



Ligações adesivas com chanfro interior entre aderentes distintos

DAVID LEAL ALVES

Outubro de 2016

LIGAÇÕES ADESIVAS COM CHANFRO INTERIOR ENTRE ADERENTES DISTINTOS

David Leal Alves

1080806

2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



LIGAÇÕES ADESIVAS COM CHANFRO INTERIOR ENTRE ADERENTES DISTINTOS

David Leal Alves

1080806

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 Eng. Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e co-orientação do Eng. Raul Domingos Ferreira Moreira.

2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

A definir

Orientador

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Co-orientador

Raul Domingos Ferreira Moreira

Bolseiro de Investigação, INEGI

Arguente

A definir

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria de todo possível a sua concretização devido a várias pessoas que me suportaram ao longo deste grande percurso e à instituição.

Começo por enumerar o meu orientador, Professor Doutor Raúl Campilho, e co-orientador, Eng. Raúl Moreira, por toda a disponibilidade, paciência, ensinamentos e ajuda que me disponibilizaram desde o primeiro minuto. A entrega de ambos foi essencial tanto no cumprimento de todo o processo experimental como de partilha de conhecimentos durante a realização da simulação numérica.

Agradeço também ao Instituto de Engenharia do Porto pela disponibilidade de realizar este trabalho e por todos os conhecimentos que aqui foram adquiridos ao longo destes anos.

Não menos importante, á minha família pelo apoio, dedicação e esforço incondicional mesmo nas situações mais adversas. Sem eles não seria possível concretizar este meu grande objectivo. À minha Mimi pelo suporte, disciplina, orientação e persistência nas fases em que mais precisei.

Agradeço ainda, a alguns amigos criados nesta instituição e colegas de trabalho que mesmo já tendo concluído os estudos, nunca deixaram de manifestar a sua colaboração e incentivo para o que fosse necessário.

PALAVRAS CHAVE

Adesivo, Juntas com Chanfro Interno, Juntas Híbridas, Métodos de Elementos Finitos, Modelos de Dano Coesivo

RESUMO

A prática de ligações adesivas, ou coladas, tem sido utilizada em diversas áreas como a indústria automóvel, aeronáutica, naval, componentes de electrónica, civil, madeiras, entre outras, com uma grande relevância. A sua utilização tem surgido em detrimento de outros métodos de ligação tradicionais tais como ligações aparafusadas, rebitadas e soldadas. A expansão da sua utilização a todas as indústrias deve-se essencialmente à facilidade de fabricação, menores custos, facilidade de união entre materiais distintos, melhor resistência à fadiga e distribuição uniforme das tensões. A ligação por chanfro interno é uma das configurações possíveis e viáveis para aplicação pois não exige que se altere a forma inicial do componente. Apresenta ainda vantagens relativamente à distribuição mais uniforme de tensões quando comparada com juntas de sobreposição simples ou dupla, embora haja alguma complexidade na execução.

Neste trabalho pretendeu-se fazer o estudo da ligação com chanfro utilizando dois substratos de materiais distintos aplicando diversos ângulos de chanfro. O estudo experimental consistiu no ensaio de tração, permitindo obter as curvas de força-deslocamento ($P-\delta$). A análise numérica por Elementos Finitos permitiu realizar um estudo de tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}), utilizando o *software* ABAQUS®. A utilização de Modelos de Dano Coesivo foi realizada para previsão numérica da resistência das juntas. Constatou-se uma variação significativa do comportamento das juntas consoante o ângulo de chanfro aplicado e adesivo. Como conclusão, considera-se os modelos numéricos adequados para serem usados como ferramenta de validação, embora a lei coesiva a utilizar deva de ser revista e melhorada para os adesivos dúcteis.

KEYWORDS

Adhesive, Scarf Joints, Hybrid Joints, Finite Element Method, Cohesive Zone Models

ABSTRACT

The practice of adhesive or glued joints has been used in many areas such as automotive and aeronautic industries, navy, electronic components, construction, woods and others, with a big relevance. Their use has emerged to the detriment of other traditional joint methods such as bolted, riveted and welded joints. The expansion of their use in all those industries is essential due to an easy manufacturing, lower costs, easiness to joint different materials, better failure resistance and uniform distribution of stresses. The scarf joint is one of the possible and a viable configurations for application because does not require to change the initial shape of the component. This joint presents other advantages, namely an uniform distribution of the stresses when compared with single and double overlap joints, although it has some complexity in the manufacturing process.

The main goal of this work is make a study about scarf joints using two adherents with different materials and varying the scarf angles. The experimental study consists of performing tensile tests and obtaining the load-displacement ($P-\delta$) curves. The numerical analysis by Finite Elements was performed to obtain peel (σ_y) and shear (τ_{xy}) stresses, using the software ABAQUS®. Cohesive Zone Models (CZM) were used to predict the joint strength. In the end, a significant variation was confirmed on the behavior of the joints depending on the chamfer angle used and the adhesive applied. As a conclusion, numerical models are considered suitable to use as a validation tool, although the cohesive law should be revised and improved for ductile adhesives.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
AMDC	Alternativas dos modelos de dano coesivo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CFRP	<i>Carbon-Fiber Reinforced Plastic</i> ou Plástico Reforçado com Fibra de Carbono
DCB	<i>Double Cantilever Beam</i>
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
EF	Elementos Finitos
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
EPD	Estado Plano de Deformação
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JSS	Junta de Sobreposição Simples
MDC	Modelo de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFE	Método de Elemento Finito Extendido
MFLE	Mecânica da fractura Linear Elástica
P	Força
$P_{m\acute{a}x}$	Força máxima
rpm	Rotações por minuto

TAST Thick Adherend Shear Test

TFFV Técnica de Fecho de Fenda Virtual

Lista de Símbolos

δ Deslocamento

δ_m^f Deslocamento final correspondente a t_m

δ_m^0 Deslocamento correspondente a t_m^0

δ_n^f Deslocamento final correspondente a t_n

δ_n^0 Deslocamento correspondente a t_n^0

δ_s^f Deslocamento final correspondente a t_s

δ_s^0 Deslocamento correspondente a t_s^0

E Módulo de *Young* ou módulo de elasticidade longitudinal

G Módulo de elasticidade transversal, Taxa de libertação de energia de libertação

G_I Taxa de libertação de energia à tração

G_{IC} Tenacidade à tração

G_{IIC} Tenacidade ao corte

G_r Tenacidade à fractura

K Matriz de rigidez

K_{nm}, K_{ss}, K_{ns} Parametros da matriz K

l_0 Comprimento útil do provete

l_A Comprimento do substrato de alumínio

l_C Comprimento do substrato de compósito

\mathbf{t}	Vector de tração
t_A	Espessura do adesivo
t_m^0	Tensão coesiva em modo misto
t_n	Tensão coesiva à tração
t_n^0	Resistência coesiva à tração
t_p	Espessura de cada provete
t_s	Tensão coesiva à tração
t_s^0	Resistência coesiva à tração
w	Largura do provete
α	Ângulo de chanfro interno
γ_f	Deformação de rotura ao corte
ε	Deformação
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Vector deformação
ε_f	Deformação da rotura à tração
ε_n	Deformação à tração
ε_s	Deformação ao corte
ϑ	Ângulo de inclinação
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão
σ_{ced}	Tensão de cedência
σ_f	Tensão de rotura
σ_y	Tensões de arrancamento
σ_y	Tensão de cedência à tração

τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_{xy}	Tensões de corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – ELEMENTOS CONSTITUINTES DA JUNTA ADESIVA	7
FIGURA 2 – ESFORÇOS TÍPICOS EM JUNTAS ADESIVAS (DA SILVA ET AL. 2007)	9
FIGURA 3 – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE CORTE NUMA JUNTA ADESIVA (DA SILVA ET AL. 2007)	10
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS TIPOS DE ROTURA: A) ROTURA ADESIVA B) ROTURA COESIVA C) ROTURA SUBSTRATO (2011)	11
FIGURA 5 – CONFIGURAÇÕES DE JUNTAS TOPO A TOPO (PETRIE 2000)	12
FIGURA 6 – CONFIGURAÇÃO DE JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO (PETRIE 2000).....	13
FIGURA 7 – CONFIGURAÇÃO JUNTAS COM TIRA (PETRIE 2000)	14
FIGURA 8 – MÉTODOS DE DIMINUIR AS FORÇAS DE ARRANCAMENTO NAS JUNTAS ADESIVAS(KOHEN 1954)	15
FIGURA 9 – SOLUÇÕES PARA DIMINUIR A CLIVAGEM DE JUNTAS REFORÇADAS (KOHEN 1954).....	15
FIGURA 10 – JUNTAS PARA VARÕES (A) E TUBOS (B) (PETRIE 2000)	16
FIGURA 11 – JUNTAS DE CONFIGURAÇÃO EM T (ADAMS ET AL. 1997)	17
FIGURA 12 – JUNTAS DE CANTO (ADAMS ET AL. 1997)	18
FIGURA 13 – LIGAÇÕES ADESIVAS DO AVIÃO DE HAVILAND CORNET (1996).....	19
FIGURA 14 – FÁBRICA DE CARROÇARIAS DOS MODELOS / DA BMW, EM LIEPZIG.(BAKEWELL 2015)	20
FIGURA 15 – PAINÉIS SANDWICH DE COBERTURA/REVESTIMENTO (CONSULTADO A 1/09/2016).....	20
FIGURA 16 – JUNTAS HÍBRIDAS (DA SILVA 2008)	23
FIGURA 17 – TÉCNICAS DE LIGAÇÃO ADESIVA SOLDADA (A) <i>THE FLOW-IN TECHNIQUE</i> (B) <i>WELD-THROUGH TECHNIQUE</i> (DA SILVA 2011).....	25
FIGURA 18 – TÉCNICAS DE REPARAÇÃO (ODI E FRIEND 2002)	26
FIGURA 19 – GEOMETRIA DOS PROVETES.....	36
FIGURA 20 – CURVAS Σ -E DA LIGA DE ALUMÍNIO AW 6082-T651 (CAMPILHO ET AL. 2013)	39
FIGURA 21 – CURVAS Σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 (CAMPILHO ET AL. 2013)	39
FIGURA 22 – ADESIVO ARALDITE® AV138 (AZEVEDO 2014A)	40
FIGURA 23 – FORMATO COMERCIAL DO ADESIVO ARALDITE® 2015 DE 50 ML (AZEVEDO 2014A).....	41

FIGURA 24 – CURVAS Σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 (CAMPILHO ET AL. 2013).....	41
FIGURA 25 – CICLO TÉRMICO PARA A CURA DAS PLACAS DE CARBONO-EPÓXIDO.....	43
FIGURA 26 – GUILHOTINA “ADIRA” GM/0410.....	43
FIGURA 27 – A) FRESADORA “GAMBIN” MODELO 1M; B) PRATO DE FIXAÇÃO GIRATÓRIO.....	44
FIGURA 28 – FIXAÇÃO E POSICIONAMENTO DOS FIOS DE NYLON.....	45
FIGURA 29 – REMOÇÃO DO EXCESSO DE ADESIVO NO PLANO SUPERIOR DO PROVETE. EXCESSO DE ADESIVO VISÍVEL NAS LATERAIS DA JUNTA.	45
FIGURA 30 – A) MÁQUINA DE ENSAIO DE TRAÇÃO SHIMADZU®; B) POSICIONAMENTO DAS AMARRAS PARA A FIXAÇÃO DO PROVETE.....	46
FIGURA 31 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE FABRICO.....	47
FIGURA 32 - CURVA P - δ RESPECTIVA AOS PROVETES DE 10° DE CHANFRO INTERNO COM APLICAÇÃO DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	48
FIGURA 33 - CURVA P - δ RESPECTIVA AOS PROVETES DE 45° DE CHANFRO INTERNO COM APLICAÇÃO DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	48
FIGURA 34 - CURVA P - δ RESPECTIVA AOS PROVETES DE 10° DE CHANFRO INTERNO COM APLICAÇÃO DO ADESIVO ARALDITE® 2015.....	49
FIGURA 35 - CURVA P - δ RESPECTIVA AOS PROVETES DE 10° DE CHANFRO INTERNO COM APLICAÇÃO DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	49
FIGURA 36 – SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS APÓS ENSAIO DE TRAÇÃO, COLADAS PREVIAMENTE COM ARALDITE® AV138.A) ÂNGULOS DE CHANFRO DE 15° E B) 20°	50
FIGURA 37 – SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS APÓS ENSAIO DE TRAÇÃO, COLADAS PREVIAMENTE COM ARALDITE® 2015.A) ÂNGULOS DE CHANFRO DE 15° E B) 20°	51
FIGURA 38 – VERIFICAÇÃO DA ROTURA ADESIVA – SOBRE ESPESSURA – PROVOCADO PELO MAU ALINHAMENTO DOS FIOS DE NYLON GUIA.....	51
FIGURA 39 – COMPARAÇÃO DE $P_{MÁX}$ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138.....	53
FIGURA 40 – COMPARAÇÃO DO $P_{MÁX}$ OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015.	54
FIGURA 41 – EXEMPLO DA MALHA OBTIDA POR EF EM ABAQUS®.....	54
FIGURA 42 – EXEMPLO DE UM PROVETE APÓS REFINAMENTO DA MALHA EM ABAQUS®.....	55
FIGURA 43 – LEI TRIANGULAR DO MODELO DE DANO COESIVO.....	56
FIGURA 44 – EXEMPLO DA MALHA APÓS REFINAMENTO E <i>PATH</i> DEFINIDO PARA OBTENÇÃO DAS TENSÕES, EM ABAQUS®.....	59

FIGURA 45 – TENSÕES DE ARRANCAMENTO REFERENTE AO ADESIVO ARALDITE® AV138, EXTRAÍDO DO MODELO NUMÉRICO EM ABAQUS®	60
FIGURA 46 – TENSÕES DE ARRANCAMENTO REFERENTE AO ADESIVO ARALDITE® 2015, EXTRAÍDO DO MODELO NUMÉRICO EM ABAQUS®	61
FIGURA 47 – TENSÕES DE CORTE REFERENTE AO ADESIVO ARALDITE® AV138, EXTRAÍDO DO MODELO NUMÉRICO EM ABAQUS®	62
FIGURA 48 – TENSÕES DE CORTE REFERENTE AO ADESIVO ARALDITE® 2015, EXTRAÍDO DO MODELO NUMÉRICO EM ABAQUS®	62
FIGURA 49 – CURVA $P-\delta$ RESPECTIVO AOS PROVETES DE 10° DE CHANFRO INTERNO COM APLICAÇÃO DO ADESIVO ARALDITE® AV138 -RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICO	63
FIGURA 50 – COMPARAÇÃO DAS FORÇAS MÁXIMAS OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE E NUMERICAMENTE PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138.....	64
FIGURA 51 – CURVA $P-\delta$ RESPECTIVO AO PROVETE DE 10° DE CHANFRO INTERNO COM APLICAÇÃO DO ADESIVO ARALDITE® 2015 -RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICO	65
FIGURA 52 – COMPARAÇÃO DAS FORÇAS MÁXIMAS OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE E NUMERICAMENTE PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015.	66

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DOS ADESIVOS SEGUNDO O SEU DESEMPENHO (DE MOURA ET AL. 2008)..	21
TABELA 2 – DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DAS JUNTAS.....	36
TABELA 3 – PROPRIEDADES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS DO CFRP, COM FIBRAS ALINHADAS UNIDIRECCIONALMENTE SEGUNDO A DIRECÇÃO X (CAMPILHO 2005).....	37
TABELA 4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA DE ALUMÍNIO AW6082-T651	37
TABELA 5 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO AW 6082-T651; DADOS DO FABRICANTE	38
TABELA 6 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO AW 6082-T651 OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (CAMPILHO ET AL. 2011A).....	38
TABELA 7 – PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FRATURA DO ADESIVO ARALDITE® AV138 (NETO ET AL. 2012, CAMPILHO ET AL. 2013)	40
TABELA 8 – PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FRATURA DO ADESIVO ARALDITE® 2015 (CAMPILHO ET AL. 2013)	42
TABELA 9 – VALORES DE $P_{MÁX}$ OBTIDOS DOS PROVETES, [N], COLADOS COM ARALDITE® AV138 OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE.....	52
TABELA 10 – VALORES DE $P_{MÁX}$ OBTIDOS DOS PROVETES, [N], COLADOS COM ARALDITE® 2015 OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE.....	53
TABELA 11 – PARÂMETROS COESIVOS EM TRACÇÃO E CORTE PARA UMA CAMADA DE ADESIVO ARALDITE® AV138 COM T_A DE 0,2 MM (CAMPILHO ET AL. 2011B)	58
TABELA 12 – PARÂMETROS COESIVOS EM TRACÇÃO E CORTE PARA UMA CAMADA DE ADESIVO ARALDITE® 2015 COM T_A DE 0,2 MM (DE MOURA ET AL. 2008).....	58
TABELA 13 – RESISTÊNCIAS MÁXIMAS OBTIDAS EXPERIMENTAL E NUMERICAMENTE, EM NEWTONS [N], COLADOS COM ARALDITE® AV138	64
TABELA 14 – RESISTÊNCIAS MÁXIMAS OBTIDAS EXPERIMENTAL E NUMERICAMENTE, EM NEWTONS [N], COLADOS COM ARALDITE® 2015	65

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Organização do relatório	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Ligação de componentes por juntas adesivas	7
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	7
2.1.2	Esforços típicos em juntas adesivas	9
2.1.3	Tipos de rotura	11
2.1.4	Configurações possíveis de junta	12
2.1.5	Aplicações comuns das juntas adesivas	18
2.1.6	Adesivos estruturais	21
2.2	Juntas híbridas	23
2.2.1	Juntas de sobreposição	23
2.2.2	Juntas de remendo embebido.....	25
2.3	Previsão de resistência de juntas adesivas	26
2.3.1	Modelos analíticos	27
2.3.2	Métodos numéricos	28
2.3.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	28
2.3.2.2	Mecânica da fratura.....	28
2.3.2.3	Modelos de dano coesivo	29
2.3.2.4	Mecânica do dano.....	30
2.3.2.5	Técnicas Alternativas aos Modelos de Dano Coesivo	30
2.3.2.6	Método de Elementos Finitos Estendido.....	31

3	DESENVOLVIMENTO	35
3.1	Trabalho experimental	35
3.1.1	Geometria dos provetes.....	36
3.1.2	Materiais utilizados	37
3.1.2.1	Compósito de carbono-epóxico	37
3.1.2.2	Alumínio.....	37
3.1.2.3	Adesivos	39
3.1.2.3.1	Araldite® AV138	39
3.1.2.3.2	Araldite® 2015.....	41
3.1.3	Processo de fabrico	43
3.1.4	Resultados obtidos	47
3.1.4.1	Curvas $P-\delta$	47
3.1.4.2	Modos de rotura	50
3.1.4.3	Resistência das juntas	52
3.2	Trabalho numérico	54
3.2.1	Condições da análise numérica	54
3.2.2	Modelo de dano coesivo	55
3.2.2.1	Modelo de dano triangular	55
3.2.2.2	Determinação das propriedades coesivas	57
3.2.3	Análise de tensões na junta.....	59
3.2.3.1	Tensões de arrancamento	59
3.2.3.1.1	Araldite® AV138	59
3.2.3.1.2	Araldite® 2015.....	60
3.2.3.2	Tensões de corte.....	61
3.2.3.2.1	Araldite® AV138	61
3.2.3.2.2	Araldite® 2015.....	62
3.2.4	Previsão da resistência	63
3.2.4.1	Araldite® AV138	63
3.2.4.2	Araldite® 2015	64

4	CONCLUSÕES.....	69
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	75

INTRODUÇÃO

- 1.1** Contextualização
- 1.2** Objetivos
- 1.3** Organização do relatório

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Nas últimas décadas, as ligações adesivas têm vindo a ter um crescendo na sua aplicação, muito derivado da necessidade de indústrias paralelas tais como aeronáutica, aeroespacial e automóvel. Esta necessidade surgiu com o intuito de criar uma alternativa às ligações mais comuns como a soldadura, brasagem, ligações aparafusadas e rebitadas. Hoje em dia, já existem múltiplos adesivos para múltiplas aplicações, estendendo-se também à indústria civil, calçado, componentes de electrónica e madeiras.

Os adesivos têm propriedades que os mantêm no topo das preferências destas indústrias, tais como alta resistência aliada a uma boa ductilidade e baixo peso, maior flexibilidade na escolha dos materiais, amortecimento de vibrações, distribuição mais uniforme das tensões, entre outras. Para a sua aplicação não é necessário apenas avaliar as suas propriedades mecânicas mas também ter em conta outros factores externos como a adesão e preparação dos materiais, tipo de esforços sujeitos, o tipo de junta, bem como a sua própria geometria.

Na prática para se obter a melhor performance de cada aplicação por vezes é necessário recorrer a ferramentas de projecto como *softwares* de simulação, como neste caso o ABAQUS®. O tipo de geometria, a refinação da malha, pontos de aplicação de esforços, pontos de esforços localizados são factores que podem ser simulados e optimizados para a aplicação final. A realização deste trabalho passa também por criar e estudar métodos alternativos às postas em prática nos dias de hoje que visem a estabilização e controlo do processo e que por sua vez, se reflectam num melhor desempenho da aplicação final.

1.2 Objetivos

Este trabalho surge da necessidade de aprofundar o comportamento de uma configuração alternativa das juntas de sobreposição simples, que se trata da configuração com chanfro interior (*scarf*). Embora esta configuração não seja tão vantajosa do ponto de vista do seu processo de fabrico, no geral, os resultados finais são substancialmente melhores pois esta configuração promove distribuições de tensões mais uniformes devido às menores excentricidades da carga e ao efeito de redução da sobreposição dos aderentes.

O estudo reside no impacto que cada ângulo de chanfro pode ter no elemento de junta aliando ainda ao factor dos adesivos aplicados, um mais frágil e outro mais dúctil. Para a junta híbrida, foram ensaiados dois substratos diferentes, regularmente utilizados na indústria, para que possa ser verificada o seu rendimento perante esforços de tração.

Como aderentes foram considerados um substrato de alumínio e outro de compósito carbono-epóxico, e aplicados chanfros com ângulos de 10°, 15°, 20°, 30° e 45°. Para além da variável do ângulo de contacto entre substratos, foi tomado também em conta a utilização de dois tipos de adesivos distintos: Araldite® 2015 e Araldite® AV138, o primeiro mais dúctil e o segundo mais frágil.

Para as diferentes condições mencionadas acima será validado numericamente com recurso ao *software* ABAQUS®. No estudo de modelos de dano coesivo serão obtidos a propagação do dano, o comportamento do adesivo respectivo às tensões em função do deslocamento e a previsão de resistência de junta. Ainda numericamente estudaram-se igualmente as tensões de arrancamento σ_y e tensões de corte τ_{xy} , ao longo da camada do adesivo.

Posteriormente os resultados numéricos foram comparados com os experimentais, realizados nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica, para que possa ser feita a validação da metodologia aplicada.

1.3 Organização do relatório

O relatório deste trabalho está composto por 4 capítulos distintos. No primeiro capítulo é feita uma contextualização do tema, descritos os objectivos propostos e apresentada a organização do relatório.

O segundo capítulo é referente à revisão bibliográfica e este encontra-se dividido em 3 sub-capítulos. O primeiro destaca a ligação de componentes por juntas adesivas, onde contempla a investigação científica de outros autores referente a definições, solicitações e comportamentos dos adesivos, tipos de rotura mais frequentes, diferentes configurações de ligações adesivas estudadas, aplicações dos adesivos nas indústrias da actualidade. O segundo sub-capítulo descreve a definição das juntas híbridas e apresenta algumas aplicações desenvolvida por alguns autores. Por último, são apresentados os modelos analíticos e numéricos referentes à previsão de resistência de juntas adesivas.

O terceiro capítulo, o desenvolvimento, é sub dividido pelo estudo experimental e numérico. O primeiro sub-capítulo, estudo experimental, detalha as geometrias definidas, materiais utilizados, parâmetros do processo de fabrico, apresentação dos resultados obtidos referentes aos modos de rotura, curvas $P-\delta$ extraídas do ensaio de tração e resistência das juntas. No segundo sub-capítulo são detalhadas as condições numéricas consideradas no ABAQUS® para a obtenção dos resultados. É ainda definido o modelo de dano coesivo explorado neste *software*. Posteriormente, ainda neste sub-capítulo, é feita uma análise comparativa dos ensaios experimentais com os modelos numéricos, para cada adesivo utilizado, referente às curvas $P-\delta$, distribuição de tensões e previsão de resistência de junta.

Por fim, no quarto capítulo, surgem as conclusões aos resultados e apresentadas as sugestões para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligação de componentes por juntas adesivas

- 2.1.1 Caracterização das juntas adesivas
- 2.1.2 Esforços típicos em juntas adesivas
- 2.1.3 Tipos de rotura
- 2.1.4 Configurações possíveis de junta
- 2.1.5 Aplicações comuns das juntas adesivas
- 2.1.6 Adesivos estruturais

2.2 Juntas híbridas

- 2.2.1 Juntas de sobreposição
- 2.2.2 Juntas de remendo embebido

2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

- 2.3.1 Modelos analíticos
- 2.3.2 Métodos numéricos

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligação de componentes por juntas adesivas

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Os adesivos ganharam especial atenção para a indústria, e em muitos casos em detrimento de processos como soldadura, brasagem ou ligações mecânicas como parafusos ou rebites.

Um adesivo pode ser definido por um material polimérico que depois de aplicado e formada a junta adesiva promove uma ligação resistente à separação. Este material a ser ligado pelo adesivo define-se por substrato e podendo ainda ser denominado de aderente após a sua a ligação.

Adesão é a propriedade dominante dos adesivos uma vez que é qualificada como sendo a atracção entre as duas substâncias resultante das forças intermoleculares que estabelecem entre si. A região compreendida entre o adesivo e o aderente é referida como a interfase. Esta região é composta pelas diferentes características químicas e físicas tanto da parte maciça do adesivo ou na do aderente. A natureza da interfase irá determinar as propriedades da ligação adesiva.

A junta é o conjunto formado pelos aderentes, o adesivo e todas as interfaces associadas, como demonstrado na Figura 1.

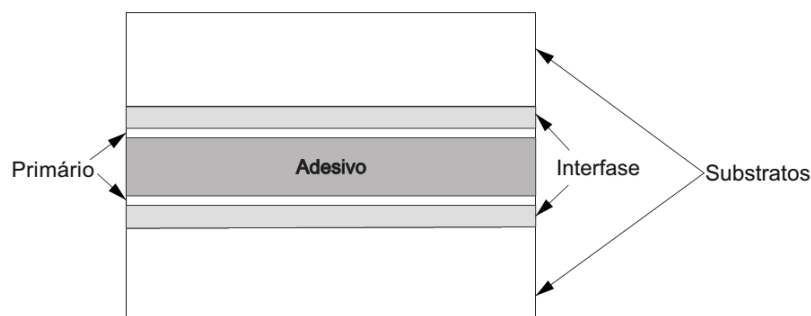


Figura 1 – Elementos constituintes da junta adesiva

De um modo geral, o sucesso e aplicabilidade das ligas adesivas resulta da sua versatilidade em ligar materiais diferentes, permitindo uma boa resistência quando aplicados esforços consideráveis. Eis algumas das suas características mais vantajosas (da Silva et al. 2007):

- Redução do peso da estrutura final comparativamente com outras ligações mecânicas.
- Melhor distribuição das tensões ao longo da área ligada, ou seja, a rigidez e transmissão de carga é feita por toda a área ligada e não apenas por pontos de ligação. Pelo contacto contínuo, evitam-se concentração de tensões nos pontos de união (como se verifica com parafusos por exemplo) e paralelamente a isto é possível obter melhores resultados à fadiga;
- Capacidade de amortecimento de vibrações. É uma característica igualmente importante na resistência à fadiga porque evita que tensões resultantes de vibrações prejudiquem a estrutura;
- Ligação de materiais diferentes;
- Boa ligação entre chapas finas;
- Tornam o projecto mais flexível do ponto de vista de selecção de materiais ou conceitos a por em prática.
- É possível obter estruturas com contornos irregulares evitando assim furos para colocação de rebites e parafusos, ou ainda marcas respectivas à soldadura.
- Redução de custos, uma vez que nos projectos as ligações pretendidas são mais ligeiras e mais económicas.

Muitas das vantagens acima são tidas em conta para a decisão final de um projecto, mas nem tudo é benéfico para este tipo de ligação. Seguem-se algumas desvantagens que estas ligações apresentam:

- Tipo de esforços sujeitos: forças de arrancamento, clivagem e impacto não são recomendados uma vez que são esforços que fragilizam ou levam mesmo até à rotura da ligação entre materiais. No projecto deve-se eliminar por completo este tipo de esforços. O correcto posicionamento e ângulo entre materiais deve ser também garantido para que a ligação não fique sujeita a forças de clivagem;
- As geometrias devem ser concebidas de maneira a que evitem tensões localizadas e garantam uma distribuição uniforme das tensões. O mais aconselhado para este tipo de geometrias é que sejam concebidas de maneira a que fiquem maioritariamente sujeitas a esforços de corte, pois as juntas são mais resistentes quando sujeitas a este esforço;
- Apresentam limitada resistência a condições extremas de humidade e temperatura;
- A aplicação para este tipo de juntas não é feita no imediato, ou seja, a utilização de ferramentas de fixação pode pesar a nível económico no projecto;
- É necessária sempre uma boa preparação superficial dos materiais para a sua correcta adesão;
- A cura dos adesivos por norma exige altas temperaturas e/ou pressão, que será sempre mais um factor económico e nem sempre fácil de garantir em obra;

- Difícil controlo de qualidade e segurança, embora haja técnicas mais recentes que ajudem;
- Para o caso concreto dos adesivos estruturais até ao momento ainda não há um critério universal que permita o dimensionamento com o mesmo rigor que é aplicado para projectar noutras estruturas. Os que existem apenas são aplicáveis para determinados casos em certas condições.

2.1.2 Esforços típicos em juntas adesivas

Na prática é praticamente impossível garantir uma distribuição homogénea ao longo de uma junta, embora todos estes factores possam ser melhorados com pormenores na fase de projecto, aperfeiçoando a geometria da junta por exemplo.

Os carregamentos mais aplicados: corte, tração, compressão, arrancamento e clivagem. Os carregamentos que se seguem na Figura 2 podem sofrer combinações ou variações mas serão tidas sempre como base para a aplicação prática.

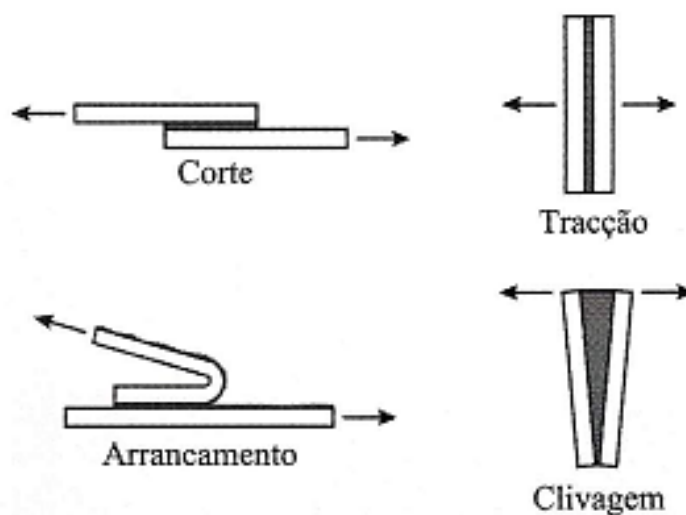


Figura 2 – Esforços típicos em juntas adesivas (da Silva et al. 2007)

Tracção e compressão

É denominado um carregamento de tração ou compressão quando se aplica forças uniformes perpendiculares ao plano da junta. Para este carregamento resistir a esforços na sua aplicação, a perpendicularidade dos substratos deve ser garantida durante o fabrico. Tal como é de prever na prática é muito difícil de assegurar que a espessura ao longo da junta se mantém homogénea. No entanto há técnicas que ajudam que esta espessura seja próxima daquilo que é pretendido e para este caso são usados umas guias para garantir um carregamento axial uniforme. Caso haja um ligeiro desvio das superfícies, após o carregamento pode-se submeter a junta, não a esforços tração mas sim de clivagem, esforço que não é de todo recomendado (tal como será explicado mais a baixo).

Para o caso de ligações que sofrem compressão pura o adesivo é quase desprezável servindo apenas para fortalecer união, uma vez que o esforço é no mesmo sentido da ligação.

Para ambas as situações apenas tem de se ter o cuidado na selecção dos materiais dos substratos pois estes devem ser suficientemente rígidos para que as tensões fiquem uniformemente distribuídas.

Corte

As tensões de corte surgem quando é aplicada uma solicitação no plano longitudinal da ligação adesiva. Como é possível prever, para este tipo de carregamento a ligação apresenta uma maior resistência pois toda a área colada contribui para a resistência da junta. Assim sendo, para além destes serem mais fáceis de projectar também oferecem propriedades favoráveis.

Atendendo ao facto que as tensões de corte são obtidas pelo valor médio (dividindo a força aplicada pela área abrangida), e somando o facto que grande parte das tensões se localizam nos extremos da sobreposição, como é possível verificar na Figura 3. Neste caso, a zona central pouco irá contribuir para sustentar o esforço. Pelas razões mencionadas acima, este carregamento é o que oferece mais vantagens, quando possível de aplicação.

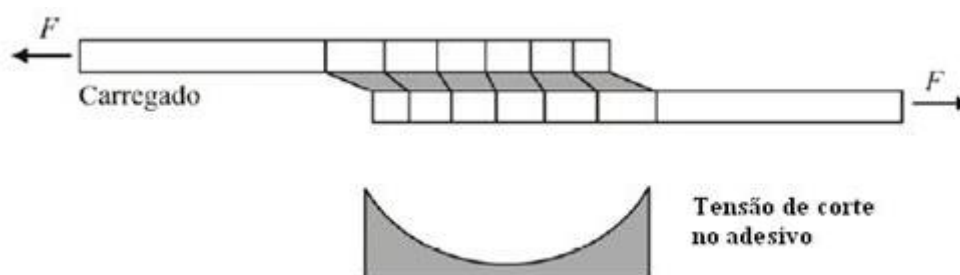


Figura 3 – Distribuição das tensões de corte numa junta adesiva (da Silva et al. 2007)

Clivagem e arrancamento

Um esforço de clivagem define-se pela aplicação de um carregamento com sentido oposto numa dada extremidade de uma junta adesiva, de modo a que ocorra a separação dos seus elementos. Para o caso do arrancamento, as tensões são idênticas às de clivagem, diferindo apenas por um ou ambos os substratos serem flexíveis. No entanto, o ângulo de separação poderá ser maior para o arrancamento do que para a clivagem.

Estes tipos de carregamentos são os menos favoráveis e principal inimigo das juntas adesivas pelo simples facto de o esforço se concentrar numa pequena área da colagem. Deste modo, pelo facto das forças serem apenas empregues numa das extremidades, a outra extremidade e até algumas zonas centrais terão pouco contributo para a sustentação do esforço.

Os adesivos frágeis e rígidos são mais susceptíveis para este tipo de esforços, contrastando com os mais dúcteis e flexíveis pois permitem uma distribuição de tensões que resulta numa maior resistência.

2.1.3 Tipos de rotura

O maior desafio de um projectista é garantir que a transmissão entre a união dos dois componentes ligados se mantém íntegra ao longo do tempo de vida da estrutura, considerando portanto os esforços aplicados (dinâmicos ou estáticos) e sob temperaturas adversas. Como tal, para uma correcta avaliação e orientação para as boas práticas, estão definidos essencialmente três modos de rotura, podendo-se considerar ainda um quarto resultante da combinação de dois dos três. Assim sendo, pode-se definir uma rotura por rotura coesiva, adesiva e do substrato.

A primeira, a rotura coesiva, ocorre quando a resistência interna do adesivo é mais fraca que a ligação entre o adesivo e substrato. Na prática, após a rotura, é possível observar a presença de adesivo em ambos os aderentes. Por norma, quando estamos perante este tipo de rotura, pode-se concluir que a junta foi bem dimensionada.

No caso em que o adesivo cede até à rotura pela superfície interfacial, superfície de contacto do substrato e adesivo, indica que sofreu uma rotura adesiva. Consequência desta natureza pode indicar que preparação superficial não cumpriu os requisitos para garantir uma boa adesão entre superfícies. Para cada material de substrato há diversas técnicas que ajudam a obter melhores resultados e evitar este tipo de rotura, tanto por meios mecânicos como químicos.

A rotura do substrato resulta, tal como o próprio nome indica, da rotura pelo substrato. Neste modo de rotura, as zonas aderentes mostram-se mais resistentes do que o próprio material seleccionado para o substrato. Contudo, indica que o dimensionamento do junta foi o mais correcto pois, tal como desejado, não houve cedência pela zona de adesão.

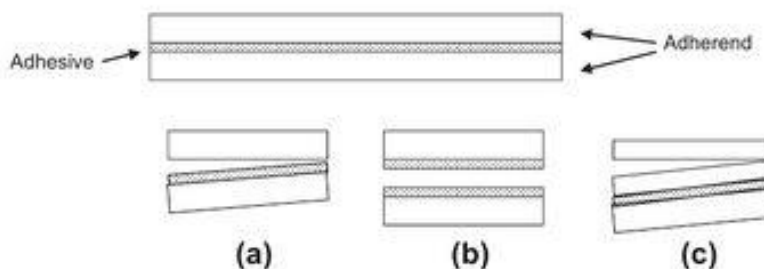


Figura 4 – Representação esquemática dos tipos de rotura: a) rotura adesiva b) rotura coesiva c) rotura substrato (2011)

2.1.4 Configurações possíveis de junta

Na indústria actual encontrámos diversos tipos de configurações possíveis e recomendadas para as juntas, podendo dividi-los por diferentes grupos:

Juntas topo a topo

Neste primeiro grupo são contempladas as juntas topo a topo simples, juntas com chanfro interno (*scarf*), duplo topo a topo com sobreposição ou ainda configuração macho-fêmea como representa a Figura 5.

Estas juntas geralmente são mais acessíveis para o fabrico, porém acarretam outros problemas pois a sua resistência a esforços de flexão é baixa, introduzindo tensões de clivagem no adesivo. Para evitar estes efeitos deve-se aumentar a espessura dos substratos.

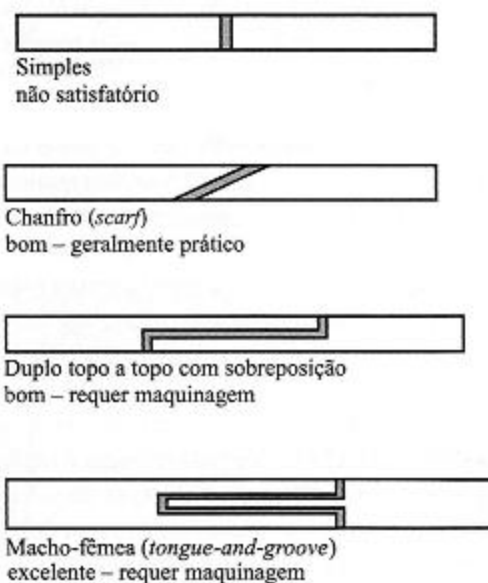


Figura 5 – Configurações de juntas topo a topo (Petrie 2000)

Existem muitas geometrias de juntas estabelecidas e outras em contínuo estudo, em que as juntas de sobreposição simples sofrem maior destaque devido ao seu simples processo de fabrico. Contudo, com este tipo de configurações, quando submetidos a cargas excêntricas afectam consideravelmente as tensões e consequentemente as forças põem em risco a estrutura ligada.

Deste modo, as configurações de junta topo a topo, mais vantajosas, suprimem esta limitação, e os seus constituintes podem ser ainda metais, compósitos, ou estruturas híbridas (ligação entre estas duas) com distinção maior para a ligação com chanfro interno (Wah 1976, He et al. 2010)) ou ainda a utilização de remendo embebido (união de dois substratos por um remendo com duplo chanfro (Breitzman et al. 2009, Whittingham et al. 2009)). A junta com chanfro ou reparação em chanfro são as mais

eficientes respectivamente à área de união devido ao potencial para a supressão de tensões e picos de forças que vão aumentando dos aderentes até às pontas de ligação (Chiu e Chaudhuri 2011). Não só por estes motivos, a técnica *scarf* ou degrau são mais populares para a ligação de compósitos de fibra reforçada (Kimiaefar et al. 2012). No caso das ligações por degrau, têm a vantagem de serem mais fáceis de realizar comparativamente com os restantes se for considerado a técnica de fabricação por empilhamento manual de camadas. No entanto, requer uma optimização do *design* devido à concentração de tensões nos cantos dos degraus afectando negativamente o desempenho das reparações (Wang et al. 2015).

Juntas de sobreposição

Este tipo de configuração de junta é a mais comum, pelo facto de estar solicitada maioritariamente ao corte. Consideradas neste grupo estão as juntas de sobreposição simples, sobreposição por chanfro, sobreposição dupla ou ressalto (Figura 6). Consoante a geometria em questão é preciso ter em atenção que caso as forças não sejam colineares, o que origina tensões de arrancamento, tornando-se assim uma grande desvantagem.

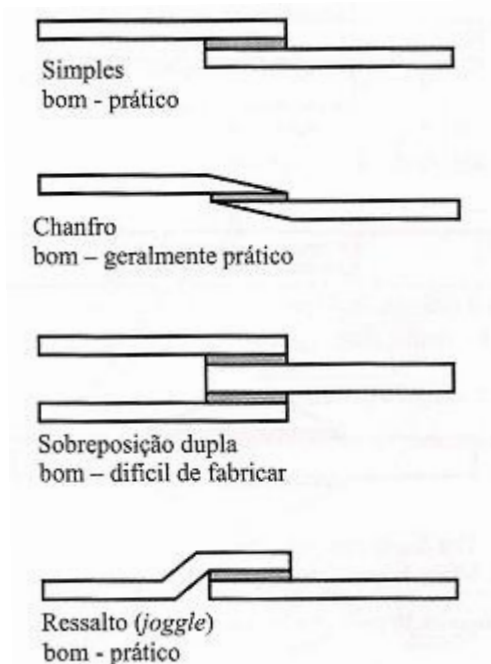


Figura 6 – Configuração de junta de sobreposição (Petrie 2000)

Juntas com tira

Este tipo de junta surgiu com a finalidade de proporcionar maior resistência à configuração inicial, tanto causado pela baixa resistência à flexão da junta como de tensões de arrancamento. Deste modo, o sobrepor uma tira na junta aumenta-se a zona de colagem e a resistência da mesma. Na Figura 7, seguem-se alguns exemplos

mais praticados, uns de mais fácil execução e outros mais eficazes mas dispendiosos (como é o caso do macho-fêmea).

Este tipo de configuração de junta é muito usado essencialmente em reparações, como o exemplo da indústria aeronáutica como meio de remendo aplicado em alumínio ou compósito.

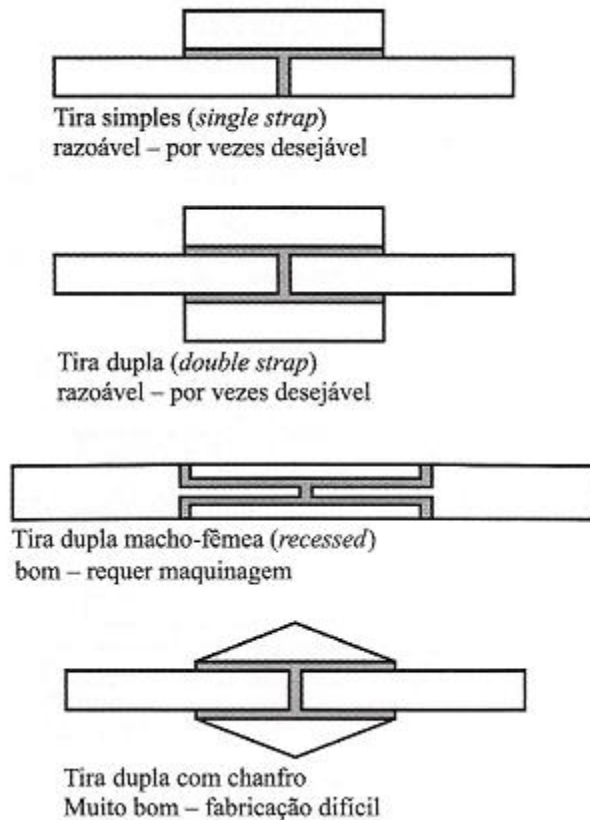


Figura 7 – Configuração juntas com tira (Petrie 2000)

Reforços

A aplicação dos reforços justifica-se para os casos em que a colagem de substratos é feita em elementos de maior espessura. De outro modo poder-se-ia incrementar as forças de arrancamento a que a estrutura estaria sujeita mas seguindo estas técnicas pode-se reduzir substancialmente os esforços causados.

É também comum a sua aplicação para aumentar a sua rigidez em substratos finos, mas com o risco de induzir tensões de clivagem que não é de todo desejado para o adesivo. Nas figuras seguintes (Figura 8 e Figura 9) apresentam-se algumas soluções em que se consegue obter melhores resultados no que diz respeito a solicitações de flexão, a flexibilidade do rebordo e a rigidez da base.

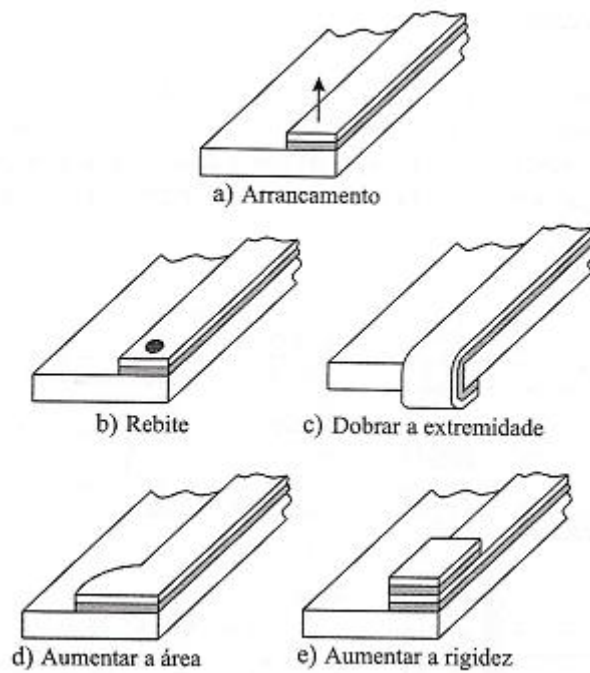


Figura 8 – Métodos de diminuir as forças de arrancamento nas juntas adesivas(Kohen 1954)

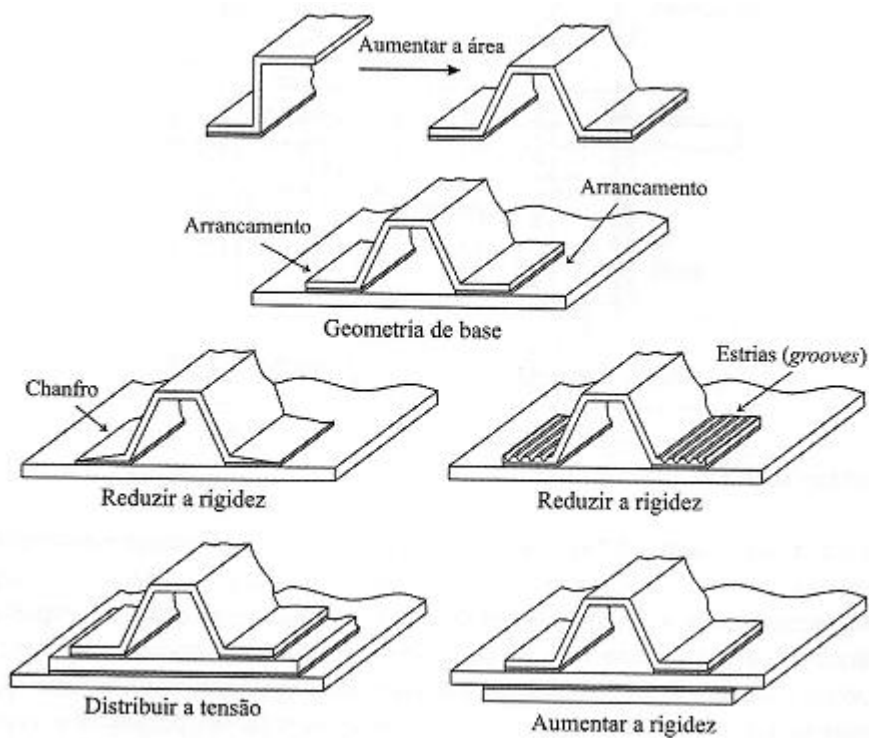


Figura 9 – Soluções para diminuir a clivagem de juntas reforçadas (Kohen 1954)

Juntas cilíndricas

É uma solução aplicada em estruturas cilíndricas como tubos e varões. Estas são mais vantajosas relativamente às juntas topo a topo, uma vez que se obtém uma maior área de resistente e diminuição do efeito de arrancamento. Porém, como é possível verificar na Figura 10 grande parte das soluções carece de maquinação, o que torna o processo de fabrico mais dispendioso.

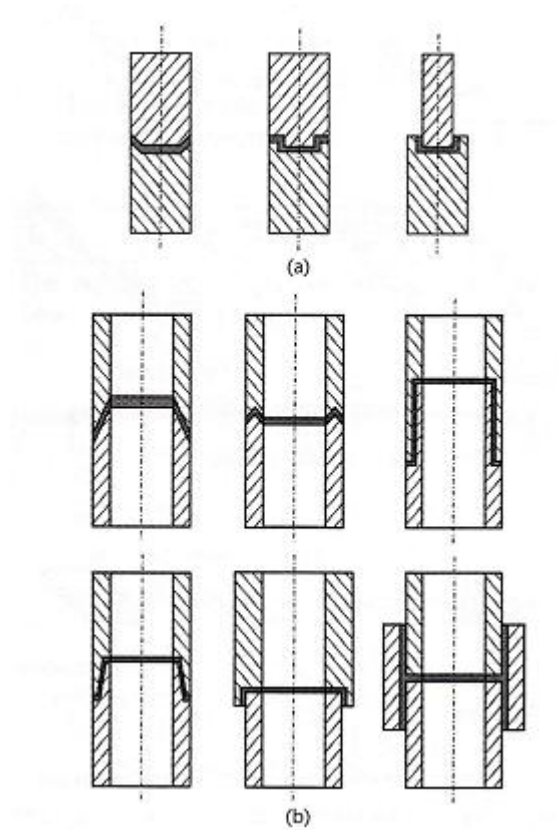


Figura 10 – Juntas para varões (a) e tubos (b) (Petrie 2000)

Juntas em T

As juntas em T são caracterizadas pela colagem perpendicular entre componentes ($\vartheta=90^\circ$), embora exista a possibilidade de serem aplicados com outra inclinação como demonstra na Figura 11. Estas configurações têm como objectivo a redução das solicitações provenientes de esforços arrancamento, que por sua vez traduzem-se num aumento das forças de corte no adesivo (esforço mais desejado).

da Silva e Adams (2002) mostraram que se pode aumentar a força de rotura da junta caso a base seja mais resistente, pois esta provoca a diminuição das forças de arrancamento. Na Figura 11 é possível observar algumas recomendações segundo Adams et al. (1997).

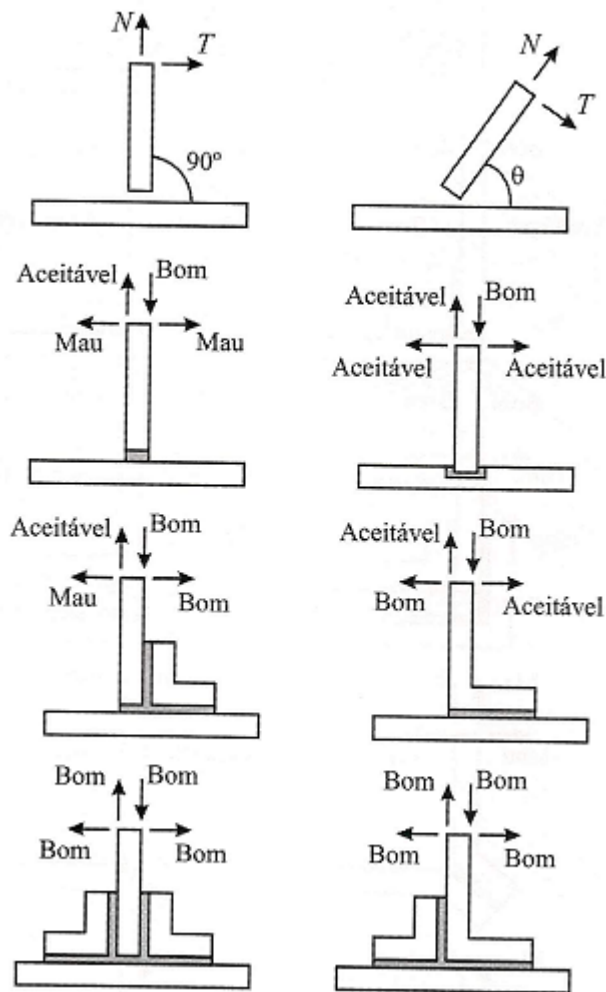


Figura 11 – Juntas de configuração em T (Adams et al. 1997)

Juntas de canto

Tal como as juntas em T, as juntas de canto surgem como solução habitualmente utilizada para reduzir o efeito de arrancamento. Pela análise de EF, é possível verificar que as concentrações de tensões correm nos términos da aplicação adesiva e que a dimensão do adesivo tem um efeito significativo na redução dos picos de tensões, e deste modo com esta configuração pode-se reduzir este efeito. Na Figura 12 surgem algumas configurações recomendadas igualmente por Adams et al. (1997).

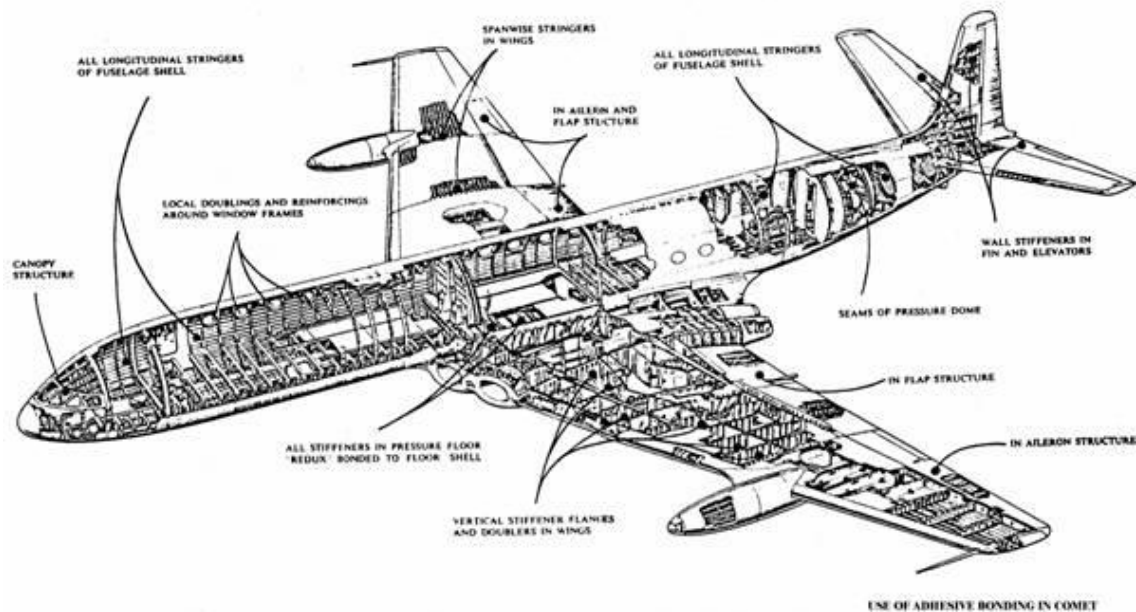


Figura 13 – Ligações adesivas do avião De Haviland Comet (1996)

Também a indústria **automóvel**, tem provado que a produção em larga escala tem resultado. Este é o método de ligação que a BMW escolheu para a construção dos seus modelos *i* com tecnologia de plástico reforçado com fibra de carbono (do inglês, CFRP). Em contraste com as linhas de produção convencionais, a sua fábrica em Liepzig com 32000m² foi construída especificamente para a produção das carroçarias destes veículos (Figura 14).

O comprimento total da ligação da carroçaria do *i3* é de 173 metros. Cada fase do processo de ligação é activado com luzes e monitorizado por cameras. Na ligação dos painéis laterais interiores e exteriores, um robô limpa as linhas de junta com uma esponja de feltro saturado, que é passada entre trabalhos, e um segundo aplica o adesivo poliuretano. Outro par de robôs pressiona os juntamente os dois elementos enquanto o adesivo é curado.

A BMW conseguiu reduzir os tempos de endurecimento do adesivo. Conseguiram que o adesivo pudesse ser trabalhado 90 segundos depois da sua aplicação e que atingisse a sua máxima resistência aos 90 minutos - dez vezes mais acelerado do que os tempos convencionais. Um processo térmico suplementar – pelo aquecimento de pequenas lâmpadas montadas nos braços dos robôs – é usado para obter tempos de endurecimento abaixo dos 10 minutos (Bakewell 2015).



Figura 14 – Fábrica de carroçarias dos modelos *i* da BMW, em Liepzig.(Bakewell 2015)

Na **construção civil** a aposta na tecnologia da adesão tem sido grande, desde estruturas de grande envergadura às mais simples como caixilharias ou painéis (Figura 15), essencialmente por simplificar métodos de ligação, união de certos materiais que de outro modo seriam impossíveis de o fazer ou até mesmo protecção das ligações quando sujeitas a corrosão. Este último factor é também uma grande vantagem que pesa na utilização das ligações adesivas pela indústria **naval**.

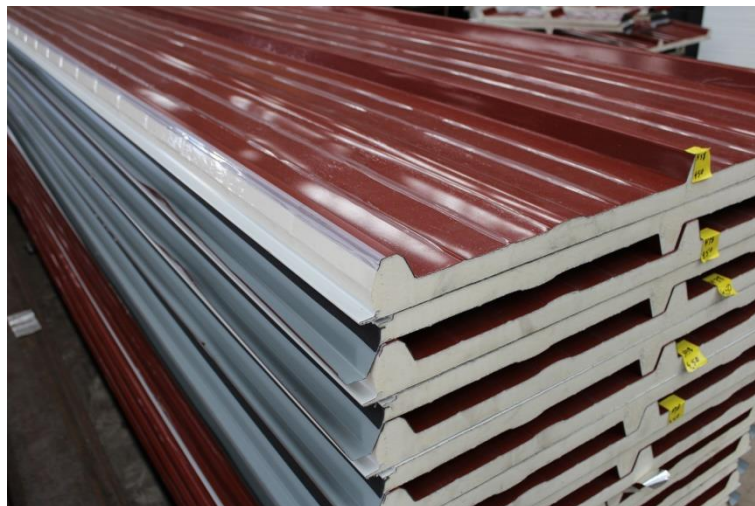


Figura 15 – Painéis Sandwich de Cobertura/Revestimento (Consultado a 1/09/2016)

Outros componentes como raquetes de ténis, bicicletas ou pranchas são utilizados no ramo **desportivo** devido à sua razão de resistência/peso.

2.1.6 Adesivos estruturais

Devido às diversas aplicações do mercado, houve a necessidade de dividir os tipos de adesivos existentes consoante o seu desempenho. Neste âmbito, os adesivos podem ser divididos em adesivos estruturais e não estruturais. Estes primeiros irão ser aprofundados pois são os que tem mais relevância na actualidade e por isso carecem de mais atenção.

Um adesivo estrutural é um adesivo que resiste a forças substanciais e que é responsável pela resistência e rigidez da estrutura e resistem a elevadas tensões de corte. Os adesivos estruturais destinam-se a atribuir uma maior resistência ou equivalente à dos materiais constituintes da estrutura. Habitualmente estes são aplicados em estruturas permanentes e garantem maior durabilidade quando correctamente aplicados. São geralmente termoendurecíveis e para adquirirem estes níveis de resistência são adicionados endurecedores e/ou curados a determinadas temperaturas. Pelo contrário, os adesivos não estruturais normalmente são aplicados como fixação (sem grandes esforços aplicados), estanquicidade ou revestimentos.

Tabela 1 – Classificação dos adesivos segundo o seu desempenho (De Moura et al. 2008)

ADESIVOS			
Estruturais		Não estruturais	
Fenólicos	fenólicos-vinílicos fenólicos-nitrilo fenólicos-policloropreno	Borrachas sintéticas	silicone policloropreno e nitrilo polisulfureto
Acrílicos	anaeróbicos cianoacrilatos	Poliésteres	
Poliuretano		Termofusíveis	
Poliimida		Inorgânicos	
Epóxido	epóxido-poliamida epóxido-polisulfureto epóxido-fenólicos epóxido-poliuretano epóxido-nitrilo		

Tal como demonstrado na Tabela 1, dentro do grupo dos adesivos estruturais pode-se considerar cinco famílias: epóxidos, fenólicos, poliuretanos, acrílicos e poliamidas.

Epóxidos

Distinguidos pela grande versatilidade que apresentam devido à boa adesão em muitos materiais, exceptuando os materiais de origem polimérica e elastómeros, mas facilmente podem ser modificados de modo a atingir as propriedades pretendidas. Apresentam excelente resistência à tracção e ao corte com oposição da resistência ao arrancamento. Na sua aplicação final, são igualmente resistentes a resíduos como óleos, solventes ou humidade.

Geralmente são compostos por uma resina epóxida e um endurecedor. Apresentam-se no mercado em estado líquido, pastas, filme ou sólidos.

Existem epóxidos que curam a temperaturas ambiente e outros a elevadas temperaturas. Os últimos referidos apresentam melhores propriedades essencialmente à resistência ao corte em altas temperaturas e por conseguinte melhores resistência ao meio ambiente. Contudo, perdem na tenacidade e a resistência ao arrancamento revela-se inferior.

Fenólicos

Resultantes da condensação de fenol e formaldeído, são essencialmente usados na indústria madeireira devido à sua boa resistência ao calor, boa resistência a fungos e à água até altas temperaturas e boa estabilidade dimensional. O seu custo é relativamente acessível. Apresentam-se sob forma de pó e posteriormente dissolvidos em água ou filme. A sua cura é feita sob pressão e temperatura (valores próximos de 140° durante vários minutos).

A sua aplicação estende-se ainda a colar metal a madeira. No entanto, revelam-se frágeis sob impacto e vibração. Como conseguinte, é possível melhorar as suas propriedades com a adição de elastómeros, o que resulta numa melhor tenacidade e resistência ao arrancamento.

Poliuretanos

As principais qualidades são a flexibilidade, alta resistência ao corte e arrancamento e ainda a formação de ligações com boa tenacidade. Geralmente, estes adesivos apresentam melhor resistência a baixas temperaturas mas penalizando na baixa resistência à tração. Podem apresentar-se sólidos ou dissolvidos em uma ou duas partes. Têm como vantagem a cura a temperatura ambiente embora degradem quando expostos a elevados índices de humidade. Devido à sua boa molhabilidade e flexibilidade, os poliuretanos aderem a materiais que por norma são difíceis de molhar.

Acrílicos

Na gama dos adesivos acrílicos pode-se dividir em três grupos: os adesivos anaeróbicos, cianoacrilatos e modificados. Os primeiros apresentam-se na sua maioria em estado líquido. Após polimerizados apresentam-se bastantes tenazes entre juntas metálicas e mostram boa resistência a solventes. São essencialmente fáceis de usar, com uma cura rápida à temperatura ambiente. Os adesivos anaeróbicos, pela sua elevada resistência mecânica e resistência ao corte em juntas planas, são essencialmente usados entre a rosca e parafuso, como travão para auferir maior resistência à ligação, e também como vedantes.

Nos cianoacrilatos, mais conhecidos como “supercola”, quando acondicionados nas condições aconselhadas são líquidos de cura rápida, excelente resistência ao corte e uma boa durabilidade. Semelhantes na cura aos adesivos anaeróbicos mas mais rígidos

e mais susceptíveis à humidade. A cura é despoletada por acção da humidade no ar e são capazes de curar à temperatura ambiente em segundos. Os cianoacrilatos de metilo são fortes e resistentes ao impacto, e aconselhados para o uso em metais, enquanto os cianoacrilatos de etilo são preferidos em superfícies plásticas ou borrachas. Pela baixa resistência à humidade e calor não é aconselhado a sua utilização em materiais sujeitos a temperaturas adversas.

Os acrílicos modificados caracterizam-se por permitirem uma elevada resistência mecânica ao corte para muitos metais e plásticos, boa resistência ao arrancamento e impacto. No geral, apresentam uma boa resistência ao meio ambiente e tem ainda a capacidade de fazer fortes ligações para superfícies mal preparadas.

Poliimididas

Têm como características a ductilidade, tenacidade reduzida e a fragilidade. Foram desenvolvidos pela indústria aeronáutica para irem ao encontro das suas necessidades, ou seja, de se comportarem a altas temperaturas. Assim sendo, as poliimididas têm uma temperatura vítrea elevada e portanto requerem igualmente altas temperaturas sobre longos tempos de cura de pressão. Devido a estas características a sua aplicação torna-se complexa.

2.2 Juntas híbridas

2.2.1 Juntas de sobreposição

De uma maneira muito sucinta, as juntas híbridas consistem numa mistura de materiais e diferentes métodos de ligação de modo a otimizar a ligação. As juntas híbridas consistem nesta ideia, de juntar as vantagens das diferentes técnicas ou características consoante a aplicação final. Outra possibilidade é conjugar mais de um adesivo ao longo da junta variando o adesivo e/ou propriedades dos aderentes. Na Figura 16 seguem alguns exemplos destas ligações vulgarmente denominadas de juntas híbridas. Este tipo de juntas é particularmente difícil de simular sendo preferível usar os elementos finitos para investigação de cada caso concreto a por em prática.

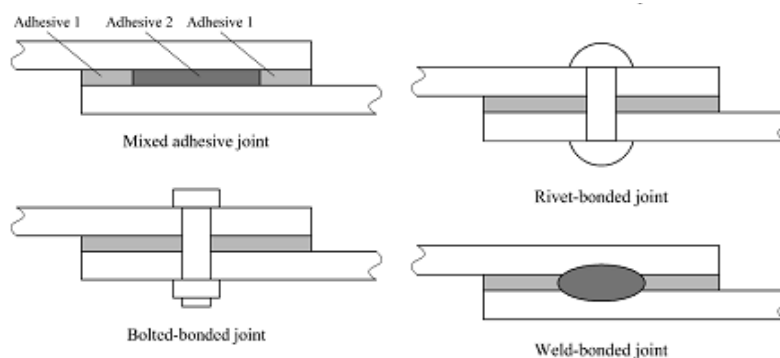


Figura 16 – Juntas Híbridas (da Silva 2008)

As juntas com mistura de adesivos têm como objectivo principal tirar proveito das melhores qualidades de cada um deles, melhorando a distribuição de tensões e aumentando o desempenho da estrutura. O adesivo mais frágil deve permanecer no meio da sobreposição enquanto o adesivo com o módulo mais baixo deve ser aplicado nas extremidades sujeito as concentrações de tensões. Bachir Bouiadjra et al. (2007) usaram a técnica da utilização de dois adesivos na reparação de uma estrutura de alumínio com remendo de compósito. O uso de um adesivo mais flexível no topo do remendo aumenta o rendimento da reparação. Esta técnica tem sido estendida para proporcionar uma solução válida para as ligações adesivas que necessitam de resistir a baixas e altas temperaturas (da Silva e Adams 2007a, da Silva e Adams 2007b). No caso das aplicações a altas temperaturas, os adesivos que resistem a altas temperaturas quando aplicados no meio da junta conservam as tensões e transferem as cargas, enquanto os adesivos de baixas temperaturas são usados como componente de transferência de cargas a baixas temperaturas, fazendo com que os adesivos de altas temperaturas sejam tencionados suavemente. Os autores estudaram diferentes configurações com métodos de EF e provaram experimentalmente que este conceito funciona, especialmente para substratos de materiais distintos.

O uso dos **materiais funcionalmente graduados** tem crescido em diversas aplicações incluindo as **juntas adesivas**. Gannesh e Choo (2002) estudaram o efeito da graduação espacial dos módulos elásticos dos substratos no pico e distribuição de tensões em juntas de sobreposição simples. O comprimento dos substratos foi dividido em dez regiões e as propriedades do material assumiram o factor de graduação. Após esta análise foram obtidas reduções dos picos de tensões na ordem dos 20% e verificada uma melhor uniformização das tensões.

Com a aplicação de **ligações adesivas com junta rebitada** é possível obter melhorias respectivamente às tensões. Liu e Sawa (2001) investigaram, usando modelos tridimensionais de EF, que para substratos de espessuras finas, juntas rebitadas, juntas adesivas e juntas ligadas por rebites oferecem resistências similares mas caso aumentassem a espessura dos substratos as juntas ligadas por rebites eram mais resistentes.

As **ligações adesivas com juntas aparafusadas** ajudam a reduzir as tensões nas extremidades da sobreposição, especialmente após do início da rotura, tal como estudado por Chan e Vedhagiri (2001).

As **ligações adesivas soldadas** consistem na combinação de pontos de soldadura com a ligação adesiva. O adesivo é normalmente aplicada por uma folha e a união é fechada. Posteriormente, o ponto de soldadura é feito através do adesivo. A força do eléctrodo desloca o adesivo para obter o contacto eléctrico entre as camadas e a soldadura é feita em condições normais. Como o calor da soldadura é muito localizado, apenas um pequeno dano ocorre no adesivo à volta da soldura. O adesivo é finalmente curado

para completar a fixação, como demonstra na Figura 17. Os adesivos são normalmente usados para a cura a quente devido à sua estabilidade e à sua viscosidade consistente.

As últimas três ligações enumeradas asseguram altas solicitações de fadiga das estruturas e também são extremamente económicas porque não necessitam de nenhuma instalação extra para o processo de polimerização.

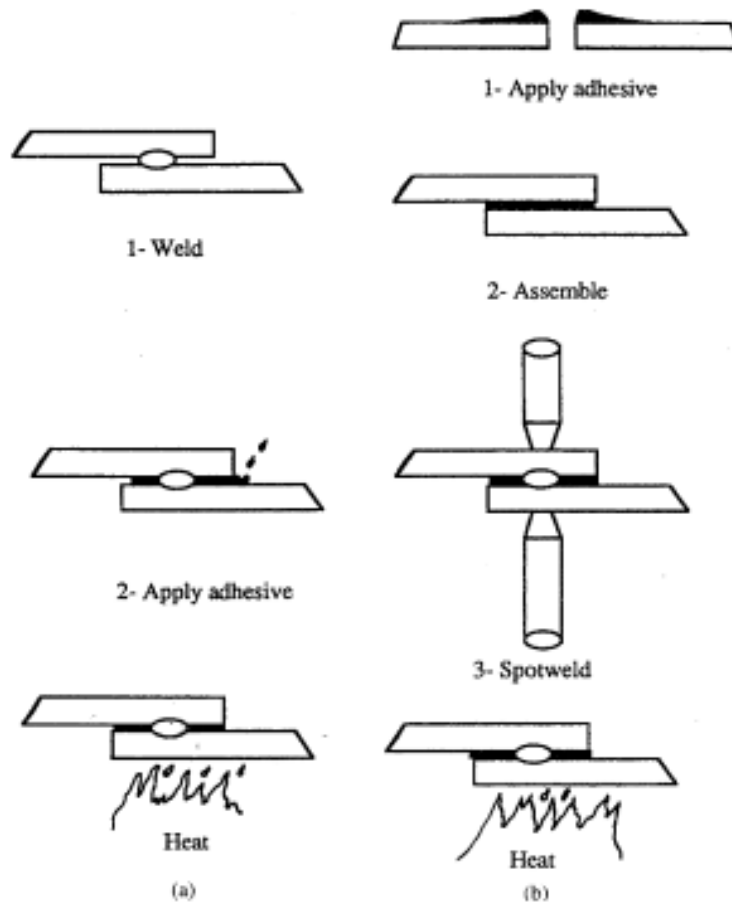


Figura 17 – Técnicas de ligação adesiva soldada (a) *The flow-in technique* (b) *Weld-through technique* (da Silva 2011)

2.2.2 Juntas de remendo embebido

As juntas de remendo embebido são geralmente associadas a geometrias complexas e o método de elementos finitos tem sido extensivamente usado para a otimização do remendo, especialmente para compósitos. Na bibliografia revista por Odi e Friend (2002) sobre técnicas de reparação e utilização do remendo ilustra claramente este ponto. Entre várias técnicas disponíveis, remendos embebidos com ligação com chanfro ou por degrau são particularmente atractivos devido à superfície ficar alinhada com a superfície reparada, o que permite um bom comportamento aerodinâmico se for o caso (Figura 18).

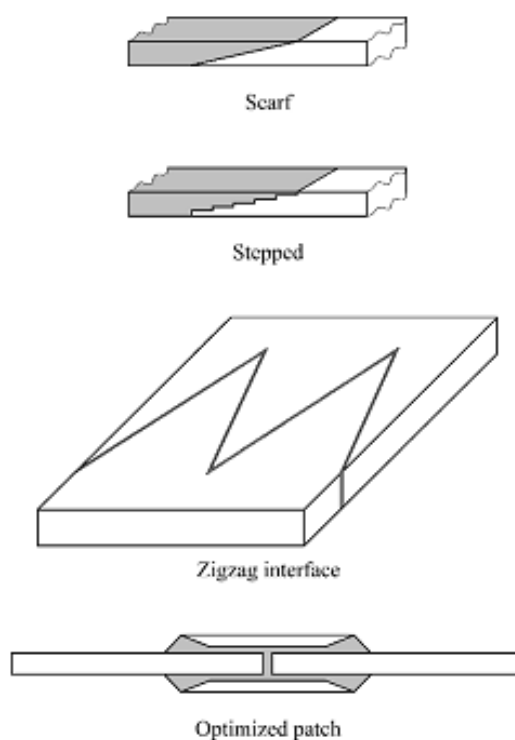


Figura 18 – Técnicas de reparação (Odi e Friend 2002)

Gunnion e Herszberg (2006) estudaram reparações adesivas por remendos embebidos e, por isso, realizaram uma análise de elementos finitos que tinham em conta certos parâmetros. Concluíram que as tensões no adesivo não são muito influenciadas pela sobreposição de uma camada de reforço, e pelo contrário, há uma enorme redução dos picos de tensões pela adição desta camada suplementar a cobrir a zona de reparação. Campilho et al. (2007) que estudaram igualmente os remendos embebidos para os compósitos aplicando o modelo de dano coesivo, concluíram que as tensões aumentam exponencialmente com a redução do ângulo de chanfro.

2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

No passado, a inexistência de modelos de materiais precisos e critérios de rotura não ajustados conduziam a um sobredimensionamento das juntas adesivas, ou que invariavelmente resultou em estruturas mais pesadas e dispendiosas. Com a disponibilidade de metodologias de projecto e previsão, novas possibilidades emergiram para um uso eficiente da ligação das juntas. Podem ser escolhidas para a análise de juntas adesivas duas alternativas: métodos analíticos e métodos numéricos que se traduz numa análise de elementos finitos. O estudo de juntas adesivas iniciou-se em meados de 1930 com o modelo analítico de Volkersen (1938) que considera todos os materiais elásticos e a deformação adesiva apenas ao corte. Contudo, a formulação analítica de juntas adesivas torna-se mais complexa se o adesivo se

deformar plasticamente, se forem usados substratos compósitos ou aplicados diferentes materiais nos substratos. A análise de elementos finitos é a técnica mais popular para juntas adesivas, e Adams e seus colaboradores são pioneiros nesta técnica (Adams e Peppiatt 1974). A rotação da junta, os substratos e plasticidade adesiva e a influência do filete do adesivo foram estudados em primeira mão por Harris e Adams (1984). A abordagem da mecânica dos meios contínuos para a previsão resistência de juntas foi usada numa primeira análise, requerendo a distribuição de tensões e modelos de rotura adequados. Uma análise de elementos finitos pode também ser usada juntamente com critérios da Mecânica da Fractura para previsão de resistência, pelo factor de intensidade de tensões ou por uma aproximação energética como a Técnica de Fecho da Fenda Virtual (TFFV). Contudo, com estas técnicas de modelação de propagação da fenda tornam-se complicadas porque o processo de malha ocorre durante a análise e são necessários investimentos ao nível computacional (Sosa e Karapurath 2012). Grande desenvolvimento destas técnicas se tem feito, e a modelação do dano pela combinação de EF com elementos coesivos foi uma delas. Esta técnica é uma combinação da modelação convencional de EF para regiões que não são esperadas que sofram dano, com a mecânica da fractura que a abordagem é feita pelos elementos coesivos e por sua vez simular o crescimento da fenda. Método de Elemento Finito Extendido (MEFE) é uma alternativa muito recente de modelos de previsão de fenda que usa funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

2.3.1 Modelos analíticos

Voltando ao ponto inicial da análise de estruturas, os métodos de previsão consistiam em formulações analíticas, e com os estudos teóricos realizados por parte de Volkersen (1938) e Goland e Reissner (1944) criaram os meios para que se atingisse com simplicidade os campos de tensões em estruturas ligadas com hipóteses simplificadas, em termos da geometria da estrutura, carregamento, e condições fronteira, oferecendo soluções elásticas eficientes de forma fechada. Deste modo, cada estrutura ligada pode ser analisada rapidamente, embora com muitas hipóteses incorporadas (Panigrahi e Pradhan 2007). Com estes modelos, deformações e tensões podem ser facilmente calculados, juntamente com a distribuição de momentos flectores na estrutura em que a resistência é tipicamente prevista pelos critérios base de deformação e tensão. Até aos dias de hoje, estes estudos foram progressivamente repostos por análises numéricas, embora estudos teóricos tenham sido refinados ao longo dos anos em termos da modelação de capacidades, tal como camadas de adesivo com materiais não-lineares (Hart Smith 1981) ou análise geométrica não-linear (Penado 1998).

2.3.2 Métodos numéricos

2.3.2.1 Mecânica dos meios contínuos

Na abordagem da mecânica dos meios contínuos, os valores de tensões máximos, deformação ou energia de deformação, previstas pela análise de EF, são normalmente usados nos critérios de falha para estimar as forças de montagem. Isto é cumprido quando os valores previstos, obtidos pelos critérios base de tensão ou deformação (ex.: Critério de Tensão Normal Máxima, ou Critério de Deformação de Corte Máxima), atingem a resistência dos constituintes da estrutura. Esta abordagem foi prontamente aplicada no geral a juntas adesivas em aplicações estruturais assim que o método de EF e programação computacional foram disponibilizados (Harris e Adams 1984). As vantagens desta técnica incluem a análise de ligação de estruturas com e sem dano inicial, e sob uma carga arbitrária. Todavia, estes critérios têm uma limitação intrínseca, já que as ligações da estrutura estão sujeitas a tensões singulares no final da sobreposição devido às extremidades com chanfro. Como resultado, na análise de EF para uma estrutura ligada, tensões numa região singular aumentam com o refinamento da malha e a convergência não é obtida, dando à malha previsões dependentes (Panigrahi e Pradhan 2007). Ao longo dos anos, as melhorias foram introduzidas para esta técnica de modelação, como a definição de critérios de rotura mais complexos de tensões e deslocamento para diferentes materiais e mecanismos de fractura, ou combinação com mais modelos de materiais contínuos realísticos, mas continua com a dependência da malha não resolvida.

2.3.2.2 Mecânica da fractura

A mecânica dos meios contínuos assume que a estrutura e os seus materiais são contínuos então, defeitos ou dois materiais distintos com reentrâncias nos cantos não são obviamente consistentes com o que é pressuposto. Deste modo, a mecânica dos meios contínuos não dá nenhuma solução a estes pontos singulares resultando em tensões e deslocamentos singulares. As fendas representam o defeito mais comum em estruturas, e foi com esta finalidade que a mecânica da fractura foi desenvolvida. Na mecânica da fractura, é bem aceite que as tensões calculadas pela mecânica dos meios contínuos são singulares (infinitos) na extremidade da fenda. Williams (1959) descobriu que as tensões singulares existem sempre que o ângulo de fenda é menor que 180° e este argumento é também aplicável à singularidade de tensões em dois materiais ligados com uma aresta viva. A mecânica da fractura tem sido aplicada com sucesso em muitos problemas de engenharia nos últimos anos. Muitos estudos lidam com ligações adesivas usando a taxa de libertação de energia de deformação, G , e respectivo valor crítico ou resistência à fractura, G_c , (Fernlund e Spelt 1991) em vez de factores de intensidade de tensões, pois estas não são facilmente determináveis quando a fenda cresce perto ou mesmo na interface. No entanto, a fractura das

ligações adesivas inerentemente ocorre em modo misto devido à variação de propriedades entre diferentes materiais e ao sistema complexo de tensões. O critério de falha para modos mistos de fractura pode ser desenvolvido de maneira semelhante ao critério de falha clássico, embora o conceito de superfície de fractura deva de ser introduzido.

2.3.2.3 Modelos de dano coesivo

A implementação computacional dos métodos da Mecânica da Fractura Linear Elástica (MFLE) teve um grande sucesso há algumas décadas atrás, mas estes foram limitados por um rendimento de baixa escala além da ponta da fenda. Em suma, adesivos temperados modernos desenvolvem zonas plásticas sob cargas que podem ser mais largas que a espessura dos substratos. A Modelação de Dano Coesivo foi desenvolvida nos finais dos anos 50/ início dos anos 60 (Barenblatt 1959) para descrever o dano sob cargas estáticas a zonas de processo coesivo à frente da zona aparente da ponta da fenda, oferecendo uma solução promissora para métodos mais refinados para a previsão do dano em estruturas ligadas. MDC foram largamente testados desde então para simular o início da fenda e sua propagação em problemas de falha coesiva e interfacial ou delaminação de compósitos. MDC podem contar com molas ou elementos coesivos mais convencionais (Feraren e Jensen 2004), e podem ser facilmente incorporados na análise convencional de EF para modelar o comportamento da fractura em diversos materiais, incluindo ligações adesivas (Ji et al. 2010). O principal conceito do MDC é uma ou múltiplas regiões/interfaces de fractura que podem ser introduzidas artificialmente em estruturas, em que o crescimento do dano é permitido pela introdução de descontinuidades em campos deslocados. Isto é possível pela definição das leis tração-separação para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis do MDC são forçadas entre os pares de nós dos elementos coesivos, e podem ligar a nós sobrepostos de elementos representando diferentes materiais ou diferentes camadas em compósitos, ou podem ser aplicados directamente entre dois materiais sem contacto para simular uma tira fina, como por exemplo para simular uma ligação adesiva. Com este modelo é possível obter uma reprodução macroscópica do dano pela relação do deslocamento relativo e tração entre nós emparelhados ao longo do caminho de fenda, que depende de parâmetros de larga escala e por sua vez, regulam o processo de crescimento de fenda tal como as energias de fractura. A evolução das tensões e amaciamento até à falha é modelado, para considerar a degradação gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração separação são tipicamente construídas pelas relações lineares a cada estágio de carga (Yang e Thouless 2001), embora uma ou mais fases possam ser distinguidos por uma representação precisa do comportamento dos materiais.

2.3.2.4 Mecânica do dano

As técnicas de modelação avançada que estão actualmente disponíveis asseguram previsões de falha precisas, superando as limitações das abordagens anteriores. No geral, o dano estrutural pode ocorrer por microfissuras ao longo de um volume finito ou região interfacial, reduzindo a transferência de carga. Uma simulação de EF baseada na modelação de sólidos contínuos obtém erradamente uma plasticização generalizada nos elementos sem evolução de dano, enquanto um modelo de dano coesivo pode na verdade induzir dano nos elementos pela redução das cargas transferidas. Como resultado, é permitida a simulação do dano passo-a-passo e a fractura no caminho pré-definido de fenda ou dentro uma região arbitrariamente finita (Duan et al. 2004). Embora estes métodos estejam disponíveis há muito tempo, não apenas para estruturas ligadas, só recentemente estes foram aplicadas em estruturas híbridas. Este continua a ser um campo inovador sob intenso desenvolvimento, relativo a técnicas de modelação mais precisas, métodos de estimação de parâmetros de materiais simples e fiáveis, aumento da robustez e assuntos de convergência de eliminação (Liljedahl et al. 2006). As técnicas de modelação de dano podem ser local ou à base de continuidade. Dentro da modelação de dano local, o dano ocorre na linha de volume zero ou numa superfície (análise 2D e 3D, respectivamente), simulando uma rotura artificial entre materiais (exemplo entre a ligação adesiva e substrato) a fractura interlaminar dos compósitos laminados ou a interface entre fases solidas dos materiais. Pela modelação contínua, o dano estende-se ao longo de uma área ou volume (analise 2D ou 3D, respectivamente), para simular uma falha maciça ou para modelar uma fractura coesiva do adesivo.

2.3.2.5 Técnicas Alternativas aos Modelos de Dano Coesivo

Neste capítulo pretende-se descrever técnicas alternativas dos modelos de dano coesivo (AMDC), isto é, outras para além dos MDC, que podem ser categorizadas dentro de uma moldura de trabalho contínua se modelados materiais de volumes finitos. Nestas metodologias, os parâmetros de dano são estabelecidos para modificar a resposta constitutiva dos matérias pela depreciação da dureza ou rigidez, como por exemplo para ligações adesivas finas (Khoramishad et al. 2010b), ou delaminação de compósitos ou rotura da matriz (Daudeville e Ladeveze 1992), para representar a severidade do dano material durante o carregamento. Esta variável de estado pode ser usada na lei de evolução de dano para modelar ambos os casos: na captação da pré fenda ou o crescimento da fenda. A variação do dano pode ser categorizada sob dois grupos principais: primeiro, em que as variáveis podem prever a quantidade de dano pela redefinição das propriedades constituintes dos materiais mas não directamente relacionados com o mecanismo de dano; e o segundo, pelas variáveis ligadas às definições físicas de um dano específico, como as porosidades ou área relativa das micro-cavidades (Voyiadjis e Kattan 2005). Pelas técnicas AMDC, o crescimento do

dano é definido como função de carregamento para modelação estática ou como contagem cíclica para análise da rotura. Comparado com a rotura de MDC, as AMDC não fornecem uma distinção clara entre o início da rotura e fases de propagação, apesar destas poderem oferecer as bases para a análises preditivas (Khoramishad et al. 2010a). Contudo, a evolução do dano anterior ao crescimento da macro fenda pode ser simulada. Por outro lado, a modelação de dano com rotura dos MDC é restrito aos caminhos de fenda predefinidos e, em aplicações específicas, as AMDC podem ser recomendadas caso o dano for mais difundido ou o caminho da fenda não for conhecido (Shenoy et al. 2010).

2.3.2.6 Método de Elementos Finitos Estendido

O Método dos Elementos Finitos Estendido é uma recente melhoria do método de EF para modelação do crescimento do dano. Usa leis do dano para a previsão da fractura que são baseados na resistência maciça dos materiais para o início do dano e tensões de avaliação de falha (definido pelo G_{Ic}), em detrimento dos valores de t_{n0}/t_{s0} ou δ_{n0}/δ_{s0} usados para MDC. MEFE ganha vantagem sobre modelação MDC pois não é necessária fenda para seguir um caminho pré definido, na verdade, as fendas conseguem crescer livremente dentro de uma região maciça de um material sem que a malha coincida com a geometria das descontinuidades ou a necessidade de voltar a criar a malha perto da fenda (Mohammadi 2008). Este método é uma extensão da modelação de EF, de quem as características fundamentais foram primeiramente apresentadas no fim dos anos 90 por Belytschko e Black (1999). O MEFE conta com o conceito de partição de uniões e pode ser implementado nos tradicionais EF. Com a introdução das funções do enriquecimento local para os deslocamentos nodais perto da fenda, permitiu o seu crescimento e separação entre as faces da fenda (Moes N. 1999). Devido ao crescimento da fenda, a ponta da fenda muda continuamente a sua posição e orientação dependendo nas condições de carga e geometria da estrutura, simultaneamente para a criação das funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos circundantes ao caminho/ponta da fenda.

DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

- 3.1.1 Geometria dos provetes
- 3.1.2 Materiais utilizados
- 3.1.3 Processo de fabrico
- 3.1.4 Resultados obtidos

3.2 Trabalho numérico

- 3.2.1 Condições da análise numérica
- 3.2.2 Modelo de dano coesivo
- 3.2.3 Análise de tensões na junta
- 3.2.4 Previsão da resistência

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo serão detalhadas todas as etapas relevantes para o processo de fabrico dos provetes. É essencial para uma boa adesão de uma junta ter em conta os seguintes factores: selecção do adesivo, projecto de junta, preparação da superfície, fabrico da junta e controlo de processo.

Para a primeira etapa é necessário predefinir as características que pretendemos para o tipo de junta obtido, por norma a resistência mecânica, a temperatura de serviço, o meio que a circunscreve e o método de aplicação são factores decisivos e eliminatórios para a selecção do adesivo. Posteriormente, na fase de projecto de junta é igualmente importante que o dimensionamento da junta tenha tido em conta o estudo da resistência mecânica estática, fadiga e fluência ao longo do tempo de vida do produto final. Igualmente importante, é a preparação das superfícies de união pois será um factor decisivo que irá garantir que a adesão dos materiais é a pretendida e aproximada dos valores de referência indicados pelo fabricante. Apenas deste modo conseguimos garantir que as propriedades mecânicas previamente dimensionadas são garantidas. Durante o processo de fabrico da junta, a fixação tem um peso importante tanto no posicionamento como na pressão indicada para a sua correcta adesão. Caso as etapas acima tenham sido respeitadas e a temperatura de cura do adesivo seja assegurada é possível afirmar que teremos uma boa estrutura de lição entre ambos os materiais. Por último, de maneira a assegurar que o controlo produtivo é feito com a qualidade pretendida é importante monitorizar todos os parâmetros internos e externos que se mostrem relevantes. É possível fazê-lo com a ajuda de ensaios destrutivos e não destrutivos.

3.1 Trabalho experimental

Nos próximos tópicos serão descritos os materiais utilizados bem como as suas propriedades mecânicas. Todo o processo de fabrico será igualmente detalhado desde a sua selecção até ao provete final. Para que o provete corresponda com os ensaios numéricos posteriormente feitos, tiveram que ser tomados em conta o rigor dimensional, a geometria do chanfro e os cuidados que o processo de fabrico exige, isto é, velocidades de corte e avanço da ferramenta durante a maquinação, a limpeza dos provetes, a colocação do próprio adesivo, o posicionamento dos aderentes durante a cura, entre outros aspectos. Todos estes detalhes são importantes e decisivos para se obter uma maior aproximação dos modelos que serão simulados posteriormente com a ajuda do *software* ABAQUS®.

Neste capítulo serão também descritas as condições do ensaio de tração a que os provetes foram sujeitos e apresentados os resultados. Estes serão figurados num gráfico $P-\delta$ de forma a demonstrar as forças máximas obtidas para cada configuração.

3.1.1 Geometria dos provetes

A geometria estabelecida para os provetes no âmbito da aplicação da tese encontra-se descrita na Figura 19. Dimensionalmente todos os provetes seguiram a mesma designação diferenciando-se apenas nos ângulos de chanfro aplicados. As dimensões características dos provetes referem-se, ao comprimento do substrato de alumínio l_A , comprimento do substrato de compósito l_C , o comprimento útil do provete l_0 ; espessura t_p de cada provete, com largura w ; espessura t_A do adesivo e os ângulos α respectivos aos chanfros. Os valores considerados para as dimensões características apresentam-se na Tabela 2.

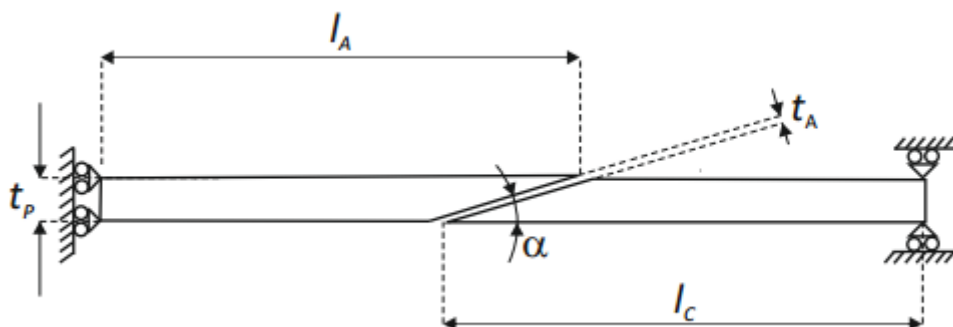


Figura 19 – Geometria dos provetes

Tabela 2 – Dimensões características das juntas

Comprimento do substrato de compósito [mm], l_C [mm]	100
Comprimento do substrato de alumínio [mm], l_A [mm]	100
Comprimento útil do provete, l_0 [mm]	200
Largura [mm], w	25
Espessura do provete [mm], t_p	3
Espessura do adesivo [mm], t_A	0,2
Ângulo de chanfro, α [°]	45, 30, 20, 15, 10

3.1.2 Materiais utilizados

Para o ensaio de tração a ser realizado, os provetes foram fabricados com substratos de alumínio AW 6082-T651 e compósito de carbono-epóxico, utilizando dois adesivos (Araldite® AV138 e Araldite® 2015).

3.1.2.1 Compósito de carbono-epóxico

Para substratos será utilizado um compósito de matriz polimérica de resina epóxida reforçada com fibra de carbono (*Carbon-Fiber Reinforced Plastic* ou CFRP), pré-impregnado e unidireccional (SEAL® Texipreg HS 160 RM). Os plásticos reforçados a fibras de carbono são os materiais de excelência em aplicações de alto desempenho como no desporto de competição ou na indústria aeronáutica, onde o factor mais decisivo é a resistência, rigidez específica e estruturas leves.

Tabela 3 – Propriedades elásticas ortotrópicas do CFRP, com fibras alinhadas unidireccionalmente segundo a direcção x (Campilho 2005)

Propriedades do CFRP		
$E_x = 1,09 \text{ E}+05 \text{ MPa}$	$\nu_{xy} = 0,342$	$G_{xy} = 4315 \text{ Mpa}$
$E_y = 8819 \text{ MPa}$	$\nu_{xz} = 0,342$	$G_{xz} = 4315 \text{ Mpa}$
$E_z = 8819 \text{ MPa}$	$\nu_{yz} = 0,380$	$G_{yz} = 3200 \text{ Mpa}$

3.1.2.2 Alumínio

Os provetes foram produzidos utilizando uma liga de alumínio AW 6082-T651, conhecida como liga estrutural da série 6000, com 82% de alumínio, e magnésio e silício como principais elementos de liga (Tabela 4). A escolha desta liga de alumínio deve-se à vasta utilização na produção de componentes estruturais, sejam eles perfis extrudidos, ou em peças obtidas por maquinação.

Tabela 4 – Composição química da liga de alumínio AW6082-T651

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

A sua ampla utilização deve-se a propriedades como a elevada resistência à tração (mínimo de 300 MPa, especificado pelo fabricante), obtida através do envelhecimento artificial a uma temperatura de aproximadamente 180°C (Tabela 5).

Tabela 5 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651; dados do fabricante

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

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

Campilho et al. (2011a) caracterizaram esta liga de alumínio à tração, de acordo com a norma (ASTM E8M 2004), onde registaram as propriedades apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651 obtidas experimentalmente (Campilho et al. 2011a)

Propriedades	Liga de Alumínio AW6082 T651
Módulo de Young, E [GPa]	70,07 ± 0,83
Tensão de cedência, σ_{ced} [MPa]	261,67 ± 7,65
Tensão de rotura, σ_f [MPa]	324,00 ± 0,16
Deformação da rotura à tração, ϵ_f	21,70 ± 4,24%

A Figura 20 mostra as curvas de tensão-deformação (σ - ϵ) desta liga, obtidas a partir dos ensaios de tração de provetes maciços.

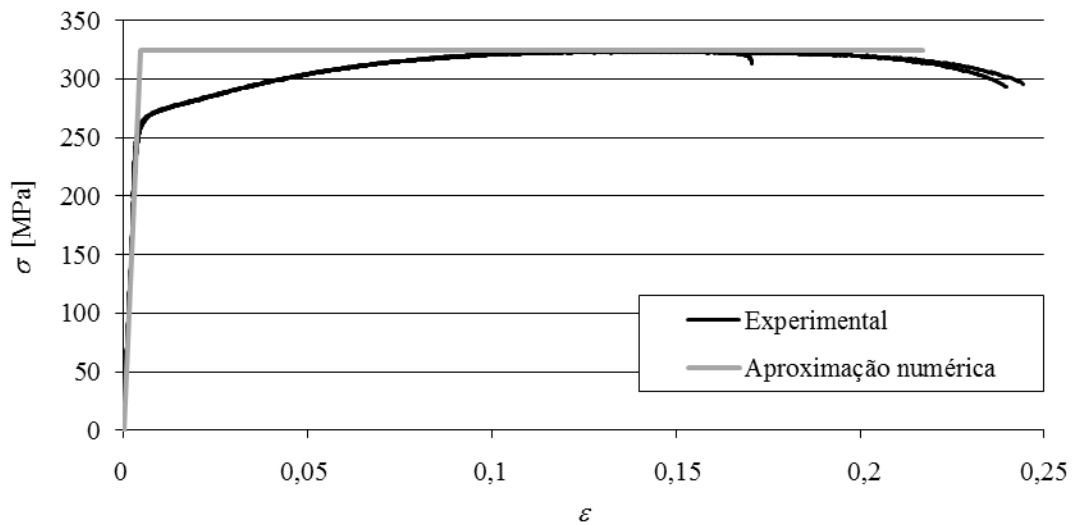


Figura 20 – Curvas σ - ϵ da liga de alumínio AW 6082-T651 (Campilho et al. 2013)

3.1.2.3 Adesivos

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

3.1.2.3.1 Araldite® AV138

O adesivo estrutural Araldite® AV138, fabricado pela empresa suíça *Huntsman Advanced Materials*, caracteriza-se pelo seu comportamento frágil mas de elevada resistência (Figura 21 e Tabela 7), e é adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros (Campilho et al. 2013).

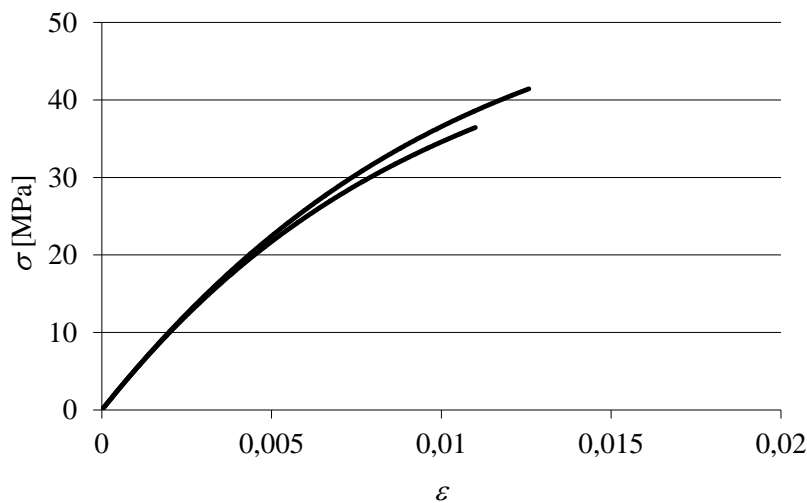


Figura 21 – Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 (Campilho et al. 2013)

É um adesivo de base epóxico, termoendurecível, composto por dois componentes, resina AV138 e endurecedor HV998 (Figura 22). Este adesivo é fornecido em duas embalagens e, como tal, é necessário proceder à pesagem dos dois componentes, utilizando uma balança digital. A relação de mistura utilizada neste adesivo é de 100 g de resina para 40 g de endurecedor, com uma precisão de $\pm 5\%$. Este adesivo apresenta-se na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa emissão de gases e perdas voláteis (Azevedo 2014a).



Figura 22 – Adesivo Araldite® AV138 (Azevedo 2014a)

Tabela 7 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 (Neto et al. 2012, Campilho et al. 2013)

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	$4,89 \pm 0,81$
Coefficiente de Poisson, ν^b	0,35
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	$36,49 \pm 2,47$
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	$39,45 \pm 3,18$
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	$1,21 \pm 0,10$
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	$1,56 \pm 0,01$
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	$25,1 \pm 0,33$
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	$30,2 \pm 0,40$
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	$7,8 \pm 0,7$
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	0,20 ^a
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	0,38 ^a

^a Valores estimados na referência (Neto 2011)

3.1.2.3.2 Araldite® 2015

O adesivo estrutural Araldite® 2015, igualmente fabricado pela empresa suíça *Huntsman Advanced Materials*, caracteriza-se pela baixa contracção, pelo seu comportamento moderadamente dúctil e uma alta resistência ao corte e à clivagem. É um adesivo de base epóxido, termoendurecível, composto por dois componentes e fornecido em cartucho (Figura 23). Apresenta-se como uma pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente.



Figura 23 – Formato comercial do adesivo Araldite® 2015 de 50 ml (Azevedo 2014a)

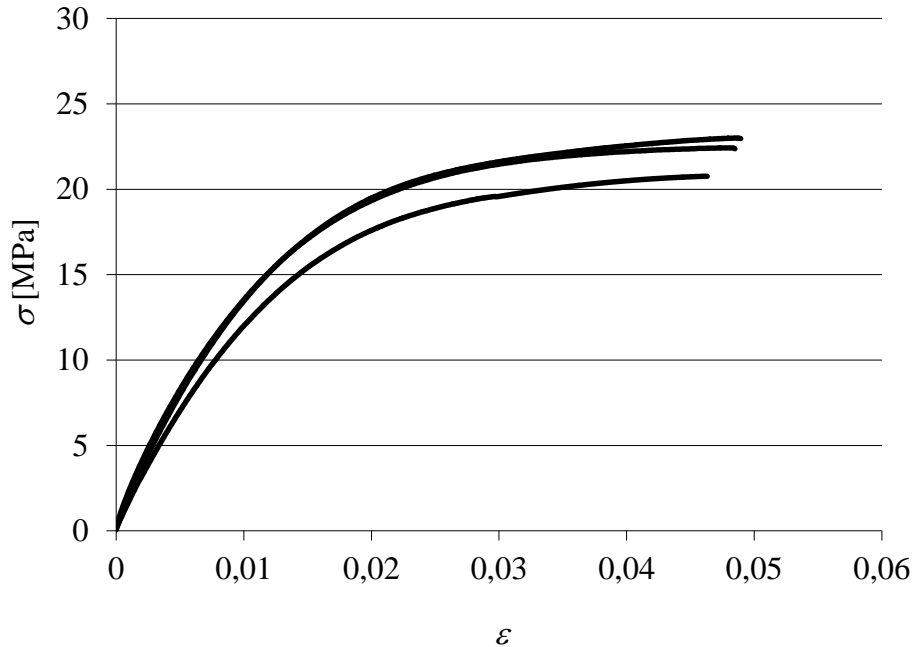


Figura 24 – Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 (Campilho et al. 2013)

A resistência e durabilidade das ligações efectuadas por este adesivo são dependentes de um tratamento adequado das superfícies a ligar. No mínimo, as superfícies a ligar devem ser limpas com um bom agente desengordurante tal como acetona ou isopropanol (para plásticos), a fim de remover todos os vestígios de contaminações e sujidade. As curvas σ - ϵ de provetes maciços ensaiados à tração são apresentadas na Figura 24 (Campilho et al. 2013).

O adesivo Araldite® 2015, quando comparado com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração de tensão, tipicamente nas extremidades da zona de ligação, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes. A Tabela 8 indica as propriedades mecânicas e de fractura mais relevantes deste adesivo (Campilho et al. 2013). Este adesivo é composto por resina e endurecedor, e aplica-se com uma pistola manual, o que permite de forma simples e fácil aplicar o adesivo com recurso a um bico que mistura os dois componentes em quantidades iguais.

Tabela 8 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 (Campilho et al. 2013)

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	1,85 ± 0,21
Coefficiente de Poisson, ν^a	0,33
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 ao 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 Valores do fabricante

3.1.3 Processo de fabrico

Delineadas as geometrias prosseguiu-se o fabrico dos provetes. Tendo em conta a sua a sua geometria foi arbitrado um comprimento inicial para cada substrato de 140 mm. Os substratos de carbono foram fabricados nas seguintes condições:

- Fabrico de placas de compósito, utilizando o pré-impregnado unidireccional da SEAL® Texipreg HS160 RM com uma sequência de empilhamento de 0°, com direcção x ;
- 20 camadas empilhadas para garantir a espessura de final 3mm;
- Placas submetidas numa prensa a 30 bar de pressão, cumprindo um ciclo de 1 hora a 148°C, mais 1 hora a 140°C, deixando arrefecer à temperatura ambiente(Figura 25);

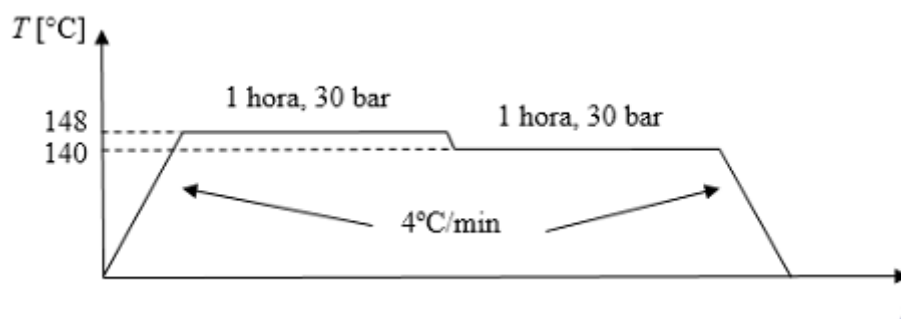


Figura 25 – Ciclo térmico para a cura das placas de carbono-epóxico

- Corte das placas nos 25 substratos desejados com um disco de corte.

Os substratos de alumínio foram cortados a partir de chapa laminada. Uma vez estipulada a geometria dos substratos e com a ajuda da guilhotina “Adira” modelo GM/0410 (Figura 26), começou-se por cortar com uma serra de disco diversas barras de alumínio com a largura pretendida.



Figura 26 – guilhotina “Adira” GM/0410

Posteriormente de cada barra de alumínio cortaram-se 25 substratos com cerca de 150 mm de comprimento, com a ajuda do serrote mecânico também disponível das oficinas do ISEP.

Após cortados os 25 substratos de alumínio e preparados os 25 de compósito, seguiu-se a remoção das rebarbas mais grosseiras com a ajuda de uma lixa de grão fino. O próximo passo consistiu na fresagem dos substratos com o ângulo desejado, isto é, 5 aderentes de cada material para cada ângulo em estudo. Para este processo foi utilizada uma fresadora “Gambin” modelo 1m (Figura 27) com uma velocidade de rotação de 1120 rpm e avanço de 10 mm/min. Os ângulos foram garantidos com o prato de fixação giratório que permitia ajustar a fixação de cada substrato no ângulo de maquinação.

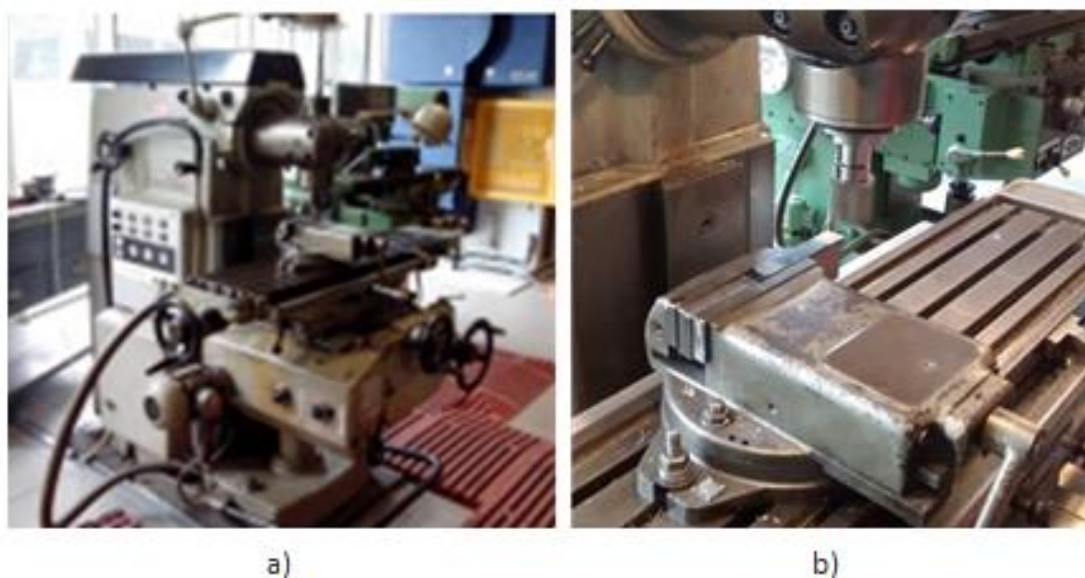


Figura 27 – a) Fresadora “Gambin” modelo 1m; b) Prato de fixação giratório

Para a maquinação dos substratos de alumínio tiveram de ser tomados em conta outros factores como o tipo de fresa e o desbaste que esta faria a cada passagem. Para assegurar que os materiais não eram danificados durante este passo do processo as passagens tiveram de ser mais reduzidas de modo a que o excesso de temperatura não fragilizasse o material. Tendo estes factores em conta, a fresa Dormer S142 Alu. S.D.S Carbide 12.00K10 Micrograin foi utilizada para os substratos de alumínio com um passo de 0,4 mm a cada passagem. Já no caso dos substratos de carbono-epóxico foi utilizada uma mó de pedra, mais apropriada para este tipo de materiais. Para reduzir o efeito de abrasão o passo máximo por passagem foi de 0,2 mm. Finalizada a maquinação foi aplicada novamente uma lixa de grão fino para pequenas rebarbas que tinham surgido dos processos anteriores.

Prosseguiu-se a limpeza dos provetes com álcool isopropanol, processo passivo químico, pois trata-se de um produto recomendado para a remoção de gorduras, óleos, poeiras, humidades ou óxidos que possam estar presentes na superfície. Para a

sua limpeza o mais indicado é que seja utilizada uma folha de papel por cada passagem para que não contamine novamente a superfície. Após efectuada a limpeza dos 50 substratos, estes foram fixados a uma tábua com a ajuda de grampos aproximadamente a $2/3$ do comprimento de cada provete para a posterior aplicação do adesivo. Primeiramente, para assegurar que a espessura do adesivo era garantida após compressão, foram aplicados dois fios de Nylon calibreados com diâmetro de 0,2 mm, tal como demonstra na Figura 28.

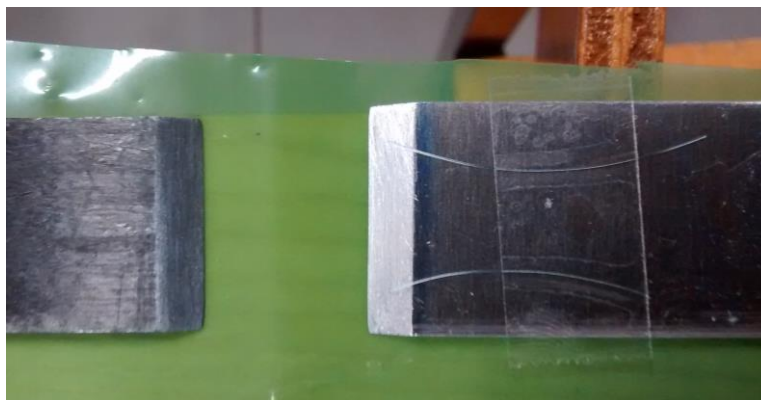


Figura 28 – Fixação e posicionamento dos fios de Nylon

Uma vez que o adesivo Araldite® AV138 é misturado manualmente com o endurecedor HV 998 é necessário ter em atenção que a aplicação deve ser feita de imediato para que a molhagem na superfície seja a melhor. Já no caso da aplicação do adesivo Araldite® 2015 recorreu-se ao uso de uma pistola com bico de mistura do adesivo, composto pelos dois componentes. Este utensílio permite que a mistura seja feita de igual modo de ambos os componentes.

Após aplicação do adesivo os grampos são posicionados novamente de maneira a que ambos os substratos fiquem sob compressão. A cura foi feita a temperatura ambiente durante uma semana. Concluído o processo de cura, foram excluídos os excessos de adesivo não desejado (Figura 29), a fim de evitar maior resistência na junta do que mais tarde previsto nos modelos numéricos.

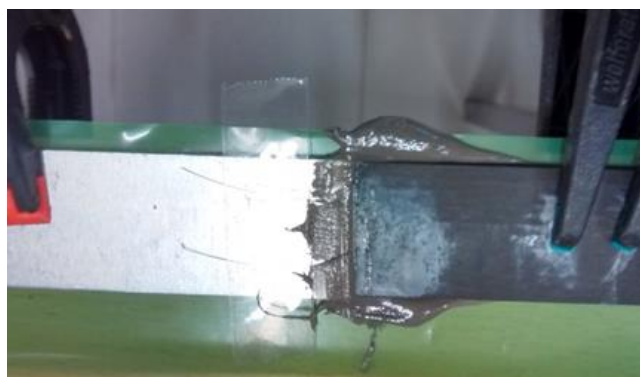


Figura 29 – Remoção do excesso de adesivo no plano superior do provete. Excesso de adesivo visível nas laterais da junta.

Finalizados os provetes, estes foram submetidos a um esforço de tração até à sua rotura, de forma a obter as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) e os seus modos de rotura. A máquina utilizada foi a disponível no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica (Figura 30) e perante as seguintes condições:

- Temperatura: 18°C (temperatura ambiente);
- Humidade relativa: 40%;
- Velocidade: 0,5 mm/min;
- Distância entre maxilas: 200 mm.

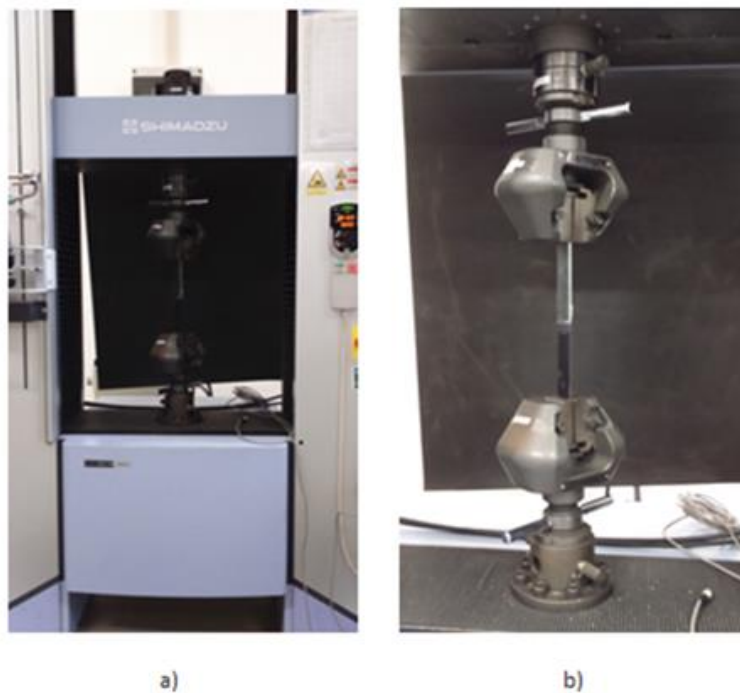


Figura 30 – a) Máquina de ensaio de tração SHIMADZU®; b) Posicionamento das amarras para a fixação do provete

O diagrama de fluxo representado na Figura 31, segue como síntese de todos o processo previamente descrito.

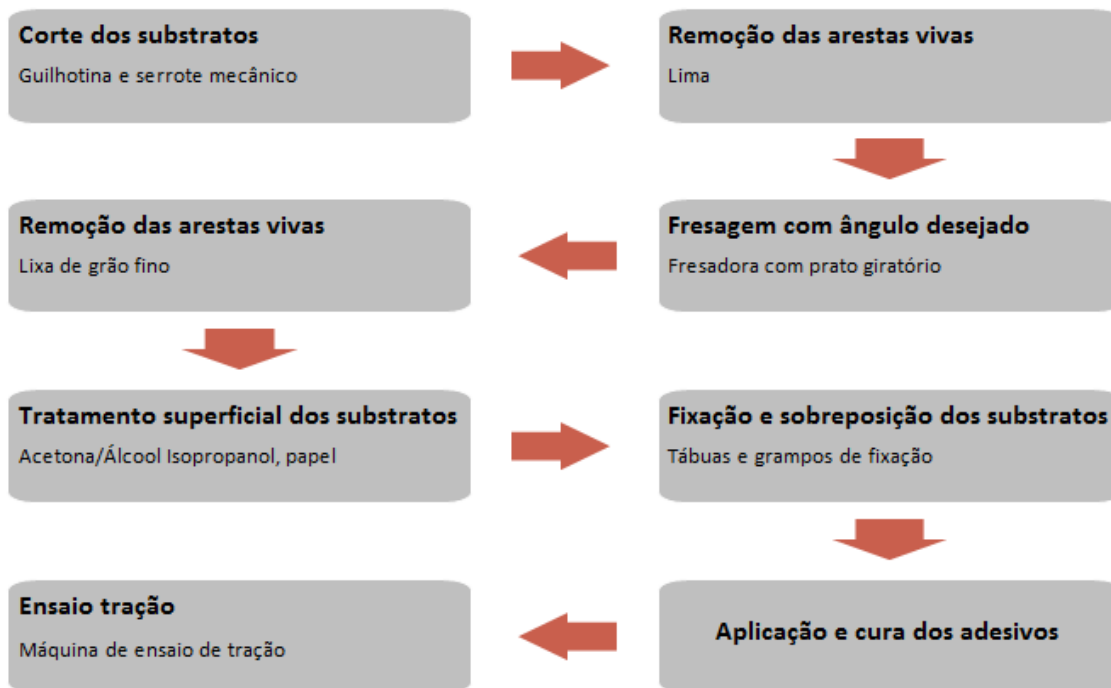


Figura 31 – Fluxograma do processo de fabrico

3.1.4 Resultados obtidos

3.1.4.1 Curvas $P-\delta$

Neste sub-capítulo apresentam-se as curvas $P-\delta$ obtidas nos ensaios de tração realizados e também uma análise do seu comportamento até à rotura. Como é possível verificar, apresentam um comportamento linear embora com algumas oscilações devido ao escorregamento das amarras da máquina de ensaio. Fisicamente os provetes não sofreram qualquer dano, e por isso não põe em causa a validade dos resultados. Para o estudo e análise de resultados serão discutidos apenas os valores máximos obtidos para cada provete.

As Figura 32 e Figura 33 fazem referência aos provetes com chanfros de 10° e 45° , respectivamente, para o adesivo Araldite® AV138. Para os 5 provetes referentes ao ângulo de 10° , com $P_{\text{máx}}$ aproximadamente de 9000 N. Por sua vez, para os provetes colados com 45° é possível verificar um valor de $P_{\text{máx}}$ médio dos 5 provetes ligeiramente abaixo dos 3000 N. É notório que, para o mesmo adesivo, variando apenas o ângulo da ligação, a influência do ângulo na resistência da junta é bastante significativa, em que $\alpha=10^\circ$ (Figura 32) apresenta uma resistência 3 vezes superior a $\alpha=45^\circ$ (Figura 33).

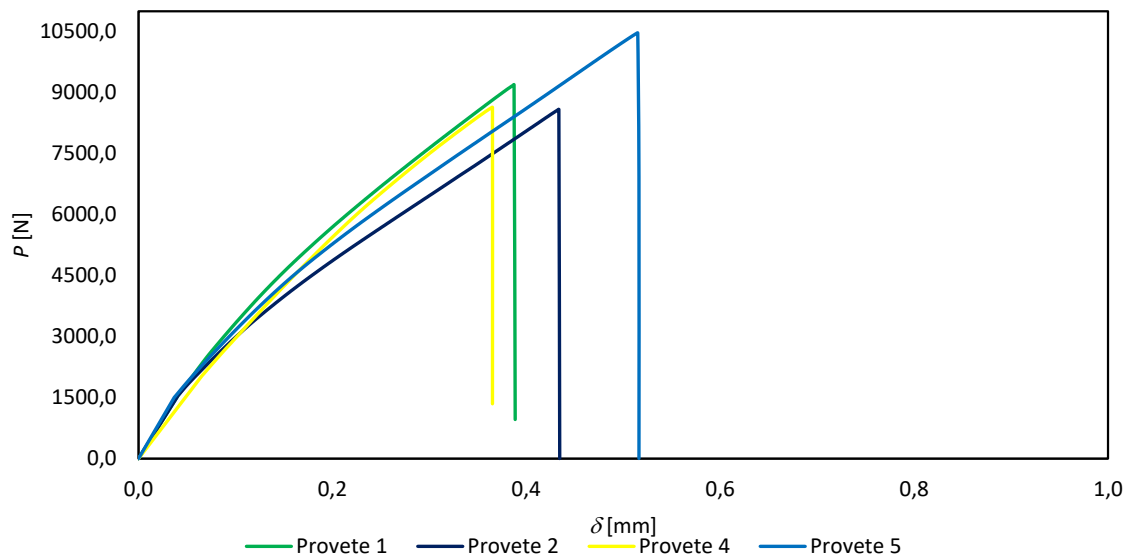


Figura 32 - Curva P - δ respectiva aos provetes de 10° de chanfro interno com aplicação do adesivo Araldite® AV138

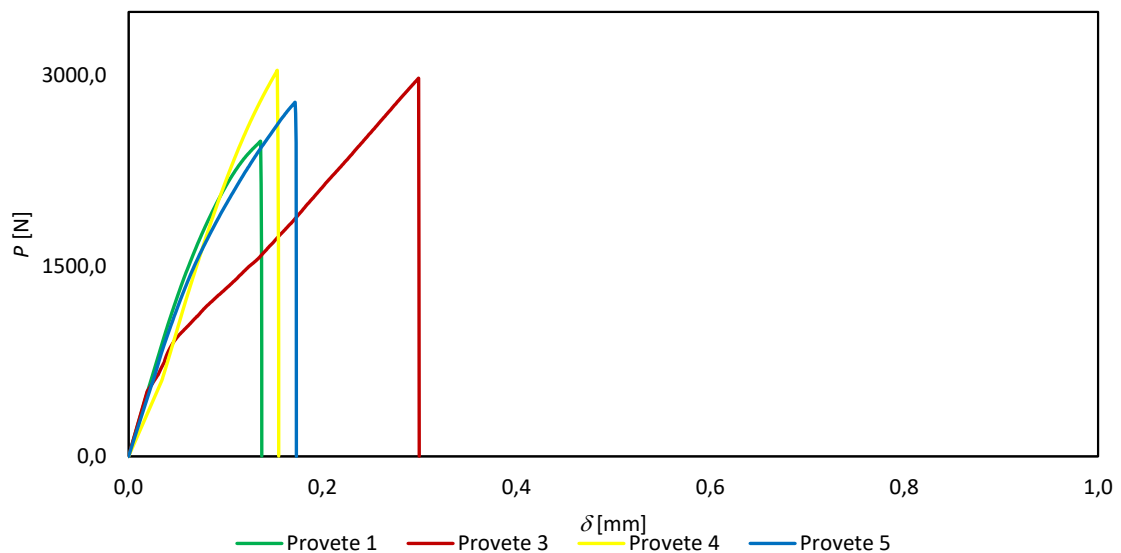


Figura 33 - Curva P - δ respectiva aos provetes de 45° de chanfro interno com aplicação do adesivo Araldite® AV138

Na Figura 34 e Figura 35, apresenta-se outro caso de análise. Desta vez, pretende-se fazer uma análise comparativa entre adesivos diferentes mantendo o mesmo ângulo de chanfro de 10° . Como seria expectável, o adesivo Araldite® 2015, mais dúctil, apresenta um valor de $P_{\text{máx}}$ inferior relativamente ao adesivo mais frágil - Araldite® AV138. O adesivo AV138 demonstra também maior resistência à tração (cerca de 40% superior ao Araldite® 2015) mas, no entanto, devido à fragilidade apresenta uma queda abrupta da carga.

Por sua vez, o adesivo Araldite® 2015, por ser mais tenaz, apresenta maior plastificação no momento da rotura e isso reflecte-se no pico descendente curvilíneo da rotura.

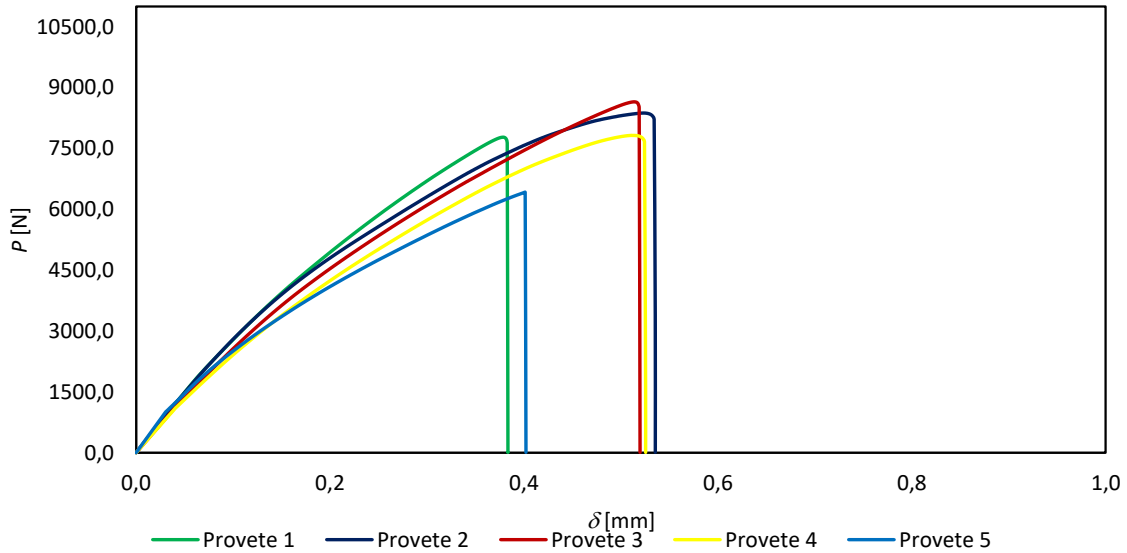


Figura 34 - Curva P - δ respectiva aos provetes de 10° de chanfro interno com aplicação do adesivo Araldite® 2015

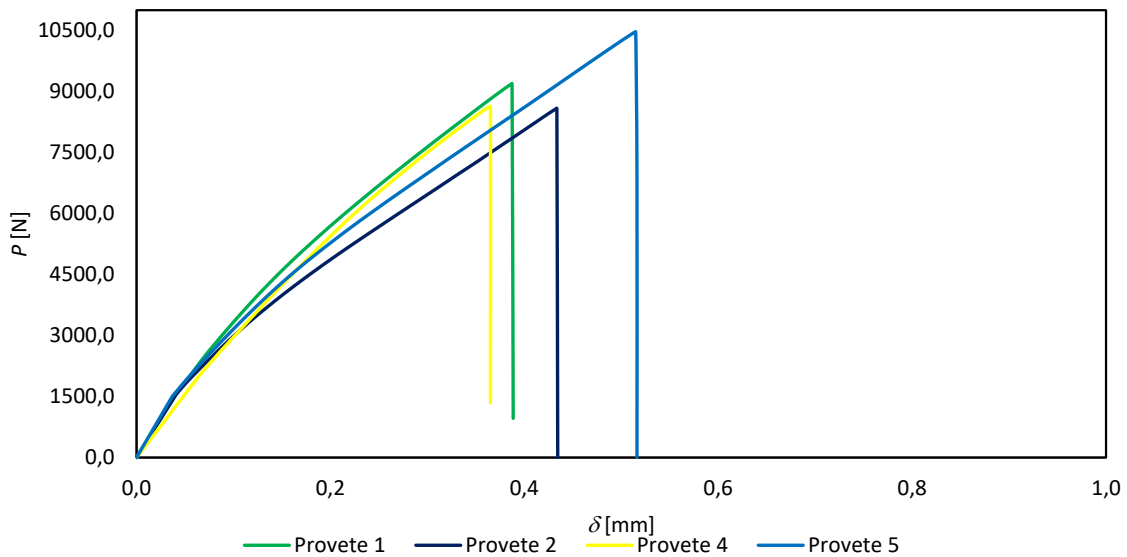


Figura 35 - Curva P - δ respectiva aos provetes de 10° de chanfro interno com aplicação do adesivo Araldite® AV138

3.1.4.2 Modos de rotura

Nas figuras seguintes apresentam-se os modos de rotura dos provetes após o ensaio de tração.

Os provetes em que foram aplicados o adesivo Araldite® AV138 demonstraram maior instabilidade quanto ao tipo de rotura apresentado. Em grande parte dos casos, os provetes sofreram uma rotura coesiva, pois ambas as faces do substrato apresentam adesivo. Numa grande minoria, surgiram casos em que a rotura ocorreu pela superfície interfacial - rotura adesiva. Este adesivo é definido como um adesivo frágil e por isso, mais sensível a defeitos de fabrico. Outros factores poderão também estar na origem de roturas adesivas como: tratamento superficial menos cuidado, menor molhabilidade deste adesivo, condições de mistura manual (do adesivo com o respectivo endurecedor) e aplicação e fixação dos substratos.

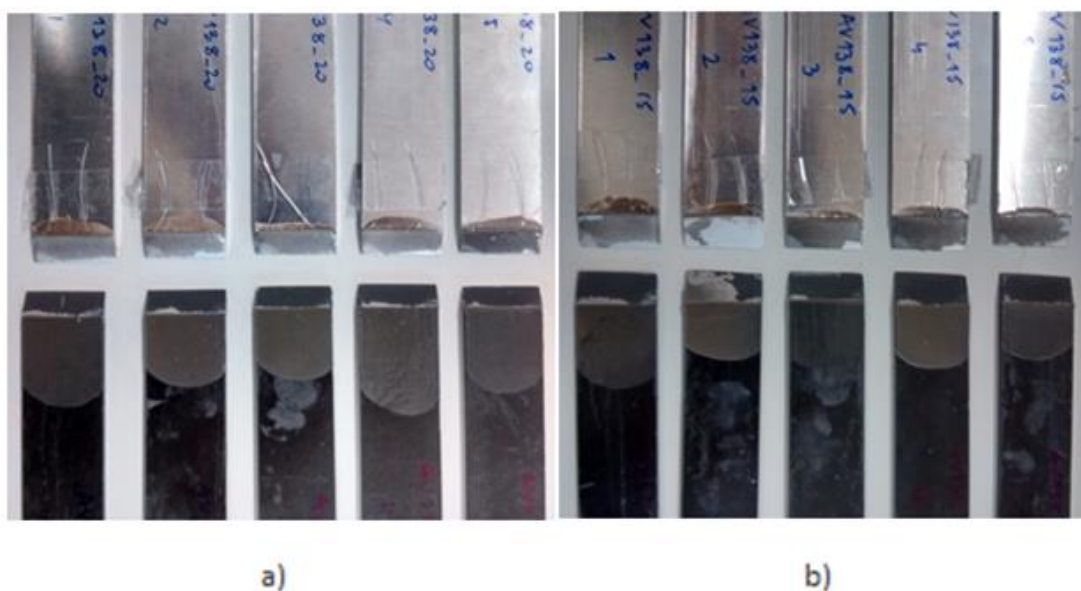


Figura 36 – Superfícies de rotura das juntas após ensaio de tração, coladas previamente com Araldite® AV138.
a) Ângulos de chanfro de 15° e b) 20°

Ao contrário do que foi demonstrado no primeiro caso, para todos provetes do adesivo Araldite® 2015, foi verificada uma rotura coesiva, como demonstrado na Figura 37. Há alguns factores que poderão ter contribuído para o sucesso destas ligações como: a facilidade de aplicação devido ao bico de mistura, mistura das porções correctas promovida pelo bi-tubo e a própria molhabilidade do adesivo.

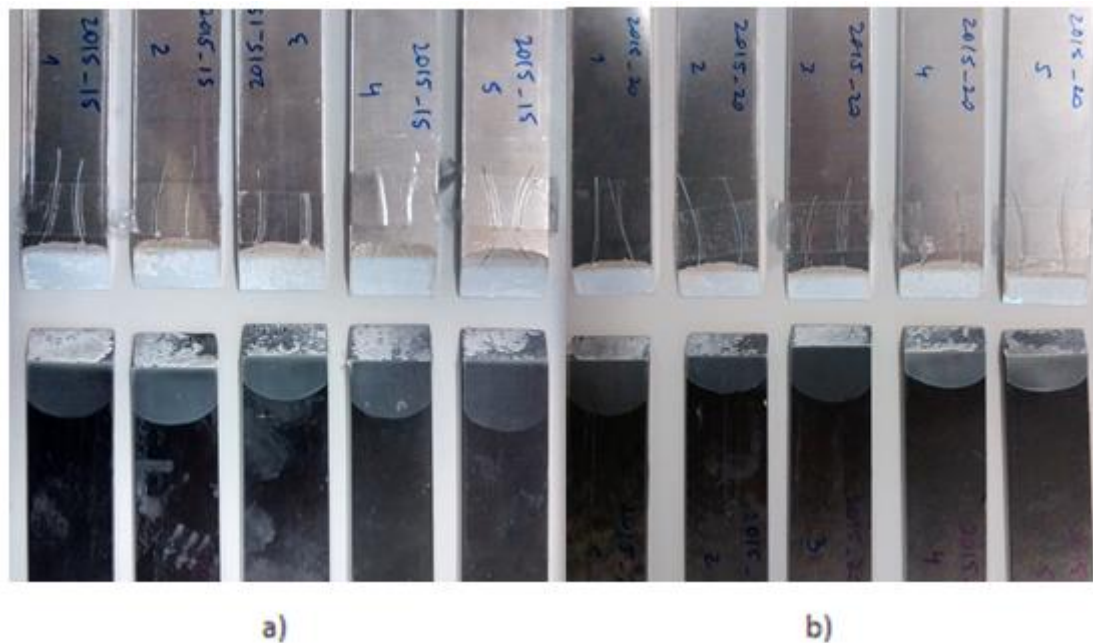


Figura 37 – Superfícies de rotura das juntas após ensaio de tração, coladas previamente com Araldite® 2015.
a) Ângulos de chanfro de 15° e b) 20°

Tal como referido anteriormente, apresenta-se na Figura 38 um dos casos em que ocorreu uma rotura adesiva. É possível verificar que, devido ao mau posicionamento dos fios de nylon, usados como guia para garantir a espessura desejada da camada do adesivo, ocorreu uma sobre espessura, que por sua vez criou condições não desejáveis para o tipo estudo em causa. Para este caso concreto os valores obtidos foram desprezados.



Figura 38 – Verificação da rotura adesiva – sobre espessura – provocado pelo mau alinhamento dos fios de Nylon guia.

3.1.4.3 Resistência das juntas

A Tabela 9 e Tabela 10 apresentam os valores obtidos experimentalmente pelos ensaios de tração respectivo a cada adesivo. É possível verificar com mais detalhes os resultados alcançados experimentalmente. Estes dados são sumarizados na Figura 39 e Figura 40.

Para ambos os adesivos, numa perspectiva geral, verifica-se uma correlação linear dos cinco provetes para cada ângulo. A variação do desvio padrão entre ângulos é praticamente proporcional face à amplitude das forças que cada configuração de junta suporta.

A informação seguinte refere-se aos resultados obtidos experimentalmente para o adesivo AV138.

Tal como referido acima no sub-capítulo “modo de rotura”, alguns ensaios em que foi observada rotura adesiva e em que o $P_{m\acute{a}x}$ apresentou um desvio assinalável relativamente à média foram desprezados. Como tal, estes valores não foram considerados para os cálculos dos valores médios e desvio padrão, tal como pode ser verificado na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos dos provetes, [N], colados com Araldite® AV138 obtidos experimentalmente

		Provetes					Média	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5		
α	10	9196,0	8591,7	-	8638,3	10471,7	9224,4	875,6
	15	6351,2	7036,9	7291,6	6967,8	7014,2	6932,3	348,4
	20	5642,2	5674,9	5901,9	5226,8	5295,5	5548,2	281,5
	30	4023,8	3271,0	-	3743,2	3826,6	3716,1	319,2
	45	2482,5	-	2978,4	3038,5	2788,7	2822,0	250,1

Na Tabela 9, considerando como referência, o valor médio obtido dos 5 provetes com ângulo de 45°, e comparado com os restantes α de 30°, 20°, 15° e 10°, verifica-se um aumento de 32%, 97%, 145% e 227%, respectivamente, dos valores de resistência obtidos. O desvio padrão obtido para cada configuração de α oscilou, proporcionalmente ao valor médio, entre os 5% e 9%.

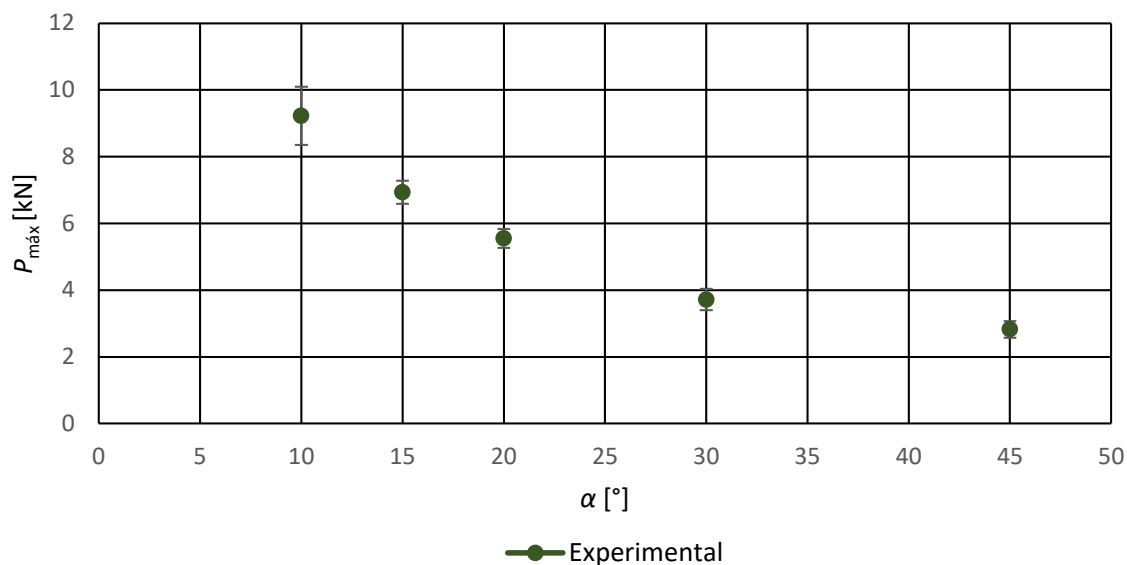


Figura 39 – Comparação de $P_{máx}$ obtidas experimentalmente para o adesivo Araldite® AV138.

Na Tabela 10, referente ao adesivo Araldite® 2015, caso se considere como referência o valor médio obtido dos 5 provetes com ângulo de 45°, e comparando com as restantes configurações 30°, 20°, 15° e 10° verifica-se um aumento de 30%, 89%, 136% e 231%, respectivamente, dos valores de resistência obtidos. É visível que a redução do ângulo e, por consequência, maior área de contacto, proporciona uma maior resistência final da junta ligada.

O desvio padrão para cada configuração oscilou, proporcionalmente ao valor médio, entre os 4% e 15%, ao que assemelha das percentagens registadas para o outro adesivo.

Tabela 10 – Valores de $P_{máx}$ obtidos dos provetes, [N], colados com Araldite® 2015 obtidos experimentalmente

	Provetes					Média	Desvio Padrão	
	1	2	3	4	5			
α	10	7776,3	8371,7	8647,8	7821,1	6421,5	7807,7	858,2
	15	5810,2	5604,0	5234,0	6127,0	5107,2	5576,5	417,0
	20	4488,2	4348,4	3934,2	4759,2	4753,1	4456,6	340,9
	30	3034,4	3132,8	3243,0	2900,4	3019,2	3066,0	128,8
	45	2144,0	2676,6	2502,7	1853,9	2591,0	2353,7	345,1

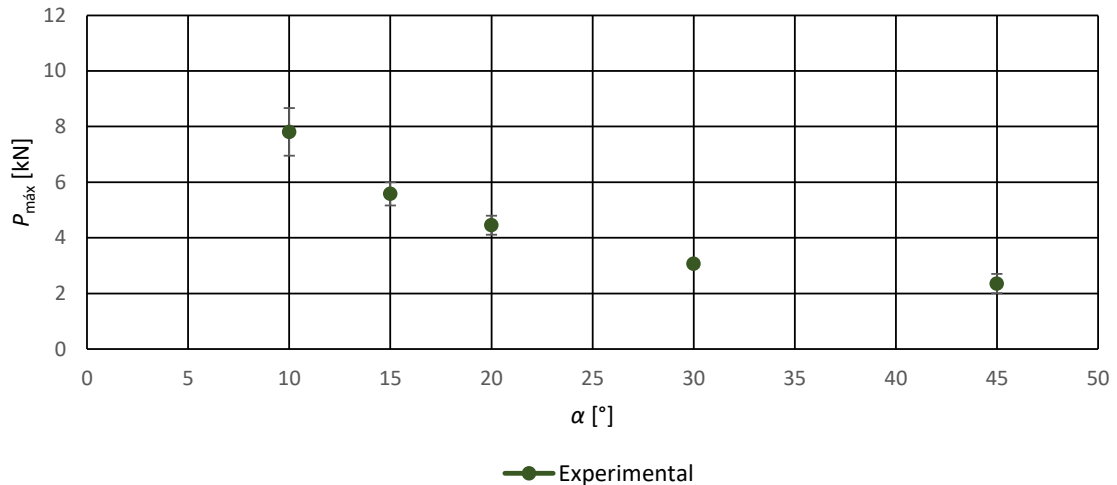


Figura 40 – Comparação do $P_{\text{máx}}$ obtidos experimentalmente para o adesivo Araldite® 2015.

3.2 Trabalho numérico

3.2.1 Condições da análise numérica

A análise numérica foi realizada com o *software* ABAQUS®, pela possibilidade de aplicar o MEF atribuindo as propriedades de cada adesivo. Inicialmente os substratos foram modelados em 2D com as mesmas dimensões e geometrias que foram aplicados no ensaio experimental. Foi definido o encastramento numa das extremidades, sendo que na ponta oposta foi definido um apoio com restrição de movimento vertical, para que se aproximasse com o deslocamento unidireccional real do ensaio de tração.

Para a modelação dos substratos foram definidas malhas com elementos contínuos de quatro nós de integração reduzidos de EPD (CPE4R, assinalado a cor verde), com a excepção dos elementos de interface (entre adesivo e substrato) em que foram considerados elementos triangulares de EPD (CPE3, assinalado a cor cinza), como é possível verificar na Figura 41.

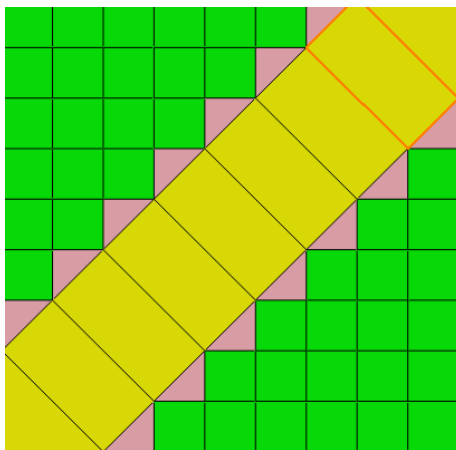


Figura 41 – Exemplo da malha obtida por EF em ABAQUS®

A liga de alumínio foi definida como sendo um material homogêneo e isotrópico de comportamento elástico perfeitamente plástico. No caso dos adesivos foram definidos como elementos coesivos bidimensionais de 4 nós (COH2D4, assinalados a amarelo na figura Figura 41). As propriedades mecânicas atribuídas ao compósito e liga de alumínio estão descritas no capítulo 3.1- Tabela 3 e Tabela 6, respectivamente - e as propriedades dos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 estão referidas nas Tabela 11 e Tabela 12, pela mesma ordem.

Segue-se um exemplo, na Figura 42, do aspecto final da ligação com α de 45° após a refinação final da malha.

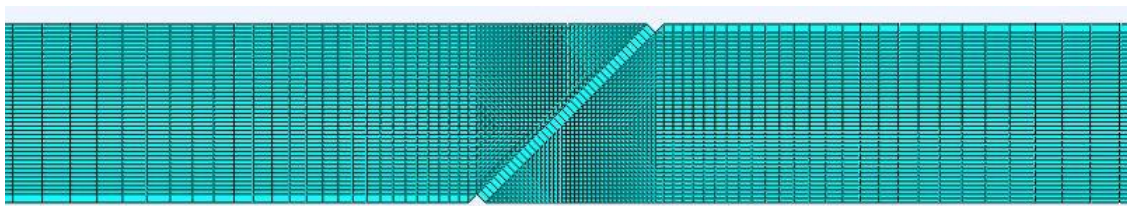


Figura 42 – Exemplo de um provete após refinação da malha em ABAQUS®

A malha de elementos finitos foi criada através da partição da camada adesiva definindo-se um espaçamento de 0,1 mm por elemento na direção do seu comprimento. Desta forma, consoante o ângulo α escolhido irá condicionar o número de elementos/partições ao longo da espessura do provete. Após este passo, repartiu-se a restante área sem malha definida com orientações ortogonais (horizontais e verticais) para anular a distorção dos elementos no momento do ensaio.

O espaçamento ao longo do comprimento do provete foi criado automaticamente numa das ferramentas do programa, com a especial atenção de ter um maior refinamento na proximidade das zonas a que o provete estará sujeito a maior concentração de tensões, como a própria ligação adesiva, condições fronteira e carregamento.

3.2.2 Modelo de dano coesivo

3.2.2.1 Modelo de dano triangular

Em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos (Pinto et al. 2009). Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular (Alfano e Crisfield 2001), linear parabólico (Allix e Corigliano 1996), exponencial (Chandra et al. 2002), polinomial (Chen 2002) e trapezoidal (Kafkalidis e Thouless 2002). Pela sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada (Liljedahl et al. 2006). O modelo

triangular 2D está representado Figura 43, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

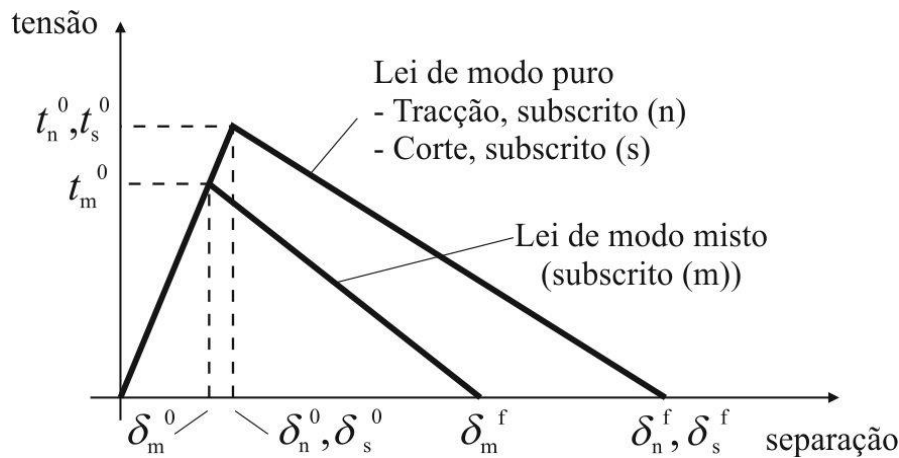


Figura 43 – Lei triangular do modelo de dano coesivo

Nesta lei, distinguem-se dois modos. O modo puro caracteriza-se por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respectivo são anulados na lei coesiva respectiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar a tensão e corte (Campilho et al. 2008). Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente directa de deformação e de uma deformação de corte que são determinados recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas, entre aderentes rígidos, as tensões existentes na membrana são desprezadas. Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz K_{COH} , a qual relaciona as tensões e deformações em tracção e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida da seguinte forma:

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

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição é dependente da formulação utilizada. Caso seja uma formulação local, esta é usada para simular fracturas de espessura nula, em que os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos (Campilho et al. 2005). Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0 \quad (2)$$

onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma

fiel a deformação da camada de adesivo (Campilho et al. 2008). Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério de tensão nominal quadrática, expresso pela seguinte expressão:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1 \quad (3)$$

$\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores (Campilho et al. 2009a). Quando t_m^0 é atingido (Figura 43), pela igualdade da equação 3, a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos (δ_m^f na Figura 43) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC}

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (4)$$

3.2.2.2 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tracção e corte é necessário conhecer t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} . No passado foram publicados alguns estudos, que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios de tracção (Campilho 2005, Pocius 2012). No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias e propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina (Andersson e Stigh 2004, Högberg e Stigh 2006, Leffler et al. 2007). Assim sendo, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

Araldite® AV138

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. (2011c). No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fractura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente ao mais indicado, e foi também utilizado para o adesivo Araldite® 2015, conforme se exemplificará de seguida. Neste caso, foram utilizados os valores de resistência à tracção e corte obtidos através de ensaios de tracção e de corte (*Thick adherend shear test* (TAST)), respectivamente, para a definição de t_n^0 e t_s^0 . Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis. As leis obtidas para tracção e corte foram então utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a JSS com $L=20$ mm), e as leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais, até obter valores de

G_{IC} e G_{IIC} que reproduzam os resultados experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram também determinados experimentalmente com ensaios de tracção e ensaios de corte (TAST). No trabalho referido (Campilho et al. 2011b) conclui-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades do adesivo. A Tabela 11 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138 numa lei coesiva em modo misto (Campilho et al. 2011b).

Tabela 11 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com t_A de 0,2 mm (Campilho et al. 2011b)

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

Araldite® 2015

Tal como no caso anterior, as leis coesivas da camada de adesivo do Araldite® 2015 foram determinadas num trabalho anterior (Campilho et al. 2011c) por um método inverso para a determinação de t_n^0 e t_s^0 . Num estudo anterior (De Moura et al. 2008) 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, respectivamente, 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 tracção ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de t_n^0 ou t_s^0 é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais do teste respectivo de caracterização à fractura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo.

Tabela 12 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com t_A de 0,2 mm (De Moura et al. 2008)

E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
1850	650	21,63	17,9	0,43	4,7

A Tabela 12 apresentam-se os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva em modo misto (De Moura et al. 2008). Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço (Marques e da Silva 2008) e ensaios TAST, respectivamente (Campilho et al. 2009b).

3.2.3 Análise de tensões na junta

Para a obtenção das tensões de arrancamento e de corte na camada adesiva da junta foram considerados os modelos previamente definidos. Para estes modelos surgiram ligeiras alterações: a primeira, foi a alteração das propriedades dos elementos da camada de adesivo de coesivos para elementos sólidos homogêneos. Posteriormente, foi feito um maior refinamento da camada adesiva, repartindo cada elemento por 4 partes ao longo da sua espessura (comparar elementos da camada adesiva da Figura 41 com Figura 44). Para a camada adesiva foram atribuídas as propriedades mecânicas (módulo de Young (E) e coeficiente de Poisson (ν) apresentadas no subcapítulo 3.1) assumindo o domínio elástico e um comportamento isotrópico.

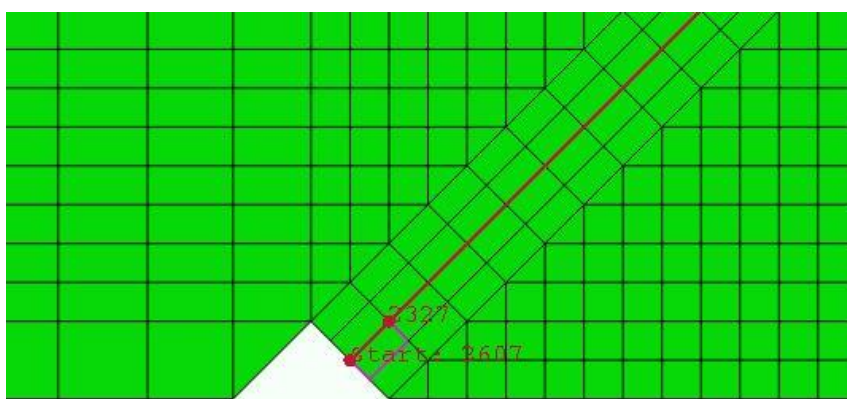


Figura 44 – Exemplo da malha após refinamento e *path* definido para obtenção das tensões, em ABAQUS®

Após a obtenção do primeiro incremento do ensaio de tração foi seleccionado o caminho – *path* – para ser possível obter os valores de tensão, tanto de arrancamento como de corte. Seguem-se os resultados nos seguintes subcapítulos para cada adesivo.

3.2.3.1 Tensões de arrancamento

3.2.3.1.1 Araldite® AV138

Na Figura 45, segue-se o gráfico das tensões de arrancamento obtido numericamente e referente ao adesivo Araldite® AV138. Numa primeira análise realça-se a assimetria do gráfico, em que nas extremidades dos provetes observa-se picos de tensão de diferentes amplitudes. Este facto provém da ligação ser feita com dois substratos com diferentes módulos de elasticidade, obtendo o pico de maior tensão na extremidade do compósito por ter maior rigidez. Outra observação é relativo à comparação entre α aplicados, e pode verificar-se que à medida que este diminui o pico de tensões consequentemente é mais acentuado nas extremidades na ligação. Para um $\alpha=10^\circ$ apresenta uma tensão de arrancamento normalizada da extremidade do compósito de aproximadamente 1,2 e na extremidade oposta, liga de alumínio, cerca de 1,8 . Consultando o α de 45° e seguindo as extremidades pela mesma ordem, obtém-se

uma tensão σ_y normalizada de aproximadamente 0,8 e 1. Verifica-se também para este caso, que para além de nas extremidades terem picos de concentração de tensões menos acentuados a distribuição das tensões ao longo do comprimento da ligação é mais uniforme.

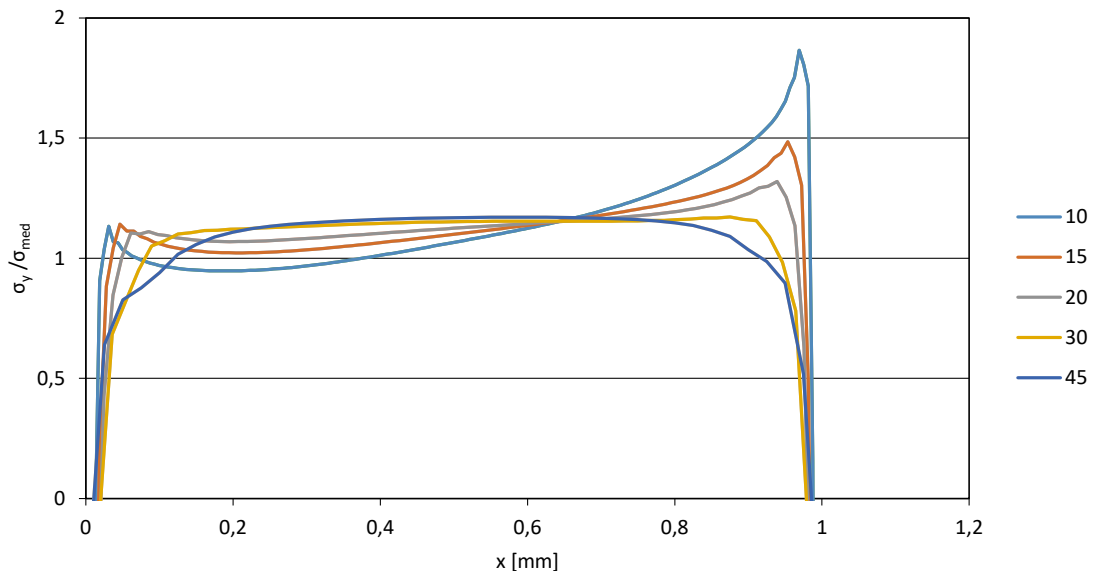


Figura 45 – Tensões de arrancamento referente ao adesivo Araldite® AV138, extraído do modelo numérico em ABAQUS®

3.2.3.1.2 Araldite® 2015

Com a aplicação de um adesivo mais dúctil, mais predisposto a uma maior distribuição de tensões essencialmente em regiões de maior concentração como são as extremidades, verifica-se um decréscimo acentuado face ao adesivo anterior. Deste modo, tal como se pode verificar na Figura 46, a assimetria do gráfico é ligeiramente menos acentuada devido à redução de tensões nas extremidades do provete. É possível também observar que o ponto comum onde convergem as tensões dos cinco provetes está mais deslocado para o eixo do provete, devido à aproximação da simetria do gráfico. De igual modo verifica-se que quanto maior o ângulo α aplicado maior o pico de tensão se acentua nas extremidades do provete. Comparando os mesmos ângulos assinalados no adesivo anterior, para $\alpha=10^\circ$ as tensões normalizadas nas extremidades atingem 1,1 (extremidade do substrato de compósito) e aproximadamente 1,6 na extremidade da liga de alumínio. Observando agora a curva de tensão para $\alpha=45^\circ$ obtém-se aproximadamente 0,8 para ambas as extremidades. Comparativamente ao outro adesivo e para o mesmo α os modelos têm praticamente o mesmo comportamento - tensões semelhantes nas extremidades e distribuição de tensões praticamente uniforme ao longo da camada do adesivo.

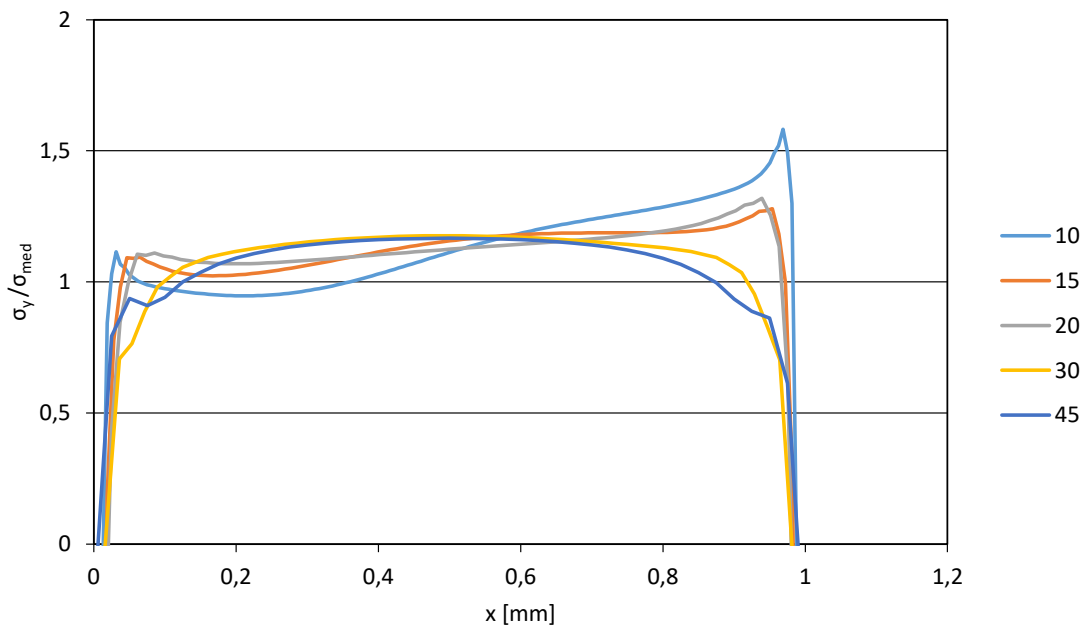


Figura 46 – Tensões de arrancamento referente ao adesivo Araldite® 2015, extraído do modelo numérico em ABAQUS®

3.2.3.2 Tensões de corte

3.2.3.2.1 Araldite® AV138

Na Figura 47 apresentam-se os resultados das tensões de corte ao longo do comprimento da camada do adesivo Araldite® AV138, obtidos para os diferentes α simulados em ABAQUS®.

Numa primeira abordagem, pode-se verificar um registo díspar referente a $\alpha=45^\circ$ nas extremidades da ligação. Os picos de concentração são mais acentuados que os restantes, verificando-se tensões normalizadas entre 1,8 e 2 para ambas as extremidades. Comparativamente com $\alpha=30^\circ$ é possível observar uma redução cerca de 30% relativamente ao primeiro α mencionado. Os resultados apresentados seguem uma tendência uniforme assim que o α é reduzido, embora para $\alpha=10^\circ$ e 15° assumam novamente uma tendência com maiores picos de tensões na extremidade da liga de alumínio.

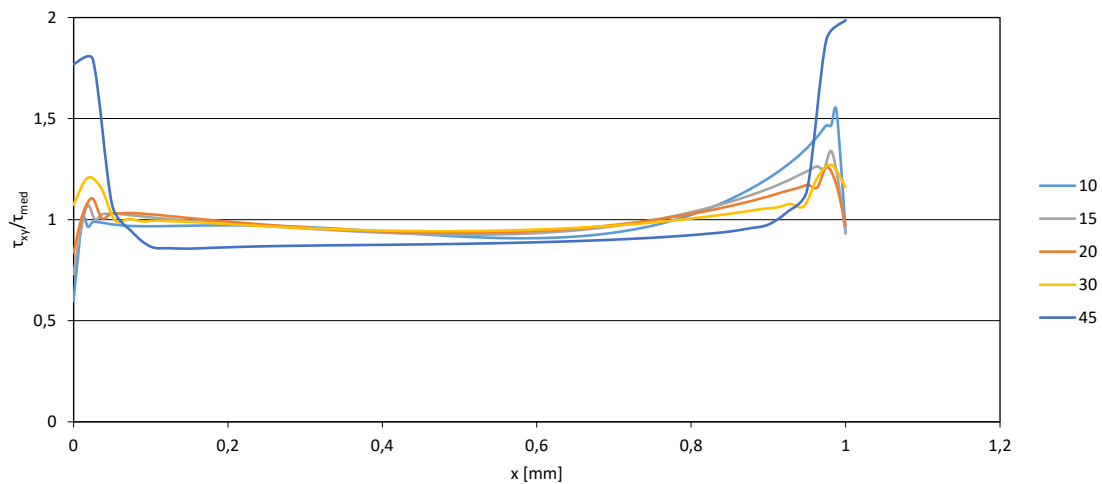


Figura 47 – Tensões de corte referente ao adesivo Araldite® AV138, extraído do modelo numérico em ABAQUS®

3.2.3.2.2 Araldite® 2015

Segue-se na Figura 48, a curva de tensões de corte para os modelos em que foram simuladas as colagens com o adesivo Araldite® 2015. Verifica-se igualmente uma disparidade para $\alpha=45^\circ$ embora, a amplitude das tensões de corte sejam menores para este adesivo pois promove maior distribuição de tensões. Analisando analiticamente os resultados e usando o mesmo termo de comparação do adesivo anterior, para $\alpha=45^\circ$ as tensões normalizadas atingem os 1,6 e 1,7 em cada extremidade dos espécimes, verificando uma redução cerca de 20% relativamente ao adesivo anterior. Tal como registado no adesivo anterior, as tensões tendem a ser mais uniformes assim que o α vai reduzindo, assinalando também que para $\alpha=10^\circ$ e 15° os picos de tensão sejam ligeiramente superiores na extremidade do alumínio.

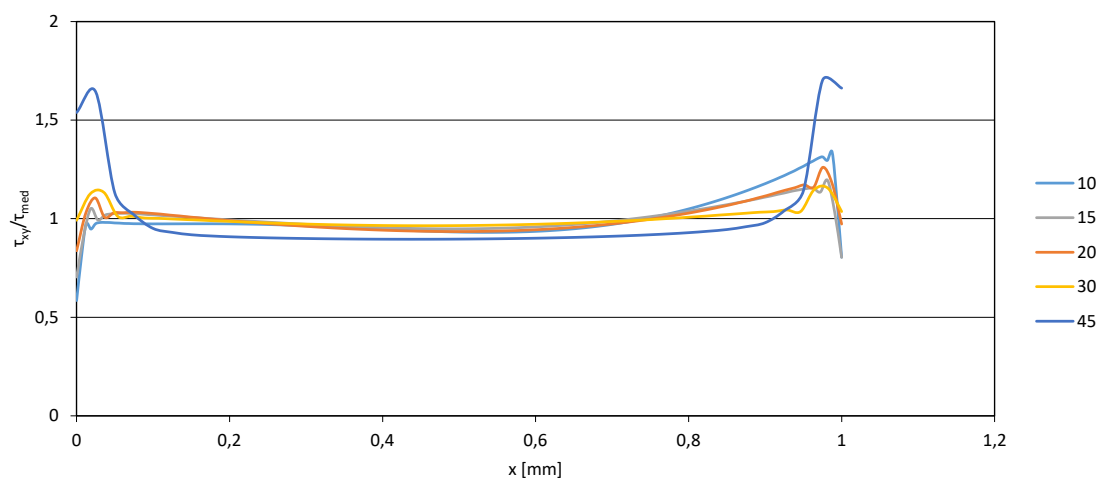


Figura 48 – Tensões de corte referente ao adesivo Araldite® 2015, extraído do modelo numérico em ABAQUS®

3.2.4 Previsão da resistência

3.2.4.1 Araldite® AV138

Na Figura 49 mostram-se as curvas $P-\delta$ com os resultados experimentais e numéricos extraídos do ABAQUS®, respectivos ao adesivo Araldite® AV138 para um α de 10° .

Numa óptica geral, pode-se verificar um ligeiro desfazamento das quatro curvas experimentais face à numérica devido ao deslocamento introduzido pelas amarras durante o ensaio. No entanto, tal como já foi referido, esta discrepância não introduz distorção dos resultados de $P_{m\acute{a}x}$, como é possível consultar na Tabela 13. Em todos os provetes, no momento da rotura, existe uma queda abrupta que corresponde com as características de um adesivo frágil - tanto nos resultados numéricos como no experimentais.

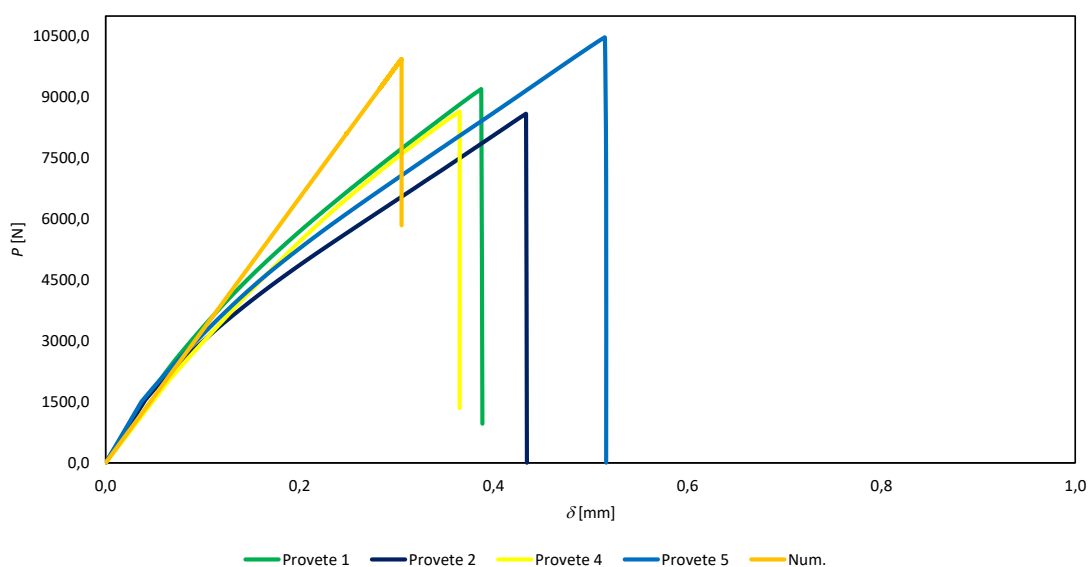


Figura 49 – Curva $P-\delta$ respectivo aos provetes de 10° de chanfro interno com aplicação do adesivo Araldite® AV138 - resultados experimentais e numérico

Na Tabela 13 seguem-se os valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ respetivos aos 5 provetes e também os resultados obtidos numericamente. Tal como referido anteriormente, estes apresentam uma correlação bastante aceitável. Note-se que, se ao valor médio obtido se considerar o desvio padrão para cada caso, confirma-se que se encontram dentro da mesma gama de resistência (visível também na Figura 50). Seguindo a tabela e acompanhando o caso concreto do provete com chanfro de 10° , verifica-se uma diferença percentual de 9% relativamente ao valor numérico. Por curiosidade, para o caso em que a amplitude das cargas é menor e correspondente ao ângulo de 45° , o desvio percentual não difere muito e corresponde apenas a uma diferença entre o valor experimental e numérico de 15%.

Tabela 13 – Resistências máximas obtidas experimental e numericamente, em Newtons [N], colados com Araldite® AV138

	Provetes					Média	Valores numéricos	Desvio Padrão	
	1	2	3	4	5				
α	10	9196,0	8591,7	-	8638,3	10471,7	9224,4	9936,1	875,6
	15	6351,2	7036,9	7291,6	6967,8	7014,2	6932,3	7414,3	348,4
	20	5642,2	5674,9	5901,9	5226,8	5295,5	5548,2	5887,6	281,5
	30	4023,8	3271,0	-	3743,2	3826,6	3716,1	4092,5	319,2
	45	2482,5	-	2978,4	3038,5	2788,7	2822,0	3245,1	250,1

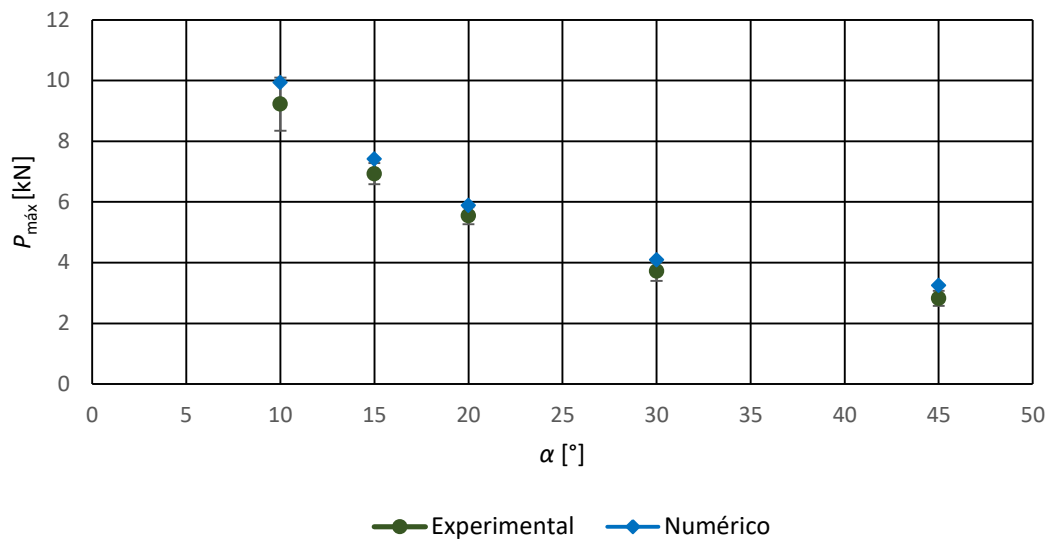


Figura 50 – Comparação das forças máximas obtidas experimentalmente e numericamente para o adesivo Araldite® AV138.

3.2.4.2 Araldite® 2015

Na Figura 51 apresentam-se as curvas P - δ com os resultados experimentais e numérico extraídos do ABAQUS®, respectivos ao adesivo Araldite® 2015, igualmente para um α de 10°.

Comparando com o adesivo anterior, existem algumas diferenças a registar. A primeira é o facto de os valores médios registados experimentalmente apresentarem resistências superiores quando comparadas com o numérico. Este efeito deve-se à lei coesiva triangular que promove uma estimativa por ligeiro defeito para adesivos dúcteis. Mesmo assim, os valores obtidos não perdem a sua validade pois se considerar o desvio padrão obtido nos ensaios experimentais encontram-se enquadrados no mesmo leque de valores obtidos, tal como pode ser verificado na

Figura 52. Quanto ao comportamento da junta no momento da rotura, é possível também registar que a curva segue uma trajetória descendente curvilínea e, deste modo, considera-se existir uma maior tenacidade por parte deste adesivo quando comparado com o primeiro.

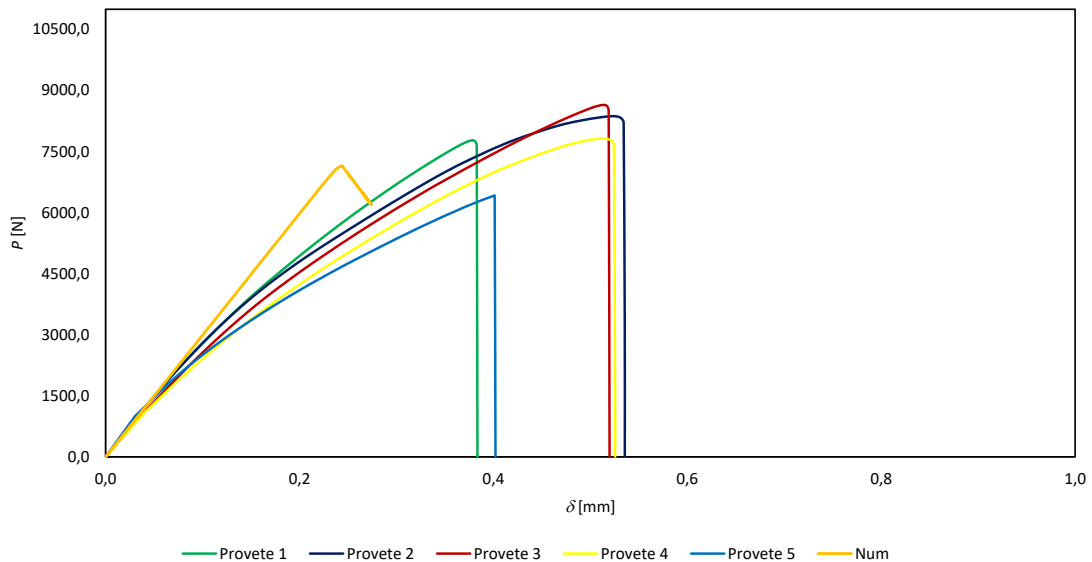


Figura 51 – Curva P - δ respectivo ao provete de 10° de chanfro interno com aplicação do adesivo Araldite® 2015 - resultados experimentais e numérico

Na Tabela 14 resumem-se os resultados obtidos tanto experimental como numericamente relativos ao adesivo Araldite® 2015. Também para este caso há uma grande proximidade dos resultados experimentais face ao numérico. Observando o caso concreto do provete com ângulo de chanfro de 10° (mesmo ângulo de comparação usado no adesivo Araldite® AV138), este difere igualmente cerca de 9%.

Tabela 14 – Resistências máximas obtidas experimental e numericamente, em Newtons [N], colados com Araldite® 2015

		Provetes					Média	Valores numéricos	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5			
α	10	7776,3	8371,7	8647,8	7821,1	6421,5	7807,7	7148,9	858,2
	15	5810,2	5604,0	5234,0	6127,0	5107,2	5576,5	4859,1	417,0
	20	4488,2	4348,4	3934,2	4759,2	4753,1	4456,6	3722,7	340,9
	30	3034,4	3132,8	3243,0	2900,4	3019,2	3066,0	2602,6	128,8
	45	2144,0	2676,6	2502,7	1853,9	2591,0	2353,7	1946,5	345,1

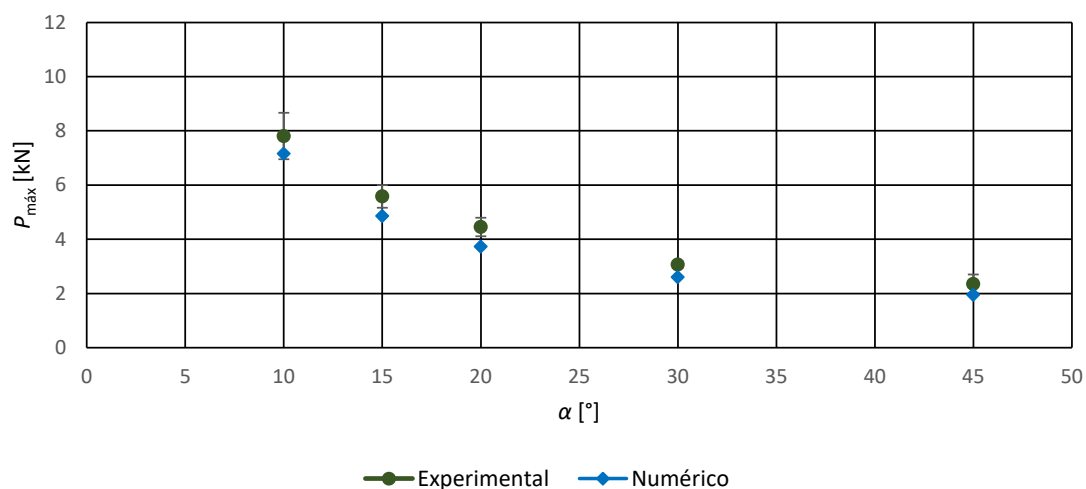


Figura 52 – Comparação das forças máximas obtidas experimentalmente e numericamente para o adesivo Araldite® 2015.

Por todas as observações feitas em ambos os adesivos relativamente aos resultados experimentais e numéricos, pode-se concluir que os valores obtidos nos ensaios experimentais não distam muito dos modelos simulados por EF em ABAQUS®. Para os diversos ângulos apresentados, obtém-se um desvio máximo de 13% entre valores experimentais e numéricos. Deste modo pode-se afirmar que os resultados são aceitáveis e que o modelo numérico se encontra validado com sucesso.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu num estudo experimental e numérico de ligações adesivas híbridas (substratos de materiais de diferentes naturezas), ligadas por um chanfro interno com diferentes ângulos de inclinação entre substratos. Para o estudo foram também considerados dois adesivos de natureza diferente: um dúctil (Araldite® 2015) e outro mais frágil (Araldite® AV138). O estudo experimental foi realizado pelo *software* ABAQUS®, usando os modelos coesivos para a previsão numérica da resistência das juntas.

O facto de o estudo envolver materiais diferentes, liga de alumínio e compósito carbono-epóxico, permitiu abordar os processos de fabrico e preparação superficial de cada caso, destacando-se o processo de fabrico do compósito que exige maior cuidado devido à abrasão no processo de fabrico. A sua preparação superficial é igualmente importante, pois só garantindo algum rigor se pode assegurar que a ligação ficará finalizada com sucesso.

Os modos de rotura obtidos experimentalmente, no geral, ocorreram como esperado na medida em que foram obtidas roturas coesivas. Nas curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente foram observados valores bastante aceitáveis para cada adesivo. Para ambos os adesivos foram obtidos resultados experimentais com algum desfasamento nos deslocamentos do gráfico devido às condições do equipamento disponível nas oficinas do DEM. Mesmo assim, esta diferença não coloca em risco a validade dos resultados obtidos já que esta não afecta $P_{máx}$, tal como pode ser verificado pela semelhança dos resultados obtidos experimentalmente com o numérico. Para o adesivo Araldite® AV138 foram obtidas resistências no ensaio experimental ligeiramente acima do numérico. O desvio padrão dos provetes testados obtiveram um desvio médio de 7% para todos os ângulos. No exemplo prático demonstrado, para um α de 10° obteve-se apenas uma diferença de 9% do modelo numérico. O caso mais díspar, $\alpha=45^\circ$, tem uma diferença de 15 pontos percentuais quando comparado ao modelo numérico. O comportamento da junta no instante da sua rotura, tal como esperado, tanto no experimental como no numérico revelou-se frágil, o que é bem visível em cada curva dos provetes ensaiados, pois verifica-se uma queda abrupta após a rotura. Para o adesivo Araldite® 2015 obteve-se resistências de juntas experimentais igualmente idênticas ao modelos numéricos, mas para este caso os resultados alcançados experimentalmente foram ligeiramente superiores ao numérico. Este factor deve-se a uma estimativa por defeito que os modelos coesivos promovem para adesivos mais dúcteis, quando aplicada uma lei coesiva triangular. Usando o mesmo caso apresentado para o adesivo anterior, α de 10° , foi igualmente verificada uma diferença de 9% entre os ensaios experimentais e numérico. Aplicando o mesmo exercício para o caso de um α com 45° , verificou-se um desvio de cerca 20 %.

Estas pequenas oscilações poderão ser justificadas com a menor superfície de contacto entre substratos especialmente para substratos de baixas espessuras como é o caso em prática, pois a molhabilidade e consistência na colagem exige que sejam mais minuciosas.

Para ambos os casos foi visivelmente notório que com um menor ângulo de chanfro de ligação é possível obter resistências de juntas substancialmente maiores. Segue o exemplo do Araldite® AV138, em que foram obtidas resistências para $\alpha=45^\circ$ de 3245 N no modelo numérico e 2822 N no experimental. Se a comparação for feita com o $\alpha=10^\circ$, pode-se constatar resistências na ordem dos 9936 N para o modelo numérico e 9224 N para o experimental, resultando assim num aumento exponencial de 206% e 226%, respectivamente. Para o adesivo Araldite® 2015, os resultados foram semelhantes em termos de proporcionalidade, tal como se pode confirmar: no ensaio numérico para $\alpha=45^\circ$, numericamente obteve-se 1946 N enquanto experimentalmente se registou 2353 N. Para o mesmo α de 10° verificou-se resistências de junta na ordem dos 7149 N e 7807 N, numérica e experimentalmente. Deste modo, proporcionalmente e pela mesma ordem atingiu-se um aumento de resistência de 267 % e 231 %.

Para o gráfico de tensões extraídas dos modelos numéricos em ABAQUS® foi possível verificar em todos eles uma assimetria. Esta trata-se de uma característica de juntas híbridas em que são utilizados materiais distintos para os substratos. Nos gráficos de tensões surge um pico de concentração superior numa das extremidades da ligação, o que se verifica sempre no material que tem o módulo de *Young* mais elevado pois este apresenta uma deformação inferior. Consoante o adesivo em prática os picos de concentração de tensões podem ser maiores ou menores. Se a abordagem for feita a um adesivo mais dúctil - Araldite® 2015 - este promove a redistribuição de tensões nas regiões de concentração de tensão, tipicamente nas extremidades da zona de ligação, o que para um adesivo mais frágil - Araldite® AV138 - não se verifica.

No caso concreto das tensões de arrancamento, pode-se concluir que quanto menor o ângulo maior é a concentração de tensões nas suas extremidades. Para ambos os adesivos verificou-se uma distribuição mais uniforme para um $\alpha=45^\circ$, obviamente que para o mais frágil foram assinaladas amplitudes maiores de tensão - entre 20% e 30%. Para as tensões de corte pode-se concluir o oposto relativamente às tensões de arrancamento, ou seja, quanto maior o α aplicado maior a tensão de corte nas extremidades.

Para a realização de trabalhos futuros propõem-se os seguintes casos de estudo:

- Estudo de variação de diferentes espessuras adesivas para dois adesivos dúcteis e frágeis;
- Estudo de diferentes geometrias com a finalidade de reduzir os picos de concentrações de tensão;

-
- Consideração de uma lei coesiva trapezoidal para o adesivo dúctil;
 - Aplicação de reforços exteriores para aumento da resistência da junta.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

(1996). Forensic Studies of Adhesive Joints. Project 3 - Environmental Durability of Adhesive Bonds, NPL/ESR Technology Limited.

(2011). Handbook of Adhesive and Surface Preparation. Oxford, UK, Elsevier.

Adams, R. and N. Peppiatt (1974). "Stress analysis of adhesive-bonded lap joints." The Journal of Strain Analysis for Engineering Design **9**(3): 185-196.

Adams, R. D., J. Comyn and W. C. Wake (1997). Structural adhesive joints in engineering, Springer Science & Business Media.

Alfano, G. and M. A. Crisfield (2001). "Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues." Int. J. Numer. Meth. Engng. **50**(7): 1701-1736.

Allix, O. and A. Corigliano (1996). "Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens." International Journal of Fracture **77**(2): 111-140.

Andersson, T. and U. Stigh (2004). "The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces." International Journal of Solids and Structures **41**(2): 413-434.

ASTM E8M (2004). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials ASTM International, West Conshohocken, PA.

Azevedo, J. C. S. A. (2014a). Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Noched Flexure (ENF). Tese de mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Azevedo, J. C. S. A. (2014b). Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Noched Flexure (ENF), Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Bachir Bouiadjra, B., H. Fekirini, M. Belhouari, B. Boutabout and B. Serier (2007). "Fracture energy for repaired cracks with bonded composite patch having two adhesive bands in aircraft structures." Computational Materials Science **40**(1): 20-26.

Bakewell, J. (2015). "Sticking together." Retrieved Consultado a 3/10/2016, from <http://www.automotivemanufacturingsolutions.com/process-materials/sticking-together>.

Barenblatt, G. I. (1959). "The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks." Journal of Applied Mathematics and Mechanics **23**: 622-636.

Belytschko, T. and T. Black (1999). "Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing." International journal for numerical methods in engineering **45**(5): 601-620.

Breitzman, T. D., E. V. Larve, B. M. Cook, G. A. Schoeppner and R. P. Lipton (2009). "Optimization of a composite scarf repair patch under tensile loading." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **40**(12): 1921-1930.

Campilho, R. D. S. G. (2005). Modelação de Execução de Reparações em Materiais Compósitos. Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Campilho, R. D. S. G., M. D. Banea, F. J. P. Chaves and L. F. M. d. Silva (2011a). "eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I." Computational Materials Science **50**(4): 1543-1549.
- Campilho, R. D. S. G., M. D. Banea, J. A. B. P. Neto and L. F. M. da Silva (2013). "Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer." International Journal of Adhesion and Adhesives **44**: 48-56.
- Campilho, R. D. S. G., M. D. Banea, A. M. G. Pinto, L. F. M. da Silva and A. M. P. de Jesus (2011b). "Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling." International Journal of Adhesion and Adhesives **31**(5): 363-372.
- Campilho, R. D. S. G., M. F. S. F. de Moura and J. J. M. S. Domingues (2005). "Modelling single and double-lap repairs on composite materials." Composites Science and Technology **65**(13): 1948-1958.
- Campilho, R. D. S. G., M. F. S. F. de Moura and J. J. M. S. Domingues (2007). "Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model." Journal of Adhesion Science and Technology **21**(9): 855-870.
- Campilho, R. D. S. G., M. F. S. F. de Moura and J. J. M. S. Domingues (2008). "Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs." International Journal of Solids and Structures **45**(5): 1497-1512.
- Campilho, R. D. S. G., M. F. S. F. de Moura and J. J. M. S. Domingues (2009a). "Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes." International Journal of Adhesion and Adhesives **29**(2): 195-205.
- Campilho, R. D. S. G., M. F. S. F. de Moura, D. A. Ramantani, J. J. L. Morais and J. J. M. S. Domingues (2009b). "Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single- and double-strap repairs." International Journal of Adhesion and Adhesives **29**(6): 678-686.
- Campilho, R. D. S. G., A. M. G. Pinto, M. D. Banea, R. F. Silva and L. F. M. da Silva (2011c). "Strength Improvement of Adhesively-Bonded Joints Using a Reverse-Bent Geometry." Journal of Adhesion Science and Technology **25**(18): 2351-2368.
- Chan, W. S. and S. Vedhagiri (2001). "Analysis of Composite Bonded/Bolted Joints Used in Repairing." Journal of Composite Materials **35**(12): 1045-1061.
- Chandra, N., H. Li, C. Shet and H. Ghonem (2002). "Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces." International Journal of Solids and Structures **39**(10): 2827-2855.
- Chen, J. (2002). "Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models." Journal of Thermoplastic Composite Materials **15**(5): 429-442.
- Chiu, S.-H. J. and R. A. Chaudhuri (2011). "A three-dimensional eigenfunction expansion approach for singular stress field near an adhesively-bonded scarf joint interface in a rigidly-encased plate." Engineering Fracture Mechanics **78**(10): 2220-2234.
- da Silva, F. J. G. O., A (2008). Modeling of Adhesively Bonded Joints. Berlin, Springer.
- da Silva, L. F. M. and R. D. Adams (2002). "The strength of adhesively bonded T-joints." International Journal of Adhesion and Adhesives **22**(4): 311-315.
- da Silva, L. F. M. and R. D. Adams (2007a). "Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives." International Journal of Adhesion and Adhesives **27**(3): 216-226.

da Silva, L. F. M. and R. D. Adams (2007b). "Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range." International Journal of Adhesion and Adhesives **27**(5): 362-379.

da Silva, L. F. M., A. G. de Magalhães and M. F. S. F. de Moura (2007). Juntas Adesivas Estruturais. Porto, Publindústria.

da Silva, L. F. M. O., A. ; Pirondi, A. (2011). Hybrid Adhesive Joints. Berlin, Springer.

Daudeville, L. and P. Ladeveze (1992). A Damage Mechanics Approach for Composite Laminates Delamination. Fifth International Conference on Fibre Reinforced Composites(FRC'92).

De Moura, M. F. S. F., J. P. M. Gonçalves, J. A. G. Chousal and R. D. S. G. Campilho (2008). "Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints." International Journal of Adhesion and Adhesives **28**(8): 419-426.

Duan, K., X. Hu and Y.-W. Mai (2004). "Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints." Journal of Adhesion Science and Technology **18**(1): 39-53.

Feraren, P. and H. M. Jensen (2004). "Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints." Engineering Fracture Mechanics **71**(15): 2125-2142.

Fernlund, G. and J. K. Spelt (1991). "Failure load prediction of structural adhesive joints: Part 1: Analytical method." International Journal of Adhesion and Adhesives **11**(4): 213-220.

Gannesh, V. K. and T. S. Choo (2002). "Modulus Graded Composite Adherends for Single-Lap Bonded Joints." Journal of Composite Materials **36**(14): 1757-1767.

Goland, M. and E. Reissner (1944). "The Stresses in Cemented Joints." Journal of Applied Mechanics **66**: 17-27.

Gunnion, A. J. and I. Herszberg (2006). "Parametric study of scarf joints in composite structures." Composite Structures **75**(1-4): 364-376.

Harris, J. and R. Adams (1984). "Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods." International Journal of Adhesion and Adhesives **4**(2): 65-78.

Hart Smith, L. J. (1981). Stress Analysis: a Continuum Mechanics Approach. Developments in Adhesives. A. J. Kinloch. London, Applied Science Publishers. **2**: 1-44.

He, D., T. Sawa, T. Iwamoto and Y. Hirayama (2010). "Stress analysis and strength evaluation of scarf adhesive joints subjected to static tensile loadings." International Journal of Adhesion and Adhesives **30**(6): 387-392.

Högberg, J. L. and U. Stigh (2006). "Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer." Engineering Fracture Mechanics **73**(16): 2541-2556.

J. Soares Correia - Armazém de Ferro, S. A. (Consultado a 1/09/2016). "<http://www.jsoarescorreia.pt/produtos/paineis-sandwich-de-cobertura-e-revestimento/>."

Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe and S.-S. Pang (2010). "Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints." International Journal of Solids and Structures **47**(18-19): 2445-2458.

Kafkalidis, M. S. and M. D. Thouless (2002). "The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints." International Journal of Solids and Structures **39**(17): 4367-4383.

- Khoramishad, H., A. Crocombe, K. Katnam and I. Ashcroft (2010a). "Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model." International Journal of Fatigue **32**(7): 1146-1158.
- Khoramishad, H., A. D. Crocombe, K. B. Katnam and I. A. Ashcroft (2010b). "Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model." International Journal of Fatigue **32**(7): 1146-1158.
- Kimiaieifar, A., H. Toft, E. Lund, O. T. Thomsen and J. D. Sørensen (2012). "Reliability analysis of adhesive bonded scarf joints." Engineering Structures **35**: 281-287.
- Kohen, G. W. (1954). Design Manual on Adhesives, Machine Design. London.
- Leffler, K., K. S. Alfredsson and U. Stigh (2007). "Shear behaviour of adhesive layers." International Journal of Solids and Structures **44**(2): 530-545.
- Liljedahl, C. D. M., A. D. Crocombe, M. A. Wahab and I. A. Ashcroft (2006). "Damage modelling of adhesively bonded joints." International Journal of Fracture **141**(1): 147-161.
- Liu, J. and T. Sawa (2001). "Stress analysis and strength evaluation of single-lap adhesive joints combined with rivets under external bending moments." Journal of Adhesion Science and Technology **15**(1): 43-61.
- Marques, E. A. S. and L. F. M. da Silva (2008). "Joint Strength Optimization of Adhesively Bonded Patches." The Journal of Adhesion **84**(11): 915-934.
- Moes N., D. J., Belytschko T. (1999). "A Finite Element Method for Crack Growth Without Remeshing." International journal for numerical methods in engineering **46**(1): 131-150.
- Mohammadi, S. (2008). Extended finite element method: for fracture analysis of structures, John Wiley & Sons.
- Neto, J. A. B. P., R. D. S. G. Campilho and L. F. M. da Silva (2012). "Parametric study of adhesive joints with composites." International Journal of Adhesion and Adhesives **37**(0): 96-101.
- Odi, R. A. and C. M. Friend (2002). "A Comparative Study of Finite Element Models for the Bonded Repair of Composite Structures." Journal of Reinforced Plastics and Composites **21**(4): 311-332.
- Panigrahi, S. and B. Pradhan (2007). "Three dimensional failure analysis and damage propagation behavior of adhesively bonded single lap joints in laminated FRP composites." Journal of Reinforced plastics and Composites **26**(2): 183-201.
- Penado, F. E. (1998). "A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint." Journal of Thermoplastic Composite Materials **11**(3): 272-287.
- Petrie, E. W. (2000). Handbook of Adhesives and Sealants 2nd ed, New York, N.Y.
- Pinto, A. M. G., A. G. Magalhães, R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura and A. P. M. Baptista (2009). "Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive." The Journal of Adhesion **85**(6): 351-376.
- Pocius, A. V. (2012). Adhesion and Adhesives Technology. Adhesion and Adhesives Technology (Third Edition), Hanser: I-XVI.
- Shenoy, V., I. A. Ashcroft, G. W. Critchlow and A. D. Crocombe (2010). "Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue." Engineering Fracture Mechanics **77**(7): 1073-1090.

- Sosa, J. C. and N. Karapurath (2012). "Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method." Composites Science and Technology **72**(7): 788-791.
- Volkersen, O. (1938). "Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten." Luftfahrtforschung **15**: 41-47.
- Voyiadjis, G. Z. and P. I. Kattan (2005). Damage mechanics, CRC Press.
- Wah, T. (1976). "Int. J. Solids Struct." **12**: 491-500.
- Wang, C. H., V. Venugopal and L. Peng (2015). "Stepped Flush Repairs for Primary Composite Structures." The Journal of Adhesion **91**(1-2): 95-112.
- Whittingham, B., A. A. Baker, A. Harman and D. Bitton (2009). "Micrographic studies on adhesively bonded scarf repairs to thick composite aircraft structure." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **40**(9): 1419-1432.
- Williams, M. L. (1959). "The stresses around a fault or crack in dissimilar media." Bulletin of the Seismological Society of America **49**(2): 199-204.
- Yang, Q. D. and M. D. Thouless (2001). "Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints." International Journal of Fracture **110**(2): 175-187.