



Estudo comparativo de diferentes adesivos estruturais ao arrancamento pelo floating roller peel test

JOÃO BONIFÁCIO SOUSA NÓBREGA
novembro de 2022

ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES ADESIVOS ESTRUTURAIS AO ARRANCAMENTO PELO *FLOATING ROLLER PEEL TEST*

João Bonifácio Sousa Nóbrega

1150978

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES ADESIVOS ESTRUTURAIS AO ARRANCAMENTO PELO *FLOATING ROLLER PEEL*

João Bonifácio Sousa Nóbrega

1150978

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 Doutor Isidro de Jesús Sánchez-Arce e do Mestre Paulo Jorge Roque de Oliveira Nóvoa.

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes

Professor Coordenador, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientadores

Doutor Isidro de Jesús Sánchez-Arce

Investigador, INEGI

Mestre Paulo Jorge Roque de Oliveira Nóvoa

Assistente Convidado, ISEP

Arguente

Doutor Filipe Silva

Investigador, INEGI

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui o meu mais vivo agradecimento a todos aqueles que contribuíram, de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

Agradeço particularmente e com veemente gratidão, ao Professor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, meu orientador, pela sua disponibilidade, pela preciosa ajuda e partilha de saber no decorrer da execução deste trabalho.

A todos os meu colegas que me apoiaram não só durante a realização deste trabalho, mas também durante todo o meu percurso no ISEP.

À minha família, em especial aos meus pais que sempre me apoiaram ao longo do meu percurso académico, fazendo esforços e sacrifícios em prol da minha formação.

Um agradecimento ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, que me acolheu durante o meu percurso e me deu oportunidade para a realização deste trabalho.

Agradeço à grande família da Tuna Académica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, onde encontrei amigos que sempre me apoiaram durante todo o meu percurso académico.

PALAVRAS-CHAVE

Juntas adesivas; Ensaios mecânicos; Ensaios de arrancamento; *Floating roller peel test*; Método de elementos finitos; Modelos de dano coesivo.

RESUMO

A evolução tecnológica dos materiais permitiu a conceção de materiais mais robustos e leves. Por outro lado, os métodos de ligação tradicionais (como a soldadura e a ligação aparafusada) têm vindo a ser substituídos por métodos de ligação mais eficientes, de menor custo e de maior rendimento mecânico, como é o caso das ligações adesivas. Este é um método de ligação vantajoso, pelo que é útil analisar o seu comportamento em diversos materiais. Os ensaios de caracterização ao arrancamento (*peel tests*) são amplamente utilizados para a determinação da resistência ao arrancamento em juntas adesivas, tendencialmente realizados em aderentes flexíveis de baixa espessura. Para a parametrização desta propriedade são utilizados vários métodos de ensaio, como o ensaio *floating roller peel test*, *climbing drum peel test*, ensaios de arrancamento a 90° e 180°, e *T-peel test*. No entanto, a adequabilidade de diferentes tipos de adesivos neste tipo de ensaios ainda se encontra relativamente limitada, tal como a sua modelação numérica eficiente e precisa, necessária para a compreensão dos fenómenos mecânicos dos respetivos ensaios.

O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento ao arrancamento e os modos de rotura dos adesivos estruturais Araldite® AV138, Araldite® AW4858, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 em aderentes de alumínio AW 6082-T651, através da utilização da configuração de ensaio *floating roller peel test*. Para este efeito, foi calculada a resistência ao arrancamento de cada ensaio, dada pelo rácio entre a força de tração e a largura da junta, o que permitiu comparar o desempenho dos diferentes adesivos a esta solicitação. Adicionalmente, foi desenvolvido um modelo numérico do ensaio, incluindo uma representação precisa do ensaio numérico, com a utilização de roletes rígidos para promover o suporte do provete, enquanto a extremidade flexível deste é solicitada, e estipuladas condições de contacto adequadas ao ensaio. Considerou-se também a utilização de modelos de dano coesivo (MDC) para modelação da propagação da fenda na camada de adesivo. Foi possível comparar os resultados numéricos obtidos com os resultados experimentais e criar uma base de modelação e validação das propriedades obtidas dos ensaios experimentais, por comparação com os resultados da análise numérica.

Através do ensaio *floating roller peel test* foi possível obter uma avaliação comparativa entre os diferentes adesivos estudados, com valores de resistência ao arrancamento enquadrados no expectável para adesivos estruturais. Os modelos numéricos reproduziram de forma aceitável os ensaios experimentais.

KEYWORDS

Adhesive joints; Mechanical tests; Peel tests; Floating roller peel test; Finite Element Method; Cohesive zone models.

ABSTRACT

The technological evolution of materials allowed the design of more robust and lighter materials as well. On the other hand, traditional joining methods (such as welding and bolted joints) have been replaced by more efficient, lower cost and higher mechanical performance joining methods, such as adhesive joints. Since this is an advantageous joining method, it is useful to analyse its behaviour in different materials. Peel tests are widely used to determine the peel strength of adhesive joints, tending to be carried out in flexible adherends of low thickness. For the parameterization of this property, several test methods are used, such as the floating roller peel test, climbing drum peel test, peel tests at 90° and 180°, and *T-peel* test. However, the suitability of different types of adhesives in this type of tests is still relatively limited, as is their efficient and accurate numerical modelling, necessary to the understanding of the mechanical phenomena of the respective tests.

The objective of this work was to study the peel behaviour and failure modes of the structural adhesives Araldite® AV138, Araldite® AW4858, Araldite® 2015 and Sikaforce® 7752 on AW 6082-T651 aluminium adherends, using the roller peel test configuration. For this purpose, the peel strength of each test was calculated, given by the ratio between the tensile load and the width of the joint, which made it possible to compare the performance of the different adhesives under this loading mode. Additionally, a numerical model of the test was developed, including an accurate representation of the numerical test, with the use of rigid rollers to promote the support of the test component, while the flexible end of the test piece is stressed, and established contact conditions suitable for the test. The use of cohesive zone models (CZM) was also considered to model crack propagation in the adhesive layer. It was possible to compare the obtained results with the experimental results and create a basis for modelling and validating the properties obtained from the experimental tests, by comparison with the results of the numerical analysis.

Through the floating roller peel test, it was possible to obtain a comparative evaluation between the different adhesives studied, with values of peel strength within the expected range for structural adhesives. The numerical models made it possible to satisfactorily reproduce the experimental tests.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

4ENF	<i>Four-Point End-Notched Flexure</i>
ADCB	<i>Asymmetric Double Cantilever Beam</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Al	Alumínio
ATDCB	<i>Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam</i>
BSI	<i>British Standards Institution</i>
CBT	<i>Corrected Beam Theory</i>
CCM	<i>Compliance Calibration Method</i>
Cr	Crómio
Cu	Cobre
CZM	<i>Cohesive Zone Modelling</i>
DBT	<i>Direct Beam Theory</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
ELS	<i>End-Loaded Split</i>
EN	<i>European Standard</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
Fe	Ferro
FRMM	<i>Fixed-Ratio Mixed-Mode</i>
FRP	<i>Fibre Reinforced Polymer</i>

ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MDC	Modelo de dano coesivo
MEF	Método de elementos finitos
MEFX	Método de elementos finitos eXtendido
Mg	Magnésio
MMB	<i>Mixed-Mode Bending</i>
MMF	<i>Mixed-Mode Flexure</i>
Mn	Manganês
PTFE	<i>Politetrafluoretileno</i>
SBT	<i>Single Beam Theory</i>
SDEG	<i>Stiffness Degradation</i>
Si	Silício
SLB	<i>Single-Leg Bending</i>
TAST	<i>Thick Adherend Shear Test</i>
TDCB	<i>Tapered Double Cantilever Beam</i>
TFFV	Técnica de fecho da fenda virtual
Ti	Titânio
Zn	Zinco

Lista de Unidades

mm	Milímetro
mm/min	Milímetro por minuto
MPa	Mega Pascal

GPa	Giga Pascal
N	Newton
J	Joule
g	Grama

Lista de Símbolos

a	Comprimento de fenda
a_0	Comprimento de pré-fenda
B	Largura do aderente
C_s	Flexibilidade
E	Módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young
E^*	Módulo de elasticidade reduzido
F	Força
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
G_C	Taxa crítica de libertação de energia
G_{IC}	Taxa crítica de libertação de energia em modo I puro
G_{IIC}	Taxa crítica de libertação de energia em modo II puro
K	Fator de intensidade de tensão
L	Comprimento do provete
L_f	Comprimento do aderente flexível
L_r	Comprimento do aderente rígido

L_T	Comprimento total da junta
L_0	Comprimento de sobreposição
P	Carga aplicada
$P_{\text{máx}}$	Carga máxima aplicada
t	Espessura
t_a	Espessura de adesivo
t_f	Espessura do aderente flexível
t_m^0	Resistência coesiva em modo misto
t_n^0	Resistência coesiva à tração
t_p	Espessura do aderente na caracterização mecânica
t_r	Espessura do aderente rígido
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
U	Energia de deformação interna
ν	Coefficiente de Poisson
W	Trabalho realizado por forças externas
γ	Energia elástica de superfície
ε	Deformação
ε_f	Deformação de rotura à tração
σ	Tensão
σ_b	Tensão aplicada para propagação de fenda
σ_f	Tensão de rotura à tração
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão máxima

σ_R	Tensão remota aplicada
σ_y	Tensão de cedência à tração
τ	Tensão de corte
τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte
γ_f	Deformação de rotura ao corte

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de uma ligação adesiva simples.....	10
Figura 2 - Energia de ligação de acordo com a distância entre dois corpos [2]	11
Figura 3 - Distribuição de tensões em juntas adesivas (a), rebitadas (b) e soldadas (c) [5]	12
Figura 4 - Esforço de corte numa ligação adesiva [1]	14
Figura 5 - Esforço de clivagem numa ligação adesiva [7]	14
Figura 6 - Modos de rotura mais comuns em juntas adesivas; rotura adesiva a), rotura coesiva b), rotura pelo aderente c), rotura mista d) [8]	15
Figura 7 - Configurações de junta mais comuns [10]	17
Figura 8 - Variação da resistência de ligação consoante a variação da largura e comprimento: provetes tipo I e II a), provetes tipo III e IV b) [11]	19
Figura 9 - Efeito da resistência de ligação em função da espessura de adesivo [12]	20
Figura 10 - Influência do ângulo de entrada na distribuição de tensões [5]	20
Figura 11 - Pá de uma turbina eólica com seccionamento [17]	22
Figura 12 - Carapaça frontal da aeronave Beagle 2, durante montagem a), após montagem b) [5]	22
Figura 13 - Aplicação de adesivo anti vibração no capot dianteiro de automóvel [5]	23
Figura 14 - Aplicação de adesivos no vidro frontal de um automóvel [5]	23
Figura 15 - Dimensões em mm de provete longo de adesivo rígido segundo ISO 527 [19]	25
Figura 16 - Dimensões em mm e carregamento losipescu [19]	26
Figura 17 - Dimensões provete Arcan [5]	27
Figura 18 - Dimensão provetes TAST (norma ISO 11003-2) [19].....	28
Figura 19 - Aplicação da carga em ensaio TAST [19]	28
Figura 20 - Fratura modo I, modo II e modo III [22]	29
Figura 21 - Geometria de provete ensaio DCB [23].....	30
Figura 22 - Representação esquemática do provete TDCB [22]	32
Figura 23 - Ensaio de caracterização de fratura em modo II para ligações adesivas [22].....	33
Figura 24 - Geometria e aplicação de cargas no ensaio FRMM a), MMB b) [5]	36
Figura 25 - Geometria e aplicação de cargas no ensaio ADCB a), SLB b), ATDCB c) [31].....	36

Figura 26 - Ligação na fuselagem do Cessna Citation III [5]	41
Figura 27 - Variação da força de arrancamento de acordo com o tratamento efetuado em borracha de estireno butadieno [40]	42
Figura 28 - Face refletora traseira unida a compósito monolítico [5]	43
Figura 29 - Funcionamento do ensaio de arrancamento por impacto, adaptado de [41]	44
Figura 30 - Configuração dos provetes no ensaio de arrancamento por impacto, a) canto simétrico, b) canto assimétrico [41]	44
Figura 31 - Configuração ensaio de arrancamento a 90° a), 180° b) [43].....	45
Figura 32 - Dimensões do provete para ensaio <i>T-peel</i> [19].....	48
Figura 33 - <i>Floating roller peel test</i> [48]	49
Figura 34 - Dimensões do provete para ensaio <i>floating roller peel</i> [49]	50
Figura 35 - <i>Climbing drum peel test</i> [5]	50
Figura 36 - Montagem do conjunto de ensaio <i>climbing drum</i> [50]	51
Figura 37 - Dimensões provetes para ensaio <i>climbing drum</i> [50]	52
Figura 38 - Gabarito para alinhamento de juntas em “T” [51]	53
Figura 39 - Distribuição de tensões em juntas com e sem filete [5]	53
Figura 40 - Filete em juntas T com 50% enchimento a), 100% enchimento b) [52]	54
Figura 41 - Colocação de lâminas para garantir espessura mínima	54
Figura 42 - Influência da rigidez e espessura do aderente na resistência (adaptado de [53])	55
Figura 43 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [68])	59
Figura 44 - Configuração da geometria dos provetes <i>floating roller peel test</i> (adaptado de [77])	66
Figura 45 - Acessório para ensaio <i>floating roller peel</i> e dimensões associadas [78]	67
Figura 46 - Curvas experimentais de σ - ϵ do alumínio AW6082 T651 e aproximação para análise de MEF [80]	69
Figura 47 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços constituídos pelo adesivo Araldite® AV138 [80]	70
Figura 48 - Curva σ - ϵ relativa ao adesivo Araldite® AW4858 [84]	72
Figura 49 - Curvas σ - ϵ relativas ao adesivo Araldite® 2015 (adaptado de [87])	73
Figura 50 - Curvas σ - ϵ relativa ao adesivo Sikaforce® 7752 (adaptado de [87])	75
Figura 51 - Modelo coesivo triangular (adaptado de [65])	75
Figura 52 - Criação das partes intervenientes no ABAQUS® para simular o <i>floating roller peel test</i>	80

Figura 53 - Possíveis escolhas para o critério de dano a usar.	81
Figura 54 - Identificação das cotas de construção do modelo	82
Figura 55 - Interações definidas no modelo	83
Figura 56 - Condições de fronteira e deslocamentos aplicados ao modelo	83
Figura 57 - Malhas utilizadas no modelo numérico.....	84
Figura 58 - Colocação das lâminas de aço inoxidável no aderente rígido	86
Figura 59 - Aplicação do adesivo nos aderentes flexíveis	86
Figura 60 - Posicionamento dos grampos para alinhamento dos provetes	87
Figura 61 - Provetes após remoção das lâminas e excesso de adesivo	88
Figura 62 - Posicionamento de um provete de ensaio <i>floating roller peel test</i> numa máquina de ensaios Shimadzu® AG-1.....	89
Figura 63 - Provette após ensaio	89
Figura 64 - Curvas $P/b - a$ obtidas experimentalmente com o adesivo Araldite® AV138	95
Figura 65 - Curvas $P/b - a$ obtidas experimentalmente com o adesivo Araldite® AW4858	96
Figura 66 - Curvas $P/b - a$ obtidas experimentalmente com o adesivo Araldite® 2015	97
Figura 67 - Curvas $P/b - a$ obtidas experimentalmente com o adesivo Sikaforce® 7752	98
Figura 68 - Comparação gráfica dos valores médios de P/b e desvios padrões para as configurações testadas.....	99
Figura 69 - Deformação plástica equivalente do provete com adesivo Araldite® AV138	101
Figura 70 - Comportamento das tensões equivalentes von Mises a), degradação do adesivo Araldite® AV138 b)	102
Figura 71 - Deformação plástica equivalente do provete com adesivo Araldite® AW4858	102
Figura 72 - Comportamento das tensões equivalentes von Mises a), degradação do adesivo Araldite® AW4858 b)	103
Figura 73 - Deformação plástica equivalente do provete com adesivo Araldite® 2015	103
Figura 74 - Comportamento das tensões equivalentes von Mises a), degradação do adesivo Araldite® 2015 b)	104
Figura 75 - Deformação plástica equivalente do provete com adesivo Sikaforce® 7752	104
Figura 76 - Comportamento das tensões equivalentes von Mises a), degradação do adesivo Sikaforce® 7752 b)	105
Figura 77 - Curva $P/b - a$ numérica para o adesivo Araldite® AV138	105

Figura 78 - Curva $P/b - a$ numérica para o adesivo Araldite® AW4858	106
Figura 79 - Curva $P/b - a$ numérica para o adesivo Araldite® 2015	107
Figura 80 - Curva $P/b - a$ numérica para o adesivo Sikaforce® 7752	108
Figura 81 - Comparação dos dados experimentais e numéricos dos provetes AV138.....	109
Figura 82 - Comparação dos dados experimentais e numéricos dos provetes AW4858	110
Figura 83 - Comparação dos dados experimentais e numéricos dos provetes 2015	111
Figura 84 - Comparação dos dados experimentais e numéricos dos provetes 7752	111
Figura 85 - Comparação de resultados numéricos e experimentais	112
Figura 86 - Comparação dos valores numéricos e do fabricante para a resistência ao arrancamento ...	114

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os métodos de ligação mais utilizados (adaptado de [1])	12
Tabela 2 - Análise da variação da resistência de ligação com a variação de largura e comprimento de junta (adaptado de [11])	18
Tabela 3 - Propriedades extraídas do ensaio tração	25
Tabela 4 - Características dos métodos ENF, ELS, 4ENF (adaptado de [27], [22], [26])	34
Tabela 5 - Estudos das propriedades mecânicas e de fratura em juntas adesivas.....	37
Tabela 6 - Espessura recomendada por material para os provetes (adaptado de [42])	46
Tabela 7 - Configurações resultantes em provetes <i>T-peel</i> , antes, durante e pós arrancamento, adaptado de [19]	47
Tabela 8 - Técnicas mais utilizadas para a previsão da resistência de juntas.....	57
Tabela 9 - Trabalho experimentais através da utilização de ensaios de arrancamento.....	60
Tabela 10 - Trabalhos numéricos com a utilização de ensaios de arrancamento	61
Tabela 11 - Dimensões dos provetes <i>floating roller peel test</i>	67
Tabela 12 - Composição química da liga de alumínio AW 6082 - T651 [79].....	68
Tabela 13 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651 [79, 80]	68
Tabela 14 - Características mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [81]	70
Tabela 15 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AW4858 (adaptado de [83-85]) .	71
Tabela 16 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [86].....	73
Tabela 17 - Características mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752 [86]	74
Tabela 18 - Parâmetros da camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm.....	77
Tabela 19 - Parâmetros da camada de adesivo Araldite® AW4858 com uma espessura de 0,2 mm	77
Tabela 20 - Parâmetros da camada de adesivo Araldite® 2015 com uma espessura de 0,2 mm	78
Tabela 21 - Parâmetros da camada de adesivo Sikaforce® 7752 com uma espessura de 0,2 mm	79
Tabela 22 - Propriedades do aderente inseridas no ABAQUS®	80
Tabela 23 - Designação dos provetes por adesivo utilizado.....	85
Tabela 24 - Modos de rotura nos provetes com adesivo Araldite® AV138	91
Tabela 25 - Modos de rotura nos provetes com adesivo Araldite® AW4858.....	92

Tabela 26 - Modos de rotura dos provetes com adesivo Araldite® 2015.....	93
Tabela 27 - Modos de rotura dos provetes com adesivo Sikaforce® 7752.....	94
Tabela 28 - Resultados obtidos após ensaio dos provetes AV138	95
Tabela 29 - Resultados obtidos após ensaio dos provetes 4858.....	96
Tabela 30 - Resultados obtidos após ensaio dos provetes 2015.....	97
Tabela 31 - Resultados obtidos após ensaio dos provetes 7752.....	98
Tabela 32 - Comparação da variação dos valores de $P/b_{\text{médio}}$ obtidos experimentalmente	100
Tabela 33 - Resultados numéricos com o adesivo Araldite® AV138	106
Tabela 34 - Resultados numéricos com o adesivo Araldite® AW4858	107
Tabela 35 - Resultados numéricos com o adesivo Araldite® 2015	108
Tabela 36 - Resultados numéricos com o adesivo Sikaforce® 7752	109
Tabela 37 - Comparação entre valores experimentais e numéricos	113

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Organização da dissertação	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Ligações adesivas	9
2.1.1	Caracterização da técnica de ligação.....	9
2.1.2	Comparação com as técnicas de ligações mecânicas.....	11
2.1.3	Esforços e modos de rotura	13
2.1.3.1	Esforços numa ligação adesiva	13
2.1.3.2	Modos de rotura	14
2.1.4	Efeito das variáveis geométricas na resistência de ligação	16
2.1.5	Efeito dos materiais na resistência da ligação.....	21
2.1.6	Aplicações das juntas adesivas	21
2.2	Caracterização mecânica e de fratura de adesivos.....	24
2.2.1	Propriedades mecânicas à tração.....	24
2.2.2	Propriedades mecânicas ao corte	25
2.2.3	Propriedades de fratura em modo puro	29
2.2.3.1	Propriedades de fratura em modo I	30
2.2.3.2	Propriedades de fratura em modo II	32
2.2.4	Propriedades de fratura em modo misto	35
2.2.5	Estado-da-arte.....	37
2.3	Ensaio de arrancamento para adesivos.....	40
2.3.1	Motivação para a caracterização dos adesivos ao arrancamento	40

2.3.2	Tipos de juntas utilizadas em aplicações reais	41
2.3.3	Ensaio de arrancamento	43
2.3.4	Particularidades no fabrico de juntas de arrancamento	52
2.3.5	Efeito dos materiais e geometria dos aderentes na resistência da junta adesiva	55
2.3.6	Modelação numérica de ensaios de arrancamento	56
2.3.7	Estado-da-arte	59
2.3.7.1	Trabalhos experimentais	60
2.3.7.2	Trabalhos numéricos	61
3	DESENVOLVIMENTO	65
3.1	Metodologia de análise	65
3.1.1	Método a seguir	65
3.1.2	Geometria a testar	66
3.1.3	Materiais utilizados	68
3.1.3.1	Aderentes	68
3.1.3.2	Adesivos	69
3.1.3.2.1	Araldite® AV138	69
3.1.3.2.2	Araldite® AW4858	71
3.1.3.2.3	Araldite® 2015	72
3.1.3.2.4	Sikaforce® 7752	74
3.1.4	Modelação numérica	75
3.1.4.1	Modelo de dano coesivo triangular	75
3.1.4.2	Determinação das propriedades coesivas	76
3.1.4.3	Preparação dos modelos numéricos	79
3.2	Trabalho experimental	84
3.2.1	Procedimento experimental	84
3.2.1.1	Fabrico das juntas	84
3.2.1.2	Ensaio das juntas	88
3.2.1.3	Tratamento dos dados	90
3.2.2	Resultados	90

3.2.2.1	Modos de rotura	90
3.2.2.2	Força de arrancamento.....	94
3.2.2.3	Análise de resultados.....	99
3.2.2.4	Comparação com a literatura	100
3.3	Trabalho numérico	101
3.3.1	Modos de rotura	101
3.3.2	Força de arrancamento	105
3.3.3	Comparação com os dados experimentais.....	109
3.3.3.1	Análise de resultados.....	113
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	117
4.1	Conclusões	117
4.2	Propostas de trabalhos futuros.....	118
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	121
6	ANEXOS.....	131
6.1	Anexo 1 - Norma ASTM D3167.....	132
6.2	Anexo 2 - Adesivo Araldite® AV138	135
6.3	Anexo 3 - Adesivo Araldite® AW 4858	138
6.4	Anexo 4 - Adesivo Araldite® 2015	141
6.5	Anexo 5 - Adesivo SikaForce® 7752	143

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As ligações adesivas com recurso a adesivos estruturais desempenham um papel importante em vários sectores da indústria, tais como automóvel, eletrónica, aeroespacial, entre outras. As juntas adesivas são uma alternativa viável a outros métodos de ligação como ligações mecânicas, e apresentam-se como uma solução atrativa pois apresentam diversas vantagens como o seu peso e custo reduzidos, melhor distribuição de tensões e prevenção de corrosão. Esta tecnologia de ligação caracteriza-se pela sua versatilidade, já que possibilita a união de materiais com propriedades dissimilares, o que é dificultado ou impossibilitado com outros métodos de ligação. O uso de adesivos permite também a obtenção de estruturas de geometria complexa, dificilmente realizável por outra forma de ligação.

Por outro lado, esta técnica de ligação apresenta algumas desvantagens, tais como a sua sensibilidade às tensões de arrancamento, pelo que se deve projetar a junta adesiva privilegiando solicitações de corte, e propensão para degradação sob efeitos ambientais adversos. Neste sentido, na literatura é possível verificar avanços apresentando configurações de junta diferentes para minimizar os esforços de arrancamento. Deste modo, para uma escolha adequada da configuração a optar, é necessário ter conhecimento e avaliar a qualidade da adesão de forma a atenuar a fragilidade da solicitação ao arrancamento que a ligação adesiva possui. Até à atualidade têm sido desenvolvidos vários ensaios para caracterizar a resistência ao arrancamento, e o tema proposto conta com a introdução mais recente do *floating roller peel test*, utilizado na indústria essencialmente como um teste de controlo de qualidade da adesão em provetes metálicos.

Por outro lado, a vasta utilização e o importante papel desempenhado pelas ligações adesivas levaram à necessidade de desenvolver ferramentas para permitir o projeto e dimensionamento, assim como a previsão do comportamento e desempenho dos aderentes e adesivos utilizados. Atualmente a utilização do método de elementos finitos (MEF) em cooperação com modelos de dano coesivos (MDC) constitui uma ferramenta fundamental para a previsão de comportamento da junta. Neste sentido, a motivação deste trabalho é estudar experimental e numericamente, por MDC, a resistência ao arrancamento de adesivos com diferente ductilidade em aderentes de alumínio. Para

este efeito são utilizados, do menos dúctil para o mais dúctil, os adesivos estruturais Araldite® AV138, Araldite® AW4858, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como por objetivo estudar experimental e numericamente o comportamento ao arrancamento e os modos de rotura dos adesivos estruturais Araldite® AV138, Araldite® AW4858, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 em aderentes de alumínio AW 6082-T651, através da utilização do *floating roller peel test*. Para este efeito, foi calculada a resistência ao arrancamento de cada ensaio, dada pelo rácio entre a força de tração e a largura da junta, o que permitiu comparar o desempenho dos diferentes adesivos a esta solicitação.

Após o estudo experimental inicialmente realizado, foi também objetivo desenvolver um modelo numérico do ensaio, considerando a utilização de MDC para modelação da propagação da fenda na camada de adesivo. Com esta abordagem, pretende-se comparar os resultados obtidos com os resultados experimentais e criar uma base de modelação e validação dos modelos numéricos desenvolvidos por comparação com o comportamento experimental.

Uma vez que esta dissertação aborda vários temas inerentes ao trabalho experimental e numérico, foi necessária a divisão em variadas tarefas como:

- Revisão bibliográfica;
- Tipos de adesivos e aderentes a utilizar;
- Fabrico dos provetes com as diferentes configurações;
- Realização do ensaio *floating roller peel*;
- Tratamento de dados de acordo com a norma utilizada e posterior análise;
- Criação do modelo numérico do ensaio;
- Tratamento de dados seguindo a norma, seguindo uma análise dos mesmos;
- Comparação dos resultados numéricos com os obtidos experimentalmente;
- Discussão dos resultados e conclusões retiradas do trabalho.

1.3 Organização da dissertação

Esta secção da presente dissertação tem como por objetivo esclarecer a organização da mesma.

No presente capítulo 1 é efetuada uma contextualização global do tema desenvolvido, apresentados os objetivos a cumprir e respetiva divisão de tarefas, e descrita a organização da dissertação.

No capítulo 2 está presente a revisão bibliográfica necessária para a realização deste trabalho. Inicialmente, esta aborda temas como a definição de ligação adesiva, comparação com outras técnicas de ligação, esforços associados e alguns exemplos da aplicação da junta adesiva. Seguidamente é abordada a caracterização mecânica e de fratura dos adesivos e os respetivos ensaios associados. Na fase final deste capítulo, mais direcionado às ligações adesivas sob esforços de arrancamento, é abordada a caracterização de uma junta sob este tipo de solicitação.

O capítulo 3 consiste no desenvolvimento dos trabalhos experimental e numérico desenvolvidos. É apresentada a metodologia seguida, procedimentos, resultados experimentais e numéricos, e respetiva discussão crítica.

No capítulo 4 são reunidas as conclusões retiradas da análise dos resultados experimentais e numéricos, bem como sugeridos trabalhos futuros, como complementares ao presente trabalho de investigação.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligações adesivas
- 2.2 Caracterização mecânica e de fratura de adesivos
- 2.3 Ensaios de arrancamento para adesivos

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

Para o fabrico de uma estrutura ou equipamento mecânico, existem vários componentes ou subconjuntos que são necessários unir de modo a garantir uma transmissão dos esforços e consequentemente sucesso no que diz respeito à sua função. Para tal, são utilizadas geralmente ligações mecânicas tais como parafusos, rebites ou soldadura que, no entanto, poderão ser substituídos por métodos com características mecânicas superiores e custos menores. Neste sentido tem-se observado um esforço ao longo dos anos no sentido de reinventar processos de ligação e torná-los mais económicos e eficientes. Uma ligação adesiva é constituída por dois aderentes unidos através de um adesivo, normalmente de origem polimérica. Estes adesivos podem ser classificados segundo a sua natureza, estrutura molecular, composição química, modo de aplicação, custos, entre outras formas. É possível descrever mais de 70 características de um adesivo. No entanto, para uma seleção de um adesivo apenas se consideram cerca de 15 a 25 características. Ao serem consideradas todas estas variáveis na seleção de um adesivo, poderá ser considerado um processo seleção algo complexo de executar [1]. Para uma conceção ideal de uma junta adesiva, o aderente deverá ser sempre o componente mais fraco, ou seja, o adesivo nunca deve limitar a resistência da estrutura [2].

Os adesivos estruturais são caracterizados pela necessidade de assegurar transmissão de esforços de uma peça para outra com valores mínimos, na ordem dos 7 MPa [3]. Nestas ligações, o adesivo desempenha um papel fundamental na estrutura e é parte integrante da mesma.

2.1.1 Caracterização da técnica de ligação

A ligação adesiva ocorre aquando da ligação de dois materiais similares ou dissimilares, designados aderentes, através de um adesivo, de modo a promover a transferência de esforços de um aderente para outro. Este método de ligação de dois materiais vem colmatar a falta de eficiência das ligações aparafusadas e rebitadas nos materiais não metálicos, em grande parte porque permite uma montagem com menor concentração de tensões na área de ligação e confere maior flexibilidade à junta. O fenómeno de ligação de dois materiais há muito que tem sido estudado. Neste âmbito, as ligações

adesivas passam por uma melhoria na eficiência da própria ligação. A Figura 1 representa uma ligação adesiva simples composta pelo aderente e adesivo.

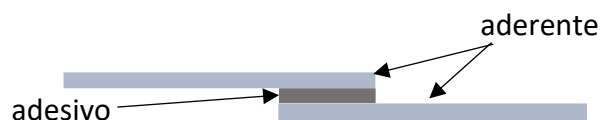


Figura 1 - Exemplo de uma ligação adesiva simples

Para a elaboração correta e consciente de uma ligação adesiva é requerido o conhecimento de várias áreas específicas. Neste sentido, é necessária uma análise física, que irá englobar o estudo da disposição da junta, assim como uma análise da superfície a ser unida, química e mecânica, para análise de como o material aderente e adesivo se irão comportar [4].

Anteriormente à caracterização prática do fenómeno de adesão através de ensaios para quantificar a força ou energia envolvida no conjunto (aderente e adesivo), é necessária a compreensão dos fenómenos envolvidos e interações entre materiais. Desta forma, é possível caracterizar a ligação adesiva de forma prática e teórica. O fenómeno da adesão presente nas ligações adesivas é um processo de interação entre moléculas, resultante de forças intermoleculares entre elas estabelecidas. Em contraste, no interior do adesivo e do aderente encontram-se forças de coesão, que mantêm o material coeso. Na interface, os adesivos ligam-se através de ligações químicas dependendo da natureza química das superfícies.

As ligações podem-se dividir em primárias ou secundárias. No tipo de ligações primárias, que serão de energia de ligação mais forte, existe partilha ou transferência de eletrões entre os átomos envolvidos e, como tal, estas incluem as ligações covalentes, iónicas e metálicas. Embora sejam ligações com energia de ligação muito forte, operam em distâncias curtas. Por outro lado, as ligações secundárias não dependem deste mesmo fator, mas sim da interação entre os dipolos atômicos e moleculares. Nesta vertente, existem as forças de Van der Waals e as ligações de hidrogénio. Ao contrário das ligações primárias, as secundárias atuam em distâncias mais longas embora sejam mais fracas [2]. Na Figura 2 é possível visualizar como variam as energias e as distâncias de ligação de acordo com os diferentes tipos de interação.

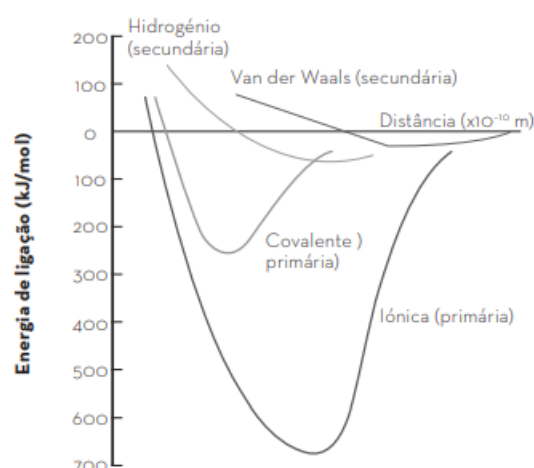


Figura 2 - Energia de ligação de acordo com a distância entre dois corpos [2]

2.1.2 Comparação com as técnicas de ligações mecânicas

O objetivo de uma ligação mecânica será resistir às solicitações aplicadas com grande fiabilidade, tendo em conta a geometria, materiais a unir e ainda o peso do conjunto. No que diz respeito às ligações mecânicas utilizadas nos últimos tempos, foram de extrema importância as ligações rebitadas no século XVIII e as ligações soldadas no século seguinte, enquanto as ligações adesivas são de elevada importância e utilização no século XXI. Repare-se que a massa específica de cada componente utilizado tem vindo a diminuir. Geralmente uma estrutura mais leve, como por exemplo na indústria automóvel, contribuirá para um menor consumo de combustível, levando a que todas as uniões presentes no automóvel sejam pensadas em prol da redução de peso. Neste sentido, são preferíveis processos de ligação envolvendo menos peso, como é o caso da ligação adesiva, que permite a utilização de conjuntos mais leves sem perdas consideráveis de resistência estrutural, com valores superiores de resistência específica quando comparada com a ligação aparafusada ou rebitada [1]. A ligação adesiva distingue-se dos processos de ligação mecânica principalmente nas suas características mecânicas como:

- A distribuição mais uniforme de tensões ao longo da área colada, o que irá permitir uma maior rigidez e transmissão de carga. É de salientar que as distribuições de tensões serão mais uniformes ao longo da largura da junta, como se verifica na Figura 3;
- Capacidade do amortecimento de vibrações, tolerando absorção de tensões com o efeito de melhorar a resistência à fadiga dos aderentes ligados.

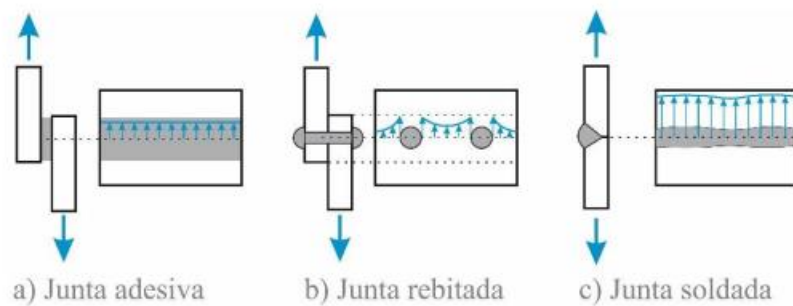


Figura 3 - Distribuição de tensões em juntas adesivas (a), rebitadas (b) e soldadas (c) [5]

Para um melhor entendimento, a Tabela 1 descreve as principais diferenças entre os três métodos de ligação mais comumente utilizados.

Tabela 1 - Comparação entre os métodos de ligação mais utilizados (adaptado de [1])

Ligações adesivas	Ligações soldadas	Ligações aparafusadas
Junta permanente	Junta permanente	Permite desmontagem
Boa distribuição de tensões pela área de colagem	Cria tensões térmicas no interior da estrutura	Pontos de tensão na área de contacto de fixação
Junta praticamente invisível com boa aparência	Aparência satisfatória (dependente do processo utilizado e qualificação do soldador)	Descontinuidade na superfície dos materiais unidos
Ideal para unir materiais diferentes	Limitação a pares de materiais similares	Permite unir materiais dissimilares
Fraca resistência a altas temperaturas	Resiste a elevadas temperaturas embora esteja sujeita a modificações do tipo de estrutura em materiais metálicos	Resistente a altas temperaturas
Alta resistência à corrosão e fadiga	Resistência à fadiga, no entanto necessita de tratamentos para a majorar	Pouca resistência à fadiga, afrouxamento da ligação; Permite criação de pares galvânicos, dando origem a corrosão
Tratamentos de superfície a ligar podem ser complexos	Preparação dos bordos para posterior união	Furação necessária e por vezes também roscagem
Aplicação de ensaios não destrutivos nem sempre é possível	Ensaio não destrutivos aplicáveis à maioria das ligações (ex: líquidos penetrantes)	Junta confiável quando controlado o binário de aperto

2.1.3 Esforços e modos de rotura

Raramente existe uma distribuição uniforme de tensões com aplicação de esforços externos. Ao invés disso, a distribuição variável de tensões é a mais comum de ser encontrada. Uma vez que a rotura/fratura ocorre quando a tensão local excede a resistência local do material, as concentrações de tensões têm um papel de grande influência na resistência à rotura de uma junta adesiva [1]. Existem vários modos de carregamento elementares a uma ligação adesiva estrutural tais como: tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento. Com estes modos de carregamento a ligação adesiva poderá sofrer rotura: adesiva, coesiva, pelo aderente, ou mista.

2.1.3.1 Esforços numa ligação adesiva

Numa junta adesiva, os esforços fundamentais que poderão estar presentes são os que se apresentam:

- **Tração**

Estes esforços atuam perpendicularmente à face de contacto mútuo dos aderentes, sendo que a distribuição de forças ao longo do comprimento da colagem será uniformemente distribuída.

- **Compressão**

À semelhança dos esforços de tração, os esforços de compressão atuam também de forma uniforme ao longo do comprimento, mas no que diz respeito ao sentido de atuação da força, esta apresenta o sentido oposto comprimindo o adesivo. Num caso de compressão pura a junta adesiva não precisaria de adesivo, uma vez que esta força atua no sentido de aproximar os dois aderentes.

- **Corte**

Os esforços de corte ocorrem no sentido de provocar o escorregamento entre os dois aderentes. Este é um dos esforços mais importantes de analisar, uma vez que as juntas adesivas mostram boa resistência aos esforços de corte, daí também advém que a maioria das geometrias utilizadas se encontre sujeita a este tipo de esforços [5].

De acordo com a Figura 4 verifica-se que existem nas extremidades, tensões mais elevadas que no centro da colagem. Este comportamento deve-se ao efeito de deformação diferencial de cada um dos aderentes, que se irão deformar a taxas diferentes ao longo do comprimento de contacto [6].

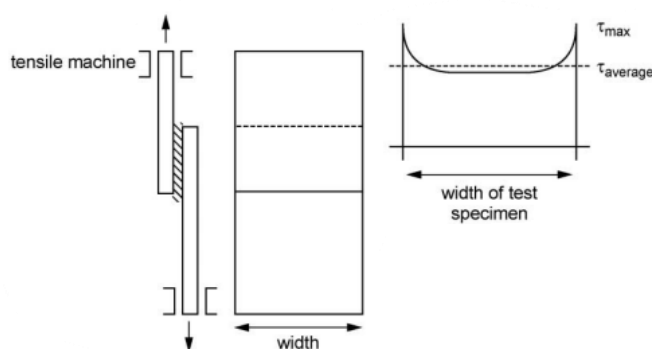


Figura 4 - Esforço de corte numa ligação adesiva [1]

- **Clivagem**

Este esforço provocado no adesivo é em parte muito similar ao esforço de tração, provocado por forças perpendiculares ao plano de ligação, mas neste caso é aplicada uma carga numa das extremidades da junta, levando a uma concentração de tensões apenas de um lado da camada de adesivo. Neste sentido, registam-se tensões normais ao longo da linha de adesão, com tração na zona da solicitação e compressão na zona adjacente, como se pode verificar na Figura 5.

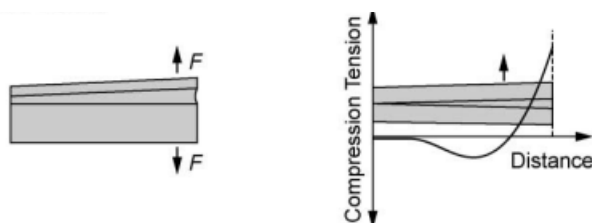


Figura 5 - Esforço de clivagem numa ligação adesiva [7]

- **Arrancamento**

Os esforços de arrancamento são muito similares aos esforços de clivagem. No entanto, este tipo de esforço só é possível de testemunhar quando um ou ambos os aderentes são flexíveis. O ângulo de separação entre os dois aderentes será superior no esforço de arrancamento ao observado no de clivagem. Juntas com solicitações de arrancamento e clivagem oferecem inferior resistência, uma vez que contêm concentração de tensões numa das extremidades da ligação. Neste sentido, os esforços que conduzam a clivagem ou arrancamento devem ser evitados em juntas adesivas.

2.1.3.2 Modos de rotura

Na solicitação de uma junta adesiva podem resultar modos de rotura diferentes. A norma ASTM D5573 – 99 tem como por objetivo classificar os modos de rotura em juntas de plástico reforçado com fibras (FRP) [8]. Estão registados 7 modos de rotura, embora

sejam mais frequentes acontecerem os quatro modos de rotura descritos de seguida e apresentados na Figura 6.

Uma junta bem preparada e dimensionada, com o adesivo em perfeitas condições conforme enunciado nas propriedades do adesivo, leva a que ocorra uma rotura coesiva. Quando este modo de rotura é observado significa que, a junta utiliza a totalidade da resistência dos materiais constituintes da junta.

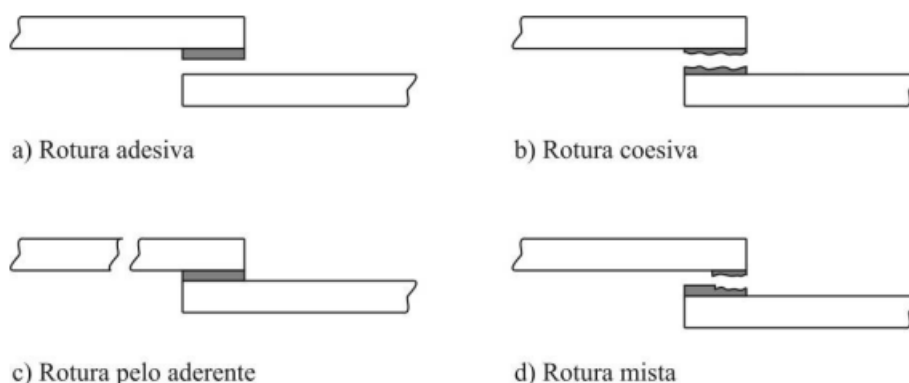


Figura 6 - Modos de rotura mais comuns em juntas adesivas; rotura adesiva a), rotura coesiva b), rotura pelo aderente c), rotura mista d) [8]

- **Rotura coesiva**

O modelo de rotura coesiva remete para a quebra da ligação no material adesivo, isto é, ocorre no interior do adesivo. É possível observar este modo de rotura quando as duas superfícies da ligação, permanecem ambas cobertas por adesivo, pelo que a resistência interna do adesivo é inferior à resistência das ligações adesivo/aderente (forças de adesão superiores à força de coesão do adesivo), como se verifica na Figura 6 (b).

- **Rotura adesiva**

A rotura adesiva ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes (Figura 6 a). Ao contrário do que acontece na rotura coesiva, haverá pelo menos uma superfície de aderente que não irá apresentar resíduos de adesivo em toda a extensão da junta. Neste modo de rotura adesiva, as forças de adesão são inferiores às forças coesivas do adesivo. Uma das causas principais para haver este modo de rotura é a má preparação da superfície, que fará com que a interação do adesivo com a superfície do aderente não esteja otimizada.

- **Rotura pelo aderente**

O modo de rotura pelo aderente será o mais desejável, uma vez que nestas condições a junta está a tirar partido da máxima resistência do aderente e demonstra que foi corretamente projetada. A ocorrência deste modo de rotura significa que existe uma

rotura coesiva no aderente e as forças da ligação adesiva e coesiva do adesivo são superiores à resistência do aderente. Este tipo de rotura está representado na Figura 6 (c).

- **Rotura mista**

Enquanto a rotura coesiva ocorre no adesivo, com evidência de adesivo nas duas superfícies após arrancamento, e na rotura adesiva regiões dos aderentes não contêm adesivo, numa rotura mista ocorrem os dois modos de rotura em simultâneo. Neste sentido, e com o auxílio da Figura 6 (d), observa-se que na mesma superfície de ligação ocorre rotura coesiva e adesiva do adesivo. Este fenómeno pode ter origem numa má preparação de uma região de superfície [8].

2.1.4 Efeito das variáveis geométricas na resistência de ligação

A geometria de uma junta irá ser um dos parâmetros essenciais a definir, uma vez que, em função deste parâmetro, as tensões irão ser distribuídas de diferentes formas, resultando em diferentes resistências de ligação. Consideram-se as seguintes variáveis as mais relevantes para a resistência da ligação:

- **Configuração de junta**

Na indústria estão presentes várias configurações de junta, sendo que a configuração escolhida irá de encontro ao tipo de solicitações presentes no meio em prol de incrementar a sua resistência. Na Figura 7 é possível observar as configurações de junta mais comuns. Um dos tipos de junta mais utilizados na indústria é a junta de sobreposição simples, face à sua facilidade de fabrico. Esta configuração permite que os esforços nos aderentes sejam transferidos através de tensões de corte no adesivo [9]. No entanto esta configuração irá dar origem a um momento de flexão visto que a carga aplicada nos aderentes não irá atuar na mesma linha de ação. Em prol da redução do efeito de flexão, existe a junta de sobreposição dupla. Juntamente a esta vantagem de redução de momento de flexão, existe também um incremento na resistência da junta, uma vez que é duplicada a área de ligação. Por outro lado, há uma maior dificuldade na sua produção e maior tempo de fabrico. Em conjunto para a resolução de problemas com efeito de flexão existe a junta de ressalto, que irá contribuir para o alinhamento da solicitação.

As juntas de sobreposição simples, graças às suas descontinuidades geométricas, estão sujeitas a fortes tensões de arrancamento. As juntas de chanfro exterior atenuam o efeito das descontinuidades abruptas, através da maquinagem de chanfros nessas zonas, o que levará a uma distribuição de tensões mais uniforme.

A junta em degrau, tal como as juntas de chanfro, tenta atenuar as descontinuidades abruptas, tornando-as mais graduais, ou seja, descontinuidades menores. Com esta geometria verifica-se também um aumento da área de união da junta, o que aumenta

assim a resistência desta e produz uma distribuição de tensões mais uniforme. Devido à presença do degrau, é necessário um processo de maquinagem extra, o que introduz mais custos e maior tempo de fabrico.

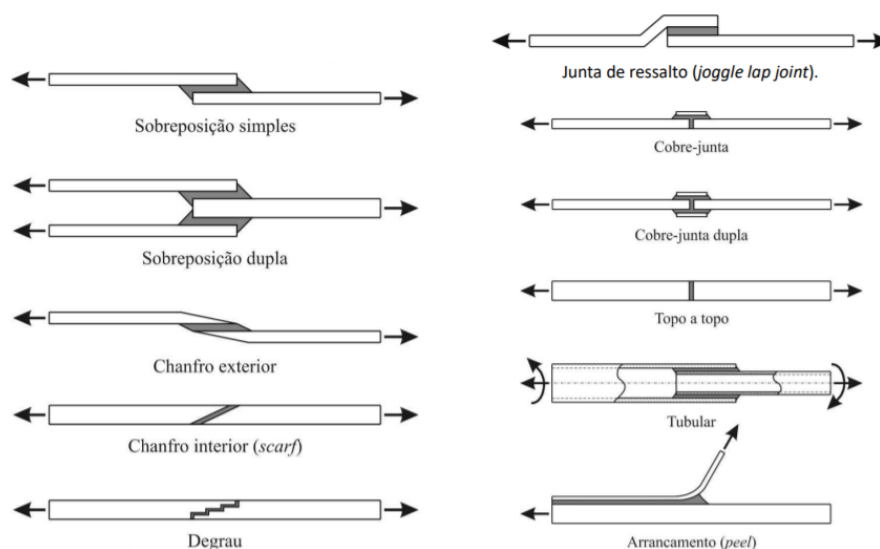


Figura 7 - Configurações de junta mais comuns [10]

A junta mais simples de fabricar é a junta topo a topo. Porém, esta não é eficiente, pois a área de adesão, além de ser menor, é alvo de grandes concentrações de tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da ligação. Uma outra desvantagem deste tipo de juntas passa por não conseguir suportar esforços à flexão. Neste sentido, existem as juntas com cobre-junta e cobre-junta dupla, que visam conferir maior resistência à junta através de um terceiro ou quarto elemento, respetivamente. A utilização dos cobre-juntas irá resultar em menor expressão do efeito de flexão.

A junta tubular é utilizada na união de tubos, hastes ou veios. Neste sentido, existe a necessidade de garantir a concentricidade entre os aderentes e o alinhamento dos esforços atuantes no eixo de revolução de forma a minimizar as forças de arrancamento.

A junta de arrancamento é utilizada quando existe a ligação de um aderente rígido, de espessura maior, e um aderente flexível, de espessura menor. A solicitação do aderente fino leva a uma distribuição de tensões mais concentrada no mesmo, criando esforços de arrancamento.

- **Comprimento e largura de sobreposição**

Estas variações geométricas são das mais importantes para uma junta adesiva, uma vez que o aumento do comprimento e largura resultará num aumento da área disponível para distribuição de tensões. No sentido de maximizar a resistência da ligação aumentam-se as duas dimensões anteriormente referidas, sendo que o aumento da largura de sobreposição irá contribuir mais para a resistência da junta que um aumento do comprimento de sobreposição, como comprova um estudo efetuado por Gültekin et

al. [11]. Neste trabalho é feita uma análise numérica e experimental variando o comprimento e largura, utilizando o alumínio série 2024-T3 e o adesivo DP460. Os provetes do Tipo I correspondem aos testados com a variação da largura e com valores de comprimento iguais, enquanto no Tipo II realizou-se o contrário, variando o comprimento. No tipo III é feita pelo mesmo raciocínio apenas diferem a grandeza dos valores fixos de comprimento e largura. A Tabela 2 resume os valores da medição dos provetes ensaiados em função da resistência média da resistência de ligação.

Tabela 2 - Análise da variação da resistência de ligação com a variação de largura e comprimento de junta (adaptado de [11])

Junta	W-L	Área de Contacto [mm ²]	Resistência da ligação [N]
Tipo I a	25-25	625	9094
Tipo I b	20-25	500	5381
Tipo I c	15-25	375	4311
Tipo I d	10-25	250	3980
Tipo I e	5-25	125	1827
Tipo II a	25-25	625	9094
Tipo II b	25-20	500	6390
Tipo II c	25-15	375	5177
Tipo II d	25-10	250	5039
Tipo II e	25-5	125	2507
Tipo III a	25-20	500	6390
Tipo III b	20-20	400	5006
Tipo III c	15-20	300	4048
Tipo III d	10-20	200	2903
Tipo III e	5-20	100	1371
Tipo IV a	20-25	500	5381
Tipo IV b	20-20	400	5006
Tipo IV c	20-15	300	4692
Tipo IV d	20-10	200	3709
Tipo IV e	20-5	100	2055

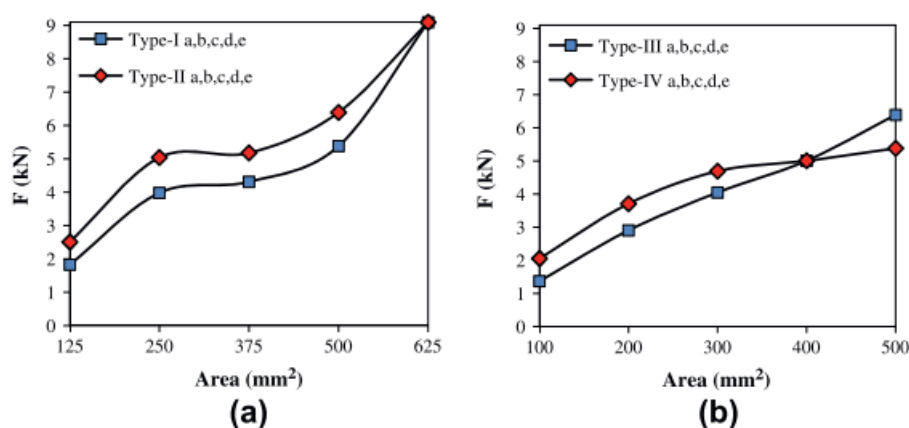


Figura 8 - Variação da resistência de ligação consoante a variação da largura e comprimento: provetes tipo I e II a), provetes tipo III e IV b) [11]

Na Figura 8 (a) é possível verificar que, na prática, o aumento da largura de sobreposição terá maior impacto na resistência da ligação do que o comprimento de ligação. A Figura 8 (b) permite ter uma melhor perceção deste efeito, uma vez que o aumento da largura de sobreposição permite maior resistência relativamente ao comprimento de sobreposição.

- **Espessura de adesivo**

A espessura de adesivo está relacionada com a quantidade de adesivo a ser acrescentado entre os dois aderentes. A alteração deste parâmetro inadequadamente poderá resultar em juntas ineficientes. Nas juntas de sobreposição simples, existem tensões de arrancamento e de corte ao longo da espessura do adesivo. Os valores destas tensões atingem os seus máximos junto da interface. De um modo geral, para a maior parte dos adesivos estruturais, a espessura recomendada para obtenção máxima da sua resistência é de cerca de 0,2 mm. A Figura 9 faz verificar esta condição, para uma de junta de sobreposição simples de alumínio, com a variação da espessura de adesivo de resina de epóxico entre os valores 0,03 mm e 1,3 mm.

Quanto maior a espessura do adesivo utilizada, menor será a transmissão de cargas para um dado deslocamento aplicado à junta. Para além deste efeito, a concentração de tensões nas extremidades do comprimento de sobreposição é menor. Para uma maximização da resistência da junta existe uma espessura ótima a utilizar dependendo dos materiais a ligar e do próprio adesivo.

Em suma, a espessura utilizada, a isenção de vazios e a uniformidade da espessura da camada de adesivo, são características importantes para conferir resistência a uma junta adesiva.

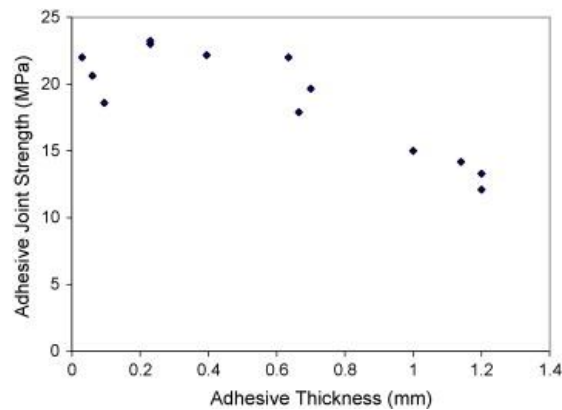


Figura 9 - Efeito da resistência de ligação em função da espessura de adesivo [12]

• Geometria do filete

A forma geométrica das extremidades da camada do adesivo tem influência na resistência da junta e de como a fratura do adesivo se irá iniciar, sendo esta alvo de uma concentração de tensões nessa mesma zona. A modificação dessa geometria irá contribuir também para uma distribuição de tensões de diferentes formas.

Num breve exemplo prático, Lang e Mallick [13] efetuaram um estudo de como a distribuição de tensões se propaga ao alterar o ângulo de entrada do adesivo em juntas com filete de adesivo. Concluiu-se, neste estudo, que a presença de filete nas extremidades do adesivo contribui para a redução dos esforços ao arrancamento, como também para a redução da concentração de tensões em juntas de sobreposição simples. Com a geometria triangular de filete utilizada, menores ângulos de entrada resultam em tensões máximas inferiores.

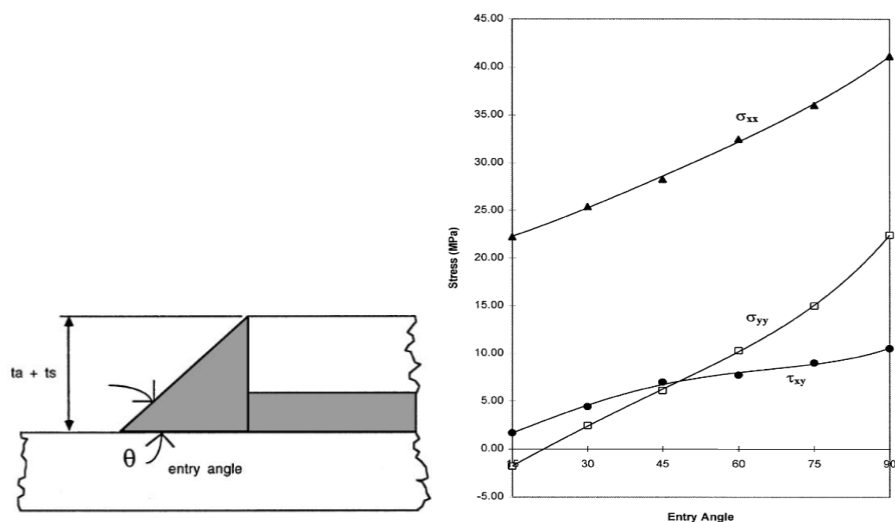


Figura 10 - Influência do ângulo de entrada na distribuição de tensões [5]

2.1.5 Efeito dos materiais na resistência da ligação

Nas ligações adesivas não é só importante o adesivo a ser selecionado para unir dois aderentes, mas também é de extrema importância o conhecimento do material dos aderentes, pois as propriedades mecânicas do adesivo e aderente serão responsáveis pela resistência da junta. Contudo, se o adesivo for adequado para os dois materiais a unir, a possibilidade de obter a mesma resistência destes utilizando materiais dissimilares ou similares será elevada [14].

Quando uma ligação adesiva é submetida a uma solicitação exterior, esta fará com que as tensões sejam distribuídas pelos elementos (adesivo e aderentes) de diferentes formas. Por exemplo, na solicitação ao corte de uma junta adesiva, a utilização de aderentes rígidos irá fazer com que a resistência de ligação aumente, uma vez que irá ser promovida uma menor deformação elástica no aderente, proporcionando menor deformação do aderente ou movimentação relativa. Consequentemente, este comportamento irá contribuir para uma menor concentração nas extremidades da ligação, contribuindo para uma distribuição de tensões mais uniforme. Por outro lado, a utilização de materiais mais flexíveis como aderentes, leva a que a sua deformação elástica promova uma maior concentração de tensões [15].

A utilização de aderentes com materiais dissimilares é menos eficiente do que a utilização de materiais iguais, uma vez que as tensões deixam de ser simétricas em relação ao centro da camada adesiva, com maiores tensões presentes no lado do aderente menos rígido [16].

2.1.6 Aplicações das juntas adesivas

Com a valência de unir materiais similares e dissimilares, vêm também agregadas variadas aplicações em diferentes indústrias. No ramo da indústria aeroespacial, aeronáutica, automóvel, como em muitas indústrias, a redução de peso está inerente a um menor consumo energético ou de combustíveis.

A utilização de adesivos estruturais está presente na indústria de produtora de energia através das pás das turbinas utilizadas para fazer mover o eixo de rotação para produção de energia. Uma pá de turbina eólica é normalmente produzida a partir de duas carapaças, unidas através de um adesivo estrutural. Esta solução é escolhida principalmente pela capacidade de ligação das duas partes, com a vantagem de que a ligação adesiva proporcionará uma transmissão de esforços mais uniforme e com menores concentrações de tensões comparativamente aos métodos de ligação mecânica tradicionais.

A partir da Figura 11 é possível observar uma pá de turbina eólica, juntamente com um seccionamento da mesma. O adesivo estrutural é usado para fazer a ligação entre o

perfil interior, que irá reforçar a estrutura e conferir estabilidade dimensional à estrutura, e as duas carapaças da pá da turbina eólica [17].

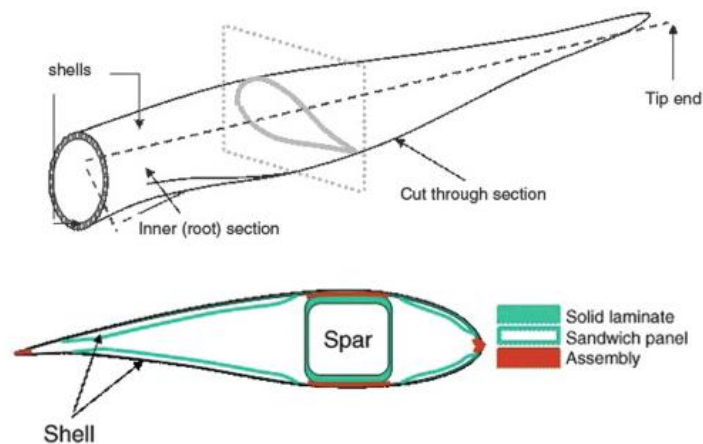


Figura 11 - Pá de uma turbina eólica com seccionamento [17]

Na indústria aeroespacial, a ligação adesiva está presente em naves espaciais, através da fixação dos blocos refratários à nave, vindo resolver um dos problemas que havia na fixação de dois materiais sob condições extremas [5]. Há vários problemas desde a concentração de tensões de outros métodos na fixação dos blocos ou incapacidade de unir materiais dissimilares. Por outro lado, as temperaturas que se fazem sentir nesses mesmos blocos são demasiado elevadas, uma vez que estão em contacto direto com o ar a altas velocidades. Com o desenvolvimento de adesivos à base de sílica e resina fenólica já é possível unir o material cerâmico do bloco ao material metálico do chassis da aeronave [5]. Na Figura 12 (a) verifica-se a montagem dos blocos cerâmicos na carapaça frontal da aeronave, enquanto na Figura 12 (b) a mesma carapaça já se encontra com todos os blocos montados.



Figura 12 - Carapaça frontal da aeronave Beagle 2, durante montagem a), após montagem b) [5]

Na Indústria automóvel a ligação adesiva desempenha um papel preponderante uma vez que, é necessária a união de vários materiais dissimilares. Num automóvel é possível encontrar materiais como aço, alumínio, magnésio e várias classes de polímeros. Neste sentido, nem sempre é possível unir estes materiais mutuamente por processos de ligação tradicionais como as ligações aparafusadas e soldadas. Em paralelo à sua

diversidade de aplicação, vem acoplado o aumento da segurança em acidentes de viação, rigidez da estrutura, e ainda redução de ruídos e vibrações. Ainda se acrescenta o acabamento superficial quase invisível das ligações adesivas. Para aumentar a rigidez das peças a unir a painéis externos e reduzir vibração e ruído dessas peças, são usados os chamados adesivos anti vibração. Este tipo de adesivos tem de compensar tolerâncias e garantir uma superfície de primeira classe dos painéis exteriores. Portanto estes terão de preencher grandes espaços, sem prejudicar a resistência da ligação.

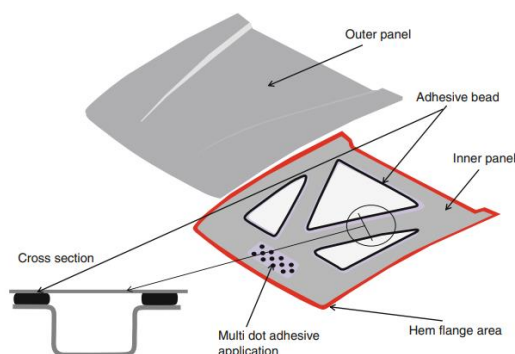


Figura 13 - Aplicação de adesivo anti vibração no capot dianteiro de automóvel [5]

Neste campo, muitas das peças são obtidas por estampagem. A utilização deste processo de fabrico obriga à utilização, muitas vezes, de óleos lubrificantes para obter peças sem defeitos durante a conformação plástica. Com esta adversidade e a necessidade de utilizar adesivos como forma de unir peças com estas características, foram criados adesivos compatíveis com a presença desses mesmos óleos, de forma a conseguir uma ligação fiável e de longa durabilidade. A Figura 13 ilustra a utilização de uma peça obtida pelo processo de estampagem que necessita dessa mesma atenção e também contará com propriedades anti vibração e de impermeabilização do adesivo [5].

Um exemplo de uma outra utilização no mesmo ramo, trata-se do vidro dianteiro (para-brisas) que não poderia ser ligado à chapa do automóvel senão por ligação adesiva. Neste sentido considera-se esta como uma das mais importantes aplicações das ligações adesivas num automóvel.

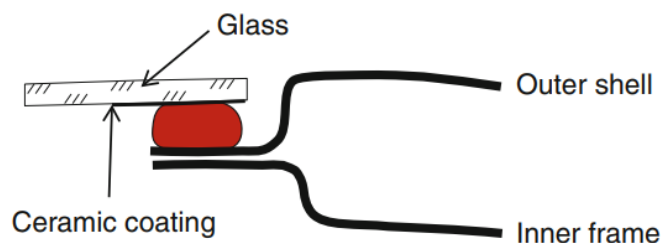


Figura 14 - Aplicação de adesivos no vidro frontal de um automóvel [5]

Na Figura 14 está representada a vista em corte da aplicação do adesivo de poliuretano mono-componente (a vermelho) entre o vidro dianteiro e a chapa de aço do automóvel.

2.2 Caracterização mecânica e de fratura de adesivos

Previamente à aplicação de uma junta adesiva, têm de ser efetuados testes de avaliação do seu desempenho de forma a avaliar vários parâmetros da adesão. As propriedades do adesivo podem variar na sua grandeza pelo que a seleção adequada dos adesivos é essencial para uma aplicação bem-sucedida. Neste sentido, para determinar os esforços e comportamento das tensões numa junta adesiva numa variedade de configurações, é necessária a caracterização do comportamento do adesivo para clarificar as suas propriedades mecânicas [18]. A caracterização de um adesivo remete para a determinação de parâmetros de carácter elástico, plástico e de fratura, sendo que cada um dos parâmetros referidos envolve a realização de um ensaio específico.

A caracterização à fratura de uma ligação adesiva é importante para o projeto adequado da junta no seu meio. Para tal, é essencial a determinação da taxa crítica de libertação de energia ou tenacidade à fratura (G_c). O crescimento da fenda pode desenvolver-se sob três modos diferentes, o modo I, modo II e modo misto [19]. O modo I é o modo de abertura, o modo II é um modo de corte, enquanto o modo misto resulta da combinação dos modos I e II. Para medição da energia de fratura de uma ligação adesiva, os provetes são solicitados segundo condições específicas a fim de promover uma propagação de fissura. Através do ensaio *double-cantilever beam* (DCB) é possível o cálculo da taxa crítica de libertação de energia de deformação em modo I (G_{Ic}). Para calcular a taxa crítica de libertação de energia em modo II (G_{IIc}) pode ser utilizado por exemplo, o ensaio *end-notched flexure* (ENF). Para determinação da resistência em modo misto são usados provetes similares ao modo I e II, sendo ensaiados por exemplo por ensaio *mixed-mode bending* (MMB) ou *mixed-mode flexure* (MMF) [5].

2.2.1 Propriedades mecânicas à tração

Entre os ensaios destrutivos, o ensaio de tração é utilizado para a obtenção de dados sobre a resistência de adesivos. Para a caracterização das propriedades mecânicas à tração de adesivos, recorre-se a dois tipos de ensaios, o ensaio do provete maciço (*bulk*) ou juntas topo a topo (*butt-joints*). Os procedimentos e as dimensões do provete para ensaio utilizando juntas topo-a-topo estão dispostos na norma ASTM D897. O ensaio de tração em juntas topo a topo consiste na união de dois aderentes cilíndricos com a utilização de uma camada de adesivo entre eles. É utilizado um espaçador não só para definir a espessura de adesivo pretendida como também proporcionar o alinhamento dos dois aderentes. Com a aplicação de uma força perpendicular à camada de adesivo, é determinada a resistência à tração do adesivo. Este método de ensaio apresenta algumas dificuldades na obtenção de propriedades mecânicas à tração, devido a questões relacionadas com o rigor de fabrico da junta e desalinhamentos ocorridos durante o ensaio que levam à concentração de tensões [19].

O ensaio de tração de provetes *bulk* está descrito na norma ISO 527 com as respetivas dimensões dos provetes e condições de ensaio para a determinação das propriedades à tração. Podem ser utilizadas duas técnicas na obtenção destes provetes: fabrico por injeção, quando os adesivos se apresentam em forma líquida, ou por pressão entre pratos quando a viscosidade é algo elevada e o processo de injeção torna-se mais difícil. Na Figura 15 está representada a geometria de provete utilizada para adesivos rígidos, pela norma ISO 527.

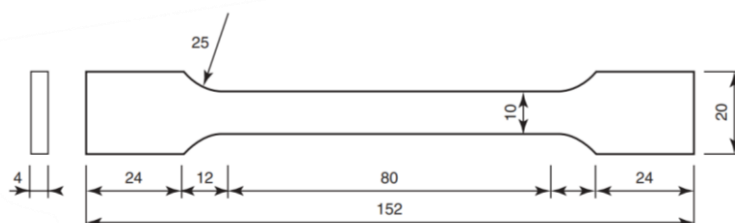


Figura 15 - Dimensões em mm de provete longo de adesivo rígido segundo ISO 527 [19]

A determinação das propriedades do ensaio de tração é feita de acordo com a norma ISO 527, a partir dos dados obtidos do ensaio de tração. A determinação do módulo de elasticidade longitudinal (E) deve ser obtida no intervalo entre 0,05% e 0,025% de deformação. O cálculo de $\sigma_{\text{máx}}$ é feito a partir da força máxima dividida pela secção transversal da zona de secção constante do provete de adesivo. Deste modo conseguem-se determinar as propriedades descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades extraídas do ensaio tração

Propriedade	Equação de cálculo	Unidade
Módulo de elasticidade longitudinal	$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$	GPa
Tensão máxima/rotura à tração	$\sigma = \frac{F}{A}$	MPa
Deformação de rotura à tração	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \Delta l = l - l_0$	

2.2.2 Propriedades mecânicas ao corte

Esta caracterização é muito importante uma vez que as tensões irão apresentar distribuições mais benéficas. Neste sentido, o projeto de juntas adesivas visa a que as ligações estejam essencialmente sujeitas a este tipo de esforço.

Para melhor determinar as propriedades mecânicas ao corte têm-se ensaios como: *Iosipescu* ou *V-notched beam shear method*, ensaio de borboleta ou *notched plate shear*

method (Arcan), ensaio de provetes de adesivo em bruto à torção, ensaio em juntas topo a topo em torção ou *napkin ring test*, e ainda o ensaio TAST.

Ensaio Iosipescu ou *V-notched beam shear method*

Trata-se de um ensaio para analisar a tensão de corte usando um provete com entalhe em V ou corte de placa dentada, inicialmente projetado para metais em 1967, e posteriormente adaptado para compósitos laminados na norma ASTM D5379.

O provete é carregado em quatro pontos, criando uma área de corte uniforme entre os entalhes, uma vez que os momentos fletores em ambos os lados se anulam. Por outro lado, como o provete é carregado nas bordas pode ocorrer flexão deste ao longo do seu eixo longitudinal. Para a redução deste problema é recomendada a utilização de provetes com cerca de 3 a 4 mm de espessura.

Na presença de adesivos muito flexíveis tais como poliuretanos, este poderá ser um método pouco adequado mesmo com espessuras elevadas. Embora tipicamente este tipo de ensaio crie uma concentração de tensões na raiz do entalhe, a tensão de corte calculada com a força e a área de secção transversal é considerada uma boa aproximação. Uma análise por elementos finitos permite corrigir o efeito de concentração de tensões [5].

As dimensões do provete são geralmente de 75 mm de largura, 20 mm altura e pelo menos 4 mm de espessura. Na Figura 16 é possível observar as forças aplicadas no ensaio por meio de setas e as respetivas dimensões do provete. A secção central fica sujeita a esforço de corte puro, visto que os momentos fletores provenientes de ambos os lados se anulam.

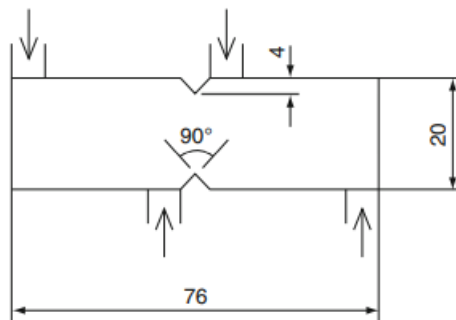


Figura 16 - Dimensões em mm e carregamento Iosipescu [19]

Na equação seguinte é possível extrair a tensão de corte (τ) através da divisão de carga aplicada (P) pelo produto da espessura pela distância entre entalhes (t_h).

$$\tau = \frac{P}{t_h} \quad (1)$$

Por outro lado, o módulo de corte (G) retira-se por:

$$G = \frac{P}{t_h (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{-45})} \quad (2)$$

A subtração entre parênteses diz respeito às deformações medidas com recurso a extensómetros colocados na face do provete a $+45^\circ$ e -45° relativamente ao seu eixo longitudinal.

Ensaio *Notched plate shear method*

Na análise das propriedades de corte do adesivo pode-se também considerar o ensaio conhecido por Arcan ou borboleta, normalmente utilizado para provetes de adesivo maciço. Graças à sua versatilidade, este ensaio é muito utilizado para obtenção de propriedades de materiais como plásticos, compósitos e adesivos [19]. Ao contrário do ensaio anterior, o ensaio Arcan é utilizado para baixas espessuras. Este tipo de ensaio colmata o problema anteriormente referido da concentração de tensões, tendo tensões de corte distribuídas mais uniformemente, o que em grande parte se deve ao ângulo do entalhe de aproximadamente 90° e o raio de concordância de 1,5 mm [20]. Os dois furos promovem a aplicação de um esforço de corte uniforme entre os dois entalhes. Esta configuração, em oposição ao ensaio losipescu, permite corrigir problemas de instabilidade nos bordos, permitindo a utilização de provetes com menor espessura [1].

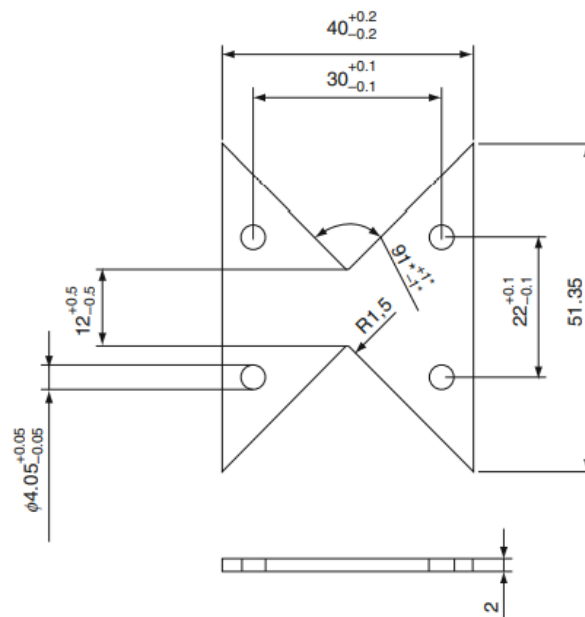


Figura 17 - Dimensões provete Arcan [5]

Encontram-se na Figura 17 as dimensões do provete para ensaio Arcan, sendo este produzido a partir de placas de adesivo. A medição da deformação poderá ser efetuada através de transdutores aplicados diretamente ao provete ou pela utilização de técnica de medição sem contacto, como por exemplo o registo fotográfico [21].

Ensaio *Thick Adherend Shear Test*

A reprodutibilidade do ensaio *Thick Adherent Shear Test* (TAST), faz com que este seja um dos mais populares no meio. A partir deste ensaio consegue-se retirar valores da tensão de corte máxima, do módulo de corte e deformação máxima de corte.

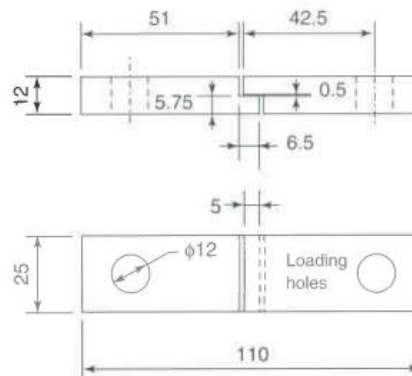


Figura 18 - Dimensão provetes TAST (norma ISO 11003-2) [19]

De acordo com a norma de fabrico destes provetes (ISO 11003-2), as medições e dimensões associadas apresentam-se na Figura 18.

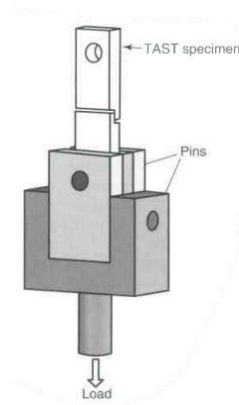


Figura 19 - Aplicação da carga em ensaio TAST [19]

Na Figura 19 está representada pela palavra “*Load*” a aplicação da força, “*TAST specimen*” o provete e “*Pins*” os pinos de fixação da amarra e provete. O ensaio consiste em aplicar uma força de tração na amarra de modo ao carregamento efetuado levar o provete até à rotura por corte.

Quanto à obtenção da tensão de corte, para o valor da tensão de corte obtida usa-se a seguinte equação:

$$\tau = \frac{P}{lb} \quad (3)$$

Onde, P é a força aplicada, o valor de b é igual à largura e l o comprimento.

Apesar de este método de ensaio ir de encontro a uma distribuição uniforme das tensões no adesivo, ainda assim existem concentrações de tensões especialmente nos bordos de sobreposição na interface. Em prol da atenuação deste problema, recomenda-se o arredondamento dos rebordos do aderente. No entanto, esta operação irá tornar ainda mais caro o fabrico dos provetes.

2.2.3 Propriedades de fratura em modo puro

A caracterização à fratura de juntas adesivas sob o modo puro I é muito estudada por diversos autores. No entanto, na camada adesiva de uma junta aplicada numa estrutura, a aplicação de uma carga resulta em propagações diferentes da fenda, ocorrendo tipicamente condições de carregamento de modo misto [5]. Neste sentido, os modos I e II e as suas combinações (modo misto) são os mais considerados na literatura, sendo menos abordado o modo III. No âmbito da caracterização de um adesivo à fratura, o cálculo da taxa de libertação de energia ou tenacidade à fratura G_c é um parâmetro fundamental.

Na Figura 20 encontram-se os modos puros de fratura I, II e III. Ao longo desta secção são explicados os ensaios mais relevantes para obtenção das propriedades de fratura em cada um dos modos puros.

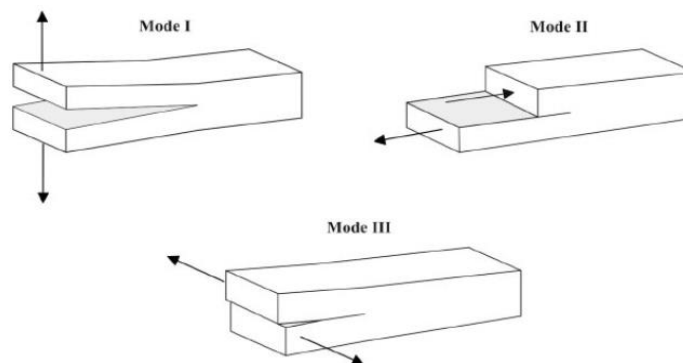


Figura 20 - Fratura modo I, modo II e modo III [22]

Enquanto no modo I a fratura se propaga no sentido da abertura da fenda, no modo II e III, ocorre o corte entre os dois planos. Segundo Griffith [18], a fratura ocorre quando existe uma quantidade suficiente de energia elástica no material para propagar uma fenda existente. Griffith conseguiu relacionar a tensão aplicada necessária para propagação da fenda:

$$\sigma_B = \sqrt{\frac{2\gamma E^*}{\pi a}}, \quad (4)$$

onde σ_b é a tensão aplicada, γ energia elástica de superfície, E^* é o módulo de elasticidade reduzido e a o comprimento de fenda.

A taxa de libertação de energia é dada por

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA}, \quad (5)$$

sendo que W [J] corresponde ao trabalho realizado por forças externas, U [J] faz corresponder à energia de deformação interna do sólido e dA [mm²] à variação superficial da fenda. A condição principal para não ocorrer propagação da fenda é que a taxa crítica de libertação de energia deve ser inferior à taxa de libertação de energia, ou

$$G < G_c. \quad (6)$$

Considerando a alteração do estado de tensão na vizinhança da extremidade da fenda, é possível caracterizar a fratura a partir do fator de intensidade de tensão, K

$$K = \sigma_R \sqrt{\pi a}, \quad (7)$$

tratando-se σ_R [MPa] da tensão remota aplicada.

2.2.3.1 Propriedades de fratura em modo I

Dos três modos de fratura independentes, o modo I é considerado mais importante do que os modos de fratura II e III, pois a tenacidade à fratura no modo I é geralmente menor que nos restantes modos enunciados, pelo que a fratura é facilmente iniciada e propagada sob aplicação de carga.

Os testes mais comuns de serem utilizados para obtenção de G_{Ic} são o *double-cantilever beam* (DCB) e o *tapered double-cantilever beam* (TDCB) descritos pelas normas americanas ASTM D3433-99, revista no ano de 2020, e pela ISO 25217:2009.

No ensaio DCB o provete é composto por dois aderentes com o mesmo comprimento (L) e a mesma espessura (t_p), tal como é possível observar na Figura 21. O comprimento que não conta com a presença de adesivo é considerado como pré fenda (a_0).

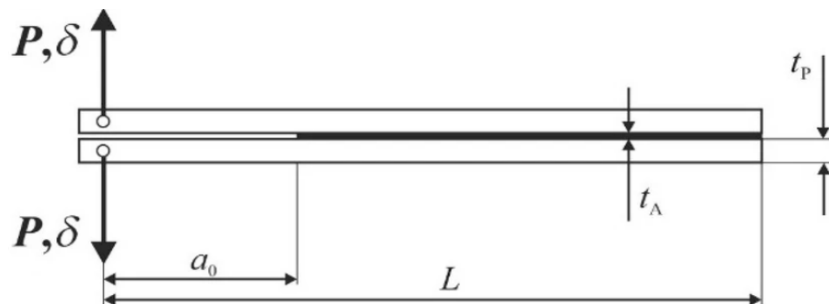


Figura 21 - Geometria de provete ensaio DCB [23]

De acordo com a geometria e as características do material, o provete é carregado pela abertura dos dois aderentes com velocidades de ensaio entre 0,5 e 3 mm/min. Durante o ensaio são registados os valores da carga (P) e o deslocamento (δ) durante a evolução da fenda (a) [22].

Em concordância com a norma ASTM D3433-99 é possível calcular a energia fratura do modo I pela equação de Irwin-Kies

$$G_{Ic} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{2b} \frac{dC_s}{da}, \quad (8)$$

onde $P_{m\acute{a}x}$ é a carga máxima aplicada, b corresponde à largura do provete, t_p corresponde à espessura e C_s corresponde à flexibilidade, determinada por

$$C_s = \frac{\delta}{P} = \frac{8a^3}{bt_p^3 E} + \frac{12a}{5t_p G}, \quad (9)$$

onde E e G correspondem aos módulos de elasticidade longitudinal e corte dos aderentes, respetivamente. Assim sendo, com base nas 2 equações anteriores, é calculada a energia de fratura em modo I segundo utilização de ensaio DCB em ligações adesivas por

$$G_{Ic} = \frac{4P_{m\acute{a}x}^2}{Eb^2} \left(\frac{3a^2}{t_p^3} + \frac{1}{t_p} \right). \quad (10)$$

A utilização destas equações no seguimento de cálculo da energia de fratura segue a *simple beam theory* (SBT), uma teoria para utilização em filmes de baixa espessura para adesivos frágeis [24].

O ensaio TDCB é normalizado pela mesma norma ASTM D3433-99, e conta com uma geometria diferente para obter G_{Ic} . Este ensaio permite a medição de G_{Ic} sem necessidade de monitorizar a durante o ensaio, embora existam métodos para o ensaio de DCB que não necessitam desta medição. Os provetes são compostos por duas secções de espessura constante na extremidade do provete com pré-fenda e uma secção de espessura crescente, traduzida por $h = f(a)$ influenciado pelo comprimento da fenda, tal como demonstrado pela Figura 22.

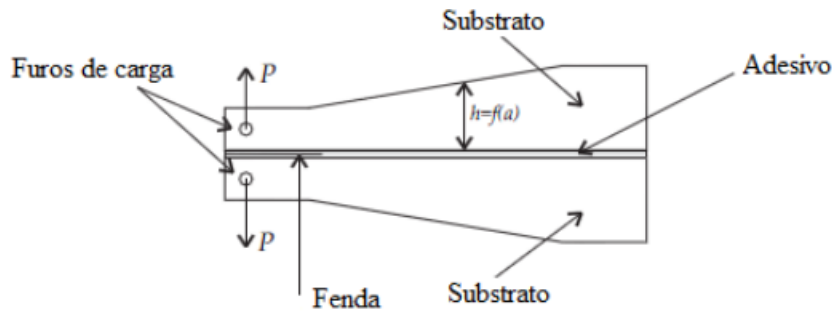


Figura 22 - Representação esquemática do provete TDCB [22]

A flexibilidade da viga é influenciada pelo momento fletor e pelas contribuições de corte para a deformação, sendo determinada por

$$\frac{dC}{da} = \frac{8}{Eb} \left(\frac{3a^2}{t_p^3} + \frac{1}{t_p} \right), \quad (11)$$

onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal. Com um perfil de alturas adequado em cada viga, Ripling et al. [25] sugeriram que dC/da permanece constante se m permanecer constante, ou

$$m = \frac{3a^2}{t_p^3} + \frac{1}{t_p} = \text{constante}, \quad (12)$$

significando que na abertura da fenda terá de haver uma variação linear de flexibilidade em função do comprimento da fenda. A partir da equação de Irwin-Keyes é obtida a energia crítica de fratura por

$$G_{Ic} = \frac{3P^2}{Eb^2} \left(\frac{3a^2}{t_p^3} + \frac{1}{t_p} \right) = \frac{4P^2}{Eb^2} m. \quad (13)$$

2.2.3.2 Propriedades de fratura em modo II

A fim de determinar propriedades de fratura em modo puro II, utilizam-se ensaios baseados na fratura interlaminar de compósitos, uma vez que até à presente data não existem normas para ensaio do modo de fratura II em ligações adesivas. Esta abordagem tem-se revelado bem-sucedida na adaptação do método utilizado em materiais compósitos. Neste sentido, existem alguns ensaios que podem ser adaptados, como por exemplo o *end-notched flexure* (ENF), *end-loaded split* (ELS) e o *four-point end-notched flexure* (4ENF) [26]. Na Figura 23 é possível observar os diagramas representativos de cada ensaio anteriormente referido.

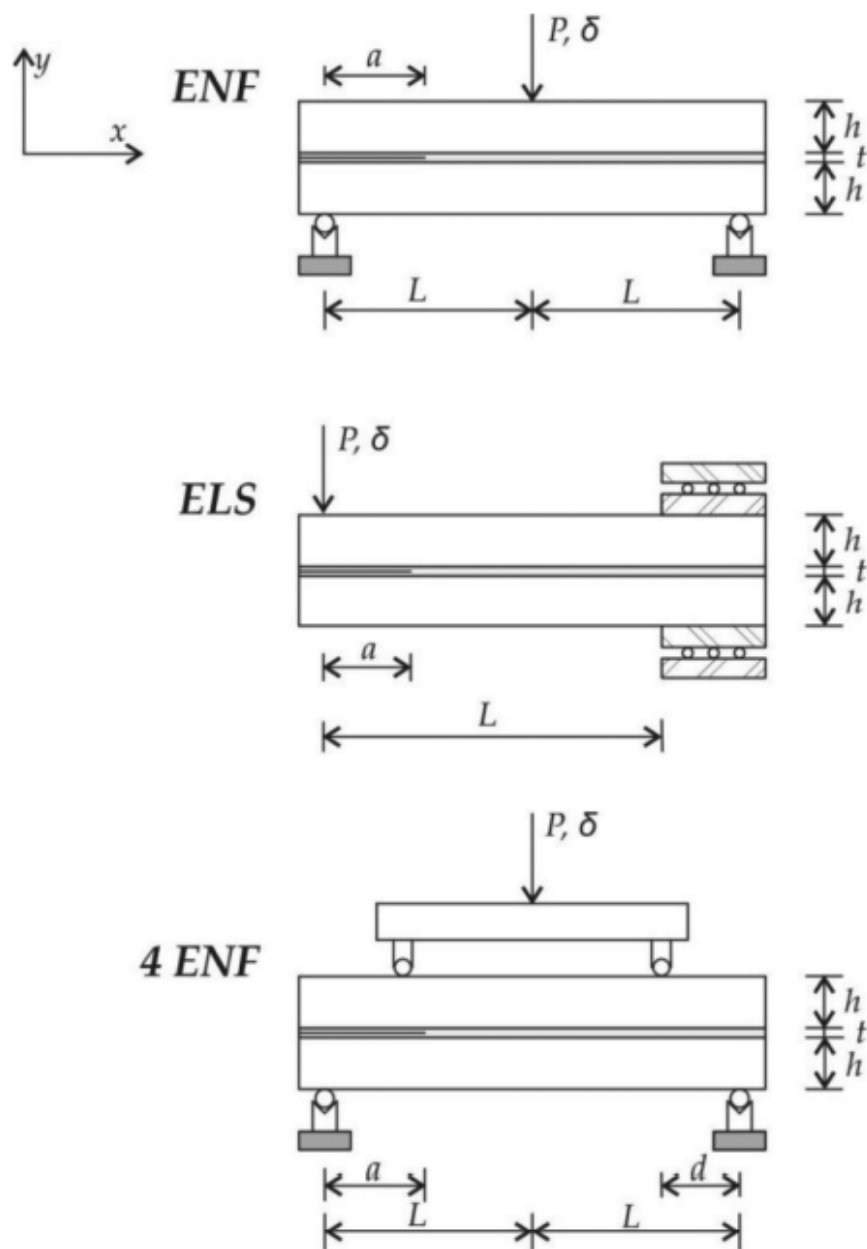


Figura 23 - Ensaios de caracterização de fratura em modo II para ligações adesivas [22]

A descrição de cada ensaio, e algumas vantagens e desvantagens, estão presentes na Tabela 4.

Tabela 4 - Características dos métodos ENF, ELS, 4ENF (adaptado de [27], [22], [26])

	ENF	ELS	4ENF
Descrição	Consiste na ligação de duas vigas, com exceção da região de pré-fenda, de espessura constante, com o provete apoiado nas duas extremidades. A aplicação de uma carga central causa esforços de corte na ligação. Existe uma grande tendência para a ocorrência de deformação plástica dos aderentes.	Ligação das duas vigas tal como no ensaio ENF. É feita a fixação firme com grampos do provete numa das suas extremidades, permitindo apenas movimentação no eixo horizontal. Esta fixação inclui a aplicação de um fator de correção. É aplicada uma força na extremidade oposta à fixação do provete.	O fabrico do provete segue em uniformidade tal como no ENF. A grande diferença é na forma de como é aplicada a força, neste caso através de dois pontos na região central. Os dois cilindros colocados em contacto com o provete são responsáveis por transmitir a força ao provete.
Vantagens	Método mais simples e utilizado para caracterização da energia de fratura G_{IIc} .	Permite propagação de fenda mais estável.	Permite propagação de fenda mais estável.
Desvantagens	Proporciona uma propagação de fenda instável.	Requer uma fixação mais cuidada e uma análise mais elaborada. Graças ao sistema de fixação poderá limitar deslocamento vertical. Dificuldades na determinação correta de G_{IIc} .	Apesar de ser o método mais sofisticado, através da introdução de um ponto adicional de carregamento, apresenta problemas com atrito na zona da pré-fenda.

O valor de G_{IIc} pode ser determinado com recurso a métodos semelhantes utilizados para determinar o G_{Ic} . No ensaio ENF, G_{IIc} pode ser obtido através métodos como o CCM (*compliance calibration method*), DBT (*direct beam theory*) e CBT (*corrected beam theory*).

O método CCM consiste na aplicação da expressão de Irwin-Kies nos dados do ensaio através de

$$G_{IIC} = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da}, \quad (14)$$

com a observância de $C=\delta/P$. O método DBT não inclui qualquer correção da dimensão a para a deformação de corte, ao contrário do que acontece no CBT, e estima o valor de G_{IIC} pela expressão

$$G_{IIC} = \frac{9P^2 \delta a^2}{2b(2L^3 + 3a^3)}. \quad (15)$$

A expressão com a utilização do CBT resulta em [26]:

$$G_{IIC} = \frac{9P^2 (a + 0,42\Delta_I)^2}{16h^3 E_x b^2}, \quad (16)$$

sendo E_x o módulo de elasticidade longitudinal dos aderentes e Δ_I um fator de correção do comprimento da fenda sugerido por Wang e Williams [28], que pode ser determinado através da regressão linear de $C^{1/3} = f(a)$.

2.2.4 Propriedades de fratura em modo misto

Em adição aos ensaios para determinação das propriedades de fratura em modo puro I e II, é de elevada importância a determinação das propriedades de fratura em modo misto, pois as ligações adesivas estruturais aplicadas em várias indústrias enfrentam fratura em modo misto. De realçar que os ensaios para caracterização desta propriedade de fratura utilizam geometrias similares aos ensaios sob modos I e II [5]. Para determinação das propriedades de fratura em modo misto podem ser utilizados ensaios como o *fixed-ratio mixed-mode* (FRMM), o *mixed-mode flexure* (MMF), também denominado por *single-leg bending* (SLB), o *mixed-mode bending* (MMB), o *asymmetric double-cantilever beam* (ADCB) e o *asymmetric tapered double-cantilever beam* (ATDCB) [29]. Os ensaios em modo misto são caracterizados pela relação entre as propriedades de fratura em modo I e modo II, dependendo de como são aplicadas as solicitações. Recentemente, foi testada a utilização de um utensílio capaz de testar juntas adesivas com diversas relações entre os modos mistos, dependendo das solicitações aplicadas, o que permite análise do envelope da fratura. Estes ensaios de fratura podem ser realizados sob diferentes proporções, sendo que para o ensaio MMF e FRMM o rácio de modo misto é de $G_I/G_{II}=4/3$, rácio este considerado para aderentes com a mesma espessura.

No ensaio FRMM (Figura 24 a) é aplicada uma única força ascendente na viga superior, sendo que a viga inferior permanece sem aplicação de solicitações e pode deformar livremente. A reprodução deste ensaio é em grande parte similar ao ensaio ELS, pois requer os mesmos utensílios e provetes para o ensaio. Este ensaio apenas apresenta

diferença na aplicação de carga, uma vez que no ensaio ELS a solicitação é aplicada na viga inferior.

O ensaio MMB (Figura 24 b) é resultado da combinação dos testes mais relevantes para a caracterização em modo I e modo II numa ligação adesiva, sendo estes, o ensaio DCB e ENF respetivamente. O funcionamento deste ensaio baseia-se na aplicação de uma carga adicional para abertura das vigas no ensaio ENF. Esta carga adicional promove a separação das vigas como observado no ensaio DCB. O ensaio MMF é adaptado da ASTM D6671.

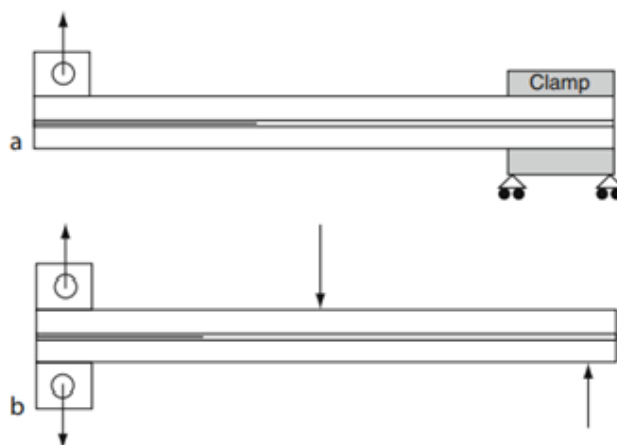


Figura 24 - Geometria e aplicação de cargas no ensaio FRMM a), MMB b) [5]

Os ensaios ADCB e ATDCB (Figura 25 a) e c), respetivamente são similares aos ensaios DCB e TDCB, apenas diferem na fabricação dos provetes, uma vez que são utilizados aderentes com geometria diferente e assimétrica para gerar a condição de modo misto (modo I + modo II). No entanto, o ideal seria a utilização de provetes similares em todos os modos de caracterização à fratura [30].

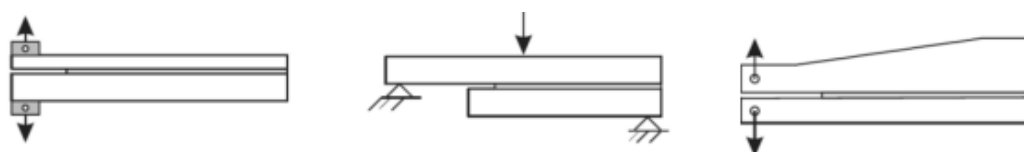


Figura 25 - Geometria e aplicação de cargas no ensaio ADCB a), SLB b), ATDCB c) [31]

A partir da Figura 25 b), é possível observar a geometria e aplicação de cargas no ensaio SLB, ensaio este que combina os carregamentos aplicados no ensaio DCB e ENF. Neste ensaio, apenas um aderente apoia no suporte da extremidade esquerda, sendo que o aderente mais curto com a extremidade mais perto da fenda irá provocar o modo de abertura I e um modo de corte II.

2.2.5 Estado-da-arte

Na Tabela 5 são dispostos, de forma breve, estudos recentes e relevantes efetuados a juntas adesivas para determinação de propriedades mecânicas e de fratura. Embora já existam muitos estudos com a caracterização das propriedades referidas, estes estudos contribuem de forma positiva, uma vez que representam as práticas mais recentes e inovadoras.

Tabela 5 - Estudos das propriedades mecânicas e de fratura em juntas adesivas

Referências Bibliográficas	Descrição do trabalho
Faneco et al. [32]	Este trabalho teve como objetivo a determinação das propriedades mecânicas e de fratura de um adesivo estrutural de poliuretano, para posterior uso na previsão de resistência de ligações adesivas. Foram utilizados o ensaio de tração com provete maciço de adesivo e ensaios TAST, DCB e ENF. Foram utilizados os métodos de redução CCM, CBT e CBBM para a determinação das propriedades de fratura. Em conclusão, os autores conseguiram afirmar que os dados se encontravam adequados, a partir da comparação dos dados obtidos no ensaio de tração com os do fabricante, enquanto para as propriedades de fratura se conseguiu uma boa aproximação com os diferentes métodos de redução utilizados.
Zheng et al. [33]	O objetivo principal deste trabalho passou pela investigação das propriedades mecânicas e modos de rotura em juntas adesivas com a utilização do adesivo Araldite® 2015, aderentes de CFRP e alumínio, sob degradação hidrotérmica ao longo de 40 dias. Para investigação deste fenómeno, foram utilizadas juntas de sobreposição simples. Foi possível avaliar o efeito deste fenómeno através de ensaios de caracterização mecânica. Os resultados apontam para um decréscimo da resistência até ao 20º dia, enquanto ao 40º dia existe um aumento da resistência mecânica devido a plastificação induzida pela humidade e pós-cura e temperatura. Verificam-se também variações nos modos de rotura ao longo dos 40 dias.

Tsokanas et al. [34]

Neste trabalho, é estudado experimentalmente o comportamento de fratura interfacial, através dos ensaios DCB e ENF, de aderentes em titânio e CFRP com matriz termoplástica e termoendurecível na junta adesiva. A ligação é feita através dos adesivos FM 300M e FM 94K, como também a ligação direta dos dois aderentes, sem a colocação de uma camada de adesivo entre estes. Esta ligação dá-se ao mesmo tempo que a cura é efetuada na placa de CFRP. Através da utilização do ensaio DCB foi verificado um modo de rotura interlaminar nas juntas que utilizaram CFRP com resina termoendurecível. Foram obtidos modos de rotura coesivos através da utilização do método ENF em todos os provetes. A resistência à iniciação de falha revelou-se superior nos provetes que utilizaram CFRP com matriz termoplástica e o adesivo FM 94K.

Teixeira et al. [35]

O objetivo deste trabalho consistiu na comparação dos ensaios DCB e TDCB para extração dos valores de G_{IC} de juntas adesivas. Foram utilizados aderentes em aço C45E e os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752, apresentando estes diferente ductilidade. Concluiu-se que, para o ensaio DCB, a utilização do método de redução CBT não é adequada para adesivos mais dúcteis. Para o ensaio TDCB, os métodos CCM e CBT mostraram uma previsão abaixo dos valores para o ensaio em adesivos dúcteis, enquanto a utilização de SBT mostrou valores ainda mais inferiores do que os referidos. Em resultado, concluiu-se que no ensaio TDCB não é possível obtenção de valores acertados de G_{IC} para adesivos dúcteis, enquanto para adesivos frágeis se torna uma boa solução. De um modo geral a utilização do ensaio DCB resulta em melhores aproximações de G_{IC} para todos os adesivos utilizados.

Figueiredo et al. [36]

Este trabalho teve como por objetivo estimar o valor de G_{IIC} de uma junta adesiva em estruturas de compósito através do ensaio ENF, com variação dos valores da espessura de adesivo. Foram utilizados diferentes métodos de redução para estimar G_{IIC} . As leis coesivas de corte foram obtidas através do MEF e MDC, considerando um método inverso para aferir a influência da espessura de adesivo no comportamento ao corte. Foi verificada uma boa aproximação dos modelos numéricos com o comportamento experimental do adesivo, e uma tendência crescente de G_{IIC} com o aumento da espessura de adesivo.

Dumont et al. [37]

Este trabalho teve como objetivo estudar a evolução do envelope de fratura de um adesivo de epóxico, sob diferentes temperaturas (-15°C, 23°C e 45°C). As juntas utilizaram aderentes de alumínio A2017 e aço de alto limite elástico, combinados com um adesivo estrutural de epóxico. Para caracterização de fratura foram utilizados os ensaios TDCB, MMB e Arcan. O ensaio Arcan permitiu a criação de uma metodologia para determinação da tenacidade à fratura (G_c). Com o ensaio Arcan foram obtidos valores similares aos ensaios TDCB e MMB. Com o ensaio Arcan foi possível observar um decréscimo de G_c com o aumento de temperatura.

Loureiro et al. [38]

O objetivo principal deste trabalho é a comparação e estudo experimental das propriedades de fratura em modo misto de três adesivos através do ensaio SLB. É utilizado um método de redução baseado no integral J para aproximação da energia de fratura à tensão (J_I) e corte (J_{II}). O enquadramento dos valores obtidos em vários envelopes de fratura permitiu selecionar o critério de rotura energético que mais se adequa para cada adesivo. As leis do MDC de corte e tração foram obtidas para cada adesivo pelo método direto. Em conclusão, observou-se uma boa concordância de valores nas propriedades de fratura entre provetes com o mesmo adesivo. As leis do MDC para cada adesivo também demonstraram uma boa correspondência entre os provetes, o que resulta em uma nova metodologia para caracterização de materiais em modo misto.

2.3 Ensaios de arrancamento para adesivos

Os ensaios ao arrancamento têm sido utilizados ao longo dos anos de forma a poder comparar a resistência ao arrancamento de diferentes adesivos em diferentes materiais e com diferentes técnicas de preparação de superfícies. Estes ensaios são geralmente utilizados para caracterização de aderentes flexíveis, medindo a capacidade de resistência a tensões altamente localizadas [39].

Ao que diz respeito às configurações dos ensaios de arrancamento para adesivos têm-se como os mais utilizados os ensaios de braço fixo (*fixed arm*), junta T (*T-peel*), com cunha (*wedge peel*), rolo flutuante (*floating roller peel*), tambor (*climbing drum*) e mandril (*mandrel peel*).

2.3.1 Motivação para a caracterização dos adesivos ao arrancamento

A solicitação a esforços de arrancamento numa junta adesiva é uma das menos favoráveis, uma vez que os adesivos têm baixa capacidade de suportar este tipo de esforços [1]. Os esforços de arrancamento numa junta adesiva desenvolvem elevada concentração de tensões de arrancamento em áreas muito reduzidas. Neste sentido, existe a necessidade do estudo da amplitude de forças desta natureza que a junta conseguirá suportar. Existem vários métodos de ensaio para avaliar a resistência ao arrancamento em juntas adesivas. No entanto, o fator mais relevante para a determinação da fratura nos ensaios de arrancamento é o momento produzido na deformação dos aderentes. Este momento tem efeito numa área muito reduzida de adesivo, o que irá resultar em elevadas concentrações de tensões, sobretudo na direção da espessura do adesivo, o que origina um efeito de clivagem. Esta concentração de tensões no adesivo leva a uma falha prematura na adesão.

Neste sentido, não é apenas necessária a análise das resistências ao arrancamento, como também o estudo das distribuições das tensões, tanto na camada de adesivo como nos aderentes. A utilização de aderentes flexíveis proporciona uma distribuição de tensões mais localizada no adesivo, enquanto a utilização de aderentes mais rígidos leva a uma zona mais alargada de transferência de esforços, o que propicia o aumento da resistência da ligação [19].

Um exemplo muito prático é a análise das forças de arrancamento na indústria do calçado através de ensaios próprios com mudanças de condições ambientais de trabalho. O conhecimento do funcionamento do produto em condições extremas faz com que haja a necessidade de criação de testes para garantir a adesão entre o aderente e adesivo durante a utilização do produto. Neste sentido, são feitos ensaios de fluência ao arrancamento aplicando forças constantes em espaços de tempo fixos. Os provetes podem ser sujeitos a temperaturas entre 50°C a 70°C. Com isto garante-se o próprio funcionamento ao longo da vida do produto. Nestes ensaios são solicitadas ao

arrancamento juntas-T, com aderentes iguais aos que serão utilizados nos sapatos, sendo neste caso a sola do sapato com o restante corpo [40].

2.3.2 Tipos de juntas utilizadas em aplicações reais

No mundo quotidiano existe uma tentativa de utilizar a ligação adesiva em muitas áreas, embora por vezes os esforços não sejam favoráveis à sua utilização. Ainda assim, a sua aplicação é mais viável do que a utilização de processos de ligação mecânica. Embora os esforços de arrancamento não favoreçam a resistência da ligação adesiva, em casos que não se conseguem evitar estes esforços, são projetadas juntas para resistir a essas mesmas forças de arrancamento.

Um exemplo prático deste tipo de aplicações é na indústria aeronáutica, onde é utilizada a ligação adesiva em substituição das ligações rebitadas na fuselagem do avião. Anteriormente a esta aplicação, esta ligação já era usada nas asas dos aviões com a vantagem de menores fugas de combustível comparativamente à ligação rebitada [5].

A aplicação da ligação adesiva consistiu na ligação das longarinas e o quadro exterior à cobertura exterior do avião. A utilização desta técnica faz com que não haja necessidade de furação ao longo das longarinas para sua fixação, mantendo a integridade deste elemento e, como resultado, é obtida uma distribuição de tensões mais uniforme.

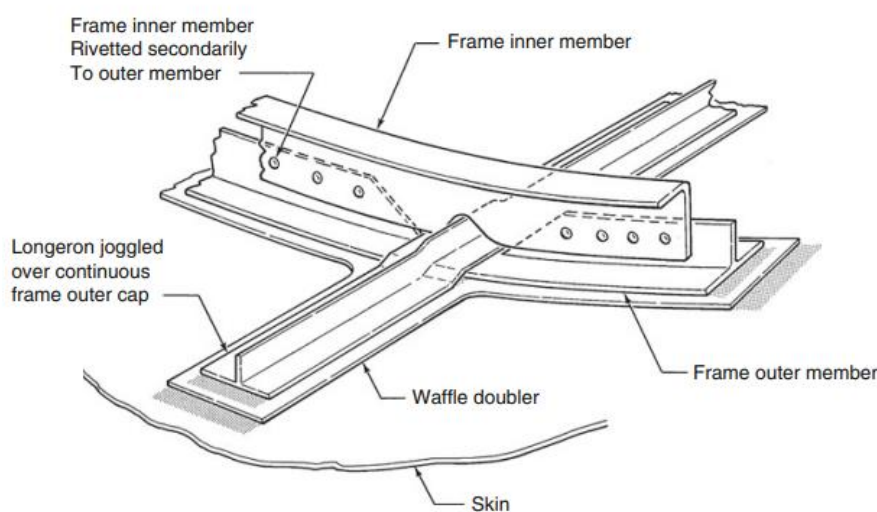


Figura 26 - Ligação na fuselagem do Cessna Citation III [5]

Na Figura 26 é possível observar a ligação das longarinas e o quadro exterior à cobertura exterior.

São também utilizadas juntas para resistência ao arrancamento em sapatos, sendo esta uma das mais exigentes aplicações no que diz respeito às ligações adesivas. Isto deve-se em grande parte pela sua exposição a diferentes ambientes e diferentes condições de temperatura. Ao mesmo tempo que a ligação adesiva é alvo destas variações, esta

também estará sujeita a esforços de tração, corte e sobretudo arrancamento. Neste sentido, apesar da utilização de diferentes materiais e formas, são habitualmente utilizados adesivos de poliuretano e policloropreno (comercialmente conhecido como cola de contacto). A primeira operação neste processo de adesão é a preparação de superfícies a unir, enquanto se prepara a solução. Unem-se os dois aderentes, são aplicados calor e pressão em forma de reativação do processo e no final são testadas as capacidades do sapato resistir ao arrancamento e corte.

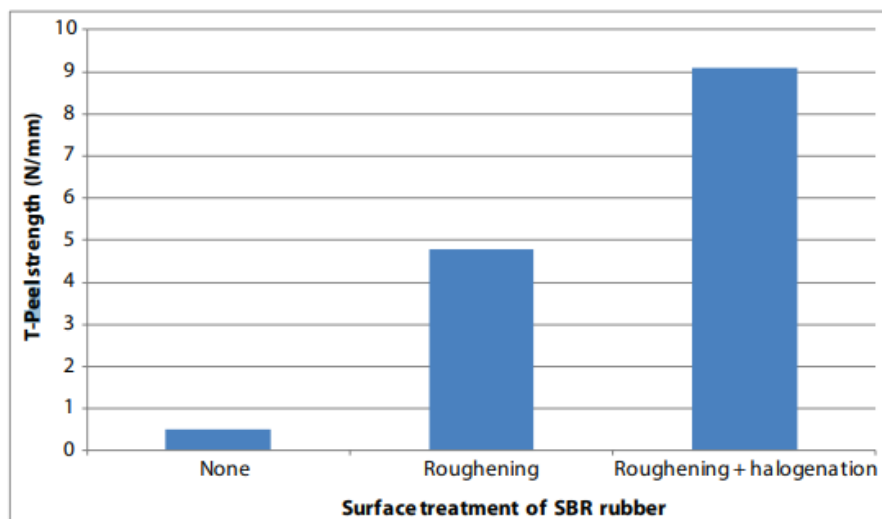


Figura 27 - Variação da força de arrancamento de acordo com o tratamento efetuado em borracha de estireno butadieno [40]

A adequada preparação de superfícies é necessária para melhorar a adesão entre os dois aderentes e consequente otimização da resistência ao arrancamento. De entre os processos possíveis de utilizar, existem quatro mais utilizados como a limpeza com solventes, aplicação de primário, halogenação e processos físicos de abrasão [40]. É possível verificar a variação da aplicação na força de arrancamento a partir da Figura 27.

No que toca a outro tipo de indústria, como por exemplo a aeroespacial, um exemplo de utilização passa pela união de uma antena refletora. Após previsão de esforços a que esta estará sujeita, são utilizados ensaios mecânicos para validação do projeto, através de ensaios de arrancamento. Os provetes são envelhecidos através de ciclos térmicos. O resultado da ligação pode-se verificar através da Figura 28, que mostra a parte traseira da antena.



Figura 28 - Face refletora traseira unida a compósito monolítico [5]

2.3.3 Ensaios de arrancamento

De entre os tipos de juntas utilizadas para caracterização mecânica, as destinadas a serem utilizadas em ensaios de arrancamento caracterizam-se em primeira instância pelos materiais utilizados como aderentes, que podem ser flexíveis ou rígidos, o que influencia a forma como o ensaio de arrancamento é efetuado. Existem duas principais variantes no tipo de juntas utilizadas, dependendo do tipo de ensaio. Estas juntas podem ter como propósito o arrancamento de apenas uma extremidade/braço fixo, como por exemplo o *floating roller peel test*, ou arrancamento das duas extremidades, como o teste *T-peel*.

- **Ensaio de arrancamento por impacto (*wedge peel*)**

Este ensaio visa definir a força de arrancamento de um aderente, não através de uma força aplicada continuamente, mas sim pela absorção de energia em curto espaço de tempo, como é o exemplo do ensaio por impacto. O ensaio de arrancamento por impacto em adesivos é definido pela norma ISO 11343. A análise deste tipo de solicitações pode ser útil no caso da indústria automóvel, que tem de garantir a segurança dos ocupantes do automóvel em uso normal como também em caso de acidente/impacto de modo a minimizar os danos para os passageiros [5]. Com esta observação é possível também afirmar que neste tipo de equipamentos não devem ser utilizados adesivos de baixa ductilidade, uma vez que estes possuem desempenho reduzido para estas aplicações.

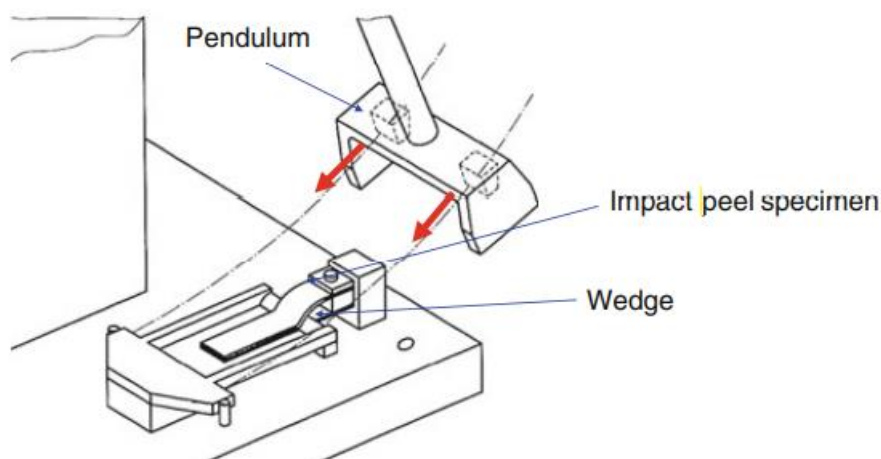


Figura 29 - Funcionamento do ensaio de arrancamento por impacto, adaptado de [41]

De acordo com a Figura 29, é possível observar que o ensaio é realizado com o provete fixo na base da máquina e, posteriormente, por meio de um pêndulo irá sofrer uma força repentina nas abas da ferramenta, o que permitirá o afastamento das duas faces do aderente unidas por adesivo. As velocidades de impacto no ensaio são definidas pela norma como 3 m/s para alumínio e 2 m/s para aço [41]. Durante o momento do impacto são obtidos resultados da força através do transdutor.

Os corpos de prova para este tipo de ensaio são obtidos sob especificação da norma ISO 11343, que visa a possibilidade de dois tipos de provetes, designadamente de cunha simétrica e assimétrica. Nos dois tipos de provetes é instalada uma cunha com 6 mm de espessura para espaçamento entre os dois aderentes. As duas configurações praticáveis são mostradas na Figura 30.

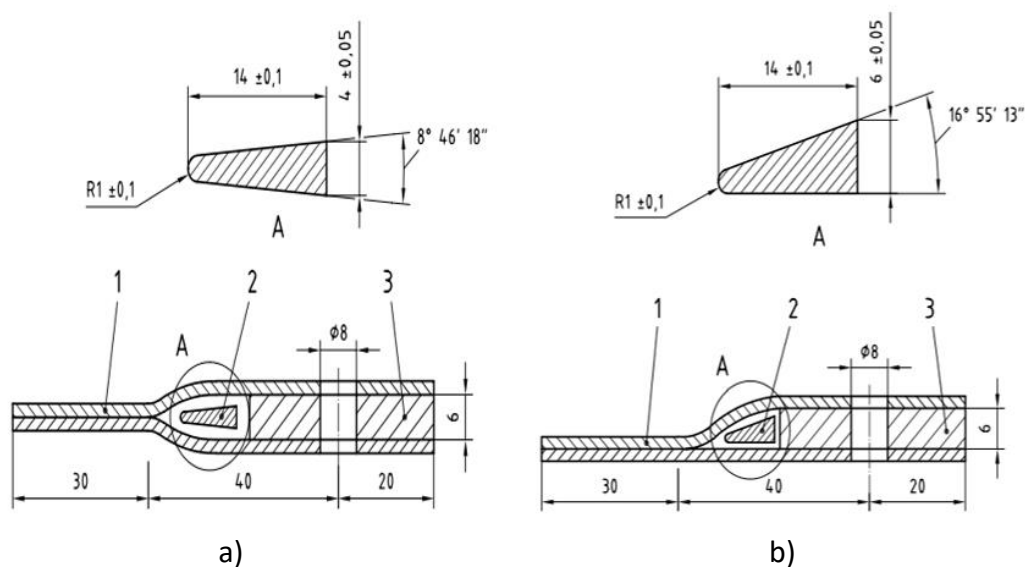


Figura 30 - Configuração dos provetes no ensaio de arrancamento por impacto, a) canto simétrico, b) canto assimétrico [41]

- **Ensaio de arrancamento a 90 e 180°**

Este tipo de ensaio de arrancamento é normalmente utilizado para caracterizar a adesão entre aderentes rígidos e flexíveis. O ensaio é realizado através de uma máquina de testes à tração, e a sollicitação consiste na aplicação de um deslocamento constante. A máquina está equipada com um módulo que permite registo de força no decorrer do ensaio e consequentemente a gravação dos dados. No ensaio a 180°, a extremidade do aderente rígido é fixa na amarra superior e a extremidade do aderente flexível na amarra inferior, completando um ângulo de 180° relativamente ao aderente rígido. Após a montagem como anteriormente referido, é iniciado o ensaio com uma velocidade recomendada de 100 mm/min e termina até quando pelo menos 125 mm tiverem sido descolados, sendo que os resultados dos primeiros 25 mm do ensaio são descartados [42]. A

Figura 31 inclui representações esquemáticas das configurações de ensaio a 90° e 180°. Este ensaio é regulamentado pelas normas ISO 8510 – 2 e ASTM C903.

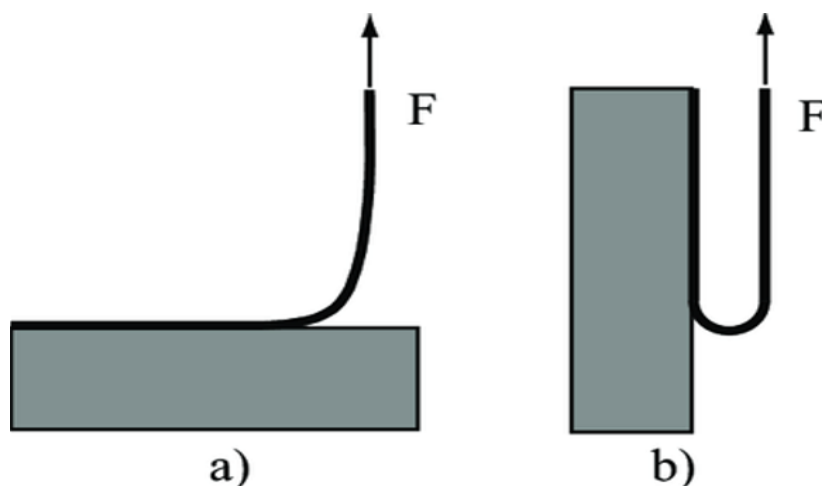


Figura 31 - Configuração ensaio de arrancamento a 90° a), 180° b) [43]

No ensaio de arrancamento a 180° os provetes são constituídos por um aderente rígido fixo, que permanece imóvel, e um aderente flexível unido por um adesivo, com uma sollicitação aplicada paralelamente ao aderente rígido. Para o fabrico de provetes para este tipo de ensaio segue-se a norma ISO 8510 – 2, consideram-se os provetes de geometria retangular e as medidas dos provetes as seguintes: a largura dos provetes flexíveis é de 25 mm, comprimento superior a 350 mm com a dobra a 90 ou 180° consoante o tipo de ensaio. Para proceder à produção dos provetes rígidos estes devem ter as mesmas dimensões [42].

A espessura recomendada dos aderentes flexíveis está descrita na Tabela 6 segundo o material utilizado.

Tabela 6 - Espessura recomendada por material para os provetes (adaptado de [42])

Material	Espessura
Metal	1,5 mm
Plástico	1,5 mm
Madeira	3,0 mm
Borrachas compostas	2,0 mm

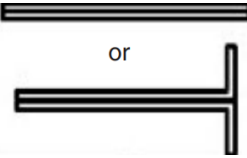
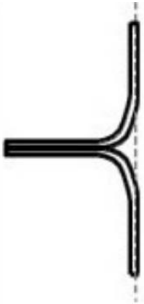
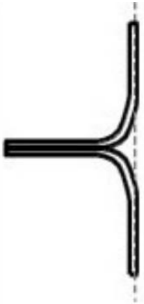
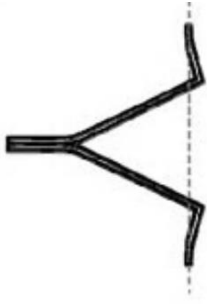
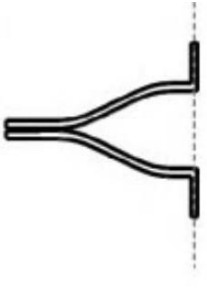
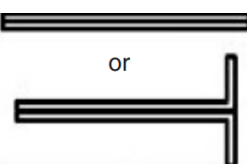
- **Ensaio *T-peel***

O ensaio de arrancamento seguindo a configuração *T-peel* é muitas vezes escolhido para caracterização da adesão entre dois aderentes flexíveis. Um dos motivos para a sua utilização é a total transmissão de esforços para a junta adesiva, sendo um dos métodos que exige menores forças aplicadas para ocorrer o arrancamento [39]. Esta geometria foi normalizada pelas diferentes organizações tais como a ASTM [44], BS [45] e ISO [46]. No ensaio *T-peel* os dois aderentes são unidos por uma camada de adesivo e as extremidades posteriormente tracionadas em sentidos opostos. A designação do ensaio decorre da forma do provete em “T”. Os resultados obtidos por este teste são a força média necessária para propagação de fenda ao longo de uma certa distância dividida pela largura de adesão, sendo que o pico de iniciação de fratura é desprezado para a determinação desta mesma média.

Para a execução do ensaio não é necessário nenhum aparato especial para fixação dos provetes nas amarras da máquina, isto porque na maioria das situações utilizam-se aderentes tão finos que a sua dobragem para fixação nas amarras é simples. A reduzida espessura dos aderentes e a necessidade de utilização de pouca quantidade de adesivo trazem consigo também, a vantagem de este ensaio possuir baixo custo em materiais. Apesar dos pontos positivos na reprodução deste ensaio, o comportamento e os resultados dos testes dependem fortemente da configuração específica que os provetes assumem durante o teste. A alteração da espessura, a tensão de cedência dos aderentes ou até a qualidade da adesão podem mudar drasticamente a forma como o provete se irá deformar, a força necessária para arrancamento, o procedimento para análise de dados ou até a interpretação dos resultados.

Existem 4 configurações resultantes deste ensaio, cada uma com a sua análise e interpretação, tal como indicado na Tabela 7.

Tabela 7 - Configurações resultantes em provetes *T-peel*, antes, durante e pós arrancamento, adaptado de [19]

	Categoria I: Os aderentes deformam-se elasticamente; Arrancamento simétrico	Categoria II: Os aderentes deformam-se plasticamente; Arrancamento simétrico	Categoria III: Os aderentes deformam-se plasticamente; Arrancamento não simétrico	Categoria IV: Os aderentes deformam-se elasticamente; Arrancamento não simétrico
Pré arrancamento				
Durante arrancamento				
Após arrancamento				

As quatro categorias presentes na tabela fazem referência à forma do provete antes, durante e após arrancamento. As categorias I e IV envolvem apenas deformação elástica dos aderentes pelo que, quando é retirada a carga aplicada após propagação de fenda, o provete regressa à sua forma de origem. Por outro lado, nos provetes de categoria II e III, a deformação plástica impede que estes voltem à sua posição de origem quando é interrompida a aplicação da força.

A preparação dos provetes para o ensaio *T-peel* e respetivas dimensões são normalizadas pelas organizações ASTM, BS e a ISO [5]. Para a preparação de este tipo

de provetes, podem ser unidas duas placas de aderente a ensaiar e posteriormente cortar cada provete com a sua dimensão correta, ou serem preparados provetes individualmente. A consistência da produção dos provetes depende em grande parte da espessura de adesivo, sendo esta uma das grandes adversidades/dificuldades deste ensaio. Dependendo da norma a utilizar, o comprimento da zona de aperto dos provetes (*tab length*) pode estar compreendido entre 25 mm e 75 mm. Quanto ao comprimento de colagem (*bond length*) os valores estão compreendidos entre 75 mm e 230 mm. A largura de colagem (*bond width*) de 25 mm, embora sejam também utilizadas larguras mais pequenas com o objetivo de reduzir as tensões nos aderentes [19].

É possível observar a geometria de um provete para ensaio *T-peel* na Figura 32.

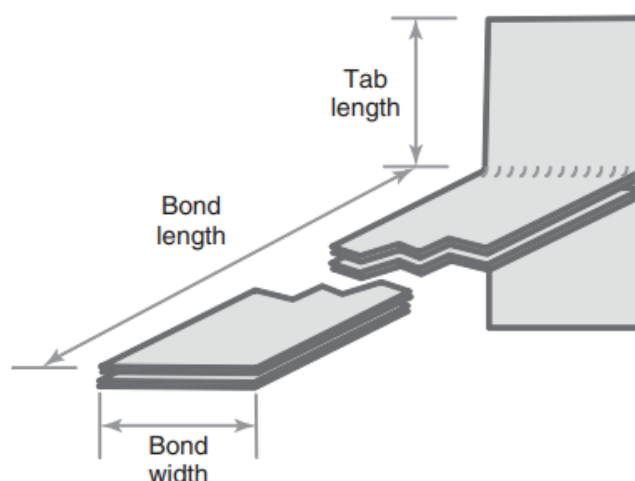


Figura 32 - Dimensões do provete para ensaio *T-peel* [19]

- **Ensaio *floating roller peel***

O ensaio *floating roller peel* trata-se de um ensaio de arrancamento regulamentado pela norma ASTM D3167 para aderentes rígidos e flexíveis ligados por meio de um adesivo. A norma indica que, fruto do seu elevado ângulo de arrancamento, o ensaio é mais severo comparativamente ao *climbing drum test*, produzindo elevado número de resultados repetíveis. O ensaio consiste no arrancamento da extremidade do aderente flexível da superfície do aderente rígido, com um ângulo controlado pelo acessório presente na Figura 33. É inserido o provete para ensaio como se pode verificar na Figura 33, com a extremidade flexível fixa na amarra inferior, enquanto o aderente rígido assenta nos dois rolos flutuantes para poder iniciar o ensaio. Após fixação do provete, é iniciado o ensaio a uma velocidade de 152 mm/min. A máquina de testes deve ter sensibilidade de leitura de deslocamento juntamente com a capacidade da medição da força com precisão. Durante o ensaio é registado um gráfico de força vs. deslocamento, sendo que terá que conter o registo de força ao longo de cerca de 76,2 mm, no mínimo, e descartam-se os resultados para os primeiros 25,4 mm. É determinada a força média de arrancamento em unidades de força por unidade de largura (kN/m) [47].

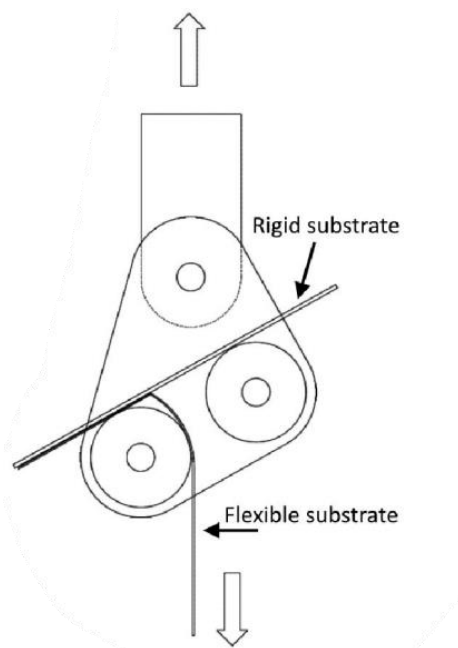


Figura 33 - Floating roller peel test [48]

No ensaio *floating roller peel*, descrito pela norma ASTM D3167, os provetes utilizados são constituídos por uma junta de sobreposição que une um aderente rígido com um aderente flexível na qual o comprimento da extremidade do material flexível é maior que a do aderente rígido [47]. A extremidade mais comprida, é fixa na amarra da máquina de ensaios e pode ser deformada com o objetivo de facilitar a fixação na amarra, para uma melhor condução do ensaio. Existem atualmente duas normas que definem este tipo de ensaio, designadamente a ASTM D3167 e a ISO 4578. A norma ASTM, sendo americana, define as dimensões em polegadas, enquanto a norma ISO utiliza o sistema métrico. Como resultado, a principal diferença entre as duas normas decorre da dimensão de largura do provete de ensaio, sendo que a ISO 4578 define 25 mm e a ASTM D3167 12,7 mm. Assim sendo, e tomando a norma ISO 4578 como referência, tem-se as dimensões identificadas na Figura 34.

Seguindo a norma, o provete deve apresentar uma aba não colada de 40 mm e o aderente flexível com um excesso de comprimento de 50 mm relativamente ao aderente rígido, enquanto o comprimento de colagem pode estar compreendido entre 200 mm e 250 mm. A espessura de aderente rígido é de 1,6 mm e a espessura de aderente flexível de 0,5 mm.

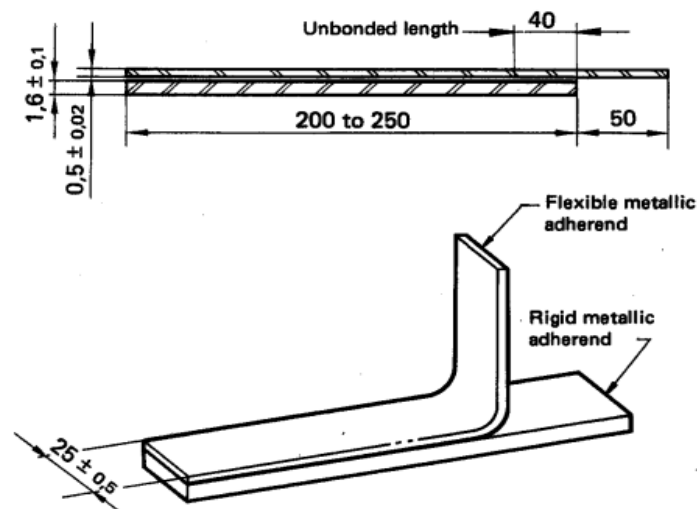


Figura 34 - Dimensões do provete para ensaio *floating roller peel* [49]

- **Ensaio *climbing drum***

O ensaio *climbing drum* é utilizado quando os aderentes não são flexíveis o suficiente para ser reproduzido o ensaio de arrancamento mais vulgar. O aderente com propriedades mais flexíveis é colocado em volta de um cilindro rígido, chamado de “*climbing drum*”, como é possível verificar através da Figura 35.

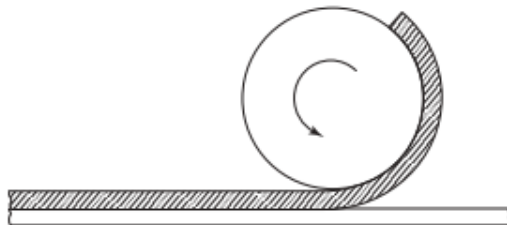


Figura 35 - *Climbing drum peel test* [5]

O ensaio *climbing drum* é padronizado pelas normas ASTM D1781 e BS 5350, que indicam como proceder para a determinação da resistência ao arrancamento do adesivo entre um aderente mais flexível que outro. É dado o nome de *climbing drum* uma vez que o rolo rígido onde a camada do aderente é acoplada irá deslocar-se juntamente com o enrolamento deste [19]. Este tipo de ensaio torna-se muito útil para determinação de forças de arrancamento em estruturas *sandwich*, quando testado em específicas condições, sendo utilizado vulgarmente na indústria aeronáutica para avaliação da resistência ao arrancamento entre peles e núcleos ninho-de-abelha ou espumas, em painéis *sandwich* ultraleves.

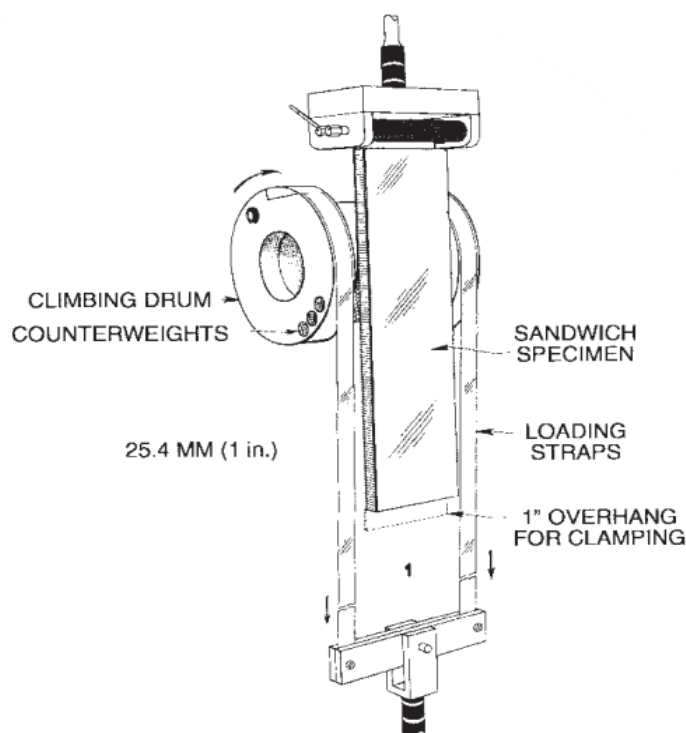


Figura 36 - Montagem do conjunto de ensaio *climbing drum* [50]

O aparelho para reproduzir o ensaio de arrancamento segundo a norma ASTM D1781 é composto por um cilindro flangeado, fitas ou correntes flexíveis para carga e grampos para aperto do provete. Na Figura 36 é possível identificar os vários componentes necessários para o ensaio. O cilindro/tambor flangeado serve para acoplar a extremidade do aderente de menor espessura. Neste componente seguem nas laterais as fitas ou correntes que farão rolar o tambor em sentido ascendente com o movimento ascendente da amarra superior, amarra esta que contém os grampos para fixação do aderente mais espesso (por exemplo aderente em ninho de abelha). O rolo cilíndrico contém um contrapeso situado no sentido oposto do diâmetro da fixação do aderente para compensar o peso do grampo de aperto do aderente.

Antes de iniciar o ensaio é colocada uma pré-carga no conjunto a fim de resistir ao binário produzido pelo conjunto do tambor. Como resultado deste ensaio é obtido um valor de força de arrancamento média dividido pela largura do provete, após serem desprezados os primeiros 25 mm desde o início do ensaio. São necessários, para um ensaio válido, no mínimo 152 mm de deslocamento. Com o objetivo de serem obtidos os resultados mais precisos, é subtraída à força obtida, a força necessária para o movimento do cilindro [50].

Os provetes deste ensaio estão descritos na norma ASTM D1781, sendo esta utilizada para testar a adesão de filmes de adesivo ao arrancamento, em painéis *sandwich*.

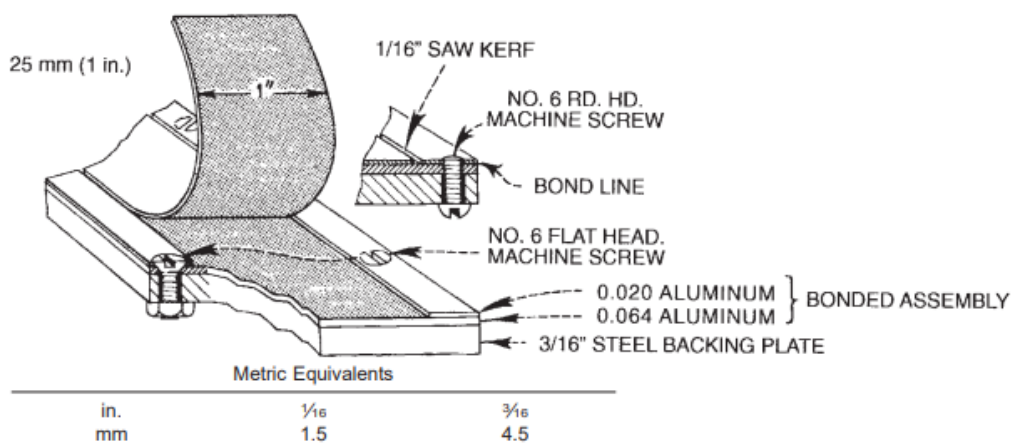


Figura 37 - Dimensões provetes para ensaio *climbing drum* [50]

Os provetes para este ensaio não possuem demasiada complexidade, já que correspondem a uma junta de configuração simples. No entanto, existem particularidades nas dimensões do provete. Na Figura 37, é possível observar um provete para caracterização ao arrancamento de adesivos, em laminados. A montagem do laminado com adesivo é efetuada através da fixação deste a uma placa de apoio em aço. O aderente inferior permanece estático durante o ensaio, enquanto o aderente superior é solicitado ao arrancamento pelo tambor.

2.3.4 Particularidades no fabrico de juntas de arrancamento

Quando é utilizada uma junta adesiva, esta mesma é dimensionada de modo a ser maximizada a sua resistência, desde a escolha adequada de materiais, preparação de superfície até à própria preparação da junta para arrancamento [5]. São necessários alguns cuidados para que todo o trabalho efetuado não venha a diminuir a sua resistência. Neste sentido apresentam-se algumas particularidades durante o fabrico das juntas, que têm influência na resistência.

- **Alinhamento da junta**

A previsão/cálculo da resistência de uma junta adesiva é apoiada por uma boa qualidade no fabrico, que deve prevenir a existência de fatores responsáveis por reduzir a resistência, como é o caso de desalinhamento entre aderentes. Este desalinhamento irá provocar forte concentração de tensões e modificação dos dados retirados do ensaio e pode invalidar o mesmo [5]. Neste sentido, existem ferramentas para auxiliar a produção de juntas no que diz respeito ao alinhamento dos dois aderentes, como por exemplo um gabarito. O objetivo passa por conseguir um alinhamento da junta. Na Figura 38 é possível observar um gabarito com o objetivo de conseguir o alinhamento das juntas em “T”.

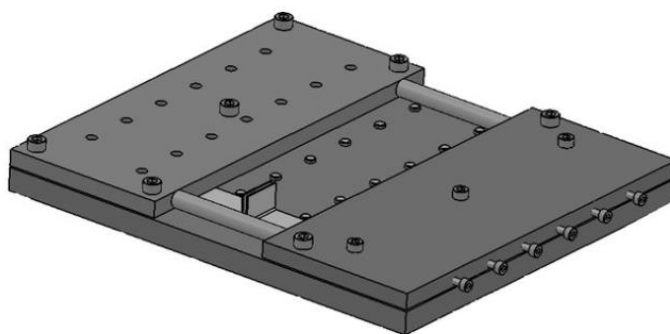


Figura 38 - Gabarito para alinhamento de juntas em "T" [51]

- **Filetes do adesivo**

A utilização de filetes de adesivo tem como principal vantagem a distribuição das tensões nas regiões das extremidades de sobreposição das juntas, o que por sua vez irá aumentar a resistência da ligação. Desta forma, no fabrico da junta adesiva é necessário prestar alguns cuidados, com o objetivo de não prejudicar a resistência da junta adesiva. É possível verificar pela Figura 39 que, numa junta de sobreposição simples com extremidades de forma quadrada, existe uma elevada concentração de tensões. A modificação da geometria do filete para 45° irá disseminar as tensões por uma área maior resultando em menores concentrações de tensões. Este filete não resulta em apenas uma distribuição mais constante como também contribui para a minimização da intensidade das tensões nas extremidades [5].

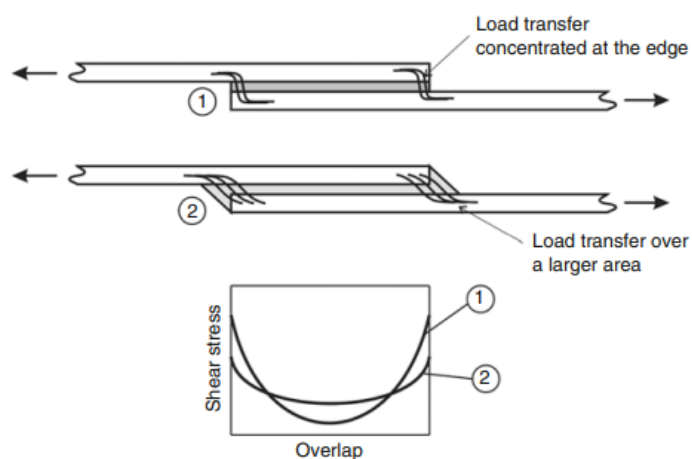


Figura 39 - Distribuição de tensões em juntas com e sem filete [5]

Como é possível observar pela Figura 39 a distribuição de tensões ao longo do comprimento de adesão é influenciado pela existência de filete no final do comprimento de sobreposição, contribuindo para uma distribuição mais uniforme de tensões.

Esta particularidade das juntas adesivas, também resulta em diferentes valores de distribuição de tensão em juntas solicitadas ao arrancamento. Através da Figura 40 é

possível observar uma junta em T, com diferentes percentagens de enchimento na zona do raio de curvatura dos aderentes. Esta variação irá produzir efeitos diferentes quando solicitada ao arrancamento por exemplo a partir de um ensaio de arrancamento *T-peel*.



Figura 40 - Filete em juntas T com 50% enchimento a), 100% enchimento b) [52]

A partir de ensaios efetuados por Awalekar et al. [52], é confirmado que juntas em T com enchimento a 50% sofrem maior deformação do que juntas que utilizam 100% de enchimento, sob a mesma solicitação. A tensão equivalente de von Mises no final do comprimento de sobreposição, no provete que continha 100% de enchimento, foi cerca de 200% inferior à tensão observada com a utilização de 50% de enchimento. Desta forma é possível afirmar que o filete do adesivo utilizado tem impacto na resistência ao arrancamento de uma junta adesiva.

- **Espessura do filme de adesivo**

A espessura de adesivo utilizada numa junta adesiva desempenha um papel importante na resistência final da junta, como detalhado no capítulo 2.1.4, com o estudo elaborado por Kahraman et al. [12], que compara a resistência da junta em função do aumento da espessura de adesivo. Para garantir a espessura de adesivo desejada, durante o fabrico dos provetes pode-se recorrer à utilização de lâminas, colocadas nas extremidades da área de adesão, ou recorrer à utilização de gabaritos.



Figura 41 - Colocação de lâminas para garantir espessura mínima

Na Figura 41 é possível verificar a colocação das lâminas nas extremidades da área de adesão de forma a garantir uma camada de adesivo com espessura uniforme.

2.3.5 Efeito dos materiais e geometria dos aderentes na resistência da junta adesiva

A utilização de diferentes geometrias e materiais afetará a resistência resultante da ligação. A escolha dos aderentes é preponderante na resistência da ligação adesiva sujeita ao arrancamento uma vez que afeta diretamente a distribuição e picos de tensão nas juntas.

Um estudo efetuado por Hinopoulos e Broughton [53] analisa de que forma a variação de vários parâmetros, como a utilização de aderentes com diferentes ductilidades e espessuras, influenciam a resistência de uma junta T ao arrancamento, através de uma análise numérica. Foi feita a análise para a utilização do adesivo Araldite® 2007, com diferentes materiais de aderentes, como aço, titânio, alumínio e Tufnol (laminado de fibra de vidro com matriz de epóxico). Os materiais selecionados possuem diferentes ductilidades, de forma a avaliar a distribuição das tensões em cada um dos aderentes selecionados. Foi concluído que as tensões ao longo do comprimento de sobreposição diminuem com o afastamento da zona do raio de curvatura dos aderentes. As componentes de tensão e deformação desenvolvem um comportamento uniforme na extremidade não solicitada dos aderentes. A tensão máxima presente na camada de adesivo decresce com a utilização de aderentes mais rígidos. Na Figura 42 é possível observar a influência do aumento da espessura e rigidez do aderente na ligação adesiva.

Property	Adherend	Adherend
	Stiffness	Thickness
Joint Stiffness	↑	↑
Equivalent Stress	↓	↓
Peel Stress	↓	↓
Axial Stress	↓	↓
Shear Stress	—	↓
Plastic strain	↑	↓

Figura 42 - Influência da rigidez e espessura do aderente na resistência (adaptado de [53])

O aumento da espessura dos aderentes faz com que haja menor deformação plástica destes, e menores picos de tensões. A tensão máxima equivalente na camada de adesivo decresce quando são utilizados aderentes com maiores valores de espessura [54], e toda a energia irá ser responsável por deformar o adesivo, provocando a rotura [19]. É possível concluir que, o aumento da espessura do aderente contribui para a resistência ao arrancamento das juntas adesivas.

2.3.6 Modelação numérica de ensaios de arrancamento

A evolução das juntas adesivas está diretamente relacionada com a evolução de metodologias de previsão fiáveis que permitam aumentar a eficiência na sua utilização, possibilitando assim ultrapassar o paradigma das juntas adesivas sobredimensionadas, que resultavam em estruturas mais dispendiosas e mais pesadas. Tal, resultava da falta de modelos mais precisos e de critérios de rotura mais adequados que se faziam sentir há algumas décadas. As duas metodologias passíveis de aplicação na análise de juntas adesivas em geral, incluindo juntas de arrancamento, são as análises de forma fechada (métodos analíticos) e os métodos numéricos [5].

O processo evolutivo dos métodos analíticos contou com um avanço no estudo das juntas adesivas por volta das década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [55], que assumiu os materiais inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas em corte. Por outro lado, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade do adesivo se deformar plasticamente, e da utilização de aderentes de compósito ou de materiais diferentes. O MEF (método dos elementos finitos) [56] é a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [57], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Recorreu-se então à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas adesivas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado. O método de elementos finitos tem atraído a atenção de analistas, em grande parte devido à capacidade de caracterizar um sistema contínuo pela divisão em elementos finitos que poderão posteriormente ser associados a partes contínuas. São montados então os elementos individuais num sistema global para obter o comportamento da estrutura, utilizando as condições de fronteira estabelecidas. O processo usa equações de balanço de equilíbrio dos nós para criar um sistema de equações com todos os graus de liberdade da estrutura, que garante a conexão entre elementos e cuja solução permite aferir deslocamentos, deformações e tensões [5].

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [58]. Ao longo das últimas décadas, a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

Recentemente, começou-se a usar outra técnica para modelar o crescimento de fendas, o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

Em suma, as técnicas mais utilizadas para previsão da resistência das juntas são a mecânica dos meios contínuos, a mecânica da fratura, mecânica do dano, MDC e MEFX. A Tabela 8 faz compreender alguns detalhes de cada técnica.

Tabela 8 - Técnicas mais utilizadas para a previsão da resistência de juntas

Técnica	Descrição
Mecânica dos meios contínuos	Utiliza modelos analíticos ou numéricos para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. Previsão efetuada através de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise do estado limite. Técnica bastante intuitiva com capacidade de reprodução de resultados satisfatórios quando aplicada em modelos analíticos [59].
Mecânica da fratura	Assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos. A mecânica da fratura permite avaliar se os defeitos são suscetíveis de causar rotura catastrófica ou se, durante a vida da estrutura, estes se mantêm com dimensões inferiores às críticas, embora se possam propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. Em juntas adesivas, esta técnica é maioritariamente baseada na utilização da taxa de libertação de energia, G_I ou G_{II} , e o respetivo valor crítico, G_C [60], em vez de fatores de intensidade de tensão, que são mais difíceis de determinar quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade.
Mecânica do dano	Estes critérios permitem a introdução de dano nos elementos sólidos de uma análise MEF, pela redução dos esforços transmitidos. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [61]. As variáveis de dano podem modelar o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais ou serem relacionadas com a definição física de um género específico de dano [62].

Modelos de dano coesivo	Permitem a análise do início e propagação de uma fenda no interior ou na interface dos materiais, ou ainda delaminação em compósitos. A implementação deste método pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [61]. Os elementos coesivos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [63]. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas.
Método de elementos finitos estendido	O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura. Comparativamente aos MDC deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, e as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [64].

No âmbito das ligações adesivas, os modelos de dano coesivo são a técnica de mais ampla utilização para efeitos de previsão de resistência [65]. Apesar da sua ampla utilização, uma das limitações deste método é que os elementos coesivos têm de ser colocados nas zonas de propagação de fenda. Embora possam ser introduzidas várias camadas de elementos coesivos, não é viável introduzir elementos coesivos entre cada elemento de campo, mesmo utilizando uma malha de tamanho considerável [63]. O princípio fundamental dos MDC é ser possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 43), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos - aproximação local [66]. Alternativamente podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva - aproximação contínua [67].

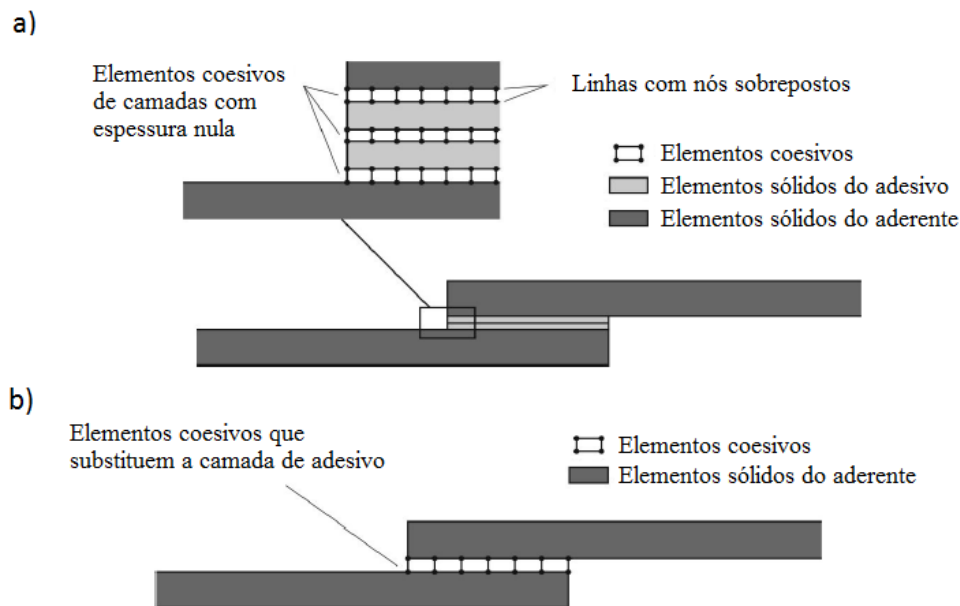


Figura 43 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [68])

Enquanto para modelação do adesivo podem ser utilizados elementos coesivos para simular o crescimento da fenda, para modelar os aderentes no ensaio de arrancamento, a geometria dos aderentes é habitualmente modelada com elementos finitos sólidos convencionais [66]. Devido à geometria deste ensaio, é comum a modelação com modelos bidimensionais (2D). Definem-se para os aderentes elementos sólidos, atribuindo os materiais que correspondem aos aderentes com as respetivas propriedades mecânicas, incluindo a componente plástica caso se preveja que os aderentes entrem neste domínio durante a solicitação das juntas.

A malha é utilizada com o objetivo de dividir o aderente num número finito de elementos possibilitando a simulação do seu comportamento. A definição da malha para os elementos sólidos poderá ser definida mediante a escolha de diferentes parâmetros como a geometria, o tipo de elemento e a respetiva densidade de elementos finitos. Quando existem elementos em contacto define-se uma malha mais refinada nos elementos em contacto e menos refinada nas restantes zonas do aderente, de forma a tornar a simulação mais eficiente.

2.3.7 Estado-da-arte

Neste capítulo são alvo de uma breve descrição trabalhos recentes e relevantes para o desenvolvimento da literatura das ligações adesivas. Incluem-se contribuições quer de cariz experimental como numérico.

2.3.7.1 *Trabalhos experimentais*

A Tabela 9 conta com trabalhos experimentais recentes e relevantes no ramo das ligações adesivas através da utilização de ensaios de arrancamento. São particularidades que, com o seu melhor entendimento, contribuem para uma utilização mais eficiente e adequada das juntas adesivas sujeitas a esforços de arrancamento.

Tabela 9 - Trabalho experimentais através da utilização de ensaios de arrancamento

Título	Descrição
Khalid et al. [69]	Análise da variação da resistência interlaminar de corte em compósitos GLARE através do processo de anodização do alumínio. Com auxílio da norma ASTM D1876-08 foram testadas juntas em “T”, de alumínio 2024 T3 com fibra de vidro utilizando o adesivo Araldite® LY5052. Neste trabalho foi comprovado que diferentes tratamentos químicos e mecânicos podem influenciar positivamente na adesão interfacial entre folhas de alumínio e fibra de vidro. Concluiu-se através de ensaios <i>T-peel</i> que o tratamento de anodização aumenta a adesão interfacial.
Pereira et al. [70]	Estudo do adesivo estrutural Araldite® AV138 sob esforços de arrancamento em juntas de compósito-alumínio, compósito-compósito e alumínio-alumínio através da utilização do ensaio <i>floating roller peel test</i> . A comparação do comportamento dos vários materiais não só passou pela análise das forças de arrancamento obtidas como também pela análise dos modos de rotura. Concluiu-se que o adesivo utilizado apresenta bom desempenho nas diferentes configurações utilizadas.
Domingues et al. [71]	Análise experimental e numérica através de MDC, para estudo do comportamento a forças de arrancamento de juntas em L, com alteração de espessura do aderente em L, entre alumínio e compósito, utilizando adesivos com diferentes ductilidades. Como conclusão, os ensaios experimentais e numéricos produziram resultados semelhantes. Através dos ensaios experimentais, concluiu-se que a utilização de adesivos mais flexíveis promove uma distribuição de tensões mais uniforme através de uma maior extensão. Foi concluído também que o aumento da espessura de aderente em L contribui para um aumento da resistência ao arrancamento, uma vez que permite a distribuição de tensões ao longo de uma maior extensão de adesivo.

2.3.7.2 Trabalhos numéricos

Com o auxílio da Tabela 10 é possível analisar trabalhos recentes de relevância que contribuíram para o enriquecimento da literatura no que diz respeito aos ensaios de arrancamento em juntas adesivas através de trabalhos numéricos.

Tabela 10 - Trabalhos numéricos com a utilização de ensaios de arrancamento

Título	Descrição
Faria et al. [72]	Validação através de MEFX para previsão do desempenho em juntas híbridas em T com aderentes em aço DIN C45E e diferentes adesivos. Foram testados três adesivos diferentes, o Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Foram testados vários critérios de iniciação e crescimento de dano, formas de lei de dano, e realizadas previsões de dissipação de energia e resistência. Para início de fenda, os resultados mais precisos foram conseguidos através dos critérios baseados na tensão (QUADS e MAXS). No que diz respeito ao critério de propagação de dano, a degradação linear mostrou-se adequada para modelação do comportamento da junta, enquanto a lei exponencial mostrou ser desadequada nesta aplicação.
Liprandi et al. [73]	Neste trabalho foi apresentado um novo modelo teórico-numérico, através da utilização de um MDC tridimensional, capaz de simular a delaminação de membranas elásticas acopladas a um aderente. Esta abordagem pode ser aplicada no estudo de complexos problemas com membranas heterogêneas, geometrias complexas ou superfícies com textura. Foi provado que, para utilização de uma membrana com propriedades mecânicas conhecidas, é possível estabelecer uma relação direta entre a força de arrancamento e comprimento descolado.
Duan et al. [74]	Análise do comportamento de delaminação de fita-cola 2G HTS sob esforços de tensão e arrancamento. Foi utilizado o MDC para lidar com a iniciação de fratura e propagação de fenda na fita sob carregamentos em modo misto. Desta análise numérica seguiu-se uma análise experimental que relaciona a força de arrancamento com o ângulo de aplicação da força. É demonstrado que o aumento do ângulo de arrancamento faz decrescer a resistência ao arrancamento. Os resultados demonstraram ser úteis na compreensão do comportamento ao arrancamento em fitas multicamada 2G HTS.

Rocha et al. [75]

Testes utilizando o FCG (*fatigue crack growth*) de modo misto através da geometria DCB. Foi utilizado um MDC triangular. Os resultados numéricos foram de encontro aos dados obtidos experimentalmente através do ajuste do parâmetro de calibração. Os resultados mostraram que a abordagem de degradação/redução das propriedades para resistir à propagação de fenda pode ser utilizada não só em modo puro, mas também em modo de carregamento misto.

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Metodologia de análise
- 3.2 Trabalho experimental
- 3.3 Trabalho numérico

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Metodologia de análise

Neste subcapítulo são abordados e detalhados todos os elementos que foram necessários antes e durante a concretização deste trabalho de análise experimental e numérica. Para o trabalho experimental, são descritos os procedimentos de ensaio, para produção dos provetes, realização de ensaio e análise de dados. No que diz respeito à análise numérica, são também descritas todas as etapas, realizada a descrição do método numérico utilizado para obtenção de resultados e respetiva análise.

3.1.1 Método a seguir

A caracterização de um adesivo ao arrancamento tem sido ao longo do tempo foi alvo de evoluções no método de ensaio e nas configurações possíveis. Esta análise começou inicialmente com os ensaios de arrancamento de braço fixo, descrito pela norma BS EN 28510-1 em 1993, que permite extrair resultados do ensaio entre provetes rígidos e flexíveis. O aparecimento do *floating roller peel test* remonta para a data de 2004 quando este ensaio foi regulamentado pela norma ASTM D3167 [47]. Atualmente o *floating roller peel test* é muito utilizado para caraterizar as propriedades de adesão entre aderentes metálicos, tendo sido posteriormente alvo de modificações para ensaio em materiais compósitos, como por exemplo num estudo efetuado por, de Freitas e Sinke [76], que estudam o potencial deste ensaio para aplicação em ensaios de arrancamento de compósitos. Posteriormente, para a caracterização entre dois aderentes flexíveis surgiu o *T-peel test*, normalizado pela primeira vez em 2005 pelo documento BS EN 2243-2 [5].

Neste trabalho é utilizado o método de ensaio *floating roller peel test*, descrito na norma ASTM D3167. Este procedimento de ensaio normalizado visa determinar a resistência de arrancamento em juntas adesivas de metal com metal. Sendo uma norma de ensaio, este procedimento não é considerado para o modo como são obtidos os aderentes, para a preparação superficial, e sua extração de propriedades de provetes. Para tal são usadas outras referências, tais como as indicações do fabricante do adesivo para as respetivas propriedades mecânicas, para a sua aplicação (espessura de adesivo, preparação superficial) e condições de trabalho (tempo de cura, tempo de colagem, *shelf life*, entre outras).

Para a preparação superficial são estudadas as variáveis presentes na literatura, aplicáveis em aderentes de alumínio. Geralmente as preparações superficiais dos aderentes são indicadas na documentação técnica do fabricante do adesivo.

No tratamento dos dados obtidos é possível contar com o auxílio da ferramenta do Microsoft® Excel. Esta ferramenta permite importar e manipular os dados obtidos da máquina de ensaios, pelos quais se pretende estimar as forças de arrancamento e todas as propriedades requeridas pela norma ASTM D3167, assim como a construção de uma representação gráfica.

Relativamente à abordagem numérica deste trabalho, foi utilizado o *software* ABAQUS®, que tem por base o MEF, e que apresenta a possibilidade de utilização de MDC. Com esta abordagem, é possível prever a resistência ao arrancamento das juntas adesivas através da utilização de elementos coesivos na camada de adesivo. Posteriormente aos resultados obtidos por este *software*, é utilizada a ferramenta Excel para análise de dados por tipo de provete, e realizar a comparação do conjunto de dados numéricos com os experimentais.

3.1.2 Geometria a testar

O ensaio efetuado para análise da resistência ao arrancamento dos quatro adesivos utilizados considera a geometria da junta adesiva seguindo a norma ASTM D3167 para ensaio *floating roller peel* (Figura 44). Os provetes foram contruídos com largura (b) de 25 mm. A ficha técnica desta norma encontra-se no anexo 6.1 para consulta.

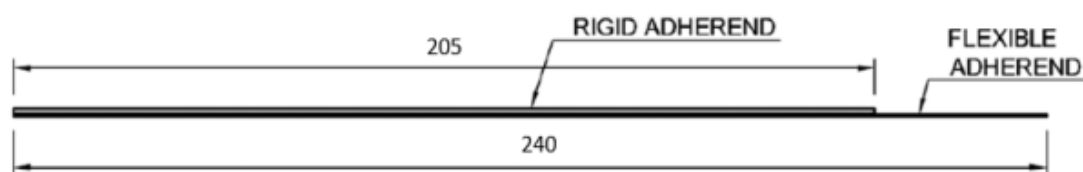


Figura 44 - Configuração da geometria dos provetes *floating roller peel test* (adaptado de [77])

Os parâmetros para caracterização da geometria são: o comprimento total (L_T), espessura de adesivo (t_a), espessura do aderente rígido (t_r), espessura do aderente flexível (t_f), comprimento de sobreposição (L_0) e largura (b). As respetivas dimensões são apresentadas na Tabela 11. Pela análise da Figura 44, L_0 será igual ao comprimento do aderente rígido (L_r), enquanto L_f , que corresponde ao comprimento do aderente flexível, é igual a L_T .

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

Parâmetro	Valor (mm)
b	25
L_T	240
t_a	0,2
L_0	205
t_r	3
t_f	0,5

Para poder reproduzir o ensaio *floating Roller peel* segundo a norma ASTM D3167 é necessária a fixação de um acessório específico na amarra superior da máquina de ensaios. Na Figura 45 é possível observar a geometria e as respectivas dimensões do acessório.

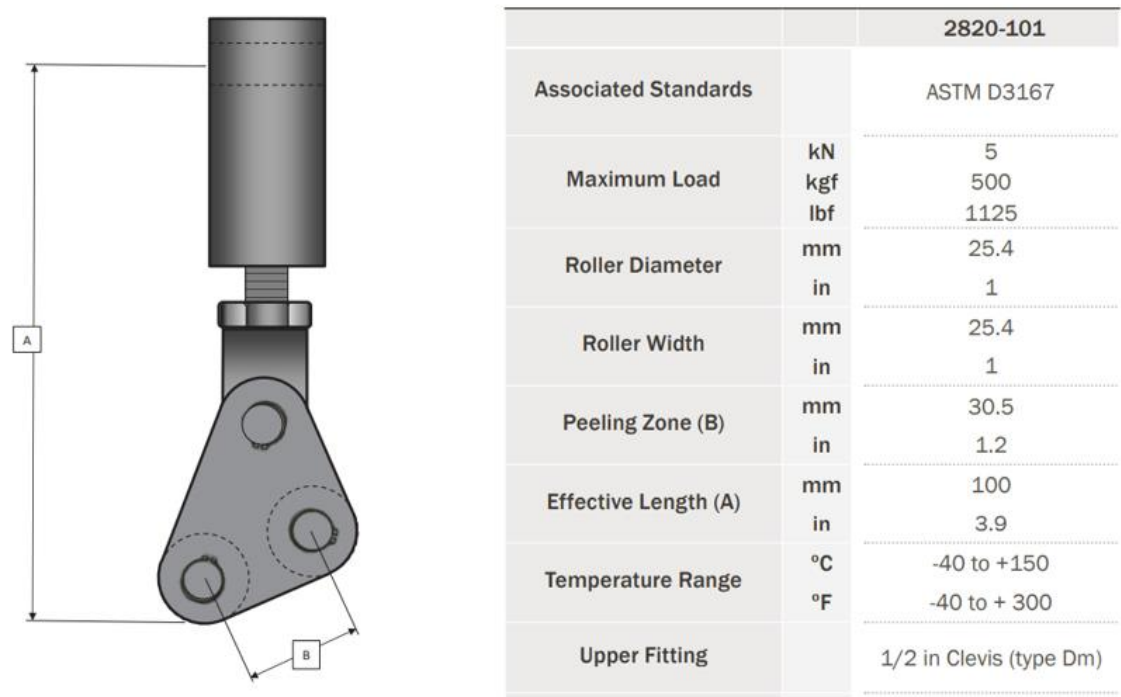


Figura 45 - Acessório para ensaio *floating roller peel* e dimensões associadas [78]

3.1.3 Materiais utilizados

Neste capítulo é efetuada a apresentação dos materiais utilizados no trabalho prático, tendo como objetivo identificar e descrever as propriedades mecânicas dos aderentes e adesivos utilizados.

3.1.3.1 Aderentes

Para a produção dos provetes ensaiados na parte experimental deste trabalho foram utilizados aderentes em liga de alumínio. Uma vez que se trata de um ensaio *floating roller peel*, foram selecionados dois aderentes de alumínio AW 6082-T651, um deles rígido e o outro flexível.

A liga de alumínio AW 6082-T651 é conhecida como uma liga de utilização estrutural, sendo uma liga da série 6000 que apresenta como principais elementos de liga o Magnésio e Silício. Na Tabela 12 é apresentada a composição química desta liga em detalhe.

Tabela 12 - Composição química da liga de alumínio AW 6082 - T651 [79]

	Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	Al
% Mínima	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

As boas propriedades mecânicas desta liga de alumínio fazem com que tenha ampla utilização nas indústrias aeronáutica e automóvel. Propriedades como a elevada energia de superfície e elevada resistência específica fazem com que esta liga seja também uma solução ideal na construção de estruturas. Na Tabela 13 é possível observar as propriedades mecânicas típicas desta liga de alumínio como também os valores obtidos experimentalmente

Tabela 13 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651 [79, 80]

Tensão de rotura, σ_r [MPa]	Tensão de cedência, σ_y [MPa]	Alongamento mínimo, ϵ [%]	Dureza Brinell, HB	Módulo de elasticidade longitudinal, E [GPa]
350 ^a	305 ^a	11 ^a	105 ^a	70 ^a
324±0,16 ^b	261,67±7,65 ^b	-	-	70,07±0,83 ^b

^a Valores obtidos pelo fabricante [79]

^b Valores obtidos através da caracterização à tração pela norma ASTM-E8M-04 por Campilho et al. [80]

Na Figura 46 são apresentadas as curvas de tensão-deformação (σ - ϵ) dos aderentes de alumínio, obtidas experimentalmente, como também uma aproximação considerada para utilização nas simulações numéricas.

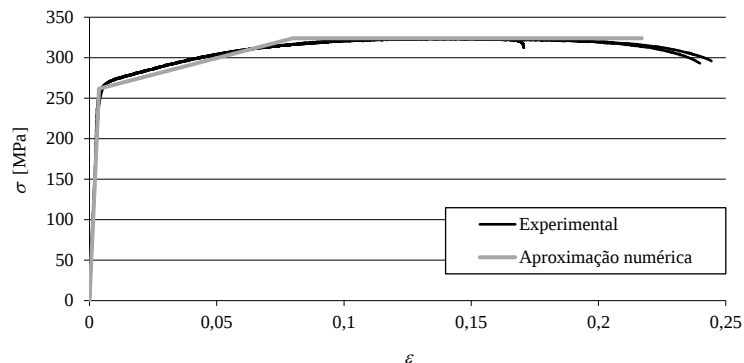


Figura 46 - Curvas experimentais de σ - ϵ do alumínio AW6082 T651 e aproximação para análise de MEF [80]

3.1.3.2 Adesivos

Foram escolhidos quatro adesivos diferentes para assim comparar a resistência de arrancamento destes em aderentes de alumínio. Os adesivos selecionados para este trabalho, de forma a abranger uma gama alargada de ductilidades, foram o adesivo epóxico frágil Araldite® AV138, os adesivos epóxicos moderadamente dúcteis Araldite® AW4858 e Araldite® 2015, e o adesivo de poliuretano dúctil Sikaforce® 7752.

3.1.3.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 utilizado neste trabalho experimental trata-se de um adesivo estrutural com comportamento frágil, embora apresente elevada resistência. Este adesivo é normalmente utilizado para ligações entre diversos materiais, tais como metais, compósitos e polímeros [81]. A ficha técnica deste adesivo encontra-se no anexo 6.2 para consulta.

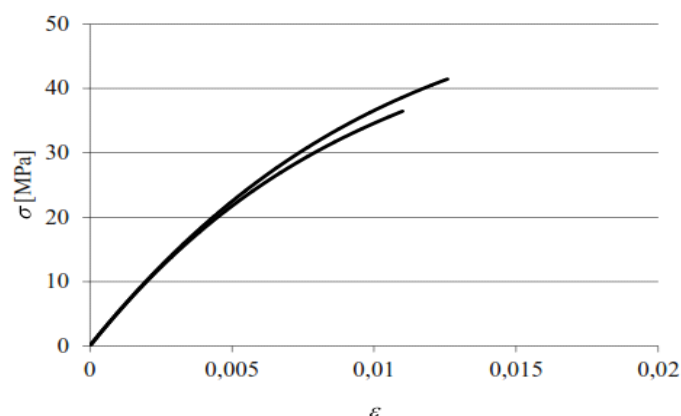
Quanto à formulação deste adesivo, é de base epoxídica termoendurecível e é composto por dois componentes (resina AV138 + endurecedor HV 998-1), apresenta natureza tixotrópica, de cura à temperatura ambiente. Quanto atinge a sua cura completa, este adesivo possui excelente comportamento mecânico até a uma temperatura de 80°C e boa resistência química. O adesivo Araldite® AV138 apresenta baixa viscosidade, o que facilita a aplicação nas superfícies a unir. Uma vez que se trata de um adesivo bi-componente, este é fornecido em duas embalagens para posterior mistura, após a qual, se dispõe de 35 minutos para aplicação. Assim sendo, é necessária a pesagem dos dois componentes. As proporções da mistura são 100 g de resina para 40 g de endurecedor, com uma precisão de $\pm 5\%$. Na Tabela 14 são dispostas as características mecânicas e de fratura do adesivo AV138.

Tabela 14 - Características mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [81]

Propriedades	Valor
Módulo de elasticidade E [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson ν	0,35 ^a
Tensão de cedência à tração σ_y [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura à tração σ_f [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura à tração ε_f [%]	1,21±0,10
Módulo de elasticidade transversal G [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência ao corte τ_y [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura de corte τ_f [MPa]	30,2±0,40
Deformação de rotura ao corte γ_f [%]	7,8±0,7
Tenacidade à tração G_{IC} [N/mm]	0,20 ^b
Tenacidade ao corte G_{IIC} [N/mm]	0,38 ^b

^a Valor do fabricante^b Valor estimado na referência [82].

Para uma melhor compreensão do comportamento do adesivo em bruto, é disposta uma representação das curvas tensão-deformação (σ - ε). Estas curvas foram obtidas experimentalmente por Campilho et al. [80].

Figura 47 - Curvas σ - ε de provetes maciços constituídos pelo adesivo Araldite® AV138 [80]

3.1.3.2.2 Araldite® AW4858

Este adesivo é caracterizado como um adesivo epóxico estrutural de duas partes (resina AW4858 + endurecedor HW4858), com cura à temperatura ambiente. Este adesivo conta com elevada rigidez e tenacidade, e apresenta uma coloração preta. O seu desempenho pode ser ainda aprimorado através de pós cura a elevadas temperaturas. Este adesivo é utilizado para unir materiais metálicos, compósitos e termoplásticos, embora o seu desenvolvimento tenha como foco os materiais compósitos [83]. Sendo este um adesivo de dois componentes, é necessária a combinação dos dois componentes com a relação indicada pelo fabricante. Dispõe-se de 150 minutos de tempo de utilização. A relação de mistura para este adesivo é de 100 g de resina para 42 g de endurecedor. Este produto é fornecido em cartuxos com a proporção adequada dos dois componentes, o que simplifica o processo de aplicação. A ficha técnica deste adesivo encontra-se no anexo 6.3 para consulta. Na Tabela 15 estão dispostas as propriedades mecânicas encontradas na literatura. É de ressaltar que não foram encontradas propriedades de fratura (G_{IC} e G_{IIC}).

Tabela 15 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AW4858 (adaptado de [83-85])

Propriedades	Valor
Módulo de elasticidade E [GPa]	1,247 ^a
Coeficiente de Poisson ν	0,3 ^a
Tensão de cedência à tração σ_y [MPa]	31 ^a
Tensão de rotura à tração σ_f [MPa]	36,17 ^a
Deformação de rotura à tração ϵ_f [%]	0,110 ^a
Módulo de elasticidade transversal G [MPa]	800 ^c
Tensão de cedência ao corte τ_y [MPa]	-
Tensão de rotura de corte τ_f [MPa]	25,76 ^b
Deformação de rotura ao corte γ_f [%]	-
Tenacidade à tração G_{IC} [N/mm]	-
Tenacidade ao corte G_{IIC} [N/mm]	-

^a Valor obtido por [85]

^b Valor obtido por Faria et al. [84]

^c Valor obtido pelo fabricante

É possível visualizar a partir da Figura 48, o comportamento do adesivo em provetes maciços a partir da curva de tensão-deformação (σ - ϵ). Esta curva foi obtida experimentalmente por Faria et al. [84].

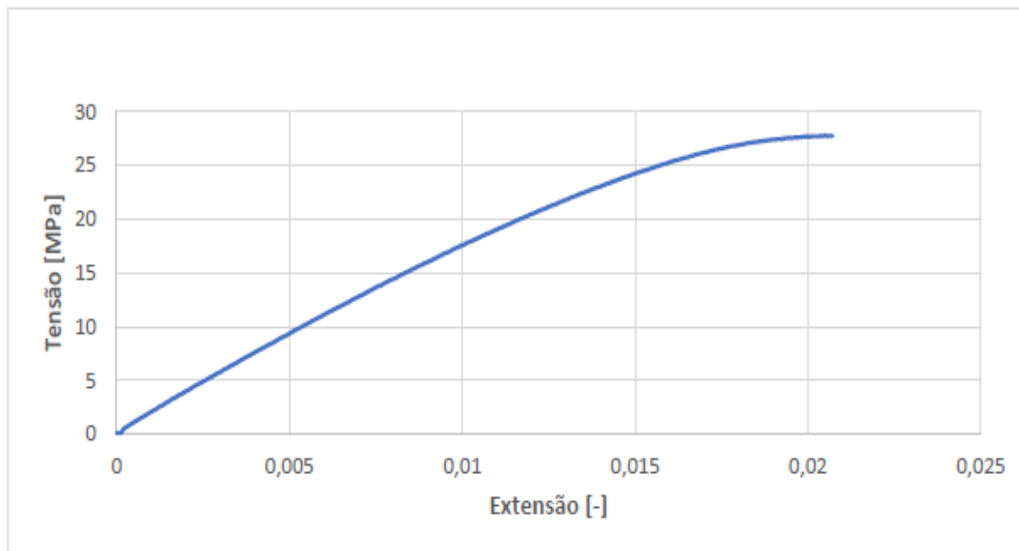


Figura 48 - Curva σ - ϵ relativa ao adesivo Araldite® AW4858 [84]

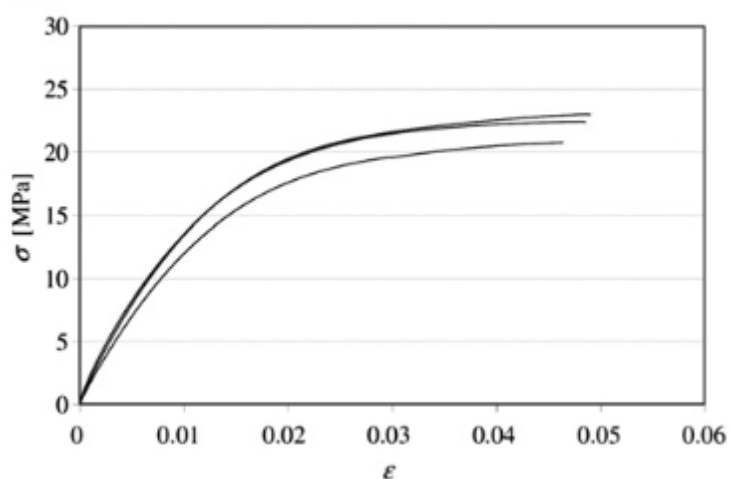
3.1.3.2.3 Araldite® 2015

Trata-se de um adesivo de epóxico estrutural de duas partes, de cura à temperatura ambiente, com ductilidade moderada e elevada resistência quando solicitado ao corte ou arrancamento. Uma vez que se trata de um adesivo dúctil, em junta adesiva este tem alguma capacidade para redistribuição da concentração de tensões nas extremidades da camada de adesivo, o que se traduz numa resistência na junta bastante aceitável. A ficha técnica deste adesivo encontra-se no anexo 6.4 para consulta. Para espessuras abaixo de 10 mm, este adesivo desenvolve um comportamento tixotrópico. Trata-se de um adesivo com dois componentes, e a mistura da resina com o endurecedor faz-se na proporção de 1/1 em volume, o que é conseguido pelo bico de mistura e aplicação fornecido pelo fabricante. O tempo de aplicação é de 30 a 40 minutos. Na Tabela 16 é possível observar as propriedades mecânicas e de fratura do adesivo em causa.

É possível visualizar a partir da Figura 49, as curvas σ - ϵ características deste adesivo, obtidas experimentalmente por Campilho et al. [82] num trabalho anterior.

Tabela 16 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [86]

Propriedades	Valor
Módulo de elasticidade E [GPa]	1,85±0,21
Coefficiente de Poisson ν	0,33 ^a
Tensão de cedência à tração σ_y [MPa]	12,63±0,61
Tensão de rotura à tração σ_f [MPa]	21,63±1,61
Deformação de rotura à tração ε_f [%]	4,77±0,15
Módulo de elasticidade transversal G [GPa]	0,56±0,21
Tensão de cedência ao corte τ_y [MPa]	14,6±1,3
Tensão de rotura de corte τ_f [MPa]	17,9±1,8
Deformação de rotura ao corte γ_f [%]	43,9±3,4
Tenacidade à tração G_{IC} [N/mm]	0,43±0,02
Tenacidade ao corte G_{IIC} [N/mm]	4,70±0,34

^a Valor do fabricanteFigura 49 - Curvas σ - ε relativas ao adesivo Araldite® 2015 (adaptado de [87])

3.1.3.2.4 Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 é um adesivo de dois componentes (adesivo + endurecedor) de cura à temperatura ambiente e que pertence à família dos poliuretanos. O tempo de utilização é de 60 minutos. A ficha técnica deste adesivo encontra-se no anexo 6.5 para consulta. Trata-se de um adesivo tixotrópico com alta viscosidade à temperatura ambiente. Este adesivo normalmente utilizado para montagem de painéis *sandwich*, embora possa ser aplicado em vários materiais, como por exemplo madeiras e derivados de madeiras, metais e materiais cerâmicos. Este é um adesivo estrutural que possui boa resistência térmica e ao impacto, e resistência ao corte e ao arrancamento aceitáveis. Na Tabela 17 é possível a observação das propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752.

Tabela 17 - Características mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752 [86]

Propriedades	Valor
Módulo de elasticidade E [GPa]	0,49±0,09
Coefficiente de Poisson ν	0,30 ^a
Tensão de cedência à tração σ_y [MPa]	3,14±0,48
Tensão de rotura à tração σ_f [MPa]	11,85±0,25
Deformação de rotura à tração ϵ_f [%]	19,18±0,40
Módulo de elasticidade transversal G [GPa]	0,19±0,01
Tensão de cedência ao corte τ_y [MPa]	5,16±1,14
Tensão de rotura de corte τ_f [MPa]	10,17±0,64
Deformação de rotura ao corte γ_f [%]	54,82±6,38
Tenacidade à tração G_{IC} [N/mm]	2,36±0,17
Tenacidade ao corte G_{IIC} [N/mm]	5,41±0,47

^a Valor do fabricante

Este adesivo apresenta um comportamento dúctil, tal como se verifica nas curvas σ - ϵ da Figura 50, obtidas por Barbosa et al. [87] num trabalho anterior.

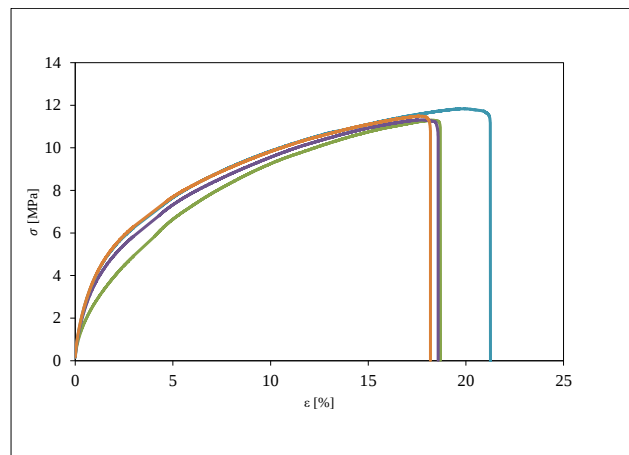


Figura 50 - Curvas σ - ϵ relativa ao adesivo Sikaforce® 7752 (adaptado de [87])

3.1.4 Modelação numérica

3.1.4.1 Modelo de dano coesivo triangular

A lei de dano triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [88]. Trata-se de um modelo baseado em elementos coesivos de interface [7] de quatro nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do Abaqus®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 50).

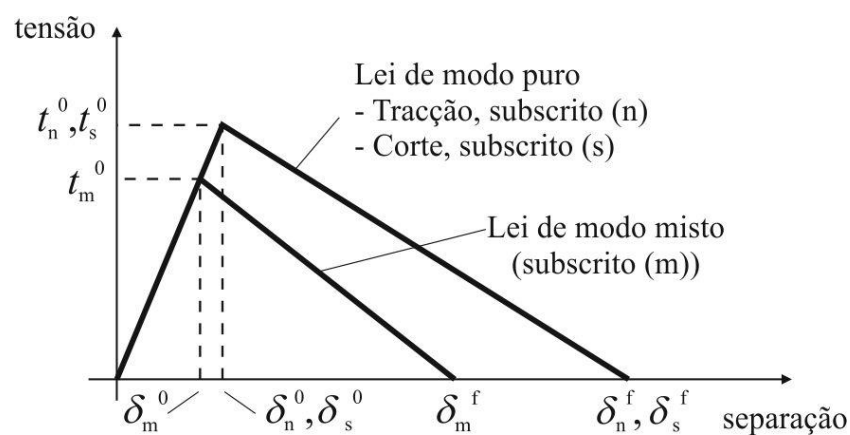


Figura 51 - Modelo coesivo triangular (adaptado de [65])

Esta lei de dano (Figura 51) assume inicialmente um comportamento linear elástico, seguido de degradação linear. O comportamento elástico é definido por uma matriz constitutiva ($\mathbf{K}$) que contém os parâmetros de rigidez, e relaciona as tensões e deformações em tração e corte ao longo dos elementos coesivos (subscritos n e s, respetivamente).

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

Para camadas finas de adesivo, uma aproximação viável é dada por $K_{nn}=E$, $K_{ss}=G$ e $K_{ns}=0$. A iniciação do dano pode ser especificada por diferentes critérios. Neste trabalho, foi considerado o critério quadrático de tensões que se segue para a iniciação do dano, por já ter sido provada a sua fiabilidade [89], obtido por

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (18)$$

$\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_m^0 na Figura 51), através da equação anterior, a rigidez do material é degradada. A separação completa é prevista por um critério linear energético da forma

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (19)$$

3.1.4.2 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} (capítulo 3.1.4.1). No passado, foram publicados alguns estudos que, por aproximação, assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios em adesivo maciço [90, 91]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos aderentes 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 [92, 93]. Assim sendo, é necessária a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

Para a determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138, foi utilizado um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [82]. Foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios em adesivo maciço e ensaios de corte TAST para a definição de t_n^0 e t_s^0 , respetivamente. 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 utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a junta de sobreposição simples com L_0 de 20 mm), e as leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas, com resultados

bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST). Noutro trabalho [80], conclui-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades dos adesivos. A Tabela 18 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138, numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 18 - Parâmetros da camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm

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

Para a determinação das propriedades coesivas do adesivo Araldite® AW4858, algumas das suas propriedades foram determinadas em trabalhos anteriores [84], [85] através de ensaios à tração com provetes maciços e ensaio *block shear*. O valor de t_n^0 foi obtido através do ensaio em provetes *bulk* de adesivo, enquanto o valor de t_s^0 foi obtido através do ensaio *block shear* por Faria et al. [84].

O valor do módulo de elasticidade longitudinal, E , foi obtido através do ensaio à tração em provetes *bulk*. O módulo de corte da camada de adesivo, G é obtido através da ficha técnica do produto emitida pelo fabricante uma vez que é o único existente encontrado.

Por ausência de dados, foram utilizados valores de G_{IC} e G_{IIC} iguais aos do adesivo Araldite® 2015 por ter um comportamento semelhante. Neste sentido, é necessário verificar a adequabilidade desta suposição.

Tabela 19 - Parâmetros da camada de adesivo Araldite® AW4858 com uma espessura de 0,2 mm

E [MPa]	1247	G [MPa]	800
t_n^0 [MPa]	36,17	t_s^0 [MPa]	25,76
G_{IC}^a [N/mm]	0,43	G_{IIC}^a [N/mm]	4,7

^a Por ausência de dados, foram considerados os valores do adesivo Araldite® 2015

Para o adesivo Araldite® 2015, as leis coesivas da camada de adesivo foram determinadas em trabalhos anteriores [94, 95] por um método inverso para a determinação de t_n^0 e t_s^0 . Nestes trabalhos é apresentada uma descrição mais detalhada desta metodologia, que basicamente consiste na determinação de G_{IC} e G_{IIC} através de ensaios DCB e ENF, respetivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de G_{IC} ou G_{IIC} é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de t_n^0 ou t_s^0 ,

estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de t_n^0 ou t_s^0 é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais do teste respetivo de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. A Tabela 20 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva em modo misto. Os valores de E e G , módulo de elasticidade em tensão e corte da camada de adesivo, respetivamente, foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST – *Thick adherend shear test*), respetivamente [96].

Tabela 20 - Parâmetros da camada de adesivo Araldite® 2015 com uma espessura de 0,2 mm

E [MPa]	1850	G [MPa]	650
t_n^0 [MPa]	23,0	t_s^0 [MPa]	22,8
G_{IC} [N/mm]	0,43	G_{IIC} [N/mm]	4,7

O processo de obtenção de propriedades coesivas para o adesivo Sikaforce® 7752 seguiu um processo algo idêntico ao utilizado para o Araldite® 2015. De facto, para a determinação da lei coesiva ao corte, foi seguido um método inverso idêntico, correspondente à determinação do valor de G_{IIC} por ensaio de fratura ENF, seguido de ajuste iterativo manual para a estimativa de t_s^0 [97]. Os valores utilizados neste trabalho são os valores médios de t_s^0 e G_{IIC} obtidos na referência [97], cujo desvio entre provetes foi bastante reduzido, traduzindo a repetibilidade dos ensaios efetuados. Por outro lado, para a lei coesiva em tração, devido à inexistência, até à data, de procedimento inverso, foi seguido um processo distinto. O valor de G_{IC} foi obtido por ensaios de fratura DCB [98], nomeadamente o valor médio de uma série de ensaios. O valor de t_n^0 foi aproximado ao valor médio de resistência à tração de provetes maciços, ensaiados no mesmo trabalho [94]. Como foi definido em trabalhos anteriores que, no caso particular de solicitação à tração, o valor de t_n^0 não tem influência digna de registo para variações de t_n^0 até 25% do valor obtido por método inverso (variação nos dois sentidos) [94], não foi considerado relevante neste trabalho a realização do dito procedimento. Os valores de E e G foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST) [98]. A Tabela 21 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada de adesivo Sikaforce® 7752, numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 21 - Parâmetros da camada de adesivo Sikaforce® 7752 com uma espessura de 0,2 mm

E [MPa]	493,81	G [MPa]	37,49
t_n^0 [MPa]	12,25	t_s^0 [MPa]	10,50
G_{IC} [N/mm]	2,36	G_{IIC} [N/mm]	5,56

3.1.4.3 Preparação dos modelos numéricos

A análise numérica para este trabalho foi efetuada com recurso ao *software* ABAQUS®. Este programa permite a análise de elementos finitos, e tem disponível para utilização o MDC que utiliza elementos coesivos de espessura finita e igual a t_a .

No ABAQUS® o utilizador define as variáveis de entrada em estudo, tais como:

- Geometria da junta a testar;
- As propriedades mecânicas dos aderentes e os vários adesivos utilizados;
- O tipo de análise a realizar e respetivos controlos;
- As condições fronteira e deslocamentos;
- Interações do provete com os roletes;
- Tamanho e forma da malha, e tipo de elementos.

Para dar início ao trabalho numérico, é criada a geometria da junta adesiva a testar, através do acesso ao módulo *Part*, do *software*. Neste módulo são criados os provetes com as dimensões referidas no capítulo 3.1.2 segundo consulta da norma ASTM D3167, considerando $t_a=0,2$ mm, utilizando modelos bidimensionais (2D). A criação dos provetes no *software* conta com um seccionamento em várias partes, em prol de facilitar a construção de uma malha de elementos finitos de forma mais eficiente. Uma malha com utilização mais eficiente leva a resultados mais precisos em menor custo computacional. Para este efeito, é construída uma malha mais refinada nas zonas dos elementos em contacto com a junta adesiva, para maior detalhe e menos refinada nas restantes áreas da junta.

Uma vez que o acessório utilizado para o ensaio *floating roller peel* conta com a presença de dois roletes que contactam com o provete, é modelado o respetivo rolete com 12,7 mm de raio, para montagem no módulo de montagem do conjunto (*assembly*) e são considerados os dois roletes inferiores, uma vez que serão os que contactam com o provete.

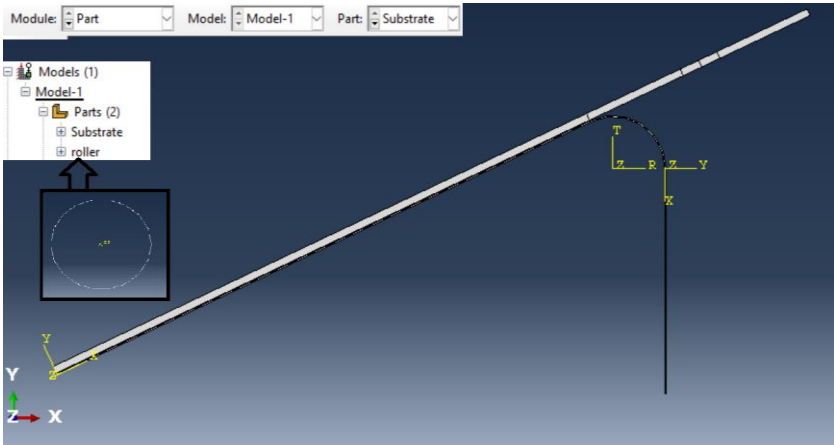


Figura 52 - Criação das partes intervenientes no ABAQUS® para simular o *floating roller peel test*

Após construção geométrica das partes intervenientes no ensaio, são definidos os materiais para cada uma das secções do provete (aderente e adesivo). A partir do módulo *property* são inseridas as propriedades dos materiais dos aderentes e adesivos. Neste sentido, para os aderentes, foi considerada uma secção sólida homogénea, considerando um material isotrópico com a introdução de propriedades do seu comportamento no regime elástico e plástico. É definido o material do aderente em alumínio com as propriedades presentes na Tabela 22.

Tabela 22 - Propriedades do aderente inseridas no ABAQUS®

Material	E [GPa]	ν	σ_y [MPa]	σ_f [MPa]
Alumínio	70	0,3	261,67	324

Neste mesmo módulo são introduzidas também as propriedades mecânicas dos adesivos utilizados, como também as propriedades do dano, a sua evolução e as propriedades elásticas, estando estas presentes no subcapítulo 3.1.4.2. em detalhe. À secção do adesivo foi atribuída uma camada de elementos, modelada com elementos coesivos. Os elementos coesivos foram testados com as propriedades de fratura, utilizando critérios para iniciação de fenda diferentes, respetivamente o *Quads* e *Maxs damage*. O critério *Quads* é baseado na combinação quadrática dos três rácios, enquanto o critério *Maxs* utiliza o máximo valor dos três rácios t_n^0 , t_s^0 e t_t^0 . Na Figura 53 é possível observar as opções de escolha para iniciação do dano.

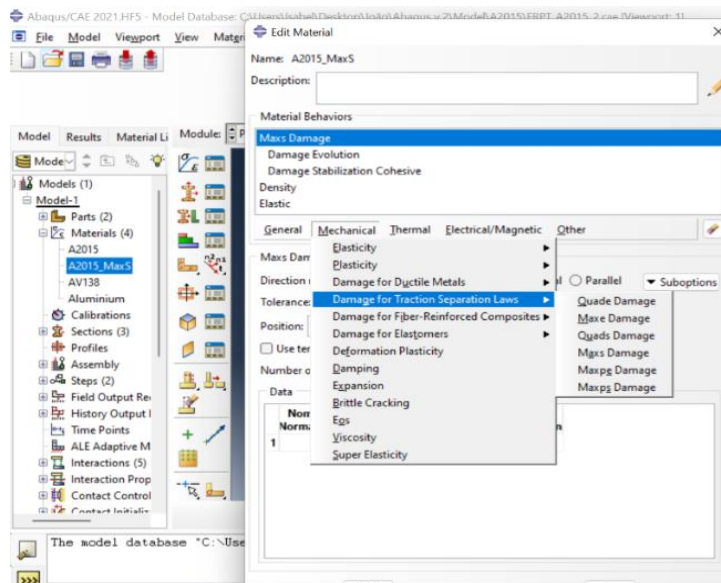


Figura 53 - Possíveis escolhas para o critério de dano a usar.

No módulo *Assembly* é montado o conjunto para o ensaio *floating roller peel*, através da introdução dos dois roletes inferiores e o provete para ensaio (Figura 54). Para definir as condições aplicadas a cada rolete, em cada um destes é criado um ponto de referência no centro da circunferência. É atribuído um ponto de referência “pivot” no topo, com o objetivo de representar o centro de circunferência do rolete que não entra em contacto com o provete, e outro ponto onde estará localizada a maxila. Para melhor compreensão é denominado como rolete 3 o que não contacta com os aderentes, rolete 2 o que apenas contacta com o aderente rígido e rolete 1 o que contacta com o aderente flexível. De acordo com a norma ASTM D3167, a distância entre os roletes 2 e 3 é de 33 mm, enquanto a distância horizontal entre os roletes 1 e 2 é de 30,5 mm. Para poder estabelecer uma relação entre estes três roletes e permitir a rotação em torno do rolete 3, são criadas circunferências de raio 33 mm e 44,94 mm com o seu centro no ponto “pivot”. O valor de 44,94 mm da segunda circunferência é conseguido através da aplicação do teorema de Pitágoras, uma vez que a relação entre os três pontos tem a forma de um triângulo retângulo. O rolete criado no módulo *part* é colocado 2 vezes (rolete 1 e 2), com o seu centro de circunferência na linha do arco das circunferências com linhas de construção criadas, de raio 33 mm e 44,94 mm, respetivamente. É possível pela Figura 54 uma melhor observação dos passos efetuados.

O provete é inserido no conjunto através da colocação do aderente rígido sobre o rolete 2, atribuindo uma condição de tangência com a circunferência deste. Para a colocação do provete no rolete 1 foi criada uma circunferência concêntrica com o rolete 1, e com raio igual à soma de 12,7 mm (raio do rolete 1) com a espessura do provete e adesivo, resultando num raio de 13,4 mm. Após a criação desta referência é colocado o arco de circunferência presente no aderente flexível concêntrico com esta referência. É criada a distância entre a extremidade do provete e o centro do rolete 1 de 145 mm.

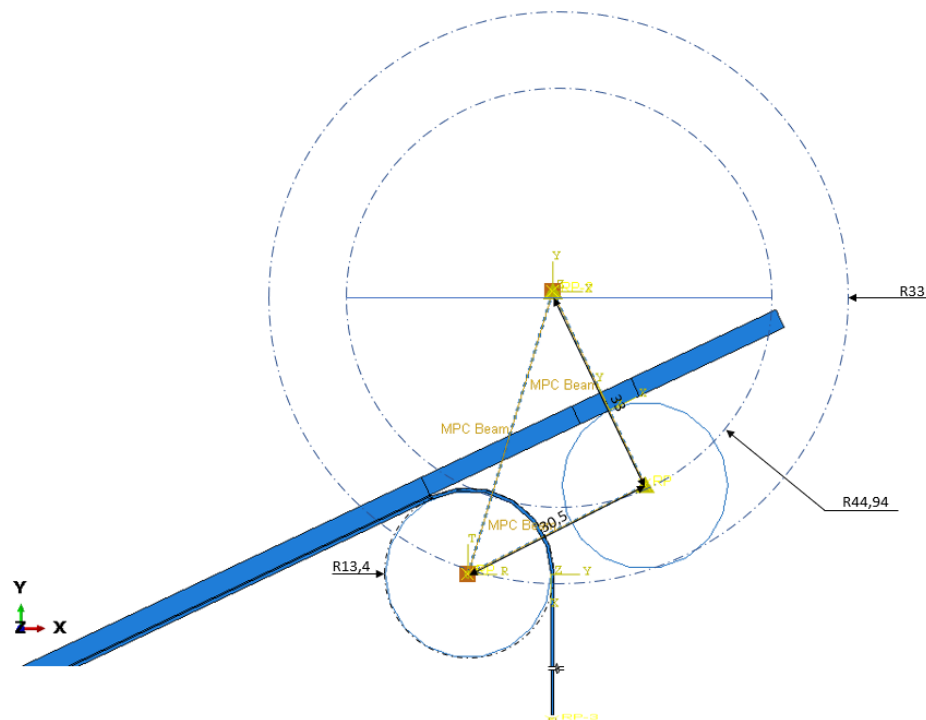


Figura 54 - Identificação das cotas de construção do modelo

Como mostrado na Figura 54, é criado um sistema de coordenadas no “pivot” para extração dos valores de força apenas numa componente (dizer onde). Através de uma linha de construção entre o “pivot” e o ponto onde se localiza a amarra (RP3), é posicionado o aderente flexível paralelamente a esta linha de construção e a uma distância de metade do valor de t_f .

No módulo *step* é criado um procedimento *dynamic explicit* não linear geométrico que diz respeito à alteração de estado do provete, ou à posição final que é desejada para o ensaio, com o nome “pull”. Neste mesmo módulo, no *manager* do *history output* são definidos os pontos de registo de força e deslocamento: o “pivot” é definido para registo dos valores das forças ao longo da simulação, e no ponto “RP3” é registado o deslocamento.

Seguidamente, no módulo *interactions*, são definidas as interações entre os elementos criados. É definida uma relação de contacto entre o aderente flexível e o rolete 1. Também é definida uma relação de contacto entre o aderente flexível e o rolete 2 pois, fruto da deformação plástica do aderente flexível, este poderá contactar com o rolete 2, resultando em valores diferentes de força de arrancamento. É definida uma relação de contacto entre o rolete 2 e o provete rígido. No ponto inferior onde é simulada a amarra, é definida uma condição de acoplamento à face da extremidade do provete flexível, garantindo durante a solicitação a respetiva transmissão de esforços.

O movimento relativo dos roletes durante o ensaio é simulado através da criação da condição MPC *beam* entre os centros de circunferência dos três roletes, que permite

uma rotação livre do conjunto em torno do centro do rolete 3. Na Figura 55 é possível identificar as interações definidas através de símbolos em forma de quadrado, enquanto as condições *beam* estão representadas por uma linha entre os três roletes, permitindo a rotação livre.

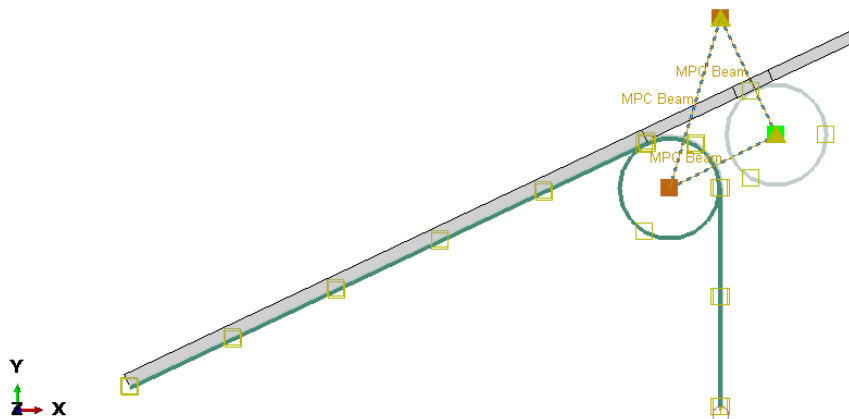


Figura 55 - Interações definidas no modelo

No módulo *load* são definidas as condições fronteira. É aplicado um deslocamento de 105 mm no aderente flexível, no sentido descendente, de forma a proporcionar o arrancamento do aderente. É restringido o movimento horizontal da amarra inferior, ponto B, como também a restrição do movimento do ponto A nos dois eixos. Na Figura 56 é possível observar as condições fronteira aplicadas.

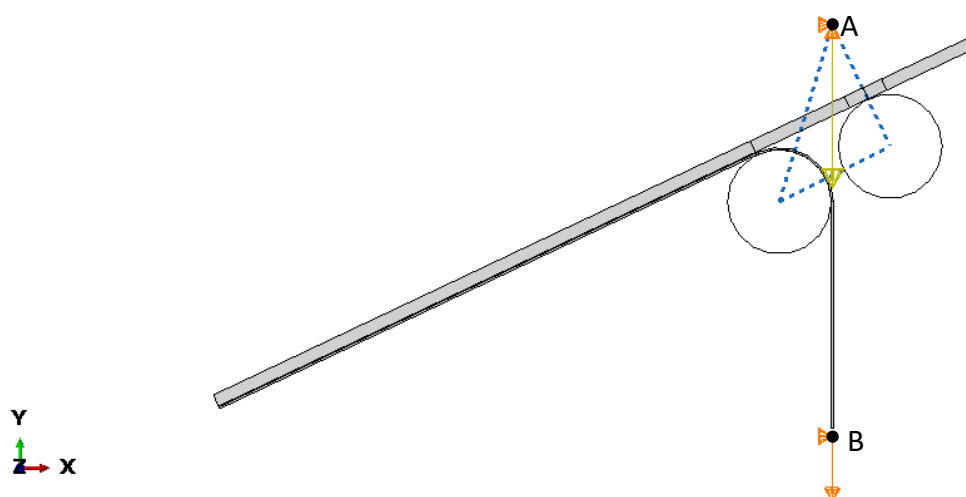


Figura 56 - Condições de fronteira e deslocamentos aplicados ao modelo

São contruídas no módulo *mesh* as malhas da simulação. Para a criação da malha no aderente rígido, foi inicialmente escolhida uma malha do tipo livre com elementos predominantemente quadrados, com elementos da família *plane strain* (CPE3 e CPE4R). De salientar que, posteriormente, a mesma malha foi testada também com elementos

da família *plane stress* (CPS3 e CPS4R) de modo a comprar a variação resultante na escolha do tipo de elemento selecionado. A malha foi construída de tal forma de o aderente rígido apresentar maior refinamento na face inferior de contacto com o adesivo e rolete (comprimento de aresta dos elementos de 0,075 mm), com o objetivo de reproduzir de forma fiável as distribuições de tensões na face do aderente e de tornar a análise mais eficiente, uma vez que a parte superior do aderente rígido não apresenta gradientes significativos de tensões. Assim sendo, foram aplicados efeitos de gradação das dimensões ao longo da espessura de 0,075 para 0,375 mm, e tamanho de aresta de 1mm para a face superior longitudinal do provete. Para o aderente flexível foi proposta uma malha composta por quadrados, com a técnica de construção de malha *sweep*, com a utilização de 7 elementos no mínimo ao longo da espessura com dimensões iguais. O adesivo foi modelado com um elemento coesivo de 4 nós, do tipo COH2D4, ao longo da espessura do mesmo, com comprimento de aresta de 0,075 mm. Na Figura 57 visualiza-se a malha utilizada para o aderente flexível e rígido, bem como para o adesivo.

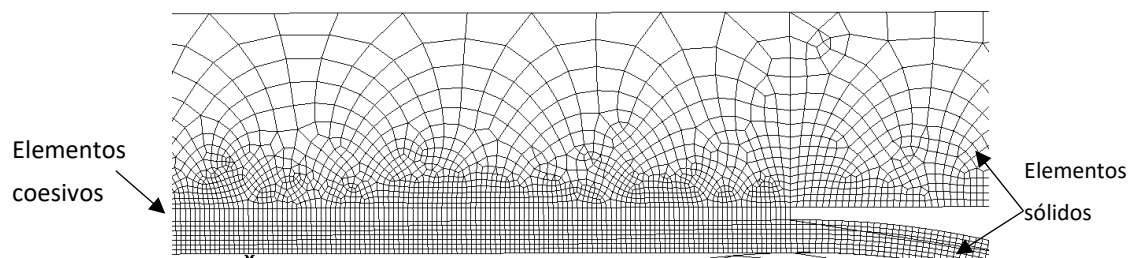


Figura 57 - Malhas utilizadas no modelo numérico

De modo a serem obtidos resultados, numa fase final é criada, no módulo *job*, a instrução para o trabalho a realizar e também a sua precisão. Neste módulo pode ser também acompanhado o processo de simulação numérica até à sua conclusão.

3.2 Trabalho experimental

3.2.1 Procedimento experimental

A parte experimental deste trabalho consistiu no fabrico de 4 provetes para cada um dos 4 adesivos considerados, o que perfaz um total de 16 provetes. Foi efetuada a colagem de um aderente rígido a um aderente flexível através da utilização de um adesivo, utilizando a configuração de provetes presente na norma ASTM D3167. São utilizados quatro adesivos diferentes para efetuar a colagem das 16 juntas: Araldite® AV138, Araldite® AW4858, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

3.2.1.1 Fabrico das juntas

Neste subcapítulo são descritas as etapas do processo de fabrico das juntas adesivas em estudo na presente dissertação. Para o fabrico dos provetes rígidos em alumínio foi

necessário em primeiro lugar efetuar o corte em guilhotina de cada provete com a largura de 25 mm, uma vez que o material já era fornecido em placa com a respetiva dimensão de comprimento adequada, $L_0=205$ mm. Já os provetes flexíveis foram fornecidos com as dimensões adequadas para ensaio.

Considerando a importância da preparação superficial de um aderente, foi efetuada uma preparação superficial dos aderentes nas zonas em contacto com o adesivo através de um processo passivo mecânico de abrasão por lixa. Este processo permite uma remoção de óxidos depositados e confere uma maior rugosidade à superfície a fim de melhorar a molhagem do adesivo no aderente e, por sua vez, melhorar a adesão. Foi utilizada uma lixa com granulometria 60 para os dois aderentes de alumínio.

Após utilização do processo de preparação superficial por abrasão é efetuado um desgorduramento através de um processo passivo químico. A utilização deste processo visa a remoção de partículas sólidas deixadas pelo processo anterior de lixagem, assim como remover qualquer gordura depositada na superfície que estaria em contacto com a camada adesiva. Esta limpeza foi efetuada manualmente com recurso a acetona. É efetuada a identificação de cada provete, tal como anunciado na Tabela 23, para fazer corresponder o adesivo utilizado, numerando cada provete de 1 a 4, após a sua designação.

Tabela 23 - Designação dos provetes por adesivo utilizado

Adesivo	Designação
Araldite® AV138	AV138
Araldite® AW4858	4858
Araldite® 2015	2015
Sikaforce® 7752	7752

Concluído o processo de preparação superficial, procede-se à preparação de todos os materiais necessários para a colagem da junta adesiva. De forma a garantir a espessura de adesivo desejada ($t_a=0,2$ mm) ao longo do comprimento de adesão e a existência de uma pré-fenda inicial, foram utilizados dois espaçadores, um em cada extremidade da camada de adesivo. Por um lado, considerou-se uma lâmina de aço com 0,2 mm de espessura na extremidade oposta à fenda inicial de forma a garantir o valor especificado de t_a . Por outro lado, para a extremidade oposta e criação da pré-fenda, foi fabricado um espaçador constituído por uma lâmina de barbear com 0,1 mm de espessura entre duas lâminas de 0,05 mm de espessura, ligadas por adesivo de cianoacrilato, o que permitiu garantir o valor de t_a desejado e simular um defeito inicial. É possível verificar a colocação diferencial das lâminas através da Figura 58. Anteriormente à colocação das

lâminas, foi efetuada uma limpeza superficial com acetona e aplicado desmoldante, para evitar a adesão destas aos provetes durante a aplicação do adesivo, para assim ser possível a sua remoção após cura do conjunto. A colocação das lâminas é feita no aderente flexível de cada provete nas extremidades da dimensão de L_0 .



Figura 58 - Colocação das lâminas de aço inoxidável no aderente rígido

Posteriormente a esta etapa de processo, iniciou-se a preparação do adesivo para a colagem. Uma vez que cada adesivo utilizado requer preparações diferentes, devido às suas características, tem-se:

- Os adesivos Araldite® AW4858 e Araldite® 2015, embora tenham proporções diferentes de mistura, 100 g/42 g e 100 g/100 g, respetivamente, apresentam o mesmo formato comercial de bisnagas e bicos de mistura que debitam os componentes de adesivo na proporção correta sem necessidade de pesagem. A aplicação destes adesivos é feita através do uso de uma pistola manual de pressão, e a mistura é assegurada pelo bico de mistura da própria embalagem. A aplicação na área de colagem é feita seguindo um padrão de zig-zag (Figura 59).



Figura 59 - Aplicação do adesivo nos aderentes flexíveis

- Os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 são constituídos por dois componentes fornecidos em embalagens separadas, pelo que é necessária a mistura de resina com o endurecedor. As proporções de mistura para estes dois adesivos são de 100 g/40 g e 100 g/20 g, respetivamente. A quantificação de cada elemento é efetuada através do auxílio de uma balança digital. Os dois componentes são mexidos manualmente até obter uma mistura homogênea do

adesivo. Após mistura do adesivo, este é aplicado manualmente através de uma espátula a fim de distribuir uniformemente o adesivo ao longo do comprimento de colagem.

A cura dos adesivos é efetuada à temperatura ambiente no decorrer de uma semana. A aplicação dos adesivos nos aderentes foi efetuada sobre placas de madeira sob cavaletes, revestidos por uma folha de politetrafluoretileno (PTFE), com o objetivo de evitar a colagem dos provetes à base utilizada. Após aplicação do adesivo nos aderentes flexíveis são colocados os aderentes rígidos corretamente posicionados. Este contacto é feito cuidadosamente, de forma a conservar a espessura de adesivo e garantir o alinhamento dos provetes. De seguida são colocados grampos na zona de sobreposição (Figura 60), sendo aplicada pressão constante entre os aderentes e as laminas para garantir a espessura de adesivo desejada. A pressão resultante faz com que o excesso de adesivo seja expulso pelas faces laterais do provete.



Figura 60 - Posicionamento dos grampos para alinhamento dos provetes

A cura de todos os adesivos utilizados ocorreu durante uma semana à temperatura ambiente. Uma vez atingida a cura total, são removidos os grampos e retirados os provetes da base que os sustenta. São removidas as lâminas de aço do interior do provete e procede-se à remoção do excesso de adesivo nas faces laterais. As lâminas são retiradas com o auxílio de um x-ato, sendo o provete colocado num torno para ajudar a imobilizá-lo. Esta etapa é simplificada através da aplicação prévia de um agente desmoldante. De qualquer forma não é descartado qualquer cuidado na remoção das lâminas, uma vez que qualquer erro pode originar alterações na geometria dos provetes ou deformação plástica nos aderentes flexíveis. Para a remoção dos excessos é utilizado inicialmente um alicate de pontas e, posteriormente, recorreu-se à utilização de uma lima para deixar as superfícies laterais uniformes.

Na Figura 61 é possível observar o resultado final. O procedimento de remoção de excesso de adesivo é importante, pois este influencia a resistência das juntas relativamente à geometria teórica, considerando uma camada com espessura constante.



Figura 61 - Provete após remoção das lâminas e excesso de adesivo

3.2.1.2 Ensaio das juntas

A última etapa laboratorial deste trabalho destina-se ao ensaio dos provetes produzidos. O ensaio das juntas realizou-se no laboratório de ensaios tecnológicos do ISEP, com recurso a uma máquina de ensaios de tração Shimadzu® AG-1 equipada com uma célula de carga de 10 kN. Previamente ao início aos ensaios, é substituída a amarra superior pelo acessório para ensaios *floating roller peel*, compatível com as dimensões da norma de ensaio ASTM D3167. Os ensaios foram concretizados a uma velocidade de ensaio de 125 mm/min à temperatura ambiente. O afastamento das amarras foi continuado até à completa separação dos aderentes.

Após montagem do acessório é colocado o aderente rígido apoiado sob os dois roletes, enquanto o aderente flexível é dobrado ligeiramente e fixo à amarra inferior. Durante a realização do ensaio, o crescimento da fenda causa movimento lateral do provete, pelo que é importante manter o alinhamento do mesmo através da rotação livre do acessório de fixação relativamente ao apoio da máquina de ensaios. É possível verificar a fixação do provete e a correta montagem da amarra na Figura 62.

O fenómeno de arrancamento é conseguido através do acessório de ensaio, que transforma o deslocamento ascendente da amarra em esforços de arrancamento, permitindo que o aderente rígido deslize ao longo dos dois roletes. Na Figura 63 é possível observar um provete após término de ensaio (rotura total da ligação).



Figura 62 - Posicionamento de um provete de ensaio *floating roller peel test* numa máquina de ensaios Shimadzu® AG-1



Figura 63 - Provete após ensaio

3.2.1.3 Tratamento dos dados

Através do seguimento da norma utilizada para este ensaio (ASTM D3167), posteriormente é necessário retirar os seguintes dados: a força de arrancamento média durante a solicitação do provete ao arrancamento ($P_{\text{média}}$), força de arrancamento mínima ($P_{\text{mínima}}$), força de arrancamento máxima ($P_{\text{máxima}}$), força de arrancamento por unidade de largura do provete (P/b) e o respetivo modo de rotura de cada provete.

Após a extração de dados da célula de carga, é necessário o tratamento dos mesmos conforme as especificações da norma. Devem ser analisados pelo menos 76,2 mm de propagação de fenda, sendo que são desprezados os primeiros 25,4 mm uma vez que a força aplicada até este valor de deslocamento tem variação até estabilização do valor para extração dos valores da resistência ao arrancamento. Portanto, os resultados são analisados entre os 25,4 mm e os 105 mm de deslocamento aplicado. O cálculo de P/b , mais conhecido na literatura por resistência de arrancamento ou *peel strength*, é calculado através da média de valores da força de arrancamento obtida por unidade de largura entre o intervalo de ensaio referido. Os valores obtidos são alvo de uma representação gráfica de P/b em função do deslocamento de propagação de fenda na junta adesiva.

Com o ensaio das juntas adesivas é possível também observar dois modos de rotura, adesiva e coesiva. É feita uma análise visual, estimando o valor percentual aproximado do tipo de rotura apresentada.

3.2.2 Resultados

No desenvolver deste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos após a realização dos ensaios de arrancamento. O capítulo 3.2.2.1 explora os modos de rotura ocorridos em cada provete, quantificando-os. Após esta análise, são analisados os dados de força de arrancamento no capítulo 3.2.2.2 através da comparação gráfica entre os provetes fabricados com o mesmo adesivo, para posterior comparação entre adesivos no capítulo 3.2.2.3. Finalmente comparam-se os valores obtidos com os presentes na literatura (capítulo 3.2.2.4).

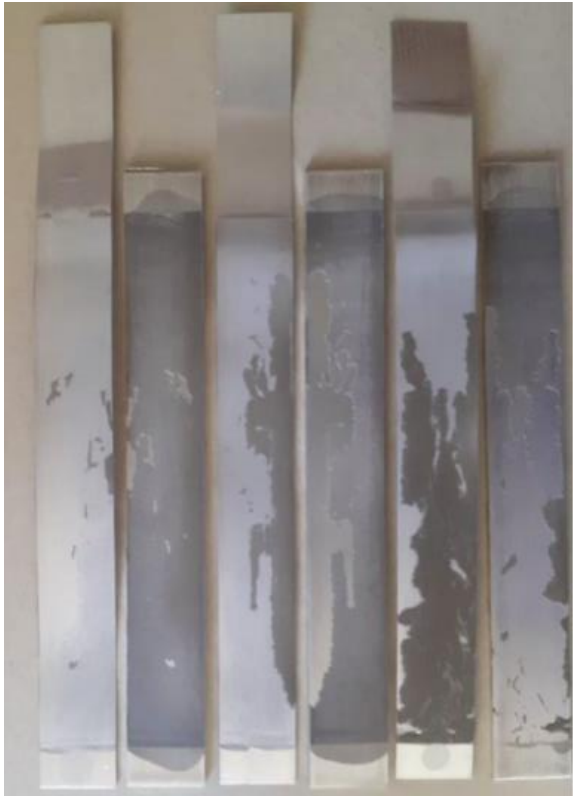
3.2.2.1 Modos de rotura

A partir da Tabela 24 é possível observar os modos de rotura resultantes após ensaio dos provetes AV138. Contudo, a presença de apenas três provetes é justificada pelo erro no fabrico do provete 4 do grupo de provetes AV138.

Através de uma análise cuidada conclui-se que o modo de rotura mais presente é o coesivo. Embora este modo de rotura tenha sido predominante, é possível observar pequenas zonas onde não se verifica a presença de adesivo em ambas as faces dos

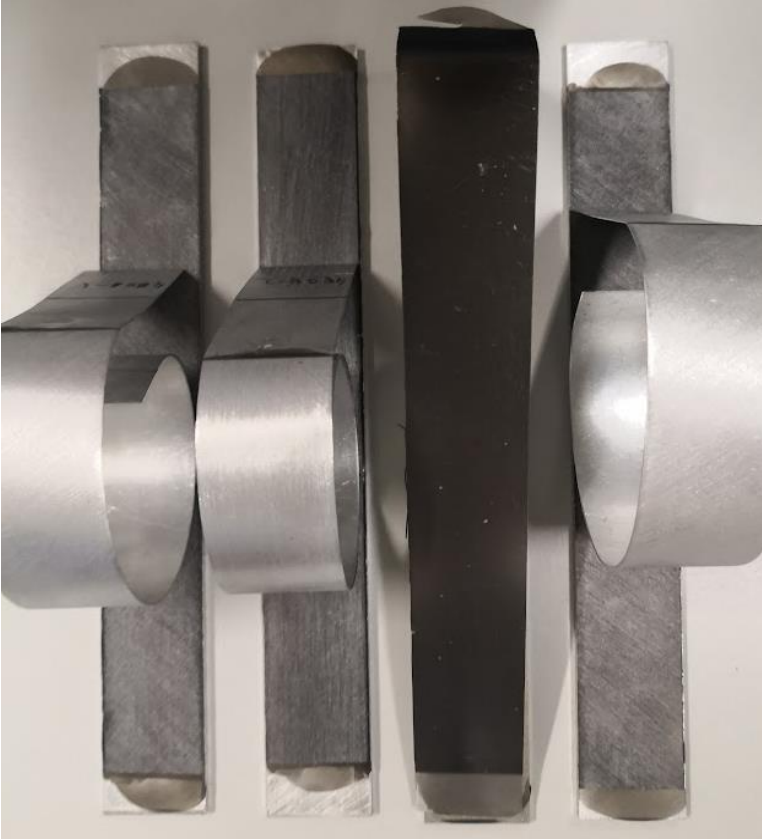
aderentes. Com isto, conclui-se que, no geral, as forças de adesão entre o adesivo e o aderente foram superiores às forças de coesão do adesivo.

Tabela 24 - Modos de rotura nos provetes com adesivo Araldite® AV138

Proвете	AV138-1	AV138-2	AV138-3	Média (%)
				
Coesiva (%)	81	63	65	70
Adesiva (%)	19	37	35	30

Na Tabela 25 é possível identificar os quatro provetes com adesivo Araldite® AW4858 e observar os modos de rotura associados. Após ensaio dos provetes é possível verificar, através de análise cuidadosa, que o modo de rotura em três provetes foi maioritariamente coesivo. No entanto, o provete 4858-3 sofreu rotura totalmente adesiva. Isto demonstra que a resistência de ligação entre o adesivo e uma interface do aderente é fraca. Esta disparidade no modo de rotura relativamente aos outros, está associada a uma falha no fabrico deste provete uma vez que, após a preparação superficial através de lixagem do provete 4858-3, a colagem foi efetuada do lado oposto à superfície com tratamento superficial, o que resulta em baixa força de adesão.

Tabela 25 - Modos de rotura nos provetes com adesivo Araldite® AW4858

Proвете	4858-1	4858-2	4858-3	4858-4	Média (%)
					
Coesiva (%)	99	98	0	95	97 ^a
Adesiva (%)	1	2	100	5	3 ^a

^a Valor excluindo o provete 4858-3

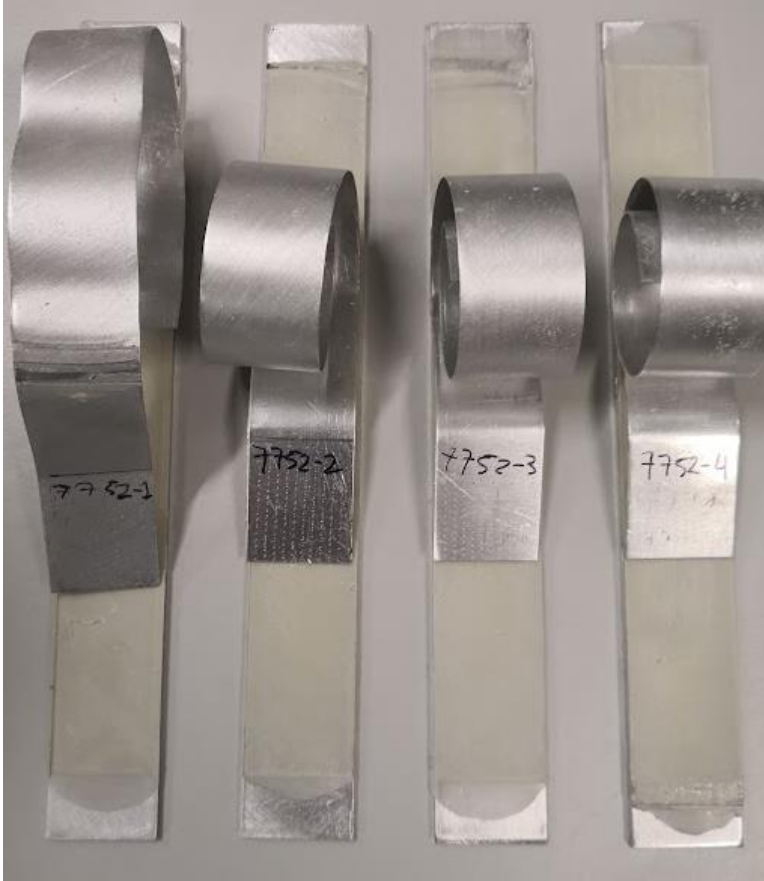
Através da Tabela 26 é possível verificar os modos de rotura resultantes do ensaio dos 4 provetes com adesivo Araldite® 2015. Com a análise da superfície dos aderentes é possível verificar que os modos de rotura foram predominantemente de rotura coesiva. São de pequena dimensão as áreas onde se verifica que não houve inclusão de adesivo nos dois aderentes. Desta forma, é possível concluir que a resistência do próprio adesivo é inferior à força da ligação entre o adesivo e os aderentes, o que reflete a preparação adequada dos provetes. São apresentados os valores que quantificam o modo de rotura em cada provete.

Tabela 26 - Modos de rotura dos provetes com adesivo Araldite® 2015

Proвете	2015-1	2015-2	2015-3	2015-4	Média (%)
					
Coesiva (%)	99	98	99	95	98
Adesiva (%)	1	1	1	5	2

Os modos de rotura observados para os provetes com adesivo Sikaforce 7752 estão presentes na Tabela 27. Em paralelo com os resultados obtidos anteriormente, o modo de rotura mais presente foi a rotura coesiva. Através da análise das superfícies dos aderentes é possível verificar que todos os provetes com a utilização deste adesivo desenvolvem, quase na sua totalidade de área, uma rotura coesiva. Os valores apresentados são fruto desta análise efetuada.

Tabela 27 - Modos de rotura dos provetes com adesivo Sikaforce® 7752

Proвете	7752-1	7752-2	7752-3	7752-4	Média (%)
					
Coesiva (%)	98	97	95	98	97
Adesiva(%)	2	3	5	2	3

3.2.2.2 Força de arrancamento

Na Figura 64 é possível observar as curvas *P/b* registadas, provenientes dos ensaios *floating roller peel* com a utilização do adesivo Araldite® AV138. Pela sua análise, é verificada uma similaridade na sua tendência resultando em valores muito próximos entre os provetes 1 e 2. A exceção a esta tendência ocorre no provete 3 que, apesar de apresentar variações semelhantes, apresenta valores inferiores para a resistência de arrancamento quando em comparação com os resultados dos restantes provetes. Este provete apresentou apenas 93 mm de propagação de fenda até ao final do ensaio, o que resulta no cálculo da resistência de arrancamento apenas entre os 25,4 mm e os 93 mm.

Este resultado heterogêneo na propagação da fenda está relacionado com a rotura catastrófica presente no final do ensaio.

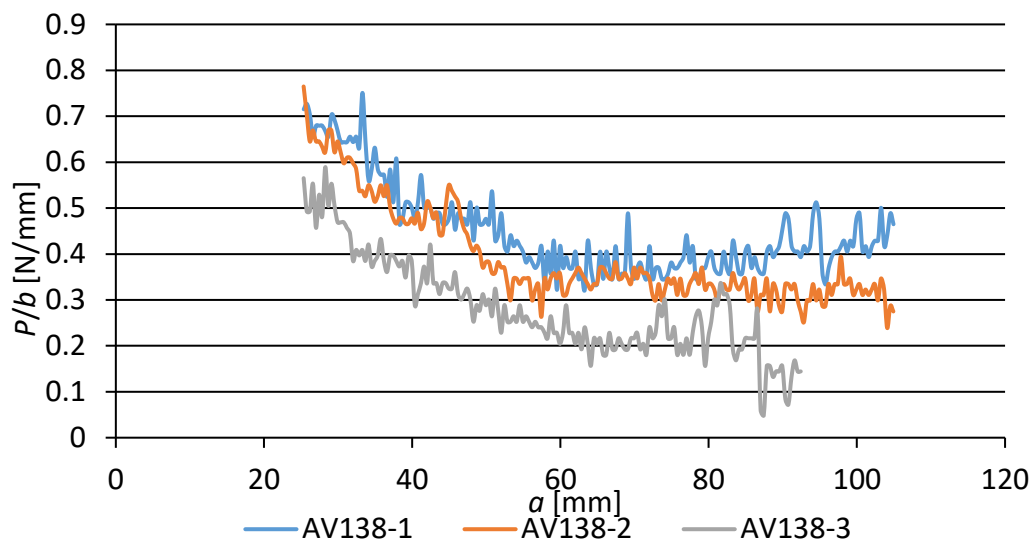


Figura 64 - Curvas P/b - a obtidas experimentalmente com o adesivo Araldite® AV138

A partir da norma ASTM D3167, os resultados do ensaio obtidos para este adesivo encontram-se registados na Tabela 28. Em resultado deste ensaio obtêm-se valores médio da resistência de arrancamento de 0,375 N/mm com um coeficiente de variação ligeiramente elevado e de média dispersão de 18,57%.

Tabela 28 - Resultados obtidos após ensaio dos provetes AV138

Parâmetro	AV138-1	AV138-2	AV138-3
$P_{\text{médio}} \text{ (N)}$	11,8	10,3	7,35
$P_{\text{mínimo}} \text{ (N)}$	19,7	20,0	15,3
$P_{\text{máximo}} \text{ (N)}$	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	0,070		
Coef. de variação (%)	18,57		

A Figura 65 apresenta as curvas P/b registadas para juntas com adesivo Araldite® AW4858. A partir da análise do gráfico da Figura 65 verifica-se que existe um bom acordo entre elas, à exceção da curva do provete AW4858-3. As forças de arrancamento obtidas para este provete são de menor valor que as restantes, em grande parte pela falta de tratamento superficial da superfície do aderente, tal como explicado no capítulo

3.2.2.1. no que diz respeito ao modo de rotura observado. Verificou-se o comportamento com tendência semelhante nos restantes provetes até ao final do ensaio.

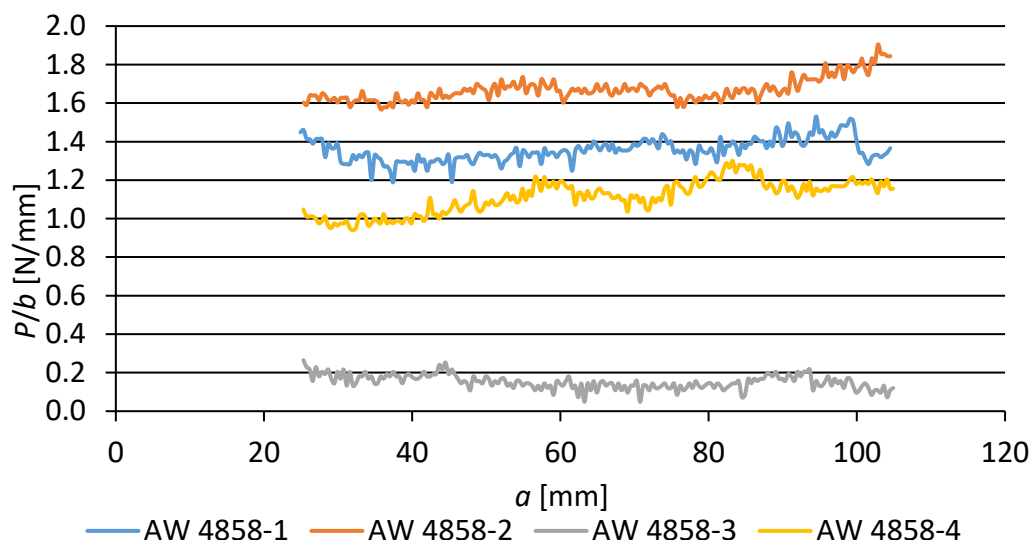


Figura 65 - Curvas $P/b - a$ obtidas experimentalmente com o adesivo Araldite® AW4858

Seguindo as condições estabelecidas na norma ASTM D3167, extraem-se os resultados do ensaio, conforme se reporta na Tabela 29. Após descartar os valores obtidos para o provete com defeito (4858-3), observam-se valores médios de resistência ao arrancamento com a utilização do adesivo Araldite® AW4858 de 1,38 N/mm, com coeficiente de variação de 16,6%. Considera-se este um ensaio com média dispersão de resultados, o que se reflete em dados com alguma homogeneidade.

Tabela 29 - Resultados obtidos após ensaio dos provetes 4858

Parâmetro	4858-1	4858-2	4858-3	4858-4
$P_{\text{médio}} \text{ (N)}$	35,99	43,32	3,94	28,86
$P_{\text{mínimo}} \text{ (N)}$	31,56	40,63	6,88	24,38
$P_{\text{máximo}} \text{ (N)}$	40,63	49,38	1,25	33,75
$P/b \text{ (N/mm)}$	1,36	1,67	0,15	1,11
$P/b_{\text{médio}} \text{ (N/mm)}$	1,38			
Desvio padrão a	0,23			
Coef. de variação (%) a	16,6			

^a Valor obtido desprezando o valor do provete 4858-3

Pela Figura 66 apresentam-se as curvas P/b dos provetes com o adesivo Araldite® 2015. Verifica-se uma correlação aceitável no comportamento ao arrancamento. No entanto, a curva do provete 2 apresenta valores superiores quando em comparação com as restantes. Comprova-se que há também um ligeiro aumento do valor de P/b no provete 3 no final do ensaio, que pode estar associado a efeitos experimentais como variações na mistura de adesivo, pequenos defeitos ou diferenças na espessura de adesivo.

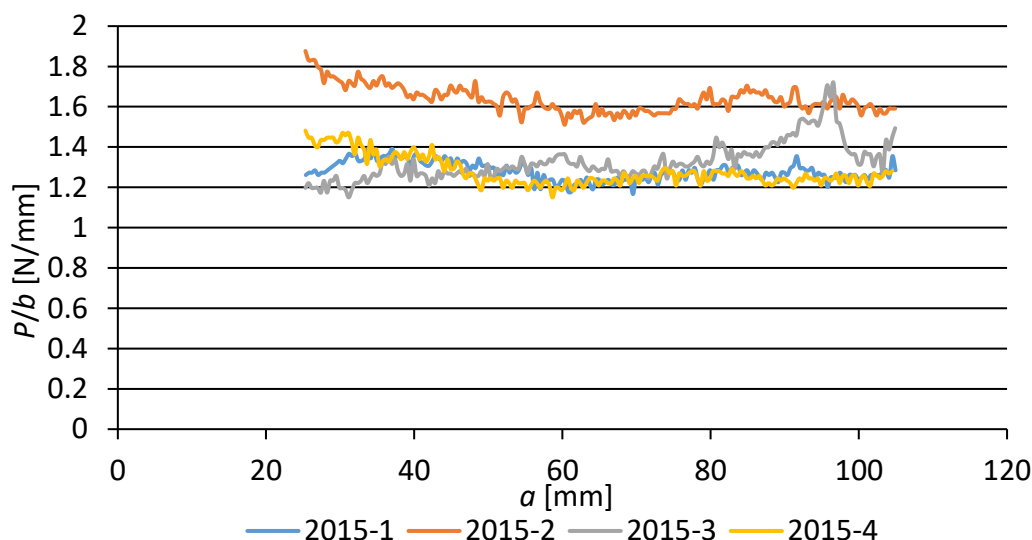


Figura 66 - Curvas $P/b - a$ obtidas experimentalmente com o adesivo Araldite® 2015

Na Tabela 30 apresentam-se os resultados obtidos, do ensaio de arrancamento para esta configuração. Pelo estudo dos resultados verifica-se uma boa coesão de resultados, com uma variação de 10,82%, estando os valores médios de P/b muito próximos à exceção do provete 2 que, como verificado anteriormente, detém um valor de força de arrancamento ligeiramente superior. Em resultado deste ensaio é estimada uma força média de arrancamento após ensaio de todos os provetes de 1,38 N/mm.

Tabela 30 - Resultados obtidos após ensaio dos provetes 2015

Parâmetro	2015-1	2015-2	2015-3	2015-4
$P_{\text{médio}}$ (N)	33,93	44,68	34,97	33,67
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	30,94	41,25	30,31	30,31
$P_{\text{máximo}}$ (N)	36,90	51,30	45,30	39,10
P/b (N/mm)	1,279	1,636	1,327	1,277
$P/b_{\text{médio}}$ (N/mm)	1,38			
Desvio padrão	0,149			
Coef. de variação (%)	10,82			

Na Figura 67 estão representadas as curvas $P/b - a$ correspondentes aos provetes com o adesivo Sikaforce® 7752. Através da análise do gráfico verifica-se a proximidade do comportamento de cada provete e dos respetivos valores adquiridos de P/b .

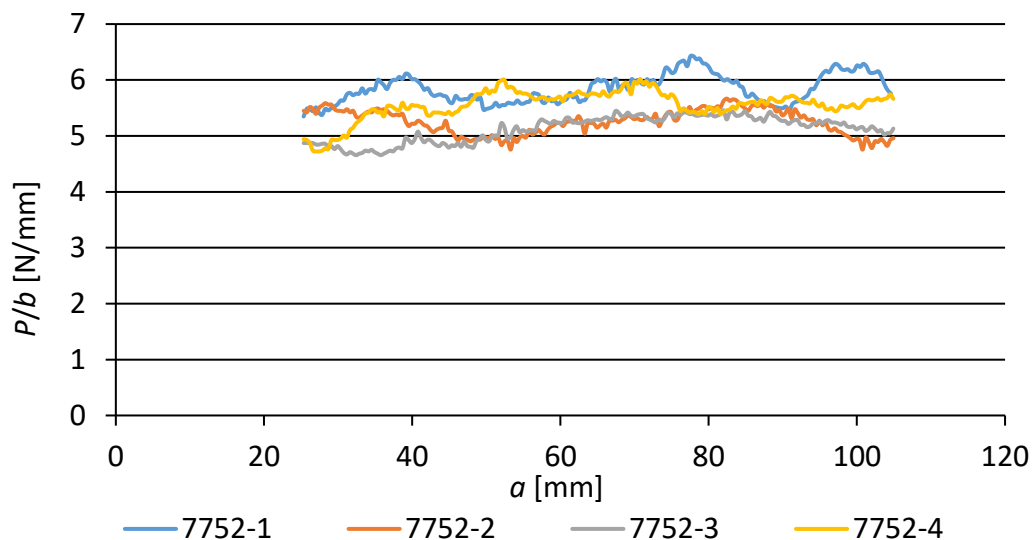


Figura 67 - Curvas $P/b - a$ obtidas experimentalmente com o adesivo Sikaforce® 7752

Houve uma baixa variação de valores médios de força de arrancamento, como é possível constatar pela Tabela 31. Os valores apresentaram um coeficiente de variação de 5,1%, sendo este o valor mais baixo apresentado até ao presente momento. O provete 1 apresenta um valor de P/b médio ligeiramente superior. O valor médio de resistência de arrancamento para a configuração com a utilização do adesivo Sikaforce® 7752 foi de 5,442 N/mm. Em comparação com os restantes adesivos, este apresenta forças de arrancamento muito superiores, o que está relacionado com a ductilidade deste adesivo.

Tabela 31 - Resultados obtidos após ensaio dos provetes 7752

Parâmetro	7752-1	7752-2	7752-3	7752-4
$P_{\text{médio}}$ (N)	133,77	120,49	117,57	127,56
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	122,50	109,06	106,88	108,44
$P_{\text{máximo}}$ (N)	147,19	130,00	125,31	138,13
P/b (N/mm)	5,84	5,25	5,12	5,56
$P/b_{\text{médio}}$ (N/mm)	5,442			
Desvio padrão	0,278			
Coef. de variação (%)	5,1			

3.2.2.3 Análise de resultados

A Figura 68 apresenta os valores médios obtidos de P/b e os respectivos desvios padrões para cada configuração. Desta forma é permitido analisar de forma direta a variação das forças de arrancamento consoante o adesivo escolhido para o ensaio. É possível verificar uma grande diferença no valor médio de P/b obtido pela junta com o adesivo Sikaforce® 7752, este apresentou valores muito mais elevados que a restante configuração na ordem dos 5 N/mm. É possível verificar alguma proximidade nos valores de resistência de arrancamento média dos provetes 4858 e 2015, apresentando respetivamente 1,073 N/mm e 1,380 N/mm. Pode-se constatar ainda o baixo resultado da resistência de arrancamento na utilização do adesivo Araldite® AV138 em juntas de alumínio AW 6082-T651 com preparação superficial de lixagem.

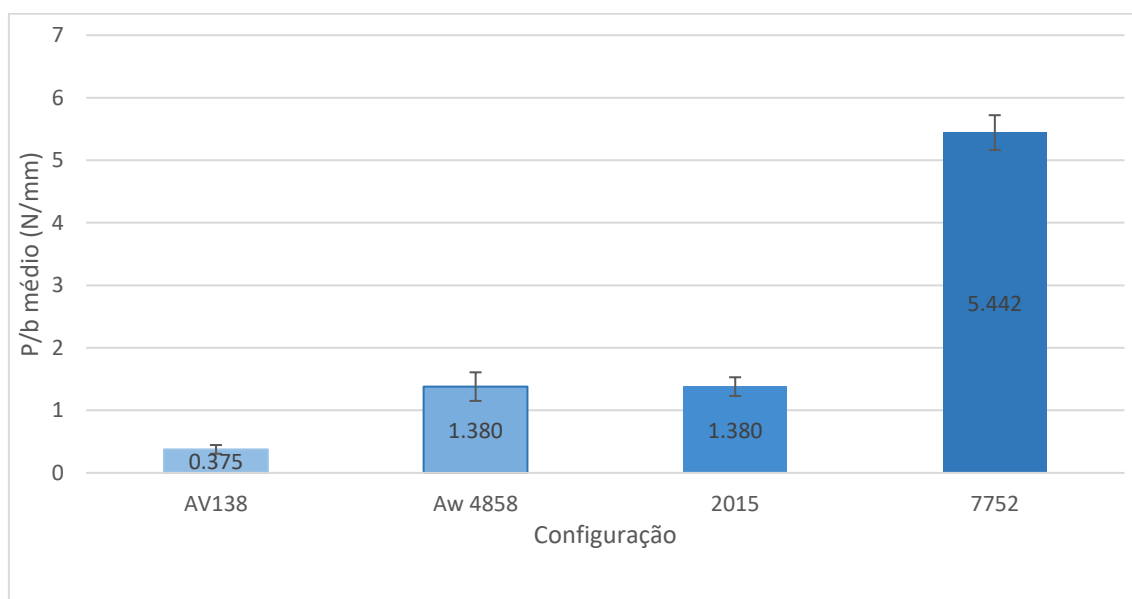


Figura 68 - Comparação gráfica dos valores médios de P/b e desvios padrões para as configurações testadas

Quanto à análise da variação de valores obtidos no ensaio experimental, a partir da Tabela 32 é possível observar os valores médios de $P/b_{\text{médio}}$, o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada um dos adesivos utilizados. Relembra-se que foram descartados o provete 3 dos ensaios AW4858 e o provete 4 dos ensaios AV138. O valor mais alto no que diz respeito à variação dos valores obtidos da força de arrancamento média, corresponde aos provetes AV138 com um valor de 18,57%, enquanto o conjunto de provetes que apresentou maior coesão nos resultados foi o 7752, com um coeficiente de variação de 5,1%. Uma vez que todos conjuntos apresentam valores do coeficiente de variação inferiores a 25%, é possível afirmar que os dados obtidos foram relativamente homogêneos.

Tabela 32 - Comparação da variação dos valores de $P/b_{\text{médio}}$ obtidos experimentalmente

	$P/b_{\text{médio}}$ (N/mm)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
AV138	0,375	0,070	18,57
AW4858	1,38	0,229	16,6
2015	1,38	0,149	10,82
7752	5,44	0,278	5,1

De um modo geral, os modos de rotura observados demonstram uma boa qualidade de adesão de todos os adesivos utilizados, embora haja 2 provetes descartados por razões de falha de fabrico. É possível observar através da Tabela 32 que o adesivo que mostrou melhor desempenho nas juntas de ensaio foi o Sikaforce® 7752, que apresentou valores de resistência ao arrancamento muito superiores em comparação com os restantes adesivos através do ensaio *floating roller peel*.

3.2.2.4 Comparação com a literatura

Esta secção tem como por objetivo comparar os resultados obtidos com os presentes na literatura.

De acordo com a informação na literatura é possível constatar que o adesivo AV138 apresenta resistência inferior ao arrancamento. Numa primeira abordagem é possível confirmar que a resistência ao arrancamento enunciada pelo fabricante [99], assumindo uma rotura 100% coesiva, é de 1,8 N/mm o que reflete um valor muito superior ao obtido de 0,375 N/mm. O baixo desempenho neste ensaio poderá estar influenciado pelo facto de que o valor de 1,8 N/mm ser obtido em juntas com preparação superficial diferente, através de jato de areia em vez de lixagem, como também a cura indicada para esta força ser de 16 horas a uma temperatura de 40°C. A cura do adesivo através de 1 semana à temperatura ambiente poderá ter causado um decréscimo na resistência da junta ao arrancamento.

No que toca aos resultados obtidos de força de arrancamento média do adesivo AW4858 de 1,38 N/mm, comparando com os valores fornecidos do fabricante entre 6 e 8 N/mm [83], também se revela inferior. Os provetes que utilizaram o adesivo 2015, com uma resistência ao arrancamento de 1,38 N/mm também demonstraram um desempenho inferior ao sugerido pelo fabricante, sendo este valor de 4,0 N/mm [100].

Num estudo efetuado por de Freitas e Sinke [77] foi caracterizada a resistência ao arrancamento pelo *floating roller peel test* de juntas em alumínio-alumínio e alumínio-

compósito com empilhamento a 90° segundo a utilização dos adesivos FM73 e EA 9695. Neste estudo para as juntas que utilizavam aderentes de alumínio, foram obtidos valores médios para as forças de arrancamento de 11 N/mm para o adesivo FM73 e de 2,08 N/mm para o EA 9695. Através desta análise de resistências ao arrancamento é possível notar que a escolha do adesivo tem grande influência na resistência ao arrancamento da junta adesiva. O baixo valor da resistência ao arrancamento do adesivo Araldite® AV138 está relacionado com o facto deste se tratar de um adesivo frágil.

Foi também efetuada, no estudo de Dinnebier e von Czarnecki [101], a caracterização ao arrancamento de uma estrutura *sandwich* ligada por um adesivo *epoxy* através do ensaio *floating roller peel*. É avaliada a influência de ciclos térmicos na resistência. As forças medidas no arrancamento no fornecimento da estrutura foram de aproximadamente 80 N sob arrancamento de um aderente flexível de 25 mm de largura, o que resulta num valor aproximado de resistência ao arrancamento de 3 N/mm.

3.3 Trabalho numérico

Neste subcapítulo são apresentados os resultados numéricos obtidos para a utilização dos diferentes adesivos. Foi criada uma aproximação ao *floating roller peel test*, recorrendo ao *software* ABAQUS®, através da aplicação dos passos descritos no capítulo 3.1.4.3. Através do *software*, e recorrendo a uma análise por MDC, obtêm-se e os valores da força de arrancamento e as curvas P/b - a . Foram reportados os valores de $P_{\text{média}}$, $P_{\text{mínima}}$, $P_{\text{máxima}}$ e P/b no intervalo a analisar, de acordo com a norma ASTM D3167.

3.3.1 Modos de rotura

A simulação numérica através do MDC considera que a ligação adesiva sofre sempre rotura coesiva do adesivo. No entanto, neste subcapítulo é descrito o comportamento das tensões nos provetes e observada a plasticização dos aderentes.

Na Figura 69 é apresentado o comportamento do provete com a utilização do adesivo Araldite® AV138.

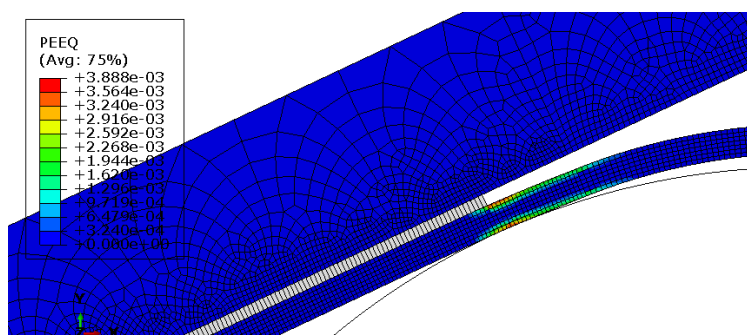


Figura 69 - Deformação plástica equivalente do provete com adesivo Araldite® AV138

É possível observar que o adesivo sofre rotura na zona onde o aderente flexível apresenta plasticização (aproximadamente 0,4%). Como se pode verificar, apenas o aderente flexível sofreu deformação plástica no decorrer da simulação. No entanto, o valor máximo obtido na extremidade da ligação do aderente flexível é um valor muito abaixo do limite da deformação de rotura do alumínio (21,7%).

A partir da Figura 70 (a) é possível visualizar a distribuição das tensões equivalentes de von Mises nos aderentes do provete (S, Mises), embora a distribuição seja mais concentrada no aderente flexível. A Figura 70 (b) permite analisar a degradação dos elementos coesivos (SDEG), neste caso do adesivo AV138. A partir desta análise, é possível verificar que o adesivo apresenta valores de degradação apenas num comprimento reduzido na extremidade da camada, uma vez que se trata de um adesivo pouco dúctil e terá baixa capacidade de deformar elasticamente. Como tal, antecipa-se uma resistência reduzida do adesivo neste ensaio.

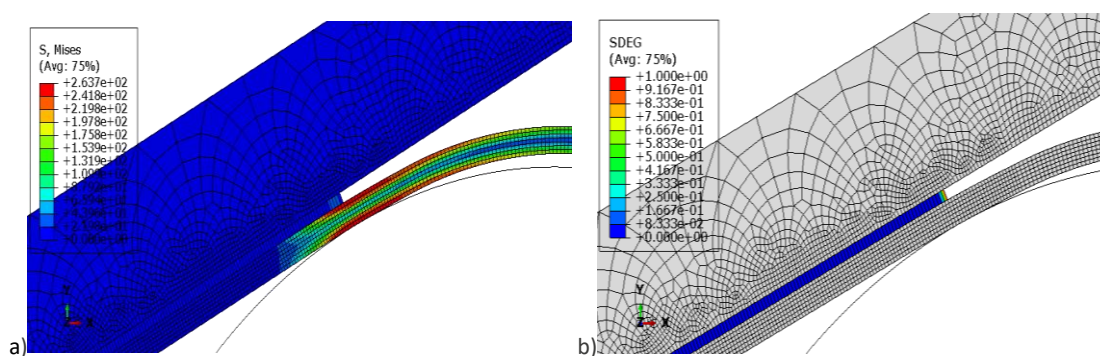


Figura 70 - Comportamento das tensões equivalentes von Mises a), degradação do adesivo Araldite® AV138 b)

Com o auxílio da Figura 71, é possível observar o comportamento da deformação plástica equivalente do aderente flexível do provete com o adesivo Araldite® AW4858.

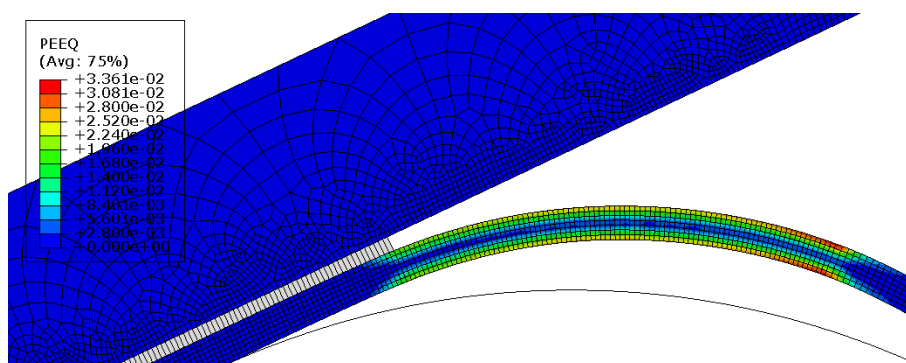


Figura 71 - Deformação plástica equivalente do provete com adesivo Araldite® AW4858

A partir da Figura 72 é possível observar o comportamento das tensões na região crítica do provete. As tensões equivalentes de von Mises, ao apresentarem um valor máximo de aproximadamente 277 MPa na zona crítica deste provete, mostram um comportamento semelhante ao do AV138. Observa-se assim a ocorrência de rotura

coesiva do adesivo, acompanhada de plasticização do aderente flexível na zona de contacto com o rolete. Na Figura 72 (b) é possível observar degradação numa extensão reduzida de adesivo, o que resulta da sua baixa ductilidade.

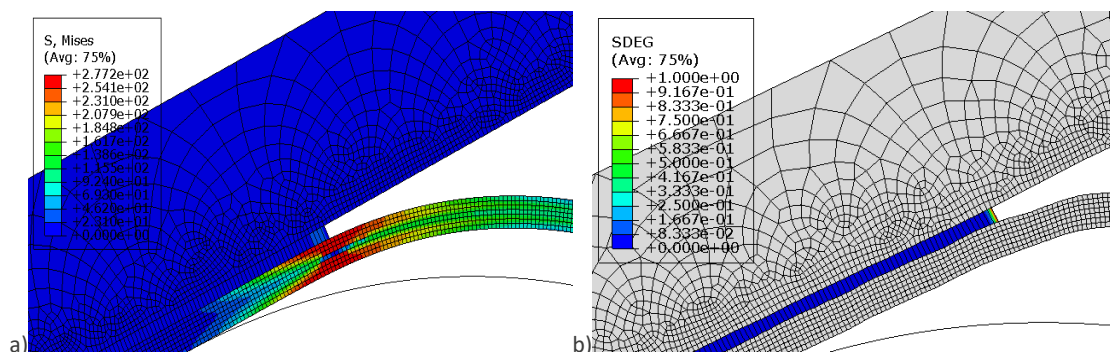


Figura 72 - Comportamento das tensões equivalentes von Mises a), degradação do adesivo Araldite® AW4858 b)

Na Figura 73 é possível observar a deformação plástica equivalente nos aderentes com o adesivo Araldite® 2015. Comparativamente aos provetes com os adesivos AW4858 e AV138, é possível observar uma deformação plástica do aderente flexível superior no provete 2015, na ordem dos 2%.

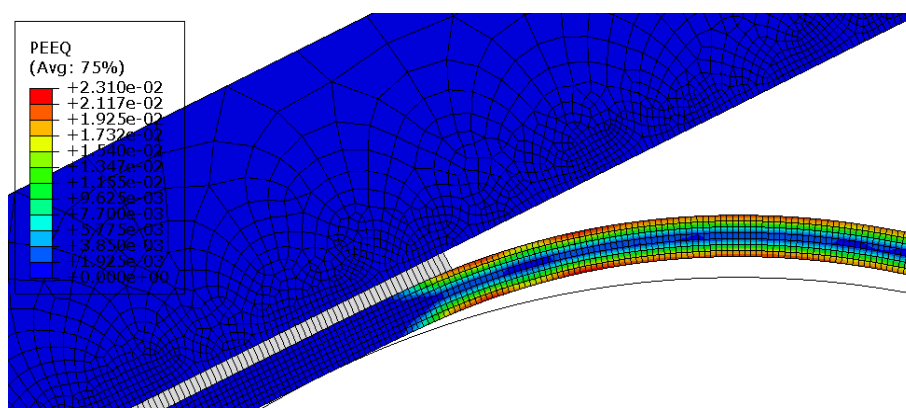


Figura 73 - Deformação plástica equivalente do provete com adesivo Araldite® 2015

A partir da Figura 74 (a) é possível observar o comportamento das tensões na zona crítica do provete, onde estão presentes as tensões de arrancamento máximas e a respetiva rotura do adesivo sob utilização do Araldite® 2015. A partir da análise do comportamento de tensões na zona crítica, é possível notar uma tensão máxima no aderente flexível inicialmente que ronda os 280 MPa, que numa fase mais avançada do carregamento atingiu o valor de 290 MPa. O valor de tensão equivalente observado mostra-se superior aos anteriormente demonstrados pelos provetes com os adesivos AV138 e AW4858. Consequente de um maior valor de ductilidade, quando comparado com o AV138 e AW4858, observa-se uma degradação do adesivo menos concentrada na extremidade do adesivo na Figura 74 (b).

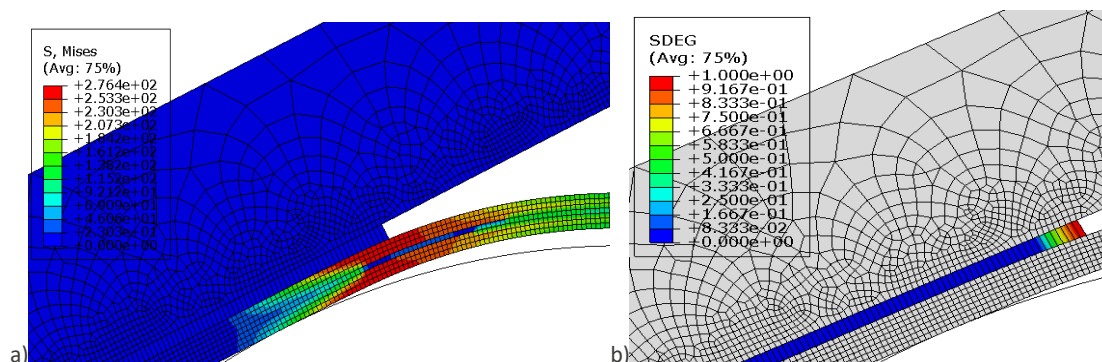


Figura 74 - Comportamento das tensões equivalentes von Mises a), degradação do adesivo Araldite® 2015 b)

Na Figura 75 é possível observar a deformação plástica equivalente no provete 7752. É possível visualizar que o aderente flexível do provete com adesivo 7752 apresenta uma deformação plástica equivalente mais uniforme quando comparado com os restantes resultados. No entanto, foi registado um valor superior na deformação plástica equivalente no aderente flexível com o provete 7752, em comparação com os restantes, valor este registado na ordem dos 7,5% na zona do rolete 1, embora na zona mais próxima da amarra na ordem dos 10%.

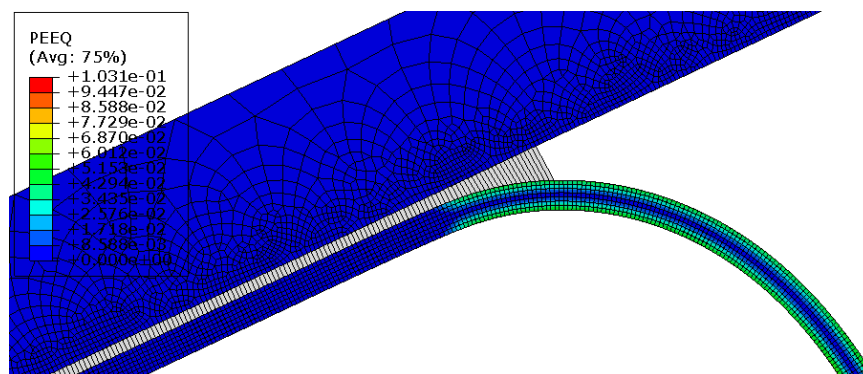


Figura 75 - Deformação plástica equivalente do provete com adesivo Sikaforce® 7752

A partir da Figura 76 é possível observar o comportamento da junta adesiva com o adesivo Sikaforce® 7752. É possível verificar um comportamento diferente relativamente aos restantes adesivos. Num regime inicial, a plasticização do aderente flexível de alumínio dá-se na terminação do adesivo, ou seja, na zona da rotura coesiva do adesivo. No entanto, numa fase mais avançada é possível verificar que o aderente flexível apresenta alguma concentração de tensões antes da extremidade da camada de adesivo, e mesmo assim o adesivo mantém a ligação entre os aderentes, o que em grande parte se deve à utilização de um adesivo com elevada ductilidade. Esta capacidade de deformação elástica resulta numa maior área para distribuição de tensões, o que irá resultar em resistências mais elevadas ao arrancamento. Na Figura 76 (b) é possível observar uma maior deformação na extremidade do adesivo. Note-se que

na Figura 76 (a) é registada pela primeira vez a presença de tensões no aderente rígido, fruto do esforço transmitido desde a extremidade solicitada até ao aderente rígido.

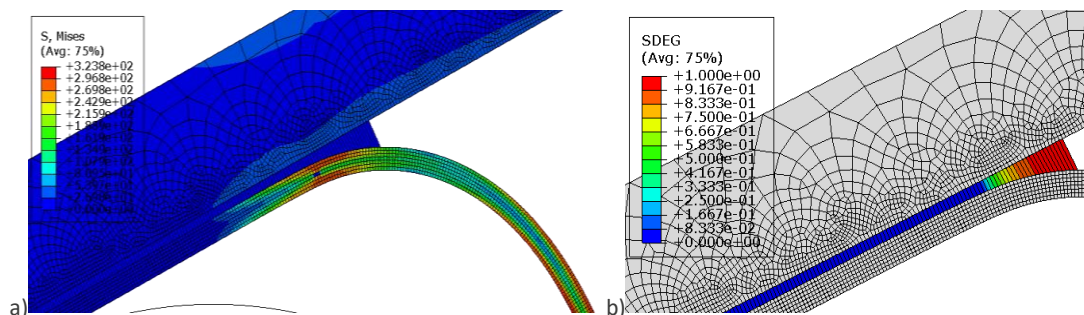


Figura 76 - Comportamento das tensões equivalentes von Mises a), degradação do adesivo Sikaforce® 7752 b)

3.3.2 Força de arrancamento

Neste subcapítulo são apresentados os valores da resistência ao arrancamento obtidos através da simulação numérica. Foram testadas várias técnicas para a propagação de dano, embora a análise gráfica seja abordada apenas com a utilização do critério de iniciação de dano *Quads Damage*.

No deslocamento anterior aos 25 mm é verificado um declive acentuado, até iniciar a fenda. Após esta fase, a curva $P/b-a$ desenvolve um comportamento sem muita variação no declive, ao que corresponde o intervalo considerado pela norma ASTM D3167.

Na Figura 77 é possível observar a curva $P/b-a$ obtida pelo Abaqus com a utilização do adesivo Araldite® AV138 na simulação numérica. Através da análise da Figura 77, é possível verificar a presença da curva de resistência ao arrancamento compreendida entre os valores 1,86 e 1,76 N/mm. É possível observar também uma tendência ligeiramente decrescente da curva de resistência ao arrancamento.

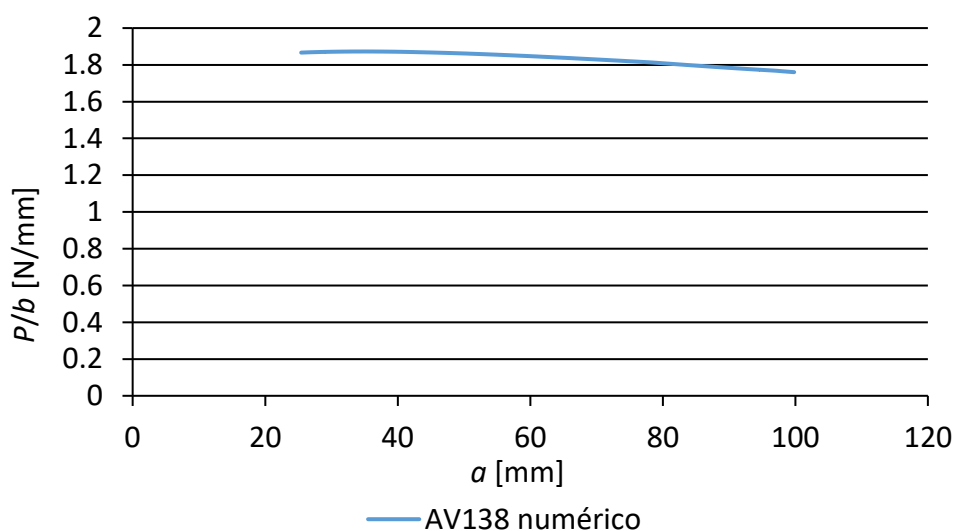


Figura 77 - Curva $P/b - a$ numérica para o adesivo Araldite® AV138

Na Tabela 33 é possível observar que o valor médio da resistência ao arrancamento para a simulação com o AV138 foi de 1,83 N/mm.

Tabela 33 - Resultados numéricos com o adesivo Araldite® AV138

Parâmetro	Resultado numérico Araldite® AV138
$P_{\text{médio}} \text{ (N)}$	45,7
$P_{\text{máximo}} \text{ (N)}$	46,8
$P_{\text{mínimo}} \text{ (N)}$	44,0
$P/b \text{ (N/mm)}$	1,83

Na Figura 78 é apresentada a curva P/b - a resultante dos resultados obtidos na simulação numérica com a utilização do adesivo Araldite® AW4858. É possível observar uma tendência crescente na curva P/b numérica com variação entre os valores de 2,75 N/mm e 3,37 N/mm.

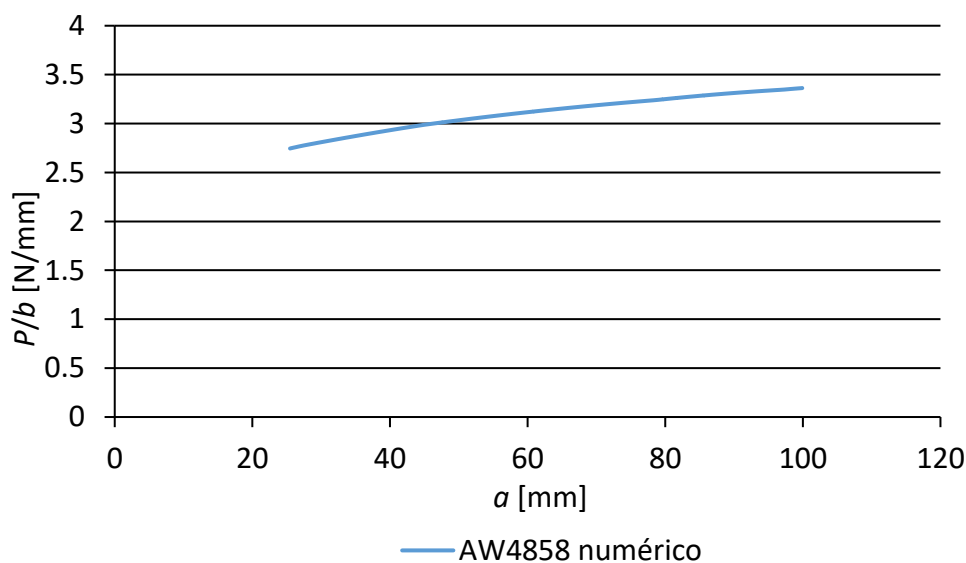


Figura 78 - Curva P/b - a numérica para o adesivo Araldite® AW4858

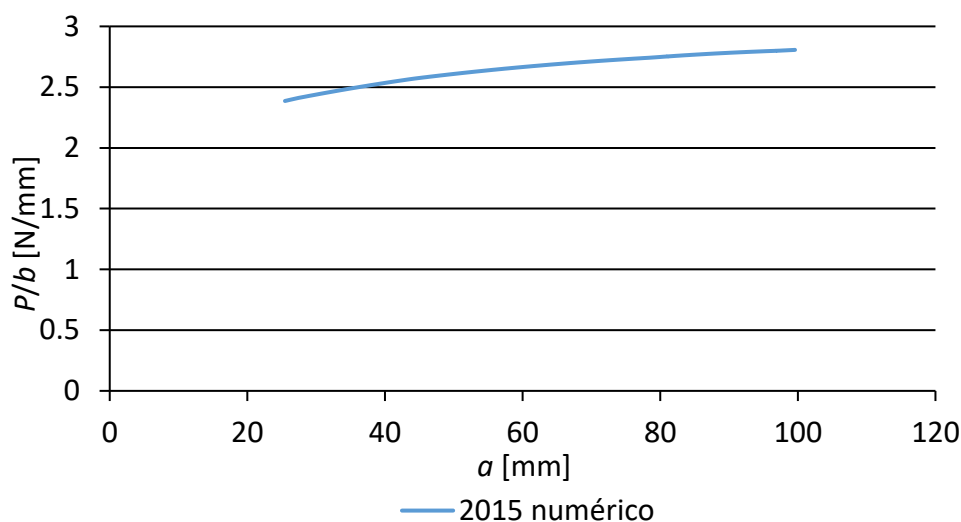
Com o auxílio da Tabela 34 são verificados com maior precisão os valores registados no ensaio numérico do provete AW4858. Foram registados valores de força ao arrancamento médios de 78,04 N e registada uma resistência ao arrancamento média de 3,12 N/mm.

Tabela 34 - Resultados numéricos com o adesivo Araldite® AW4858

Parâmetro	Resultado numérico Araldite® AW4858
$P_{\text{médio}}$ (N)	78,04
$P_{\text{máximo}}$ (N)	84,10
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	68,63
P/b (N/mm)	3,12

Na Figura 79 está representada a curva $P/b-a$ registada durante a simulação numérica com o adesivo Araldite® 2015 no intervalo entre 25 mm e 100 mm tal como especificado pela norma ASTM D3167. Anteriormente aos 25 mm existe um declive mais acentuado na curva de resistência ao arrancamento, embora esta parte das curvas tenha sido truncada por indicação da mesma norma.

Pela análise da Figura 79 é possível verificar um gradual aumento da resistência ao arrancamento até ao final da curva. É possível constatar que a resistência ao arrancamento varia entre os valores de 2,39 e 2,81 N/mm, e consegue-se observar este valor de forma mais precisa na Tabela 35.

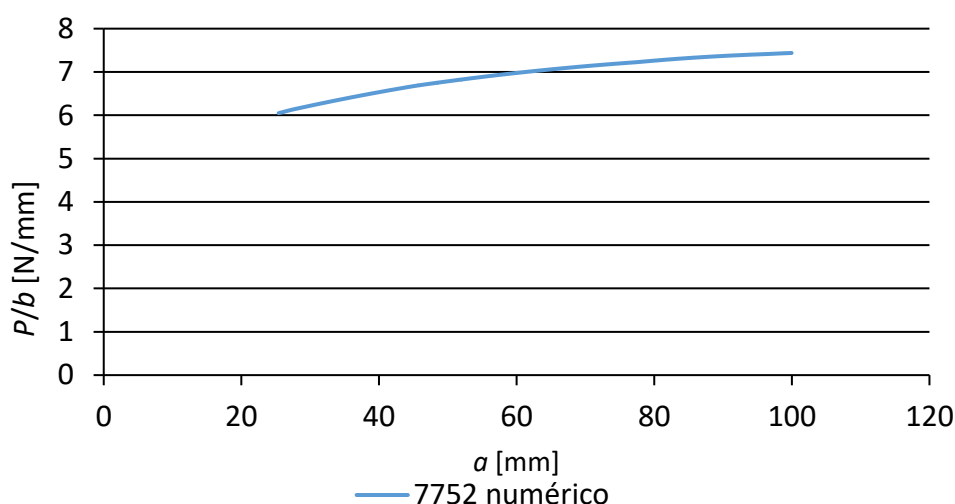
Figura 79 - Curva $P/b - a$ numérica para o adesivo Araldite® 2015

Os resultados obtidos a partir da simulação numérica encontram-se na Tabela 35. Observam-se valores de resistência ao arrancamento média, com a utilização do adesivo Araldite® 2015, de 2,66 N/mm.

Tabela 35 - Resultados numéricos com o adesivo Araldite® 2015

Parâmetro	Resultado numérico Araldite® 2015
$P_{\text{médio}} \text{ (N)}$	66,46
$P_{\text{máximo}} \text{ (N)}$	70,2
$P_{\text{mínimo}} \text{ (N)}$	59,65
$P/b \text{ (N/mm)}$	2,66

Encontra-se representada na Figura 80 a curva $P/b-a$ registada durante a simulação numérica para os provetes com o adesivo Sikaforce® 7752. A partir da tendência da curva P/b do gráfico é possível reparar que há uma estabilização parcial pouco antes do valor de 8 N/mm. Verifica-se também a variação da resistência ao arrancamento entre 6,05 e 7,44 N/mm.

Figura 80 - Curva $P/b - a$ numérica para o adesivo Sikaforce® 7752

De forma idêntica aos resultados numéricos da curva $P/b-a$ do adesivo Araldite® 2015, é apresentada também uma tendência crescente da resistência ao arrancamento no intervalo considerado.

Na Tabela 36 são apresentados os valores numéricos resultantes da utilização do adesivo Sikaforce® 7752. O valor médio da resistência ao arrancamento deste adesivo foi de 7,0 N/mm.

Tabela 36 - Resultados numéricos com o adesivo Sikaforce® 7752

Parâmetro	Resultado numérico Sikaforce®7752
$P_{\text{médio}} \text{ (N)}$	173,96
$P_{\text{máximo}} \text{ (N)}$	185,9
$P_{\text{mínimo}} \text{ (N)}$	151,2
$P/b \text{ (N/mm)}$	7,0

3.3.3 Comparação com os dados experimentais

Ao longo deste capítulo é efetuada a comparação entre a previsão numérica da resistência ao arrancamento obtida pelo modelo numérico e os resultados experimentais, com o objetivo de avaliar a capacidade dos MDC para a previsão da resistência ao arrancamento e explicar o comportamento das tensões com a utilização dos vários adesivos selecionados.

Através da Figura 81 é possível observar uma grande variação dos valores experimentais para o valor numérico. No entanto, a resistência de arrancamento obtida através de análise numérica tem valor muito próximo àquela que o fabricante aponta de 1,8 N/mm, pelo que se considera que a diferença obtida decorre da rotura parcialmente adesiva que se verifica nos ensaios experimentais, cerca de 70% coesiva e 30% adesiva. A repetição dos ensaios experimentais em trabalhos futuros com a aplicação de tratamentos superficiais e procedimentos de cura do adesivo diferentes, poderá resultar em valores mais próximos aos da simulação numérica.

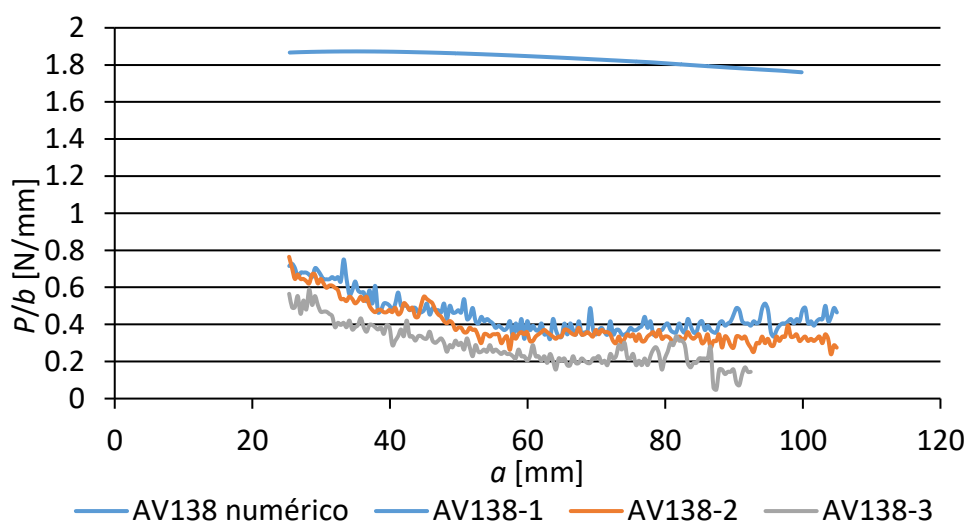


Figura 81 - Comparação dos dados experimentais e numéricos dos provetes AV138

A partir da Figura 82 é possível observar os resultados obtidos experimentalmente e o resultado numérico para o adesivo Araldite® AW4858. A grande variação observada na Figura 82 entre a curva P/b - a experimental e numérica poderá estar associada com a inserção das propriedades do material do adesivo no Abaqus, uma vez que foram admitidos valores G_{IC} e G_{IIC} iguais ao adesivo Araldite® 2015. Ao contrário do que se verifica na Figura 81, com a tendência das curvas decrescente, na Figura 82 as curvas P/b - a experimentais mantêm praticamente um valor constante, enquanto a curva numérica apresenta uma tendência crescente.

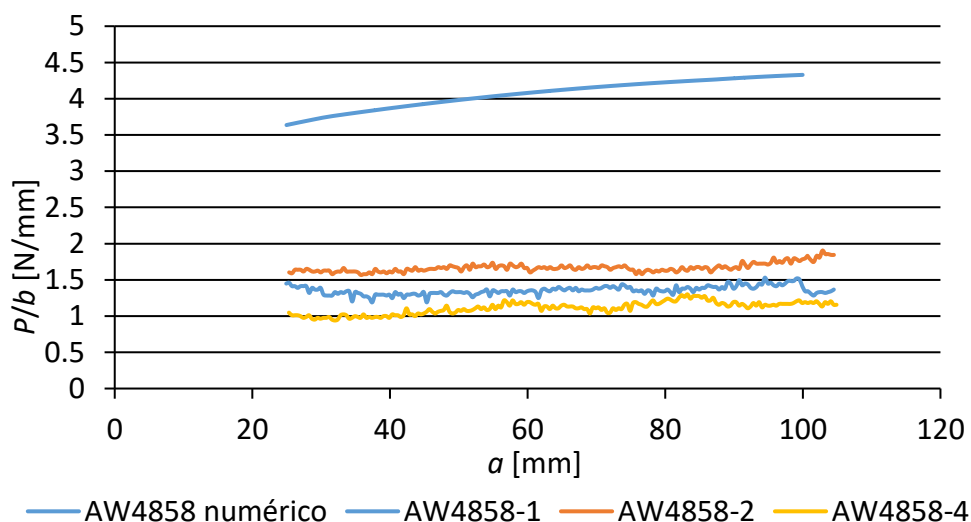


Figura 82 - Comparação dos dados experimentais e numéricos dos provetes AW4858

Na Figura 83 é possível observar os resultados experimentais e numérico através das curvas P/b - a registadas para o adesivo Araldite® 2015. A partir da análise da Figura 83, é possível observar a mesma tendência crescente da curva numérica P/b - a , tal como verificado para o resultado numérico para o adesivo Araldite® AW4858, enquanto os resultados experimentais permanecem relativamente constantes. A curva numérica do adesivo 2015 apresenta valores de P/b superiores, o que se deve à rotura parcialmente adesiva que se verificou nos ensaios experimentais.

Adicionalmente, apesar de o material dos aderentes ter sido caracterizado por Campilho et al. [80], podem existir algumas variações com o material utilizado no ensaio experimental. Como referido anteriormente, a ductilidade dos aderentes influencia diretamente a resistência ao arrancamento da junta adesiva.

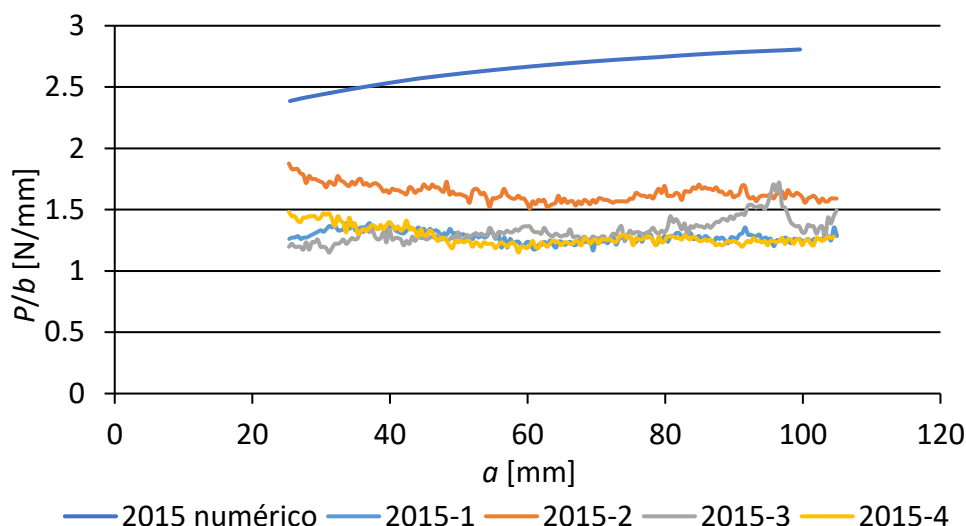


Figura 83 - Comparação dos dados experimentais e numéricos dos provetes 2015

Na Figura 84 estão representadas as curvas $P/b-a$ experimentais e numérica para o adesivo Sikaforce® 7752. Numa rápida análise e com algum destaque, em comparação com a utilização dos restantes adesivos, o Sikaforce® 7752 permite uma melhor aproximação aos valores obtidos experimentalmente.

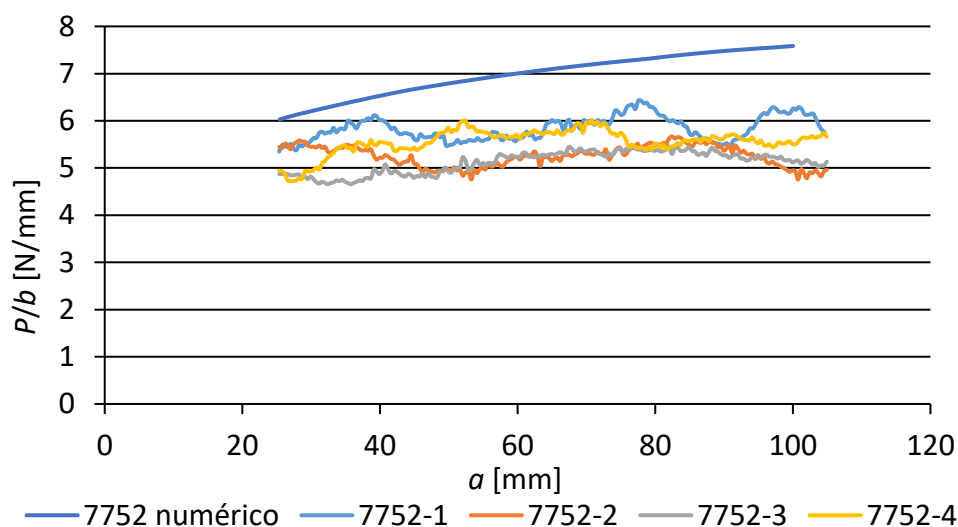


Figura 84 - Comparação dos dados experimentais e numéricos dos provetes 7752

A partir da Figura 85 é possível observar os valores obtidos para os valores de P/b experimental e numérico para a utilização dos diferentes adesivos.

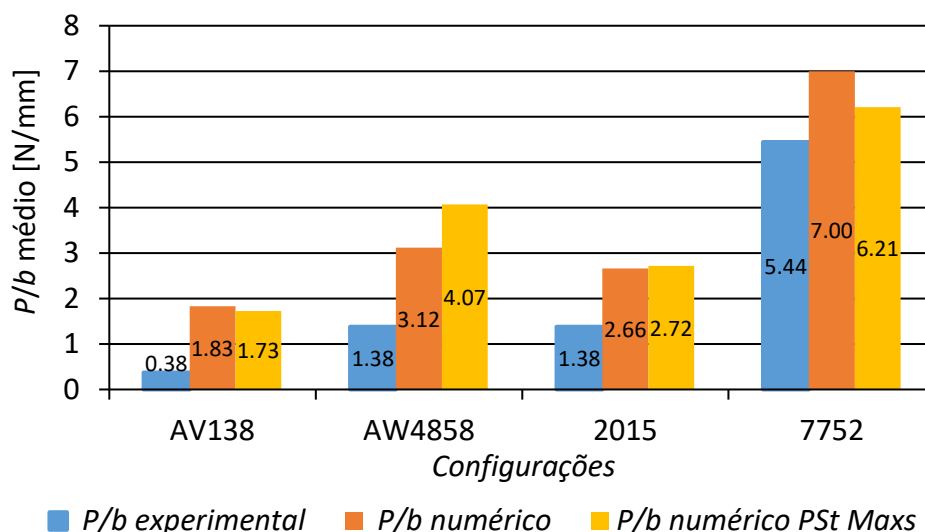


Figura 85 - Comparação de resultados numéricos e experimentais

Na análise numérica foram testadas, para modelação das juntas com os vários adesivos, duas abordagens diferentes. O P/b numérico representado na Figura 85 diz respeito à utilização do critério de iniciação do dano *Quads damage* para o adesivo, enquanto P/b *Pst Maxs* faz corresponder à utilização de uma malha da família *plane stress* com a utilização do critério *Maxs damage* na iniciação de fenda dos elementos coesivos. Os resultados obtidos com *Maxs damage* revelaram-se mais próximos aos valores do trabalho experimental efetuado na utilização do adesivo Araldite® AV138 e no Sikaforce® 7752, embora tenham um desvio relativo ao valor experimental de 78 e 12%, respetivamente. Para os adesivos Araldite® AW4858 e 2015, a abordagem *plane stress* com critério de iniciação de dano *Quads damage* revelou-se mais próxima dos valores experimentais, o que resultou em erros relativos de 56 e 48%, respetivamente.

Esta constatação é visível na Tabela 37, que permite observar em maior detalhe a variação dos valores de P/b com as duas abordagens numéricas e o valor experimental. É possível verificar que a abordagem numérica mais próxima dos valores experimentais foi encontrada nos provetes 7752. A resistência ao arrancamento experimental é inferior à obtida numericamente, sendo mais notável nos adesivos de epóxico, possivelmente pela cura do adesivo que não foi de encontro com as especificações do fabricante e também pelas roturas parcialmente adesivas nos ensaios experimentais. Relativamente aos valores obtidos numericamente para a resistência ao arrancamento do provete AW4858, estes também são muito diferentes dos obtidos experimentalmente, o que demonstra que a abordagem efetuada ao admitir valores semelhantes de G_{IC} e G_{IIC} do provete 2015 não é adequada. Para o provete 7752 foi conseguida uma melhor aproximação do valor experimental através da abordagem com *Quads damage/plane stress*.

Tabela 37 - Comparação entre valores experimentais e numéricos

Adesivo	Valor de P/b médio obtido				
	Experimental (N/mm)	Numérico Quads damage (N/mm)	Erro relativo (%)	Numérico PSt Maxs (N/mm)	Erro relativo (%)
Araldite® AV138	0,38	1,83	79	1,73	78
Araldite® AW4858	1,38	3,12	56	4,07	66
Araldite® 2015	1,38	2,66	48	2,72	49
Sikaforce® 7752	5,44	7,00	22	6,21	12

3.3.3.1 Análise de resultados

Os resultados desta análise numérica revelaram-se algo diferentes dos obtidos experimentalmente, embora para o adesivo Sikaforce® 7752 tenha sido observada uma maior aproximação entre estes. Na generalidade, os valores obtidos na simulação numérica são superiores aos obtidos experimentalmente pelas diferentes abordagens testadas. No entanto, quando comparados os valores numéricos com os valores de resistência ao arrancamento fornecidos pelo fabricante, estes apresentam-se muito próximos do indicado. O valor obtido de 1,83 N/mm para o adesivo Araldite® AV138 é muito similar ao indicado pelo fabricante [99] de 1,8 N/mm. O adesivo Araldite® AW4858 apresenta valor inferior de resistência ao arrancamento de 3,12 N/mm na simulação numérica quando comparada com a fornecida pelo fabricante, entre 6 e 8 N/mm. É possível concluir que a abordagem escolhida para a definição das propriedades coesivas G_{IC} e G_{IIC} do adesivo AW4858, a partir do adesivo 2015 não foi adequada tendo em conta os valores do fabricante. Relativamente ao adesivo Araldite® 2015 é indicado um valor médio de resistência ao arrancamento de 4,0 N/mm e o resultado numérico foi de 2,66 N/mm. Na Figura 86 estão presentes os valores obtidos através do trabalho numérico relativamente aos valores encontrados, indicados pelo fabricante. Na Figura 86 não é possível observar o adesivo Sikaforce 7752, pois a informação acerca da resistência ao arrancamento é desconhecida. Em suma, foi conseguida uma maior aproximação aos valores do fabricante com o adesivo Araldite® AV138 e 2015.

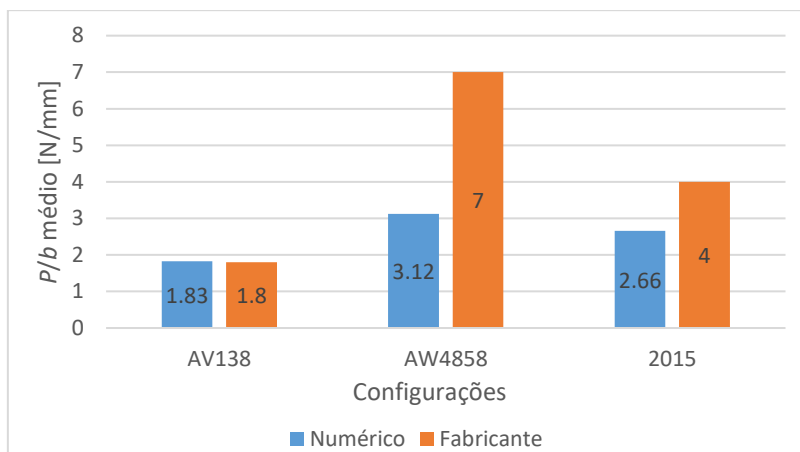


Figura 86 - Comparação dos valores numéricos e do fabricante para a resistência ao arrancamento

De momento não é possível comparar os valores obtidos numericamente neste trabalho com resultados na literatura através do ensaio *floating roller peel*, no entanto foram comparados apenas os valores obtidos com os referidos pelo fabricante.

Num estudo realizado por Faria et al. [72], foi testada numérica e experimentalmente a resistência ao arrancamento de juntas em T com aplicação de diferentes adesivos. Neste estudo foram obtidos, a partir da aplicação do critério *Quads damage* para os adesivos Araldite AV138, 2015 e Sikaforce® 7752, valores crescentes de resistência ao arrancamento com o aumento de ductilidade do adesivo, sendo o mais dúctil o Sikaforce® 7752. Embora não seja possível efetuar uma comparação direta com o *floating roller peel test*, a resistência máxima observada para o adesivo mais dúctil foi de 1,34 kN, para uma junta com 25 mm de largura.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Propostas de trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo principal a comparação de diferentes adesivos estruturais ao arrancamento, através da utilização do ensaio *floating roller peel test*. O ensaio utilizado é alvo de amplo uso para determinar a resistência ao arrancamento em juntas metálicas e tem sido também utilizado como teste de controlo de qualidade de ligações adesivas. Para o ensaio das juntas, foram escolhidos 4 adesivos com propriedades diferentes. Os adesivos apresentam ductilidade distinta, e englobam, do menos para o mais dúctil, o Araldite® AV138, Araldite® AW4858, Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752.

Foram ensaiados experimentalmente quatro grupos de provetes, através do *floating roller peel test*. O valor médio de P/b obtido para o adesivo Araldite AV138 foi de 0,375 N/mm, com coeficiente de variação de 18,57%. Com a utilização do adesivo Araldite AW4858 e 2015 foi obtido sensivelmente o mesmo valor médio para a resistência ao arrancamento, de 1,380 N/mm, com uma variação entre os resultados obtidos de cada conjunto de 16,60 e 10,82%, respetivamente. Através do ensaio efetuado também foi possível obter, para a utilização do adesivo Sikaforce 7752, uma resistência ao arrancamento média de 5,442 N/mm com um coeficiente de variação de 5,1%, o que resulta no resultado experimental com mais coesão nos dados. Com a análise dos dados obtidos, observou-se que o adesivo Sikaforce 7752 apresenta a melhor prestação ao arrancamento entre os adesivos analisados, e com uma boa concordância entre os próprios dados obtidos. Uma vez que todos os resultados experimentais obtidos apresentam um coeficiente de variação inferior a 20%, este serve de indicativo para elevada repetibilidade ao nível dos resultados obtidos. Quanto aos modos de rotura obtidos, estes foram predominantemente coesivos em todos os adesivos.

Através das simulações numéricas efetuadas para as quatro configurações, foram obtidos valores de P/b de 1,83 N/mm, 3,12 N/mm, 2,66 N/mm e 7,0 N/mm para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® AW4858, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente. É possível concluir que a utilização de um adesivo com maior ductilidade resultou em resistência ao arrancamento mais elevada, o que foi comum nos resultados experimentais e numéricos. Nos resultados numéricos, foi verificada uma maior aproximação aos valores definidos pelo fabricante nas juntas com adesivo AV138.

Os valores de P/b obtidos através de ensaio experimental e numérico foram alvo de uma comparação entre eles. Neste sentido, foi verificado que a abordagem *plane strain/Quads damage* conduz a variações percentuais relativamente aos valores experimentais de 79, 56, 48 e 22% para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® AW4858, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente. Por outro lado, com a abordagem *plane stress/Maxs damage*, foram obtidas variações relativamente aos resultados experimentais com a utilização dos diferentes adesivos, pela mesma ordem, de 78, 66, 49 e 12%. A menor variação entre os valores experimentais e numéricos foi observada no adesivo Sikaforce® 7752, com diferenças inferiores a metade da variação observada para os restantes adesivos em estudo. No geral, a variação significativa obtida para os adesivos Araldite® foi atribuída às roturas parcialmente adesivas verificadas, o que teve influência significativa no desempenho das juntas ao arrancamento.

4.2 Propostas de trabalhos futuros

Como sugestão de trabalhos futuros, de modo a dar continuidade à caracterização de adesivos pelo *floating roller peel test*, sugere-se:

- Determinação das propriedades de fratura do adesivo Araldite® AW4858 para servir de entrada nos modelos numéricos;
- Repetição dos ensaios efetuados no trabalho experimental, considerando o processo de cura recomendado pelo fabricante e utilização de maior amostragem para minimizar variação de valores;
- Teste de diferentes técnicas de preparação superficial para mitigar as roturas parcialmente adesivas observadas;
- Propor nova definição de intervalos de análise no ensaio *floating roller peel test* para garantir valores de P/b estabilizados;
- Comparar numericamente diferentes critérios de iniciação e propagação de dano, bem como diferentes formas de lei coesiva, para melhorar a previsão numérica e reduzir os problemas de convergência associados.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2007, Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill Education.
2. Marques, E.A.S., R.J.C. Carbas, A.F.G. Tenreiro, e L.F.M. da Silva, *Introdução às ligações adesivas estruturais*, ed. L. Quântica Editora - Conteúdos Especializados. 2021, Porto, Portugal. 126.
3. Tserpes, K., *Adhesive bonding of aircraft structures*, in *Revolutionizing Aircraft Materials and Processes*. 2020, Springer. p. 337-357.
4. Davis, M. e D. Bond, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1999. **19**(2-3): p. 91-105.
5. da Silva, L.F.M., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. Vol. 1. 2018, Berlim, Alemanha: Springer.
6. da Silva, L.F.M., R.A.M. da Silva, J.A.G. Chousala, e A.M.G. Pinto, *Alternative methods to measure the adhesive shear displacement in the thick adherend shear test*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2008. **22**(1): p. 15-29.
7. 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.
8. ASTM, *ASTM D5573 - 99 Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber Reinforced Plastic Joints*. 1999: Pennsylvania, EUA.
9. Mittal, K.L. e S.K. Panigrahi, *Structural Adhesive Joints: Design, Analysis, and Testing*. 2020, Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons.
10. Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 1997, Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media.
11. Gültekin, K., S. Akpınar, e A. Özel, *The effect of the adherend width on the strength of adhesively bonded single-lap joint: Experimental and numerical analysis*. *Composites Part B: Engineering*, 2014. **60**: p. 736-745.
12. Kahraman, R., M. Sunar, e B. Yilbas, *Influence of adhesive thickness and filler content on the mechanical performance of aluminum single-lap joints bonded with aluminum powder filled epoxy adhesive*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008. **205**(1): p. 183-189.
13. Lang, T.P. e P.K. Mallick, *Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1998. **18**(3): p. 167-177.
14. Rudawska, A., *Comparison of the adhesive joints' strength of the similar and dissimilar systems of metal alloy/polymer composite*. *Applied Adhesion Science*, 2019. **7**(1): p. 7.

15. Reis, P.N.B., J.A.M. Ferreira, e F. Antunes, *Effect of adherend's rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(4): p. 193-201.
16. Banea, M.D., *Influence of adherend properties on the strength of adhesively bonded joints*. MRS Bulletin, 2019. **44**(8): p. 625-629.
17. Subrahmanian, K.P. e F. Dubouloz, *Adhesives for bonding wind turbine blades*. Reinforced Plastics, 2009. **53**(1): p. 26-29.
18. 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. **32**(3): p. 284-292.
19. da Silva, L.F.M., D.A. Dillard, B. Blackman, e R.D. Adams, *Testing adhesive joints: best practices*. 2012, Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons.
20. Kim, M.-H., -I. Ri, H.-S. Hong, e Y.-C. Kim, *Comparative study of failure models for prediction of mixed-mode failure characteristics in composite adhesively bonded joint with brittle/Quai-brittle adhesive using finite element analysis*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021. **109**: p. 102911.
21. Kadioglu, F., L.F. Vaughn, F.J. Guild, e R.D. Adams, *Use of the thick adherend shear test for shear stress-strain measurements of stiff and flexible adhesives*. The Journal of adhesion, 2002. **78**(5): p. 355-381.
22. Chaves, F., L.F.M. da Silva, M. de Moura, D. Dillard, e V. Esteves, *Fracture Mechanics Tests in Adhesively Bonded Joints: A Literature Review*. The Journal of Adhesion, 2014. **90**: p. 955-992.
23. Millán, J.S., I. Armendáriz, J. García-Martínez, e R. González, *Chapter 1 - Strategies for static failure analysis on aerospace structures*, in *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Aerospace and Automotive Industries*, A.S.H. Makhoulouf and M. Aliofkhazraei, Editors. 2016, Butterworth-Heinemann: Boston. p. 3-28.
24. Moazzami, M., M.R. Ayatollahi, A. Akhavan-Safar, S.T. de Freitas, J.A. Poulis, e L.F.M. da Silva, *Effect of cyclic aging on mode I fracture energy of dissimilar metal/composite DCB adhesive joints*. Engineering Fracture Mechanics, 2022. **271**: p. 108675.
25. Ripling, E.J., S. Mostovoy, e H.T. Corten, *Fracture mechanics: a tool for evaluating structural adhesives*. The Journal of Adhesion, 1971. **3**(2): p. 107-123.
26. Leal, A.J.S. e R.D.S.G. Campilho, *Numerical evaluation of the ENF and 4ENF tests for the shear toughness estimation of adhesive joints*. Composite Structures, 2018. **202**: p. 333-343.
27. Blackman, B.R.K., A.J. Kinloch, e M. Paraschi, *The determination of the mode II adhesive fracture resistance, GIIC, of structural adhesive joints: an effective crack length approach*. Engineering Fracture Mechanics, 2005. **72**(6): p. 877-897.
28. Wang, Y. e J.G. Williams, *Corrections for mode II fracture toughness specimens of composites materials*. Composites Science and Technology, 1992. **43**(3): p. 251-256.
29. Ramalho, L.D.C., R.D.S.G. Campilho, J. Belinha, e L.F.M. da Silva, *Static strength prediction of adhesive joints: A review*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **96**: p. 102451.

30. Razavi, S.M.J., M.R. Ayatollahi, E. Esmaeili, e L.F.M. da Silva, *Mixed-mode fracture response of metallic fiber-reinforced epoxy adhesive*. European Journal of Mechanics - A/Solids, 2017. **65**: p. 349-359.
31. da Silva, L.F.M., V.H.C. Esteves, e F.J.P. Chaves, *Fracture toughness of a structural adhesive under mixed mode loadings*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2011. **42**(5): p. 460-470.
32. Faneco, T.M.S., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. da Silva, e R.M. Lopes, *Strength and fracture characterization of a novel polyurethane adhesive for the automotive industry*. Journal of Testing and Evaluation, 2017. **45**(2): p. 398-407.
33. Zheng, G., Z. He, K. Wang, X. Liu, Q. Luo, Q. Li, e G. Sun, *On failure mechanisms in CFRP/Al adhesive joints after hygrothermal aging degradation following by mechanical tests*. Thin-Walled Structures, 2021. **158**: p. 107184.
34. Tsokanas, P., T. Loutas, e P. Nijhuis, *Interfacial Fracture Toughness Assessment of a New Titanium–CFRP Adhesive Joint: An Experimental Comparative Study*. Metals, 2020. **10**(5): p. 699.
35. Teixeira, J.M.D., R.D.S.G. Campilho, e F.J.G. da Silva, *Numerical assessment of the Double-Cantilever Beam and Tapered Double-Cantilever Beam tests for the GIC determination of adhesive layers*. The Journal of Adhesion, 2018. **94**(11): p. 951-973.
36. Figueiredo, J.C.P., R.D.S.G. Campilho, E.A.S. Marques, J.J.M. Machado, e L.F.M. da Silva, *Adhesive thickness influence on the shear fracture toughness measurements of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018. **83**: p. 15-23.
37. Dumont, V., G. Stamoulis, C. Badulescu, A. Lefèvre, e D. Thévenet, *Investigation of the influence of the temperature on the fracture properties of adhesive joints using the Arcan device*. Engineering Fracture Mechanics, 2022. **269**: p. 108524.
38. Loureiro, F.J.C.F.B., R.D.S.G. Campilho, e R.J.B. Rocha, *J-integral analysis of the mixed-mode fracture behaviour of composite bonded joints*. The Journal of Adhesion, 2020. **96**(1-4): p. 321-344.
39. Ebnesajjad, S. e A.H. Landrock, *Chapter 12 - Testing of Adhesive Bonds*, in *Adhesives Technology Handbook (Third Edition)*, S. Ebnesajjad and A.H. Landrock, Editors. 2015, William Andrew Publishing: Boston. p. 339-352.
40. Orgilés-Calpena, E., F. Arán-Aís, A.M. Torró-Palau, e M.A.M. Sánchez, *Adhesives in the footwear industry: a critical review*. Reviews of adhesion and adhesives, 2019. **7**(1).
41. Standardization, I.O.f., *ISO 11343:2019 - Adhesives — Determination of dynamic resistance to cleavage of high-strength adhesive bonds under impact wedge conditions — Wedge impact method*. 2019: Genebra, Suíça.
42. Standardization, I.O.f., *ISO 8510 - Adhesives - Peel test for a flexible-bonded-to-rigid test specimen assembly*. 2006: Genebra, Suíça.
43. Sekulic, A., *Experimental identification of adhesive properties between epoxy and glass*. These de Doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008.
44. ASTM, *ASTM D1876 - Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test)*. 2015: Pennsylvania, EUA.
45. Standards, E., *BS EN 1895:2001 - Adhesives for paper and board, packaging and disposable sanitary products. 180°. "T" peel test for a flexible-to-flexible assembly*. 2001: Pilsen, Chéquia.

46. Standardization, I.O.f., *ISO 11339:2010 Adhesives — T-peel test for flexible-to-flexible bonded assemblies*. 2010: Genebra, Suíça.
47. ASTM, *ASTM D3167 - Standard Test Method for Floating Roller Peel Resistance of Adhesives*. 2004: Pennsylvania, EUA.
48. Salo, T., A. Halme, M. Kanerva, e J. Vanhala, *Bond Strength and Failure Mechanisms of Non-Conductive Adhesives for Stretchable Electronics*. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2020. **PP**: p. 1-1.
49. Standardization, I.O.f., *ISO 4578 - Adhesives - Determination of peel resistance of highstrength adhesive bonds - Floating roller method* 1997: Genebra, Suíça.
50. ASTM, *ASTM D1781 - Standard Test Method for Climbing Drum Peel for Adhesives*. 2004: Pennsylvania, EUA.
51. Loureiro, A.L., L.F.M. da Silva, C. Sato, e M.A.V. Figueiredo, *Comparison of the Mechanical Behaviour Between Stiff and Flexible Adhesive Joints for the Automotive Industry*. Journal of Adhesion 2010. **86**: p. 765-787.
52. Awalekar, Y.J., A.S. Takalkar, e S.S. Shinde, *Investigation of Peel Resistance of Adhesives Materials: A Review*. Proceedings of Engineering and Technology Innovation, 2018. **10**: p. 19.
53. Hinopoulos, G. e W.R. Broughton, *Evaluation of the T-peel joint using the finite element method*. 1999, National Physical Laboratory: Teddington, UK.
54. Crocombe, A.D. e R.D. Adams, *Peel analysis using the finite element method*. The Journal of Adhesion, 1981. **12**(2): p. 127-139.
55. Volkersen, O., *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung 15, 1938: p. 41-47.
56. Adams, R.D. e N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. **9**(3): p. 185-196.
57. 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.
58. Curiel-Sosa, J.L. e N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
59. 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 and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
60. Fernlund, G. e J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
61. 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.
62. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001, Heidelberg, Alemanha: Springer Berlin Heidelberg.

63. 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 and Structures, 2010. **47**(18–19): p. 2445-2458.
64. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013, Rhode Island, EUA: Dassault Systèmes.
65. Rocha, R.J.B. e R.D.S.G. Campilho, *Evaluation of different modelling conditions in the cohesive zone analysis of single-lap bonded joints*. The Journal of Adhesion, 2018. **94**(7): p. 562-582.
66. 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 and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
67. Carvalho, U.T.F. e R.D.S.G. Campilho, *Validation of pure tensile and shear cohesive laws obtained by the direct method with single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **77**(Supplement C): p. 41-50.
68. da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011, Berlim, Alemanha: Springer.
69. Khalid, M.Y., A. Al Rashid, e M.F. Sheikh, *Effect of Anodizing Process on Inter Laminar Shear Strength of GLARE Composite through T-Peel Test: Experimental and Numerical Approach*. Experimental Techniques, 2021. **45**(2): p. 227-235.
70. Pereira, J.P.O., R.D.S.G. Campilho, P.J.R.O. Nóvoa, F.J.G. Silva, e D.C. Gonçalves, *Adherend effect on the peel strength of a brittle adhesive*. Procedia Structural Integrity, 2022. **37**: p. 722-729.
71. Domingues, N.R.E., R.D.S.G. Campilho, R.J.C. Carbas, e L.F.M. da Silva, *Experimental and numerical failure analysis of aluminium/composite single-L joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016. **64**: p. 86-96.
72. Faria, R.V.F., R.D.S.G. Campilho, P.J.A. Gonçalves, e R.J.B. Rocha, *Advanced numerical methods for the strength prediction of hybrid adhesively bonded T-peel joints*. The Journal of Adhesion, 2022. **98**(2): p. 154-179.
73. Liprandi, D., F. Bosia, e N.M. Pugno, *A theoretical-numerical model for the peeling of elastic membranes*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2020. **136**: p. 103733.
74. Duan, Y., W. Ta, e Y. Gao, *Numerical models of delamination behavior in 2G HTS tapes under transverse tension and peel*. Physica C: Superconductivity and its Applications, 2018. **545**: p. 26-37.
75. Rocha, A.V.M., A. Akhavan-Safar, R. Carbas, E.A.S. Marques, R. Goyal, M. El-zein, e L.F.M. da Silva, *Numerical analysis of mixed-mode fatigue crack growth of adhesive joints using CZM*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020. **106**: p. 102493.
76. de Freitas, S.T. e J. Sinke, *Test method to assess interface adhesion in composite bonding*. Applied Adhesion Science, 2015. **3**(1): p. 9.
77. de Freitas, S.T. e J. Sinke, *Adhesion Properties of Bonded Composite-to-Aluminium Joints Using Peel Tests*. The Journal of Adhesion, 2014. **90**(5-6): p. 511-525.
78. INSTRON, *Floating roller peel fixtures | 2820-101 and 2820-102*. INSTRON. p. 2.
79. 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.

80. 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.
81. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, e L.F.M. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
82. 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.
83. HUNTSMAN, *Araldite®AW4858/ Hardener HW4858 Two component epoxy adhesive system*, H.A.M.S. GmbH, Editor. 2016, HUNTSMAN. p. 7.
84. Faria, A., D. Moutinho, P. Araújo, e V. Alves, *Trabalho prático sobre ligações adesivas*, ISEP, Editor. 2022: Porto, Portugal.
85. Malik, G.A.M., *On the characterization of the mechanical behaviour of bonded steel-CFRP adhesive joints*, FEUP, Editor.: Porto, Portugal.
86. Azevedo, J.C.S., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. da Silva, T.M.S. Faneco, e R.M. Lopes, *Cohesive law estimation of adhesive joints in mode II condition*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2015. **80**: p. 143-154.
87. Barbosa, N.G.C., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. Silva, e R.D.F. Moreira, *Comparison of different adhesively-bonded joint types for mechanical structures*. Applied Adhesion Science, 2018. **6**.
88. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
89. 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 and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
90. Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology, An introduction: The chemistry and physical properties of elastomer-based adhesives*. 2002, Hansen Gardner Publications, Inc., Maplewood.
91. Gonçalves, J.P.M., M.F.S.F. de Moura, A.G. Magalhães, e P.M.S.T. de Castro, *Application of interface finite elements to three-dimensional progressive failure analysis of adhesive joints*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2003. **26**(5): p. 479-486.
92. Andersson, T. e U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41**(2): p. 413-434.
93. Högberg, J.L. e U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
94. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, e J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10): p. 2224-2230.
95. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, e J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.

96. Marques, E.A.S. e L.F.M. da Silva, *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. The Journal of Adhesion, 2008. **84**(11): p. 915-934.
97. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014, ISEP: Porto.
98. Darwish, S.M.H. e A. Ghanya, *Critical assessment of weld-bonded technologies*. Journal of Materials Processing Technology, 2000. **105**(3): p. 221-229.
99. HUNTSMAN, *Araldite® AV138M with Hardenener HV 998 | Two component epoxy adhesive*. 2004, HUNTSMAN. p. 4.
100. HUNTSMAN, *Araldite® 2015 Adhesive*. 2015. p. 6.
101. Dinnebier, H. e J. von Czarnecki, *Floating Roller Peel Test Indicates Excellent Current Condition*. adhäsion KLEBEN & DICHTEN, 2008. **52**(4): p. 20-23.

ANEXOS

- 6.1 Anexo 1 - Norma ASTM D3167
- 6.2 Anexo 2 - Adesivo Araldite® AV138
- 6.3 Anexo 3 - Adesivo Araldite® AW 4858
- 6.4 Anexo 4 - Adesivo Araldite® 2015
- 6.5 Anexo 5 - Adesivo SikaForce® 7752

6 ANEXOS

6.1 Anexo 1 - Norma ASTM D3167



Designation: D 3167 – 03a (Reapproved 2004)

Standard Test Method for Floating Roller Peel Resistance of Adhesives¹

This standard is issued under the fixed designation D 3167; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

INTRODUCTION

The purpose of this test method is to provide for the determination of the metal-to-metal peel strength of adhesives by a method that will provide good reproducibility at low-, as well as at high-strength levels and yet allow for a simple method of test specimen preparation and testing.

The accuracy of the results of strength tests of adhesive bonds will depend on the conditions under which the bonding process is carried out. Unless otherwise agreed upon between the manufacturer and the purchaser, the bonding conditions shall be prescribed by the manufacturer of the adhesive. In order to ensure that complete information is available to the individual conducting the tests, the manufacturer of the adhesive shall furnish numerical values and other specific information for each of the following variables:

(1) Procedure for preparation of the surfaces prior to application of the adhesive, the cleaning and drying of metal surfaces, and special surface treatments such as sanding, which are not specifically limited by the pertinent test method.

(2) Complete mixing directions for the adhesive.

(3) Conditions for application of the adhesive, including the rate of spread or thickness of film, number of coats to be applied whether to be applied to one or both surfaces, and the conditions of drying where more than one coat is required.

(4) Assembly conditions before application of pressure, including the room temperature and length of time.

(5) Curing conditions, including the amount of pressure to be applied, the length of time under pressure, and the temperature of the assembly when under pressure. It should be stated whether this temperature is that of the glue line, or of the atmosphere at which the assembly is to be maintained.

(6) Conditioning procedure before testing, unless a standard procedure is specified, including the length of time, temperature, and relative humidity.

A range may be prescribed for any variable by the manufacturer of the adhesive, if it can be assumed by the test operator that any arbitrarily chosen value within such a range or any combination of such values for several variables will be acceptable to both the manufacturer and the purchaser of the adhesive.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the relative peel resistance of adhesive bonds between one rigid adherend and one flexible adherend when tested under specified conditions of preparation and testing.

1.2 A variation in thickness of the adherends will generally influence the test values. For this reason, the thickness of the sheets used to make the test specimens shall be specified in the material specification. When no thickness is specified, the flexible adherend shall be 0.63 mm (0.025 in.) thick and the rigid adherend shall be 1.63 mm (0.064 in.) thick.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D14 on Adhesives and is the direct responsibility of Subcommittee D14.80 on Metal Bonding Adhesives.

Current edition approved April 1, 2004. Published April 2004. Originally approved in 1973. Last previous edition approved in 2003 as D 3167 – 03a.

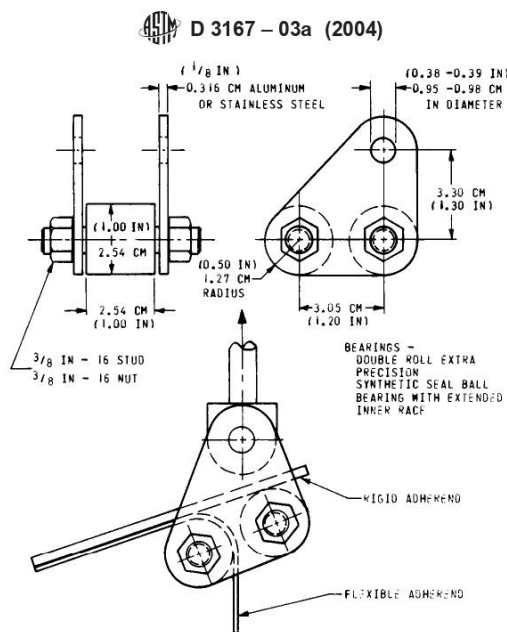


FIG. 1 Roller Drum Peel Test Fixture

1.4 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

- B 209 Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate
- D 907 Terminology of Adhesives
- D 1781 Test Method for Climbing Drum Peel for Adhesives
- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Many of the terms used in this test method are defined in Terminology D 907.

4. Summary of Test Method

4.1 This test method consists of testing laminated or bonded adherends, where one adherend is made to be rigid and the other adherend is made to be flexible, by peeling of the flexible adherend from the rigid adherend at a controlled angle of peel using the test fixture shown in Fig. 1.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

5. Significance and Use

5.1 Use this test method for acceptance and process control testing. This test method may be used as an alternative to Test Method D 1781 when that facility is not available. This test method is considered more severe since the angle of peel is greater.

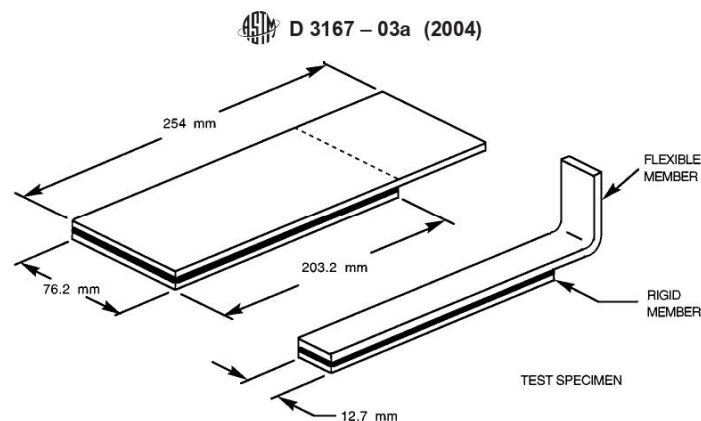
6. Apparatus

6.1 *Testing Machine*, conforming to the requirements of Practices E 4. Select a testing machine that is autographic with chart capability, that reads and records in millimetres (inches) of separation as one coordinate and applied load as the other coordinate, the applied load accurate to within $\pm 1\%$. Additional capabilities of the machine are a crosshead rate of 152 mm/min (6 in./min), with self-aligning grips to hold the specimen, and where the breaking load of the specimens falls between 15 and 85 % of the full-scale machine capacity. The grips need to engage the outer 25.4 mm (1 in.) of the flexible adherend firmly and when the load is applied, the direction of the applied pull needs to be through the center line of the grip assembly.

6.2 Attach a fixture as shown in Fig. 1 to one of the testing machine cross arms and ensure that the 1-in. diameter rollers of the test fixture roll freely.

7. Sample Preparation

7.1 Laminated test panels (see Fig. 2) consist of two adherends properly prepared and bonded together in accordance with the adhesive manufacturer's recommendations.



NOTE 1—A 38.1 to 74.2-mm (1.5 to 3.0-in.) shim can be used to facilitate the start of peel.
FIG. 2 Test Panel and Test Specimen

7.2 Unless otherwise specified, use clad aluminum alloy conforming to the specification for aluminum-alloy sheet and plate (Specification B 209) Alloy 2024-T3.

7.3 Cut the bonded panels into 12.7-mm (0.5-in.) wide test specimens (see Fig. 2) by a means that is not deleterious to the bond. The use of edge members depends upon the desire to measure peel strengths in this area. The method of cutting test specimens is controlled by adherend and adhesive compositions and the accuracy desired. Shearing, milling, and band-saws can all be used successfully. Bend the unbonded end of the flexible adherend, perpendicular to the rigid adherend, for clamping in the grip of the testing machine. Select two specimens for each temperature tested from each of three bonded panels.

NOTE 1—Direct comparison of different adhesives may be made only when specimen construction and test conditions are identical.

NOTE 2—Within the limitations imposed by 7.3, other specimen widths may be used, provided the test machine grip and peel test fixtures are of ample width to apply the load uniformly across the width of the adherends.

NOTE 3—Direct comparison of different adhesives may be made only when the angle of peel is identical. The operator must ascertain that the flexible adherend is bending over the mandrel and not at some irregular angle.

8. Test Method

8.1 Insert the test specimen into the peel test fixture as shown in Fig. 1, with the unbonded end of the flexible adherend gripped in the test machine jaw. Peel the specimen at 152-mm/min (6-in./min) bond separation rate by applying the load at a constant head speed of 152 mm/min. If the backup plate bends or is distorted during the test, it is recommended that the specimen be redesigned with a backup member stiff enough to ensure even peel.

8.2 During the peel test, make an autographic recording of load versus head movement (load versus distance peeled).

8.3 Record the load over at least a 7.6-mm (3-in.) length of the bond line, disregarding the first 2.54 mm (1 in.) of peel.

9. Calculation

9.1 Determine from the autographic curve, or at least 76.2 mm (3 in.) of peeling (disregarding the first 25.4 mm (1 in.)), the average peeling load in pounds-force per inch (or kilonewtons per metre) of the specimen width required to separate the adherends. It is preferred that the average load be determined from the curve by means of a planimeter.

NOTE 4—In case a planimeter is not used, the average may be calculated as the average of load readings taken at fixed increments of crosshead motion. For example, the load may be recorded at each 12.7-mm (½-in.) interval of crosshead motion (discarding the first 25.4 mm (1 in.)) until at least six readings have been attained.

10. Report

10.1 Report the following information:

10.1.1 Complete identification of the adhesive tested including type, source, manufacturer's code number, batch or lot number, form, etc.

10.1.2 Complete identification of adherends used, including material thickness, surface preparation, and orientation.

10.1.3 Description of bonding process, including method of application of adhesive, glue line thickness, drying or precuring conditions (where applicable), curing time, temperature, and pressure.

10.1.4 The average thickness of adhesive layer after formation of the joint shall be reported within 0.0127 mm (0.0005 in.). The method of obtaining the thickness of adhesive layer shall be described including procedure, location of measurements, and range of measurements.

10.1.5 Complete description of the test specimen, including dimensions and construction of the test specimen, conditions used for cutting individual test specimens, number of test panels represented, and number of individual test specimens.

10.1.6 Conditioning procedure prior to testing.

10.1.7 Testing temperature.

10.1.8 Type of test machine and crosshead separation rate used.

6.2 Anexo 2 - Adesivo Araldite® AV138



Advanced Materials

Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998-1

Structural Adhesives

TECHNICAL DATASHEET

Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998-1

Two component epoxy adhesive

Key properties

- Excellent chemical resistance
- Temperature resistant to 140°C
- Thixotropic, gap filling paste

Description

Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998-1 is a two component, room temperature curing paste adhesive of high strength. When fully cured the adhesive will have excellent performance at elevated temperatures and has high chemical resistance. It is suitable for bonding a wide variety of metals, ceramics, glass, rubbers, rigid plastics and other materials, and is widely used in many industrial applications where resistance to aggressive or warm environments are required.

Typical product data

Property	Araldite® AV 138M-1	Hardener HV 998-1	Mix
Colour - visual (A112)*	beige	grey	grey
Specific gravity	ca. 1.7	ca. 1.6	ca. 1.7
Viscosity (Pa.s)	thixotropic	thixotropic	thixotropic
Lap shear strength at 25°C (A501)*	-	-	> 11 MPa
Pot Life (100 g at 25°C)	-	-	30 min

* Specified data are on a regular basis analysed. Data which is described in this document as 'typical' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.

Processing

Pretreatment

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

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite® AV 138M-1	100	100
Hardener HV 998-1	40	40

Resin and hardener should be blended until they form a homogeneous mix.



Application of adhesive

The resin/hardener mix is applied with a spatula, to the pretreated and dry joint surfaces.
A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint.
The joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. An even contact pressure throughout the joint area will ensure optimum cure.

Mechanical processing

Specialist firms have developed metering, mixing and spreading equipment that enables the bulk processing of adhesive. We will be pleased to advise customers on the choice of equipment for their particular needs.

Equipment maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.
If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

Typical times to minimum shear strength

Temperature	°C	10	15	23	40	60	100
Time to reach a LSS of 1 MPa	hours	14	8	4	-	-	-
	minutes	-	-	-	75	20	4
Time to reach a LSS of 10 MPa	hours	22	15	6	-	-	-
	minutes	-	-	-	120	30	5

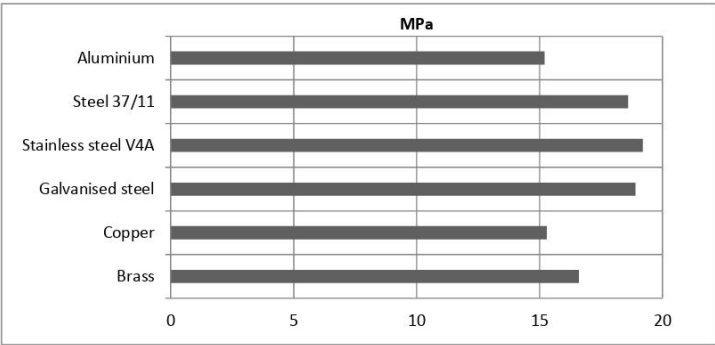
LSS = Lap shear strength.

Typical cured properties

Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.
The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

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

Cure: 16 hours at 40°C and test at 23°C
Pretreatment - Sand blasting



HUNTSMAN

Enriching lives through innovation

Storage	Araldite® AV 138M-1 and Hardener HV 998-1 must be stored at room temperature provided the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.
Handling Precautions	Caution Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with food-stuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.



Huntsman Advanced Materials (Switzerland) GmbH
 Klybeckstrasse 200
 CH - 4057 Basel
 Switzerland

Tel: +41 (0)61 299 11 11
 Fax: +41 (0)61 299 11 12

www.aralditeadhesives.com

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the user. Specified data are analysed on a regular basis. Data which is described in this document as 'typical' or 'guideline' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless it specifically mentioned.

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

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of Huntsman Advanced Material's knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, **nothing herein is to be construed as a warranty, whether express or implied, including but without limitation, as to merchantability or fitness for a particular purpose. In all cases, it is the responsibility of the user to determine the applicability of such information and recommendations and the suitability of any product for its own particular purpose.**

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

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

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users. Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., Huntsman Advanced Materials (UAE) FZE, Huntsman Advanced Materials (Guangdong) Company Limited, and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

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

All trademarks mentioned are either property of or licensed to Huntsman Corporation or an affiliate thereof in one or more, but not all, countries.

Copyright © 2018 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.

6.3 Anexo 3 - Adesivo Araldite® AW 4858



Advanced Materials
Araldite® AW4858/ Hardener HW4858
Structural Adhesives

Araldite® AW4858/ Hardener HW4858
Two component epoxy adhesive system

- Key properties**
- Very high lap shear and peel strength
 - Bonds a wide variety of materials (metal, composite and thermoplastics)
 - Good moisture resistance
 - Extremely tough and resilient adhesive
 - Long pot life, ideal for large composite part assemblies
 - Contains spacers to ensure a minimum bond line thickness of 0.05 mm

Description

ARALDITE® AW 4858 / Hardener HW 4858 is a two-component room temperature curing black coloured epoxy adhesive paste of high strength and toughness. Performances can be enhanced by post-curing at elevated temperature. It is suitable for bonding a wide variety of metals, and especially designed for bonding composites.

Product data

Property	Araldite® AW4858	Hardener HW4858	Mixed Adhesive
Colour (visual) (A112)*	Black	Yellowish	Black
Specific gravity	1.2	1.0	approx. 1.1
Viscosity at 25 °C (Pa.s) (A191)*	60 - 120	8 - 15	thixotropic
Lap shear strength at 23°C (A501)*	-	-	> 28 MPa
Pot Life (100 gm at 25°C)	-	-	150 min

* Specified data are on a regular basis analysed. Data which is described in this document as 'typical' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.

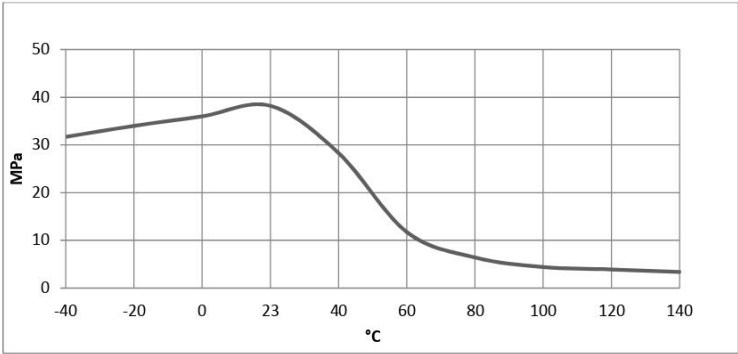
Processing

Pretreatment

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

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite® AW4858	100	100
Hardener HW4858	42	50

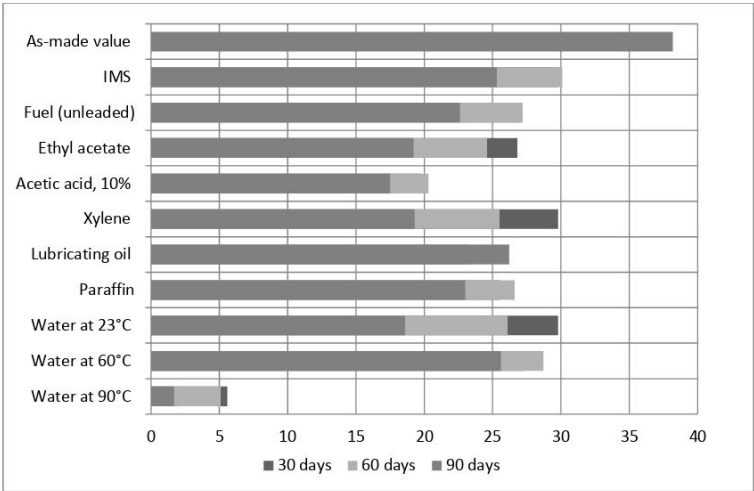
The resin and hardener should be blended until they form a homogeneous mix. Araldite® AW4858/ Hardener HW 4858 is available in cartridges incorporating mixers and can be applied as ready to use adhesive with the aid of the tool recommended by Huntsman Advanced Materials



Roller peel test (ISO 4578) (typical average values)
Cured: 16 hours at 40°C 6 - 8 N/mm

Glass transition temperature (DSC) (typical average values) (ISO 11357-2)
Cure: 16 hours at 40°C 56°C
Cure: 16 hours at 40°C+ 1hour at 80°C 67°C

Lap shear strength versus immersion in various media (ISO 4587) (typical average values)
Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 30,60 and 90 days at 23°C. Cure 16 hrs 40°C.



Lap shear strength versus heat ageing (ISO 4587) (typical average values)
Cure: 16 hours at 40°C, on aluminium sandblasted and degreased, tested at 23°C



Storage

ARALDITE® AW 4858 and Hardener HW 4858 can be stored at room temperature provided the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

Handling precautions

Caution

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



Huntsman Advanced Materials (Switzerland) GmbH
Klybeckstrasse 200
CH - 4057 Basel
Switzerland

Tel: +41 (0)61 299 11 11
Fax: +41 (0)61 299 11 12

www.aralditeadhesives.com

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the user. Specified data are analysed on a regular basis. Data which is described in this document as 'typical' or 'guideline' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.

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

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of Huntsman Advanced Materials' knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, **nothing herein is to be construed as a warranty, whether express or implied, including but without limitation, as to merchantability or fitness for a particular purpose. In all cases, it is the responsibility of the user to determine the applicability of such information and recommendations and the suitability of any product for its own particular purpose.**

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

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

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

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

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

All trademarks mentioned are either property of or licensed to Huntsman Corporation or an affiliate thereof in one or more, but not all, countries.

Copyright © 2016 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved

6.4 Anexo 4 - Adesivo Araldite® 2015

Advanced Materials Technical Datasheet



Araldite® 2015 Adhesive

Product Description

Araldite® 2015 structural adhesive is a two component, room temperature curing paste adhesive giving a resilient bond. It is thixotropic and non-sagging up to 0.394 (10 mm) thickness. It is particularly suitable for SMC and GRP bonding.

Features

- Toughened paste
- Ideal for bonding GRP, SMC and dissimilar substrates
- Low shrinkage
- Gap filling, non-sagging up to 0.394 in (10 mm) thickness
- High shear and peel strength

Typical Properties*

Property	Araldite® 2015 A	Araldite® 2015 B	Mixed System
Appearance	Neutral paste	Neutral paste	Neutral paste
Density, g/cm ³	~1.4	~1.4	~1.4
Viscosity at 25°C, cP	Thixotropic	Thixotropic	Thixotropic
Pot life at 25°C, 100 g, min	--	--	~30 - 40

*Properties are based on Huntsman test methods. Copies are available upon request

Processing

Mix Ratio

Product	Parts by weight	Parts by volume
Araldite® 2015 A	100	100
Araldite® 2015 B	100	100

Advanced Materials Technical Datasheet

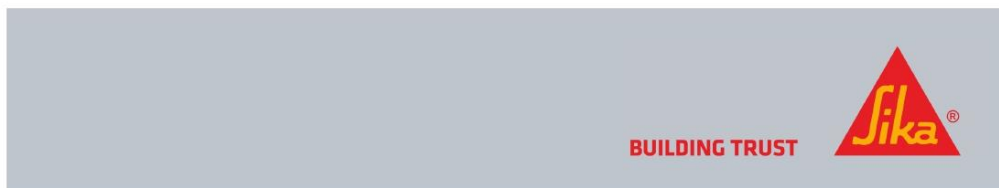


Lap shear strength, heat aging at 158°F, psi		ISO 4587
As-made value	2,408	
30 days	2,814	
60 days	3,321	
90 days	3,292	
Thermal cycling [†]	3,002	
Roller peel test, pli (N/mm)	23 (4.0)	ISO 4578
Glass transition temperature, T _g , °F (°C)		
Cure: 16 h at 104°F (40°C)	153 (67) by DSC	Huntsman
1 h at 176°F (80°C)	189 (87) by shear modulus	DIN 53445
Dielectric constant (500v at 25°C), at 1 kHz	5.6	
Flexural strength, psi (MPa)	6,193 (42.7)	ISO 178
Flexural modulus, psi (MPa)	263,040 (1813.6)	ISO 178
Tensile strength, psi (MPa)	4351 (30)	ISO 527
Tensile modulus, psi (MPa)	290,075 (2)	ISO 527
Elongation at tensile break, %	4.4	ISO 527
Shear modulus, cure 1 h at 176°F, psi (GPa)		DIN 53445
32°F		
G'	145,038 (1.0)	
Λ	0.25	
77°F		
G'	130,534 (0.9)	
Λ	0.25	
122°F		
G'	116,030 (0.8)	
Λ	0.35	
167°F		
G'	29,008 (0.2)	
Λ	1.9	
212°F		
G'	290 (0.002)	
Λ	0.5	
Resistance to fatigue, 40 Hz at 23°C	Cycles to failure	Static failing load: 2321 psi (16 MPa)
Maximum applied load:		
20% of static failing load		
Sandblasted aluminum	>10 ⁷	
Chromate pickled aluminum	>10 ⁷	
25% of static failing load		
Sandblasted aluminum	>10 ⁷	
Chromate pickled aluminum	>10 ⁷	
30% of static failing load		
Sandblasted aluminum	3 x 10 ⁶	
Chromate pickled aluminum	8 x 10 ⁵	

*40/92, DIN 50015; typical average values; test at 23°C.

[†]25 cycles -22°F to 158°F (-30°C to +70°C).

6.5 Anexo 5 - Adesivo SikaForce® 7752



PRODUCT DATA SHEET

SikaForce®-472 FR L60

(formerly SikaForce®-7752 FRW L60)

Non sagging structural adhesive

TYPICAL PRODUCT DATA (FURTHER VALUES SEE SAFETY DATA SHEET)

Properties	Component A SikaForce®-472 FR L60	Component B SikaForce®-040 (formerly SikaForce®-7752 (B))
Chemical base	Polyols	Isocyanate derivatives
Color (CQP001-1)	White	Brown
	mixed	Beige
Cure mechanism	Polyaddition	
Density (uncured)	1.60 g/cm ³	1.23 g/cm ³
	mixed (calculated)	1.52 g/cm ³
Solid content	100 %	100 %
Mixing ratio	by volume 100 : 26 by weight 100 : 20	
Viscosity (CQP029-4)	Rheometer, PP25, shear rate 10 s ⁻¹ , d=0.2 mm mixed	200 000 mPa·s ^A 200 mPa·s ^B
Application temperature	15 – 30 °C	
Pot life (CQP536-2)	70 minutes ^B	
Open time (CQP526-3)	85 minutes ^B	
Press time (CQP590-4)	1 MPa	300 minutes ^B
Shore D hardness (CQP023-1 / ISO 868)	75 ^C	
Tensile strength (CQP543-1 / ISO 527)	20 MPa ^C	
Elongation at break (CQP543-1 / ISO 527)	10 % ^C	
Tensile lap-shear strength (CQP546-1 / ISO 4587)	11 MPa ^C	
Gross calorific potential (EN ISO 1716)	16 MJ/kg	
Shelf life	12 months	9 months

CQP = Corporate Quality Procedure

A) 20 °C

C) 12 weeks at 23 °C / 50 % r.h.

B) 23 °C / 50 % r.h.

DESCRIPTION

SikaForce®-472 FR L60 is a high viscous 2-component polyurethane adhesive for assembling sandwich panels and similar constructions of various materials.

PRODUCT BENEFITS

- Room temperature curing
- Highly impact resistant
- IMO compliance acc. to DNV-GL
- Solvent free
- Good non-sag properties in thin adhesive layer

AREAS OF APPLICATION

SikaForce®-472 FR L60 is used primarily for industrial structural bonding of different materials like metals, ceramics, wood and wood derivatives.

This product is suitable for experienced professional users only. Tests with actual substrates and conditions have to be performed, ensuring adhesion and material compatibility.

PRODUCT DATA SHEET
SikaForce®-472 FR L60
Version 01.01 (11 - 2021), en_DE
012104544720001020



CURE MECHANISM

The curing of SikaForce®-472 FR L60 takes place by a chemical reaction of the two components. Higher temperatures speed up the curing process and lower slow it down.

CHEMICAL RESISTANCE

In case of chemical or thermal exposure, conduct project related testing.

METHOD OF APPLICATION**Surface preparation**

Surfaces must be clean, dry and free from grease, oil, dust and contaminants. After the cleaning process, a physical or chemical pretreatment might be required, depending on surface and type of material. The type of pretreatment must be determined by tests.

Application

Volume and positioning of the adhesive must be defined in a way, that the intended gap is sufficiently filled after joining the parts. The specific applied quantity and position must be determined by tests.

The procedure for manual application is as follows: Ensure that the A-component is stirred thoroughly to avoid any sediment or separation, taking care not to stir too vigorously as this may introduce air into the product. Add the B-component in the specified ratio and stir thoroughly, ensuring a homogeneous mixture is achieved.

Apply before reaching half of the pot-life and join parts together within the open time. Consider that, if mixed in larger amounts, the exothermic reaction can reduce the pot-life and open time significantly.

For support on selecting and setting up a suitable pump system, contact the System Engineering department of Sika Industry.

Pressing

An adequate bonding pressure is necessary to obtain a voidless contact between the substrates and the adhesive. The specific pressure is, however, dependent on the core material and must be determined by tests. The pressure must always be below the maximum compressive strength of the core. After starting the press process, do not release the pressure until the press time has elapsed.

Removal

Uncured SikaForce®-472 FR L60 may be removed from tools and equipment with SikaForce®-096 Cleaner (formerly SikaForce®-7260 Cleaner). Once cured, the material can only be removed mechanically.

Hands and exposed skin have to be washed immediately using hand wipes such as Sika® Cleaner-350H or a suitable industrial hand cleaner and water.

Do not use solvents on skin.

STORAGE CONDITIONS

SikaForce®-472 FR L60 has to be kept between 10 °C and 30 °C in a dry place. Do not expose it to direct sunlight or frost. After opening of the packaging, the content has to be protected against humidity.

The lowest allowed temperature during transportation is -20 °C for max. 7 days.

FURTHER INFORMATION

The information herein is offered for general guidance only. Advice on specific applications is available on request from the Technical Department of Sika Industry.

Copies of the following publications are available on request:

- Safety Data Sheets

BASIS OF PRODUCT DATA

All technical data stated in this document are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

HEALTH AND SAFETY INFORMATION

For information and advice regarding transportation, handling, storage and disposal of chemical products, users shall refer to the actual Safety Data Sheets containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.

DISCLAIMER

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and enduse of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.

PRODUCT DATA SHEET
SikaForce®-472 FR L60
Version 01.01 (11 - 2021), en_DE
012104544720001020

Sika Deutschland GmbH
Industry
Stuttgarter Straße 139
72574 Bad Urach
Tel. +49 7125 940-7692
verkauf.industry@de.sika.com
www.sika.de

