



# Estudo de um adesivo estrutural em juntas de compósito-alumínio utilizando o floating roller peel test

JOÃO PEDRO OLIVEIRA PEREIRA

novembro de 2020

**ESTUDO DE UM ADESIVO ESTRUTURAL EM JUNTAS DE  
COMPÓSITO-ALUMÍNIO UTILIZANDO O *FLOATING*  
*ROLLER PEEL TEST***

João Pedro Oliveira Pereira

1140238

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



# **ESTUDO DE UM ADESIVO ESTRUTURAL EM JUNTAS DE COMPÓSITO-ALUMÍNIO UTILIZANDO O *FLOATING* *ROLLER PEEL TEST***

João Pedro Oliveira Pereira

1140238

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

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# JÚRI

## **Presidente**

Doutora Sandra Cristina de Faria Ramos

Professor Adjunto, ISEP

## **Orientador**

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

## **Coorientador**

Doutor Paulo Jorge Roque de Oliveira Nóvoa

Professor Assistente Convidado, ISEP

## **Arguente**

Doutor António Torres Marques

Professor Catedrático, FEUP



## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Campilho, orientador científico da presente dissertação, com quem foi um privilégio trabalhar, usufruindo da sua sabedoria, pela sua disponibilidade e apoio incansável apresentado no decorrer da execução deste trabalho.

Ao Professor Paulo Jorge Roque de Oliveira Nóvoa, coorientador da presente dissertação, por toda a disponibilidade e apoio prestados, especialmente na execução do trabalho experimental com o fabrico e ensaio dos provetes.

À Adriana Mota, aos meus avós, pais e irmão, por todo o apoio, incentivo e preocupação ao longo do meu percurso académico, sem o apoio dos quais a sua frequência e conciliação com a vida profissional não teria sido possível.



## PALAVRAS CHAVE

Juntas adesivas; Adesivo estrutural; Resistência de arrancamento; Testes de arrancamento; *Floating roller peel test*; Método de elementos finitos; Modelos de dano coesivo.

## RESUMO

A ligação entre materiais, em particular com a utilização de adesivos estruturais, tem vindo a ser utilizada ao longo de várias décadas, como uma forma de resolver vários problemas associados a técnicas mais tradicionais de ligação, como a soldadura e a ligação aparafusada. Esta alternativa apresenta vantagens relativamente às ligações mecânicas, como o menor peso estrutural, menor custo de fabricação e capacidade de união de diferentes materiais. Desta forma, são necessários métodos que permitam caracterizar e quantificar os esforços a que as juntas adesivas são sujeitas.

A presente dissertação focou-se nos ensaios de caracterização ao arrancamento (*peel tests*), que são amplamente utilizados para controlo de qualidade e determinação da resistência de arrancamento em adesivos. Existem vários formatos de *peel tests*, como ensaio *T-peel*, *peel-testing a 180°*, *floating Roller peel test* e *climbing drum peel test*. Os *peel tests* têm sido amplamente utilizados, sobretudo na indústria aeronáutica, como teste de controlo de qualidade e como forma de determinar a resistência ao arrancamento de juntas metálicas. No entanto, com a crescente utilização de materiais compósitos na indústria, torna-se necessário caracterizar também juntas com estes aderentes quando sujeitas a esforços de arrancamento. Desta forma, o presente trabalho pretende efetuar o estudo da prestação do adesivo estrutural Araldite® AV138 em juntas compósito-alumínio, compósito-compósito e alumínio-alumínio, utilizando para tal o método de ensaio *floating roller peel test*. Por outro lado, pretende-se também comprovar a aplicabilidade deste teste de controlo de qualidade da adesão e determinação da resistência de arrancamento em juntas com materiais compósitos. Um modelo numérico através da análise de modelos de dano coesivo (MDC) foi também desenvolvido de forma a recriar o *floating roller peel test* e comparar os resultados obtidos com os resultados experimentais.

Os resultados mostram que a prestação do adesivo Araldite® AV138 se enquadra dentro dos valores característicos de força de arrancamento de outros adesivos estruturais mais frágeis, com discrepâncias bastante reduzidas nos parâmetros determinados.



## KEYWORDS

Adhesive joints; Structural adhesive; Peel strength; Peel tests; Floating roller peel test; Finite element method; Cohesive zone models.

## ABSTRACT

Bonding of materials by structural adhesives has been used for several decades as a method of solving various problems associated with the more traditional joining methods, such as welding and mechanical fastening. This alternative presents multiple advantages comparing to mechanical joints, due to several factors such as less structural weight, lower manufacturing cost and possibility to join different materials. This way, testing methods are necessary to characterize and quantify the loads that bonded joints are subjected to.

This dissertation focuses on peel tests. These tests are widely used to characterize the peel strength of bonded joints and to control the adhesion quality. There are various configurations of peel test, such as the T-peel test, the peel testing at 180°, the floating roller peel test and the climbing drum peel test. These methods have been widely used mainly in the aeronautical industry, as a quality control test and a way of assessing the peel strength of metallic joints. Nonetheless, with the growing use of composite materials in the industry, it is necessary to characterize bonded joints with these materials when subjected to peeling loads. Here, in this dissertation the performance of the adhesive Araldite® AV138 is assessed in bonded joints with composite-aluminum, composite-composite and aluminum-aluminum adherends, using the floating roller peel test. On the other hand, this work also aims to prove that this method can be applied as a method of adhesion quality control and assessment of peel strength in bonded joints of composite materials. A numerical model was created using a cohesive zone modelling numerical analysis (CZM), in order to recreate the floating roller peel test and compare the numerical with the experimental results.

The results show that the peel performance of the adhesive Araldite® AV138 is within the results of other brittle structural adhesives, with very low variations in the determined parameters.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

CZM	<i>Cohesive zone modelling</i>
EF	Elementos finitos
HRR	Hutchinson-Rice-Rosengreen
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelo de dano coesivo
MEF	Método de elementos finitos
MEFX	Método de elementos finitos extendido
NPL	<i>National physical laboratory</i>
PRFC	Polímero reforçado com fibra de carbono
PRFV	Poliéster reforçado com fibras de vidro
PTFE	Politetrafluoretileno
SDEG	<i>Stiffness degradation</i>
TAST	<i>Thick adherend shear test</i>
TFFV	Técnica de fecho da fenda virtual

### Lista de Símbolos

$b$	Largura de junta
$E$	Módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young

$G$	Módulo de elasticidade transversal ou módulo de corte, quando se refere a ensaios ao corte, e taxa de libertação da energia, quando se refere a ensaios de fratura
$\hat{G}_C$	Taxa crítica de libertação de energia ou tenacidade à fratura
$G_{IC}$	Taxa crítica de libertação de energia de deformação à tração
$G_{IIC}$	Taxa crítica de libertação de energia de deformação ao corte
$h$	Distância entre as extremidades dos entalhes no ensaio losipescu
$HB$	Dureza Brinell
$L_o$	Comprimento de sobreposição
$L_f$	Comprimento do aderente flexível
$L_r$	Comprimento do aderente rígido
$L_T$	Comprimento total do provete
$M$	Momento
$M_t$	Momento torsor
$P$	Força aplicada
$P_{máx}$	Força máxima
$r$	Raio
$r_i$	Raio interior
$r_o$	Raio exterior
$t$	Espessura do provete
$t_a$	Espessura do adesivo
$t_f$	Espessura do aderente flexível
$t_m^0$	Resistência coesiva em modo misto
$t_r$	Espessura do aderente rígido
$t_s^0$	Resistência coesiva ao corte

---

$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\nu_a$	Deslocamento no adesivo
$\nu_m$	Deslocamento total
$\nu_t$	Deslocamento nos aderentes
$w$	Espessura da camada adesiva
$\delta_n^0$	Deslocamento correspondente à resistência coesiva à tração
$\delta_s^0$	Deslocamento correspondente à resistência ao corte
$\epsilon$	Deformação
$\epsilon_f$	Deformação de rotura
$\epsilon_r$	Deformação à tração
$\gamma$	Deformação de corte
$\gamma_r$	Deformação máxima de corte
$\varphi$	Ângulo de rotação
$\sigma$	Tensão
$\sigma_y$	Tensão de limite elástico ou tensão de cedência
$\sigma_r$	Tensão de rotura
$\sigma_{VM}$	Tensão de von Mises
$\tau$	Tensão de corte
$\tau_r$	Tensão de corte de rotura

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração dos conceitos de adesão e coesão numa junta adesiva [5].	10
Figura 2 - Comparação da distribuição de tensões em juntas adesivas, rebitadas e soldadas [2].	10
Figura 3 - Junta adesiva [10].	11
Figura 4 - Deformação plástica dos substratos [3].	12
Figura 5 - Exemplo de uma das primeiras aplicações de adesivos na indústria automóvel [3].	17
Figura 6 - Aplicações adesivas no Lamborghini Reventon Roadster ao nível da vedação de cárter, estrutura, vidro e portas [14].	17
Figura 7 - Junta adesiva entre o casco e o convés de um barco [13].	18
Figura 8 - Aplicações de adesivos na estrutura de um avião [14].	19
Figura 9 - Distribuição de tensões em função do grau de arredondamento dos substratos [26].	22
Figura 10 - (a) Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local e (b) modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua [27].	24
Figura 11 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento do dano do aderente de alumínio (b) [44].	26
Figura 12 - Provetes bulk para ensaios à tração de acordo com a norma EN ISO 527-3 (dimensões em mm) [3].	28
Figura 13 - Provette com juntas topo a topo (dimensões em mm) [59].	29
Figura 14 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ obtidas no ensaio de tração do adesivo 3M <sup>®</sup> DP-8005 [10].	29
Figura 15 - Representação esquemática de uma JSS [62].	30
Figura 16 - Dimensões em mm de uma JSS segundo a norma ASTM D1002 (dimensões em mm) [3].	31
Figura 17 - (a) Provete losipescu maciço; (b) Provete losipescu em junta; (c) Configuração de ensaio tipo Wyoming [60].	31
Figura 18 - (a) Provete Arcan; (b) tipo de fixação NPL [3, 64].	32
Figura 19 - Ensaio de torção de juntas topo a topo e geometria do provete [3].	33
Figura 20 - Provete de ensaio TAST de acordo com a norma ISO 11003-2 (dimensões em mm) [64].	34
Figura 21 - Mecanismo de fixação para o ensaio TAST [64].	35
Figura 22 - Diferentes configurações de <i>peel test</i> . (a) Teste <i>T-peel</i> , (b) <i>peel-testing</i> a 180°, (c) <i>climbing drum peel test</i> e (d) <i>floating roller peel test</i> [64].	35
Figura 23 - Representação do cálculo do momento produzido na dobragem durante o <i>peel test</i> [68].	36
Figura 24 - Representação das várias categorias de <i>T-peel</i> , demonstrando os formatos antes, durante e depois da descolagem [64].	37
Figura 25 - Ensaio <i>T-peel</i> da categoria II [64].	38
Figura 26 - Exemplo de provete <i>T-peel</i> pronto para ensaio [64].	39
Figura 27 - Posicionamento e fixação dos provetes no ensaio <i>peel test</i> a 180° [64].	40
Figura 28 - Resultado típico de um ensaio <i>peel test</i> a 180° [64].	41
Figura 29 - <i>floating roller peel test</i> [77].	42
Figura 30 - Configuração e geometria dos provetes no <i>floating roller peel test</i> de acordo com a norma ASTM D3167 [78].	42

Figura 31 - Forças de arrancamento - deslocamento. (a) resultados com a liga BS L61 e (b) resultados com a liga 2024 T3 [69].	43
Figura 32 – Representação do <i>climbing drum peel test</i> [64].	44
Figura 33 - <i>Climbing drum peel test</i> e o resultado típico (adaptado de [64]).	45
Figura 34 -Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ do alumínio Al6082-T651 [82].	51
Figura 35 – Adesivo Araldite® AV138.	52
Figura 36 – Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços constituídos pelo adesivo Araldite® AV138 [84].	52
Figura 37 - Configuração da geometria dos provetes <i>floating roller peel test</i> . (Adaptado de [77]).	54
Figura 38 – Acessório de fixação para o ensaio <i>floating roller peel test</i> e a configuração de ensaio [78].	55
Figura 39 - Processo de corte das camadas de PRFC.	56
Figura 40 – a) Aplicação de pressão na camada com recurso a uma espátula e b) aspeto final da camada após o aquecimento.	57
Figura 41 - Aplicação do filme desmoldante.	58
Figura 42 - Ciclo de cura utilizado para as placas de PRFC [83].	58
Figura 43 - Máquina de corte utilizada.	59
Figura 44 - Procedimento de corte para os provetes das configurações C-c-90 e C-c-0 [77].	59
Figura 45 - Corte dos aderentes de PRFC para as configurações C-c-90 e C-c-0.	59
Figura 46 - a) Processo de lixagem dos substratos de alumínio e b) processo de lixagem dos substratos de PRFC.	60
Figura 47 - Aspeto dos substratos de alumínio após a preparação superficial e limpeza.	60
Figura 48 – a) Aplicação das lâminas nos substratos e b) exemplo de lâmina utilizada para assegurar a espessura $t_a$ após limpeza superficial.	61
Figura 49 - Aplicação do adesivo nos substratos.	61
Figura 50 -a) Alinhamento dos provetes previamente à colagem e b) fixação e alinhamento dos provetes após colagem.	62
Figura 51 -Processo de remoção dos excessos de adesivo nos provetes.	62
Figura 52 – Correto posicionamento de um provete do ensaio <i>floating roller peel test</i> numa máquina de ensaios de tração Shimadzu AG-1.	63
Figura 53 - Provede após o final do ensaio.	64
Figura 54 – Curvas $P/b - a$ obtidas experimentalmente após ensaio da configuração A-a.	65
Figura 55 - Modos de rotura da configuração A-a.	66
Figura 56 – Curvas $P/b - a$ obtidas experimentalmente após ensaio da configuração A-c-0.	67
Figura 57 - Modos de rotura da configuração A-c-0.	68
Figura 58 – Curvas $P/b - a$ obtidas experimentalmente após ensaio da configuração A-c-90.	69
Figura 59 - Modos de rotura da configuração A-c-90.	70
Figura 60 - Curvas $P/b - a$ obtidas experimentalmente após ensaio da configuração C-c-0.	71
Figura 61 - Modos de rotura da configuração C-c-0.	72
Figura 62 – Curvas $P/b - a$ obtidas experimentalmente após ensaio da configuração C-c-90.	73
Figura 63 - Modos de rotura da configuração C-c-90.	74
Figura 64 - Curvas $P/b - a$ obtidas experimentalmente após ensaio da configuração C-a.	75
Figura 65 - Modos de rotura da configuração C-a.	76
Figura 66 - Comparação gráfica dos valores de $P/b_{médio}$ e desvios padrões obtidos nas seis configurações testadas.	77

Figura 67 – Configuração desenhada no <i>software</i> ABAQUS® para simular o <i>floating roller peel test</i> . .....	81
Figura 68 – Partições criadas para a construção da malha. ....	81
Figura 69 – Condições fronteira e deslocamento aplicados ao provete. ....	82
Figura 70 – Sentido de <i>bias</i> da malha na zona de sobreposição. ....	83
Figura 71 – Pormenor da malha na extremidade de $L_0$ . ....	84
Figura 72 – Lei triangular do modelo de dano coesivo. ....	85
Figura 73 - Curva $P/b - a$ numérica após simulação da configuração A-a. ....	88
Figura 74 – Propagação da fenda na simulação numérica da configuração A-a. ....	89
Figura 75 - Curva $P/b - a$ numérica após simulação da configuração A-c-0. ....	89
Figura 76 - Propagação da fenda na simulação numérica da configuração A-c-0. ....	90
Figura 77 - Curva $P/b - a$ numérica após simulação da configuração A-c-90. ....	91
Figura 78 - Propagação da rotura na simulação numérica da configuração A-c-90. ....	92
Figura 79 - Curva $P/b - a$ numérica após simulação da configuração C-c-0. ....	92
Figura 80 - Propagação da rotura na simulação numérica da configuração C-c-0. ....	93
Figura 81 - Curva $P/b - a$ numérica após simulação da configuração C-c-90. ....	94
Figura 82 - Propagação da rotura na simulação numérica da configuração C-c-90. ....	94
Figura 83 - Curva $P/b - a$ numérica após simulação da configuração C-a. ....	95
Figura 84 - Propagação da rotura na simulação numérica da configuração C-a. ....	96
Figura 85 – Comparação gráfica dos valores de $P/b_{\text{médio}}$ entre os resultados experimentais e numéricos. .....	96
Figura 86 – Curvas $P/b-a$ obtidas experimentalmente e numericamente para a configuração A-c-0. ....	97
Figura 87 – Curvas $P/b-a$ obtidas experimentalmente e numericamente para a configuração C-c-0. ....	97
Figura 88 – Curvas $P/b-a$ obtidas experimentalmente e numericamente para a configuração A-c-90. ....	98
Figura 89 – Curvas $P/b-a$ obtidas experimentalmente e numericamente para a configuração C-c-90. ....	98
Figura 90 – Curvas $P/b-a$ obtidas experimentalmente e numericamente para a configuração A-a. ....	99
Figura 91 - Curvas $P/b-a$ obtidas experimentalmente e numericamente para a configuração C-a. ....	100



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Calendarização do trabalho. ....	4
Tabela 2 – Legenda das tarefas desempenhadas. ....	4
Tabela 3 -Tipos de adesivos estruturais [7]. ....	15
Tabela 4 – Algumas propriedades dos adesivos estruturais [12]. ....	15
Tabela 5 -Composição química da liga de alumínio AW 6082 – T651 [81]. ....	50
Tabela 6 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651 (dados do fabricante) [81]. ....	50
Tabela 7 - Propriedades mecânicas à tração da liga de alumínio Al6082-T651 [82]. ....	50
Tabela 8 – Propriedades mecânicas do pré-impregnado de matriz HexPly® 8552 e reforço de fibra de carbono HexTow® AS4 [83]. ....	51
Tabela 9 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [85]. ....	53
Tabela 10 – Nomenclatura e configurações dos provetes fabricados. (Adaptado de [77]). ....	54
Tabela 11 - Dimensões dos provetes <i>floating roller peel test</i> . ....	55
Tabela 12 - Configurações das placas PRFC fabricadas. ....	56
Tabela 13 – Resultados obtidos após o ensaio dos provetes da configuração A-a. ....	66
Tabela 14 – Quantificação dos modos de rotura da configuração A-a. ....	67
Tabela 15 - Resultados obtidos após o ensaio dos provetes da configuração A-c-0. ....	68
Tabela 16 - Quantificação dos modos de rotura da configuração A-c-0. ....	69
Tabela 17 - Resultados obtidos após o ensaio dos provetes da configuração A-c-90. ....	70
Tabela 18 - Quantificação dos modos de rotura da configuração A-c-90. ....	71
Tabela 19 - Resultados obtidos após o ensaio dos provetes da configuração C-c-0. ....	72
Tabela 20 - Quantificação dos modos de rotura da configuração C-c-0. ....	73
Tabela 21 - Resultados obtidos após o ensaio dos provetes da configuração C-c-90. ....	74
Tabela 22 - Quantificação dos modos de rotura da configuração C-c-90. ....	75
Tabela 23 - Resultados obtidos após o ensaio dos provetes da configuração C-a. ....	76
Tabela 24 - Quantificação dos modos de rotura da configuração C-a. ....	77
Tabela 25 - Comparação dos valores de $P/b_{médio}$ e desvios padrões obtidos nas seis configurações testadas. ....	79
Tabela 26 – Comparação dos modos de rotura obtidos nas seis configurações testadas. ....	79
Tabela 27 – Propriedades dos aderentes inseridas no <i>software</i> ABAQUS® [83, 88, 89]. ....	82
Tabela 28 – Definições de incrementação no <i>software</i> ABAQUS®. ....	84
Tabela 29 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com $t_A$ de 0,2 mm. ....	87
Tabela 30 - Resultados numéricos após simulação da configuração A-a. ....	88
Tabela 31 - Resultados numéricos após simulação da configuração A-c-0. ....	90
Tabela 32 - Resultados numéricos após simulação da configuração A-c-90. ....	91
Tabela 33 - Resultados numéricos após simulação da configuração C-c-0. ....	93
Tabela 34 - Resultados numéricos após simulação da configuração C-c-90. ....	94
Tabela 35 - Resultados numéricos após simulação da configuração C-a. ....	95



# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	3
1.1	Contextualização .....	3
1.2	Objetivo .....	3
1.3	Calendarização .....	4
1.4	Organização da dissertação .....	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Ligações adesivas .....	9
2.1.1	Caraterização das ligações adesivas.....	10
2.1.1.1	Processo de construção de uma junta adesiva .....	12
2.1.1.2	Classificação dos adesivos .....	13
2.1.1.2.1	Classificação segundo a composição química .....	13
2.1.1.2.2	Classificação segundo o seu desempenho .....	14
2.1.1.2.3	Classificação segundo o método de reação .....	16
2.1.1.2.4	Classificação segundo a sua forma física.....	16
2.1.2	Aplicações das juntas adesivas.....	16
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas .....	19
2.2.1	Mecânica dos meios contínuos .....	20
2.2.1.1	Modelos analíticos .....	21
2.2.1.2	Modelos de Elementos Finitos.....	21
2.2.1.3	Critérios de rotura.....	22
2.2.2	Mecânica da fratura .....	23
2.2.3	Modelos de dano coesivo.....	23
2.2.4	Mecânica do dano .....	24
2.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido .....	25
2.3	Determinação das propriedades mecânicas de adesivos .....	27
2.3.1	Propriedades mecânicas à tração.....	27
2.3.2	Propriedades mecânicas ao corte .....	30
2.3.2.1	Ensaio em junta de sobreposição simples .....	30
2.3.2.2	Ensaio Iosipescu .....	31
2.3.2.3	Ensaio Arcan .....	32
2.3.2.4	Ensaio TAST.....	34

2.4	Ensaio de caracterização ao arrancamento .....	35
2.4.1	Ensaio T-peel .....	36
2.4.1.1	Configurações T-peel .....	37
2.4.1.2	Fabrico de juntas, ensaio e interpretação de resultados.....	38
2.4.2	Peel test at 180° .....	40
2.4.2.1	Fabrico de juntas, ensaio e interpretação de resultados.....	40
2.4.3	Floating roller peel test .....	41
2.4.3.1	Fabrico de juntas, ensaio e interpretação de resultados.....	42
2.4.3.2	Elementos finitos e investigação experimental .....	43
2.4.4	Climbing drum peel test .....	44
2.4.4.1	Ensaio e interpretação de resultados .....	44
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>49</b>
3.1	Trabalho experimental.....	49
3.1.1	Materiais .....	49
3.1.1.1	Substratos .....	49
3.1.1.2	Adesivo .....	51
3.1.2	Procedimento experimental.....	53
3.1.2.1	Geometria das juntas.....	54
3.1.2.2	Processo de fabrico.....	56
3.1.2.3	Procedimento de ensaio .....	63
3.1.3	Resultados .....	64
3.1.3.1	Configuração A-a.....	65
3.1.3.2	Configuração A-c-0.....	67
3.1.3.3	Configuração A-c-90.....	69
3.1.3.4	Configuração C-c-0.....	71
3.1.3.5	Configuração C-c-90.....	73
3.1.3.6	Configuração C-a.....	75
3.1.4	Análise de Resultados.....	77
3.2	Trabalho numérico .....	80
3.2.1	Condições da análise numérica .....	80
3.2.2	Modelo de dano coesivo .....	84
3.2.2.1	Modelo de dano triangular .....	84
3.2.2.2	Determinação das propriedades coesivas .....	86
3.2.3	Análise das forças de arrancamento .....	87
3.2.3.1	Configuração A-a.....	87
3.2.3.2	Configuração A-c-0.....	89
3.2.3.3	Configuração A-c-90.....	90
3.2.3.4	Configuração C-c-0.....	92
3.2.3.5	Configuração C-c-90.....	93
3.2.3.6	Configuração C-a.....	95
3.2.4	Previsão da resistência .....	96

---

4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	103
4.1	CONCLUSÕES.....	103
4.2	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	104
5	REFERÊNCIAS.....	109



# INTRODUÇÃO



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

As juntas adesivas, devido ao seu leque alargado de potencialidades na ligação de materiais, têm vindo a verificar um crescimento bastante significativo na indústria. Trata-se de um método de ligação que ainda não se encontra tão estudado e desenvolvido como outros métodos de ligação, como por exemplo a ligação por soldadura, ligações aparafusadas ou rebitadas. Desta forma, com o também crescente aumento na utilização de materiais compósitos, em indústrias como a aeronáutica e automóvel, por vezes torna-se necessário a união entre materiais compósitos ou até mesmo entre alumínio e materiais compósitos. As juntas adesivas tornaram-se assim numa solução, sobretudo quando o objetivo é a união entre materiais diferentes, mesmo aqueles mais suscetíveis a desenvolver corrosão galvânica.

Por norma, as ligações adesivas podem estar sujeitas a quatro modos elementares de carregamento, sendo eles a tração, corte, arrancamento e clivagem. Na prática, é possível encontrar combinações destes modos ou variações. A maior parte dos estudos disponíveis com juntas compósito-alumínio ou compósito-compósito foca-se na determinação das propriedades mecânicas e de fratura. No entanto, é também necessário avaliar a qualidade da adesão nestas configurações. Mais recentemente, testes de arrancamento, como o *floating roller peel test*, têm sido utilizados na indústria como teste de controlo de qualidade da adesão em provetes metálicos. Como para provetes com aderentes compósitos os requisitos de adesão têm de ser os mesmos, alguns estudos já têm aplicado este método de ensaio na avaliação da qualidade de adesão entre aderentes compósitos ou compósito-alumínio.

A motivação deste trabalho é assim estudar a resistência ao arrancamento de um adesivo frágil e rígido (Araldite® AV138) em juntas adesivas com aderentes compósitos e compósito-alumínio. Comprovando também a aplicabilidade do *floating roller peel test* em provetes com materiais compósitos, através da comparação dos resultados obtidos com os resultados de uma configuração com ambos os aderentes em alumínio.

## 1.2 Objetivo

A presente dissertação tem como principal objetivo o estudo de um adesivo estrutural em juntas de compósito-alumínio utilizando o *floating roller peel test*. Para este efeito, o adesivo estrutural Araldite® AV138 foi testado em juntas compósito-alumínio, compósito-compósito e alumínio-alumínio. O objetivo foi caracterizar os valores de resistência de arrancamento e os modos de rotura obtidos nas diferentes configurações

com este adesivo. Ao mesmo tempo, é comprovada a aplicabilidade deste teste de controlo de qualidade da adesão e determinação da resistência de arrancamento em juntas com materiais compósitos.

Pretendeu-se também desenvolver um modelo numérico através de uma análise de modelo de dano coesivo (MDC), de forma a recriar o *floating roller peel test* e comparar os resultados obtidos numericamente com os resultados obtidos experimentalmente.

Dada a complexidade inerente a este objetivo, sentiu-se a necessidade de o subdividir em múltiplas tarefas de realização mais simples, tais como:

- Revisão bibliográfica;
- Seleção do adesivo e dos substratos a utilizar;
- Fabrico dos substratos de compósito e posterior fabrico das juntas para ensaio;
- Realização de ensaios do tipo *floating roller peel test*;
- Tratamento de dados e análise dos resultados;
- Criação de um modelo numérico para simulação do *floating roller peel test*;
- Tratamento de dados e análise dos resultados numéricos;
- Comparação entre os resultados experimentais e numéricos.

### 1.3 Calendarização

Na Tabela 1 encontra-se representada a calendarização das várias etapas inerentes à realização da presente dissertação. A legenda das tarefas desempenhadas encontra-se na Tabela 2.

Tabela 1 - Calendarização do trabalho.

	Ano	2019		2020									
	Mês	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT
Tarefas	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
	7												
	8												
	9												
	10												

Tabela 2 – Legenda das tarefas desempenhadas.

1	Pesquisa e introdução	6	Análise de resultados
2	Revisão bibliográfica	7	Desenvolvimento do modelo numérico
3	Fabrico dos provetes	8	Análise dos resultados numéricos
4	Realização dos ensaios	9	Conclusões
5	Tratamento de dados	10	Elaboração do relatório

## 1.4 Organização da dissertação

Com o objetivo de providenciar uma melhor interpretação e análise do trabalho desenvolvido, a presente dissertação foi organizada em 4 capítulos distintos.

No capítulo 1 é efetuada a contextualização da dissertação, descritos os objetivos propostos, apresentada a calendarização das tarefas e descrita a divisão dos conteúdos por capítulo.

O capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica da dissertação. Inicia-se por efetuar uma caracterização das ligações adesivas, indicando as suas principais aplicações. De seguida são abordados os métodos de previsão de resistência de juntas adesivas, referindo modelos analíticos, métodos de elementos finitos (MEF) e critérios de rotura. Neste capítulo são também abordados métodos de determinação das propriedades mecânicas à tração e ao corte. Por fim é realizada uma abordagem aos ensaios de caracterização ao arrancamento, indicando as diferentes configurações, as suas características e de que forma estes têm sido aplicados na indústria e para caracterizar a qualidade da adesão em juntas adesivas.

O capítulo 3 é representativo do trabalho experimental e numérico desenvolvidos na presente dissertação. São apresentados e analisados os resultados obtidos para as forças de arrancamento e modos de rotura das diferentes configurações testadas. De seguida o método de ensaio é replicado no *software* ABAQUS®, reportando também os resultados obtidos e comparando com os resultados experimentais.

No capítulo 4 estão reunidas as conclusões retiradas desta dissertação, assim como são indicados possíveis trabalhos futuros.



# **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ligações adesivas

A ligação entre materiais, sejam eles similares ou dissimilares, é uma ciência que tem sido bastante desenvolvida ao longo do tempo. O requisito predominante de uma ligação eficaz é a transmissão de carga entre dois componentes, de forma a manter a integridade da estrutura durante as solicitações a que será sujeita no decorrer do seu tempo de vida.

Atualmente existe um leque bastante variado de opções para escolher qual o método de ligação apropriado a uma determinada aplicação ou conjunto de materiais. Entre estes processos de ligação encontram-se por exemplo as ligações por soldadura, as ligações mecânicas e as ligações por intermédio de adesivos [1].

Cada um destes métodos de ligação apresenta as suas vantagens e desvantagens, não sendo possível eleger um método que apresente maior eficiência de ligação para o geral das aplicações. Torna-se, assim, importante estudar cada um dos métodos, de forma a perceber qual o mais apropriado, mediante a aplicação e os materiais a ligar.

As ligações adesivas são, atualmente, o processo de ligação que mais interesse tem despertado junto da comunidade científica, sendo assim alvo de inúmeras investigações. O seu estudo e evolução é relativamente recente quando comparado com os métodos mais tradicionais. Apenas durante o último século o estudo das ligações adesivas se tem desenvolvido de forma mais significativa, com a introdução dos polímeros sintéticos, novos processos de ligação e tecnologias utilizadas [2]. Esta evolução deve-se por exemplo à evolução da indústria automóvel e ao crescimento na utilização de materiais compósitos observado nesta indústria [3].

De acordo com a norma DIN EN 923, um adesivo é uma substância não metálica, capaz de unir materiais por fixação à sua superfície (processo de adesão), em que o vínculo estabelecido entre os elementos supõe existência de resistência interna (coesão) [4].

No estudo das ligações adesivas, é importante fazer a distinção entre os conceitos de adesão e a coesão, dado que são dois conceitos que se encontram intrinsecamente associados às ligações adesivas. A adesão é a atração entre duas substâncias resultantes das forças intermoleculares que se estabelece entre elas. A coesão está associada às forças intermoleculares que se verificam dentro de uma substância [3].

Na Figura 1 é possível observar a ilustração dos conceitos de adesão e coesão.

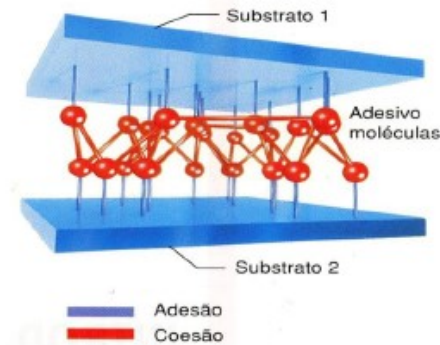


Figura 1 - Ilustração dos conceitos de adesão e coesão numa junta adesiva [5].

### 2.1.1 Caracterização das ligações adesivas

Tal como estabelecido anteriormente, ao longo dos últimos anos foi verificado um crescente uso das ligações adesivas, sobretudo para ligar materiais avançados de alta resistência específica, como os compósitos de matriz polimérica. A justificação para este crescimento reside no facto de as ligações adesivas apresentarem diversas vantagens em comparação com os métodos de ligação mais tradicionais, nomeadamente [3, 6, 7]:

- Possibilidade de unir materiais dissimilares;
- Obtenção de elevadas resistências mecânicas;
- Distribuição mais uniforme das tensões sobre o total da área colada, bem como a redução ou eliminação de concentração de tensões (Figura 2);
- Excelente resistência à fadiga.
- Elevada capacidade de amortecimento de vibrações;
- Redução do peso da estrutura e conseqüente diminuição do valor de rácio entre o peso da estrutura e a resistência mecânica obtida;
- Boa resistência à corrosão (capacidade de ligar metais suscetíveis de desenvolver corrosão galvânica);
- Garantia de estanquicidade da junta de ligação. Ao mesmo tempo que produzem a união, os adesivos também atuam como vedantes, impedindo assim que a condensação penetre na ligação.

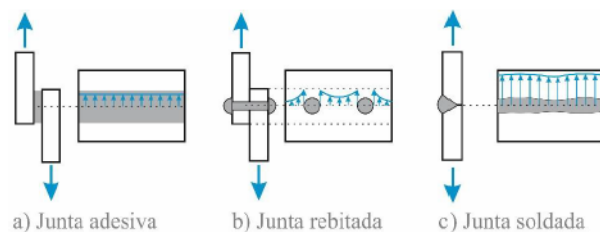


Figura 2 - Comparação da distribuição de tensões em juntas adesivas, rebitadas e soldadas [2].

No entanto, da mesma forma que lhe são reconhecidas diversas vantagens, é também importante referenciar as suas limitações que comprometem a utilização deste tipo de ligação, em determinadas aplicações. Em seguida são enumeradas algumas das desvantagens inerentes a este processo de ligação [3, 8, 9].

- Necessidade de um tratamento das superfícies a ligar;
- O processo de endurecimento da ligação pode ser bastante demorado;
- Alguns adesivos requerem a aplicação de temperatura e pressão para a adesão;
- A resistência e durabilidade das ligações está bastante dependente das condições de processamento;
- Em alguns casos podem ser mais dispendiosas do que as ligações mecânicas;
- Alguns adesivos apresentam tempos de vida curtos;
- Baixa resistência à clivagem e ao arrancamento;
- Baixa resistência em ambientes extremamente húmidos ou altas temperaturas;
- Impossibilidade de desmontagem;
- Difícil controlo de qualidade, embora atualmente existam técnicas não destrutivas, como a análise por ultrassons, vibrações, radiografia, entre outras.

As ligações adesivas podem também ser designadas por ligações coladas ou juntas adesivas. Uma junta adesiva é constituída pelos seguintes elementos: aderentes, adesivo, primário (quanto utilizado) e as respetivas interfases, como constatável na Figura 3.

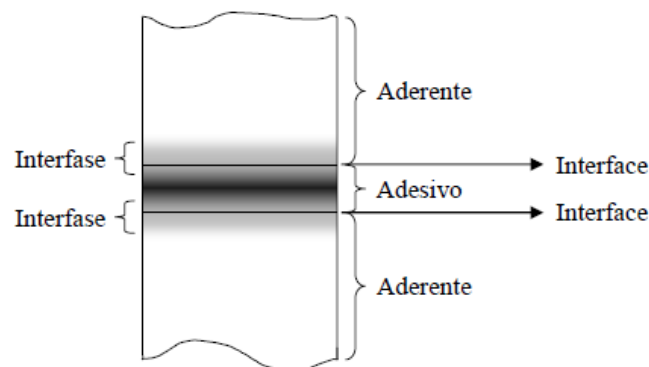


Figura 3 - Junta adesiva [10].

Os aderentes ou substratos são os membros estruturais da junta que são ligados entre si através do adesivo. Geralmente, utiliza-se o termo substrato para designar os componentes antes da ligação e o termo aderentes após a colagem.

O adesivo trata-se do material polimérico que promove a união entre os dois substratos. Este tem de possuir capacidade para resistir à separação, pela ação combinada das forças adesivas e coesivas. Por vezes, previamente à aplicação do adesivo, é utilizado um primário para revestir as superfícies dos substratos, de forma a melhorar a adesão ou para proteger as superfícies até à aplicação do adesivo.

A interfase é a região entre o adesivo e o aderente que se estende desde um ponto no aderente, onde as propriedades locais começam a alterar-se desde as propriedades maciças do aderente não alteradas pelo adesivo, até um ponto no adesivo onde as propriedades locais são iguais às propriedades maciças do adesivo não alteradas pelo aderente. A interface, também designada por camada limite, está contida na interfase e corresponde ao plano de contacto entre o adesivo e o aderente [2].

### 2.1.1.1 Processo de construção de uma junta adesiva

O processo de ligação das juntas adesivas inclui as seguintes etapas [3]:

- Seleção do adesivo;
- Projeto da junta;
- Preparação da superfície;
- Fabrico da junta;
- Controlo do processo.

A seleção do adesivo deve ter alguns parâmetros em consideração dependendo sobretudo da aplicação pretendida. Por norma, os parâmetros mais importantes são a resistência mecânica, ductilidade, temperatura de serviço, meio ambiente em que irá operar, método de aplicação e condições de cura.

Para o projeto da junta, parte-se do princípio que existe uma adesão perfeita entre o adesivo e o aderente. É, assim, necessário conhecer as propriedades do adesivo de forma a projetar a junta e garantir que as solicitações aplicadas não provocam a plastificação ou rotura da junta. Os métodos de dimensionamento selecionados devem ter em consideração a resistência mecânica estática, assim como a resistência à fadiga e à fluência.

Numa ligação ideal, o substrato deve ser o componente menos resistente da junta. No entanto, na maior parte das ligações adesivas, é constatável que o adesivo é o elemento que mais rapidamente atinge o ponto de rotura. Isto deve-se ao facto de as forças de adesão serem superiores às forças de coesão que atuam no seio do adesivo, tornando-o no elo mais fraco da junta adesiva.

A cedência dos substratos é também um fator que condiciona a rotura do adesivo, uma vez que a deformação plástica dos substratos provoca uma concentração de tensões na vizinhança das extremidades do comprimento de sobreposição ( $L_0$ ), o que pode conduzir à rotura prematura do adesivo [3]. Este fenómeno é exemplificado na Figura 4.

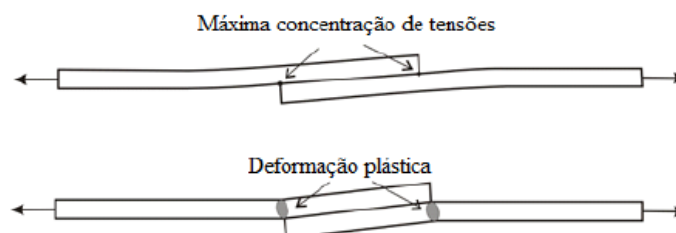


Figura 4 - Deformação plástica dos substratos [3].

A preparação de superfície requer o conhecimento do adesivo e substrato a ligar, de modo a garantir uma boa adesão inicial e posteriormente em serviço. Os tratamentos de superfície são essenciais para que a colagem dos substratos seja bem executada. A sua principal finalidade consiste na formação de superfícies resistentes, resultando numa junta estável e com um índice de molhabilidade bastante elevado. Entre alguns dos tratamentos de superfície, encontram-se por exemplo a abrasão manual com lixa, a

granalhagem, a descarga de corona e chama [1]. Estes métodos previnem a presença de óxidos, pós, óleos, humidade e outras impurezas nas superfícies a ligar e evitam assim que estes afetem negativamente a resistência final da ligação adesiva.

O fabrico da junta envolve a aplicação do adesivo sobre os substratos a unir e a cura do adesivo de acordo com determinadas condições de temperatura e pressão. Uma vez que o adesivo é aplicado no estado líquido, é necessário que os substratos a ligar estejam apropriadamente fixos durante a cura [3].

Por fim, de forma a garantir uma qualidade satisfatória a curto e longo prazo das ligações adesivas, as juntas devem ser sujeitas a processos de controlo através de técnicas não destrutivas de inspeção. Alguns exemplos destas técnicas são a radiografia, a inspeção visual, o ensaio de líquidos penetrantes, a holografia, entre outros [8].

### 2.1.1.2 *Classificação dos adesivos*

Existem várias formas de classificar os adesivos. Dos métodos existentes, serão descritos os que permitem classificar os adesivos quanto à sua composição química, desempenho, método de reação e forma física [9].

#### 2.1.1.2.1 *Classificação segundo a composição química*

A classificação de adesivos quanto à sua composição química permite separar por grupos adesivos que apresentem propriedades semelhantes. Estas propriedades estão intrinsecamente ligadas à estrutura molecular do material. De acordo com este critério, é possível dividir os adesivos nas seguintes classes [9]:

- **Termoendurecíveis:** Apresentam uma estrutura fortemente reticulada, possuindo uma grande rigidez após a sua polimerização. No entanto, após a cura degradam-se facilmente sob a ação de temperaturas elevadas. A sua cura dá-se por uma reação química irreversível à temperatura ambiente ou a altas temperaturas. Por vezes pode ser necessária a aplicação de pressão. Apresentam boa resistência a agentes químicos, térmica, mecânica e à fluência;
- **Termoplásticos:** Tratam-se de polímeros lineares ou ramificados, que podem ser fundidos pela adição de calor, podendo também ser moldados e remoldados, permitindo assim uma fácil deposição nas juntas a serem ligadas. Estes não curam ou endurecem com o calor. Não são considerados bons adesivos, pelo que não são utilizados em aplicações estruturais. Uma das justificações é o seu baixo desempenho a altas temperaturas;
- **Elastoméricos:** Este tipo de adesivo pode ser termoplástico ou termoendurecível. Possuem uma rede macromolecular levemente reticulada que confere uma grande capacidade de deformação. Absorvem, assim, bastante energia e fornecem uma boa resistência a juntas submetidas a um carregamento não uniforme. São também ideais para a ligação de substratos com coeficientes de dilatação térmica diferentes;

- Híbridos: Os adesivos híbridos são uma combinação de resinas termoendurecíveis, termoplásticas e elastoméricas. Foram desenvolvidos para retirar partido das propriedades mais úteis de cada componente. Por isto, são sobretudo utilizados como adesivos estruturais, onde o grau de exigência é elevado. Possuem resistências elevadas ao arrancamento, impacto e corte, sem sacrificar a resistência química e a resistência a altas temperaturas.

#### 2.1.1.2.2 Classificação segundo o seu desempenho

A classificação de adesivos baseada no desempenho que estes apresentam, permite a criação de dois grupos, os adesivos estruturais e os adesivos não estruturais [9]. Na ótica do utilizador este trata-se do critério mais interessante, uma vez que o critério a considerar será o desempenho do adesivo.

O grupo dos adesivos estruturais constitui materiais de elevada resistência coesiva com capacidade de unir outros materiais de elevada resistência, como polímeros, metais, compósitos, madeira, entre outros. Os adesivos estruturais garantem que a resistência da ligação adesiva ao corte excede os 6,9 MPa à temperatura ambiente. Dependendo do tipo de aplicação, os adesivos estruturais devem garantir uma boa ligação face ao ambiente onde estão inseridos, sendo capazes de transferir as forças aplicadas à junta em condições de serviço. Também podem ser considerados como materiais de provada fiabilidade em aplicações nas quais a ligação deve ser mantida sem ocorrência de falha, mesmo quando sujeita a solicitações significativas por um longo período de tempo [11].

A maioria dos materiais utilizados nos adesivos estruturais são os termoendurecíveis como os cianoacrilatos e os anaeróbicos. No entanto, alguns termoplásticos podem também ser considerados como adesivos estruturais [12]. Dentro do grupo de adesivos estruturais, podem-se considerar os seguintes tipos: acrílicos, epóxidos, fenólicos, poliuretanos e poliamidas. Na Tabela 3 estão agrupados esses tipos de adesivos estruturais. Já na Tabela 4 estão agrupados os tipos de adesivos e apresentadas algumas das suas propriedades.

Quanto aos adesivos não estruturais, são exemplos destes os adesivos sensíveis a pressão, adesivos termofusíveis e as emulsões de água, pois têm baixa resistência ao corte, à temperatura e a agentes químicos. Por vezes, podem ser combinados com outro tipo de ligações mecânicas, permitindo assim a redução do número de ligações mecânicas, amortecimento de vibrações, vedação e isolamento [9].

Tabela 3 -Tipos de adesivos estruturais [7].

Acrílicos	Anaeróbicos
	Cianoacrilatos
Epóxidos	Acrílicos modificados
	Epóxidos-fenólicos
	Epóxido-nitrilo
	Epóxido-poliamida
	Epóxido-polisulfetos
Fenólicos	Epóxido-poliuretano
	Epóxido-vinílico
	Fenólicos-cloropreno
Poliimida	Fenólicos-nitrilo
	Fenólicos-vinílicos
Poliuretano	

Tabela 4 – Algumas propriedades dos adesivos estruturais [12].

Tipo	Apresentação	Temperatura máxima em contínuo [°C]	Resistência			
			Corte [MPa]	Arrancamento	Fluência	
Acrílicos	Anaeróbicos	Líquido	120-150	10-40	Boa	Média
	Cianoacrilatos	monocomponente	80	10-35	Medíocre	Má
Epóxidos	Epóxido-fenólicos	Líquido monocomponente Filme	200-250	20	Boa	Medíocre
	Epóxido-nitrilo	Filme	100-120	10-46	Boa	Média
	Epóxido-poliamida	Líquido bicomponente	80	15-25	Medíocre	Boa
	Epóxido-polisulfetos	Líquido bicomponente	80	15-25	Medíocre	Boa
	Fenólicos-nitrilo	Líquido monocomponente Filme	140-170	15-30	Média	Boa
Fenólicos	Fenólicos-vinílicos	Líquido monocomponente Líquido + pó Filme	100-130	17-35	Média	Boa
Poliamida	Filme	250-300	10-15	Boa	Má	
Poliuretano	Líquido bicomponente	90	8-15	Média	Boa	

### 2.1.1.2.3 Classificação segundo o método de reação

O método de reação ou modo de endurecimento, pode ser um fator muito importante no processo de seleção de um adesivo. De facto, este pode limitar significativamente as características do adesivo dependendo das aplicações.

Quanto ao método de reação, os adesivos dividem-se pelos seguintes grupos [9]:

- Adesivos que endurecem por reação química. São exemplos a reação com endurecedor, com calor, radiação, entre outros;
- Adesivos que endurecem por perda de solvente;
- Adesivos que endurecem por perda de água;
- Adesivos que endurecem por arrefecimento desde o estado líquido (após fusão).

### 2.1.1.2.4 Classificação segundo a sua forma física

De acordo com o critério de classificação segundo a sua forma física, os adesivos podem-se dividir da seguinte forma [9]:

- Líquidos de um ou vários componentes, com ou sem solventes;
- Emulsões;
- Pastoso mono ou policomponente, com ou sem solvente;
- Adesivos sólidos em barra, filme ou pó.

## 2.1.2 Aplicações das juntas adesivas

Devido às vantagens que as juntas adesivas disponibilizam, a sua aplicação é bastante comum em indústrias como a das embalagens, calçado, madeira e mobiliário. No entanto, existem outras indústrias que têm também assistido a um elevado crescimento na utilização de adesivos, como [9]:

- Indústria aeroespacial;
- Indústria automóvel;
- Indústria naval;
- Energias renováveis,
- Medicina;
- Construção;
- Indústria do calçado.

Os adesivos começaram a ser utilizados na indústria automóvel inicialmente para a colagem dos para-brisas. Posteriormente, a sua aplicação estendeu-se a outras áreas do automóvel, sobretudo com o início da utilização de peças produzidas em materiais compósitos, como por exemplo PRFV (Poliéster reforçado com fibras de vidro), moldado por compressão ou injetado.

Estes painéis, fabricados em material compósito, foram colados ou aparafusados com insertos em estruturas internas metálicas. Um exemplo desta aplicação foi a

substituição dos para-choques metálicos por peças em material compósito em duas partes com reforços colados, como o exemplo presente na Figura 5.

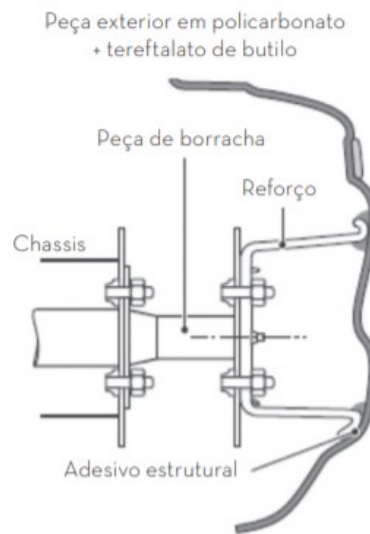


Figura 5 - Exemplo de uma das primeiras aplicações de adesivos na indústria automóvel [3].

Os adesivos eram ainda usados no preenchimento de falhas nas soldaduras, como forma de prevenir a corrosão. Na indústria automóvel constatou-se que, com o aumento da utilização dos adesivos, aumentava também a resistência dos veículos, o que originou a que a sua aplicação se estendesse às ligações estruturais do veículo (Figura 6), permitindo assim otimizar a rigidez torsional. Em adição às vantagens anteriormente enumeradas, a aplicação de ligações adesivas permitiu também tornar o veículo mais leve [13].

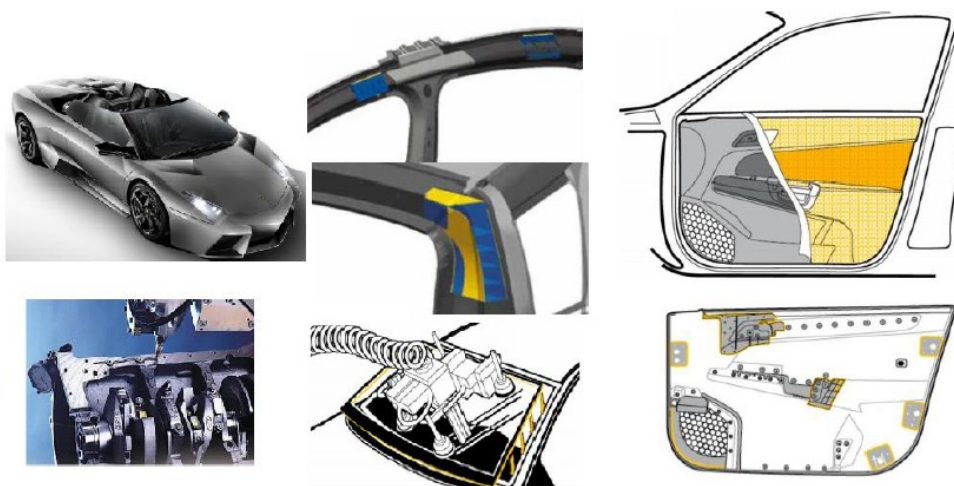


Figura 6 -Aplicações adesivas no Lamborghini Reventon Roadster ao nível da vedação de cárter, estrutura, vidro e portas [14].

A utilização de ligações adesivas na indústria do calçado é uma boa alternativa para a união da sola, quando comparada com a costura ou a utilização de grampos. Esta utilização apresenta um conjunto de vantagens, como maior flexibilidade e juntas mais homogêneas, melhor distribuição das cargas transmitidas ao longo da junta e uma

melhoria nas propriedades estéticas. No entanto, apresenta também algumas limitações, como por exemplo a necessidade de um grande controle em todas as fases de concepção para evitar problemas de adesão. As juntas adesivas são utilizadas para unir várias partes do sapato, mas nesta aplicação específica da união da sola, é importante que a junta apresente uma boa durabilidade e resistência mecânica [13].

Na indústria naval, as juntas adesivas também ganharam popularidade em determinadas aplicações. No entanto, isto apenas se verificou após ser confirmado que estas forneciam as características exigidas, como resistência à humidade, temperatura e boa durabilidade. Outro parâmetro que foi necessário confirmar foi a carga que a ligação podia suportar, já que nesta indústria as aplicações apresentam sobretudo esforços de flexão, corte e torção. As aplicações mais comuns na indústria naval consistem na ligação dos painéis laterais, casco e convés [13].

Na Figura 7 é possível observar uma ligação adesiva entre o casco e o convés de um barco.



Figura 7 - Junta adesiva entre o casco e o convés de um barco [13].

No que toca à indústria aeroespacial, as juntas adesivas são essencialmente utilizadas para aplicações estruturais (Figura 8), nas quais permitem a transmissão de esforços entre os membros e para aplicações de selagem, protegendo assim as interfaces sujeitas a corrosão. As ligações adesivas possuem um papel decisivo nesta indústria, sobretudo devido à sua resistência à fadiga, por permitirem uma redução de peso significativa, um bom isolamento e amortecimento de vibrações, assim como uma vida útil considerável. Apesar de todas estas vantagens, é necessário particular atenção ao fabrico das juntas adesivas durante a concepção de estruturas aeroespaciais, pois os meios de inspeção para avaliar o seu estado apresentam algumas limitações [13].

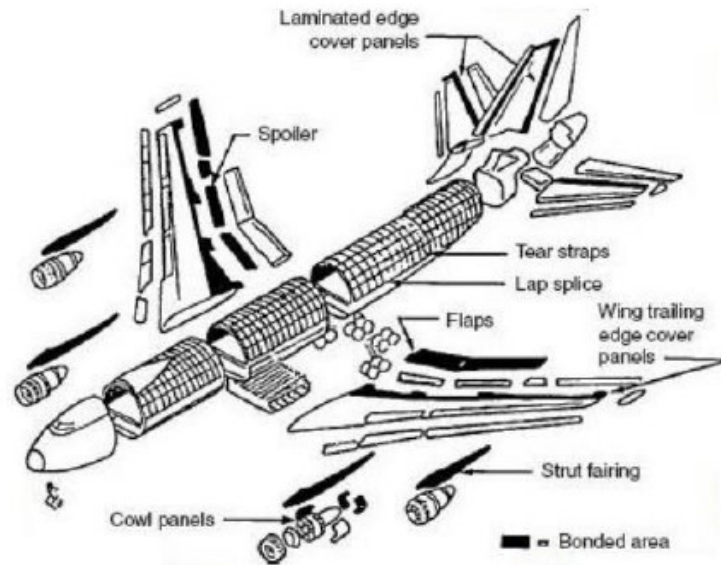


Figura 8 – Aplicações de adesivos na estrutura de um avião [14].

## 2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

A evolução das ligações por juntas adesivas está bastante relacionada com o desenvolvimento de métodos de previsão fiáveis que permitam aumentar a eficiência na sua utilização. Isto permite, assim, ultrapassar o paradigma das juntas adesivas sobredimensionadas que resultavam em estruturas mais dispendiosas e mais pesadas. As metodologias que podem ser aplicadas para a análise de juntas adesivas são as análises de forma fechada (métodos analíticos) e os métodos numéricos.

Os avanços do estudo das juntas adesivas remontam à década de 30, através do modelo analítico de Volkersen [15], que estabelece que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa no caso de o adesivo se deformar plasticamente na presença de substratos de compósito ou de materiais diferentes. O MEF [16] é a técnica mais utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [17], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Recorreu-se, assim, à mecânica dos meios contínuos como método para a previsão da resistência das juntas coladas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

O MEF pode também ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões, quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). No entanto, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [18]. A modelação numérica tem sido alvo de grandes avanços nas décadas mais recentes, sendo um deles a modelação de dano por combinação de elementos finitos com modelos de dano coesivo (MDC).

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

Recentemente, começou-se a utilizar outra técnica para modelar o crescimento de fendas com uma tensão, o Método de Elementos Finitos Extendido (MEFX). Este método utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

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

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

### *2.2.1 Mecânica dos meios contínuos*

A mecânica dos meios contínuos utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão e deformação. A previsão é obtida através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma determinada distância, tensão deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para tal, os valores obtidos pelos modelos são comparados com os valores admissíveis dos materiais, o que permite prever a resistência das ligações adesivas.

Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [15], que apenas considera que o adesivo deforma ao corte. Pode-se assim considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. O critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF foi efetuado por Adams et al. [19] para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados.

Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem por vezes reproduzir resultados satisfatórios [20]. No entanto, podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não têm em consideração a concentração de tensões em possíveis entalhes ou ranhuras, assim como a existência de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [17], em situações onde se utilizem adesivos dúcteis, os critérios baseados em tensões não são apropriados uma vez que, após a cedência por parte do adesivo, este ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

### 2.2.1.1 Modelos analíticos

Nos primórdios da análise de estruturas ligadas, os métodos de previsão consistiam em técnicas analíticas. As formulações de Volkersen e Goland Reissner foram pioneiras numa série de estudos teóricos que tiveram a vantagem de simplificar os campos de tensão nas estruturas, carregamentos e condições fronteira, permitindo assim obter soluções eficientes em forma fechada [15, 21].

Desta forma, é possível analisar de forma rápida e eficiente ligações adesivas, ainda que com alguns pressupostos incorporados [20]. Estes modelos permitem que as tensões e deformações sejam facilmente calculadas, assim como a distribuição do momento fletor na estrutura. A resistência é tipicamente prevista por critérios de tensão ou deformação. Estes estudos têm sido progressivamente substituídos por análises numéricas, embora os estudos teóricos também tenham sido melhorados ao longo dos anos em termos de capacidades de modelação, como por exemplo considerando nas análises a não-linearidade material empregue na camada adesiva [22] ou análises geométricas não-lineares [23].

### 2.2.1.2 Modelos de Elementos Finitos

Com recurso a análises por Elementos Finitos (EF) é possível estimar os campos de tensões nas juntas adesivas e na camada de adesivo. Uma das vantagens da utilização desta técnica, prende-se com a possibilidade de análise de qualquer geometria de junta adesiva. Os primeiros estudos neste âmbito utilizavam as tensões principais máximas para estimar a rotura de materiais frágeis, cuja rotura ocorre perpendicularmente em relação à direção da tensão principal máxima. Este critério ignora todas as outras tensões principais, mesmo que não sejam nulas. No entanto, devido à singularidade de tensões nos cantos reentrantes das juntas, as tensões dependem do tamanho e da malha utilizada e quão perto são tomadas as tensões dos pontos singulares. Para ultrapassar esta limitação, foram utilizados os valores das tensões nos pontos de Gauss ou extrapolados os valores em pontos de Gauss para as zonas de singularidade.

Assim, é necessário ter cuidado com a utilização da tensão principal máxima. Embora este critério seja sensível ao tamanho da malha utilizada, a percepção física do processo de rotura é muito clara, uma vez que a tensão principal máxima é a maior responsável pela rotura das juntas coladas com adesivos frágeis. No entanto, é de notar que os cantos dos substratos de uma forma geral não possuem arestas vivas. Devido ao processo produtivo os cantos são ligeiramente arredondados. Isto pode afetar a distribuição de tensões nos cantos dos substratos e, por consequência, na resistência da junta, já que as tensões são muito sensíveis à variação da geometria. O arredondamento dos substratos leva à não existência da singularidade, o que facilita a aplicação de um critério de tensão ou deformação limite. Adams e Harris [24] foram capazes de demonstrar teórica e experimentalmente que a resistência de juntas de sobreposição simples (JSS) com substratos arredondados e um adesivo dúctil aumentou substancialmente em relação às juntas com arestas vivas. Mais recentemente, Zhao et al. [25, 26] também estudaram o efeito do arredondamento dos substratos. Na Figura 9 é possível observar um exemplo de distribuição de tensões em função do grau de

arredondamento. É constatável que a singularidade de tensões desaparece com um pequeno grau de arredondamento.

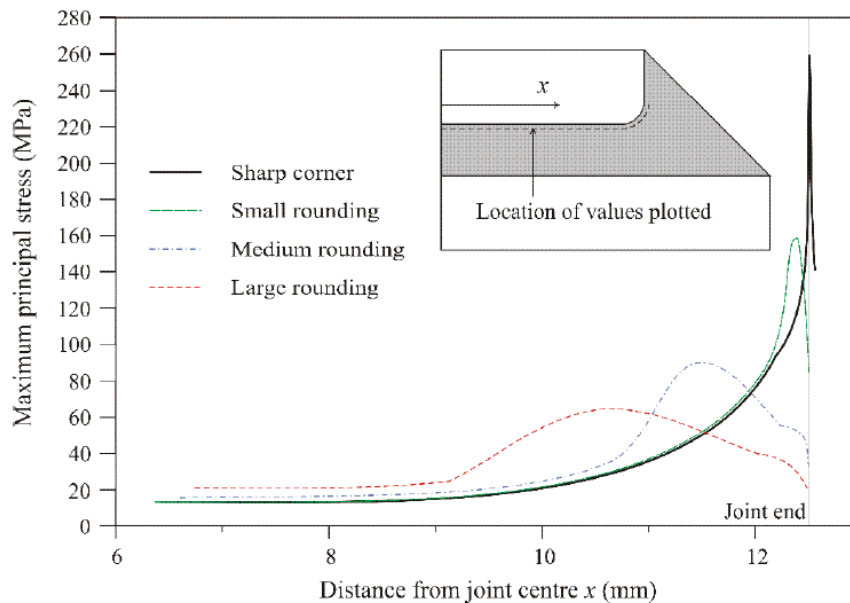


Figura 9 - Distribuição de tensões em função do grau de arredondamento dos substratos [26].

### 2.2.1.3 Critérios de rotura

Existem alguns critérios de rotura para a análise da resistência das juntas, von Mises propôs um critério de cedência que afirma que os materiais cedem sob tensões multi-axiais, quando a sua energia de distorção atinge um valor crítico. A Equação (2.1) é representativa deste critério, onde  $\sigma_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) são as tensões principais.

$$\sigma_{VM}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = \text{constante} \quad (2.1)$$

As tensões de corte têm sido amplamente utilizadas para prever a resistência de juntas de sobreposição, sobretudo em análises de forma fechada. Para tal, é considerado uma tensão máxima de corte igual à resistência ao corte do adesivo em estado maciço. Greenwood (1969) utilizou a tensão máxima de corte calculada pela análise de Goland e Reissner para prever a resistência de uma junta [21, 27]. Mais recentemente, John et al. [28] utilizaram as tensões de corte em juntas com uma distância crítica para prever a resistência de juntas de sobreposição dupla (JSD). da Silva et al. [29, 30] demonstraram que, para as JSS, este critério só é válido para adesivos frágeis e comprimentos de sobreposição reduzidos. Esta abordagem ignora as tensões normais existentes em juntas de sobreposição, pelo que prevê por excesso a resistência da junta.

Na utilização de adesivos dúcteis, os critérios baseados em tensões não são apropriados, uma vez que as juntas ainda podem suportar grandes solicitações mesmo após a cedência do adesivo. Para adesivos dúcteis, é possível utilizar a deformação principal máxima como critério de rotura para prever a resistência da junta [17]. Com este critério, é também possível prever o modo de rotura. No entanto este é igualmente

sensível ao tamanho da malha, tal como previamente mencionado para o critério da tensão principal máxima.

### 2.2.2 *Mecânica da fratura*

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, o que não se adequa quando existem defeitos nos materiais. Contrariamente, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos, como por exemplo fendas, causados por processos de fabrico ou outros acontecimentos durante o seu funcionamento. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica ou se, durante o período de vida da estrutura, estes se mantêm com dimensões inferiores às críticas, embora se possam propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura através da propagação de fissuras pode ser provocada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [3]. Os princípios básicos da mecânica da fratura tiveram as suas origens no estudo de Griffith [31], que através do estudo de fraturas em fibras de vidro, conseguiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

Na indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseia em conceitos da fratura linear elástica. Em materiais dúcteis, uma certa quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [32]. Uma vez que a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada a este tipo de materiais, foi então criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen), por Hutchinson [33] e por Rice [34], para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos sobre juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia de deformação,  $G$ , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura,  $G_c$  [35], em vez de fatores de intensidade de tensão, pois estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto, devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e pelo efeito dos substratos. Assim, torna-se necessário introduzir o conceito de envelope de fratura. Este conceito fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando ambas estão presentes na solitação.

### 2.2.3 *Modelos de dano coesivo*

Os MDC foram desenvolvidos para descrever o dano sob cargas estáticas na zona de processo de dano à frente da extremidade da fenda, fornecendo assim um método promissor para prever danos em estruturas coladas. Os estudos de Barenblatt [36] e Dugdale [37], realizados em finais da década de 1950 e início da década de 1960, respetivamente, foram os primeiros desenvolvimentos na área. Desde então os MDC foram amplamente testados para simular a iniciação e propagação de fendas em

problemas de rotura coesiva e interfacial ou delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [38], como representado na Figura 10.

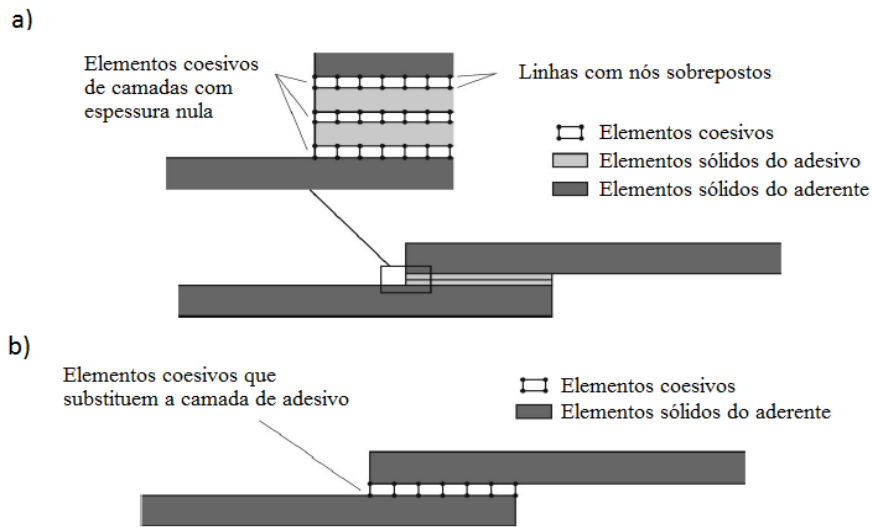


Figura 10 – (a) Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local e (b) modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua [27].

Estes modelos podem facilmente ser incorporados em programas de análise por MEF, de forma a modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [39]. O princípio fundamental dos MDC baseia-se na possibilidade de introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, de forma a avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo de deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos e podem ligar nós sobrepostos de elementos, que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos (aproximação local) [40], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo a simulação de uma ligação adesiva (aproximação contínua) [41].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desprezando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tração-separação relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são utilizados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüente amaciamento até à rotura completa, permitindo assim simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são tipicamente construídas por relações lineares em cada uma das fases de carregamento [42]. No entanto, é possível definir uma ou mais fases de forma diferente para uma representação mais fidedigna do comportamento dos materiais.

#### 2.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano representa métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Estes

métodos estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. São exemplos da aplicação deste método os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [43] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou o trabalho de Khoramshad et al. [44] para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, é possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [38].

É possível classificar as variáveis de dano em dois grupos. No primeiro grupo, as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como por exemplo a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [45]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [46], ou pelo número de ciclos para análises de fadiga [47, 48]. Comparando com os MDC, em determinadas aplicações a mecânica do dano pode ser recomendada quando o dano é generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido, já que pelos MDC a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [49].

Através da mecânica do dano, é possível obter modelos com resultados independentes da malha para a previsão da resistência de juntas adesivas com adesivos dúcteis sujeitas a degradação ambiental. Hua et al. [50] propuseram um modelo com estas características. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano baseado no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado com recurso a ensaios de fratura em provetes à flexão em modo misto, o que permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, permitindo assim obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. [51] aplicaram uma técnica da mecânica do dano em JSS, que era baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, assim como da carga de rotura. A técnica consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura era atingida em algum elemento da estrutura. Nestas condições o módulo de Young ( $E$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) do material eram reduzidos até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos com os ensaios experimentais revelou que esta técnica apresentava resultados bastante positivos.

### 2.2.5 Método de Elementos Finitos Extendido

O Método de Elementos Finitos Extendido é uma melhoria recente do MEF que permite modelar o crescimento de dano para previsão da fratura em estruturas. O método é baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de  $t_n^0/t_s^0$  ou  $\delta_n^0/\delta_s^0$  (deslocamentos de tração e corte correspondentes a  $P_{m\acute{a}x}$ , respetivamente), usados no MDC. No MEFX, comparando

com os MDC, não é necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que apresenta uma vantagem significativa. As fendas podem assim propagar-se livremente dentro de uma região do material, sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades ou que haja a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda durante a análise [52]. Belytschko e Black [53] apresentaram as características fundamentais deste método no final dos anos 90, baseadas no conceito de partição de unidade e que pode ser implementado no MEF, através da introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto da extremidade da fenda, de forma a permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [54]. Devido ao crescimento de dano, a extremidade da fenda modifica continuamente a sua posição e orientação em função das condições de carga e da geometria da estrutura, simultaneamente com a criação das funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais do MEF na proximidade da extremidade da fenda.

Inicialmente o MEFX considera um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas. Já as leis de tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [55].

O MEFX foi utilizado por Campilho et al. [56] para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, coladas com um adesivo dúctil (Figura 11). No estudo, foram comparados os resultados pelo MEFX com os MDC.

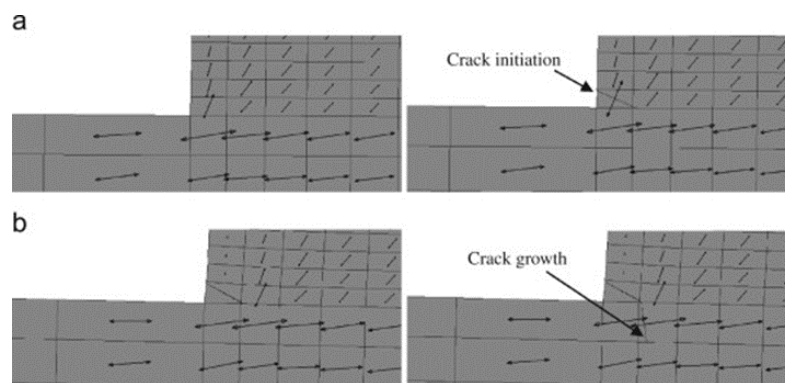


Figura 11 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento do dano do aderente de alumínio (b) [44].

Através do estudo, foi possível concluir que o MEFX não é o método mais apropriado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo. Isto acontece pois a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos, ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Contrariamente, os MDC permitiram previsões bastante precisas do comportamento da junta.

## 2.3 Determinação das propriedades mecânicas de adesivos

Desde o início da utilização dos adesivos como um método para ligação de materiais, sempre existiu a necessidade de definir um conjunto de testes que permitissem quantificar e qualificar a sua utilização na indústria. Até ao momento foram propostos vários testes e alguns ainda se encontram em uso para a caracterização de adesivos [19]. A caracterização de um adesivo implica a determinação de parâmetros de carácter elástico, plástico e de fratura. Cada um destes parâmetros envolve a realização de um teste específico.

As propriedades dos adesivos variam bastante, pelo que uma seleção adequada é essencial para o projeto de uma junta adesiva [57]. Para a previsão da resistência de uma junta, são também fundamentais a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado [58].

Para a caracterização mecânica de um adesivo, devem ser realizados pelo menos dois tipos de carregamento, sendo a tração e o corte os mais utilizados. Normalmente são utilizados provetes *bulk* para a determinação das propriedades mecânicas à tração e provetes *Thick Adherend Shear Test (TAST)*, para a determinação das propriedades mecânicas ao corte.

Foi já demonstrado por diversos autores que as propriedades elásticas obtidas por cada método se correlacionam razoavelmente bem. Para um material homogéneo, o módulo de elasticidade ao corte ( $G$ ), determina-se de acordo com a Equação (2.2).

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.2)$$

Se o módulo de elasticidade e de corte forem determinados através dos ensaios previamente referidos, os valores para o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), na maior parte dos adesivos, estará compreendido entre 0,3 e 0,5 [2].

### 2.3.1 Propriedades mecânicas à tração

Entre os ensaios destrutivos, o ensaio de tração é um dos mais utilizados para a obtenção de dados de projeto sobre a resistência de adesivos. É também utilizado como ensaio de controlo de qualidade de juntas coladas. Assim, este ensaio é utilizado para a determinação de várias propriedades, como o módulo de elasticidade longitudinal, a tensão de cedência, tensão de rotura e a deformação de rotura. A máquina utilizada no ensaio fornece a curva de força-deslocamento e, para o cálculo das tensões referidas anteriormente, é necessário dividir o valor de força no instante desejado pela área inicial transversal da zona útil do provete.

Para a determinação das propriedades de um adesivo à tração, para além dos provetes maciços (*bulk*), podem também ser utilizados provetes com juntas topo a topo (*butt-joint*). Na realização de ensaios com provetes maciços, é importante que a espessura

utilizada seja a mínima possível de modo a representar a camada fina de adesivo em juntas coladas [59]. Na Figura 12 está representada a estrutura típica de um provete *bulk* para ensaios de tração. Este ensaio consiste em solicitar de forma contínua e crescente, com recurso a uma força de tração uniaxial na direção longitudinal, um provete com as dimensões determinadas de acordo com a norma EN ISO 527-3. No decorrer do ensaio é efetuado o registo da força e do alongamento sofrido na secção do provete. Para a medição das deformações, podem ser utilizados transdutores aplicados diretamente no provete ou então pode ser efetuada por meio ótico de medição, que não necessita de contacto. A Figura 12 representa o que de acordo com a norma EN ISO 527-2 se denomina por provete *bulk* longo. Existe, no entanto, uma versão curta deste provete, cujas dimensões são também possíveis de encontrar na mesma norma. A opção entre os dois tipos de provete é definida pela rigidez do adesivo a utilizar. Para adesivos mais rígidos, como as deformações são menores, é mais adequada a utilização do provete longo [3].

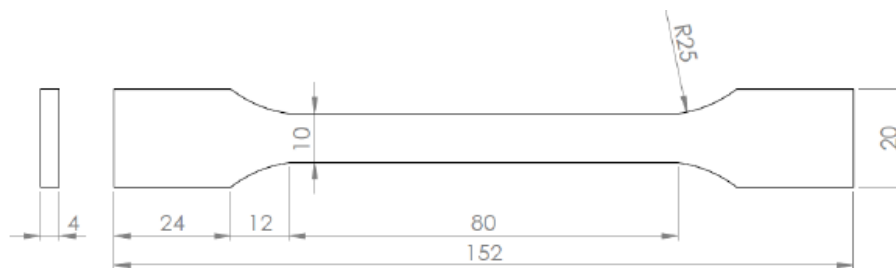


Figura 12 – Provetes bulk para ensaios à tração de acordo com a norma EN ISO 527-3 (dimensões em mm) [3].

Existem dois métodos para o fabrico de provetes *bulk*, através da injeção de adesivo num molde, ou através da pressão entre pratos. O fabrico por injeção é utilizado sobretudo em adesivos que se apresentam numa forma líquida no seu estado natural. Nas ocasiões em que o adesivo é demasiado viscoso no seu estado natural, a injeção torna-se bastante difícil, pelo que se opta pela pressão entre pratos. Durante o fabrico dos provetes deve ser garantida a isenção de porosidades e vazios relacionados com a entrada de ar entre o filme de adesivo, de forma a que não se formem bolhas de ar no interior do adesivo durante o processo de cura [60].

Os ensaios realizados com recurso a provetes *butt joint* são os mais representativos da realidade, embora existam algumas dificuldades inerentes a este método de obtenção de propriedades. Ao contrário do que acontece nos ensaios com provetes *bulk*, este método utiliza substratos de secção circular em aço ligados por uma camada de adesivo, tal como representado na Figura 13. Usualmente, este tipo de ensaio é realizado para a determinação de propriedades como o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Para a determinação das tensões ocorridas durante o ensaio, divide-se a força aplicada pela área colada.

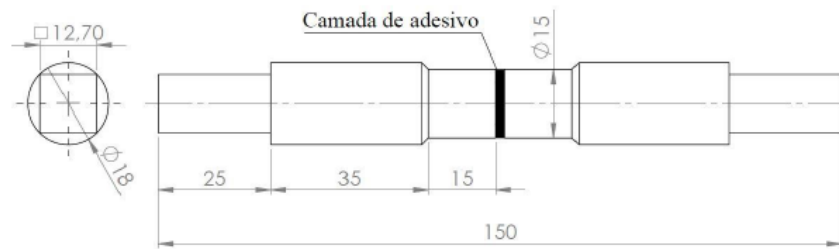


Figura 13 -Provete com juntas topo a topo (dimensões em mm) [59].

Como limitações, este ensaio apresenta a dificuldade de obtenção de propriedades mecânicas em tração, devido a questões relacionadas com a precisão do fabrico dos provetes e o alinhamento destes durante o decorrer do ensaio. Os desalinhamentos, mesmo quando pequenos, levam à existência de esforços espúrios de flexão, reduzindo assim as propriedades de resistência da junta colada. Em adição, a distribuição de tensões em juntas topo a topo não é uniforme. Isto resulta do efeito de Poisson, pela constricção provocada na camada de adesivo pelos substratos quando existe uma diferença de rigidez entre eles ou um desalinhamento [3].

Por norma, os ensaios são realizados a condições de temperatura e humidade ambiente, com recurso a uma máquina universal de ensaios mecânicos. A velocidade de ensaio pode variar entre 1 a 100 mm/min, sendo a velocidade de 1mm/min utilizada para se determinar o módulo de elasticidade [2, 61].

Finalizado o ensaio é possível obter a curva tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ). A Figura 14 representa um exemplo de curva  $\sigma$ - $\epsilon$  para o adesivo 3M® DP-8005. Após a obtenção da curva, é possível determinar a tensão de limite elástico ( $\sigma_y$ ), a tensão de rotura à tração ( $\sigma_r$ ) e a deformação à tração ( $\epsilon_r$ ).

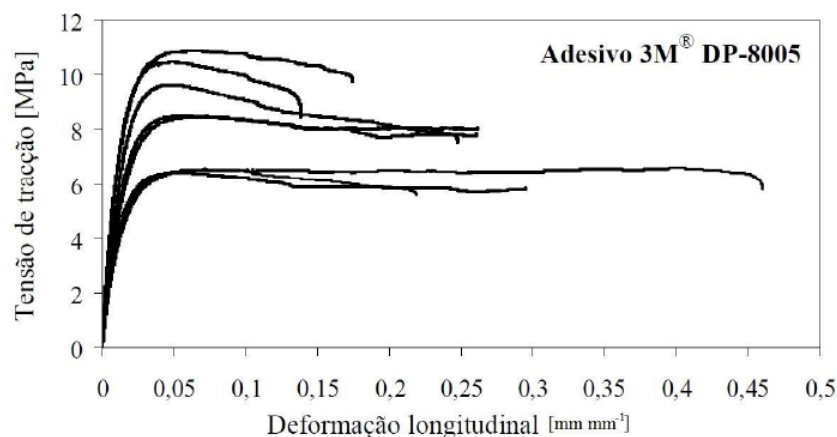


Figura 14 -Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  obtidas no ensaio de tração do adesivo 3M® DP-8005 [10].

De acordo com a norma EN ISO 527-2, um dos métodos para a determinação do módulo de elasticidade ( $E$ ), consiste na seleção de dois pontos no intervalo de 0,05% e 0,25% de  $\epsilon$ , dentro do regime elástico da curva obtida. De seguida, retiram-se os valores de  $\sigma$  correspondentes à interseção das deformações na curva do gráfico. Desta forma, é possível calcular  $E$  (em MPa) através da Equação (2.3), sendo  $\Delta\sigma$  [MPa] a diferença entre as tensões e  $\Delta\epsilon$  a variação da deformação.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}. \quad (2.3)$$

### 2.3.2 Propriedades mecânicas ao corte

Existem vários tipos de ensaio para a determinação das propriedades ao corte de ligações adesivas [2, 3, 9]:

- Ensaio em junta de sobreposição simples (JSS);
- Ensaio losipescu (*V-Notched beam shear method*);
- Ensaio Arcan (*Notched plate shear method*);
- Ensaio de torção em juntas topo a topo (*Napkin-ring test*);
- Ensaio TAST (*Thick Adherend Shear Test*).

O principal objetivo destes ensaios é tentar produzir um estado puro de tensões de corte na junta adesiva. O ensaio para determinação das propriedades ao corte em JSS é o mais comum entre os anteriormente mencionados. A sua preferência em relação aos restantes métodos prende-se com a sua simplicidade, custo reduzido, fácil fabrico e por ser facilmente executável em máquinas universais de ensaios mecânicos. Algumas das normas que regulamentam este ensaio são as normas ASTM D1002, ISO 4587, entre outras.

#### 2.3.2.1 Ensaio em junta de sobreposição simples

Nos ensaios em JSS os substratos estão sujeitos a solicitações de tração, enquanto o adesivo está sujeito a esforços de corte. Em adição a estes esforços, a junta sofrerá também esforços de arrancamento originados pelo desalinhamento das forças de tração. Com o objetivo de diminuir o aparecimento de esforços de arrancamento e regular a espessura de adesivo, são colocados calços nos locais de amarração dos provetes, como representado na Figura 15.

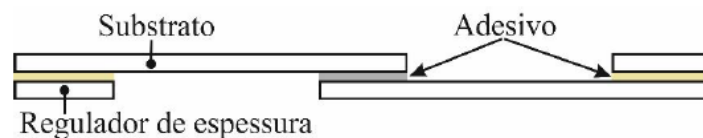


Figura 15 -Representação esquemática de uma JSS [62].

As dimensões e geometria dos provetes de uma JSS, de acordo com a norma ASTM D1002, encontram-se demonstradas na Figura 16. A tensão média de corte ( $\tau$ ), é determinada utilizando a Equação (2.4), sendo  $P$  a carga aplicada,  $l$  o comprimento de sobreposição e  $b$  a largura da junta.

$$\tau = \frac{P}{l \times b}. \quad (2.4)$$

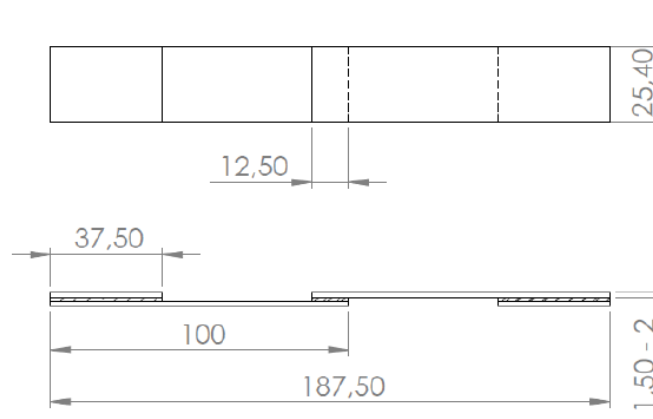


Figura 16 -Dimensões em mm de uma JSS segundo a norma ASTM D1002 (dimensões em mm) [3].

### 2.3.2.2 Ensaio losipescu

O ensaio losipescu, regido pela norma ASTM D5379, foi inicialmente proposto para o teste de metais e juntas soldadas em condições de carregamento de corte puro. Só mais recentemente é que começou a ser utilizado para a caracterização de juntas adesivas com aderentes fabricados com materiais compósitos [60]. Neste método de ensaio, podem ser testados provetes de adesivo em estado maciço ou em juntas, como demonstrado na Figura 17-(a) e (b).

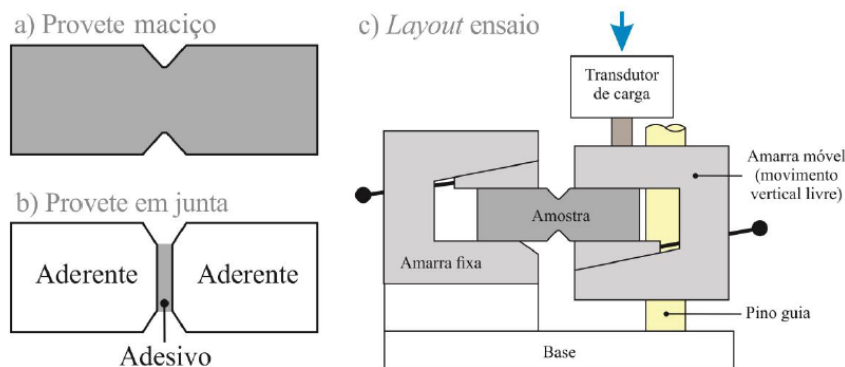


Figura 17 – (a) Provede losipescu maciço; (b) Provede losipescu em junta; (c) Configuração de ensaio tipo Wyoming [60].

Em ambas as configurações, provede em junta e provede maciço, existem dois entalhes simétricos no centro dos provedes. A secção central do provede está sujeita a um esforço de corte, uma vez que os momentos fletores provenientes dos dois lados dos provedes se anulam. As deformações no ensaio são medidas com recurso a extensómetros que são colados a  $+45^\circ$  e a  $-45^\circ$  com o eixo do provede. Na configuração de ensaio tipo Wyoming, a solicitação no provede é efetuada à compressão em quatro pontos distintos, como observável na Figura 17-(c) [3], criando uma área de corte linear entre os dois entalhes, uma vez que os momentos fletores provenientes dos dois lados se anulam [2].

Como principais vantagens deste ensaio regista-se o fácil fabrico dos provedes e a possibilidade de obtenção do módulo de corte ( $G$ ) e a tensão de corte ( $\tau$ ). Estes valores são calculados através das Equações (2.5) e (2.6), respetivamente:

$$G = \frac{P}{t \times h \times (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{-45})} \quad (2.5)$$

$$\tau = \frac{P}{t \times h}, \quad (2.6)$$

onde  $t$  é a espessura do provete,  $h$  a distância entre as extremidades dos dois entalhes e  $\varepsilon_{45}$  e  $\varepsilon_{-45}$  a deformação determinada pelos extensômetros.

### 2.3.2.3 Ensaio Arcan

O ensaio Arcan é um ensaio particularmente indicado para espessuras de adesivo bastante reduzidas, com provetes com uma configuração em formato borboleta. Comparativamente ao ensaio losipescu, este possui mais vantagens, uma vez que possui bom desempenho em todos os tipos de adesivos, incluindo os mais dúcteis. Na Figura 18 está representada a configuração do provete Arcan (a) e um exemplo de mecanismo de fixação para a realização do ensaio do tipo *National Physical Laboratory* (NPL) (b) [63]. Este tipo de fixação requer a existência de dois furos em cada metade do provete. O provete possui dois entalhes simétricos a  $90^\circ$  e um raio de concordância de 1,5 mm para minimizar a concentração de tensões [3].

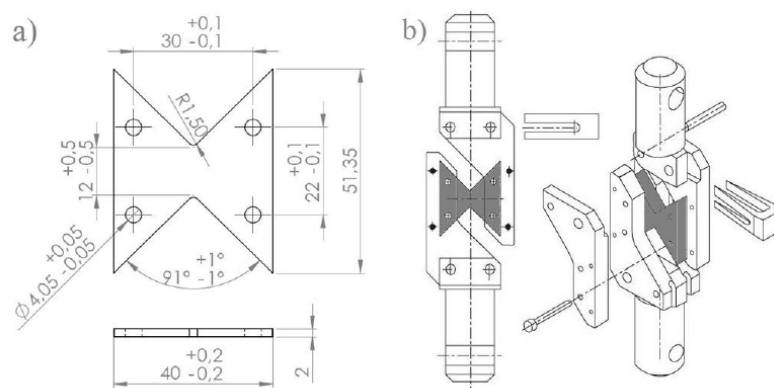


Figura 18 –(a) Provete Arcan; (b) tipo de fixação NPL [3, 64].

Tal como no ensaio losipescu, na zona central do provete são colocados extensômetros de forma a que façam  $+45^\circ$  e  $-45^\circ$  com o eixo do provete, de forma a obter as deformações de corte ( $\gamma$ ). O cálculo de  $G$  e  $\tau$  pode ser efetuado com recurso às Equações (2.5) e (2.6), respetivamente.

O ensaio de torção em juntas topo a topo, representado na Figura 19, aplica momentos torsores de igual valor, mas com sentidos opostos aos provetes, sendo que será no raio exterior do cilindro que ocorrerão as maiores deformações do adesivo [64].

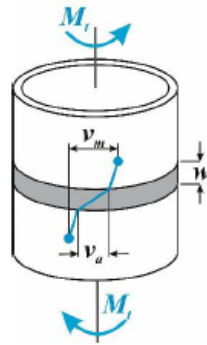


Figura 19 - Ensaio de torção de juntas topo a topo e geometria do provete [3].

Este ensaio é sobretudo utilizado quando as deformações são baixas. As juntas topo a topo são constituídas por dois cilindros de paredes de espessura fina, de modo a reduzir a variação das tensões de corte ao longo do adesivo [3]. De forma a obter um estado de tensão de corte puro, é necessário que os dois cilindros se encontrem perfeitamente alinhados. A maior dificuldade encontrada neste ensaio dá-se durante o teste de adesivos de baixa espessura, onde a medição dos pequenos deslocamentos terá de ser efetuada com elevada precisão [64].

Sendo  $M_t$  o momento torsor aplicado no provete,  $r_i$  e  $r_o$  os raios interior e exterior dos substratos, respetivamente, e  $w$  a espessura da camada adesiva, o valor da tensão de corte a uma dada distância  $r$  do eixo onde é aplicado o  $M_t$ , é calculado com recurso à Equação (2.7).

$$\tau = \frac{2M_t \times r}{\pi \times (r_o^4 - r_i^4)} \quad (2.7)$$

O módulo de corte  $G$  é determinado pela Equação (2.8), em que  $\phi$  representa o ângulo de rotação medido.

$$G = \frac{2t}{\pi \times (r_o^4 - r_i^4)} \times \left( \frac{M_t}{\phi} \right). \quad (2.8)$$

Alternativamente, o módulo de corte pode ser determinado pela Equação (2.9), em que  $\gamma$  é determinado pela Equação (2.10).

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.9)$$

$$\gamma = \frac{v_m - v_t}{w} \quad (2.10)$$

$v_m$  é o deslocamento total medido no provete. Como observável na Figura 19, este valor é igual ao deslocamento no adesivo,  $v_a$ , acrescido do deslocamento nos aderentes,  $v_t$ .

### 2.3.2.4 Ensaio TAST

Outro dos métodos mais utilizado para a determinação de propriedades do adesivo ao corte é o ensaio TAST. Este ensaio pode também ser realizado numa máquina universal de ensaios mecânicos, embora exija uma montagem apropriada para a sua execução. Os substratos utilizados são de aço, devido à sua elevada rigidez, o que permite a criação de um estado de tensão no adesivo de praticamente corte puro. Para a obtenção desta condição, a geometria dos provetes também é essencial uma vez que, quanto menor for o comprimento da ligação e maior a espessura dos substratos, menor será a probabilidade de ocorrer arrancamento nas extremidades da junta. Na Figura 20 é possível observar a configuração típica e dimensões de um provete do ensaio TAST, de acordo com a norma ISO 11003-2.

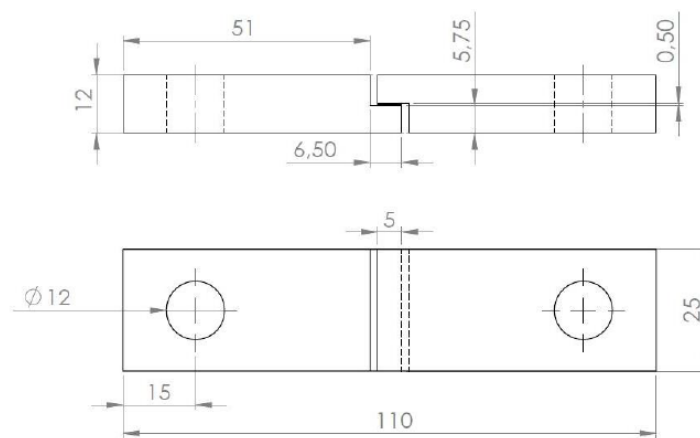


Figura 20 – Provette de ensaio TAST de acordo com a norma ISO 11003-2 (dimensões em mm) [64].

Como vantagens, o ensaio TAST permite obter um estado de tensões relativamente uniforme ao longo da ligação adesiva, apresenta um baixo custo e simplicidade de execução, assim como permite a reutilização dos substratos metálicos. No entanto, apresenta também algumas limitações, como a necessidade de extensómetros complexos e dispendiosos, assim como a possibilidade de gerar concentrações de tensões nos bordos das ligações [3, 65]. As principais propriedades obtidas neste ensaio são:

- A tensão de corte em função da curva de tensão de corte até a rotura do adesivo ( $\tau_r$ );
- O módulo de corte do adesivo ( $G$ );
- Outras propriedades podem ser obtidas a partir da curva de  $\tau$ - $\gamma$ , tal como a deformação máxima de corte ( $\gamma_r$ ).

Na Figura 21 é possível observar um exemplo de mecanismo de fixação para a realização do ensaio TAST. Este é facilmente adaptável a uma máquina de ensaios universais e permite, teoricamente, eliminar os momentos fletores induzidos no provete. Para a velocidade de ensaio, a norma ISO 11003-2 especifica um valor de 0,5 mm/min.

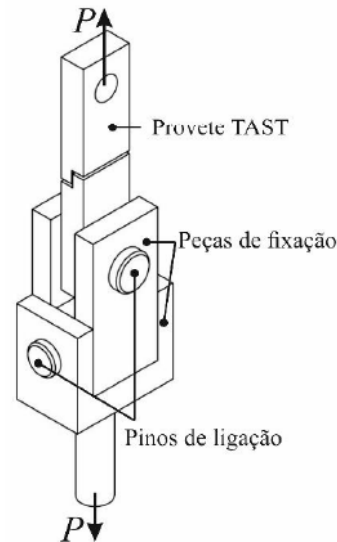


Figura 21 – Mecanismo de fixação para o ensaio TAST [64].

## 2.4 Ensaios de caracterização ao arrancamento

Os ensaios de caracterização ao arrancamento (*peel tests*) são amplamente utilizados para controlo de qualidade e determinação da *performance* de arrancamento em adesivos. Existem vários formatos de *peel tests*, como o ensaio *T-peel*, *peel-testing a 180°*, *floating Roller peel test* e *climbing drum peel test*, conforme apresentado na Figura 22.

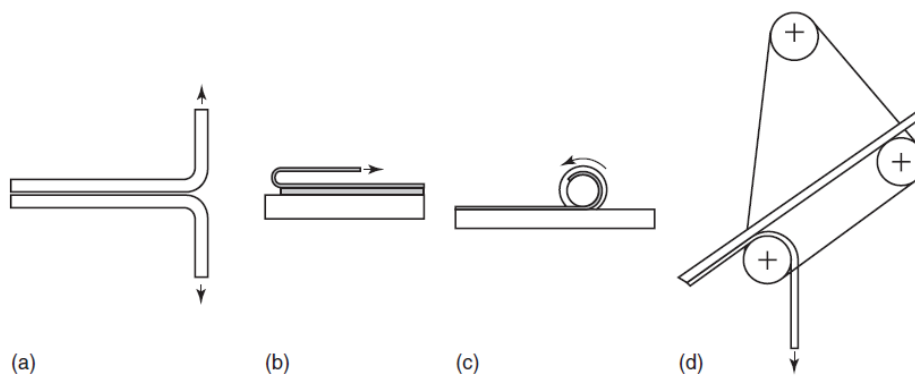


Figura 22 – Diferentes configurações de *peel test*. (a) Teste *T-peel*, (b) *peel-testing a 180°*, (c) *climbing drum peel test* e (d) *floating roller peel test* [64].

Através de investigações realizadas por Kaelbe [66, 67] e Crocombe e Adams [68, 69], foi demonstrado que o fator mais importante para a determinação da fratura nos *peel tests* é o momento  $M$ , produzido na dobragem dos aderentes no início da propagação da fratura. Na Figura 23 é representado o método de cálculo do momento produzido na dobragem durante *peel tests*.

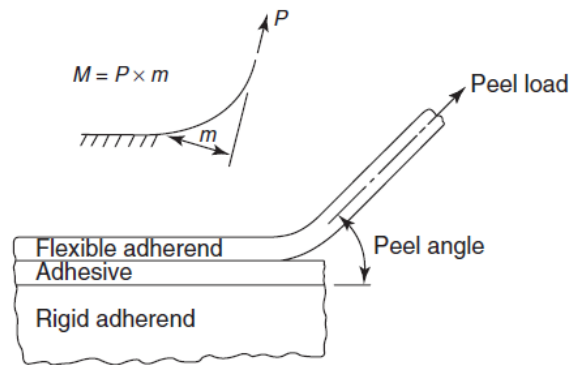


Figura 23 -Representação do cálculo do momento produzido na dobra durante o *peel test* [68].

O momento produzido na dobra é aplicado numa área bastante reduzida de adesivo, o que resulta numa elevada concentração de tensões, sobretudo na direção da espessura do adesivo, o que provoca um efeito de clivagem. Este fenómeno provoca uma concentração elevada de tensões, originando uma falha prematura na adesão de vários adesivos que possuem prestações bastante satisfatórias em ensaios de JSS [64]. Os *peel tests* apresentam-se, assim, como um conjunto de ensaios mais severo que outros métodos mais tradicionais.

#### 2.4.1 Ensaio *T-peel*

O ensaio *T-peel*, tal como outros *peel tests*, é um tipo de ensaio para juntas adesivas que envolve grandes deflexões dos aderentes. Dois aderentes relativamente flexíveis são unidos por intermédio de um adesivo e em seguida tracionados em direções opostas, numa ação de *peeling*. O nome do ensaio *T-peel* teve origem no facto de quando a rigidez dos aderentes é semelhante, a forma simétrica da configuração é semelhante a um T. A geometria do teste em T tem sido amplamente utilizada e normalizada por diversas organizações (ASTM [70], BS [71] e ISO [72]). Estes ensaios permitem a medição de uma força *T-peel*. Tipicamente esta força é definida como a força média necessária para propagar a fenda ao longo de uma determinada distância, dividida pela largura da união, (resistência de arrancamento). A zona associada ao pico de força necessária para o início da falha de adesão é normalmente omitida no cálculo para determinação da força média.

Este ensaio é particularmente popular para a caracterização da adesão em aderentes com rigidez semelhante. Desta forma, embora seja um ensaio útil para a comparação do desempenho de adesivos, é necessário cuidado para a interpretação dos resultados, uma vez que o ensaio *T-peel* pode resultar num amplo conjunto de modos de deformação, cada um possuindo o seu método para análise.

Alternativamente, estes testes são por vezes definidos como testes de fratura, permitindo uma análise da fratura uma vez que, envolvem a propagação de uma fenda em vez da medição de uma força de rotura [64].

### 2.4.1.1 Configurações *T-peel*

O ensaio *T-peel* apresenta vantagens quando ambos os aderentes são flexíveis o suficiente para permitir que as partes dos aderentes que não se encontram coladas, sejam dobradas de forma perpendicular à restante parte do aderente colada. Como os aderentes são geralmente de espessura reduzida, é possível medir a adesão com quantidades reduzidas de adesivo, permitindo assim uma redução de custos. Em adição, aderentes de espessura reduzida solicitados através de um ensaio *T-peel* podem mesmo simular determinadas aplicações na indústria, nomeadamente a ligação de painéis automóveis. O conjunto destes fatores torna o ensaio *T-peel* bastante popular. No entanto, o comportamento e resultados dos ensaios encontram-se muito dependentes das configurações que os provetes assumem durante os testes. Alterar a espessura ou tensão de cedência dos aderentes, assim como a qualidade de adesão, pode afetar radicalmente a forma que o provete assume durante o ensaio, a força necessária para o arrancamento e a interpretação de resultados.

As configurações resultantes do ensaio podem ser classificadas em quatro categorias diferentes, onde cada uma possui a sua análise e interpretação independente:

- Categoria I: Os aderentes deformam-se elasticamente. Ocorre um arrancamento simétrico;
- Categoria II: Os aderentes deformam-se plasticamente. Ocorre um arrancamento simétrico;
- Categoria III: Os aderentes deformam-se plasticamente. Não ocorre um arrancamento simétrico;
- Categoria IV: Os aderentes deformam-se elasticamente. Não ocorre um arrancamento simétrico.

Na Figura 24, é possível observar a representação destas categorias, incluindo o formato dos provetes antes, durante e após o ensaio.

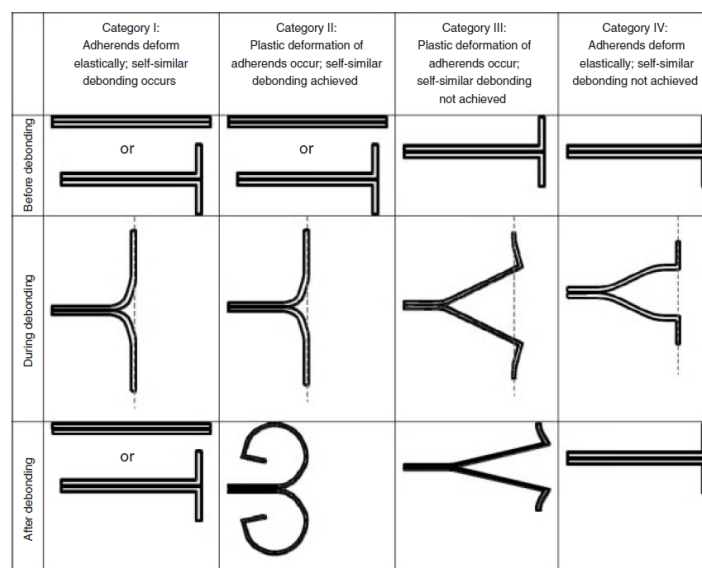


Figura 24 – Representação das várias categorias de *T-peel*, demonstrando os formatos antes, durante e depois da descolagem [64].

As categorias I e IV envolvem apenas análises elásticas. Portanto, quando as cargas são removidas após a propagação da fenda, normalmente o provete regressa ao seu formato inicial. A deformação plástica dos aderentes das categorias II e III impede os provetes de regressarem ao seu formato inicial após a remoção das cargas.

Se os aderentes se deformarem elasticamente (categorias I e IV), não existe energia a ser dissipada dentro dos aderentes. Desta forma, todo o trabalho desenvolvido no ensaio vai para deformar o adesivo e quebrar a união, (inicialmente é necessária energia para deformar elasticamente os aderentes, mas após esta deformação inicial, para um arrancamento estável da junta, esta energia é transferida de um incremento do aderente para o seguinte [73]).

Os ensaios da categoria II embora envolvam deformação plástica, tipicamente permitem atingir um arrancamento simétrico, quando a propagação da fenda percorreu uma distância tal que permita aos aderentes descolados possuir comprimento suficiente para que a zona descolada tenha um formato semelhante à medida que a fenda se vai propagando [74]. A Figura 25 é representativa do resultado de um ensaio que se enquadra nesta categoria.



Figura 25 – Ensaio *T-peel* da categoria II [64].

Ensaio da categoria III, normalmente são encontrados com aderentes mais espessos e adesivos estruturais. Uma das aplicações mais corrente destes ensaios é a indústria automóvel. Nestes casos, os provetes são tão rígidos que não se deformam o suficiente para produzir uma zona de propagação estável, impedindo assim a estrutura de atingir uma configuração simétrica durante o ensaio.

#### *2.4.1.2 Fabrico de juntas, ensaio e interpretação de resultados*

A preparação de provetes para o ensaio *T-peel* (Figura 26) pode ser efetuada cortando tiras com a largura pretendida, que são depois unidas de forma a produzir os provetes, ou utilizando duas placas de substrato para efetuar a colagem e, após a união, cortar em provetes com a largura pretendida. O último método é o mais recomendável e resulta em provetes de maior qualidade [75].

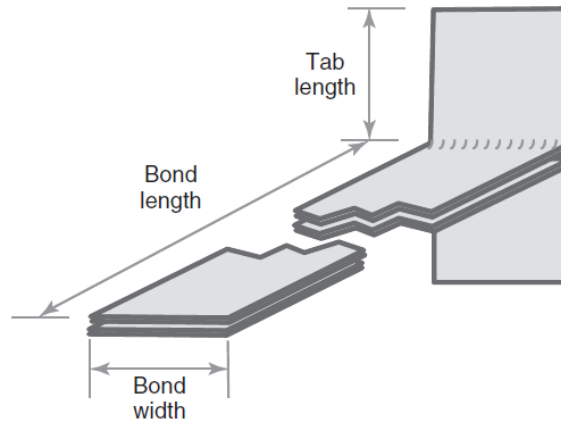


Figura 26 - Exemplo de provete *T-peel* pronto para ensaio [64].

Segundo a norma ASTM 1876, o comprimento da junta deve ser de aproximadamente 230 mm, embora comprimentos de junta de 75 mm também sejam bastante comuns e especificados em algumas normas [64]. No entanto, no caso dos ensaios *T-peel*, a utilização de juntas com comprimentos reduzidos, pode impedir o desenvolvimento dos arrancamentos simétricos. A largura mais comum para o fabrico das juntas é de 25 mm.

Nas análises mais simples de *peel tests*, onde a energia da fratura resultante da descolagem é representada pela Equação (2.11), é assumido que os aderentes não se alongam durante o teste. Portanto, por vezes são incorporados fios nos aderentes, especialmente quando são elastoméricos, de forma a prevenir o alongamento dos aderentes durante os ensaios [64]

$$\zeta = \frac{2P}{w}. \quad (2.11)$$

Para a realização do ensaio, normalmente são sugeridas as velocidades de 254, 127 e 51 mm/min. São utilizados entre cinco a dez provetes para as mesmas condições de ensaio [64, 75, 76].

O resultado mais importante a retirar de um *peel-test* é a resistência média de arrancamento durante o ensaio (*peel strength*). Esta força é definida pela Equação (2.12) e aplicável aos restantes *peel tests* abordados.

$$Peel\ strength = \frac{P}{b}, \quad (2.12)$$

onde  $P$  é a força de arrancamento aplicada em determinado instante e  $b$  a largura do provete. Não existem muitas indicações sobre a forma de excluir o pico inicial de força num ensaio. No entanto, segundo a norma ASTM D1876 para o cálculo da força média de arrancamento, deve ser utilizada a força no decorrer de 127 mm de descolagem após a exclusão do pico inicial de força [75].

### 2.4.2 Peel test at 180°

O ensaio *peel test* a 180° é um ensaio que permite a caracterização da adesão entre aderentes rígidos e flexíveis a um ângulo de arrancamento de 180°. Tal como no ensaio *T-peel*, o resultado comum do ensaio é a força de arrancamento por largura da junta ( $P/b$ ) ou resistência de arrancamento. Este ensaio é regulamentado pelas normas ASTM C 903 e ISO 8510-2 [64].

#### 2.4.2.1 Fabrico de juntas, ensaio e interpretação de resultados

Usualmente, para o aderente rígido é utilizado alumínio, aço ou polímeros reforçados com fibras, como por exemplo o PRFV. Para o aderente flexível podem ser utilizados placas finas de alumínio ou aço. A largura mais comum de junta é também de 25 mm [64].

Para a realização dos *peel tests* a 180°, são utilizadas máquinas de ensaio universais acionadas por parafuso. Não existe necessidade de acessórios adicionais para a fixação dos provetes e realização do ensaio, com a exceção de casos onde o aderente flexível seja demasiado fino. Nestas situações serão necessárias fixações especiais para prevenir a flexão do aderente fino durante o ensaio. A máquina de ensaios utilizada deverá ser capaz de manter uma velocidade de ensaio constante, entre 1 e 500 mm/min.

Após a fixação do aderente rígido numa das amarras da máquina, o aderente flexível é dobrado para trás (num movimento que origina um ângulo de 180°), e fixo na outra amarra. O modelo de fixação dos provetes pode ser observado na Figura 27.

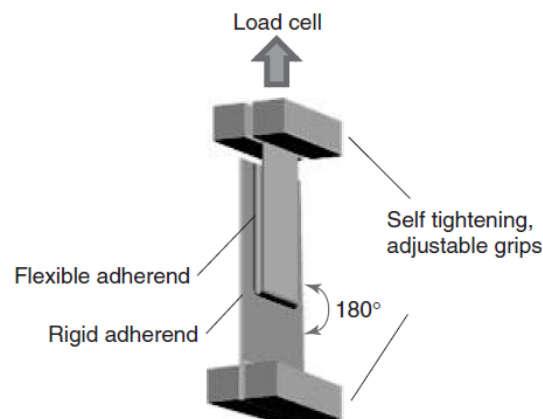


Figura 27 – Posicionamento e fixação dos provetes no ensaio *peel test* a 180° [64].

É necessário assegurar um bom alinhamento do provete com as amarras de fixação, de forma a garantir uma boa distribuição das cargas pela junta. A amarra à qual está fixo o aderente flexível necessita de um sistema de calibração automático para assegurar que o ângulo de 180° é mantido no decorrer do ensaio.

Durante o ensaio *peel test* a 180°, a força aplicada e o deslocamento devem ser continuamente monitorizados, de forma a caracterizar o comportamento do provete. Na Figura 28 é possível observar um exemplo de gráfico típico para este ensaio.

Inicialmente observa-se um pico da força de arrancamento até ocorrer a rotura total da ligação. Após a rotura, a força de arrancamento apresenta um valor estável (por vezes oscilações em torno de um valor médio), que se mantém até ao final do ensaio.

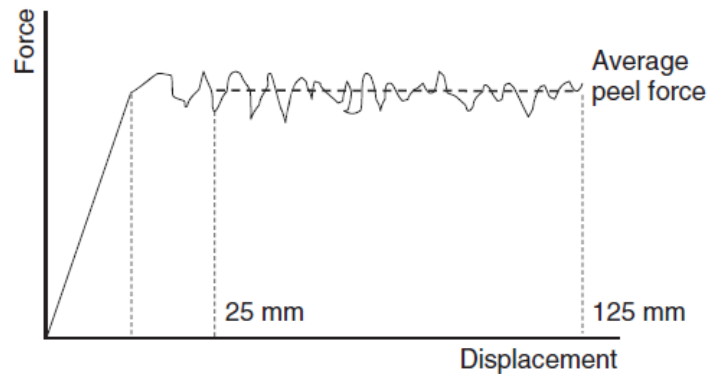


Figura 28 -Resultado típico de um ensaio *peel test* a 180° [64].

A força média de arrancamento é calculada através dos valores medidos após o pico inicial de força. Esta é normalmente expressa em N/mm. De acordo com as normas ASTM C903 e ISO 8510-2, é recomendável que o cálculo da resistência de arrancamento média seja efetuado ao longo de um comprimento de arrancamento de pelo menos 100 mm, após excluídos os 25 mm iniciais.

Como nos restantes *peel tests*, o modo de rotura pode ser coesivo, quando a falha ocorre dentro da camada de adesivo, sendo possível observar uma camada de adesivo em cada aderente, ou adesiva, quando a falha ocorre na *interface* entre o aderente e o adesivo. Existem casos em que ocorrem ambos os modos de rotura, sendo assim denominado de modo de rotura misto. No final do ensaio, o modo de rotura deve sempre ser identificado, pelo menos através de inspeção visual. Para uma correta interpretação de dados em ensaios de *peel test* a 180°, o modo de rotura deve sempre ser reportado [64].

#### 2.4.3 *Floating roller peel test*

O *floating roller peel test* é um ensaio especificado pela norma ASTM D3167, que permite caracterizar ligações entre aderentes rígidos e flexíveis. Comparativamente com o ensaio *climbing drum peel test* é um ensaio mais severo, já que o ângulo de arrancamento é superior. Geralmente para o aderente flexível é utilizado aço ou alumínio e para o aderente rígido é também utilizado um material metálico, usualmente aço, devido ao seu custo benéfico. Recentemente, Freitas e Sinke [77], demonstraram que este tipo de ensaio pode também ser utilizado para determinar as propriedades de adesão de ligações compósito-alumínio, tendo para tal aplicado o *floating roller peel test* a um conjunto de provetes com diferentes configurações de materiais como aderente. O material compósito utilizado foi um polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC), que foi utilizado como aderente rígido em algumas configurações e como aderente flexível noutras. Foram também testados provetes com ambos os aderentes fabricados em PRFC. Na Figura 29 é possível observar a configuração de ensaio utilizada no *floating roller peel test*, assim como o acessório de ensaio utilizado.

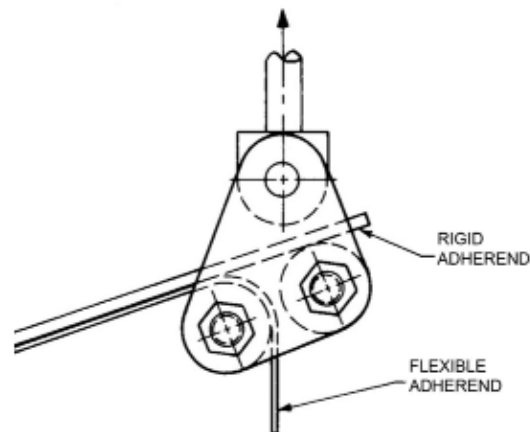


Figura 29 - *floating roller peel test* [77].

#### 2.4.3.1 *Fabrico de juntas, ensaio e interpretação de resultados*

As propriedades mecânicas do aderente flexível possuem bastante influência nos resultados obtidos para a resistência de arrancamento. É, assim, necessário cuidado na escolha do aderente flexível, de forma a obter resultados consistentes nos ensaios. Aderentes de diferentes origens resultarão em forças de arrancamento dissimilares.

Este ensaio pode ser efetuado numa máquina universal de ensaios de tração, pois o acessório de ensaio é facilmente adaptável a estes equipamentos. É importante que seja mantido o alinhamento dos provetes durante o ensaio, uma vez que o provete sofre um movimento lateral. Isto é conseguido permitindo o movimento lateral da parte inferior do acessório.

As dimensões dos provetes sugeridas pela norma ASTM D3167 encontram-se na Figura 30.

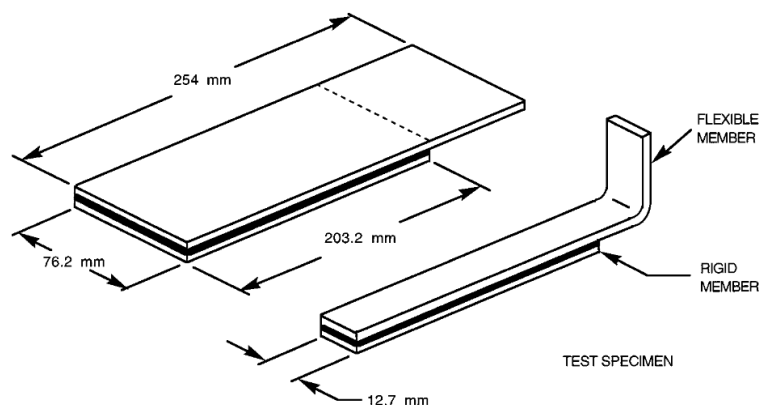


Figura 30 - Configuração e geometria dos provetes no *floating roller peel test* de acordo com a norma ASTM D3167 [78].

O método preferencial para o fabrico dos provetes é através da colagem de placas do material pretendido para os aderentes, das quais após a cura do adesivo são cortados os provetes na largura pretendida. Este deve ser o método utilizado quando os aderentes são homogêneos.

O ensaio decorre através do arrancamento do aderente flexível a um determinado ângulo, determinado com auxílio de um acessório de fixação semelhante ao da Figura 29. A velocidade de ensaio recomendada é de 152 mm/min. Tal como no *peel test* a 180°, a norma que rege o *floating roller peel test* (ASTM D3167) sugere que, para a determinação da resistência de arrancamento, sejam ignorados os primeiros 25 mm de deslocamento. Por outro lado, para o cálculo, devem ser utilizados os valores ao longo de pelo menos 76,2 mm de deslocamento no ensaio.

Como resultados do ensaio, devem ser apresentados os valores máximo, mínimo e médio de força de arrancamento ao longo do período selecionado para recolha dos dados. A resistência de arrancamento média, tal como nos restantes *peel tests*, deve ser expressa em função da largura do provete, como demonstrado na Equação (2.12). O modo de rotura do provete deve também ser indicado, ou seja, deve ser mencionado se ocorreu rotura adesiva, coesiva ou mista. No *floating roller peel test*, para a interpretação dos resultados, o modo de rotura é mais importante do que a resistência de arrancamento, uma vez que a resistência de arrancamento só é comparável em provetes com aderentes flexíveis iguais. A resistência de arrancamento pode diminuir num fator de até dez vezes de um aderente flexível de alumínio para um em material compósito [77].

#### 2.4.3.2 Elementos finitos e investigação experimental

Durante algum tempo acreditava-se que o trabalho resultante do ensaio no provete, calculado através da área por baixo da curva força - deslocamento, era representativo do trabalho originário do arrancamento do adesivo. Adams e Crocombe [69], com uma investigação baseada numa análise pelo método de elementos finitos e suportada por trabalho experimental, demonstraram que este não é o caso e que cerca de 50% do trabalho realizado é absorvido pela deformação plástica do aderente flexível, enquanto este dobra e endireita novamente no decorrer do ensaio. Na experiência, foram utilizados dois alumínios com tensões de cedência diferentes para os aderentes flexíveis, a liga 2024 T3 e a BS L61, como recomendado pelas normas ASTM D3167 e ISO 4578, respetivamente. O estudo demonstrou que, apesar das diferenças nas propriedades mecânicas entre as duas ligas de alumínio, os resultados para as forças de arrancamento foram similares. Os resultados dos ensaios são apresentados na Figura 31.

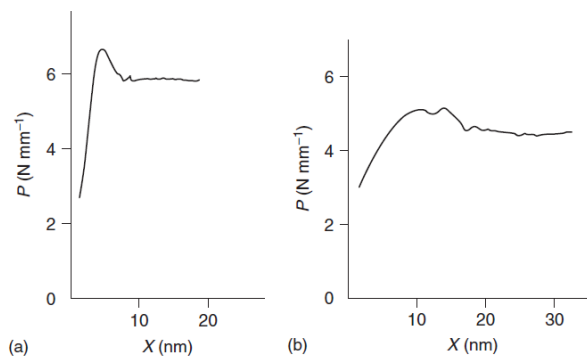


Figura 31 - Forças de arrancamento - deslocamento. (a) resultados com a liga BS L61 e (b) resultados com a liga 2024 T3 [69].

A semelhança nos resultados, apesar da diferença nas propriedades das ligas utilizadas, deve-se ao facto de a liga macia (BS L61) dobrar e ceder a uma carga mais baixa, reduzindo assim o braço de arrancamento, como representado na Figura 23. A liga de alta resistência (2024 T3) possui um raio de curvatura muito superior no decorrer do ensaio, o que causa um maior momento no braço de arrancamento. No entanto, a deformação plástica de ambos os aderentes é bastante diferente na zona da dobra, o que implica diferentes condições de tensão e deformação no adesivo. Estes resultados não permitem assim concluir se é preferível utilizar aderentes flexíveis, de maior ou menor rigidez [64].

#### 2.4.4 Climbing drum peel test

O *climbing drum peel test* é um ensaio aplicado quando nenhum dos aderentes é flexível o suficiente para ser arrancado de forma mais prática. Assim, o aderente mais flexível entre os dois aderentes é arrancado com recurso a um cilindro rígido (*climbing drum*), e enrolado em torno deste, permitindo a aplicação de forças de arrancamento bastante elevadas [64]. Na Figura 32 é possível observar uma representação do *climbing drum peel test*.

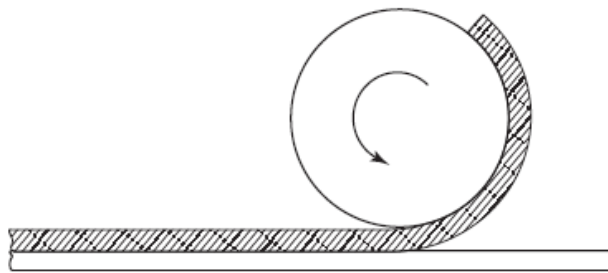


Figura 32 – Representação do *climbing drum peel test* [64].

Este método de ensaio é regulamentado pelas normas ASTM D1781 e BS 5350, prevendo a caracterização da resistência de arrancamento em geralmente duas configurações:

- A ligação entre um aderente relativamente flexível com um aderente rígido;
- A ligação entre as peles e o núcleo de uma estrutura *sandwich*.

A principal aplicação deste método de ensaio é na indústria aeroespacial, onde é essencialmente utilizado para verificar a qualidade das ligações entre as peles e o núcleo em estruturas *sandwich*. Sendo um ensaio que não fornece dados relativamente às propriedades de adesão, é sobretudo um teste de controlo de qualidade.

##### 2.4.4.1 Ensaio e interpretação de resultados

Durante o ensaio, o cilindro rígido de facto sobe pelo provete, dando assim origem ao nome do ensaio. A força necessária para o cilindro subir pelo provete, é por vezes bastante superior à força necessária para o arrancamento dos aderentes. Esta força deve então ser subtraída à força total obtida no ensaio, de forma a calcular a força de

arrancamento obtida para o provete. Na Figura 33 está representado o típico movimento do ensaio e resultados esperados.

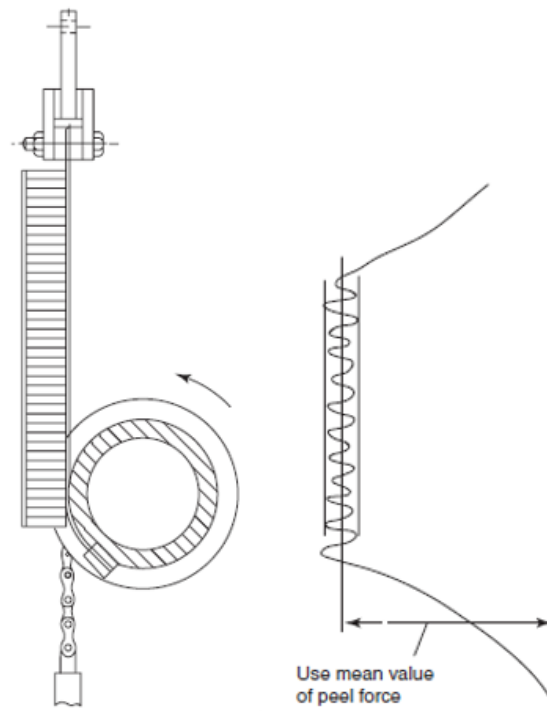


Figura 33 - *Climbing drum peel test* e o resultado típico (adaptado de [64]).

As recomendações das normas devem ser seguidas de forma rigorosa na realização do ensaio, por exemplo no que toca às dimensões dos provetes e velocidade do ensaio, devido à complexidade inerente a este procedimento. O teste é também usualmente efetuado à temperatura ambiente devido à complexidade, dimensões e peso da estrutura necessária para a sua execução.

O resultado do ensaio será o valor de força de arrancamento média a dividir pela largura do provete, depois de excluído o pico inicial de força como nos restantes *peel tests*. O intervalo recomendado para medição dos resultados é entre os 25 e 152mm de deslocamento. Como mencionado anteriormente, a este valor é necessário subtrair o valor de força requerido para mover o cilindro rígido e só após este procedimento é obtido o valor de força de arrancamento para o aderente flexível.



**DESENVOLVIMENTO**



## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Trabalho experimental

A investigação utilizando *peel tests* para a avaliação das propriedades de adesão em juntas com aderentes na configuração compósito – alumínio é ainda bastante recente. Os primeiros *peel tests* efetuados utilizavam a configuração de ensaio *T-peel*, que foram ensaiados em diversas condições de humidade e preparação de superfície [79]. No entanto, estes visavam mais determinar a influência nas propriedades mecânicas do que propriamente avaliar as propriedades de adesão. Atualmente, o *floating roller peel test* é bastante utilizado na indústria para avaliação das propriedades de adesão entre juntas de substratos metálicos, sobretudo devido à simplicidade de conceito e de geometria [77]. No entanto, para juntas com substratos de material compósito, ou de constituição compósito-alumínio, é necessário cumprir os mesmos requisitos de adesão, em especial devido ao aumento da sua utilização na indústria. Portanto, é necessário um método para avaliação das propriedades de adesão para juntas com materiais compósitos na sua constituição.

Mais recentemente têm surgido alguns trabalhos de investigação [77, 80], onde o *floating roller peel test* é testado como um meio de avaliação das propriedades de adesão em juntas com materiais compósitos nos seus aderentes. Devido à experiência já existente da utilização deste ensaio em juntas com substratos metálicos e às suas características mencionadas no subcapítulo 2.4.3, torna-se num ensaio apropriado para a comparação de resultados. Como em todos os trabalhos de análise e investigação, os resultados da análise experimental são de grande importância para a validação das técnicas teóricas ou práticas utilizadas.

#### 3.1.1 Materiais

Neste subcapítulo é efetuada a apresentação dos materiais utilizados no trabalho experimental, especificamente os materiais utilizados para os substratos e o adesivo, sendo indicadas as propriedades mecânicas mais relevantes.

##### 3.1.1.1 Substratos

Para o fabrico dos provetes ensaiados no decorrer da presente dissertação, foram utilizados dois tipos de substratos, uma liga de alumínio e PRFC. Ambos os materiais possuem um elevado número de aplicações na indústria automóvel, aeronáutica, entre outras. A sua seleção para a realização de ensaios do tipo *floating roller peel test* permite, assim, a simulação de algumas aplicações reais da indústria [64].

A liga de alumínio utilizada foi a liga AW 6082-T651, conhecida como uma liga estrutural da série 6000, sendo os seus principais elementos de liga o magnésio e o silício. Na Tabela 5 mostra-se a composição química detalhada desta liga de alumínio.

Tabela 5 - Composição química da liga de alumínio AW 6082 – T651 [81].

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

A ampla utilização desta liga deve-se sobretudo às suas propriedades mecânicas. Na Tabela 6 é possível observar as propriedades mecânicas típicas da liga de alumínio AW 6082-T651, anunciadas pelo fabricante.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651 (dados do fabricante) [81].

Tensão de rotura, $\sigma_r$ [MPa]	Tensão de cedência, $\sigma_y$ [MPa]	Alongamento mínimo, $\epsilon$ [%]	Dureza Brinell, $HB$	Módulo de elasticidade longitudinal, $E$ [GPa]
350	305	11	105	70

Esta liga de alumínio foi caracterizada em trabalhos anteriores por Campilho et al. [82]. Do estudo efetuado foram registadas as propriedades mecânicas presentes na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas à tração da liga de alumínio Al6082-T651 [82].

Tensão de rotura à tração, $\sigma_r$ [MPa]	Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	Deformação de rotura, $\epsilon_f$ [%]	Módulo de elasticidade, $E$ [GPa]
324 ±0,16	261,67±7,65	21,70±4,24	70,07±0,83

As curvas de tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ), dos substratos de alumínio, obtidas experimentalmente, encontram-se apresentadas na Figura 34 [82]. Na Figura 34 é também representada a aproximação considerada para utilização nas simulações numéricas.

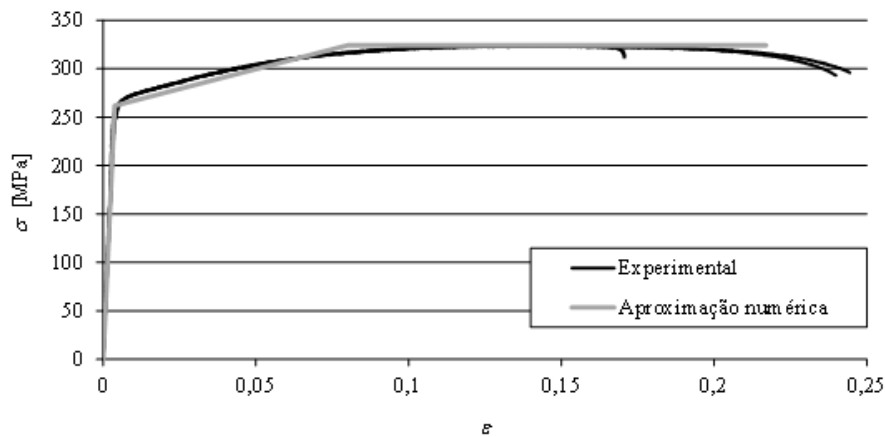


Figura 34 -Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  do alumínio Al6082-T651 [82].

O material compósito utilizado possui reforço de fibra de carbono, o que lhe confere resistência e rigidez elevadas numa matriz de resina epóxida. O PRFC utilizado foi obtido através de um pré-impregnado unidirecional da Hexcel®, com matriz epóxida constituída pela resina HexPly® 8552 e o reforço de fibra de carbono constituído por fibras HexTow® AS4. Este pré-impregnado é um material de alta *performance*, utilizado sobretudo para aplicações estruturais na indústria aeroespacial, onde os fatores mais determinantes são a resistência e rigidez específica. Este material apresenta também uma boa capacidade de resistência ao impacto, tolerância de dano e boa resistência a elevadas temperaturas para uma ampla variedade de outras aplicações [83]. As propriedades mecânicas de tensão de cedência ( $\sigma_y$ ) e módulo de tensão ( $E$ ) do pré-impregnado utilizado à temperatura ambiente e nas direções de 0° e 90° das fibras com a direção longitudinal do provete, encontram-se indicadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades mecânicas do pré-impregnado de matriz HexPly® 8552 e reforço de fibra de carbono HexTow® AS4 [83].

Tensão de cedência $\sigma_y$ [MPa]		Módulo de elasticidade $E$ [GPa]	
0°	90°	0°	90°
2207	81	141	10

### 3.1.1.2 Adesivo

O adesivo estrutural utilizado é o Araldite® AV138 (Figura 35), que se caracteriza pelo seu comportamento frágil mas de elevada resistência, sendo adequado para efetuar ligações entre materiais de famílias diferentes, como metais, compósitos e polímeros [84].

Trata-se um adesivo de base epóxida termoendurecível e composto por dois componentes (resina AV138 + endurecedor HV998). Apresenta uma viscosidade baixa, o que facilita a sua aplicação nas superfícies a ligar, permitindo assim variar facilmente a espessura de adesivo. Tratando-se de um adesivo bi-componente, este adesivo é

fornecido em duas embalagens. Como tal, previamente à mistura, é necessário proceder à pesagem dos dois componentes utilizando uma balança digital. A relação de mistura utilizada é de 100 g de resina para 40 g de endurecedor, com uma precisão de  $\pm 5\%$ . Este adesivo apresenta-se na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa emissão de gases e perdas voláteis [85].

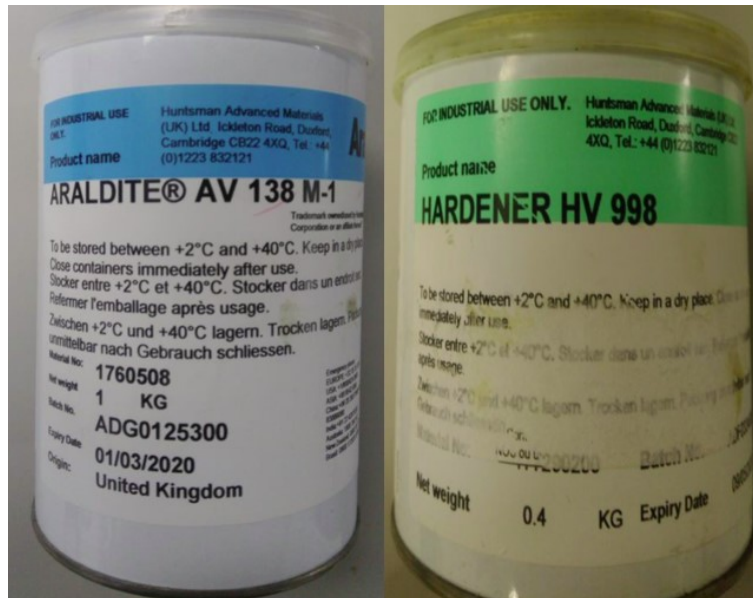


Figura 35 – Adesivo Araldite® AV138.

A curva de tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) do adesivo está representada no gráfico da Figura 36. Esta curva foi obtida experimentalmente por Campilho et al. [84].

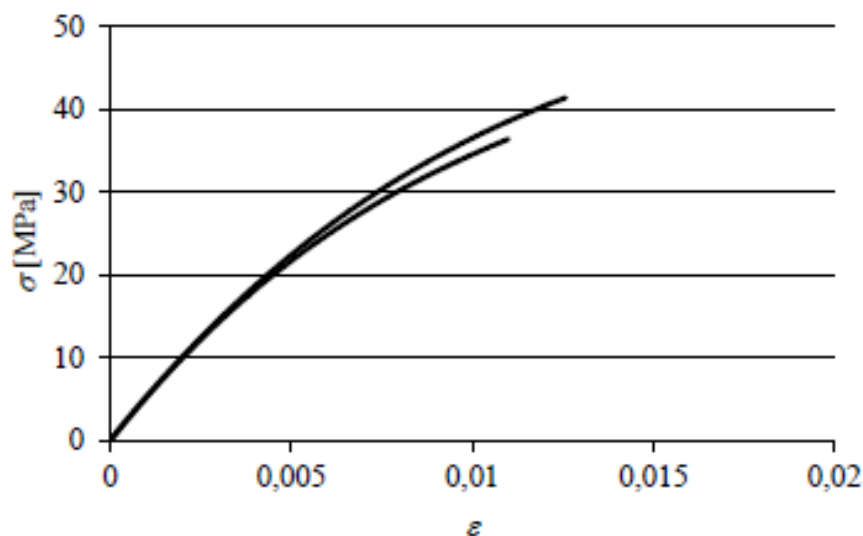


Figura 36 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços constituídos pelo adesivo Araldite® AV138 [84].

As propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo são descritas na Tabela 9.

Tabela 9 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [85].

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

<sup>a</sup> Valor do fabricante.

<sup>b</sup> Valor estimado na referência [86].

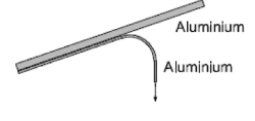
### 3.1.2 Procedimento experimental

O trabalho experimental consistiu no fabrico e ensaio de seis configurações de juntas. Os provetes com a configuração do ensaio *floating roller peel test* foram fabricados através da colagem de um aderente flexível a um aderente rígido. Para tal, foram utilizadas diferentes configurações com os aderentes em alumínio e em PRFC, sendo as especificações dos materiais conforme descrito no subcapítulo 3.1.1.1. Para cada configuração de junta foram fabricados três provetes, resultando num total de 18 provetes. O adesivo Araldite® AV138 foi o adesivo utilizado em todas as juntas. Na Tabela 10 é possível observar as diferentes configurações e nomenclaturas, assim como as espessuras para os aderentes rígidos ( $t_r$ ) e para os aderentes flexíveis ( $t_f$ ), utilizadas no procedimento experimental da presente dissertação.

Como constatável pela Tabela 10, na nomenclatura atribuída aos provetes, o aderente rígido é referenciado com uma letra maiúscula e o aderente flexível com uma letra minúscula. Estes caracteres ocupam respetivamente a primeira e segunda posição da nomenclatura. *A* ou *a* são representativos dos aderentes de alumínio e *C* ou *c* dos aderentes em PRFC. As terminações *0* e *90*, ocupam a terceira posição na nomenclatura e são representativas da direção das fibras de carbono com a direção longitudinal dos provetes ( $0^\circ$  ou  $90^\circ$ ). Como foram utilizados três provetes por condição, posteriormente no processamento de dados (subcapítulo 3.1.3) será acrescentada uma quarta posição na nomenclatura, relativo ao número do provete de cada configuração (1,2,3). No caso do alumínio, foram utilizados aderentes com 3 e 0,6 mm de espessura para os aderentes

rígidos e flexíveis, respetivamente. Para o PRFC foram fabricadas placas com aproximadamente 1,8 mm e 0,3 mm para os aderentes rígidos e flexíveis, respetivamente. O fabrico e descrição do empilhamento dos substratos de PRFC será abordado posteriormente de forma detalhada no subcapítulo 3.1.2.2.

Tabela 10 – Nomenclatura e configurações dos provetes fabricados. (Adaptado de [77]).

Nomenclatura	Aderente rígido	Aderente flexível	Representação
A-c-0	Alumínio ( $t_r = 3$ mm)	PRFC ( $t_f = 0,3$ mm)	
A-c-90	Alumínio ( $t_r = 3$ mm)	PRFC ( $t_f = 0,3$ mm)	
A-a	Alumínio ( $t_r = 3$ mm)	Alumínio ( $t_f = 0,6$ mm)	
C-c-0	PRFC ( $t_r = 1,8$ mm)	PRFC ( $t_f = 0,3$ mm)	
C-c-90	PRFC ( $t_r = 1,8$ mm)	PRFC ( $t_f = 0,3$ mm)	
C-a	PRFC ( $t_r = 1,8$ mm)	Alumínio ( $t_f = 0,6$ mm)	

Em seguida é especificado o formato e dimensões geométricas das juntas em análise, assim como é descrito o seu processo de fabrico. Por fim são apresentadas as condições em que foram efetuados os ensaios.

### 3.1.2.1 Geometria das juntas

A Figura 37 representa a geometria e dimensões em mm utilizadas para o fabrico dos provetes *floating roller peel test*. Os provetes foram construídos com largura ( $b$ ) de 25 mm.

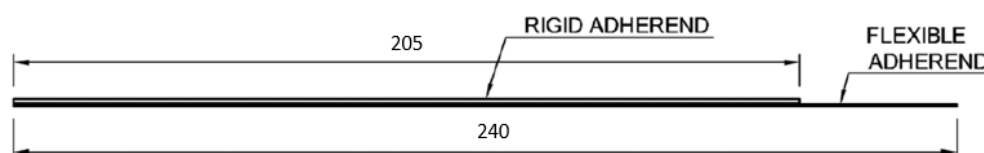


Figura 37 - Configuração da geometria dos provetes *floating roller peel test*. (Adaptado de [77]).

Os parâmetros geométricos do provete são: comprimento total ( $L_T$ ), espessura do adesivo ( $t_a$ ), comprimento de sobreposição ( $L_0$ ) e largura ( $b$ ). Como as espessuras dos

substratos rígidos e flexíveis já se encontram expressas na Tabela 10, as restantes dimensões são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Dimensões dos provetes *floating roller peel test*.

Parâmetro	Valor (mm)
$b$	25
$L_T$	240
$t_a$	0,2
$L_0$	205

Como é possível constatar pela análise da Figura 37,  $L_0$  será igual ao comprimento do aderente rígido ( $L_r$ ). Já  $L_T$  será igual ao comprimento do aderente flexível ( $L_f$ ).

Na Figura 38 é possível observar o acessório de fixação necessário para executar o *floating roller peel test* e as respetivas dimensões, conforme recomendado pela norma ASTM D3167. É possível também observar a configuração do ensaio, após a fixação do acessório e do provete na máquina de ensaios.

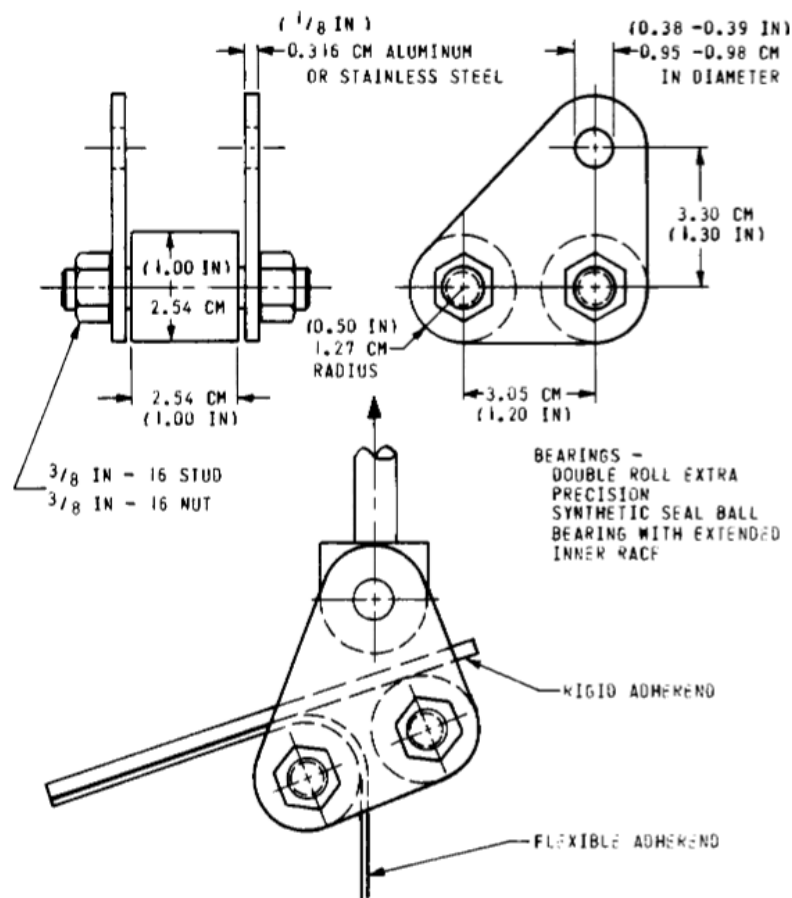


Figura 38 – Acessório de fixação para o ensaio *floating roller peel test* e a configuração de ensaio [78].

### 3.1.2.2 Processo de fabrico

Para o fabrico dos provetes e como um dos substratos a ser utilizado era em PRFC, foi necessário proceder ao fabrico de placas de compósito neste material. O fabrico das estruturas foi realizado no laboratório de materiais compósitos do ISEP.

Como estipulado anteriormente o material compósito foi utilizado como aderente rígido e flexível, pelo que foi necessário o fabrico de duas placas com espessuras e, por consequência, empilhamentos diferentes. Ambas as placas foram produzidas com as dimensões 240 x 240 mm<sup>2</sup>. Na Tabela 12 estão descritas as espessuras, número de camadas, empilhamentos e respetiva direção de cada aderente, sendo que as folhas de pré-impregnado utilizado apresentam 0,075 mm de espessura.

Tabela 12 - Configurações das placas PRFC fabricadas.

Aderente	Espessura (mm)	Número de camadas	Empilhamento
Rígido	1,8	24	[0 <sub>3</sub> /90/0 <sub>3</sub> /90/0 <sub>3</sub> /90] <sub>s</sub>
Flexível	0,3	4	[0/90] <sub>s</sub>

Iniciou-se o processo de fabrico por retirar o rolo pré-impregnado de PRFC de uma câmara frigorífica, onde se encontrava armazenado a uma temperatura de aproximadamente -18°C. Este foi deixado a estabilizar por alguns minutos à temperatura ambiente, previamente ao corte das camadas necessárias nas dimensões indicadas anteriormente. Foram cortadas vinte e quatro camadas para o empilhamento e fabrico da placa de aderente rígido, de forma a perfazer  $t_r = 1,8$  mm. Para as placas do aderente flexível, foram cortadas oito camadas para o fabrico de duas placas, ambas com uma espessura de  $t_f = 0,3$  mm. O processo de corte encontra-se representado na Figura 53.

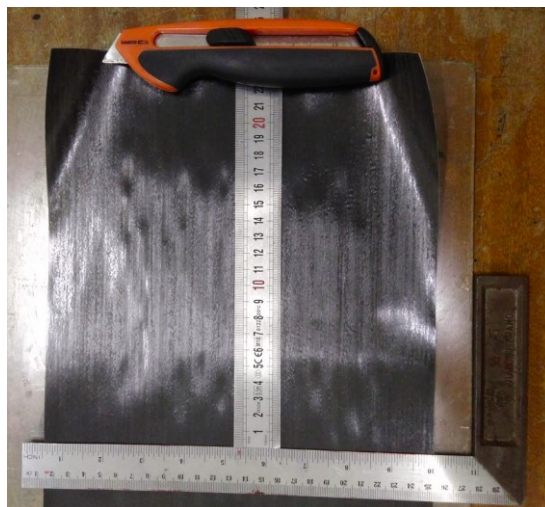


Figura 39 - Processo de corte das camadas de PRFC.

No final do corte procedeu-se ao empilhamento manual das camadas, nas sequências e orientações indicadas na Tabela 12. O pré-impregnado utilizado possui uma face adesiva (protegida por uma película plástica) que possibilita a aderência das diferentes camadas durante o empilhamento. Anteriormente à remoção desta película, foi utilizado um soprador de ar quente para aquecer uniformemente a folha de pré-impregnado, de forma a ativar o adesivo e possibilitar uma melhor aderência entre camadas. Para facilitar a descolagem da película plástica, assegurar uma adesão uniforme na camada e retirar o ar entre folha de pré-impregnado e a película, recorreu-se a uma espátula que foi utilizada para pressionar toda a folha, num movimento exemplificado na Figura 40 a). Na Figura 40 b) é possível observar o aspeto final da folha de pré-impregnado após este processo de aquecimento. Este procedimento foi repetido para as restantes camadas necessárias para perfazer os empilhamentos pretendidos.



Figura 40 – a) Aplicação de pressão na camada com recurso a uma espátula e b) aspeto final da camada após o aquecimento.

Após o empilhamento estar concluído, as placas produzidas foram novamente armazenadas em câmara frigorífica a uma temperatura de aproximadamente  $-18^{\circ}\text{C}$ , de forma a estarem armazenadas e as suas propriedades conservadas, até ser possível efetuar a moldação do laminado.

Para a moldação dos laminados foi utilizada uma prensa de pratos quentes. O processo utilizado para a moldação foi a moldação por compressão a quente. Este processo consiste na moldação do pré-impregnado através de pressão (aplicada pela prensa) e temperatura (através dos pratos quentes), que ativa e cura a matriz presente no pré-impregnado. Para este efeito recorreu-se ao uso de um filme desmoldante de Teflon, o Wrightlon® 5200 da empresa norte-americana Airtech Int. Co. para envolver as placas. Este filme desmoldante apresenta uma boa capacidade de alongação, o que lhe permite conformar-se às formas mais complexas, e suporta temperaturas de cura até  $260^{\circ}\text{C}$ . Para dar início ao processo de cura cada placa de compósito foi envolvida por filme desmoldante (Figura 41). Este procedimento foi efetuado de forma a facilitar a remoção das placas de PRFC após a cura e obter um bom acabamento superficial com a utilização do filme desmoldante Wrightlon® 5200.

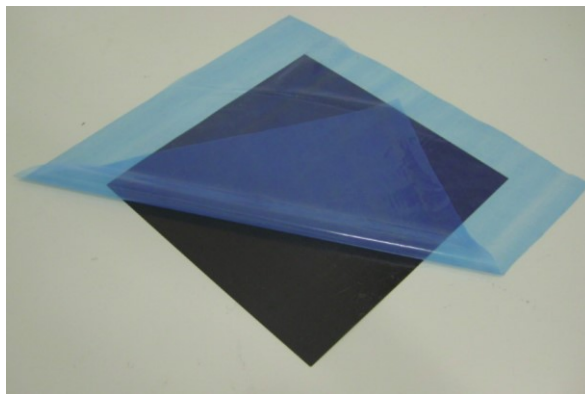


Figura 41 - Aplicação do filme desmoldante.

De seguida, deu-se o ciclo de cura das placas na prensa. Este foi efetuado de acordo com as indicações presentes na ficha técnica do pré-impregnado utilizado [83]. Foi utilizada uma pressão de 7 bar e dois ciclos de temperatura. Durante o primeiro ciclo foi aplicada uma temperatura de 110°C durante 1h, com um aquecimento de 3°C/min até serem atingidos os 110°C. No segundo ciclo, foi efetuado um aquecimento também de 3°C/min a partir dos 110°C até serem atingidos os 180°C, que foram mantidos por 120 min. Por fim efetuou-se o arrefecimento até à temperatura ambiente. Na Figura 42 é possível observar uma representação gráfica do ciclo de cura utilizado.

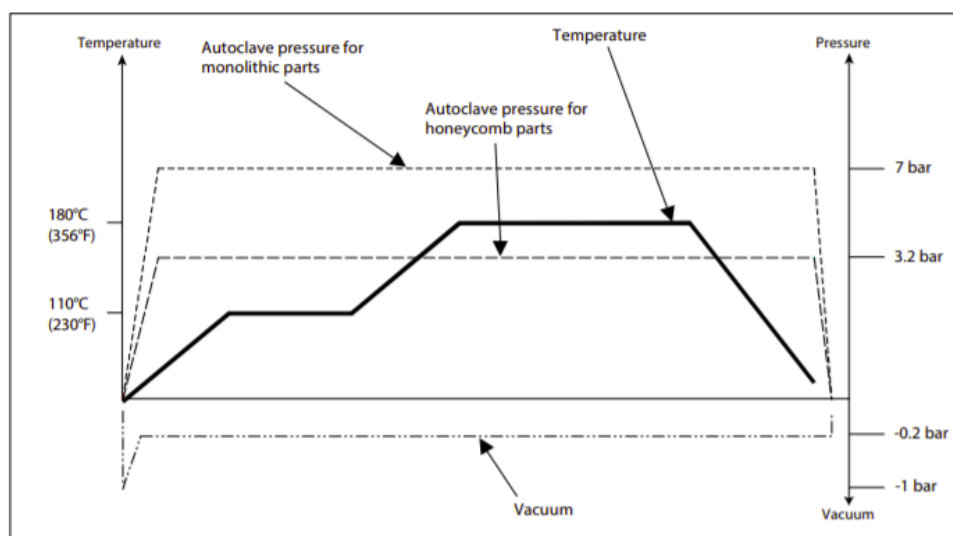


Figura 42 - Ciclo de cura utilizado para as placas de PRFC [83].

Após a moldação das placas de PRFC, procedeu-se ao corte das placas de compósito e de alumínio para fabrico dos provetes. O corte foi efetuado no laboratório de materiais compósitos do ISEP de acordo com as dimensões estipuladas no subcapítulo 3.1.2.1, tendo sido utilizada uma mesa de corte guiada com disco diamantado (Figura 43), utilizando um sistema de guias e réguas para o correto posicionamento das placas na mesa de corte.



Figura 43 - Máquina de corte utilizada.

Para obtenção das configurações com terminação c-0 e c-90, o corte do aderente flexível foi efetuado com as fibras numa direção de  $0^\circ$  e  $90^\circ$  respetivamente, com a direção longitudinal dos provetes.

No caso das configurações nas quais ambos os aderentes são em PRFC, o corte dos aderentes foi efetuado como especifica a norma ASTM D3167 (Figura 44) [78].



Figura 44 - Procedimento de corte para os provetes das configurações C-c-90 e C-c-0 [77].

Foram cortadas placas de maiores dimensões das quais os provetes individuais seriam cortados (com  $b=25$  mm) após a colagem e cura do adesivo. Este procedimento é observável na Figura 45.



Figura 45 - Corte dos aderentes de PRFC para as configurações C-c-90 e C-c-0.

No caso da configuração A-a, não foi possível utilizar o mesmo método, uma vez que os aderentes foram fornecidos já com  $b=25$  mm. Para todas as configurações que envolviam a utilização de aderentes em alumínio, os provetes foram imediatamente cortados na sua forma individual previamente à aplicação do adesivo (subcapítulo 3.1.2.1).

Para a preparação superficial dos aderentes nas zonas de contacto com o adesivo, recorreu-se ao processo passivo mecânico de abrasão por lixa (lixagem). Esta técnica permite a remoção de camadas de óxidos e fornece às superfícies uma rugosidade que permite melhorar a molhagem do adesivo ao substrato e por consequência permite uma melhor adesão [2]. Para os substratos de PRFC foi utilizada uma lixa bastante fina com um índice de 360, de forma a não provocar danos nas fibras nem diminuir a espessura dos substratos. No caso dos aderentes em alumínio, foi utilizada uma lixa muito mais grossa com um índice de 60. Na Figura 46 é possível observar o processo de lixagem de um substrato de alumínio.

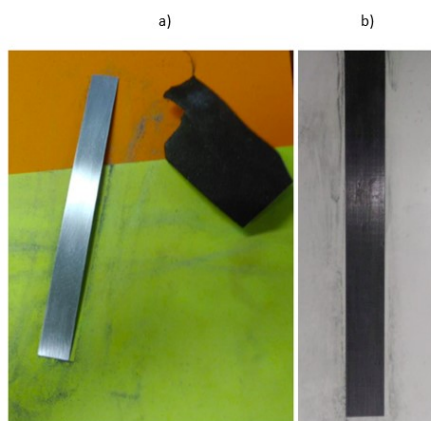


Figura 46 - a) Processo de lixagem dos substratos de alumínio e b) processo de lixagem dos substratos de PRFC.

Posteriormente ao tratamento superficial, os substratos foram sujeitos a uma limpeza. A limpeza superficial dos substratos foi efetuada manualmente com recurso a acetona. Esta limpeza teve por objetivo a remoção de partículas sólidas deixadas pelo processo de lixagem, assim como eliminar vestígios oleosos das superfícies que estariam em contacto com a camada adesiva. Na Figura 47 é possível observar o aspeto dos substratos de alumínio, após os tratamentos de abrasão por meio de lixa e limpeza superficial com acetona.



Figura 47 - Aspeto dos substratos de alumínio após a preparação superficial e limpeza.

Concluído o processo de preparação e limpeza superficial, procedeu-se à preparação dos substratos para a aplicação do adesivo. Para assegurar de forma o mais uniforme possível a espessura de adesivo pretendida ( $t_a = 0,2$  mm), ao longo da área a colar foram utilizadas lâminas de aço inoxidável com espessura de 0,2 mm, conforme exemplificado na Figura 48. Previamente à sua aplicação, estas lâminas foram sujeitas a uma limpeza superficial com acetona.

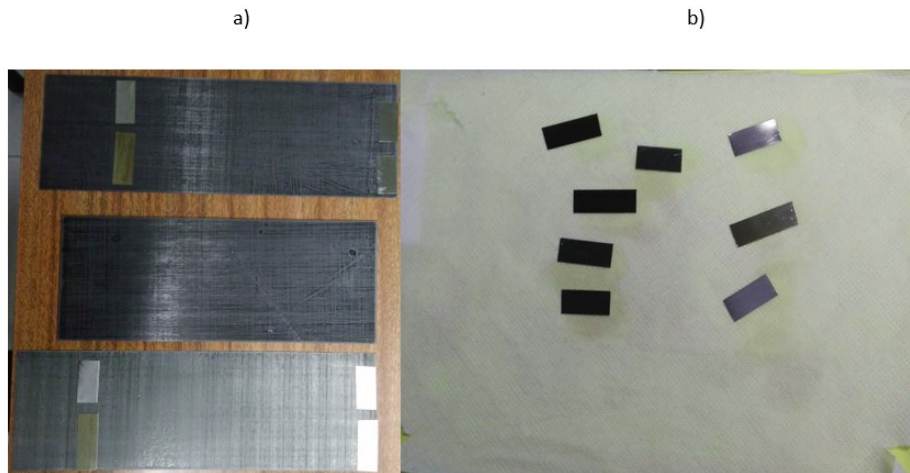


Figura 48 – a) Aplicação das lâminas nos substratos e b) exemplo de lâmina utilizada para assegurar a espessura  $t_a$  após limpeza superficial.

De seguida delineou-se nos substratos flexíveis de cada provete o valor de  $L_0$ , que corresponderá ao comprimento do substrato rígido. O posicionamento das lâminas espaçadoras foi efetuado nos substratos flexíveis, nas extremidades de  $L_0$ .

Posteriormente a este trabalho iniciou-se a preparação do adesivo, a fim de efetuar a colagem dos substratos. Como mencionado no subcapítulo 3.1.1.2, o adesivo utilizado foi o Araldite® AV138. Tratando-se de um adesivo de dois componentes foi necessário proceder à sua mistura na razão de 100 g de resina para 40 g de endurecedor. A mistura foi efetuada manualmente até à completa homogeneização das duas partes no adesivo. Após misturado, o adesivo foi aplicado manualmente com recurso a uma espátula (Figura 49).



Figura 49 - Aplicação do adesivo nos substratos.

É importante salientar que, previamente à aplicação do adesivo, os substratos foram dispostos sobre um cavalete e uma folha de politetrafluoretileno (PTFE), de forma a evitar a colagem dos provetes ao cavalete. Esta disposição é observável na Figura 50 a). Após a aplicação do adesivo, procedeu-se ao correto posicionamento do substrato rígido sob o flexível. Este contacto foi efetuado de forma bastante cuidada, para conservar o alinhamento dos substratos. Como representado na Figura 50 b), de seguida foram colocados grampos na zona de sobreposição para, através da pressão aplicada por estes, se garantir o valor desejado de  $t_a$ . A aplicação desta pressão resultou na expulsão do excesso de adesivo pelos bordos laterais dos provetes.

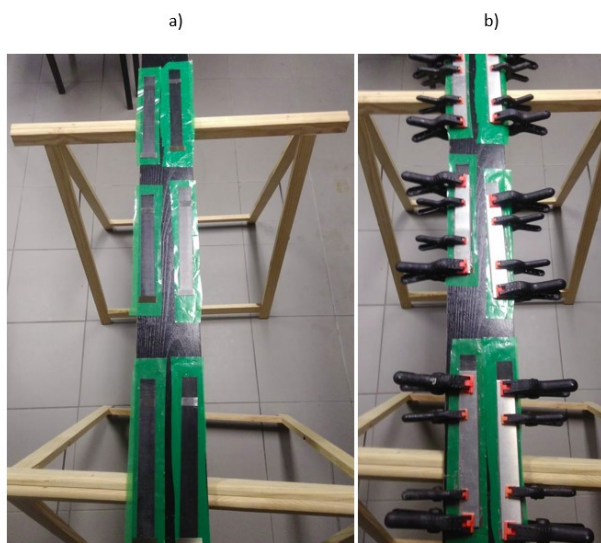


Figura 50 -a) Alinhamento dos provetes previamente à colagem e b) fixação e alinhamento dos provetes após colagem.

A cura do adesivo decorreu durante uma semana à temperatura ambiente. Após a cura total, foi necessário proceder à remoção das lâminas de aço do interior do provete e à remoção do excesso de adesivo nas laterais. A remoção das lâminas foi efetuada com o auxílio de um torno e um x-ato, o que se afirmou um processo simples devido à utilização de um agente desmoldante, enquanto a remoção dos excessos foi inicialmente efetuada com um alicate de pontas e de seguida recorreu-se a uma mó abrasiva para deixar as superfícies laterais uniformes. Este procedimento está representado na Figura 51.

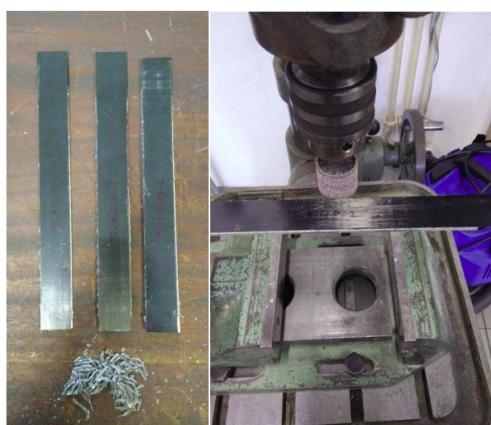


Figura 51 -Processo de remoção dos excessos de adesivo nos provetes.

O procedimento de remoção dos excessos decorreu de forma cuidada para não provocar alterações na geometria dos provetes. Este processo torna-se necessário, pois os excessos influenciam a resistência das juntas relativamente à geometria teórica, em que apenas existe uma camada de adesivo com  $t_a$  constante na zona de sobreposição.

### 3.1.2.3 Procedimento de ensaio

O ensaio dos provetes foi efetuado no laboratório de ensaios mecânicos do ISEP e com recurso a uma máquina de ensaios de tração Shimadzu AG-1, equipada com uma célula de carga de 10 kN (Figura 52). Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente a uma velocidade de ensaio de 125 mm/min. O deslocamento imposto às juntas foi sempre realizado até a ocorrência de rotura da ligação, ou seja, até que ocorresse a separação total dos aderentes.

No *floating roller peel test*, os provetes são fixos à máquina de tração de modo manual. O acessório de ensaio é fixo à amarra superior da máquina, enquanto o aderente flexível do provete é fixo à amarra inferior. Uma vez que existe movimento lateral do provete durante o crescimento da fenda, é importante manter o alinhamento do mesmo através da rotação do acessório de fixação relativamente ao ponto de apoio na máquina de ensaios [64]. Na Figura 52 é possível observar um provete devidamente posicionado para o ensaio.



Figura 52 – Correto posicionamento de um provete do ensaio *floating roller peel test* numa máquina de ensaios de tração Shimadzu AG-1.

Embora o movimento da máquina de ensaios seja o de um ensaio de tração, devido ao acessório de fixação é possível simular o fenómeno de arrancamento. Na Figura 53 observa-se um provete após a descolagem (arrancamento) completa.



Figura 53 - Provete após o final do ensaio.

### 3.1.3 Resultados

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos após a realização dos ensaios. De seguida, é efetuada a respetiva análise e comentário dos resultados obtidos, comparando os valores obtidos nas diferentes configurações e com outros resultados reportados na literatura.

De acordo com a norma ASTM D3167 [78], no final do *floating roller peel test* devem ser reportados os seguintes dados: força de arrancamento média no decorrer do ensaio ( $P_{\text{média}}$ ), força de arrancamento máxima ( $P_{\text{máxima}}$ ), força de arrancamento mínima ( $P_{\text{mínima}}$ ), força de arrancamento por unidade de largura do provete ( $P/b$ ) e modo de rotura. Para a determinação destes resultados, a norma especifica que devem ser ignorados os primeiros 25,4 mm de propagação da fenda e que devem ser analisados pelo menos 76,2 mm de propagação, pelo que o intervalo definido para a obtenção dos resultados foi entre os 25,4 mm e os 105 mm de propagação da fenda. Este intervalo foi o selecionado pois cumpria com as recomendações da norma e era aplicável a todos os provetes ensaiados, com a exceção do provete número 3 da configuração A-a e o provete número 1 da configuração C-a. Nestes provetes foi observável uma rotura catastrófica, que impossibilitou que a propagação da fenda atingisse os 105 mm. Este fenómeno pode estar relacionado com a natureza frágil do adesivo utilizado. Nestes provetes o intervalo de medição foi dos 25,4 mm até ao início da propagação catastrófica obtida na parte final do ensaio.

O cálculo de  $P/b$ , resistência de arrancamento ou *peel strength* como denominado na literatura [64], foi calculado efetuando a média dos valores de força de arrancamento por unidade de largura em cada instante do intervalo de medição 25,4 a 105 mm. A representação gráfica destes valores, no intervalo de medição selecionado, será

também apresentada nos resultados, através da consideração da força de arrancamento por unidade de largura do provete ( $P/b$ ) em função do deslocamento de propagação da fenda do adesivo ( $a$ ).

No decorrer dos ensaios foram observáveis três tipos de modo de rotura: rotura coesiva, rotura mista e rotura interlaminar do aderente flexível compósito. A apresentação do modo de rotura obtido é efetuada por percentagem do tipo de rotura presente. A determinação da percentagem foi obtida através do cálculo das áreas correspondentes a cada modo de rotura, com recurso ao *software* de imagem *Meazure*.

### 3.1.3.1 Configuração A-a

A Figura 54 apresenta as curvas  $P/b-a$  registadas nos ensaios dos provetes da configuração A-a. Pela análise do gráfico da Figura 54, verifica-se que as curvas dos três provetes apresentam similaridades na sua tendência, sendo os valores obtidos para a resistência de arrancamento dos provetes número 1 e 2 próximos. A exceção será o provete número 3 que, apesar de a tendência da curva ser semelhante, apresenta valores inferiores para a resistência de arrancamento quando em comparação com os restantes. Este provete apenas apresentou cerca de 93 mm de propagação da fenda durante o ensaio, o que fez com que o cálculo da resistência de arrancamento tenha sido efetuado no intervalo de 25,4 a 93 mm. Esta diferença na propagação da fenda está relacionada com a rotura catastrófica observada na parte final do ensaio.

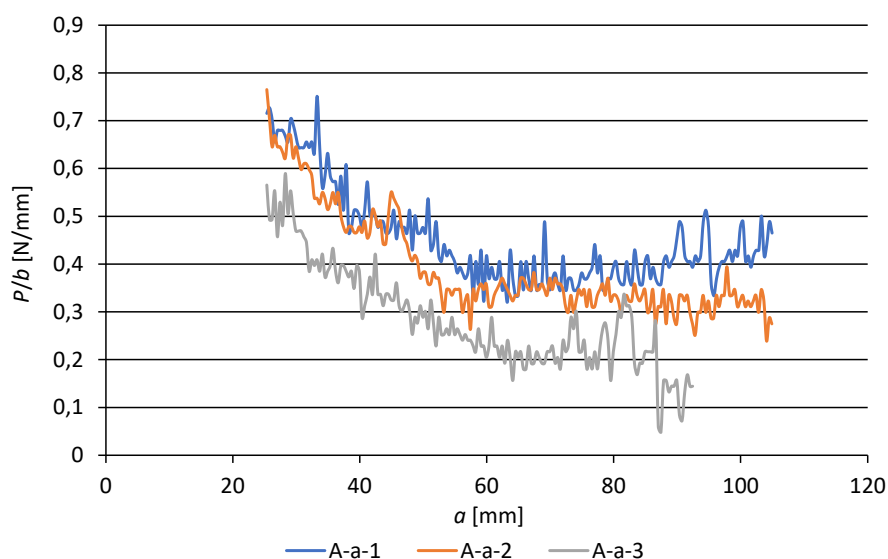


Figura 54 – Curvas  $P/b - a$  obtidas experimentalmente após ensaio da configuração A-a.

Tal como indicado pela norma ASTM D3167, os resultados do ensaio para esta configuração encontram-se reportados na Tabela 13. É possível observar que o valor médio de resistência de arrancamento para a configuração A-a foi de 0,375 N/mm, com um coeficiente de variação de 10,7%.

Tabela 13 – Resultados obtidos após o ensaio dos provetes da configuração A-a.

Parâmetro	A-a-1	A-a-2	A-a-3
$P_{\text{médio}} \text{ (N)}$	11,8	10,3	7,35
$P_{\text{máximo}} \text{ (N)}$	19,7	20,0	15,3
$P_{\text{mínimo}} \text{ (N)}$	8,44	6,25	1,250
$P/b \text{ (N/mm)}$	0,451	0,393	0,283
$P/b_{\text{médio}} \text{ (N/mm)}$	0,375		
Desvio Padrão	0,040		
Coef. de variação (%)	10,7		

Na Figura 55 é possível observar os modos de rotura ocorridos para os três provetes ensaiados na configuração A-a.

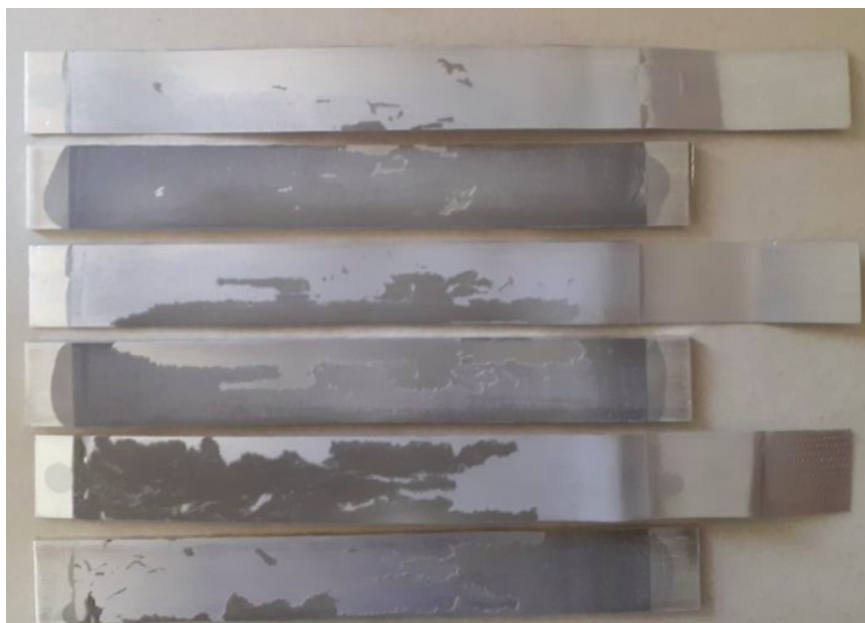


Figura 55 - Modos de rotura da configuração A-a.

Por observação cuidadosa dos provetes, é possível concluir que o modo de rotura predominante foi a rotura coesiva. Embora em algumas regiões a rotura tenha ocorrido muito próxima da interface entre o adesivo e o substrato, são residuais as áreas dos aderentes onde não se verifica a presença de adesivo em ambos os aderentes do provete. Isto demonstra que a ligação entre o adesivo e os aderentes é superior à resistência interna do próprio adesivo. Na Tabela 14 encontra-se a quantificação dos modos de rotura em cada provete baseada na análise efetuada. É possível concluir que

embora existam alguns pontos onde tenha ocorrido rotura adesiva, o modo de rotura predominante foi a rotura coesiva.

Tabela 14 – Quantificação dos modos de rotura da configuração A-a.

Configuração	Coesiva (%)	Adesiva (%)	Interlaminar (%)
A-a-1	81	19	-
A-a-2	63	37	-
A-a-3	65	35	-
Média	70	30	-

### 3.1.3.2 Configuração A-c-0

Na Figura 56 encontram-se representadas as curvas  $P/b-a$  registadas nos ensaios dos provetes da configuração A-c-0. Pela análise do gráfico da Figura 56, verifica-se que as curvas dos três provetes apresentam similaridades na sua tendência, sendo os valores obtidos para a resistência de arrancamento dos provetes relativamente próximos.

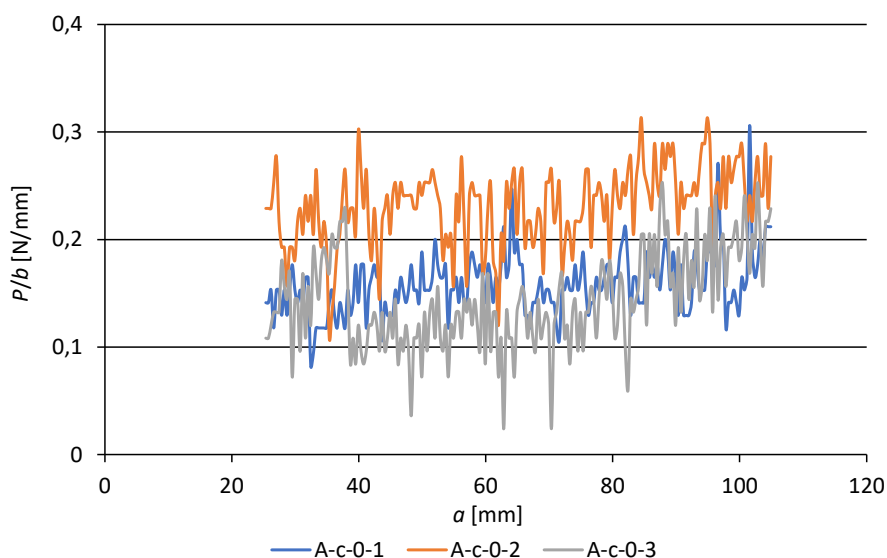


Figura 56 – Curvas  $P/b - a$  obtidas experimentalmente após ensaio da configuração A-c-0.

A Tabela 15 apresenta os resultados do ensaio para esta configuração. Pela análise dos resultados reportados na tabela é possível comprovar a tendência verificada no gráfico da Figura 56. O valor de resistência de arrancamento é bastante próximo nos provetes número 1 e 3, sendo que apenas o provete número 2 apresenta um valor de resistência de arrancamento ligeiramente superior. O valor médio de resistência de arrancamento para a configuração A-c-0 foi de 0,178 N/mm, com um coeficiente de variação de 12,5%.

Tabela 15 - Resultados obtidos após o ensaio dos provetes da configuração A-c-0.

Parâmetro	A-c-0-1	A-c-0-2	A-c-0-3
$P_{\text{médio}} \text{ (N)}$	4,20	6,01	3,74
$P_{\text{máximo}} \text{ (N)}$	8,13	8,13	6,56
$P_{\text{mínimo}} \text{ (N)}$	2,19	2,81	0,625
$P/b \text{ (N/mm)}$	0,158	0,232	0,144
$P/b_{\text{médio}} \text{ (N/mm)}$	0,178		
Desvio Padrão	0,022		
Coef. de variação (%)	12,5		

De seguida na Figura 57 é possível observar o modo de rotura para os três provetes ensaiados na configuração A-c-0.

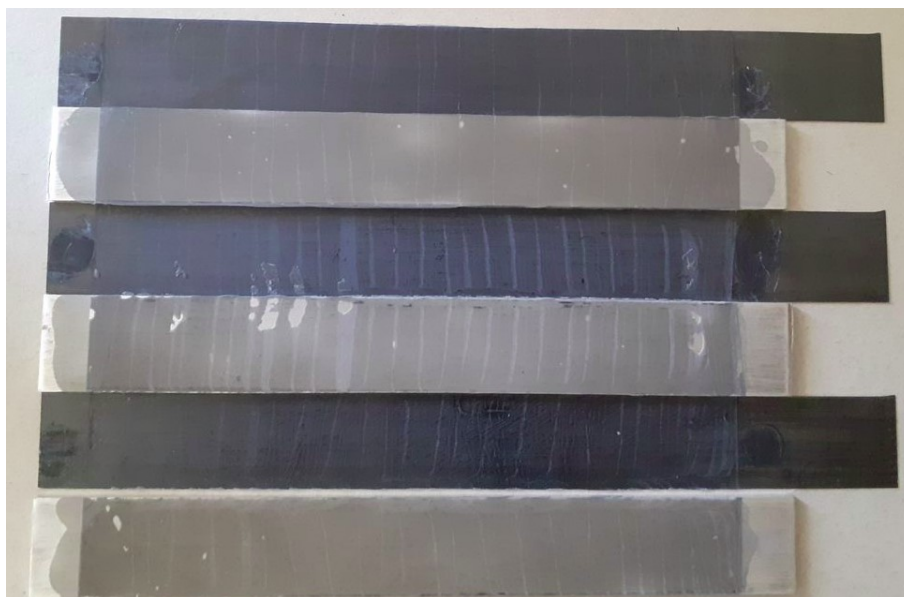


Figura 57 - Modos de rotura da configuração A-c-0.

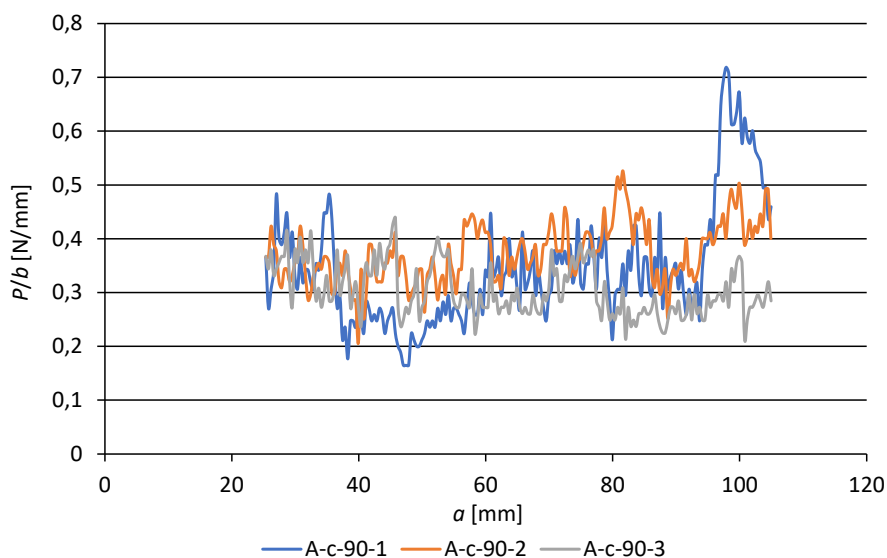
Através da observação cuidada dos provetes, é possível concluir que o modo de rotura predominante foi a rotura coesiva. São residuais as áreas dos aderentes onde não se verifica a presença de adesivo em ambos os aderentes do provete. Conclui-se desta forma que a resistência da ligação entre o adesivo e os aderentes é superior à resistência interna do próprio adesivo, o que demonstra também uma boa preparação superficial dos aderentes previamente à colagem. Na Tabela 16 encontra-se a quantificação dos modos de rotura em cada provete baseada na análise visual efetuada, onde se conclui que o modo de rotura predominante foi a rotura coesiva.

Tabela 16 - Quantificação dos modos de rotura da configuração A-c-0.

Configuração	Coesiva (%)	Adesiva (%)	Interlaminar (%)
A-c-0-1	100	-	-
A-c-0-2	98	2	-
A-c-0-3	100	-	-
Média	99	1	-

### 3.1.3.3 Configuração A-c-90

Na Figura 58 é possível observar as curvas  $P/b-a$  registadas nos ensaios dos provetes da configuração A-c-90. Através da análise do gráfico da Figura 58, constata-se que as curvas dos três provetes apresentam similaridades na sua tendência e nos valores obtidos para a resistência de arrancamento. A única exceção será um aumento do valor de  $P/b$  verificado no provete A-c-90-1 na fase final do ensaio.

Figura 58 – Curvas  $P/b - a$  obtidas experimentalmente após ensaio da configuração A-c-90.

O aumento verificado no provete A-c-90-1 está relacionado com o modo de rotura obtido no provete. Aproximadamente aos 90 mm de propagação da fenda ocorreu rotura interlaminar do aderente flexível, ou seja, o aumento de  $P/b$  coincide com a fase de transição entre a rotura coesiva e interlaminar. A inclusão deste aumento na resistência de arrancamento foi mantida no cálculo de  $P/b_{\text{médio}}$ , uma vez que se encontrava no intervalo de amostragem e a sua inclusão não provocava grandes discrepâncias entre o valor de  $P/b$  obtido para o provete A-c-90-1 e o valor  $P/b_{\text{médio}}$ , conforme constatável pela análise dos resultados presente na Tabela 17.

Na Tabela 17 encontram-se apresentados os resultados do ensaio de arrancamento para esta configuração. Pela análise dos resultados é possível confirmar a tendência verificada no gráfico da Figura 58. O valor médio da resistência de arrancamento  $P/b$  é bastante próximo nos três provetes. O valor médio para resistência de arrancamento da configuração A-c-90 é de 0,341 N/mm, com um coeficiente de variação reduzido de apenas 4,78%.

Tabela 17 - Resultados obtidos após o ensaio dos provetes da configuração A-c-90.

Parâmetro	A-c-90-1	A-c-90-2	A-c-90-3
$P_{\text{médio}}$ (N)	9,13	10,2	8,03
$P_{\text{máximo}}$ (N)	19,1	14,4	11,6
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	4,38	5,63	5,63
$P/b$ (N/mm)	0,344	0,373	0,305
$P/b_{\text{médio}}$ (N/mm)	0,341		
Desvio Padrão	0,016		
Coef. de variação (%)	4,78		

Os modos de rotura na configuração A-c-90 apresentaram um novo fenómeno no estudo, a rotura interlaminar do aderente flexível, conforme indicado anteriormente. Por observação da Figura 59, verifica-se que, nos provetes número 1 e 2, ocorreu o fenómeno de delaminação na segunda camada do empilhamento do aderente flexível (entre as duas camadas com a orientação de 90°). Já no provete número 3 a rotura foi coesiva. O fenómeno de delaminação nos provetes número 1 e 2 indica que a resistência do adesivo e da sua adesão com os aderentes é superior à resistência interlaminar do aderente.



Figura 59 - Modos de rotura da configuração A-c-90.

Na Tabela 18 encontra-se a quantificação dos modos de rotura em cada provete. Observa-se que os fenómenos predominantes foram a rotura coesiva e interlaminar, o que comprova uma boa adesão entre adesivo e aderente em todos os provetes e indica uma boa preparação superficial dos substratos.

Tabela 18 - Quantificação dos modos de rotura da configuração A-c-90.

Configuração	Coesiva (%)	Adesiva (%)	Interlaminar (%)
A-c-90-1	53	-	47
A-c-90-2	-	-	100
A-c-90-3	100	-	-
Média	51	-	49

### 3.1.3.4 Configuração C-c-0

A Figura 60 apresenta as curvas  $P/b-a$  registadas nos ensaios dos provetes da configuração C-c-0. Pela análise do gráfico da Figura 60, constata-se que as curvas dos três provetes apresentam bastantes similaridades na sua tendência e nos valores obtidos para a resistência de arrancamento.

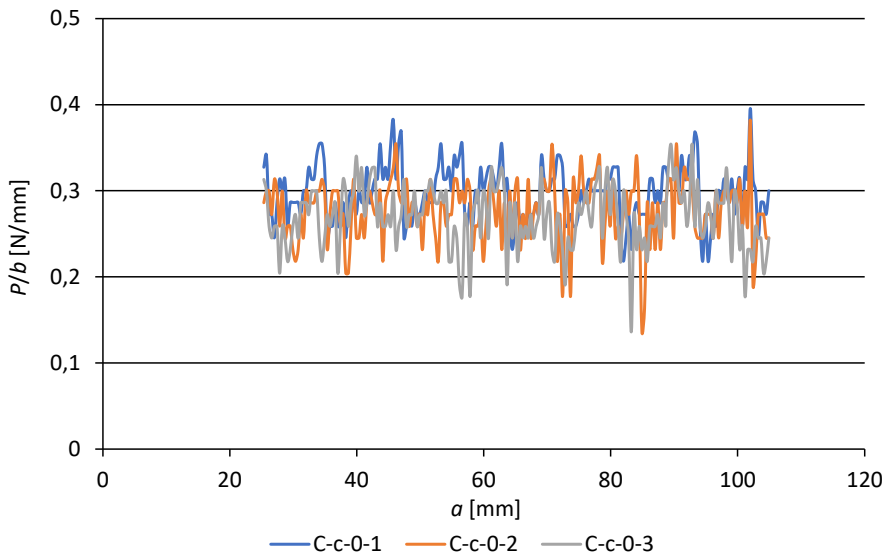


Figura 60 - Curvas  $P/b - a$  obtidas experimentalmente após ensaio da configuração C-c-0.

Os resultados retirados dos ensaios encontram-se apresentados na Tabela 19. É possível verificar que o valor de resistência de arrancamento foi bastante próximo para os três provetes ensaiados, comprovando assim a tendência do gráfico da Figura 60. O valor de  $P/b_{\text{médio}}$  para a configuração C-c-0 foi de 0,281 N/mm, com um coeficiente de variação de apenas 2,47%.

Tabela 19 - Resultados obtidos após o ensaio dos provetes da configuração C-c-0.

Parâmetro	C-c-0-1	C-c-0-2	C-c-0-3
$P_{\text{médio}}$ (N)	6,81	6,36	6,17
$P_{\text{máximo}}$ (N)	9,06	8,75	8,13
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	5,00	3,13	3,13
$P/b$ (N/mm)	0,297	0,277	0,269
$P/b_{\text{médio}}$ (N/mm)	0,281		
Desvio Padrão	0,007		
Coef. de variação (%)	2,47		

Na Figura 61 é possível observar os modos de rotura obtidos para os três provetes ensaiados da configuração C-c-0.



Figura 61 - Modos de rotura da configuração C-c-0.

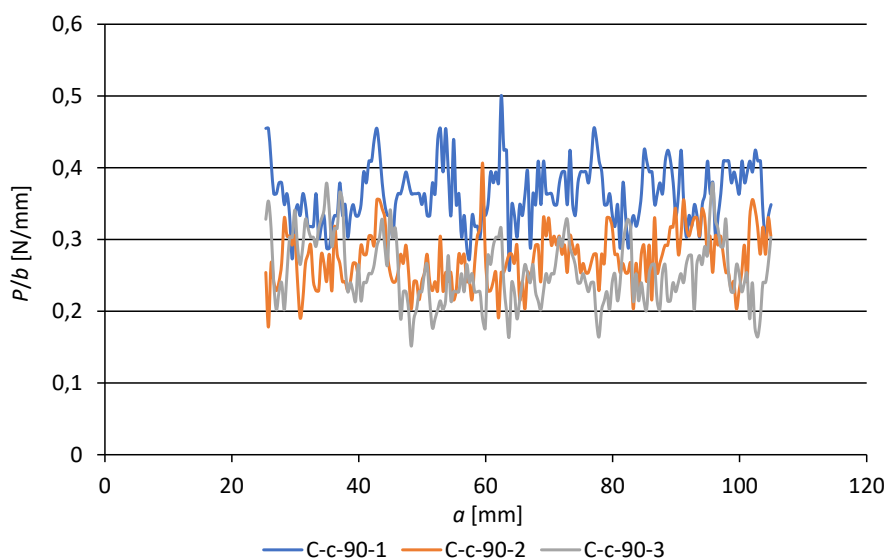
Realizando uma análise cuidada dos provetes, é possível concluir que o modo de rotura predominante foi a rotura coesiva. São residuais as áreas dos aderentes onde não se verifica a presença de adesivo em ambos os aderentes do provete, o que demonstra novamente que a ligação entre o adesivo e os aderentes é superior à resistência interna do próprio adesivo. Este tipo de rotura demonstra também uma boa preparação superficial dos aderentes. Na Tabela 20 apresenta-se a quantificação dos modos de rotura em cada provete. É possível concluir que o modo de rotura predominante foi a rotura coesiva.

Tabela 20 - Quantificação dos modos de rotura da configuração C-c-0.

Configuração	Coesiva (%)	Adesiva (%)	Interlaminar (%)
C-c-0-1	99	1	-
C-c-0-2	99	1	-
C-c-0-3	94	6	-
Média	97	3	-

### 3.1.3.5 Configuração C-c-90

Através da Figura 62 é possível observar as curvas  $P/b - a$  registadas nos ensaios dos provetes da configuração C-c-90. Pela análise do gráfico da Figura 62, constata-se que as curvas dos três provetes apresentam similaridades na sua tendência e nos valores obtidos para a resistência de arrancamento. Apenas a curva do provete número 1 apresenta valores ligeiramente superiores em comparação com os restantes dois provetes.

Figura 62 – Curvas  $P/b - a$  obtidas experimentalmente após ensaio da configuração C-c-90.

Na Tabela 21 encontram-se apresentados os resultados do ensaio de arrancamento para esta configuração. Pela análise dos resultados é possível confirmar a tendência verificada no gráfico da Figura 62. O valor de  $P/b$  é bastante similar nos três provetes, sendo que apenas o valor relativo ao provete número 1 é ligeiramente superior aos restantes. O valor médio para a resistência de arrancamento foi de 0,297 N/mm, com um coeficiente de variação de 9,22%.

Tabela 21 - Resultados obtidos após o ensaio dos provetes da configuração C-c-90.

Parâmetro	C-c-90-1	C-c-90-2	C-c-90-3
$P_{\text{médio}}$ (N)	7,49	6,72	6,31
$P_{\text{máximo}}$ (N)	10,3	10,0	9,38
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	5,31	4,38	3,75
$P/b$ (N/mm)	0,363	0,273	0,255
$P/b_{\text{médio}}$ (N/mm)	0,297		
Desvio Padrão	0,027		
Coef. de variação (%)	9,22		

Os modos de rotura ocorridos no ensaio dos provetes da configuração C-c-90 foram predominantemente roturas interlaminares, como constatável por análise da Figura 63. Este fenómeno indica que a resistência do adesivo, e a sua adesão com os aderentes, é superior à resistência interlaminar do aderente.

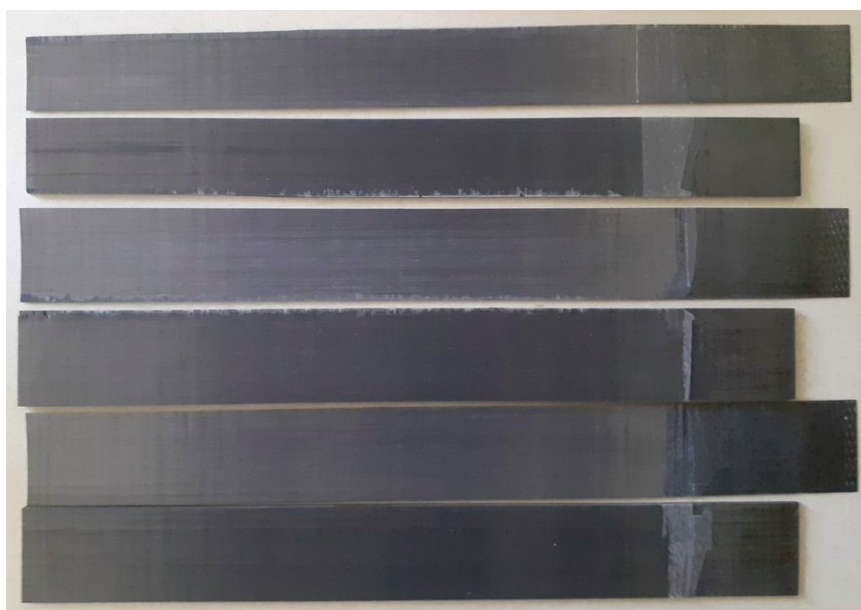


Figura 63 - Modos de rotura da configuração C-c-90.

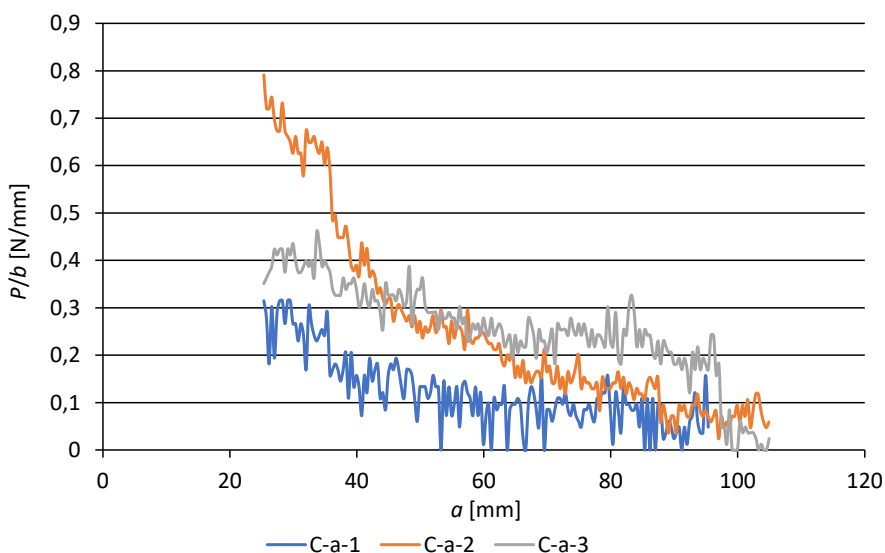
Na Tabela 22 encontra-se representada a quantificação dos modos de rotura em cada provete. Constata-se que o fenómeno predominante foi a rotura interlaminar, como observado anteriormente na Figura 63.

Tabela 22 - Quantificação dos modos de rotura da configuração C-c-90.

Configuração	Coesiva (%)	Adesiva (%)	Interlaminar (%)
C-c-90-1	8	-	92
C-c-90-2	-	-	100
C-c-90-3	4	-	96
Média	4	-	96

### 3.1.3.6 Configuração C-a

Na Figura 64 encontram-se representadas as curvas  $P/b-a$  registadas nos ensaios dos provetes da configuração C-a. Através da análise do gráfico, é possível constatar que a curva do provete número 2 apresenta um pico anormal de resistência de arrancamento entre os 25,4 e os 40 mm, quando comparado com os resultados dos restantes provetes. As curvas dos provetes número 1 e 3 apresentam similaridades na sua tendência, embora o provete número 1 apresente valores ligeiramente inferiores de  $P/b$  ao longo do ensaio. Estas variações podem dever-se ao facto de se ter utilizado um adesivo frágil e podiam ser minimizadas com uma maior amostragem. O provete número 1 apenas apresentou cerca de 96 mm para a propagação da fenda durante o ensaio, o que fez com que o cálculo da resistência de arrancamento tenha sido efetuado no intervalo de 25,4 a 96 mm. Esta diferença na propagação da fenda está relacionada com a rotura catastrófica observada no decorrer do ensaio para este provete.

Figura 64 - Curvas  $P/b - a$  obtidas experimentalmente após ensaio da configuração C-a.

Os resultados do ensaio para esta configuração encontram-se reportados na Tabela 23. É possível observar que o valor médio de resistência de arrancamento para a configuração A-a foi de 0,211 N/mm, com um coeficiente de variação de 16,9%. A

obtenção de um coeficiente de variação mais elevado nesta configuração, pode estar relacionada com a rotura catastrófica obtida no provete número 1. Para os valores a 0 reportados para  $P_{\text{mínimo}}$ , foram na realidade obtidos valores negativos, provavelmente devido a se ter assumido um valor de carga nula no início do ensaio podendo, contudo, já existir uma ligeira pré-carga.

Tabela 23 - Resultados obtidos após o ensaio dos provetes da configuração C-a.

Parâmetro	C-a-1	C-a-2	C-a-3
$P_{\text{médio}}$ (N)	3,18	6,73	6,58
$P_{\text{máximo}}$ (N)	8,13	20,9	11,9
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	0	0,625	0
$P/b$ (N/mm)	0,123	0,254	0,255
$P/b_{\text{médio}}$ (N/mm)	0,210		
Desvio Padrão	0,036		
Coef. de variação (%)	16,9		

Na Figura 65 é possível observar os modos de rotura para os três provetes ensaiados na configuração A-a.

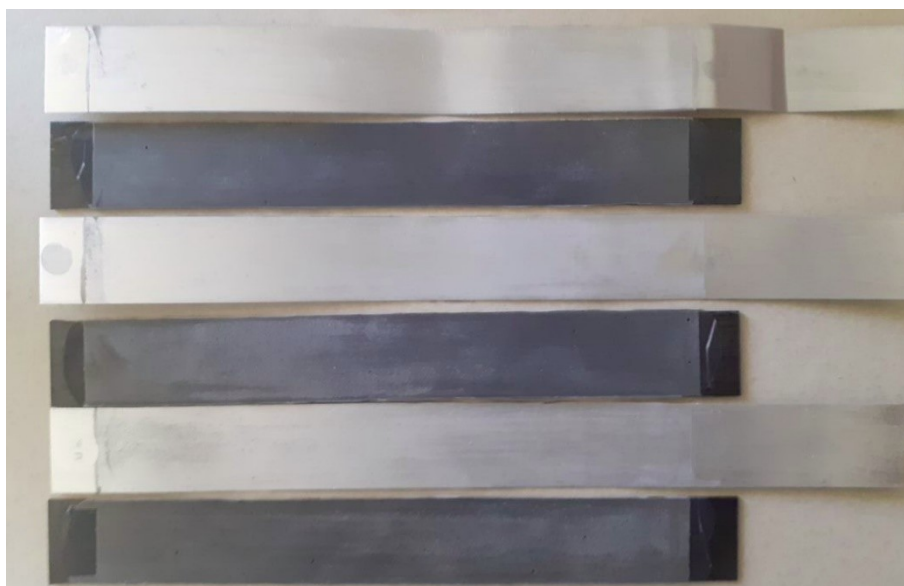


Figura 65 - Modos de rotura da configuração C-a.

Através da observação cuidada dos provetes, é possível concluir que o modo de rotura predominante foi a rotura coesiva. Embora em algumas regiões a rotura tenha ocorrido muito próxima da interface entre o adesivo e o substrato, a rotura coesiva foi confirmada com recurso a um microscópico ótico. O modo de rotura obtido demonstra

que a ligação entre o adesivo e os aderentes é superior à resistência interna do próprio adesivo. Na Tabela 24 encontra-se a quantificação dos modos de rotura em cada provete.

Tabela 24 - Quantificação dos modos de rotura da configuração C-a.

Configuração	Coesiva (%)	Adesiva (%)	Interlaminar (%)
C-a-1	100	-	-
C-a-2	100	-	-
C-a-3	100	-	-
Média	100	-	-

### 3.1.4 Análise de Resultados

Na Figura 66 encontram-se apresentados os valores médios de  $P/b$  e os respetivos desvios padrão para as seis configurações testadas. Pela análise da figura, é possível constatar que o valor de  $P/b$  mínimo obtido foi de 0,178 N/mm e ocorreu na configuração A-c-0., enquanto que o valor máximo obtido foi de 0,375 N/mm e ocorreu na configuração A-a.

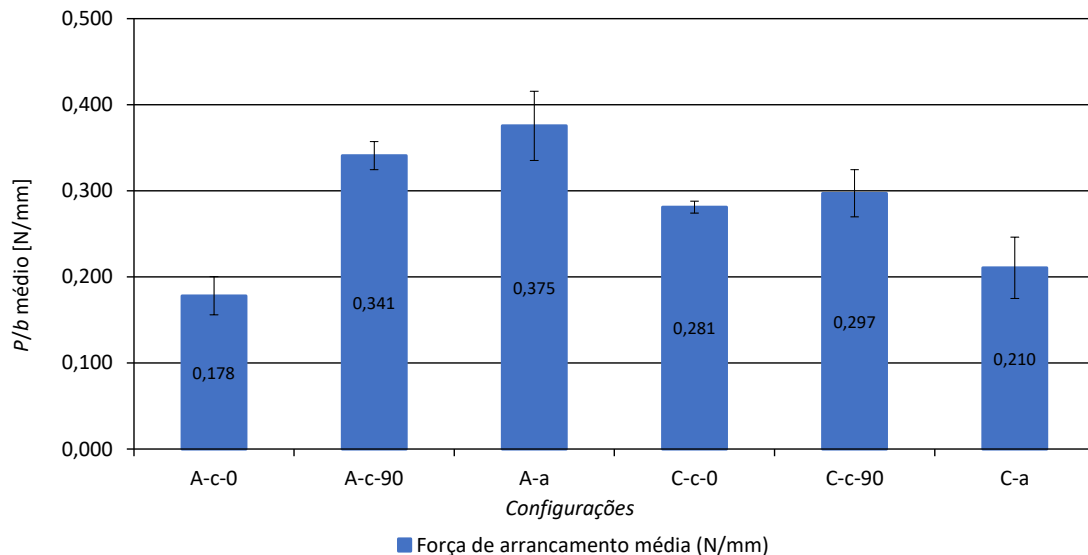


Figura 66 - Comparação gráfica dos valores de  $P/b_{médio}$  e desvios padrões obtidos nas seis configurações testadas.

Ainda pela análise da Figura 66 é constatável uma similaridade no valor de  $P/b$  obtido para as configurações C-c-0 e C-c-90, onde se obteve uma resistência de arrancamento média de 0,281 N/mm e 0,297 N/mm, respetivamente. Tal como indicado na Tabela 25, o valor dos coeficientes de variação também foram bastante reduzidos, cerca de 2% para a configuração C-c-0 e 5% para a configuração C-c-90. A existência de um coeficiente de variação superior na configuração C-c-90 pode estar relacionado com a

ocorrência de rotura interlaminar em dois dos provetes desta configuração. Esta poderá também ser a explicação para a obtenção de um valor de  $P/b$  superior nos provetes com o aderente flexível em PRFC com a direção das fibras a 90° da direção longitudinal do provete, quando em comparação com os provetes que possuem o aderente flexível em PRFC com as fibras a 0° da direção longitudinal do provete. Nestes casos a presença do modo de rotura interlaminar impede que o resultado de  $P/b$  se foque exclusivamente na caracterização da resistência de arrancamento do adesivo, desviando os resultados para uma análise da resistência do compósito [77]. As configurações heterogêneas apresentaram uma maior diversidade de resultados, sendo observável que a configuração A-c-0 apresentou um valor inferior de resistência de arrancamento quando em comparação com a configuração A-c-90, obtendo-se um valor de  $P/b$  igual a 0,341 N/mm e 0,178 N/mm, respetivamente. A configuração C-a apresentou um valor de  $P/b$  de 0,210 N/mm. Esta diversidade de resultados pode indicar uma melhor prestação do *floating roller peel test* em provetes homogêneos. No entanto, as diferenças no valor de  $P/b$  entre as diferentes configurações não podem ser indicativas de uma melhor ou pior adesão. Apenas se deve comparar estes valores entre provetes com os mesmos aderentes, em particular o mesmo tipo de aderente flexível. Para uma comparação da qualidade da adesão, devem ser analisados os modos de rotura obtidos para cada configuração [77], análise que será efetuada posteriormente.

Comparando os valores obtidos com valores encontrados na literatura da área, é possível constatar que o adesivo selecionado apresenta uma resistência inferior ao arrancamento, em particular na adesão dos substratos de alumínio. O estudo [77] realizado com os adesivos FM 73 e EA9695 para as mesmas configurações, o valor obtido para resistência de arrancamento numa configuração A-a foi de 11 N/mm com o adesivo FM 73 e de 2,08 N/mm com o adesivo EA 9695. Já para uma configuração C-c as diferenças já não são tão notáveis: com o adesivo FM-73 obteve-se um valor de 0,8 N/mm e com o adesivo EA 9695 um valor de 0,56 N/mm. Na presente dissertação nas configurações C-c-0 e C-c-90, os valores obtidos foram 0,281 N/mm e 0,297 N/mm, respetivamente. As diferenças são ainda menos significativas nas configurações alumínio-PRFC, onde foi possível obter um valor de resistência de arrancamento de 0,341 N/mm na configuração A-c-90 e, para os adesivos FM 73 e EA 9695, de 0,68 N/mm e de 0,56 N/mm, respetivamente. Esta diferença nos resultados pode estar relacionada com o facto de o adesivo Araldite® AV138 ser considerado um adesivo frágil. Já noutro estudo [80], em que foram comparadas as resistências ao arrancamento de vários adesivos em provetes com aderentes em carbono e alumínio, os valores de resistência de arrancamento obtidos para os provetes em alumínio foram da mesma grandeza do estudo abordado anteriormente, e por isso superiores aos obtidos para o adesivo Araldite® AV138. No entanto, no caso dos provetes com os aderentes em PRFC e para a utilização de diferentes adesivos (entre eles EA 9696, EA 9686, AF163-2, AF191, AF3109-2 e Sup10HT), os valores obtidos foram na ordem dos 0,28 a 0,40 N/mm, o que vai de encontro aos valores obtidos nas configurações C-c-90 e C-c-0.

Quanto aos coeficientes de variação (Tabela 25), o valor mais alto foi de 16,9% e ocorreu na configuração C-a, enquanto o menor valor foi de 2,5% e ocorreu na configuração C-

c-0. Como todos os valores de coeficiente de variação foram abaixo de 25%, é possível afirmar que os conjuntos de dados foram relativamente homogêneos e que os provetes ensaiados em cada configuração apresentavam propriedades bastante semelhantes [87].

Tabela 25 - Comparação dos valores de  $P/b_{\text{médio}}$  e desvios padrões obtidos nas seis configurações testadas.

	$P/b_{\text{médio}}$ (N/mm)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
A-c-0	0,178	0,022	12,5
A-c-90	0,341	0,016	4,8
A-a	0,375	0,040	10,7
C-c-0	0,281	0,007	2,5
C-c-90	0,297	0,027	9,2
C-a	0,210	0,036	16,9

Na Tabela 26 é efetuada uma compilação da quantificação dos modos de rotura verificados em cada provete, sendo que os valores apresentados são os valores médios apresentados nos resultados de cada configuração.

Tabela 26 – Comparação dos modos de rotura obtidos nas seis configurações testadas.

	Coesiva (%)	Adesiva	Interlaminar (%)
A-c-0	99	1	-
A-c-90	51	-	49
A-a	70	30	-
C-c-0	97	3	-
C-c-90	4	-	96
C-a	100	-	-

Através da análise da tabela verifica-se que, de uma forma geral, a adesão entre o adesivo e os aderentes apresentava uma boa qualidade e resistência, dado que a ocorrência de rotura adesiva foi escassa. Foi também possível observar que, nas configurações C-c-90 e A-c-90, esteve sempre presente o modo de rotura interlaminar, indicando que a resistência interna da junta é superior à resistência interlaminar dos aderentes em PRFC que foram cortados com a direção da fibra a 90° da direção

longitudinal do provete. Para as restantes configurações foi sempre obtida rotura coesiva, o que constitui o resultado desejado e indica uma boa preparação superficial das superfícies e que a resistência da ligação entre o adesivo e o aderente é superior à resistência interna do adesivo. Os modos de rotura obtidos indicam uma boa qualidade de adesão em todas as configurações, sendo este o modo preferencial para comparação da qualidade da adesão observa-se que o adesivo Araldite® AV138 apresenta uma boa prestação nas diferentes configurações e que o *floating roller peel test* pode ser utilizado para avaliar as propriedades de adesão em juntas com substratos de material compósito.

## 3.2 Trabalho numérico

A simulação numérica computacional é uma ferramenta bastante utilizada na conceção de projetos de engenharia. O desenvolvimento das técnicas de simulação permite que os valores obtidos nos resultados numéricos sejam cada vez mais concretos e fiáveis. Estas simulações numéricas em *software* permitem compreender, de forma detalhada, o comportamento de juntas adesivas quando sujeitas a várias solicitações, tornando-as assim, numa das principais técnicas para conhecer e estudar o comportamento de juntas adesivas, juntamente com as atividades experimentais executadas em laboratório.

Neste subcapítulo pretende-se efetuar a previsão da resistência nas juntas adesivas estudadas e, posteriormente, comparar os resultados obtidos com os resultados experimentais do subcapítulo 3.1. Para este efeito começa-se por apresentar as condições da análise numérica e é descrito o MDC triangular utilizado. Em termos de resultados, são apresentadas as forças de arrancamento obtidas numericamente para as diferentes configurações.

### 3.2.1 Condições da análise numérica

A análise numérica foi realizada com recurso ao *software* ABAQUS®. Este *software* tem por base o MEF e a sua escolha deve-se à possibilidade de utilização do seu módulo integrado de MDC que permite prever a resistência ao arrancamento das juntas adesivas ensaiadas.

Para a realização dos ensaios no *software* ABAQUS®, é necessário executar várias etapas, começando pelo desenho das juntas. O processo seguido para criar um modelo que permita simular o *floating roller peel test* é descrito de seguida.

No módulo *Part* do *software* foi desenhada a junta adesiva na posição verificada no *floating roller peel test*. Conforme representado na Figura 67, na configuração foram apenas incluídos os dois roletes inferiores do acessório de fixação, uma vez que estes são os únicos que interagem com o provete durante o decorrer do ensaio. Durante a realização das simulações numéricas foi verificado que a elevada área de contacto entre o provete e os roletes impossibilitava o correto desenvolvimento do ensaio durante a simulação devido a problemas associados ao deslizamento excessivo entre

componentes. Foram realizados vários testes alterando os parâmetros do ensaio, nomeadamente a interação entre os roletes e o provete, a natureza dos roletes que inicialmente foram considerados como corpos rígidos indeformáveis, entre outros. No entanto, não era possível concluir uma simulação apropriadamente. Por vezes ocorriam fenómenos anormais ao ensaio, como deslocamentos impossíveis de terem lugar na prática ou então, o tamanho do incremento durante a simulação era de tal forma baixo que não seria possível concluir o ensaio. Desta forma, para possibilitar a obtenção de resultados numéricos, optou-se pela remoção dos roletes nas simulações.

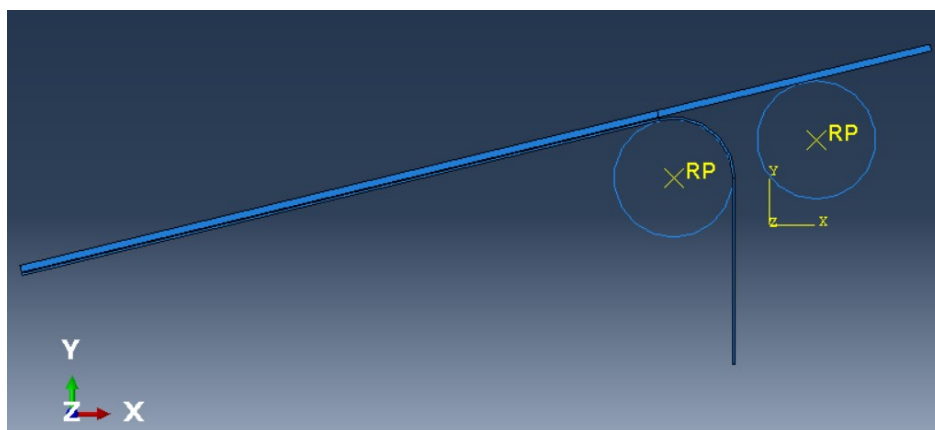


Figura 67 – Configuração desenhada no *software* ABAQUS® para simular o *floating roller peel test*.

Para a geometria das juntas foram consideradas as mesmas dimensões que no subcapítulo 3.1.2.1. Como a largura das juntas era constante (25 mm), foram utilizados modelos bidimensionais (2D). A geometria dos aderentes foi dividida em partições de forma a facilitar a construção da malha de elementos finitos (Figura 68). Pretendia-se a construção de uma malha mais refinada na zona dos elementos em contacto com a junta adesiva e menos refinada nas restantes zonas dos aderentes, de forma a não tornar as análises demasiado demoradas.

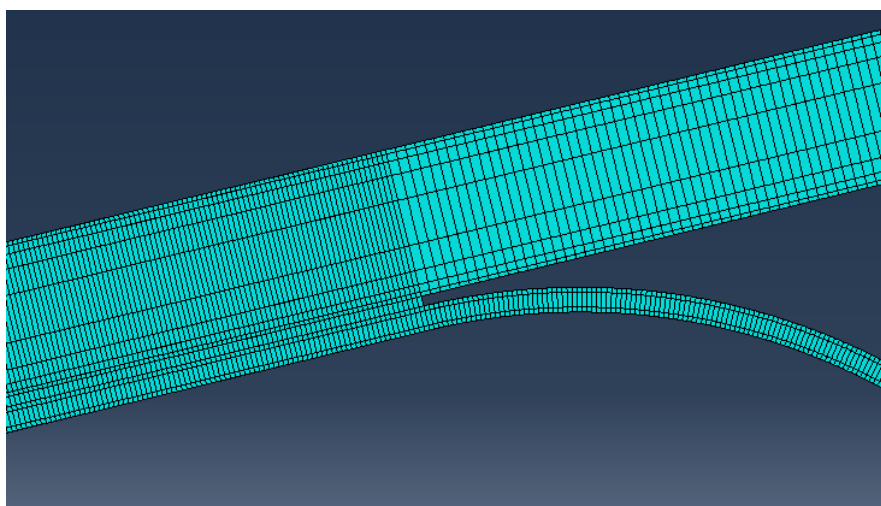


Figura 68 – Partições criadas para a construção da malha.

No módulo *Property* foram atribuídos os materiais às diferentes secções do provete, aderente e adesivo. Tanto os aderentes de alumínio como de PRFC foram considerados

como sólidos homogêneos. As propriedades mecânicas dos materiais utilizados nos aderentes encontram-se na Tabela 27. Para os aderentes em PRFC, durante as análises realizadas foi apenas considerado o comportamento elástico do material uma vez que, o PRFC possui um comportamento frágil até à rotura. Foi também considerada uma aproximação isotrópica para o comportamento do PRFC, através de valores equivalentes para  $E$  e  $\nu$ , em vez de considerado o seu comportamento ortotrópico devido à inexistência das propriedades ortotrópicas do compósito. Na tabela,  $0^\circ$  e  $90^\circ$  indicam a direção das fibras relativamente à direção longitudinal do provete. Como mencionado anteriormente, foram utilizados aderentes de PRFC com duas direções distintas. Neste módulo também foi necessário executar a introdução das propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138, tal como as propriedades do dano, sua evolução, e as propriedades elásticas, cujos parâmetros são discutidos posteriormente no subcapítulo 3.2.2.2. A camada de adesivo, modelada com propriedades coesivas, foi considerada como uma secção do tipo coesiva. Para os aderentes em alumínio e PRFC, foi considerada uma secção sólida homogênea.

Tabela 27 – Propriedades dos aderentes inseridas no software ABAQUS®[83, 88, 89].

Aderente	$E$ [GPa]	$\nu$	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]
Al6082-T651	70	0,30	261,67	324
PRFC ( $0^\circ$ )	141	0,22	-	-
PRFC ( $90^\circ$ )	10	0,081	-	-

As condições fronteira e deslocamento aplicados ao provete estão representados na Figura 69. Dada a remoção dos roletes do acessório de fixação nas simulações, procedeu-se à restrição de deslocamento na direção  $Y$  da superfície superior do aderente rígido, de forma a conseguir simular o arrancamento do *floating roller peel test*. O deslocamento aplicado no aderente flexível foi de 130 mm no sentido descendente, de forma a possibilitar o arranque completo do aderente.

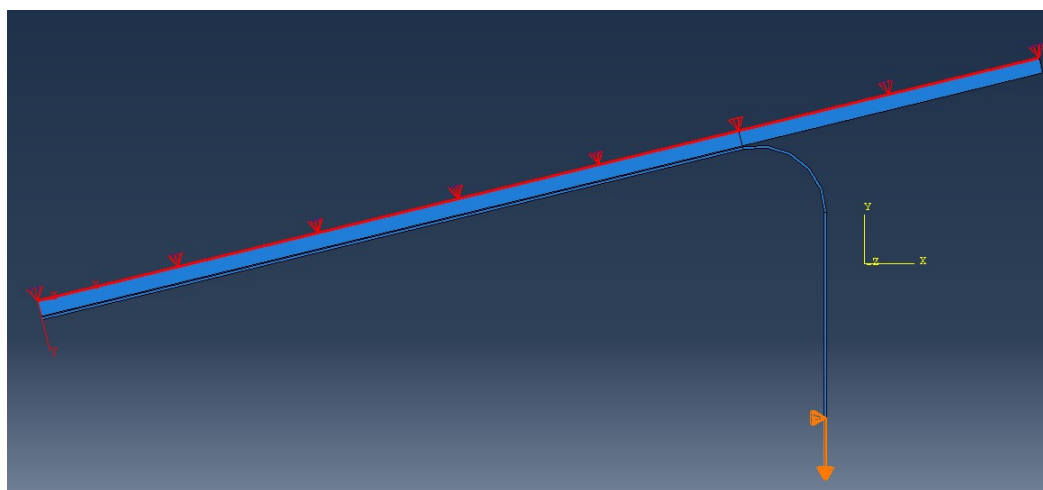


Figura 69 – Condições fronteira e deslocamento aplicados ao provete.

As malhas da simulação foram construídas no módulo *Mesh* através da definição individual do espaçamento dos nós em cada aresta do modelo, com maior refinamento nas zonas mais críticas, ou seja, nas faces dos aderentes mais próximas da camada adesiva e também nas faces opostas, na zona de contacto do aderente flexível com o rolete e nas extremidades de  $L_0$ . Nos modelos utilizou-se gradação do tamanho dos elementos através da função *bias* do *software*. A gradação simples significa que existe um aumento do refinamento em apenas um sentido. A gradação dupla é utilizada quando é exigido um maior refinamento em ambas as extremidades de uma aresta. Este tipo de gradação foi aplicado nos aderentes no sentido da espessura, conforme representado na Figura 70, de forma a refinar a malha nas proximidades da camada adesiva e das condições fronteira.

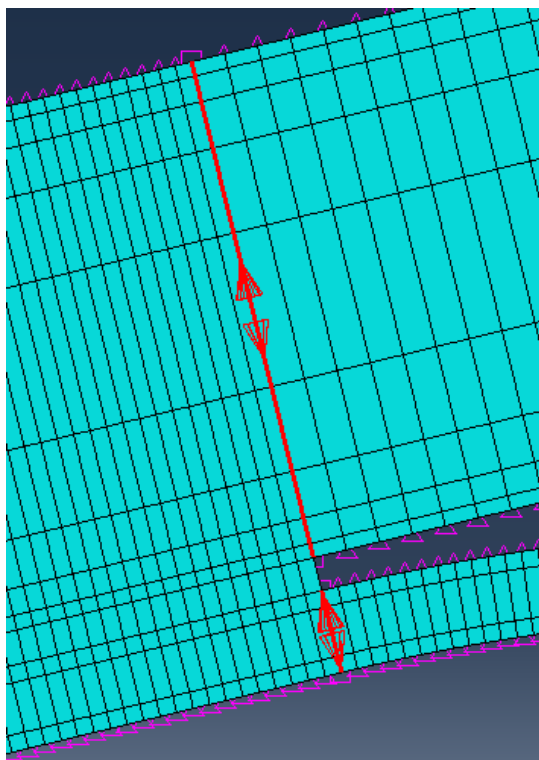


Figura 70 – Sentido de *bias* da malha na zona de sobreposição.

O tamanho dos elementos finitos para as arestas das zonas anteriormente consideradas críticas e ao longo de  $L_0$  foi de  $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$ . Para as restantes arestas do aderente rígido e flexível que não possuíam contacto com a camada adesiva e no caso das arestas do aderente flexível que não estariam em contacto com o rolete, o tamanho dos elementos finitos foi de  $0,2 \times 0,1 \text{ mm}^2$ . O comportamento da camada adesiva foi modelado por uma camada de elementos coesivos, considerando um modelo de dano coesivo triangular. Na Figura 71 é possível observar em pormenor as diferentes secções da malha.

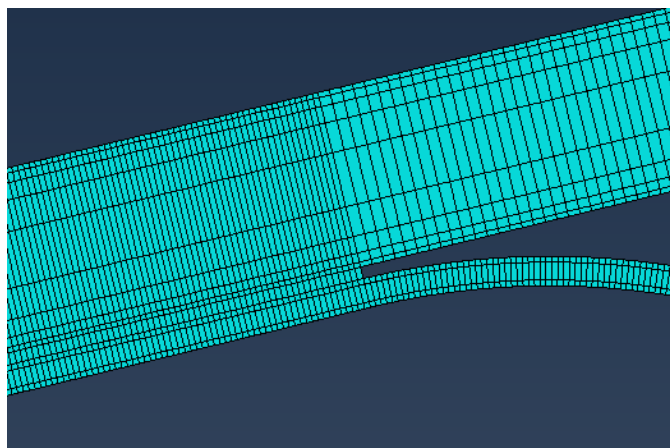


Figura 71 – Pormenor da malha na extremidade de  $L_0$ .

As variações do número de elementos e do efeito *bias* têm como objetivo diminuir o esforço computacional, permitindo uma redução do tempo na obtenção dos resultados, sem comprometer a precisão dos resultados nas zonas com grandes variações de tensão.

Outro aspeto importante na construção do modelo numérico é a definição da incrementação. É necessário definir um tamanho de incremento mínimo suficientemente reduzido para que o *software* não tenha problemas de convergência na zona de propagação do dano. Por outro lado, o limite superior de incrementos que a análise pode conter deve ser suficientemente elevado para que a análise não termine devido a exceder o número de incrementos permitido. Os valores utilizados para a definição da incrementação encontram-se apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Definições de incrementação no *software* ABAQUS®.

Número máximo de incrementos	10 000
Tamanho inicial do incremento	0,01
Tamanho mínimo do incremento	$10^{-20}$
Tamanho máximo do incremento	0,01

### 3.2.2 Modelo de dano coesivo

Como referido no subcapítulo 2.2.3, os MDC baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos que ligam nós homólogos dos elementos coesivos, de forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima e subsequente degradação das propriedades dos materiais até à rotura [27].

#### 3.2.2.1 Modelo de dano triangular

Em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais

precisos [90]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [91], linear parabólico [92], exponencial [93], polinomial [94] e trapezoidal [41]. Pela sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada [95]. O modelo triangular 2D está representado na Figura 72, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

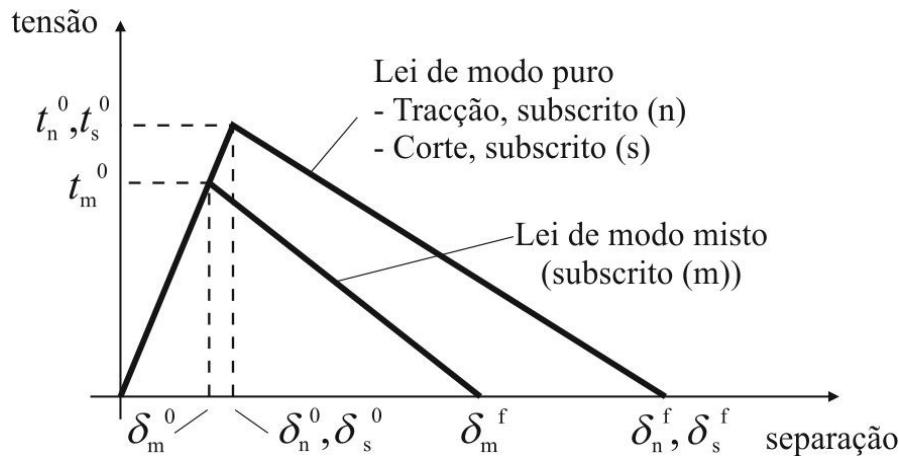


Figura 72 – Lei triangular do modelo de dano coesivo.

Nesta lei, distinguem-se dois modos. O modo puro caracteriza-se por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar a tração e corte [96]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente de deformação de tração e outra de corte que são determinadas recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas, entre aderentes rígidos, as tensões existentes na membrana são desprezadas. Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz  $K_{COH}$ , a qual relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida de acordo com a Equação (3.1)

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.1)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja uma formulação local, esta é usada para simular fraturas de espessura nula, em que os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [97]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que (Equação (3.2)):

$$\mathbf{K}_m = E, \mathbf{K}_{ss} = G, \mathbf{K}_{ns} = \mathbf{0}, \quad (3.2)$$

onde  $E$  corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e  $G$  ao módulo de elasticidade transversal. Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [96]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério de tensão nominal quadrática, expresso pela Equação (3.3):

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_m^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (3.3)$$

$\langle \rangle$  são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [98]. Quando a resistência coesiva em modo misto ( $t_m^0$ ) é atingida (Figura 72), pela igualdade da Equação (3.3), a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos (definida por  $\delta_m^f$  na Figura 72) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ :

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (3.4)$$

### 3.2.2.2 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tração e corte é necessário conhecer  $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ . No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios de tração [99, 100]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias e propagação de fenda tipicamente em modo misto levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [101-103]. Assim sendo, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

Para a determinação das leis coesivas do adesivo Araldite® AV138 foi utilizado um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [86]. Foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios de tração e de corte, respetivamente, para a definição de  $t_n^0$  e  $t_s^0$ . Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram então utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a JSS com  $L=20$  mm), e as leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais, até obter valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  que reproduzam os resultados experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de  $E$  e  $G$  foram também determinados experimentalmente com ensaios de tração e ensaios de corte (TAST). No trabalho

referido [86] conclui-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades do adesivo. A Tabela 29 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138 numa lei coesiva em modo misto [82].

Tabela 29 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com  $t_A$  de 0,2 mm.

$E$ [MPa]	$G$ [MPa]	$t_n^0$ [MPa]	$t_s^0$ [MPa]	$G_{IC}$ [MPa]	$G_{IIC}$ [N/mm]
4890	1560	39,45	30,2	0,2	0,38

### 3.2.3 Análise das forças de arrancamento

Neste subcapítulo são apresentados os resultados numéricos obtidos para as diferentes configurações. Como mencionado no subcapítulo 3.2.1, foi construída no *software* ABAQUS® uma aproximação ao ensaio *floating roller peel test* e, recorrendo a uma análise por MDC, foi possível obter as curvas  $P/b-a$  e valores de força de arrancamento para as diferentes configurações.

Os dados reportados no final das simulações numéricas, assim como o intervalo de análise, foram apresentados e determinados conforme o indicado pela norma ASTM D3167 [78], ou seja, da mesma forma ao exposto no subcapítulo 3.1.3. Foram reportados os dados de  $P_{média}$ ,  $P_{máxima}$ ,  $P_{mínima}$  e  $P/b$ , e o intervalo de análise definiu-se novamente entre os 25,4 e 105 mm de propagação da fenda. O modo de rotura não foi reportado durante o trabalho numérico, uma vez que as simulações decorreram sempre com rotura coesiva.

O valor de  $P/b$  foi calculado efetuando a média dos valores de força de arrancamento por unidade de largura em cada instante do intervalo de medição. De seguida são apresentadas as representações gráficas destes valores.

#### 3.2.3.1 Configuração A-a

A Figura 73 apresenta a curva  $P/b-a$  registada na simulação numérica da configuração A-a. Através da análise do gráfico da Figura 73, verifica-se que a curva do ensaio se apresenta estável durante o intervalo de análise e encontra-se entre os valores de 1,4 e 1,5 N/mm. Também é possível afirmar que o resultado gráfico obtido vai de encontro ao esperado uma vez que, para o gráfico dos resultados numéricos, era esperado observar um pico inicial de resistência de arrancamento, que de seguida baixaria para um valor que se mostraria estável no decorrer da restante simulação. O pico inicial é excluído da análise através da eliminação dos primeiros 25 mm de propagação da fenda. No entanto, no gráfico é possível observar a parte estabilizada da resistência de arrancamento.

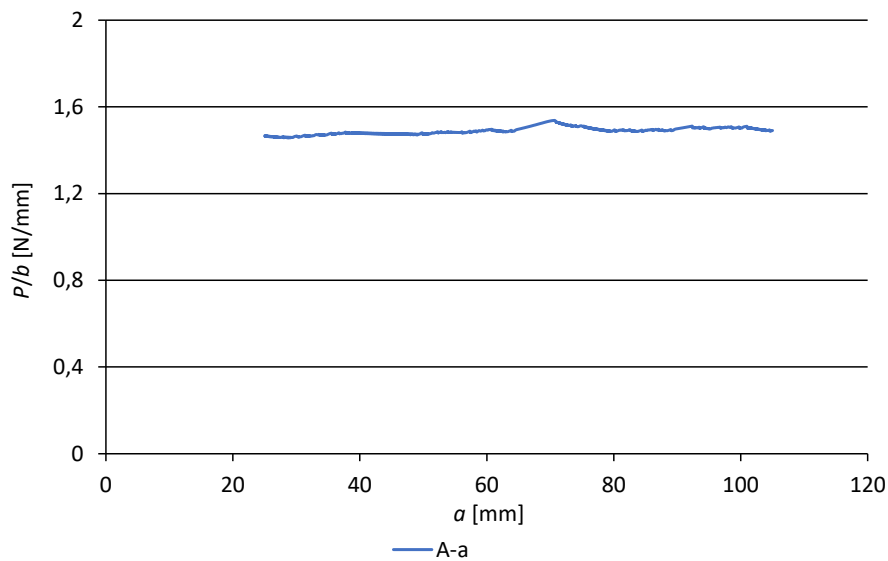


Figura 73 - Curva  $P/b - a$  numérica após simulação da configuração A-a.

Os resultados da simulação numérica para a configuração A-a encontram-se reportados na Tabela 30. É possível observar que o valor médio de resistência de arrancamento para a configuração A-a foi de 1,49 N/mm, tal como é perceptível pela análise do gráfico da Figura 73.

Tabela 30 - Resultados numéricos após simulação da configuração A-a.

Parâmetro	A-a resultado numérico
$P_{médio}$ (N)	37,2
$P_{máximo}$ (N)	38,4
$P_{mínimo}$ (N)	36,4
$P/b$ (N/mm)	1,49

Na Figura 74 é possível observar a propagação da fenda que teve lugar durante a simulação, assim como o estado de deformação dos aderentes no final do ensaio. Como se pode observar, apenas o aderente flexível sofreu deformação plástica no decorrer da simulação, o que era esperado, uma vez que o aderente rígido se encontra fixo e o deslocamento é apenas aplicado no aderente flexível. Na Figura 74 é também possível observar a variável de dano *stiffness degradation* (SDEG), esta variável permite verificar a degradação do adesivo desde o início da aplicação da carga até à rotura completa, dada em função de  $L_0$ . Varia entre SDEG=0 (material não danificado) até SDEG=1 (rotura completa).

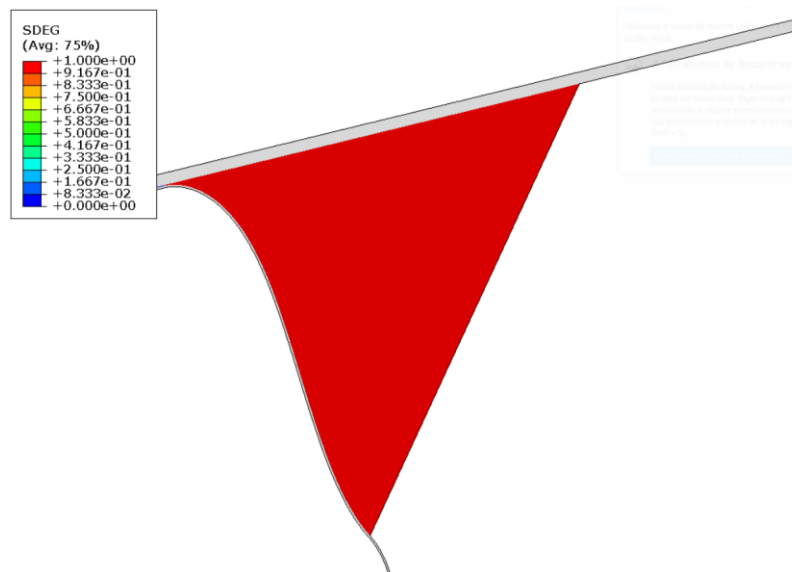


Figura 74 – Propagação da fenda na simulação numérica da configuração A-a.

### 3.2.3.2 Configuração A-c-0

Na Figura 75 encontra-se representada a curva  $P/b$ - $a$  registada durante a simulação numérica da configuração A-c-0. Pela análise do gráfico da Figura 75 verifica-se que, após o pico inicial do valor de  $P/b$ , a estabilização deste valor ocorreu de forma progressiva entre os 25 mm e aproximadamente os 85 mm de propagação da fenda. No final do decréscimo de  $P/b$  é possível observar que o valor de  $P/b$  tende aproximadamente para 0,4 N/mm, tendo-se estabilizado em torno deste valor a partir dos 85 mm de propagação da fenda.

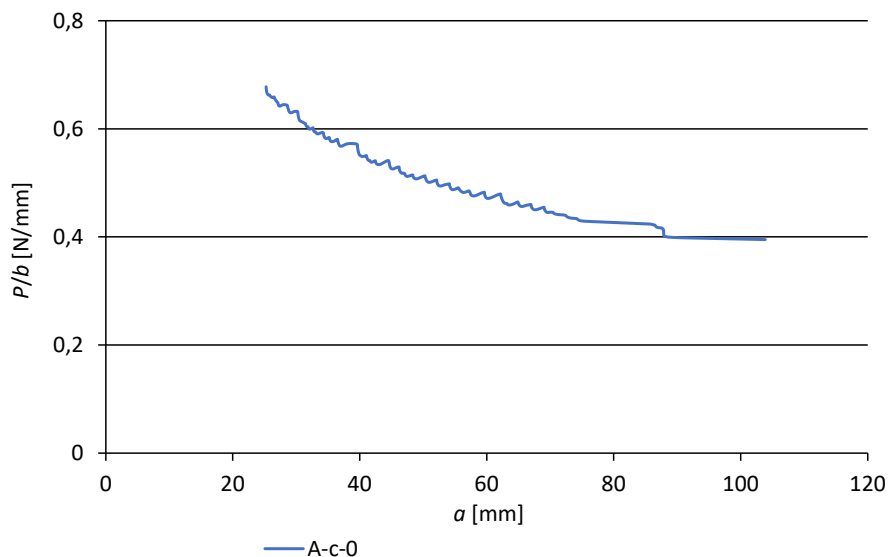


Figura 75 - Curva  $P/b$  -  $a$  numérica após simulação da configuração A-c-0.

Ao contrário do que ocorreu na simulação numérica da configuração A-a ou até mesmo nos resultados experimentais, a parte decrescente do pico inicial de força típica destes ensaios ocupou parte dos valores do intervalo de análise, sendo que o valor de resistência de arrancamento também demorou mais a estabilizar em comparação com

os resultados das restantes simulações. Este fenómeno foi também verificado na configuração C-c-0 e ocorreu também embora em menor escala nas configurações A-c-90 e C-c-90, pelo que poderá estar relacionado com a utilização do aderente flexível de PRFC por não plastificar como o alumínio.

A Tabela 31 apresenta os resultados numéricos para a configuração A-c-0. Pela análise dos resultados reportados na tabela é possível comprovar a tendência verificada no gráfico da Figura 75. O valor médio de resistência de arrancamento para esta configuração foi de 0,509 N/mm.

Tabela 31 - Resultados numéricos após simulação da configuração A-c-0.

Parâmetro	A-c-0 resultado numérico
$P_{médio}$ (N)	55,2
$P_{máximo}$ (N)	104
$P_{mínimo}$ (N)	25,3
$P/b$ (N/mm)	0,509

Na Figura 76 é possível observar a propagação da fenda que teve lugar durante a simulação, assim como o estado de deformação do aderente flexível no final do ensaio.

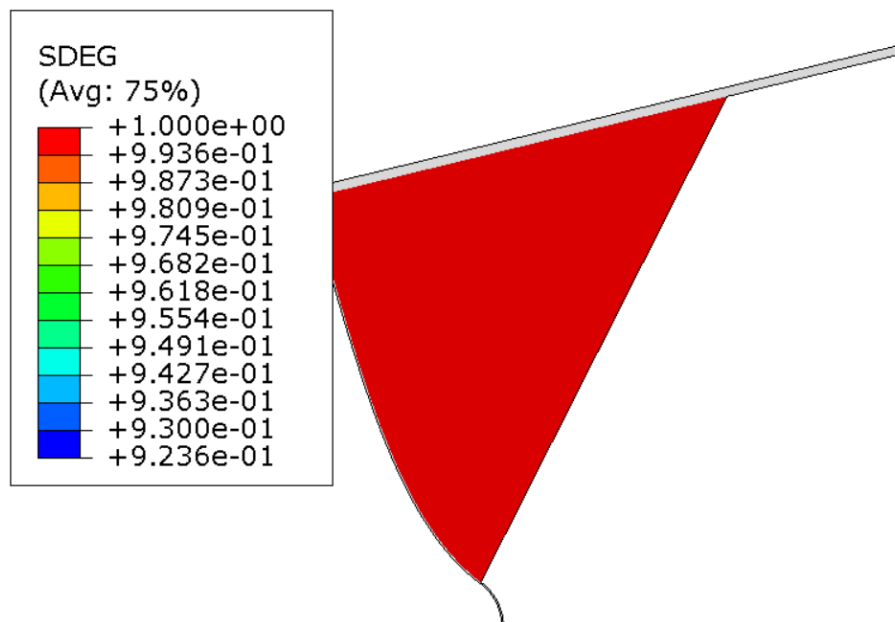


Figura 76 - Propagação da fenda na simulação numérica da configuração A-c-0.

### 3.2.3.3 Configuração A-c-90

Na Figura 77 é possível observar a curva  $P/b-a$  registada na simulação da configuração A-c-90. Através da análise do gráfico da Figura 77, constata-se que a curva começa a estabilizar por volta dos 50 mm de propagação da fenda e mantém-se em torno dos

0,37 N/mm. Verifica-se também que parte da curva descendente do pico de resistência de arrancamento também se encontra dentro do intervalo de análise.

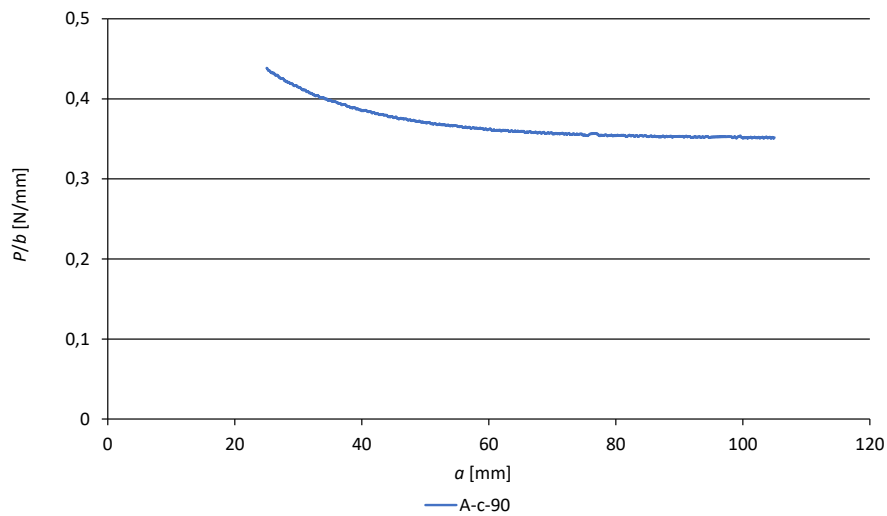


Figura 77 - Curva  $P/b - a$  numérica após simulação da configuração A-c-90.

Na Tabela 32 encontram-se apresentados os resultados do ensaio de arrancamento para esta configuração. Pela análise dos resultados é possível confirmar a tendência verificada no gráfico da Figura 77. O valor médio para resistência de arrancamento da configuração A-c-90 foi de 0,369 N/mm.

Tabela 32 - Resultados numéricos após simulação da configuração A-c-90.

Parâmetro	A-c-90 resultado numérico
$P_{médio}$ (N)	9,23
$P_{máximo}$ (N)	11,0
$P_{mínimo}$ (N)	8,76
$P/b$ (N/mm)	0,369

Na Figura 78 é possível observar a propagação da fenda que teve lugar durante a simulação, assim como o estado de deformação do aderente flexível no final do ensaio.

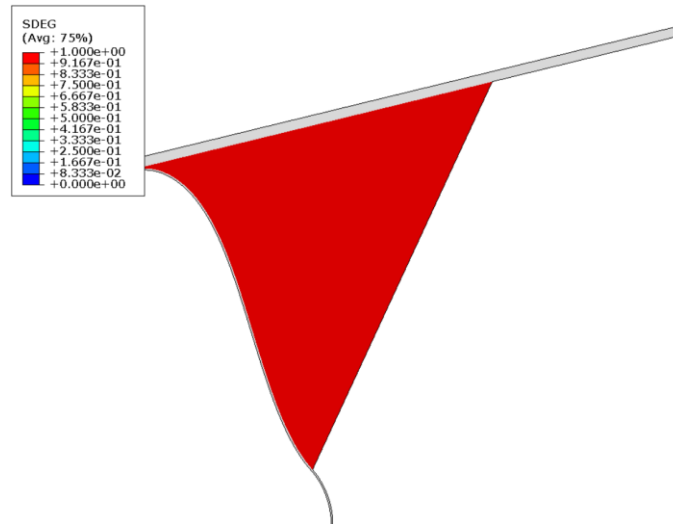


Figura 78 - Propagação da rotura na simulação numérica da configuração A-c-90.

### 3.2.3.4 Configuração C-c-0

A Figura 79 apresenta a curva  $P/b-a$  registada na simulação da configuração C-c-0. Pela análise do gráfico da Figura 79, constata-se o mesmo fenómeno ocorrido no resultado numérico da configuração A-c-0, já que a parte decrescente do pico inicial de força ficou incluída no intervalo de análise, sendo que o valor de resistência de arrancamento também estabilizou de forma progressiva entre os 25 mm e aproximadamente os 85 mm de propagação da fenda. No final do decréscimo é possível observar que o valor de  $P/b$  tende aproximadamente para 0,4 N/mm, tendo-se estabilizado em torno deste valor a partir dos 85 mm de propagação da fenda.

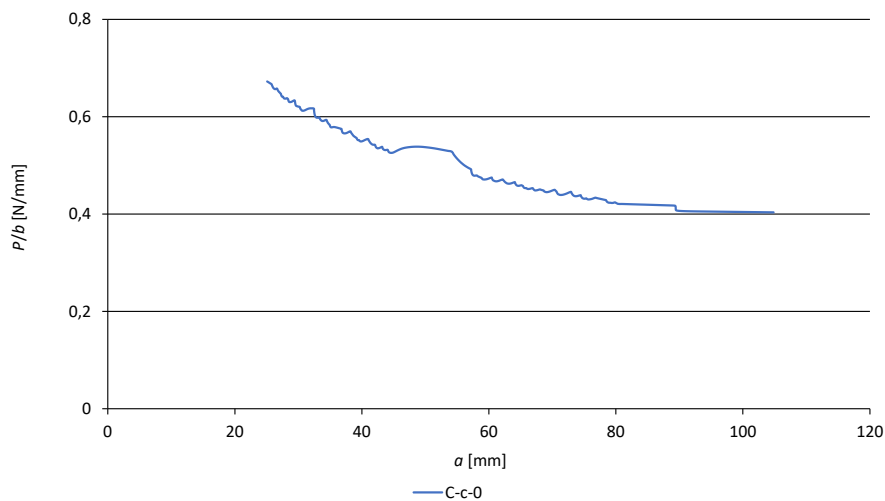


Figura 79 - Curva  $P/b - a$  numérica após simulação da configuração C-c-0.

Os resultados retirados da simulação encontram-se apresentados na Tabela 33. O valor da resistência de arrancamento médio para a configuração C-c-0 foi de 0,504 N/mm.

Tabela 33 - Resultados numéricos após simulação da configuração C-c-0.

Parâmetro	C-c-0 resultado numérico
$P_{médio}$ (N)	12,6
$P_{máximo}$ (N)	16,8
$P_{mínimo}$ (N)	10,1
$P/b$ (N/mm)	0,504

Na Figura 80 é possível observar a propagação da fenda que teve lugar durante a simulação e o estado de deformação do aderente flexível no final do ensaio.

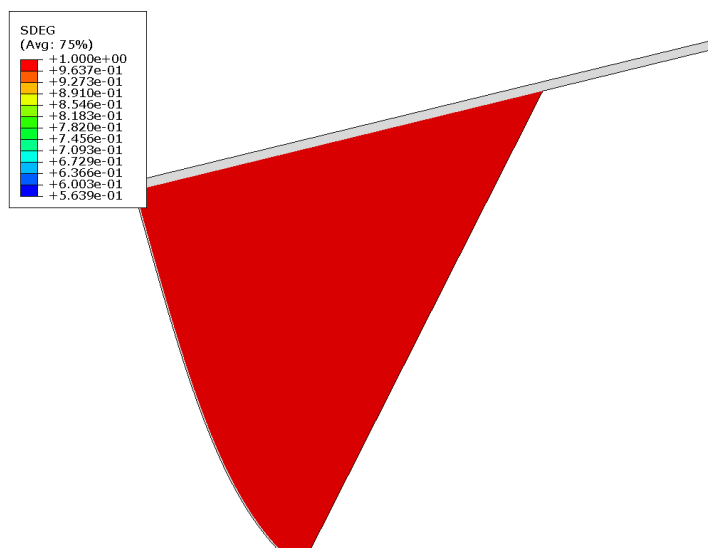


Figura 80 - Propagação da rotura na simulação numérica da configuração C-c-0.

### 3.2.3.5 Configuração C-c-90

Através da Figura 81 é possível observar a curva  $P/b-a$  registada na simulação da configuração C-c-90. Pela análise do gráfico da Figura 81, constata-se que a curva apresenta similaridades na sua tendência e nos valores obtidos com a configuração A-c-90 (tal como sucedido entre as configurações A-c-0 e C-c-0). A curva do gráfico também começa a estabilizar por volta dos 50 mm de propagação da fenda e mantém-se em torno dos 0,36 N/mm. Este fenómeno comprova assim que a natureza e propriedades mecânicas do aderente flexível possuem mais influência nos resultados do ensaio do que a natureza e propriedades mecânicas do aderente rígido [64]. Um fenómeno semelhante ocorreu nos resultados experimentais das configurações A-c-90 e C-c-90. No entanto, devido à ocorrência de rotura interlaminar nos ensaios de alguns provetes, os resultados não foram tão aproximados como nos resultados numéricos onde decorreu sempre rotura coesiva.

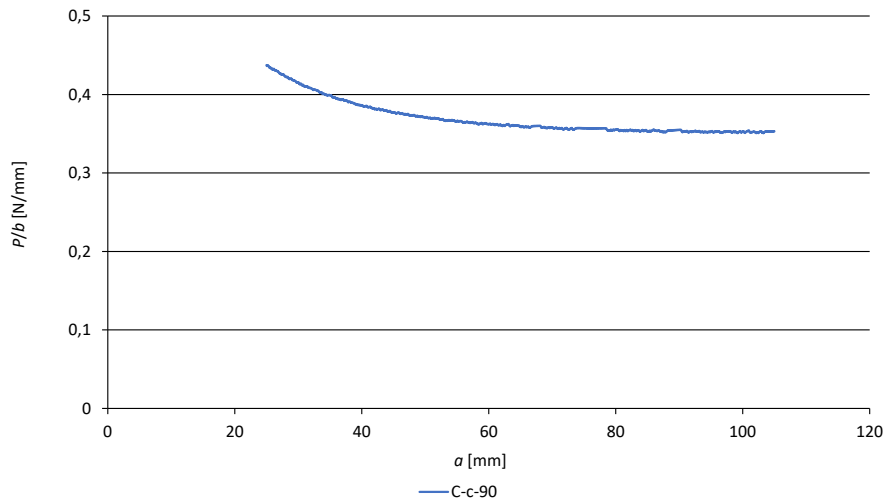


Figura 81 - Curva  $P/b - a$  numérica após simulação da configuração C-c-90.

Na Tabela 34 encontram-se apresentados os resultados da simulação para esta configuração. Pela análise dos resultados é possível confirmar a tendência verificada no gráfico da Figura 81. O valor médio para a força de arrancamento foi de 0,366 N/mm.

Tabela 34 - Resultados numéricos após simulação da configuração C-c-90.

Parâmetro	C-c-0 resultado numérico
$P_{médio}$ (N)	9,16
$P_{máximo}$ (N)	10,9
$P_{mínimo}$ (N)	8,75
$P/b$ (N/mm)	0,366

Na Figura 82 é possível observar a propagação da fenda que teve lugar durante a simulação e o estado de deformação do aderente flexível no final do ensaio.

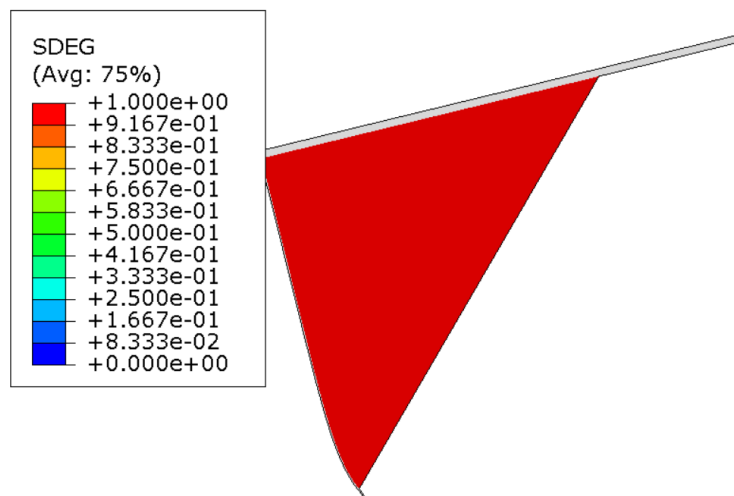


Figura 82 - Propagação da rotura na simulação numérica da configuração C-c-90.

### 3.2.3.6 Configuração C-a

Na Figura 83 encontra-se representada a curva  $P/b-a$  registada na simulação do ensaio da configuração C-a. Através da análise do gráfico é possível constatar que a curva se encontra estável no intervalo de análise e varia entre os valores de 1,4 e 1,5 N/mm. Novamente, tal como sucedeu com as restantes configurações que partilhavam o mesmo aderente flexível, a curva numérica da configuração C-a apresenta similaridades com a curva numérica da configuração A-a.

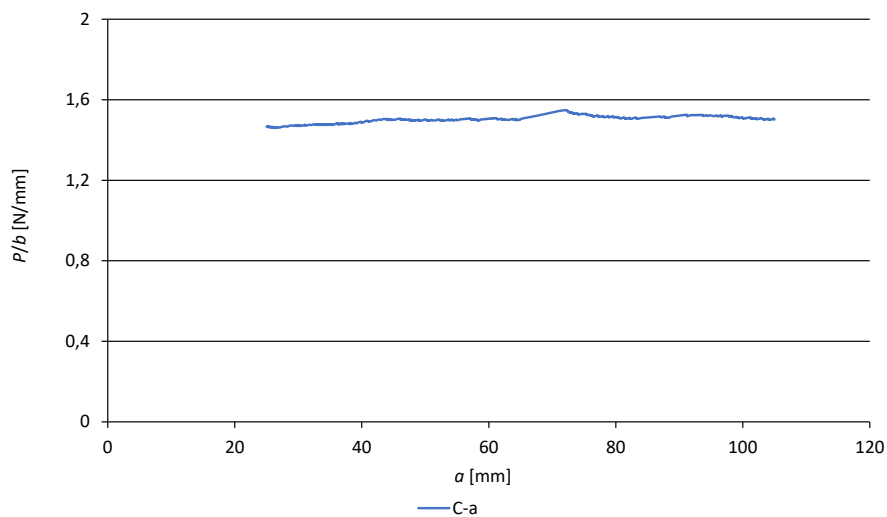


Figura 83 - Curva  $P/b - a$  numérica após simulação da configuração C-a.

Os resultados da simulação para esta configuração encontram-se reportados na Tabela 35. É possível observar que o valor médio de resistência de arrancamento para a configuração C-a foi de 1,50 N/mm.

Tabela 35 - Resultados numéricos após simulação da configuração C-a.

Parâmetro	C-a resultado numérico
$P_{médio}$ (N)	61,6
$P_{máximo}$ (N)	105
$P_{mínimo}$ (N)	25
$P/b$ (N/mm)	1,50

A propagação da fenda ao longo da simulação, encontra-se representada na Figura 84 assim como o estado de deformação dos aderentes no final do ensaio.

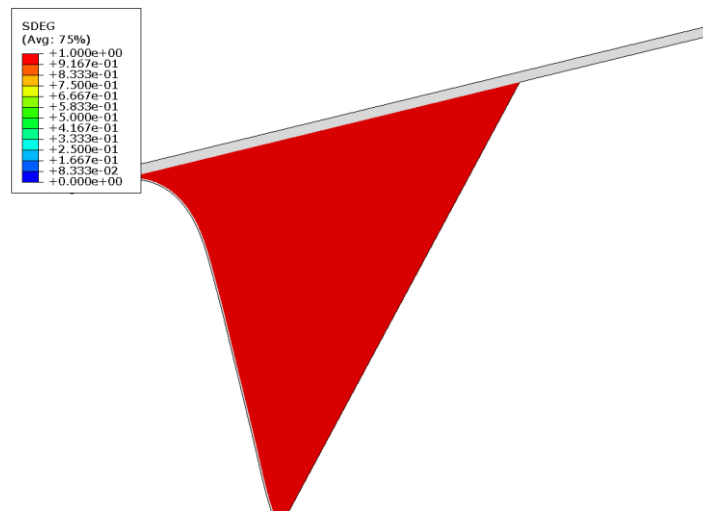


Figura 84 - Propagação da rotura na simulação numérica da configuração C-a.

### 3.2.4 Previsão da resistência

Neste subcapítulo é efetuada a comparação entre as previsões de resistência de arrancamento obtidas pelo MDC e os valores de resistência de arrancamento obtidos experimentalmente. Este estudo tem por objetivo avaliar a capacidade dos MDC em prever a resistência das juntas adesivas estudadas, bem como explicar de forma detalhada os resultados obtidos para os diversos tipos de junta. Inicialmente é apresentada a comparação entre os valores médios de  $P/b$  experimentais e numéricos. De seguida, é efetuada uma comparação entre as curvas  $P/b-a$  experimentais e numéricas. Para todos os ensaios experimentais e simulações numéricas, o intervalo de análise de propagação da fenda foi o mesmo e entre os 25,4 e 105 mm.

Na Figura 85 encontram-se apresentados os valores médios de  $P/b$  para as seis configurações testadas. De um modo geral, a concordância entre os resultados experimentais e numéricos foi bastante razoável para as configurações A-c-90 e C-c-90. No entanto, para as restantes configurações ocorreram oscilações um pouco superiores entre os resultados. Os resultados numéricos apresentaram para todas as configurações valores superiores para  $P/b$ .

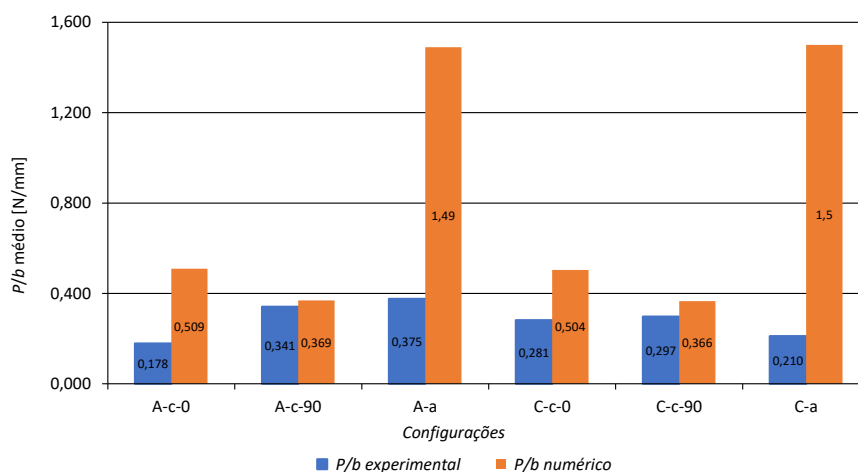


Figura 85 – Comparação gráfica dos valores de  $P/b$  médio entre os resultados experimentais e numéricos.

Para tentar compreender melhor os possíveis motivos por detrás das diferenças entre os resultados numéricos e experimentais é importante analisar e comparar as curvas  $P/b-a$ . A Figura 86 apresenta a comparação para a configuração A-c-0, enquanto a Figura 87 apresenta a comparação para a configuração C-c-0.

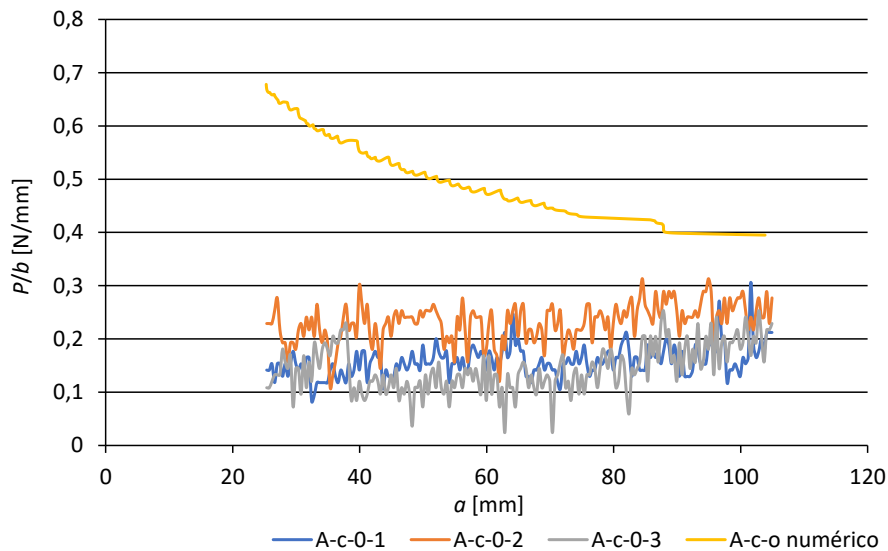


Figura 86 – Curvas  $P/b-a$  obtidas experimentalmente e numericamente para a configuração A-c-0.

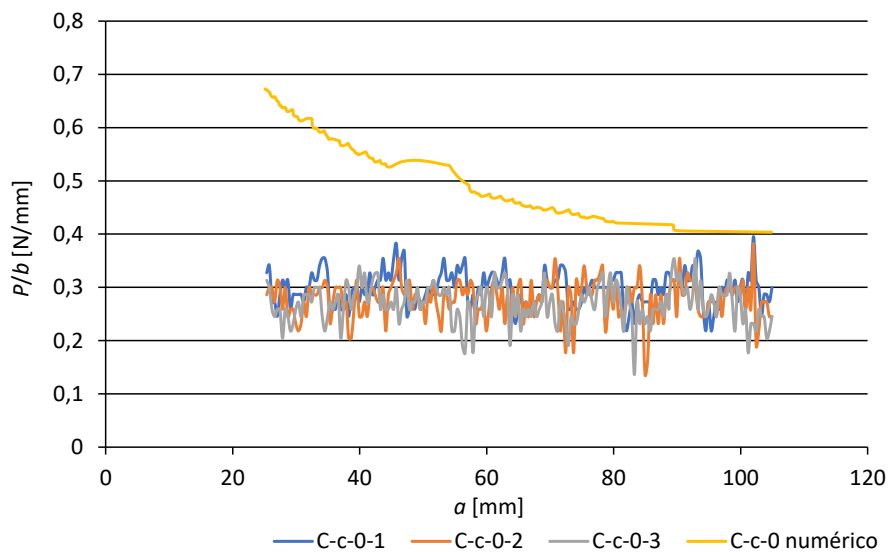


Figura 87 – Curvas  $P/b-a$  obtidas experimentalmente e numericamente para a configuração C-c-0.

Pela análise dos gráficos, é possível observar que, ao contrário do que ocorreu nos resultados experimentais, ou até mesmo nas simulações de ensaio das configurações A-a e C-a, a parte decrescente do pico inicial de força típico destes ensaios ocupou parte dos valores do intervalo de análise, sendo que o valor de resistência de arrancamento também demorou mais a estabilizar em comparação com os resultados experimentais e das restantes simulações, tendo estabilizado por volta dos 0,39 N/mm e 0,40 N/mm nas configurações A-c-0 e C-c-0, respetivamente. Já nos resultados experimentais as curvas encontravam-se estabilizadas em todo o intervalo de análise e com valores em torno dos 0,18 N/mm e 0,28 N/mm para as configurações A-c-0 e C-c-0, respetivamente.

A repetição deste fenómeno nas duas configurações pode indicar que este está relacionado com a utilização do aderente flexível de PRFC que possui a direção das fibras a um ângulo de  $0^\circ$  com a direção longitudinal do provete. Como a única alteração aos parâmetros de simulação, quando comparando por exemplo com as configurações A-c-90 e C-c-90, são os valores de  $E$  e  $\nu$  relativos ao aderente flexível, poderá ser o valor mais alto de  $E$  (141 GPa) que afeta os resultados numéricos no *software* ABAQUS®. Este valor provoca um aumento do pico inicial de força típico dos *floating roller peel tests* e um prolongamento da sua duração. Para uma melhor análise deste fenómeno seria necessária uma investigação mais aprofundada sobre os efeitos de  $E$  em simulações numéricas por MDC do *floating roller peel test*.

Os resultados numéricos das configurações A-c-90 (Figura 88) e C-c-90 (Figura 89) foram bastante semelhantes aos resultados experimentais, sendo os valores de  $P/b$  numéricos de 0,369 N/mm e 0,366 N/mm para as configurações A-c-90 e C-c-90, respetivamente, enquanto os resultados experimentais foram de 0,341 N/mm e 0,297 N/mm para as configurações A-c-90 e C-c-90, respetivamente. Tanto as representações gráficas numéricas como experimentais das curvas  $P/b-a$  se mantiveram estáveis em todo o intervalo de análise e em torno dos valores indicados anteriormente de  $P/b$ .

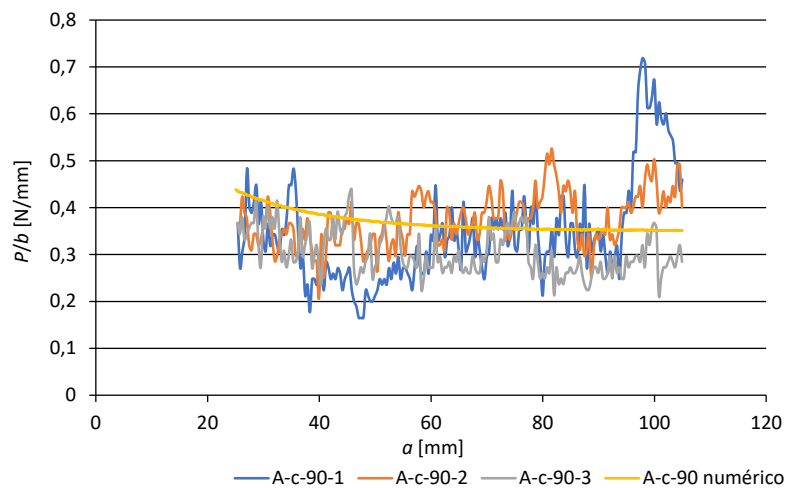


Figura 88 – Curvas  $P/b-a$  obtidas experimentalmente e numericamente para a configuração A-c-90.

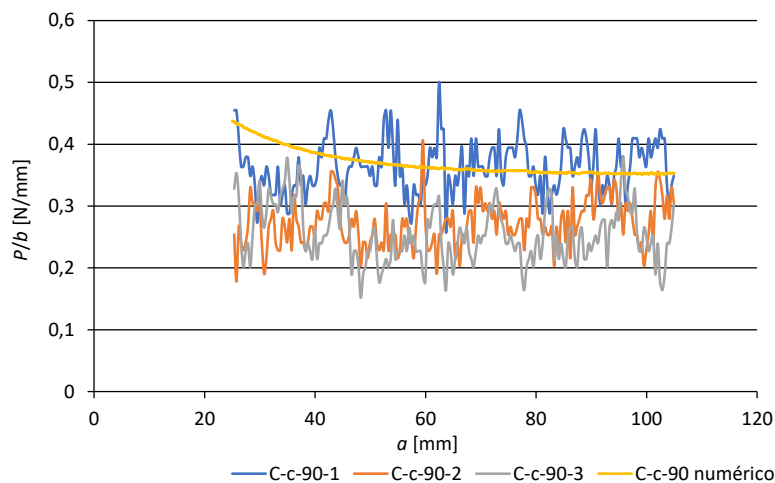


Figura 89 – Curvas  $P/b-a$  obtidas experimentalmente e numericamente para a configuração C-c-90.

Tal como verificado nas configurações A-c-0 e C-c-0 (e como será posteriormente constatável nos resultados das configurações A-a e C-a), as representações gráficas numéricas das configurações A-c-90 e C-c-90 foram bastante semelhantes, comprovando assim que a natureza e propriedades mecânicas do aderente flexível possuem mais influência nos resultados do *floating roller peel test* do que as propriedades do aderente rígido [64].

Na Figura 90 encontra-se a comparação entre as curvas  $P/b-a$  obtidas experimentalmente e numericamente da configuração A-a, já a Figura 91 apresenta a comparação da configuração C-a. Ambas as representações gráficas numéricas das curvas  $P/b-a$  se mantiveram estáveis durante todo o intervalo de análise e em torno dos valores obtidos para  $P/b$ . Os valores de  $P/b$  numéricos foram de 1,49 N/mm e 1,5 N/mm para as configurações A-a e C-a, respetivamente. Já os resultados experimentais foram de 0,375 N/mm e 0,210 N/mm para as configurações A-a e C-a, respetivamente. A maior oscilação entre os resultados numéricos e experimentais ocorreu nestas duas configurações. Como comprovado pela comparação com valores da literatura efetuada no subcapítulo 3.1.4, o valor de  $P/b$  experimental para o adesivo Araldite® AV138 na configuração A-a é inferior a outros valores obtidos com a mesma configuração, mesmo para adesivos estruturais frágeis como o utilizado. No entanto, os valores obtidos numericamente encontram-se mais próximos desses valores [77, 80], o que pode indicar que os valores experimentais foram mais baixos que o que era esperado. No caso da configuração A-a esta diferença pode estar relacionada com a ocorrência de rotura mista (cerca de 70% coesiva e 30% adesiva) e, no caso da configuração C-a, pode estar relacionada com o facto de, embora o modo de rotura ter sido coesivo, este ter ocorrido muito próximo da interface entre o adesivo e o aderente flexível. Uma maior amostragem num trabalho futuro, poderá colmatar este efeito e permitir a obtenção de resultados mais próximos dos resultados numéricos e dos experimentais de outros estudos.

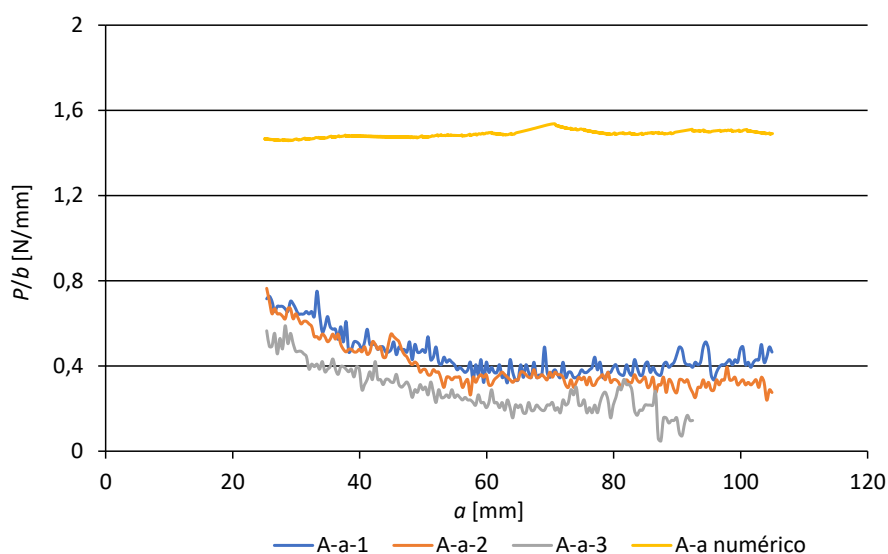


Figura 90 – Curvas  $P/b-a$  obtidas experimentalmente e numericamente para a configuração A-a.

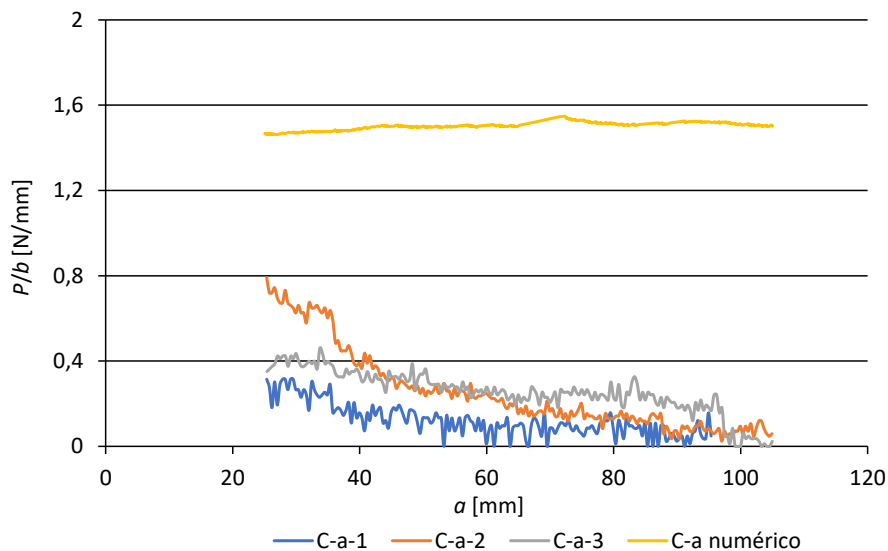


Figura 91 - Curvas  $P/b$ - $a$  obtidas experimentalmente e numericamente para a configuração C-a.

A juntar às observações efetuadas anteriormente, a obtenção de valores superiores nos resultados numéricos, pode também estar relacionada com a simplificação efetuada na configuração da análise numérica ao remover os roletes do acessório de fixação. Esta simplificação pode ter provocado uma maior resistência de arrancamento na zona de propagação da fenda, levando a que o pico inicial de resistência obtido nos resultados numéricos fosse superior e se prolongasse por mais tempo quando em comparação com os resultados experimentais. Mesmo nas configurações A-c-90 e C-c-90, onde os resultados numéricos e experimentais foram próximos pode ter ocorrido a incidência de uma resistência de arrancamento superior nas simulações uma vez que, nestas configurações no ensaio experimental ocorreu rotura interlaminar em alguns provetes e este fenómeno provoca valores de resistência de arrancamento superiores por fazer com que a resistência interna dos aderentes influencie a caracterização da resistência ao arrancamento do adesivo. Para o esclarecimento desta possibilidade é recomendada uma investigação mais aprofundada acerca da recriação numérica do *floating roller peel test*, de forma a solucionar os problemas associados ao deslizamento excessivo entre componentes no *software* ABAQUS® encontrados no decorrer da presente dissertação.

# CONCLUSÕES



## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 4.1 CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como principal objetivo o estudo do adesivo estrutural Araldite® AV138 ao arrancamento em juntas compósito-alumínio, compósito-compósito e alumínio-alumínio, utilizando para tal o método de ensaio *floating roller peel test*. Este procedimento de ensaio tem sido amplamente utilizado como teste de controlo de qualidade e como forma de determinar a resistência ao arrancamento de juntas metálicas, nomeadamente na indústria aeronáutica. Desta forma, este trabalho teve também o objetivo de verificar a sua aplicabilidade como teste de controlo de qualidade da adesão e determinação da resistência de arrancamento em juntas com materiais compósitos ou até mesmo em juntas híbridas.

Foram seis as configurações ensaiadas com recurso ao *floating roller peel test* (cuja nomenclatura foi explicada no subcapítulo 3.1.2): A-a, A-c-0, A-c-90, C-c-0, C-c-90 e C-a. Os resultados para  $P/b$  em cada configuração foram de 0,375 N/mm, 0,178 N/mm, 0,341 N/mm, 0,281 N/mm, 0,297 N/mm e 0,210 N/mm, respetivamente. Após análise dos resultados verifica-se que o valor de  $P/b$  mais alto reportado foi de 0,375 N/mm para a configuração A-a e o valor mais baixo foi de 0,178 N/mm para a configuração A-c-0. Quanto aos coeficientes de variação, o valor mais alto foi de 16,9% e ocorreu na configuração C-a, enquanto o menor valor foi de 2,47% e ocorreu na configuração C-c-0. Como todos os valores foram abaixo de 25%, estes valores são indício de uma elevada repetibilidade a nível de resultados obtidos. A comparação dos resultados experimentais obtidos para as diferentes configurações com outros valores da literatura [77, 80] demonstrou que os valores obtidos de  $P/b$  para as configurações com aderentes flexíveis de PRFC vai de encontro aos valores obtidos noutras investigações com adesivos estruturais frágeis. No entanto, no caso das configurações com aderentes flexíveis em alumínio, os valores experimentais obtidos foram inferiores aos encontrados na literatura. Esta comparação com valores da literatura permite concluir que o adesivo Araldite® AV138 apresenta uma prestação semelhante, embora ligeiramente inferior, a outros adesivos estruturais frágeis, quando sujeito a esforços de arrancamento.

Quanto aos modos de rotura, foram verificados dois modos: rotura coesiva e rotura interlaminar em provetes com aderentes flexíveis em PRFC que foram cortados com a direção das fibras a 90° da direção longitudinal do provete. Estes modos de rotura permitem concluir que a adesão entre o adesivo e os aderentes apresentava uma boa qualidade e resistência, indicando também uma boa preparação superficial das superfícies dos aderentes. Nos casos em que ocorreu rotura coesiva, demonstrou-se que

a ligação entre o adesivo e os aderentes é superior à resistência interna do próprio adesivo. Nos casos onde ocorreu rotura interlaminar demonstrou-se que a resistência interna da junta é superior à resistência interlaminar dos aderentes em PRFC que foram cortados com a direção das fibras a 90° da direção longitudinal do provete. Pela análise dos provetes após rotura, foi possível concluir que a rotura coesiva ocorria sempre mais próxima da interface entre o adesivo e o aderente flexível.

A comparação entre os resultados de *peel tests* deve-se focar essencialmente na comparação do modo de rotura, já que a resistência de arrancamento apenas pode ser comparável entre ensaios com o mesmo aderente flexível. Desta forma, os modos de rotura obtidos indicam uma boa qualidade de adesão em todas as configurações e, uma vez que o modo de rotura é o método preferencial para comparação da qualidade de adesão entre diferentes configurações de provetes, é possível concluir que o adesivo Araldite® AV138 apresenta uma boa prestação nas diferentes configurações e que o *floating roller peel test*, da mesma forma que é utilizado como teste de qualidade de adesão em juntas metálicas, pode também ser utilizado para avaliar as propriedades e qualidade de adesão em juntas com substratos de material compósito.

Os valores de  $P/b$  obtidos através das simulações numéricas efetuadas para as seis configurações foram de 1,49 N/mm, 0,509 N/mm, 0,369 N/mm, 0,504 N/mm, 0,366 N/mm e 1,5 N/mm, para as configurações A-a, A-c-0, A-c-90, C-c-0, C-c-90 e C-a, respetivamente. Pela análise dos resultados, é possível concluir que o aderente flexível é aquele que possui mais influência nos resultados obtidos, uma vez que as configurações com o mesmo aderente flexível apresentaram resultados muito semelhantes. Comparando os valores obtidos numericamente com os obtidos experimentalmente, é possível concluir que os valores experimentais são superiores em todas as configurações. Nas configurações A-c-90 e C-c-90 os resultados numéricos foram bastante semelhantes aos experimentais, enquanto a maior diferença entre valores foi obtida nas configurações A-a e C-a. Tal como mencionado no subcapítulo 3.2.4, os valores numéricos obtidos para as configurações A-a e C-a podem estar mais próximos dos valores reais para  $P/b$  do que os valores experimentais obtidos, uma vez que são mais próximos dos valores encontrados na literatura em ensaios destas configurações com outros adesivos estruturais frágeis. Para o esclarecimento desta possibilidade é recomendada a realização dos ensaios nas configurações A-a e C-a com uma maior amostragem para tentar obter resultados mais próximos dos resultados numéricos e dos experimentais de outros estudos.

## 4.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Finalizada a presente dissertação, existe um conjunto de trabalhos que seria importante desenvolver de modo a dar continuidade ao estudo do adesivo selecionado utilizando o *floating roller peel test*. Desta forma, apresentam-se as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- Repetição dos ensaios com uma maior amostragem para minimizar variações;
- Estudo de adesivos mais dúcteis utilizando o *floating roller peel test*;

- Continuação do desenvolvimento de um modelo numérico para recriação do *floating roller peel test* com o objetivo de solucionar os problemas com excesso de contacto no *software ABAQUS®*;
- Conduzir uma investigação mais aprofundada sobre os efeitos de  $E$  em simulações numéricas por MDC do *floating roller peel test* utilizando aderentes de material compósito.



# REFERÊNCIAS



## 5 REFERÊNCIAS

1. Pocius, A.V. e D.A. Dillard, *Adhesion science and engineering: surfaces, chemistry and applications*. 2002: Elsevier. Amsterdão, Holanda.
2. Da Silva, L.F.M., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Springer Science & Business Media. Berlim, Alemanha.
3. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, e M.F.S.F. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007: Publindústria. Porto, Portugal.
4. DIN923. *Adhesives-Terms and definitions*. in *German Edition*. 2005.
5. Silva, J.O.d.S., *Estudo de juntas adesivas em degrau: análise experimental e numérica por modelos de dano coesivo*. 2018, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
6. Banea, M.D., F.S.M. De Sousa, L.F.M. Da Silva, R.D.S.G. Campilho, e A.M.B. de Pereira, *Effects of temperature and loading rate on the mechanical properties of a high temperature epoxy adhesive*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2011. **25**(18): p. 2461-2474.
7. de Moura, M.F.d.S.F., A.M.B. de Morais, e A.G. de Magalhães, *Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico*. 2005: Publindústria. Porto, Portugal.
8. Adams, R.D. e B.W. Drinkwater, *Nondestructive testing of adhesively-bonded joints*. *International journal of adhesives*, 1997. **30**(2): p. 93-98.
9. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 1999: McGraw Hill Professional. New York City, USA.
10. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Tese de doutoramento. Faculdade de Engenharia da Uiversidade do Porto.
11. Pocius, A.V., *Adhesion and adhesives technology: an introduction*. 2012: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG. Munique, Alemanha.
12. Brewis, D.M. e J. Comyn, *Advances in Adhesives: Applications, Materials and Safety*. 1983: Warwick Publishing. St Charles, USA.
13. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005: Elsevier. Amesterdão, Holanda.
14. Domingues, N.R.E., *Estudo da resistência de juntas adesivas em L entre alumínio e material compósito*. 2015, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
15. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. *Luftfahrtforschung*, 1938. **15**: p. 41-47.
16. Adams, R.D. e N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. *Journal of strain analysis*, 1974. **9**(3): p. 185-196.
17. Harris, J.A. e R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1984. **4**(2): p. 65-78.
18. Sosa, J.L.C. e N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. *Composites Science and Technology*, 2012. **72**(7): p. 788-791.
19. Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 1997: Springer Science & Business Media. Berlim, Alemanha.
20. Panigrahi, S.K. e B. Pradhan, *Three dimensional failure analysis and damage propagation behavior of adhesively bonded single lap joints in laminated FRP composites*. *Journal of Reinforced Plastics Composites*, 2007. **26**(2): p. 183-201.

21. Goland, M.a., *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics, 1944. **17**: p. 66.
22. Hart-Smith, L.J., *Developments in adhesives 2. Stress analysis- A continuum mechanics approach(in adhesive bonded joints*. 1981: Applied Science Publishers. London, UK. 1-44.
23. Penado, F.E., *A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1998. **11**(3): p. 272-287.
24. Adams, R.D. e J.A. Harris, *The influence of local geometry on the strength of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1987. **7**(2): p. 69-80.
25. Zhao, X., R.D. Adams, e L.F.M. Da Silva, *Single lap joints with rounded adherend corners: stress and strain analysis*. Journal of Adhesion Science Technology, 2011. **25**(8): p. 819-836.
26. Zhao, X., R.D. Adams, e L.F.M. Da Silva, *Single lap joints with rounded adherend corners: experimental results and strength prediction*. Journal of Adhesion Science Technology 2011. **25**(8): p. 837-856.
27. Da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*, in *Advances in numerical modeling of adhesive joints*. 2012, Springer. Berlim, Alemanha. p. 1-93.
28. John, S.J., A.J. Kinloch, e F.L. Matthews, *Measuring and predicting the durability of bonded carbon fibre/epoxy composite joints*. Composites, Elsevier 1991. **22**(2): p. 121-127.
29. Da Silva, L.F.M., R.J.C. Carbas, G.W. Critchlow, M.A.V. Figueiredo, e K. Brown, *Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(6): p. 621-632.
30. da Silva, L.F.M., P.J.C. das Neves, R.D. Adams, e J.K. Spelt, *Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: Literature survey*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(3): p. 319-330.
31. Griffith, A.A., VI. *The phenomena of rupture and flow in solids*. Philosophical transactions of the royal society of London, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
32. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the seismological society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
33. Hutchinson, J.W., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics & Physics of Solids 1968. **16**(5): p. 337-342.
34. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968.
35. Fernlund, G. e J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints: Part 1: Analytical method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 213-220.
36. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics 1959. **23**(3): p. 622-636.
37. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics & Physics of Solids 1960. **8**(2): p. 100-104.
38. Duan, K., X. Hu, e Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
39. Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, e S.-S. Pang, *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids Structures, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
40. Turon, A., J. Costa, P.P. Camanho, e C.G. Dávila, *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: applied science manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.

41. Kafkalidis, M.S. e M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. Journal of Solids Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
42. Yang, Q.D. e M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
43. Daudeville, L. e P. Ladev ze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Journal of Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
44. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, e I.A. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
45. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage mechanics with finite elements: practical applications with computer tools*. 2012: Springer Science & Business Media. Berlim, Alemanha.
46. Raghavan, P. e S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
47. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, e M. Kimoto, *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.
48. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, e S.J. Shaw, *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
49. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, e A.D. Crocombe, *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
50. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
51. Chen, Z., R.D. Adams, e L.F.M. Da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
52. Mohammadi, S., *Extended finite element method: for fracture analysis of structures*. 2008: Blackwell Publishing. Nova Jersey, USA.
53. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
54. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
55. Documentation, A., *Dassault Systèmes: Vélizy-Villacoublay*. 2013.
56. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, e L.F.M. Da Silva, *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
57. Banea, M.D. e L.F.M. da Silva, *Adhesively bonded joints in composite materials: an overview*. Journal of Materials: Design Applications, 2009. **223**(1): p. 1-18.
58. Banea, M.D., L.F.M. da Silva, e R.D.S.G. Campilho, *Moulds design for adhesive bulk and joint specimens manufacturing*. Assembly Automation, 2012.
59. Broughton, B. e M. Gower, *Preparation and testing of adhesive joints. Measurement Good Practice Guide No. 47*. NPL Materials Centre, 2001.
60. Da Silva, L.F.M., R.D. Adams, e M. Gibbs, *Manufacture of adhesive joints and bulk specimens with high-temperature adhesives*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004. **24**(1): p. 69-83.
61. Dean, G. e B. Duncan, *A Guide to the Preparation and Testing of Bulk Specimens of Adhesives*. National Physical Laboratory, Teddington, Middx., UK, 1998.

62. Monteiro, J.P.R., *Caraterização das propriedades mecânicas e de fratura de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2015, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
63. Duncan, B.C. e G. Dean, *Test methods for determining shear property data for adhesives suitable for design. Part 1: Notched-beam shear (Iosipescu) and notched-plate shear (Arcan) methods for bulk and joint test specimens. Part A: Summary*. 1996: Centre for Materials Measurement and Technology, National Physical Laboratory. Teddington, UK.
64. Da Silva, L.F.M., D.A. Dillard, B. Blackman, e R.D. Adams, *Testing adhesive joints: best practices*. 2012, Nova Jersey, USA: John Wiley & Sons.
65. Adams, D.F. e D.E. Walrath, *Current status of the Iosipescu shear test method*. Journal of Composite Materials, 1987. **21**(6): p. 494-507.
66. DH, K., *Theory and analysis of peel adhesion: mechanisms and mechanics*. Transactions of the Society of Rheology, 1959. **3**: p. 161.
67. Kaelble, D.H., *Theory and analysis of peel adhesion: bond stresses and distributions*. Transactions of the Society of Rheology, 1960. **4**(1): p. 45-73.
68. Crocombe, A.D. e R.D. Adams, *Peel analysis using the finite element method*. The Journal of Adhesion, 1981. **12**(2): p. 127-139.
69. Crocombe, A.D. e R.D. Adams, *An elasto-plastic investigation of the peel test*. The Journal of Adhesion, 1982. **13**(3-4): p. 241-267.
70. ASTM. *Standard test method for peel resistance of adhesives (T-peel test)*. 2008. ASTM International.
71. DIN. *Adhesives for paper and board, packaging and disposable sanitary products-Determination of dispersability*. 1998.
72. ISO11339. *Adhesives. T-peel test for flexible-toflexible bonded assemblies*. in *British Standards*. 2005.
73. Anderson, G.P., S.J. Bennett, e K.L. DeVries, *Analysis and testing of adhesive bonds*. 1977: Academic Press. Cambridge, Massachusetts, USA.
74. Hutchinson, J.W. e Z. Suo, *Mixed mode cracking in layered materials*, in *Advances in applied mechanics*. 1991, Elsevier: Amesterdão, Holanda. p. 63-191.
75. ASTM D-08. *Standard test method for peel resistance of adhesives (T-peel test)*. 2008. American Society of Testing and Materials West Conshohocken.
76. FORD, W., *M2G410-A2: Aftermarket adhesive, weldable, rivetable, air dry, structural, aluminum*. 2002, Ford Global Technologies.
77. de Freitas, S.T. e J. Sinke, *Adhesion properties of bonded composite-to-aluminium joints using peel tests*. Applied Adhesion Science, 2014. **90**(5-6): p. 511-525.
78. ASTM. *Standard Test Method for Floating Roller Peel Resistance of Adhesives*. 2004.
79. Rhee, K.Y. e J.-H. Yang, *A study on the peel and shear strength of aluminum/CFRP composites surface-treated by plasma and ion assisted reaction method*. Journal of Composites Science and Technology, 2003. **63**(1): p. 33-40.
80. de Freitas, S.T. e J. Sinke, *Test method to assess interface adhesion in composite bonding*. Journal of Applied Adhesion Science, 2015. **3**(1): p. 1-13.
81. Kolarik, L., K. Kovanda, M. Valova, P. Vondrous, e J. Dunovsky, *Weldability test of precipitation hardenable aluminium alloy EN AW 6082 T6*. MM Science Journal, 2011: p. 242-247.
82. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, A.M.G. Pinto, L.F.M. da Silva, e A.M.P. De Jesus, *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
83. Corporation, H., *HexPly® 8552 epoxy matrix product data sheet*. 2013.
84. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, e L.F.M. da Silva, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
85. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, e L.F.M. Da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.

86. Campilho, R.D.S.G., A.M.G. Pinto, M.D. Banea, R.F. Silva, e L.F.M. da Silva, *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
87. Shimakura, S.E. *Coeficiente de variação*. 2005; Disponível em: <http://www.est.ufpr.br/~silvia/CE055/node26.html>].
88. Campanatti, A.C. e G. Salerno, *CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE DELAMINAÇÃO EM MATERIAL COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO E RESINA EPÓXI*. Revista Composites & Plásticos de Engenharia, 2015.
89. Chansawat, K., T. Potisuk, T.H. Miller, S.C. Yim, e D. Kachlakev, *FE models of GFRP and CFRP strengthening of reinforced concrete beams*. Advances in Civil Engineering, 2009. **2009**.
90. Pinto, A.M.G., A.G. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. De Moura, e A.P.M. Baptista, *Single-lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **85**(6): p. 351-376.
91. Alfano, G.a.M.A.C. e M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for numerical methods in engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
92. Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
93. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
94. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and repaired sandwich panel by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
95. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture Mechanics, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
96. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. De Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
97. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. De Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Journal of Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
98. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. De Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
99. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*. 2005, Faculdade de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
100. Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology, An introduction: The chemistry and physical properties of elastomer-based adhesives*. 2002: Hansen Gardner Publications, Inc.. Maplewood Cincinnati, USA.
101. Leffler, K., K.S. Alfredsson, e U.I.f. Stigh, *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids Structures, 2007. **44**(2): p. 530-545.
102. Högberg, J.L. e U.I.f. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. International Journal of Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
103. Andersson, T. e U.I.f. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids Structures, 2004. **41**(2): p. 413-434.