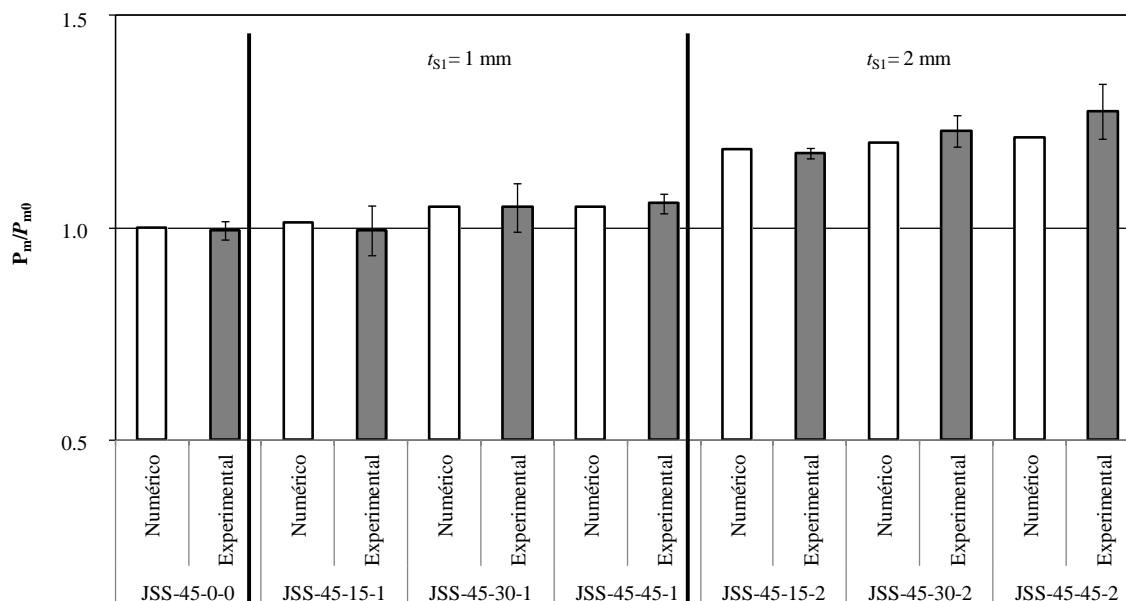


Figura 103 Comparação experimental/MEF dos valores de  $P_m/P_{m0}$  para as configurações com  $L_0=45\text{mm}$ .

A Figura 104 representa graficamente os resultados para  $L_0=60\text{mm}$ , indicando para  $t_{s1}=1\text{mm}$ , melhorias da resistência, desde 3,5% para JSS-60-15-1 a 7,1% para JSS-60-30-1, correspondendo à redução do pico de tensão de arrancamento entre 9,4% (desde 1,403MPa a 1,271MPa), e de 13,5% (desde 1,403MPa a 1,214MPa), respetivamente. Não há grandes diferenças na distribuição das tensões de corte entre as diversas configurações com  $L_0=60\text{mm}$ . Por outro lado, para uma profundidade do rasgo de  $t_{s1}=2\text{mm}$ , houve melhorias significativas e crescentes com  $L_{01}$ . As melhorias de  $P_m/P_{m0}$  foram de 10,4% para JSS-60-15-2, 14,7% para JSS-60-30-2 e de 17,1% para JSS-60-45-2, o que corresponde, pela mesma ordem, a reduções de picos de tensões de corte de 25,1% (até 1,051MPa), 31,6% (até 0,960MPa) e 37,9% (até 0,871MPa).

Ao comparar o aumento da resistência entre os quatro valores de  $L_0$  analisados, é possível identificar comportamentos idênticos em relação à melhoria do comportamento das várias juntas, embora existam algumas oscilações. Em geral, com a profundidade do rasgo  $t_{s1}=1\text{mm}$  obtém-se aumentos de resistência que podem atingir 7,1% (JSS-60-45-1), mas que na maioria dos casos são de cerca de 5%. Em algumas das condições, valores de  $L_{01}$  pequenos proporcionam melhorias menores. Usando  $t_{s1}=2\text{mm}$  conseguem-se melhorias de resistência da ordem dos 20%, tipicamente idênticos para os valores testados de  $L_{01}$  ou aumentando ligeiramente com este parâmetro. As juntas com  $L_0=60\text{mm}$  mostraram ser

ligeiramente menos afetadas pelo rasgo, já que a melhoria da resistência atingiu no máximo 17,1% (para JSS-60-45-2).

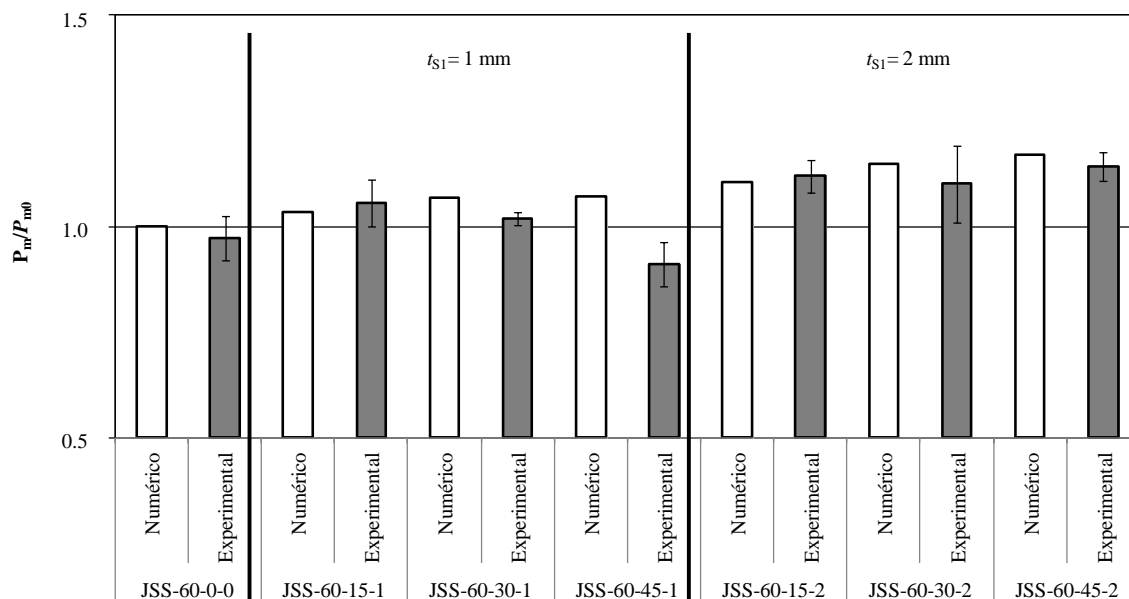


Figura 104 Comparação experimental/MEF dos valores de  $P_m/P_{m0}$  para as configurações com  $L_0=60\text{mm}$ .

## 4.3.2 Condição 2

### 4.3.2.1 Modo de rotura

Depois do programa de teste ter sido completo, a fratura de todas as amostras testadas mostraram rotura coesiva do adesivo. No entanto, para algumas configurações de reparação, nomeadamente para as configurações JSS-60-40-2 (Figura 105), JSS-60-40-1 e JSS-45-30-2, foi detetado visualmente perto das extremidades da sobreposição uma deformação plástica menor dos aderentes, o que mostra a necessidade de incluir a plasticidade dos aderentes nos modelos. Nas simulações MEF, estes fenómenos eram visíveis após a rotura das juntas. Para todas as configurações, os modos de fratura MEF foram simulados com precisão.

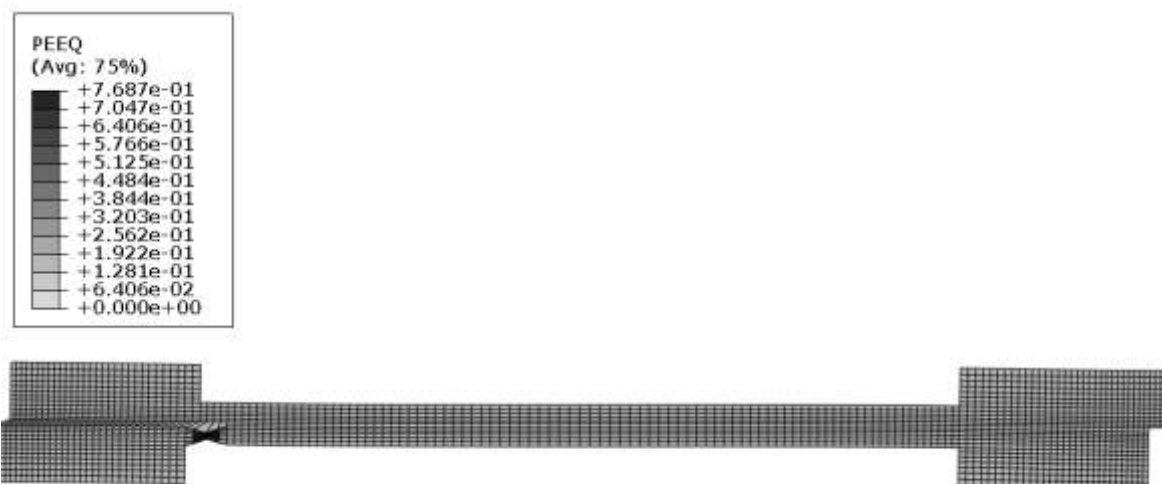


Figura 105 Deformação plástica dos aderentes para a junta JSS-60-40-2, detetada nas arestas vivas nos degraus dos rebaixos.

#### 4.3.2.2 Curvas Força-Deslocamento

Na Figura 106 e Figura 107 podem-se visualizar as curvas  $P-\delta$  para algumas configurações, para comparação entre os dados experimentais e numéricos: a Figura 106 diz respeito a uma junta JSS-15-10-1 (a) e JSS-15-10-2 (b), enquanto a Figura 107 apresenta as configurações JSS-30-20-1 (a) e JSS-30-20-2 (b).

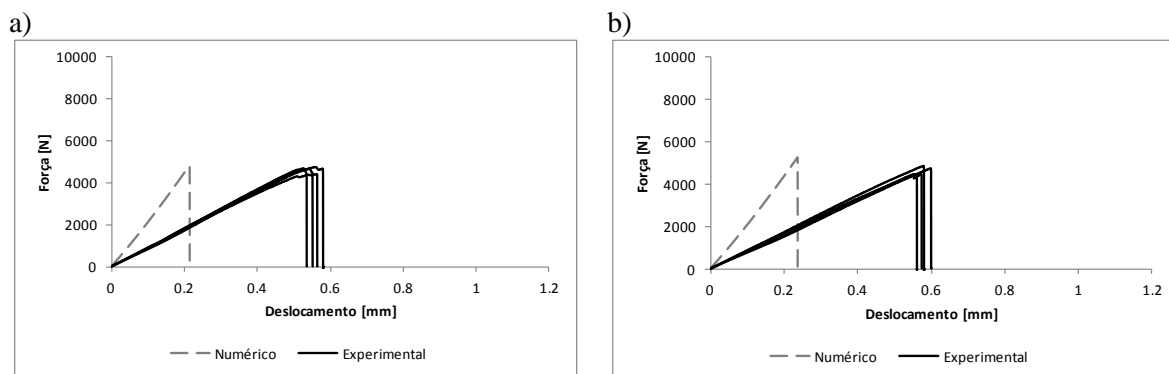


Figura 106 Gráficos das curvas  $P-\delta$  para as configurações JSS-15-10-1 (a) e JSS-15-10-2 (b).

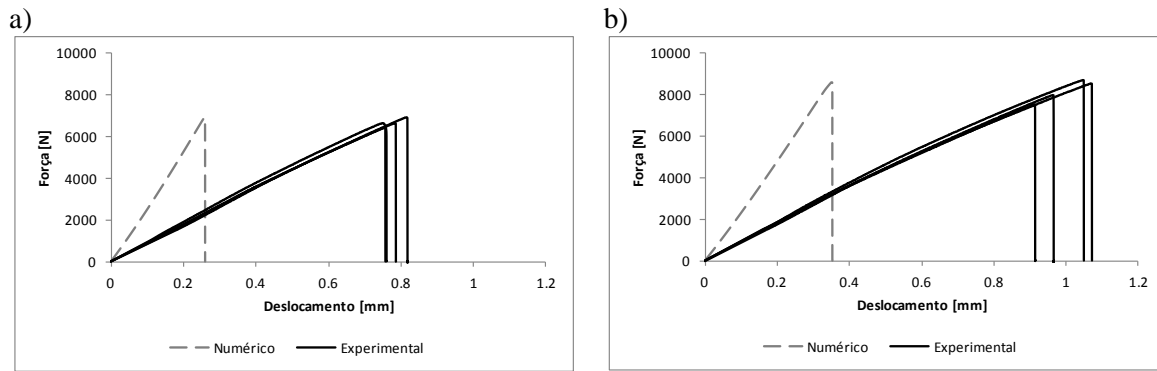


Figura 107 Gráficos das curvas  $P$ - $\delta$  para as configurações JSS-30-20-1 (a) e JSS-30-20-2 (b).

Como se pode verificar, os resultados apresentados mostram uma precisão razoável em relação a  $P_m$ , embora a rigidez seja sobrestimada nos modelos de MEF. A causa deste efeito foi explicada na secção 4.3.1.2.

#### 4.3.2.3 Resistência das juntas

A influência da alteração geométrica (rasgo a meio do comprimento de sobreposição) na junta de sobreposição simples, com as várias combinações de  $L_0$ ,  $L_{01}$  e  $t_{s1}$ , está resumida na Figura 108, em função de  $P_m/P_{m0}$ . Tal como na secção 4.3.1.3 os resultados por MEF/MDC foram razoavelmente precisos para todas as condições e nas próximas descrições, apenas os valores de MEF são mencionados para permitir uma comparação mais simples entre as configurações das juntas.

Como se pode verificar na Figura 108, para o comprimento de sobreposição  $L_0=15\text{mm}$ , a resistência da junta para a alteração geométrica com  $t_{s1}=1\text{mm}$ , é praticamente a mesma, comparativamente com a junta JSS-15-0-0, enquanto para a junta JSS-15-10-2, ou seja, quando se aumentou de  $t_{s1}=1\text{mm}$  para  $t_{s1}=2\text{mm}$ , ocorreu uma melhoria significativa da resistência da junta. Para  $t_{s1}=2\text{mm}$ , obteve-se uma melhoria da resistência de 7,0%, comparativamente com a junta JSS-15-0-0. Na análise de tensões para este tipo de geometrias, ocorre uma melhoria da resistência da junta devido à redução do pico de tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da sobreposição. Este comportamento é justificado com o aumento da flexibilidade dos aderentes na zona central da junta, fazendo com que nas extremidades também seja mais flexível e diminuindo assim as tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição [59]. Este aumento da

resistência também se deve ao facto de as tensões de corte terem aumentado na zona correspondente ao rasgo devido à maior flexibilidade longitudinal na referida zona, o que provoca um aumento da tensão de corte média no momento da rotura, com o respetivo aumento de  $P_m$  [59].

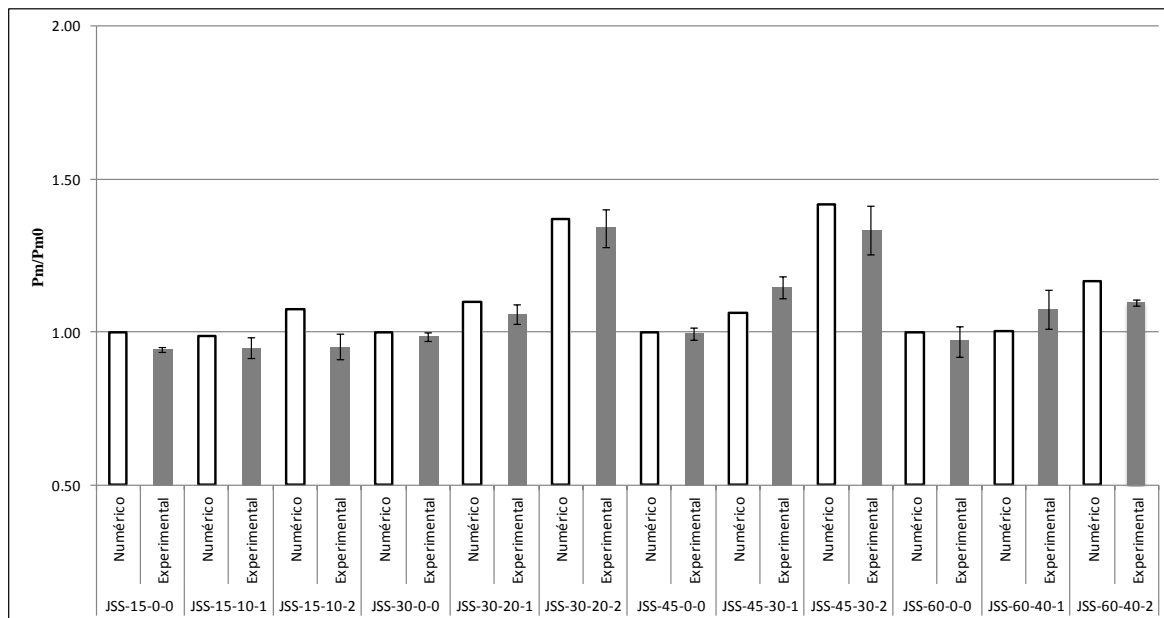


Figura 108 Comparação experimental/MEF dos valores de  $P_m/P_{m0}$  para as configurações da condição 2.

Na Figura 109 pode-se visualizar as diferenças nas tensões de arrancamento, considerando as geometrias JSS-15-0-0 (a) e JSS-15-10-2 (b), sujeitas a um deslocamento de 0,01mm. Este deslocamento é usado em toda esta secção para fins comparativos. Como é claramente visível, o pico da tensão de arrancamento na extremidade da sobreposição reduz desde 1,75MPa até 1,39MPa, o que corresponde a uma redução percentual de 25,9%. Em relação aos picos das tensões de corte nas extremidades da sobreposição, estes permanecem praticamente inalterados por esta modificação, para este comprimento de sobreposição, em 0,97MPa (apesar das variações na zona do rasgo). Ao longo do comprimento do rasgo (zona central da junta), as tensões de arrancamento diminuem significativamente de 0,26MPa (JSS-15-0-0) até 0,013MPa (JSS-15-10-2), cerca de 0,25MPa e as tensões de corte aumentam de 0,35MPa (JSS-15-0-0) para 0,37MPa (JSS-15-10-2), cerca de 0,020MPa.

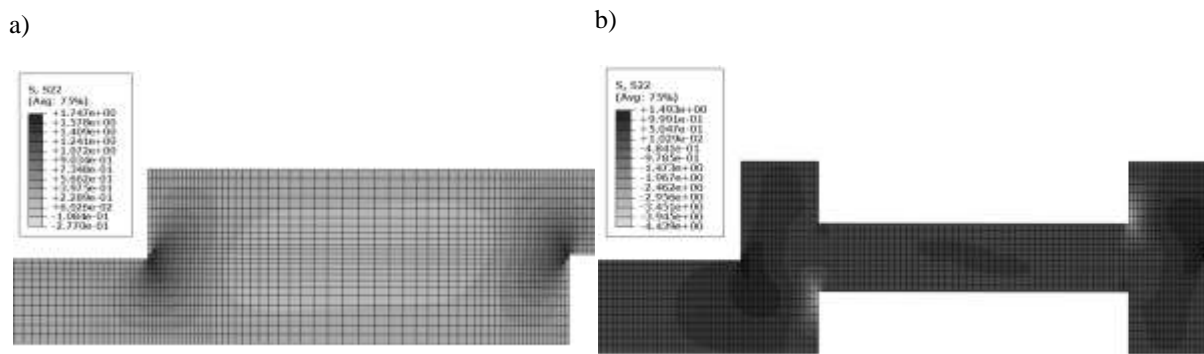


Figura 109 Distribuição das tensões de arrancamento na zona de sobreposição para as juntas JSS-15-0-0 (a) e JSS-15-10-2 (b).

Os resultados para  $L_0=30\text{mm}$ , ver Figura 108, demonstram uma melhoria bastante significativa para  $t_{s1}=1\text{mm}$  e  $t_{s1}=2\text{mm}$ , em relação à junta  $L_0-0-0$  correspondente. Para a junta JSS-30-20-1 e JSS-30-20-2, obteve-se uma melhoria de 10% e 37%, respetivamente. Esta melhoria de resistência ocorre devido à diminuição das tensões de arrancamento e das tensões de corte nas extremidades da sobreposição, e também à diminuição das tensões de arrancamento e um aumento das tensões de corte na zona do rasgo, o que é benéfico para a resistência da junta, tal como foi referido anteriormente.

De facto, com as alterações geométricas efetuadas, para  $L_0=30\text{mm}$ , as tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição diminuem. Para JSS-30-0-0 estas são de 1,59MPa e diminuem para JSS-30-20-1 e JSS-30-20-2 para 1,43MPa e 1,26MPa, respetivamente, correspondendo a uma redução de 11,19% (JSS-30-20-1) e 26,19% (JSS-30-20-2). Relativamente às tensões de corte nas extremidades da sobreposição, estas também diminuem à medida que se vai aumentando a profundidade do rasgo na zona central. Para JSS-30-0-0 estas são de 1,01MPa, enquanto para JSS-30-20-1 e JSS-30-20-2 passam para 0,97MPa e 0,89MPa, respetivamente, correspondendo a uma redução de 4,12% para JSS-30-20-1 e de 13,48% para JSS-30-20-2. Ao longo do comprimento do rasgo, as tensões de arrancamento diminuem de 0,01MPa (JSS-30-0-0) para aproximadamente 0 para as juntas JSS-30-20-1 e JSS-30-20-2. Relativamente às tensões de corte, estas aumentam desde 0,12MPa para as juntas JSS-30-0-0 e JSS-30-20-1, para 0,17MPa para a junta JSS-30-20-2, correspondendo a um aumento de 41,67%.

Para  $L_0=45\text{mm}$ , ver Figura 108, também com as alterações geométricas efetuadas aumenta a resistência de forma bastante significativa em relação à junta sem alteração



geométrica correspondente. Para a junta JSS-45-30-1 e JSS-45-30-2, obteve-se valores de melhoria de 6% e 42%, respectivamente. Também neste caso, as modificações nas tensões na zona de sobreposição foram responsáveis pelo aumento de  $P_m$ . Em relação aos picos das tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição, estes diminuem de 1,59MPa (JSS-45-0-0), para 1,5MPa (JSS-45-30-1) e 1,22MPa (JSS-45-30-2), correspondendo a uma redução de 6% e de 30,33%, respectivamente. Os picos das tensões de corte nas extremidades da sobreposição também sofrem uma diminuição. Para a junta JSS-45-0-0 estas são de 1,05MPa e para as juntas JSS-45-30-1 e JSS-45-30-2 estas são de 0,97MPa e 0,79MPa, respectivamente, correspondendo a uma redução de 8,25% e 32,91%. Na zona central da junta colada, ao longo do comprimento do rasgo, os picos das tensões de arrancamento mantêm-se constantes enquanto as tensões de corte aumentam de forma significativa. Em relação às tensões de corte, estas aumentam de 0,08MPa (JSS-45-0-0) para 0,11MPa (JSS-45-30-1) e 0,17MPa (JSS-45-30-2), correspondendo a um aumento de 37,5% e 112,5%, respectivamente.

Relativamente ao comprimento de sobreposição,  $L_0=60\text{mm}$ , ver Figura 108, a resistência da junta para a alteração geométrica com  $t_{s1}=1\text{mm}$  é praticamente a mesma, comparativamente com a junta JSS-60-0-0, enquanto para a junta JSS-60-40-2, ou seja, quando se aumentou de  $t_{s1}=1\text{mm}$  para  $t_{s1}=2\text{mm}$ , ocorreu uma melhoria significativa da resistência da junta de 17%.

Este comportamento é justificado pelas variações que se seguem. Os picos das tensões de arrancamento nas extremidades do comprimento de sobreposição diminuem desde 1,45MPa (JSS-60-0-0) para 1,4MPa (JSS-60-40-1) e para 1,06MPa (JSS-60-40-2), correspondendo a uma redução de 3,57% e 36,79%, respectivamente. Em relação aos picos das tensões de corte, estes diminuem desde 1,06MPa (JSS-60-0-0) para 0,97MPa (JSS-60-40-1) e para 0,75MPa (JSS-60-40-2), correspondendo a uma redução de 9,28% e 41,33%, respectivamente. Ao longo do comprimento do rasgo, as tensões de arrancamento mantêm-se constantes em aproximadamente 0MPa e as tensões de corte, aumentam desde 0,08MPa (JSS-60-0-0) para 0,11MPa (JSS-30-20-1) e para 0,17MPa (JSS-30-20-2), correspondendo a um aumento de 37,5% e 112,5%, respectivamente.

Ao comparar o aumento da resistência entre os quatro valores de  $L_0$  analisados, é possível identificar comportamentos idênticos em relação à melhoria do comportamento das várias juntas, embora existam algumas oscilações. Em geral, com a profundidade do rasgo  $t_{s1}=1\text{mm}$  obtêm-se aumentos de resistência que podem atingir os 10% para a junta

JSS-30-20-1, os 6% para a junta JSS-45-30-1 e relativamente às restantes, a resistência é praticamente a mesma quando comparadas com as juntas sem alteração geométricas correspondentes. Usando  $t_{s1}=2\text{mm}$  conseguem-se melhorias de resistência bastante significativas. Para as juntas JSS-15-10-2, JSS-30-20-2, JSS-45-30-2 e JSS-60-40-2, obtém-se melhorias da resistência de 7, 37, 42 e 17%, respetivamente, quando comparadas com as juntas sem alteração geométrica correspondentes. As juntas com  $L_0=15\text{mm}$  mostraram ser ligeiramente menos afetadas pelo rasgo, já que a melhoria da resistência atingiu no máximo 7% (para JSS-15-10-2), enquanto para as juntas com  $L_0=45\text{mm}$  mostraram ser as mais afetadas pelo rasgo, pois a melhoria da resistência atingiu no máximo 42% (para JSS-45-30-2).

## 5. Conclusões

Neste trabalho foi realizado um estudo experimental e numérico pelo MEF de duas alterações efetuadas à geometria de juntas de sobreposição simples coladas com adesivo frágil, de modo a aumentar a sua resistência comparativamente às juntas sem alteração geométrica. A primeira condição efetuada foi a utilização de rasgos nas extremidades do comprimento de sobreposição e a segunda foi a utilização de rasgos a meio do comprimento de sobreposição. Após a análise experimental e de MEF realizada ao longo deste trabalho destinada a avaliar o efeito das alterações geométricas (condição 1 e condição 2) com diferentes valores de comparação de  $L_0$ ,  $L_{01}$  e  $t_{s1}$  em juntas de sobreposição simples, coladas pode-se concluir que para toda a gama de configurações testadas, as previsões da abordagem MEF/MDC foram precisas, em relação ao modo de rotura das juntas, comportamento das curvas  $P-\delta$ , características de crescimento da fenda e previsão de  $P_m$ . Para as juntas sem alteração geométrica, os resultados apresentam um aumento de  $P_m$  a uma taxa decrescente com  $L_0$ , principalmente devido à fragilidade do adesivo, o que o torna propenso a rotura sem que haja lugar a plastificação.

Com a aplicação da alteração geométrica para a condição 1, aumentou-se de forma eficaz a resistência das juntas, quando comparadas com as juntas sem alteração geométricas correspondentes. De todas as configurações estudadas para a condição 1, o maior aumento da resistência obtido foi o da junta JSS-45-45-2 (21,2%), devido à redução do pico de tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição, tendo em conta o aumento da flexibilidade dos aderentes nessas zonas. Devido à elevada sensibilidade do adesivo às tensões de arrancamento (devido à sua fragilidade e valor reduzido de  $G_n^c$ ), esta modificação conduz a um aumento significativo da resistência das juntas. Por outro lado,

as distribuições das tensões de corte mantiveram-se praticamente inalteradas. O valor de  $t_{s1}$  foi o parâmetro mais importante relativamente à melhoria da resistência das juntas, onde se registou um aumento significativo da resistência quando se aumentava de  $t_{s1}=1\text{mm}$  para  $t_{s1}=2\text{mm}$ , enquanto para  $L_{01}$  se registou um aumento da força pouco significativa, embora em alguns casos, ocorresse alguma melhoria com o aumento deste parâmetro. Entre os quatro valores de  $L_0$  testados, foi possível identificar comportamentos idênticos para a resistência das juntas, apesar de existirem algumas variações. Em geral, para  $t_{s1}=1\text{mm}$ , obtiveram-se melhorias de resistência que na maioria dos casos era cerca de 5%, enquanto para  $t_{s1}=2\text{mm}$  registaram-se aumentos de resistência da ordem de 20%. Estes valores são tipicamente idênticos entre os vários comprimentos de  $L_{01}$ .

Através da condição 2 também se conseguiu de forma eficaz aumentar a resistência das juntas, quando comparadas com as juntas sem alteração geométrica correspondentes. A maior percentagem de aumento da resistência para esta condição, foi a da junta JSS-45-30-2, em que se obteve um aumento da resistência de 42%, devido ao aumento da flexibilidade dos aderentes na zona central da junta, fazendo com que nas extremidades também seja mais flexível e diminuindo assim as tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da sobreposição. Este aumento de resistência também se deve ao facto de as tensões de corte terem aumentado na zona correspondente ao rasgo devido à maior flexibilidade longitudinal na referida zona, o que provoca um aumento da tensão de corte média no momento da rotura, com o respetivo aumento de  $P_m$ . Dos vários parâmetros estudados para esta condição, aquele que teve mais influência no aumento da resistência das juntas foi o valor de  $t_{s1}$  (aumento de  $t_{s1}=1\text{mm}$  para  $t_{s1}=2\text{mm}$ ). Com a profundidade do rasgo  $t_{s1}=1\text{mm}$  obtém-se aumentos de resistência que podem atingir os 10% para a junta JSS-30-20-1 ou os 6% para a junta JSS-45-30-1. Para as mesmas juntas, mas com  $t_{s1}=2\text{mm}$ , ou seja, para JSS-30-20-2 e JSS-45-30-2 obtém-se melhorias da resistência de 37 e 42%, respetivamente, quando comparadas com as juntas sem alteração geométrica correspondentes. Entre os quatro valores de  $L_0$  testados, foi possível identificar comportamentos idênticos para a resistência das juntas, apesar de existirem algumas variações. Em geral, as duas técnicas propostas são válidas, pois para as várias configurações estudadas conseguiu-se um aumento da resistência relativamente às juntas sem alteração geométrica correspondentes.

Como perspetivas de trabalhos futuros, será importante estudar para as alterações efetuadas (condição 1 e condição 2), diferentes valores de  $L_0$  (menores e maiores), bem

---

como diferentes valores de  $L_{01}$ , para verificar qual o comportamento da resistência das juntas. Também será importante estudar para estas condições, por exemplo o seu comportamento à fadiga e respetiva influência da variação dos parâmetros estudados. Considera-se este tipo de carregamento de grande relevância devido ao potencial das modificações propostas, uma vez que a resistência à fadiga de juntas adesivas depende em grande parte dos picos de tensões no adesivo. Outro aspeto relevante será também testar modelos de dano mais adequados para adesivos com componente plástica importante.



## 6. Referências Documentais

- [1] He X. *A review of element analysis of adhesively bonded joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives 31 (2011) 248 – 264.
- [2] <http://www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/PDF/COTE077.PDF>, consultado em 28/05/2012.
- [3] <http://www.engenhariacivil.com/ligacoes-estruturais-colagem>, consultado em 28/05/2012.
- [4] Brandão A., Oliveira C., Beleza F., Pinto J., Couto J., Mendes R., Correia V. *Adesivos em Automóveis*. Relatório do Projeto FEUP, Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica (2010).
- [5] da Silva L.F., Moura M.F.S.F., Magalhães A.G. *Juntas Adesivas Estruturais*. Publindústria, Porto (2007).
- [6] Adams R.D., Comyn J. *Joining using adhesives*. Assembly Automation (2000).
- [7] Pinto A. M. G. *Ligações Adesivas entre materiais Poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. Dissertação para obtenção do grau doutor em Engenharia Mecânica na Faculdade de Engenharia do Porto (2009).
- [8] Grant L.D.R., Adams R.D., da Silva L.F.M. *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. Int. J. A. A. 29 (2009) 405 – 413.
- [9] Campilho R.D.S.G., Pinto A.M.G., Banea M.D., da Silva R.F. e Silva L.F.M. *Strength Improvement of Adhesively-Bonded Joints using Reverse-Bent Geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology 25 (2011) 2351 – 2368.
- [10] Pocius, A.V. *Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction, 2<sup>nd</sup> Edition*. 83 (2002) Hanser. 311 – 319.
- [11] Gauthier, MM. *Sorting out structural adhesives*. Advanced Materials & Processes 138 (1990), ASM International.
- [12] Esteves, J.L.S. *Estudo do comportamento de adesivos estruturais*. FEUP (1990) 112.
- [13] <http://www.retenfix.com.br/2012/produtos.php?id=2042>, consultado em 06/07/2012.
- [14] <http://www.maketa.com.br/paulista.htm>, consultado em 06/07/2012.
- [15] <http://mundodaimpermeabilizacao.blogspot.pt/2012/03/umidade-acaba-com-rodape-da-parede.html>, consultado em 06/07/2012.
- [16] <http://turmadamonicaufc.blogspot.pt/2010/12/tecnologia-kevlar-torna-blindagem.html>, consultado em 06/07/2012.
- [17] <http://blogdoplastico.wordpress.com/tag/ultem/>, consultado em 09/07/2012.
- [18] <http://www.quimica.com.br/quimica/revista/qd461/adesivos1.htm>, consultado em 09/07/2012.
- [19] [http://www.asborrego.pt/layout.asp?go=produto\\_detalhe&cat=2&gama=6&subgama=16&id=689](http://www.asborrego.pt/layout.asp?go=produto_detalhe&cat=2&gama=6&subgama=16&id=689), consultado em 10/07/2012.
- [20] <http://carroceria.blogspot.pt/2008/06/adesivo-estrutural-para-carrocerias.html>, consultado em 10/07/2012.

- [21] <http://www.abal.org.br>, consultado em 11/07/2012.
- [22] <http://nutricorpo.blogspot.pt/2012/01/panelas-de-aluminio-uma-ameaca-saude.html>, consultado em 11/07/2012.
- [23] <http://www.euroferragens.com.br/loja.phtml?f=1&cprod=2524>, consultado em 11/07/2012.
- [24] <http://dicasgratisninet.blogspot.pt/2011/08/portoes-de-aluminio-precios-fotos.html>, consultado em 11/07/2012.
- [25] [http://www.temisdeparis.com/galeria/Vasos/VASO\\_AFRO\\_aluminio](http://www.temisdeparis.com/galeria/Vasos/VASO_AFRO_aluminio), consultado em 11/07/2012.
- [26] [http://igapel.com.br/detalhes\\_produtos.php?cod\\_produto=267](http://igapel.com.br/detalhes_produtos.php?cod_produto=267), consultado em 11/07/2012.
- [27] <http://www.mesasbareslojavirtual.com.br/linha-aluminio/cadeiras-de-aluminio.html>, consultado em 11/07/2012.
- [28] [http://www.grecav.it/pt/111\\_\\_Segurana](http://www.grecav.it/pt/111__Segurana), consultado em 11/07/2012.
- [29] <http://www.jalopnik.com.br/a-quem-quiser-um-motor-preparado-aspirado-parte-3/>, consultado em 11/07/2012.
- [30] [http://www.visualtuning.net/v3/index.php?option=com\\_content&view=article&id=307&Itemid=55](http://www.visualtuning.net/v3/index.php?option=com_content&view=article&id=307&Itemid=55), consultado em 11/07/2012.
- [31] <http://www.planair.com.br/pt/caracteristicas.php#saibamais>, consultado em 11/07/2012.
- [32] <http://www.nauticajairomar.com.br/barcosencomenda.htm>, consultado em 11/07/2012.
- [33] <http://www.porfitex.com/>, consultado em 12/07/2012.
- [34] <http://www.cofam.com.br/produtos.php>, consultado em 12/07/2012.
- [35] <http://br7eventos.blogspot.pt/2011/06/servico-locacao-de-trelicas-box-struss.html>, consultado em 12/07/2012.
- [36] <http://www.totallyttrs.com/>, consultado em 12/07/2012.
- [37] Ganesh V.K., Choo T.S. *Modulus graded composite adherends for single-lap bonded joints*. Journal of Composite Materials 36 (2002) 1757 – 1767.
- [38] Boss J.N., Ganesh V.K., Lim C.T. *Modulus grading versus geometrical grading of composite adherends in single-lap bonded joints*. Composite Structures 62 (2003) 113 – 121.
- [39] Raphael C. *Variable-adhesive bonded joints*. Appl. Polym. Symp. 3 (1966) 99 – 108.
- [40] Pires I., Quintina L., Durodola J.F., Beevers A. *Performance of bi-adhesive bonded aluminium lap joints*. Int. J. Adhes. 23 (2003) 215-23.
- [41] Fitton M.D., Broughton J.G. *Variable modulus adhesives: an approach to optimized joint performance*. Int. J. Adhes. & Adhes. 25 (2005) 329-36.
- [42] Marques E.A.S., da Silva L.F.M. *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. The Journal of Adhesion 84:11 (2008) 915 – 934.



- [43] Adams R.D., Arkins R.W., Harris J.A., Kinloch A.J. *Stress analysis and failure properties of carbon-fibre-reinforced-plastic/steel double-lap joint*. The Journal of Adhesion 20 (1986) 29 – 53.
- [44] Tsai M.Y., Morton J. *An evaluation of analytical and numerical solutions to single-lap joint*. Int. J. Solids & Struct. 31 (1994) 2537 – 2563.
- [45] Chaves F.J.P., da Silva L.F.M., de Castro P.M.S.T. *Adhesively bonded T-joints in polyvinyl chloride windows*. Design Appl. 222 (2008) 159 – 174.
- [46] Cheuk P.T., e Tong L. *Failure of adhesive bonded composite lap shear joints with embedded precrack*. Composites Sci. Technol. 62 (2002) 1079 – 1095.
- [47] Rispler A.R., Tong L., Steven G.P., e Wisnom M.R. *Shape optimization of adhesive fillets*. Int. J. Adhesion & Adhesives 20 (2000) 221 – 231.
- [48] Lang T.P., e Mallick P.K. *Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints*. Int. J. Adhesion & Adhesives 18 (1998) 167 – 177.
- [49] Quaresimin M. e Ricotta M. *Fatigue behaviour and damage evolution of single lap bonded joints in composite material*. Composites Sci. Technol. 66 (2006) 176 187.
- [50] Mortensen F., Thomsen O.T. *Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach*. Composites Sci. Technol. 62 (2002) 1011 – 1031.
- [51] Kress G., Naeff P., Niedermeier M., e Ermanni. *A new joining technology for sandwich structures*. Composite Struct. 73 (2006) 196 – 207.
- [52] Kaye R.H., e Heller M. *Through-thickness shape optimization of bonded repairs and lap-joints*. Int. J. Adhesion & Adhesives 22 (2002) 7 – 21.
- [53] Hu F.Z., e Soutis C. *Failure analysis of scarf-patch-repaired composite laminates loaded in compression*. Composites Sci. Techn. 60 (2000) 1103 – 1114.
- [54] Haghani R., Al-Emrani M., Kliger R. *Effects of geometrical modifications on behavior of adhesive joints used to bond CFRP laminates to steel members – experimental investigation*. (2009) 280 – 282.
- [55] Cherry B.W., Harrison N.L. *The optimum profile for a lap joint*. The Journal of Adhesion. 2 (1970) 125 – 128.
- [56] Ávila A.F., e Bueno P.O. *Stress analysis on a wavy-lap bonded joint for composites*. Int. J. Adhesion & Adhesives 24 (2004) 407 – 414.
- [57] Zeng Q., e Sun C.T. *New design of a bonded lap joint*. A.I.A.A. J. 39 (2001) 1991 – 1996.
- [58] Fessel G., Broughton J.G., Fellows N.A., Durodola J.F., Hutchinson A.R. *Evaluation of different lap-shear joint geometries for automotive applications*. Int. J. Adhesion & Adhesives 27 (2007) 574 – 583.
- [59] McLaren A.S., e MacInnes I. *Brit. The influence on the stress distribution in an adhesive lap joint of bending of the adhering sheets*. J. Appl. Phys. 9 (1958) 72 – 77.
- [60] Zhan-Mou Y., Min Y., Xiao-Su Y., Xiao-Ling Z., Zhi L. *A numerical study of parallel slot in adherend on the stress distribution in adhesively bonded aluminum single lap joint*. International Journal of Adhesion & Adhesives 27 (2007) 687 – 695.

- [61] Volkersen O. *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung 15 (1938) 41-47.
- [62] Adams R.D., Peppiatt N.A. *Stress analysis of adhesively-bonded lap joints*. Journal of Strain Analysis 9 (1974) 185-196.
- [63] Harris J.A., Adams R.D. *Strength prediction of bonded single-lap joints by non-linear finite element methods*. Int. J. Adhes. & Adhes. 4 (1984) 65 – 78.
- [64] Sosa J.L.C., Karapurath N. *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology 72 (2012) 788 – 791.
- [65] Goland M., Reissner E. *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics 66 (1944) 17 – 27.
- [66] Hart-Smith L.J. *Stress analysis: a continuum mechanics approach*. In: Developments in Adhesives (1973).
- [67] Penado F.E. *A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint*. Journal of Thermoplastic Composite Materials 11 (1998) 272 – 287.
- [68] 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 26 (2007) 183 – 201.
- [69] Williams M.L. *The stress around a fault or crack in dissimilar media*. Bull Seism Soc. Of America 49 (1959) 199 – 204.
- [70] Fernlund G., Spelt J.K. *Failure load prediction*. Int. J. Adhes. & Adhes. 11 (1991) 213 – 227.
- [71] Duan K., Hu X., Mai Y.W. *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. J. Adhes. Sci. Technol. 18 (2004) 39 – 53.
- [72] Liljedahl C.D.M., Crocombe A.D., Wahab M.A., Ashcroft I.A. *Damage modelling of adhesively bonded joints*. Int. J. Fract. 141 (2006) 147 – 161.
- [73] Barenblatt G.I. *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks*. J. Appl. Math. Mech. 71 (1959) 622 – 636.
- [74] Feraren P., Jensen H.M. *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. Eng. Fract. Mech. 71 (2004) 2125 – 2142.
- [75] Yang Q.D., Thouless M.D. *Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints*. Int. J. Fract. 110 (2001) 175 – 187.
- [76] Khoramishad H., Crocombe A.D., Katnam K.B., Ashcroft I.A. *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. Int. J. Fatigue 32 (2010) 1146 – 1158.
- [77] Daudeville L., Ladeveze P. *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Compos. Struct. 25 (1993) 547 – 555.
- [78] Voyiadjis G.Z., Kattan P.I. *Damage Mechanics*. Marcell Dekker, New York (2005).

- [79] Shenoy V., Ashcroft I.A., Critchlow G.W., Crocombe A.D. *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Eng. Fract. Mech. 77 (2010b) 1073 – 1090.
- [80] Mohammadi S. *Extended finite element method for fracture analysis of structures*. Blackwell Publishing, New Jersey 46 (2008) 131 – 150.
- [81] Belytschko T., Black T. *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. Int. J. Fract. Mech. 45 (1999) 601 – 620.
- [82] Moës N., Dolbow J., Belytschko T. *A finite element method for crack growth without remeshing*. Int. J. Numer. Meth. Eng. 46 (1999) 131 – 150.
- [83] [http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy\\_6082-T6~T651\\_148.ashx](http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy_6082-T6~T651_148.ashx), consultado em 12/07/2012.
- [84] Campilho, R.D.S.G., Banea M.D., Pinto A.M.G., da Silva L.F.M., de Jesus A.M.P. *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. Int. J. Adhes. & Adhes. 31 (2011) 363–372.
- [85] 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*. Compos.: Part B 40 (2009) 149-157.7.
- [86] Reis P.N.B., Ferreira J.A.M., Antunes F. *Effect of adherend's rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints*. Int. J. Adhes. & Adhes. 31 (2011) 193-201.
- [87] Campilho R.D.S.G., de Moura M.F.S.F., Domingues J.J.M.S. *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. Int. J. Solids Struct. 45 (2008) 1497-1512.
- [88] Campilho R.D.S.G., Banea M.D., Neto J.A.B.P., da Silva L.F.M. *Modelling of single-lap joints using cohesive zone models: effect of the cohesive parameters on the output of the simulations*. J. Adhesion 88 (2012) 513-533.
- [89] Neto J.A.B.P., Campilho R.D.S.G., da Silva L.F.M. *Parametric study of adhesive joints with composites*. Int. J. Adhes. & Adhes. 37 (2012) 96-101.
- [90] <http://www.alusound.com/product/showproduct.php?lang=en&id=289>, consultado em 12/07/2012.



Tabela 9 Propriedades típicas das ligas Série 6xxx [90].

| SÉRIE 6xxx | 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>6</sup> K | CALOR ESPECÍFICO<br>J / Kg K | RESISTIVIDADE<br>ELÉCTRICA<br>20 - μΩ cm | CONDUITIVIDADE<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                                     |                                       |

Tabela 10 Composição química das ligas Série 6xxx [90].

|               | % 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      | 0.12-0.5Mn+Cr | 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      | Bi 0.7        | 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 | Bi 0.4-0.7    | 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     | "     |
| <b>7003</b>   | 0.30      | 0.35      | 0.20      | 0.30      | 0.50-1.00 | 5.00-6.50 | +Zr0.20     | -         | 0.10-0.35 | -             | 0.15     | "     |
| <b>7020</b>   | 0.35      | 0.40      | 0.20      | 0.05-0.50 | 1.00-1.40 | 4.00-5.00 | -Zr0.9-0.25 | -         | 0.10-0.30 | Ga 0.08-0.2   | 0.15     | "     |
| <b>7022</b>   | 0.50      | 0.50      | 0.50-1.00 | 0.10-0.40 | 2.60-3.70 | 4.30-5.20 | +Zr0.20     | -         | -         | -             | 0.15     | "     |
| <b>7049 A</b> | 0.40      | 0.50      | 1.20-1.90 | 0.50      | 2.10-3.10 | 7.20-8.40 | +Zr0.25     | -         | 0.05-0.25 | -             | 0.15     | "     |
| <b>7050</b>   | 0.12      | 0.15      | 1.90-2.50 | 0.10      | 2.00-2.70 | 5.90-6.90 | 0.06        | -         | 0.04      | -             | 0.15     | "     |
| <b>7075</b>   | 0.40      | 0.50      | 1.20-2.00 | 0.30      | 2.10-2.90 | 5.10-6.10 | +Zr0.20     | -         | -         | -             | 0.15     | "     |
| <b>7175</b>   | 0.15      | 0.20      | 1.20-2.00 | 0.10      | 2.10-2.90 | 5.10-6.10 | +Zr0.20     | -         | 0.18-0.28 | -             | 0.15     | "     |