



## Validação numérica de leis coesivas triangulares para previsão de resistência de juntas adesivas em tração e corte puros

RUI VALDEMAR CORREIA DE ARAÚJO

Julho de 2016

# VALIDAÇÃO NUMÉRICA DE LEIS COESIVAS TRIANGULARES PARA PREVISÃO DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS EM TRAÇÃO E CORTE PUROS

Rui Valdemar Correia de Araújo

1980512

**2016**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica



# VALIDAÇÃO NUMÉRICA DE LEIS COESIVAS TRIANGULARES PARA PREVISÃO DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS EM TRAÇÃO E CORTE PUROS

Rui Valdemar Correia de Araújo

1980512

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 de Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação de Francisco José Gomes da Silva.

**2016**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica





# JÚRI

## **Presidente**

A definir

## **Orientador**

Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

## **Co-orientador**

<Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, ISEP

## **Arguente**

A definir



## AGRADECIMENTOS

A realização desta Dissertação de Mestrado só foi possível graças à colaboração e ao contributo, de forma direta ou indireta, de várias pessoas, às quais gostaria de exprimir algumas palavras de agradecimento e profundo reconhecimento, em particular:

ao meu orientador Professor Doutor Raul Campilho pela oportunidade em trabalhar em conjunto e especialmente pela transmissão de conhecimento, experiência e aconselhamento que apresentou durante o tempo de realização deste trabalho. Foi sem dúvida uma longa jornada de aprendizagem contínua que envolveu dedicação, disponibilidade e incentivo;

ao Professor Doutor Francisco Silva, meu coorientador, pelo apoio prestado no desenrolar da elaboração da tese e revisão final da mesma, transmitindo também a sua valiosa experiência;

à minha família, em especial à Sofia e ao Tomás, pela privação de convívio que lhes causei. O apoio e compreensão inestimáveis, pelos diversos sacrifícios suportados e pelo constante encorajamento a fim de prosseguir a elaboração deste trabalho, foram sem dúvida vitais no decorrer desta longa etapa;

ao Nuno Veiga e Tiago Bompastor pela amizade e espírito de entreatajuda ao longo desta caminhada e em especial ao Tiago Ribeiro, pelo companheirismo e pela prestimosa colaboração que se transformaram em conselhos e sugestões, além das palavras de ânimo que imprimia sempre que achava necessário.



## PALAVRAS CHAVE

Juntas adesivas, Adesivo, Lei coesiva, Modelos de Dano Coesivo, Método de Elementos Finitos, Parâmetros coesivos.

## RESUMO

As ligações adesivas surgiram pela necessidade de se encontrar formas de unir componentes, por vezes de materiais distintos, através de técnicas mais vantajosas. Atualmente, qualquer estrutura deve ser resistente, robusta e leve, o que amplificou o interesse industrial e investigação nas ligações adesivas, principalmente na melhoria das propriedades de resistência e fratura de materiais. Desta forma, nos últimos anos, a utilização de juntas adesivas em aplicações industriais tem aumentando gradualmente, substituindo alguns métodos de ligação tradicionais, por apresentarem vantagens, tais como redução de concentração de tensões, reduzido peso e facilidade de processamento/fabrico. Em qualquer área da indústria, a aplicação em larga escala de uma determinada técnica de ligação supõe que estão disponíveis ferramentas confiáveis para o projeto e previsão da rotura. Neste âmbito, os Modelos de Dano Coesivo (MDC) são uma ferramenta fundamental, apesar de ser necessário estimar as leis coesivas do adesivo à tração e corte para entrada nos modelos numéricos.

Nesta dissertação o trabalho experimental consistiu no tratamento de dados com vista à obtenção de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ , com a devida comparação de diferentes métodos de redução, bem como potencialidades e limitações dos mesmos. É realizada uma comparação dos três adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. Neste trabalho estudou-se também numericamente a adequação de leis coesivas triangulares na previsão no comportamento de juntas adesivas, nomeadamente nas curvas força-deslocamento ( $P-\delta$ ) de ensaios *Double-Cantilever Beam* para caracterização à tração e ensaios *End-Notched Flexure* para caracterização ao corte. Os ensaios foram simulados numericamente pelo *software* ABAQUS®, recorrendo ao Método de Elementos Finitos (MEF) e um MDC triangular, com o intuito de estimar a lei coesiva de cada um dos adesivos.

Para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, à tração e ao corte, a lei triangular previu o comportamento do adesivo com alguma razoabilidade. Para a previsão da resistência do adesivo SikaForce® 7752, a lei triangular não se ajustou convenientemente nem à tração nem ao corte. Considera-se que, para este adesivo, uma lei trapezoidal é a que melhor se adequa, devido à ductilidade do mesmo.



**KEYWORDS**

Adhesive joints, Adhesive, Cohesive Law, Cohesive Zone Models, Finite Element Method, Cohesive parameters.

**ABSTRACT**

Adhesive joints emerged by the need to find ways of joining components, often of dissimilar materials, through more advantageous techniques. Currently, any structure should be strong, durable and lightweight, which amplified the industrial interest and research in adhesive bonds, particularly in the improvement of strength and fracture properties of the materials. Thus, in recent years, the use of adhesive joints in industrial applications is gradually increasing, replacing some traditional joining methods by providing advantages such as reduced stress concentration, reduced weight and easy of processing/manufacturing. In any area of industry, large-scale application of a particular bonding technique assumes that are reliable tools available for the design and prediction of failure. In this context, Cohesive Zone Models (CZM) are an important tool, although it is necessary to estimate the cohesive laws of adhesive in tension and shear to apply in the numerical models.

In this thesis, the experimental work consisted of processing previously available data to obtain  $G_{Ic}$  and  $G_{IIc}$ , and respective comparison of different reduction methods together with assessment and limitations of these. A comparison of three adhesive is performed: Araldite® AV138, Araldite® 2015 and SikaForce® 7752. This work also numerically studied the adequacy of triangular cohesive laws in predicting the behaviour of adhesive joints, particularly in the force-displacement curves ( $P-\delta$ ) of Double-Cantilever Beam tests for tensile characterization and End-Notched Flexure tests for shear characterization. The tests were numerically simulated by the software ABAQUS®, using the Finite Element Method (FEM) and a triangular CZM, in order to estimate the cohesive law of each of the adhesives.

For the adhesives Araldite®AV138 and Araldite®2015, triangular tensile and shear laws predicted the adhesive behaviour with some reasonableness. To predict the SikaForce® 7752 adhesive strength, the triangular law was not suitable neither in tension or shear. It is considered that, for this adhesive, a trapezoidal law is best suited due to the ductility of the same.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões
4ENF	<i>Four-point End-Notched Flexure</i>
ADCB	<i>Asymmetric Double-Cantilever Beam</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATDCB	<i>Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam</i>
CAD	Desenho assistido por computador
CBBM	<i>Compliance-Based Beam Method</i>
CBT	<i>Corrected Beam Theory</i>
CCM	<i>Compliance Calibration Method</i>
CLS	<i>Crack Lap Shear</i>
CT	<i>Compact Tension</i>
CZM	<i>Cohesive Zone Model</i>
DBT	<i>Direct Beam Theory</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
ELS	<i>End-Loaded Split</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>

---

FRMM	<i>Fixed Ratio Mixed-Mode</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JCI	Junta de chanfro interior
JD	Junta em degrau
JSD	Juntas de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
JTT	Junta topo-a-topo
MDC	Modelo do Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFE	Método de Elementos Finitos Extendido
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
MMB	<i>Mixed-Mode Bending</i>
MMF	<i>Mixed-Mode Flexure</i>
PVC	Policloreto de vinil
SDEG	<i>Stiffness degradation</i>
SENB	<i>Single Edge Notched Bend</i>
SLB	<i>Single Leg Bending</i>
TDCB	<i>Tapered Double Cantilever Beam</i>
TND	Teste Não Destrutivo
ZPF	Zona de processo de fratura

---

## Lista de Símbolos

$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\delta_n^0$	Deslocamento de carga máxima
$\delta_s^f$	Deslocamento de rotura
$a_0$	Comprimento da pré-fenda
$B$	Largura dos substratos
$E$	Módulo de Young
$E_{Pmáx}$	Energia libertada desde o início até à carga máxima
$E_{\delta máx}$	Energia libertada desde o início até á rutura
$G$	Taxa de Libertação de Energia
$G_c$	Taxa Crítica de Libertação de Energia
$h$	Espessura dos substratos
$L$	Comprimento dos substratos
$P$	Carga
$P_{máx}$	Carga máxima
$t_A$	Espessura adesiva
$t_n^0$	Resistência coesiva à tração
$t_s^0$	Resistência coesiva ao corte
$\delta$	Deslocamento
$\delta_{máx}$	Deslocamento máximo
$\delta_{Pmáx}$	Deslocamento na carga máxima



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - CONTEXTO HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO DE ADESIVOS [7].....	6
FIGURA 2 - ESTRUTURA ESQUEMÁTICA DE UM AVIÃO AIRBUS A380 APRESENTANDO ÁREAS DE JUNTAS ADESIVAS [8] .....	6
FIGURA 3 - APLICAÇÃO DE ADESIVOS EM CARROS MODERNOS [11].....	7
FIGURA 4 – ÁREAS POTENCIAIS DE APLICAÇÃO DE JUNTAS HÍBRIDAS [10] .....	7
FIGURA 5 – APLICAÇÃO DE ADESIVOS NUM BARCO DE LAZER [13].....	8
FIGURA 6 – CONSTITUIÇÃO TÍPICA DE UMA JUNTA ADESIVA [20].....	10
FIGURA 7 – TIPOS DE SOLICITAÇÕES TÍPICAS EM JUNTAS ADESIVAS A) TRAÇÃO, B) COMPRESSÃO, C) CORTE, D) ARRANCAMENTO (PEEL) E E) CLIVAGEM (CLEAVAGE) [5, 17] .....	11
FIGURA 8 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NO ADESIVO QUANDO SUJEITO A ESFORÇOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO [5] .....	12
FIGURA 9 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NOS ADESIVOS QUANDO SUJEITOS A ESFORÇOS DE CORTE [6].	13
FIGURA 10 – COMPARAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO DE UM ADESIVO RÍGIDO E DE UM ADESIVO DÚCTIL AO ARRANCAMENTO [5, 6] .....	13
FIGURA 11 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NOS ADESIVOS QUANDO SUJEITOS A ESFORÇOS DE ARRANCAMENTO E CLIVAGEM [20].....	14
FIGURA 12 – TIPOS DE JUNTAS MAIS COMUNS [5] .....	16
FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE CORTE NO ADESIVO NUMA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES [5] .....	17
FIGURA 14 – DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE ARRANCAMENTO NO ADESIVO NUMA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES [5] .....	17
FIGURA 15 – DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE ARRANCAMENTO NO ADESIVO NUMA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO DUPLA [5].....	18
FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE CORTE NA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES E NA JUNTA DE CHANFRO EXTERIOR [5] .....	19
FIGURA 17 – TIPOS DE COBRE-JUNTAS MAIS UTILIZADOS [6].....	19
FIGURA 18 – DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE JUNTAS PARA A) VARÕES B) CILINDROS OU TUBOS [6]..	20
FIGURA 19 – FLUXOGRAMA COM CLASSIFICAÇÃO BÁSICA DE ADESIVOS [17] .....	21
FIGURA 20 – JSS COM CANTOS ARREDONDADOS [43].....	27

FIGURA 21 - VARIAÇÃO DA TENSÃO PRINCIPAL MÁXIMA DO ADESIVO COM UMA CARGA APLICADA DE 20 KN [43] .....	28
FIGURA 22 – ELEMENTOS COESIVOS (A) PARA SIMULAR ESPESSURA ZERO NA INTERFACE – APROXIMAÇÃO LOCAL (B) PARA SIMULAR UMA PEQUENA CAMADA DE ADESIVO COM ESPESSURA CONSTANTE – APROXIMAÇÃO CONTÍNUA [43].....	30
FIGURA 23 – MODELO COESIVO DE DANO TRIANGULAR [43] .....	31
FIGURA 24 – MODELO COESIVO DE DANO TRAPEZOIDAL [79] .....	31
FIGURA 25 – LEI COESIVA EM TRAÇÃO PARA OS ADESIVOS ARALDITE® AV138 E ARALDITE® 2015 [81]...	32
FIGURA 26 – LEI COESIVA EM CORTE PARA OS ADESIVOS ARALDITE® AV138 E ARALDITE® 2015 [81] .....	33
FIGURA 27 – DESVIO PERCENTUAL ENTRE OS VALORES EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS DE $P_{MÁX}$ PARA O ARALDITE® 2015 [81] .....	33
FIGURA 28 – DESVIO PERCENTUAL ENTRE OS VALORES EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS DE $P_{MÁX}$ PARA O ARALDITE® AV138 [81].....	34
FIGURA 29 – DEGRADAÇÃO DA RIGIDEZ PARA AS JUNTAS COM $L_0=80$ MM E COM O (A) ARALDITE® AV138 (B) E ARALDITE® 2015 QUANDO $P_{MÁX}$ É ATINGIDO (LEI TRAPEZOIDAL) [81] .....	35
FIGURA 30 – LEIS COESIVAS (A) À TRAÇÃO (B) E CORTE PARA ALTERAÇÃO DE $G_{IC}$ E $G_{IIC}$ ENTRE -80 ATÉ +100% DO VALOR INICIAL [83].....	37
FIGURA 31 – LEIS COESIVAS (A) À TRAÇÃO (B) E CORTE PARA ALTERAÇÃO DE $T_N^0$ E $T_S^0$ ENTRE -80 ATÉ +100% DO VALOR INICIAL [83].....	37
FIGURA 32 – VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}/P_{M0}$ COM VALORES DE $G_{IC}$ DESDE -80 ATÉ +100% DO VALOR INICIAL [83] .....	38
FIGURA 33 – VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}/P_{M0}$ COM VALORES DE $G_{IIC}$ DESDE -80 ATÉ +100% DO VALOR INICIAL [83] .....	38
FIGURA 34 – VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}/P_{M0}$ COM VALORES DE $G_{IC} + G_{IIC}$ DESDE -80 ATÉ +100% DOS VALORES INICIAIS [83].....	38
FIGURA 35 – VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}/P_{M0}$ COM VALORES DE $T_N^0$ DESDE -80 ATÉ +100% DO VALOR INICIAL [83] .....	39
FIGURA 36 – VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}/P_{M0}$ COM VALORES DE $T_S^0$ DESDE -80 ATÉ +100% DO VALOR INICIAL [83] .....	39
FIGURA 37 – VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}/P_{M0}$ COM VALORES DE $T_N^0$ E $T_S^0$ DESDE -80 ATÉ +100% DOS VALORES INICIAIS [83] .....	40
FIGURA 38 – VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}/P_{M0}$ COM VALORES DE $G_{IC}$ , $G_{IIC}$ , $T_{N0}$ E $T_{S0}$ DESDE -80 ATÉ +100% DOS VALORES INICIAIS [83].....	40
FIGURA 39 – MODOS DE ROTURA [5].....	44

FIGURA 40 – COMBINAÇÃO ENTRE OS MODOS PRINCIPAIS DE CARREGAMENTO [1].....	45
FIGURA 41 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO DCB [5].....	46
FIGURA 42 – GEOMETRIA DO ENSAIO DCB ADOTADA PELA NORMA ASTM D3433-99 (DIMENSÕES EM MM) [5].....	46
FIGURA 43 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO ENF [5] .....	48
FIGURA 44 – CURVAS $\Sigma$ - $\epsilon$ DA LIGA DE ALUMÍNIO AW6082-T651 E RESPECTIVA APROXIMAÇÃO PARA ANÁLISE ATRAVÉS DO MEF [59].....	54
FIGURA 45 – MODO DE FORNECIMENTO DA RESINA ARALDITE® AV 138 E ENDURECEDOR HV 998 [113] .....	55
FIGURA 46 – CURVAS $\Sigma$ - $\epsilon$ RELATIVAS AO ADESIVO ARALDITE® AV 138 [114].....	55
FIGURA 47 – MODO DE FORNECIMENTO DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [115].....	57
FIGURA 48 – CURVAS $\Sigma$ - $\epsilon$ RELATIVA AO ADESIVO ARALDITE® 2015 [114] .....	57
FIGURA 49 – MODO DE FORNECIMENTO DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [116].....	59
FIGURA 50 – CURVA $\Sigma$ - $\epsilon$ RELATIVA AO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [117].....	59
FIGURA 51 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM ENSAIO DCB [103].....	61
FIGURA 52 – GRANALHADORA CIDBLAST, MODELO RT6S [1].....	62
FIGURA 53 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA LOCALIZAÇÃO DOS CALÇOS [1] .....	62
FIGURA 54 – MÁQUINA DE ENSAIOS SHIMADZU AG-X 100 [3].....	63
FIGURA 55 – FACE LATERAL DO PROVETE CAPTADA PELA CÂMARA [1] .....	63
FIGURA 56 – EVOLUÇÃO DAS CURVAS $P$ - $\Delta$ DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [1] .....	65
FIGURA 57 – CURVAS- $R$ DE UM PROVETE DCB COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 [1] .....	67
FIGURA 58 – EVOLUÇÃO DAS CURVAS $P$ - $\Delta$ DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [1].....	68
FIGURA 59 – CURVAS- $R$ DE UM PROVETE DCB COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 [1].....	70
FIGURA 60 – CURVAS $P$ - $\Delta$ DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [2].....	71
FIGURA 61 – CURVA- $R$ DE UM PROVETE DCB COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [2].....	73
FIGURA 62 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM ENSAIO ENF [101].....	74
FIGURA 63 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA LOCALIZAÇÃO DOS CALÇOS CALIBRADOS [3].....	75
FIGURA 64 – CURVAS $P$ - $\Delta$ PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 [3] .....	77
FIGURA 65 – CURVAS- $R$ DE UM PROVETE ENF COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 [3].....	80
FIGURA 66 – CURVAS $P$ - $\Delta$ PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015 [3].....	81
FIGURA 67 – CURVAS- $R$ DE UM PROVETE ENF COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 [3] .....	84

FIGURA 68 - CURVAS $P-\Delta$ PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 L60 [3].....	85
FIGURA 69 – CURVA- $R$ DE UM PROVETE ENF COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [3].....	88
FIGURA 70 – VALOR MÉDIO DE $G_{Ic}$ E DESVIOS PADRÃO PELOS QUATRO MÉTODOS E PARA OS TRÊS ADESIVOS [118].....	89
FIGURA 71 – VALOR MÉDIO DE $G_{IIC}$ E DESVIOS PADRÃO PELOS QUATRO MÉTODOS E PARA OS TRÊS ADESIVOS [3].....	90
FIGURA 72 – MALHA DO PROVETE DCB .....	91
FIGURA 73 – REFINAMENTO DA MALHA DO PROVETE DCB NA EXTREMIDADE DA PRÉ-FENDA .....	92
FIGURA 74 – REFINAMENTO GERAL DE MALHA DO MODELO UTILIZADO NOS PROVETES ENF .....	92
FIGURA 75 – DETALHE DA MALHA MEF NA PROXIMIDADE DA EXTREMIDADE DA FENDA.....	93
FIGURA 76 – DETALHE DA MALHA DE MEF NA ZONA DE CONTACTO ENTRE O PROVETE E UM DOS CILINDROS DE SUPORTE.....	93
FIGURA 77 – DETALHE DA MALHA DE MEF NA ZONA DE CONTACTO ENTRE O PROVETE E O PUNÇÃO DE CARREGAMENTO .....	94
FIGURA 78 – CONDIÇÕES FRONTEIRA E DE CARREGAMENTO IMPOSTAS NOS MODELOS NUMÉRICOS...94	
FIGURA 79 – DETALHE DA ZONA DE CONTACTO NO CILINDRO DE SUPORTE .....	94
FIGURA 80 – DETALHE DA ZONA DE CONTACTO ENTRE ADERENTES NA PROXIMIDADE DA EXTREMIDADE DA FENDA.....	95
FIGURA 81 – DETALHE DA ZONA DE CONTACTO NO PUNÇÃO DE CARREGAMENTO.....	95
FIGURA 82 – COMPARATIVO DAS CURVAS $P-\Delta$ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA APÓS O PROCEDIMENTO DE AJUSTE DE UM PROVETE DCB COLADO COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 .....	98
FIGURA 83 – LEIS COESIVAS OBTIDAS POR AJUSTE NUMÉRICO PARA OS PROVETES DCB COLADOS COM O ADESIVO ARALDITE® AV 138, E RESPETIVA LEI COESIVA MÉDIA .....	99
FIGURA 84 – COMPARATIVO DAS CURVAS $P-\Delta$ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA APÓS O PROCEDIMENTO DE AJUSTE DE UM PROVETE DCB COLADO COM O ADESIVO ARALDITE® 2015.....	101
FIGURA 85 – LEIS COESIVAS OBTIDAS POR AJUSTE NUMÉRICO PARA OS PROVETES DCB COLADOS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, E RESPETIVA LEI COESIVA MÉDIA.....	102
FIGURA 86 – COMPARATIVO DAS CURVAS $P-\Delta$ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA APÓS O PROCEDIMENTO DE AJUSTE DE UM PROVETE DCB COLADO COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	103
FIGURA 87 – LEIS COESIVAS OBTIDAS POR AJUSTE NUMÉRICO PARA OS PROVETES DCB COLADOS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, E RESPETIVA LEI COESIVA MÉDIA.....	105
FIGURA 88 – COMPARATIVO DAS CURVAS $P-\Delta$ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA APÓS O PROCEDIMENTO DE AJUSTE DE UM PROVETE ENF COLADO COM O ADESIVO ARALDITE® AV138.....	107

---

FIGURA 89 – LEIS COESIVAS OBTIDAS POR AJUSTE NUMÉRICO PARA OS PROVETES ENF COLADOS COM O ADESIVO ARALDITE® AV 138, E RESPETIVA LEI COESIVA MÉDIA .....	108
FIGURA 90 – COMPARATIVO DAS CURVAS $P-\Delta$ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA APÓS O PROCEDIMENTO DE AJUSTE DE UM PROVETE ENF COLADO COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 .....	109
FIGURA 91 – LEIS COESIVAS OBTIDAS POR AJUSTE NUMÉRICO PARA OS PROVETES ENF COLADOS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, E RESPETIVA LEI COESIVA MÉDIA.....	111
FIGURA 92 – COMPARATIVO DAS CURVAS $P-\Delta$ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA APÓS O PROCEDIMENTO DE AJUSTE DE UM PROVETE ENF COLADO COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 .....	112
FIGURA 93 – LEIS COESIVAS OBTIDAS POR AJUSTE NUMÉRICO PARA OS PROVETES ENF COLADOS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, E RESPETIVA LEI COESIVA MÉDIA.....	114
FIGURA 94 – COMPARAÇÃO DE VALORES DE $G_{IC}$ EXPERIMENTAL, PARA OS TRÊS ADESIVOS .....	115
FIGURA 95 – COMPARAÇÃO DE VALORES DE $G_{IIC}$ EXPERIMENTAL, PARA OS TRÊS ADESIVOS.....	115
FIGURA 96 – DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE CORTE EM ADESIVOS FRÁGEIS E DÚCTEIS [23] .....	116



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – COMPARAÇÃO DAS FORMAS TÍPICAS DE LIGAÇÃO DE MATERIAIS [4] .....	5
TABELA 2 – MODOS DE ROTURA DE JUNTAS ADESIVAS [5] .....	15
TABELA 3 - RESUMO DOS MODELOS ANALÍTICOS PARA JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES [5] .....	24
TABELA 4 – EXEMPLOS DE ENSAIOS PARA O MODO MISTO I+II [107, 110] .....	49
TABELA 5 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%) DA LIGA DE ALUMÍNIO AW 6082-T651 [112].....	54
TABELA 6 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO AW6082-T651 [112].....	54
TABELA 7 – PROPRIEDADES RELATIVAS AO ADESIVO ARALDITE® AV138 [114] .....	56
TABELA 8 – PROPRIEDADES RELATIVAS AO ADESIVO ARALDITE® 2015 [71, 81, 114].....	58
TABELA 9 – PROPRIEDADES RELATIVAS AO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [117] .....	60
TABELA 10 – DIMENSÕES DOS PROVETES DCB [1, 118] .....	64
TABELA 11 – VALORES DE $P_{MÁX}$ , $\Delta P_{MÁX}$ , $\Delta M_{MÁX}$ , $E_{PMÁX}$ E $E_{\Delta M_{MÁX}}$ PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 [1].....	66
TABELA 12 – VALORES DE $G_{IC}$ PELOS QUATRO MÉTODOS PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 [1].....	67
TABELA 13 – VALORES DE $P_{MÁX}$ , $\Delta P_{MÁX}$ , $\Delta M_{MÁX}$ , $E_{PMÁX}$ E $E_{\Delta M_{MÁX}}$ PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015 [1] .....	69
TABELA 14 – VALORES DE $G_{IC}$ PELOS QUATRO MÉTODOS PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015 [1] .....	70
TABELA 15 – VALORES DE $P_{MÁX}$ , $\Delta P_{MÁX}$ PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 .....	72
TABELA 16 – VALORES DE $G_{IC}$ PARA O MÉTODO CBBM PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [2] .....	73
TABELA 17 – CONTROLO DIMENSIONAL DOS SUBSTRATOS DE ALUMÍNIO (MM) [3].....	75
TABELA 18 – IDENTIFICAÇÃO DOS PROVETES DE ENSAIO E RESPECTIVAS DIMENSÕES (MM) [3] .....	76
TABELA 19 – VALORES DE $P_{MÁX}$ E RESPETIVO $\delta_{PMÁX}$ DAS CURVAS $P-\Delta$ DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [3].....	78
TABELA 20 – VALORES DE $G_{IIC}$ DO ARALDITE® AV138 OBTIDOS PELOS VÁRIOS MÉTODOS [3] .....	79
TABELA 21 - VELOCIDADE DE SOLICITAÇÃO, VALORES DE $P_{MÁX}$ E RESPETIVO $\delta_{PMÁX}$ DAS CURVAS $P-\Delta$ DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [3] .....	82
TABELA 22 – VALORES DE $G_{IIC}$ DO ARALDITE® 2015 OBTIDOS PELOS VÁRIOS MÉTODOS [3].....	83
TABELA 23 – VELOCIDADE DE SOLICITAÇÃO, VALORES DE $P_{MÁX}$ E RESPETIVO $\delta_{PMÁX}$ DAS CURVAS $P-\Delta$ DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [3] .....	86
TABELA 24 – VALORES DE $G_{IIC}$ DO SIKAFORCE® 7752 OBTIDOS PELO MÉTODO CBBM [3] .....	87

---

TABELA 25 – MÉDIA E DESVIO-PADRÃO DE $G_{IC}$ PARA OS VÁRIOS MÉTODOS E ADESIVOS [N/MM] [2, 118]	88
TABELA 26 – MÉDIA E DESVIO-PADRÃO DE $G_{IIC}$ PARA OS VÁRIOS MÉTODOS E ADESIVOS [N/MM] [3] ....	89
TABELA 27 – VALORES DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DAS JUNTAS DCB COLADAS COM ADESIVO ARALDITE® AV138.....	97
TABELA 28 – VALORES OBTIDOS PELA LEI COESIVA TRIANGULAR, À TRAÇÃO, DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	99
TABELA 29 – VALORES DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DAS JUNTAS DCB COLADAS COM ADESIVO ARALDITE® 2015 .....	100
TABELA 30 – VALORES OBTIDOS PELA LEI COESIVA TRIANGULAR, À TRAÇÃO, DO ADESIVO ARALDITE® 2015 .....	101
TABELA 31 – VALORES DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DAS JUNTAS DCB COLADAS COM ADESIVO SIKAFORCE® 7752 .....	103
TABELA 32 – VALORES OBTIDOS PELA LEI COESIVA TRIANGULAR, À TRAÇÃO, DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 .....	104
TABELA 33 – VALORES DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DAS JUNTAS ENF COLADAS COM ADESIVO ARALDITE® AV138.....	106
TABELA 34 – VALORES OBTIDOS PELA LEI COESIVA TRIANGULAR, AO CORTE, DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	107
TABELA 35 – VALORES DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DAS JUNTAS ENF COLADAS COM ADESIVO ARALDITE® 2015 .....	109
TABELA 36 – VALORES OBTIDOS PELA LEI COESIVA TRIANGULAR, AO CORTE, DO ADESIVO ARALDITE® 2015 .....	110
TABELA 37 – VALORES DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DAS JUNTAS ENF COLADAS COM ADESIVO SIKAFORCE® 7752 .....	112
TABELA 38 – VALORES OBTIDOS PELA LEI COESIVA TRIANGULAR, AO CORTE, DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 .....	113

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>1</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização do relatório</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Ligação de componentes por juntas adesivas</b>	<b>5</b>
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	8
2.1.2	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	11
2.1.1	Configurações possíveis de junta	16
2.1.2	Adesivos estruturais	20
<b>2.2</b>	<b>Previsão de resistência das juntas</b>	<b>23</b>
2.2.1	Modelos analíticos	24
2.2.2	Métodos numéricos	26
2.2.2.1	Mecânica dos meios contínuos	27
2.2.2.2	Mecânica da fratura	28
2.2.2.3	Modelos de dano coesivo	29
2.2.2.3.1	Tipos de leis coesivas	31
2.2.2.3.2	Influência do tipo de lei coesiva na resistência das juntas	32
2.2.2.3.3	Influência dos parâmetros coesivos na resistência das juntas	36
2.2.2.3.4	Métodos de determinação dos parâmetros coesivos	40
2.2.2.4	Mecânica do dano	41

---

2.2.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido.....	42
<b>2.3</b>	<b>Ensaaios de caracterização à fratura.....</b>	<b>43</b>
2.3.1	Modo puro I.....	45
2.3.2	Modo puro II.....	47
2.3.3	Modo misto I+II .....	48
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1</b>	<b>Trabalho experimental .....</b>	<b>53</b>
3.1.1	Materiais utilizados .....	53
3.1.1.1	Substratos .....	53
3.1.1.2	Adesivos .....	54
3.1.1.2.1	Araldite® AV138 .....	55
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	56
3.1.1.2.3	SikaForce® 7752 .....	58
3.1.2	Ensaaios DCB .....	60
3.1.2.1	Geometria, fabrico e teste dos provetes DCB.....	60
3.1.2.2	Resultados obtidos para o adesivo Araldite® AV138 .....	65
3.1.2.3	Resultados obtidos para o adesivo Araldite® 2015 .....	67
3.1.2.4	Resultados obtidos para o adesivo Sikaforce® 7752 .....	70
3.1.3	Ensaaios ENF .....	74
3.1.3.1	Geometria, fabrico e teste dos provetes ENF .....	74
3.1.3.2	Resultados obtidos para o adesivo Araldite® AV138 .....	77
3.1.3.3	Resultados obtidos para o adesivo Araldite® 2015 .....	80
3.1.3.4	Resultados obtidos para o adesivo Sikaforce® 7752 .....	84
3.1.4	Análise do comportamento das juntas.....	88
<b>3.2</b>	<b>Trabalho numérico .....</b>	<b>90</b>
3.2.1	Condições da análise numérica .....	91
3.2.2	Modelos de dano coesivo.....	95
3.2.2.1	Modelo de dano triangular .....	95

---

3.2.3	Estimativa das leis coesivas em tração.....	96
3.2.3.1	Araldite® AV138.....	96
3.2.3.2	Araldite® 2015.....	100
3.2.3.3	Sikaforce® 7752.....	102
3.2.4	Estimativa das leis coesivas em corte.....	105
3.2.4.1	Araldite® AV138.....	106
3.2.4.2	Araldite® 2015.....	108
3.2.4.3	Sikaforce® 7752.....	111
3.2.5	Análise dos resultados obtidos.....	114
4	CONCLUSÕES.....	121
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	127



# INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização do relatório



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A utilização de ligações adesivas tem vindo nos últimos anos a ganhar destaque de uma forma gradual em relação aos métodos de união tradicionais (soldadura, ligações aparafusadas, entre outros), tornando-se hoje em dia numa técnica de ligação cada vez mais predominante em várias indústrias, como são o caso da automóvel e aeronáutica. As ligações adesivas apresentam menores concentrações de tensões, boa resistência à fadiga, redução de custo de fabrico e possibilidade de união de diversos tipos de materiais. A existência e aperfeiçoamento de vários modelos de previsão de dano ao longo dos últimos anos, principalmente através do Método de Elementos Finitos (MEF), têm criado condições ao desenvolvimento desta técnica de ligação. Os métodos de previsão de resistência assentes em parâmetros energéticos apresentam várias vantagens relativamente aos métodos baseados na Resistência dos Materiais, nomeadamente em estruturas com singularidades de tensões e quando os materiais envolvidos apresentam comportamento plástico.

Desta forma, os Modelos de Dano Coesivo (MDC) apresentam-se como uma ferramenta com potencial para a modelação de juntas adesivas, e combinam critérios da resistência dos materiais para modelar a iniciação de dano e conceitos da Mecânica da Fratura para lidar com a propagação. Com este método, não há necessidade de existência de defeitos iniciais, ao mesmo tempo que se evita os problemas da dependência da malha, característicos dos métodos baseados em tensões. Contudo, os MDC requerem uma medição muito precisa das energias críticas de fratura, para efeitos de previsão da propagação do dano. Os parâmetros coesivos têm uma preponderância assinalável nos resultados das simulações, nomeadamente a tenacidade à tração ( $G_{Ic}$ ) e a resistência à tração ( $t_n^0$ ) para a lei coesiva à tração, e a tenacidade ao corte ( $G_{IIc}$ ) e a resistência coesiva ao corte ( $t_s^0$ ) para a lei coesiva ao corte. A forma da lei coesiva também influencia a previsão de resistência de juntas adesivas por MDC e, mediante a ductilidade do adesivo em estudo, diferentes leis coesivas podem ser recomendadas. A aplicabilidade da lei triangular é mais usual, muito devido à sua simplicidade e implementação mais generalizada em *softwares* de MEF.

## 1.2 Objetivos

Nesta dissertação estuda-se numericamente a adequação de leis coesivas triangulares na previsão no comportamento de juntas adesivas, nomeadamente nas curvas força-deslocamento ( $P-\delta$ ) de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) para caracterização à tração e ensaios *End-Notched Flexure* (ENF) para caracterização ao corte.

Três tipos de adesivos foram alvo de estudo experimental, nomeadamente o Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. Este estudo centrou-se no tratamento de

dados após os ensaios DCB e ENF, para a identificação das curvas força vs. deslocamento ( $P-\delta$ ). Após obter estas informações e com a medição do comprimento de fenda durante o ensaio, foi possível a obtenção das curvas de resistência (curvas- $R$ ) através de vários métodos de redução com o intuito de determinar a tenacidade à fratura ( $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ ) dos adesivos estruturais em estudo. Naturalmente, é realizada também uma comparação do comportamento dos três adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

Através do recurso ao *software* ABAQUS® e a um MDC triangular pretende-se validar numericamente as leis coesivas obtidas experimentalmente por ensaios DCB (tração) e ENF (corte) pelo método inverso, recorrendo à comparação entre as  $P-\delta$  numéricas e experimentais.

### 1.3 Organização do relatório

A presente dissertação está organizada da seguinte forma:

No capítulo 1 é apresentado o enquadramento geral do trabalho, indicados os principais objetivos do trabalho e descrita a organização do relatório.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica com os temas fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação. Descrevem-se generalidades das ligações adesivas e dos adesivos estruturais, bem como os ensaios mais comuns para cada modo de carregamento, e referem-se ainda técnicas de previsão da resistência de juntas adesivas como a mecânica dos meios contínuos, mecânica da fratura e os modelos de dano coesivo.

No capítulo 3 é descrito o trabalho experimental que serviu de base para a presente dissertação, realizado em trabalhos anteriores, nomeadamente os ensaios DCB com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 por Constante [1] e com o adesivo Sikaforce® 7752 por Campilho et al. [2], assim como os ensaios ENF para os três adesivos referidos por Azevedo [3]. Neste capítulo é descrito o procedimento experimental, que envolve a caracterização dos materiais utilizados, o fabrico dos provetes, os ensaios em tração e em corte, bem como é apresentada a análise de resultados para dos três adesivos.

No capítulo 4 é apresentada a modelação numérica efetuada no *software* Abaqus®, incluindo as previsões de comportamento dos ensaios DCB e ENF, e comparação com os resultados obtidos experimentalmente. As simulações numéricas foram efetuadas cumprindo com as condições da análise numérica, com o objetivo de validação das leis coesivas obtidas para cada ensaio pelo método inverso após parametrização para uma lei coesiva triangular.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas, assim como é realizada referência a possíveis trabalhos futuros.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## **2.1 Ligação de componentes por juntas adesivas**

- 2.1.1 Caracterização das juntas adesivas
- 2.1.2 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas
  - 2.1.1 Configurações possíveis de junta
  - 2.1.2 Adesivos estruturais

## **2.2 Previsão de resistência das juntas**

- 2.2.1 Modelos analíticos
- 2.2.2 Métodos numéricos

## **2.3 Ensaio de caracterização à fratura**

- 2.3.1 Modo puro I
- 2.3.2 Modo puro II
- 2.3.3 Modo misto I+II



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ligação de componentes por juntas adesivas

O desenvolvimento da tecnologia de adesivos tornou possível a utilização das ligações adesivas em muitos campos de engenharia. Atualmente, nas indústrias, desenvolvem-se componentes que eventualmente terão que ser unidos e, para este fim, projetistas e engenheiros podem optar por vários tipos de união de materiais: soldadura, aparafusamento, rebiteagem ou ligações adesivas. Em muitos casos, o binómio custo-benefício poderá ser o elemento diferenciador. Na Tabela 1 é feita uma comparação com algumas características das formas de união típicas de materiais.

Tabela 1 – Comparação das formas típicas de ligação de materiais [4]

	Juntas adesivas	Aparafusamento	Soldadura	Juntas híbridas (adesivas e aparafusamento)
<b>Necessidade de preparação de superfície</b>	Extensa	Pequena	Pequena	Extensa
<b>União de materiais diferentes</b>	Boa	Limitada	Pobre	Boa
<b>Peso adicional para a estrutura</b>	Baixo	Alto	Moderado	Moderado
<b>Resistência à fadiga</b>	Alta	Pobre	Moderada	Moderada
<b>Resistência à corrosão</b>	Alta	Pobre	Moderada	Moderada
<b>Inspeção por Testes Não Destrutivos (TND)</b>	Muito Limitada	Adequada	Adequada	Limitada
<b>Facilidade na desmontagem</b>	Difícil	Fácil	Difícil	Difícil
<b>Custos de produção</b>	Médio	Baixo	Baixo	Alto
<b>Resistência à degradação e meio ambiente</b>	Pobre	Pobre	Moderada	Moderada
<b>Tempo de produção</b>	Lento	Rápido	Moderado	Lento

Atualmente, várias indústrias poderão ser apontadas como grandes impulsionadoras do estudo e desenvolvimento de ligações adesivas. Os adesivos e vedantes começaram a ser usados há muitos anos atrás. A maioria destes tinha origem vegetal, animal e substâncias minerais. Com o aparecimento de adesivos poliméricos sintéticos no início do século XX (Figura 1), e devido às características mecânicas apresentadas pelos mesmos, nasce um interesse por parte de algumas indústrias em desenvolver estes materiais, pois possibilitavam a diversificação de união de materiais devido à sua capacidade de adesão entre superfícies e resistência em ambientes adversos. Entre os anos de 1940 e 1950 verificou-se um forte crescimento no desenvolvimento de adesivos estruturais e vedantes, impulsionado pela indústria aeronáutica militar (Figura 2). Um dos fatores que levou a este crescimento no interesse pelos adesivos estruturais, foi a vantajosa relação resistência/peso [5, 6].

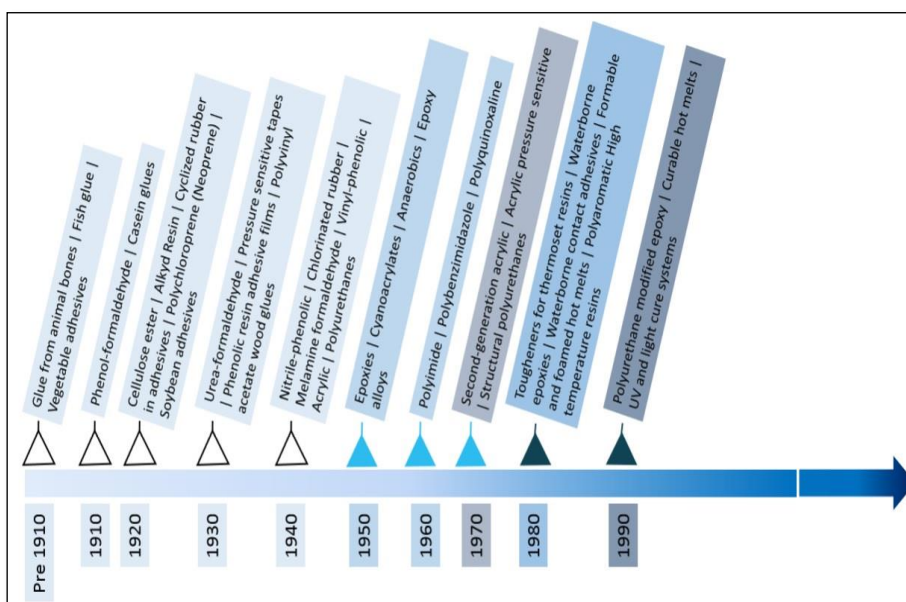


Figura 1 - Contexto histórico da evolução de adesivos [7]

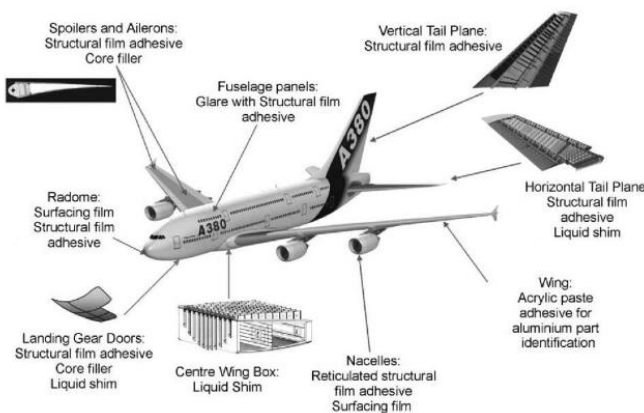


Figura 2 - Estrutura esquemática de um avião Airbus A380 apresentando áreas de juntas adesivas [8]

O sucesso das ligações adesivas na indústria aeronáutica levou a uma generalização para outros sectores. A indústria automóvel é um bom exemplo desta generalização. Os fabricantes de automóveis confiam na tecnologia adesiva como se de um componente das suas linhas de produção se tratasse. Segundo o fabricante de adesivos Jowat Adhesives [9], em cada veículo, atualmente é estimado que sejam utilizados 15 kg de diferentes adesivos na sua montagem.

No fabrico de um automóvel, as ligações adesivas podem ser usadas em pontos-chave, tais como [10]:

- União de materiais não soldáveis e/ou componentes ou materiais sensíveis a altas temperaturas;
- Construção de componentes que são de acesso difícil ou até mesmo impossível a equipamentos de soldadura;
- União de vários substratos metálicos e não metálicos com o cuidado de evitar corrosão galvânica;
- Redução de tempos de ciclo e custos de produção pela eliminação de pontos de soldadura.



Figura 3 - Aplicação de adesivos em carros modernos [11]



Figura 4 – Áreas potenciais de aplicação de juntas híbridas [10]

A aplicação de juntas adesivas em componentes estruturais para aplicações na indústria automóvel (Figura 3 e Figura 4) tem aumentado significativamente nos últimos anos e oferece muitos benefícios como a redução de peso, economia de combustível e redução de emissões [12].

A indústria naval também é apontada como um bom exemplo de aplicação de juntas adesivas (Figura 5). São utilizados cada vez mais plásticos e compósitos pelas suas características: baixo peso, resistência à corrosão e facilidade de processamento. Outras indústrias poderão ser apontadas como um exemplo de aplicação deste tipo de ligação. Na medicina (medicina dentária); na moda (indústria do calçado), na construção civil (pontes, painéis, caixilharias, etc.) ou no desporto (bicicletas, raquetes de ténis, tacos de golfe, esquis, etc.) [5].



Figura 5 – Aplicação de adesivos num barco de lazer [13]

Os desempenhos de juntas adesivas são fortemente afetados pelas características adesivas, a interação de aderente/adesivo, e pela variabilidade destas características no tempo e sob condições ambientais [14]. A baixa densidade dos adesivos, devida em parte à sua natureza polimérica, faz com que seja uma forma muito atrativa de ligar materiais, especialmente para tornar estruturas mais leves, como é o caso da indústria aeroespacial [15].

### 2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Várias questões se colocam às técnicas tradicionais de união de materiais. Entre elas, a durabilidade dos materiais que provoca alterações nas boas práticas de dimensionamento de estruturas e até mesmo a regulamentação de cada indústria. As exigências das indústrias estão em constante evolução, levando a que surjam novos

materiais estruturais, mais leves, menos sujeitos a degradação e que exijam menos manutenção [16].

Os adesivos assumem-se, cada vez mais, como uma alternativa às técnicas tradicionais de união de materiais. Um adesivo é um material polimérico que é aplicado às superfícies de materiais de forma a uni-los permanentemente por um processo de ligação adesiva. De realçar a quantidade relativamente pequena de adesivo necessária em comparação com o peso dos objetos finais [17]. Os adesivos poderão ser escolhidos então tendo como base a sua capacidade de fixação e resistência. A função primária de um adesivo é a união de materiais semelhantes ou diferentes. No entanto, é de realçar que a rotura das juntas adesivas é fortemente influenciada pela distribuição não uniforme de tensões e deformações que geralmente se desenvolvem nas uniões de materiais. As tensões máximas normalmente localizadas nas extremidades da ligação podem determinar a rotura da junta. Este fenómeno é especialmente crítico quando são usados adesivos frágeis [18].

As ligações adesivas são bastante competitivas porque permitem economizar peso, asseguram uma melhor distribuição de tensões e oferecem uma melhor estética, uma vez que a linha de união é praticamente invisível [19]. Na ligação adesiva, teoricamente, há distribuição das cargas e tensões sobre a área total da ligação, em vez de as concentrar em apenas alguns pontos. Desta forma, a ligação com adesivos é mais resistente à flexão e vibração do que, por exemplo, a montagem com rebites [20]. É importante realçar que as juntas adesivas atuam sobre áreas e não em pontos únicos, levando a que um dos objetivos seja minimizar a concentração de tensões. A seleção do tipo de junta deverá ter em conta alguns fatores importantes, tais como: as limitações das instalações em fase de produção, os custos de produção e a aparência final desejada da peça [17].

Uma junta adesiva corresponde à zona na qual dois aderentes estão ligados entre si através de um adesivo. É constituída por (Figura 6) [20]:

**Aderente** – componente ligado através de um adesivo. É importante distinguir dois termos que normalmente são utilizados. Aderente é normalmente utilizado para designar o componente após a colagem. O termo substrato é normalmente utilizado para denominar o material a ser ligado.

**Adesivo** – é o material que irá proceder à união entre dois substratos e que deve ser capaz de resistir à sua separação, pela ação combinada de diferentes forças: forças adesivas (adesão) e forças coesivas (coesão).

**Primário** – é um revestimento que normalmente é utilizado nas superfícies dos substratos antes da aplicação de um adesivo, para promover uma melhor adesão ou até mesmo de proteção entre superfícies até a aplicação do adesivo. Nem sempre este revestimento é necessário.

**Interface** – é o plano de contacto entre duas superfícies de dois materiais, por exemplo, entre o adesivo e o aderente.

**Interfase** – A interface está abrangida na interfase. Esta última região situa-se entre o adesivo e o aderente e estende-se desde um ponto no aderente, onde as propriedades locais (físicas, químicas, mecânicas e morfológicas) começam a alterar-se.

Numa ligação ideal, o aderente deverá ser sempre o elo mais fraco [5].

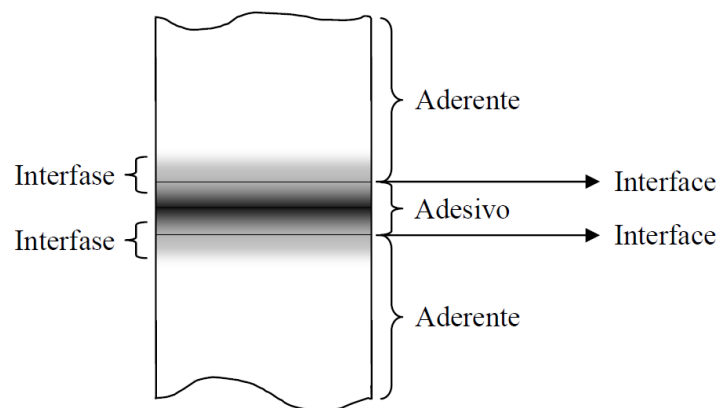


Figura 6 – Constituição típica de uma junta adesiva [20]

A resistência de uma junta adesiva é determinada principalmente por [17]:

- As propriedades mecânicas dos aderentes e do adesivo;
- As tensões internas residuais;
- Boa ligação interfacial;
- A geometria da junta.

As ligações adesivas atualmente conseguem oferecer diversas vantagens quando comparadas com as técnicas tradicionais de união de materiais como a soldadura, rebite e aparafusamento. As principais vantagens apontadas às ligações adesivas estruturais são [5, 17, 21, 22]:

- Capacidade de unir materiais de diversas espessuras com várias geometrias;
- Capacidade de unir materiais semelhantes ou diferentes;
- Minimização ou prevenção da corrosão electroquímica (galvânica) entre materiais diferentes;
- Maior resistência à fadiga e cargas cíclicas, devido a uma melhor distribuição de tensões;
- Boa capacidade de vedação em vários tipos de ambientes;
- A quantidade de calor necessária para a obtenção de ligações adesivas é geralmente muito baixa para afetar a resistência de aderentes metálicos;
- Resistência a vibrações e absorção ao choque;
- Redução de custos (possibilidade de automatização);

- Eliminação da distorção térmica associada a processos de soldadura;
- Melhoria da estética da estrutura, uma vez que a ligação adesiva é quase invisível.

Contudo, são apontadas também algumas desvantagens das ligações adesivas, que deverão ser consideradas [5, 17, 21, 22]:

- A ligação adesiva não permite uma inspeção visual na zona de ligação (a menos que as peças sejam transparentes);
- É necessária uma preparação cuidadosa da superfície para obter uma junta adesiva durável, já que as juntas adesivas são muitas vezes sujeitas a produtos químicos corrosivos;
- Pode ser necessário um longo tempo de cura;
- Podem ser necessários acessórios de fixação, prensas, fornos e autoclaves para o fabrico de ligações adesivas;
- Temperaturas de serviço normalmente baixas, quando comparadas com as ligações mecânicas;
- É requerido para a maioria dos adesivos um controlo de qualidade exigente;
- A vida útil da ligação adesiva está dependente dos ambientes a que está exposta;
- Adesivos de origem vegetal ou natural estão sujeitos a ataques de bactérias, roedores ou vermes;
- É difícil a combinação de propriedades de resistência ao impacto com resistência a temperaturas elevadas num único adesivo.

### 2.1.2 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

A Figura 7 ilustra os tipos de esforços típicos encontrados em juntas adesivas.

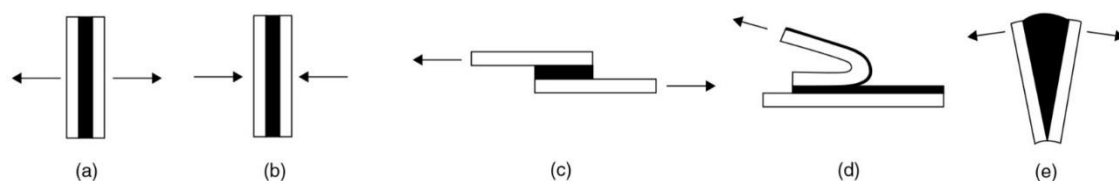


Figura 7 – Tipos de solicitações típicas em juntas adesivas a) tração, b) compressão, c) corte, d) arrancamento (*Peel*) e e) clivagem (*Cleavage*) [5, 17]

#### Esforço de tração (Figura 7a)

Este esforço é caracterizado por forças que atuam num plano perpendicular ao da junta e que estão distribuídas uniformemente ao longo da área colada. Porém, a espessura do adesivo é difícil de controlar, levando a que raramente as forças sejam axiais. Tal situação origina a que a junta adesiva desenvolva tensões não uniformes,

originando picos de tensões indesejáveis de arrancamento ou clivagem nas extremidades da zona de sobreposição (Figura 8) [5, 6, 17, 20].

### Esforço de compressão (Figura 7b)

As juntas, quando solicitadas à compressão pura, terão menos risco de rotura, em comparação com qualquer outro tipo de solicitação. As tensões de compressão desenvolvem-se também a partir de forças que atuam perpendicularmente ao plano da junta, embora sejam forças que tendem a comprimir um aderente contra o outro [23]. Contudo, as forças de compressão deverão manter-se alinhadas para que o adesivo permaneça em compressão pura. Na verdade, numa junta carregada em compressão pura poderá ser dispensável o uso de adesivo. Todavia, este tipo de solicitação tem aplicações muito limitadas em juntas adesivas [5, 17, 20].

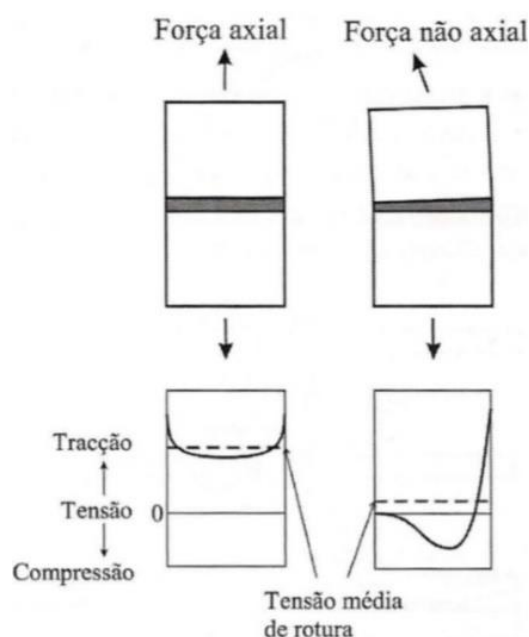


Figura 8 – Distribuição de tensões no adesivo quando sujeito a esforços de tração e compressão [5]

### Esforço de corte (Figura 7c)

O esforço de corte decorre da aplicação de forças paralelas ao plano do adesivo, podendo originar a separação dos substratos. A Figura 9 apresenta a distribuição de tensões típica nos adesivos em juntas sujeitas a esforços de corte. Como se pode observar, os picos de tensões estão localizados nas extremidades da zona de ligação. Por outro lado, a zona intermédia da ligação, acrescenta pouca resistência à junta. Este comportamento é devido ao efeito de deformação diferencial por parte dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição. De facto, cada aderente deforma-se longitudinalmente a uma taxa crescente, desde a extremidade livre até à extremidade oposta, pelo que o aumento da largura favorecerá a resistência, enquanto o aumento

do comprimento de sobreposição provocará um efeito mais acentuado de deformação diferencial dos aderentes [1, 20, 24].

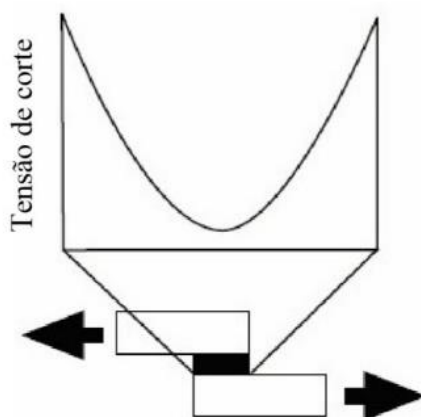


Figura 9 – Distribuição de tensões nos adesivos quando sujeitos a esforços de corte [6]

### Esforços de Arrancamento (Peel) (Figura 7d)

Os esforços de arrancamento não são desejáveis numa junta adesiva. No caso do arrancamento, um ou os dois aderentes são bastante flexíveis e podem deformar plasticamente por ação das forças aplicadas. Juntas adesivas sujeitas a este tipo de esforço oferecem muito menos resistência do que quando sujeitas a esforços de corte, porque as tensões estão concentradas numa área muito reduzida em comparação com a área total da junta adesiva, conforme se pode ver na Figura 10. Todas as tensões estão concentradas numa extremidade da junta. Os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis a esforços de arrancamento, uma vez que o dano no adesivo se inicia nas extremidades da ligação para deformações do adesivo muito reduzidas. Por outro lado, os adesivos dúcteis e flexíveis permitem uma plastificação do adesivo nestas regiões e transferência dos esforços para a zona interior do adesivo, o que conduz a uma maior resistência da junta [5, 6].

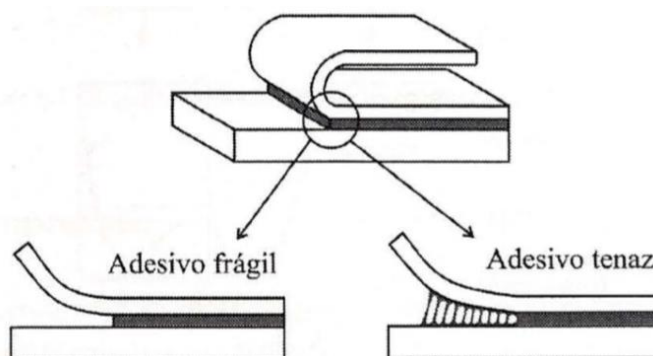


Figura 10 – Comparação entre o comportamento de um adesivo rígido e de um adesivo dúctil ao arrancamento [5, 6]

### Esforços de clivagem (*Cleavage*) (Figura 7e)

Este tipo de esforço, tal como o de arrancamento, não é desejável. As tensões de clivagem são originadas quando são aplicadas forças na extremidade de uma junta rígida, originando o afastamento dos aderentes. Como demonstrado na Figura 11, a tensão máxima ocorre na extremidade solicitada, havendo uma diminuição gradual desta ao longo do adesivo. Importa realçar que os esforços de clivagem podem ocorrer igualmente em juntas topo a topo quando sujeitas a carregamento axial, se as forças não forem rigorosamente axiais [6, 20].

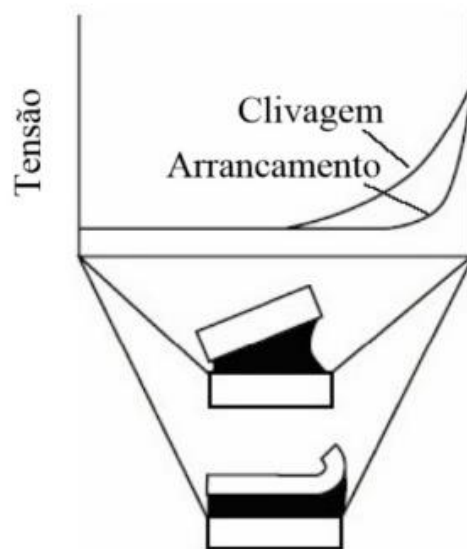

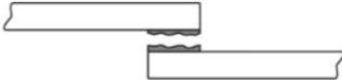

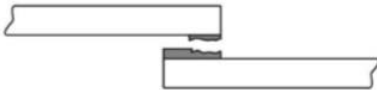


Figura 11 – Distribuição de tensões nos adesivos quando sujeitos a esforços de arrancamento e clivagem [20]

Tanto os esforços de arrancamento como de clivagem deverão ser evitados e, sempre que possível, deverá recorrer-se a juntas adesivas que sejam sujeitas maioritariamente a esforços de corte [6, 20].

De uma forma geral são apontadas como formas típicas de rotura das juntas adesivas as representadas na Tabela 2. É muito importante determinar com a máxima exatidão possível o modo de rotura de uma junta adesiva, no sentido de tomar medidas preventivas e corretivas.

Tabela 2 – Modos de rotura de juntas adesivas [5]

Modos de Rotura	Designação
	Rotura adesiva
	Rotura coesiva
	Rotura pelo aderente
	Rotura mista

### Rotura adesiva

É caracterizada pela ocorrência de rotura na interface entre o adesivo e um dos aderentes, e também é conhecida por falha interfacial. Após a rotura, a superfície de um dos aderentes não apresenta indícios de adesivo. Por outro lado, a superfície de rotura do outro aderente apresenta-se coberta de adesivo. Segundo Adams [25], este será provavelmente um dos tipos de rotura mais críticos. As condições ambientais poderão ser propícias à degradação da zona de interface da junta, conduzindo a este tipo de rotura, pelo que é sempre aconselhado um pré-tratamento superficial. As preparações de superfície podem consistir em [1, 5, 26]:

- Limpeza da superfície de óleos, gorduras, pó e/ou outras partículas contaminantes, agentes de desmoldagem;
- Alteração da topologia da superfície para promover uma superfície mais rugosa e capilar, assim como uma estrutura alveolar de óxido que favoreça o encravamento mecânico com o adesivo;
- Alteração química da camada superficial para favorecer a atracção eletrostática ao nível atómico, através das ligações secundárias ou de Van der Waals.

A preparação de superfície deve ser sempre efetuada com grande rigor, uma vez que esta fase de tratamento superficial está diretamente ligada com a resistência final da junta adesiva. Este tipo de rotura pode acontecer devido à má preparação superficial, má seleção do adesivo ou mesmo até a um processo de cura que não o adequado [5].

### Rotura Coesiva

Este tipo de rotura caracteriza-se pela fratura no interior do adesivo. A ligação entre o adesivo e o substrato é notoriamente mais forte quando comparada com a resistência interna do próprio adesivo. Neste tipo de rotura as superfícies de rotura estão ambas cobertas por adesivo [20].

### Rotura pelo aderente

Este modo de rotura dá-se quando a resistência do adesivo é superior à resistência dos aderentes, o que resulta na rotura destes, enquanto o adesivo se mantém intacto [20].

### Rotura mista

A rotura mista consiste na combinação de rotura coesiva e adesiva da camada de adesivo. Ocorre na zona de ligação entre o adesivo e o substrato e no interior do próprio adesivo. Vários fatores podem ser apontados para ocorrer rotura mista, destacando-se uma limpeza ineficaz da superfície a ligar em zonas específicas da ligação, deficiência na mistura do adesivo, processo de cura não adequado e concentrações de tensões em determinadas zonas [20, 26].

#### 2.1.1 Configurações possíveis de junta

As juntas adesivas podem apresentar várias configurações possíveis, das quais as mais frequentes estão representadas na Figura 12. De notar que cada tipo de junta tem as suas próprias características e especificidades, tanto na dificuldade de produção como na distribuição de tensões ao longo da junta adesiva.

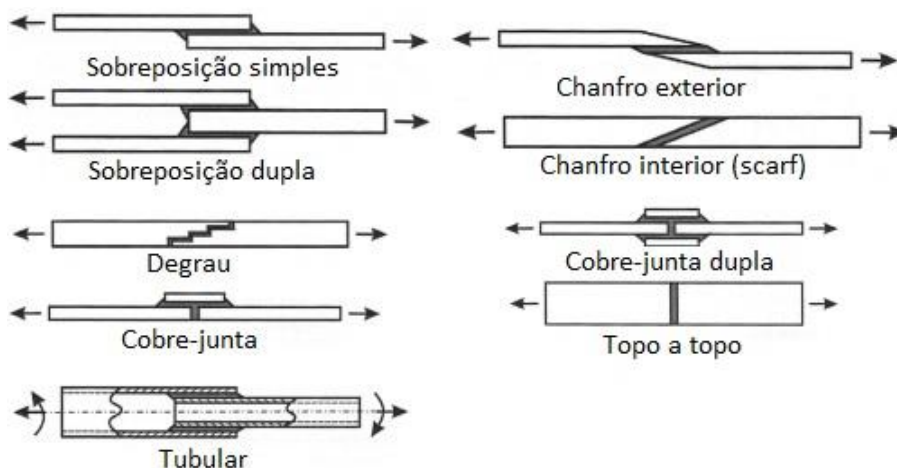


Figura 12 – Tipos de juntas mais comuns [5]

### Sobreposição simples e sobreposição dupla

A junta de sobreposição simples (JSS) é a mais aplicada na indústria pela sua facilidade e simplicidade no fabrico. Como pode ser observado na Figura 13 e Figura 14, existe uma concentração de tensões nas extremidades da junta. Podem ser apontadas como motivos para este acontecimento [17, 27]:

- O efeito de deformação longitudinal dos aderentes;
- O esforço de flexão causado pela carga não axial nos aderentes.

A aplicação de cargas descentradas nas juntas de sobreposição simples provoca a flexão dos substratos, originando uma rotação da junta e, desta forma a linha de aplicação da carga na zona de sobreposição origina o aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo (tensões de arrancamento). Nos bordos da zona ligada ocorre um efeito de entalhe provocado pela alteração da geometria. Os dois efeitos combinados (flexão e mudança de secção) ocorrem na zona mais crítica, provocando uma concentração de tensões e uma redução de resistência da junta [28-30]. Estas juntas não são aconselhadas para esforços de flexão, uma vez que nestas condições o adesivo poderá sofrer rotura por clivagem [17]. As juntas de sobreposição dupla (JSD) (Figura 15) surgiram com o objetivo principal de contornar o problema de flexão existente na junta de sobreposição simples. Têm a desvantagem de apresentar um fabrico mais moroso [20]. Estas apresentam uma configuração simétrica que se presume excluída de flexão. Contudo, na linha de adesão poderá ocorrer o desenvolvimento de tensões de tração e compressão, desde que os aderentes exteriores sofram flexão [1, 31, 32].

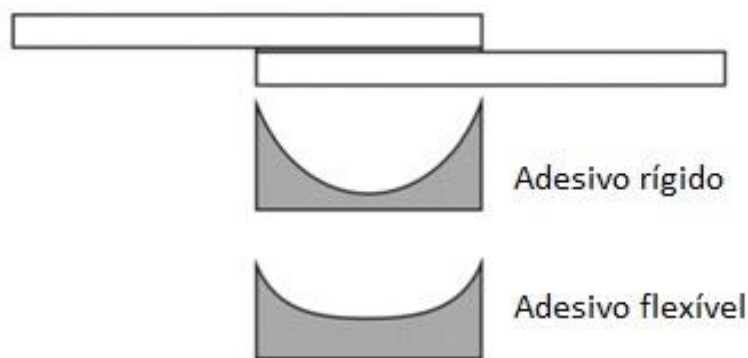


Figura 13 – Distribuição da tensão de corte no adesivo numa junta de sobreposição simples [5]

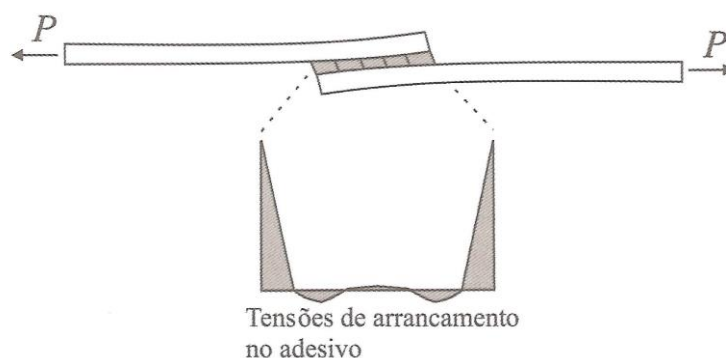


Figura 14 – Distribuição da tensão de arrancamento no adesivo numa junta de sobreposição simples [5]

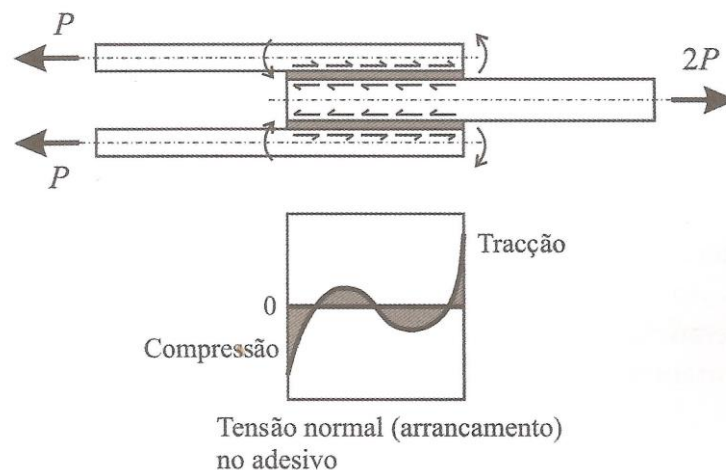


Figura 15 – Distribuição da tensão de arrancamento no adesivo numa junta de sobreposição dupla [5]

### Juntas topo-a-topo (JTT)

Estas juntas não têm grande capacidade de resistência a esforços de flexão, porque nestas condições o adesivo fica sujeito a clivagem. O facto de apresentarem elevadas concentrações de tensões de arrancamento e de corte nas suas extremidades de ligação diminui a eficácia deste tipo de junta. Têm a vantagem de serem bastante simples de fabricar [6, 17].

### Junta de chanfro interior (*scarf*) e degrau

As juntas de chanfro interior (JCI) têm uma maior capacidade de transferência de esforços, quando comparadas com juntas de sobreposição [33]. Este tipo de juntas origina uma uniformização de tensões ao longo do adesivo, o que aumenta a resistência das juntas. A significativa diminuição da excentricidade dos esforços também contribui para este facto [29]. A junta em degrau (JD), com um número de degraus suficientes, aproxima-se da JCI. A dificuldade em maquinar os degraus ou as rampas é vista como uma desvantagem porque faz encarecer o processo de fabrico tanto das JCI como das JD [25, 34].

### Junta chanfro exterior

As juntas com chanfro exterior, tal como as juntas em degrau e chanfro interior, foram desenvolvidas para atenuar as concentrações de tensões tipicamente existentes nas extremidades da zona de ligação de juntas adesivas, que ocorrem nas extremidades das JSS [5, 20]. Com a modificação na geometria do aderente nas zonas de maior tensão, os efeitos dos picos de tensão podem ser reduzidos, o que conduz a uma melhor distribuição de tensões, tal como representado na Figura 16 [6, 17].

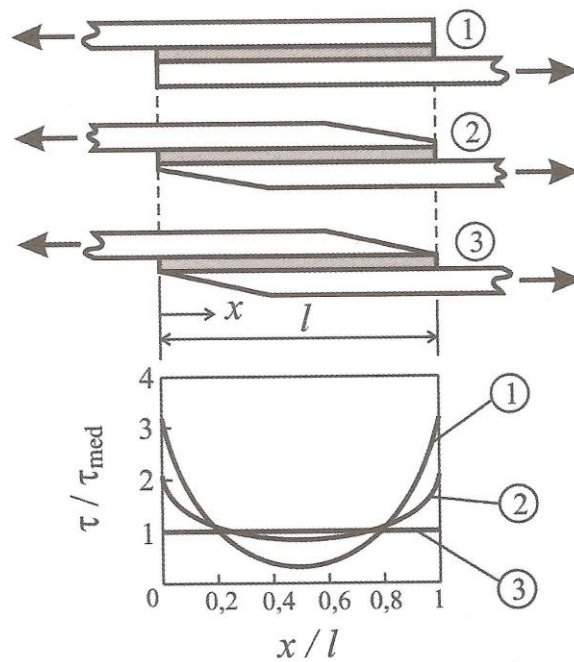


Figura 16 - Distribuição da tensão de corte na junta de sobreposição simples e na junta de chanfro exterior [5]

### Cobre-junta

Em comparação com as JSS e JTT, as cobre-juntas simples e dupla apresentam melhor resistência. Tal como se verifica na JSS, a junta com cobre simples também está sujeita a esforços de flexão e clivagem, apesar de apresentar uma resistência superior. Nas juntas com reforço duplo o momento-fletor é menor, o que torna preferível esta geometria. No entanto, estas juntas envolvem processos de maquinagem um pouco dispendiosos [6, 17]. Na Figura 17 estão representados alguns tipos de cobre-junta mais usados.

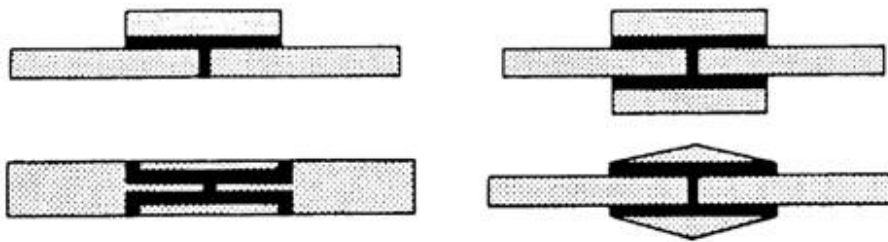


Figura 17 – Tipos de cobre-juntas mais utilizados [6]

### Junta tubular

Este tipo de juntas é preferível às JTT, devido à sua maior resistência a esforços de clivagem decorrentes da flexão, mas também porque a área adesiva é maior e, portanto, conseguem proporcionar maior resistência de junta. Contudo, este tipo de

juntas envolve também processos de maquinagem que poderão ser dispendiosos [6, 17]. Estão representados na Figura 18 alguns exemplos de juntas tubulares.

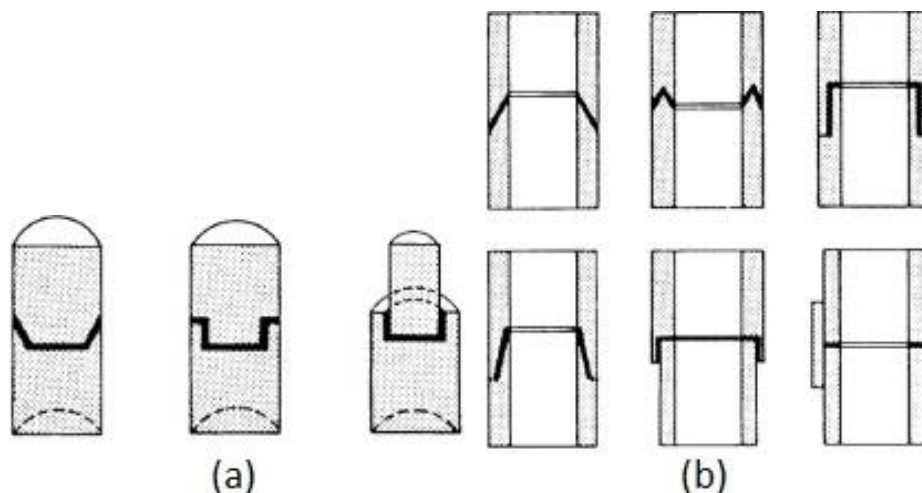


Figura 18 – Diferentes configurações de juntas para a) varões b) cilindros ou tubos [6]

### 2.1.2 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais começaram por surgir na indústria de construção mecânica, devido à necessidade de assegurar a transmissão de esforços entre componentes, com resistência similar aos tipos de ligações rebitadas, aparafusadas ou soldadas [35].

Adesivos estruturais são aqueles que possuem uma boa resistência ao corte (6,7 MPa) e boa resistência a ambientes desfavoráveis. Quando utilizados, é esperado que possuam um ciclo de vida igual ao da estrutura onde é aplicado. Como exemplo destes tipos de adesivos referem-se os: epóxicos, fenólicos, aromáticos, poliuretanos e acrílicos. Adesivos não estruturais são adesivos com muito menor capacidade de resistência e de fixação. Normalmente, são utilizados para fixações temporárias ou para unir substratos pouco resistentes. Como exemplo deste tipo de adesivos referem-se as borrachas sintéticas, poliésteres, termofusíveis e materiais inorgânicos. Os vedantes são utilizados pela sua capacidade de preencher espaços e por resistirem ao movimento relativo dos substratos. Possuem menos resistência quando comparados com os adesivos, mas têm uma maior flexibilidade. Como exemplos de vedantes têm-se os: uretanos, silicones e acrílicos [6, 7]. Os adesivos estruturais permitem evitar discontinuidades típicas devido a ligações mecânicas e acomodar ligações geométricas complexas. Além disso, permitem uma melhor distribuição de tensões em toda a superfície colada e amortecer vibrações, permitindo também obter estruturas mais leves, uma vez que não será necessário recorrer ao uso de parafusos e rebites [36].

Os adesivos podem ser classificados por vários métodos, e a distinção mais ampla passa por dividir entre adesivo sintético ou adesivo natural. Considera-se um adesivo sintético aquele que é fabricado através de produtos concebidos pelo homem, tais

como os polímeros. Por outro lado, os adesivos naturais são fabricados a partir de materiais naturais, como subprodutos animais ou de agricultura [5, 17].

Outra classificação possível dos adesivos passa pela sua composição química (Figura 19). Assim, estes podem ser classificados em [5, 17]:

- Adesivos termoendurecíveis (fenólico, epóxico, poliéster, entre outros);
- Adesivos termoplásticos (acrílico, poliamida, vinílico, entre outros);
- Adesivos elastoméricos (poliuretano, nitrilo, silicone, entre outros).

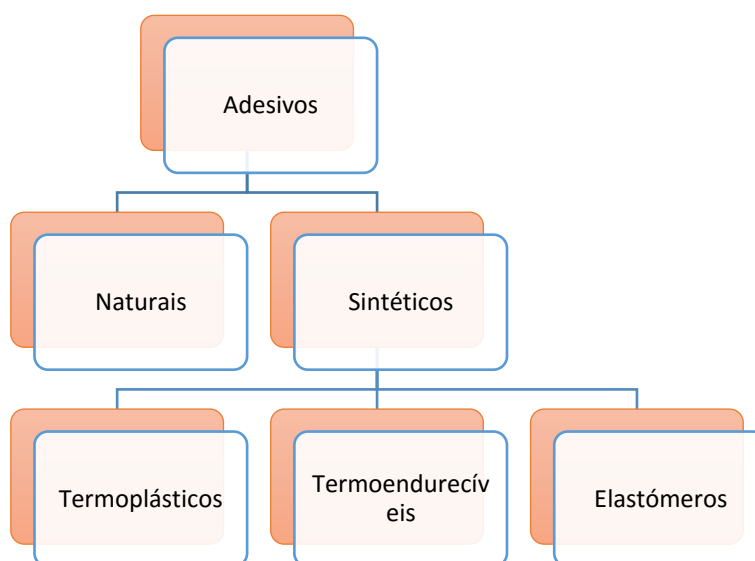


Figura 19 – Fluxograma com classificação básica de adesivos [17]

Atualmente existe uma grande diversidade disponível de adesivos, com características diversas para empregar em condições de utilização distintas. Assim, são descritas de seguida as cinco principais famílias de adesivos estruturais [5]:

### Adesivos Epóxicos

Os adesivos epóxicos foram introduzidos comercialmente em 1946 e têm atualmente uma larga utilização na indústria automóvel e aeronáutica. Apresentam boas características de molhabilidade e oferecem boa resistência química e mecânica. Este tipo de adesivo oferece um alto grau de adesão para uma vasta gama de substratos, podendo ser empregues na ligação de variadíssimos materiais utilizados na construção mecânica. Apresentam excelente resistência à tração e ao corte, embora tenham fraca resistência ao arrancamento caso não sejam modificados com um polímero mais tenaz. Oferecem também boa resistência ao óleo, humidade e a muitos solventes. Possuem uma baixa contração na cura e uma elevada resistência à fluência. Não têm evaporação de voláteis na cura e são utilizados em aplicações de preenchimento de

espaços (*gap-filling*). As propriedades dos adesivos epóxicos podem ser alteradas adicionando outras resinas (tais como poliamida, fenólica ou polisulfido) [5, 6, 20].

Comercialmente, os adesivos epóxicos são fornecidos de várias formas, desde líquida de baixa viscosidade até sólida. O processo de cura de um adesivo que possua só um componente é efetuado, normalmente, a uma temperatura de cerca de 120°C. Caso os adesivos possuam dois componentes, a cura poderá ser efetuada a partir dos 5°C. O tempo de cura é bastante variável, podendo estar situado entre os 10 min e vários dias [6, 20].

Estes adesivos também são conhecidos como adesivos de fenol-formaldeído e são o resultado da condensação do fenol monoídrico e formaldeído. Os adesivos fenólicos são normalmente usados para a colagem de madeira. Além do sector da madeira, são usados também como primário na preparação de superfícies de metal. Apresentam uma razoável resistência ao calor, boa estabilidade dimensional e preço acessível, o que os torna também numa possível solução para serem utilizados em calços de travões, rodas abrasivas, lixas e moldes de fundição. As principais desvantagens são a baixa resistência à corrosão e a baixa resistência ao impacto [5, 17, 20]. O processo de cura deve realizar-se a altas temperaturas, onde ocorre libertação de água. Assim, é aconselhado utilizar substratos porosos ou aplicar uma elevada pressão para evitar o aparecimento de defeitos na área de colagem [20].

Os adesivos acrílicos podem ser divididos em [20]:

- Adesivos Anaeróbicos;
- Adesivos Cianoacrilatos;
- Adesivos Acrílicos Modificados.

Os adesivos anaeróbicos têm uma vasta aplicação na indústria mecânica, nomeadamente na fixação de peças estriadas e roscadas, fixação de rolamentos, e de uma forma geral, em peças com geometria cilíndrica, podendo ser aplicados na colagem de materiais como poliolefinas, nylon e policloreto de vinilo (PVC). Apresentam uma resistência comparável à dos epóxicos, possuem uma boa resistência a solventes e as temperaturas de utilização podem atingir 150°C. A sua comercialização pode ser na forma de pastas ou líquidos tixotrópicos. O seu processo de cura pode ser efetuado à temperatura ambiente e são de fácil manuseamento e utilização. O processo de endurecimento efetua-se através de uma reação de polimerização do tipo radical livre, quando o oxigénio é eliminado. Normalmente, o adesivo excedente fora da junta não cura, porque permanece em contacto com o oxigénio, permitindo a sua fácil remoção.

Os adesivos cianoacrilatos também são conhecidos por “supercola” porque permitem colagens muito rápidas, quase instantâneas. O seu processo de cura pode estar dependente de fatores como: humidade, teor de pH no meio e espessura da junta

adesiva. Possuem elevadas características de resistência à tração, mas são frágeis e têm baixa resistência ao arrancamento.

Por fim, os adesivos acrílicos modificados possuem uma boa resistência ao arrancamento e ao impacto, possibilitando ligações resistentes, mesmo quando a preparação da superfície não é a mais cuidada. Com estes adesivos, as juntas possuem alta resistência à humidade. Como desvantagens destes adesivos são normalmente apontadas uma baixa resistência mecânica a altas temperaturas e elevada inflamabilidade [5, 6, 20].

### **Adesivos de Poliuretano**

Os adesivos de poliuretano, também conhecidos como cola PVC, foram introduzidos há cerca de 50 anos e resultam de reação de um polioliol (ou poliéster-polioliol) com um isocianato e apresentam-se usualmente sob a forma de dois componentes cuja cura se processa lentamente à temperatura ambiente [24]. São largamente usados em diversas indústrias, tais como: aeroespacial, automóvel, medicina, construção, embalagens, equipamentos, livros, calçado, móveis, têxteis, abrasivos e montagens diversas. Apresentam ductilidade elevada, dureza e resistência química, possuem uma boa flexibilidade, boa adesão, um bom desempenho a baixas temperaturas, uma boa resistência ao arrancamento, à abrasão, a choques e vibrações [6, 20]. As principais desvantagens são a elevada sensibilidade às proporções da mistura, a toxicidade do isocianato e a baixa resistência à temperatura ambiente [5].

### **Adesivos de poliimida e adesivos de bismaleimida**

São os adesivos mais estáveis a altas temperaturas (superiores a 200°C). Estão disponíveis sob a forma de líquidos e filmes, mas são caros e de difícil manuseamento. São necessários longos tempos de cura com ciclos de pressão e temperatura elevada, pelo que a sua aplicação é complexa. Os adesivos de bismaleimida têm um processo de cura mais simples [20].

## **2.2 Previsão de resistência das juntas**

Todas as estruturas que incluem ligações adesivas devem ser capazes de realizar a sua função durante a sua vida útil, em prol da segurança e interesses económicos. Estas estruturas estão, normalmente, expostas a uma série de eventos que incluem cargas, meio ambiente e ameaças diversas por vezes imprevisíveis. E todos estes eventos, de uma forma individual ou até cumulativa, contribuem de uma forma gradual para a degradação estrutural, o que afeta a capacidade para a qual a estrutura foi projetada. Surge assim a necessidade de conseguir efetuar previsões precisas da resistência de juntas adesivas. Para o projeto de juntas adesivas, inicialmente utilizavam-se métodos analíticos, dos quais se apresenta um resumo na Tabela 3 (modelos aplicados a juntas de sobreposição simples).

Tabela 3 - Resumo dos modelos analíticos para juntas de sobreposição simples [5]

	Linearidade dos materiais				Substratos					Tensões no adesivo		
	Adesivo		Substratos		Isotrópico	Compósito	Similar	Não similar		$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
	Linear	Não linear	Linear	Não linear				Espessura	Material			
Análise simples	X		X		X		X					X
Volkersen (1938)	X		X		X		X	X				X
Goland e Reissner (1944)	X		X		X		X				X	X
Grimes e Greimann (1975)	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
Wah (1973)	X		X		X	X	X	X			X	X
Hart-Smith (1973a)	X	X	X		X		X				X	X
Pirvics (1974)	X		X		X		X	X	X	X	X	X
Renton e Vinson (1975)	X		X		X	X	X	X	X		X	X
Srinivas (1975)	X		X		X	X	X	X	X		X	X
Allman (1977)	X		X		X	X	X				X	X
Ojalvo and Eidinoff (1978)	X		X		X		X				X	X
Chen e Cheng (1983)	X		X		X		X			X	X	X
Cheng et al. (1991)	X		X		X		X	X	X	X	X	X
Adams e Mallick (1992)	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Tong (1996)	X	X	X		X		X				X	X
Yang e Pang (1996)	X		X		X	X	X	X	X		X	X
Frostig et al. (1999)	X		X		X	X	X	X	X		X	X
Mortensen e Thomsen (2002)	X	X	X		X	X	X	X	X		X	X
Wang et al. (2003)	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
Smeltzer e Klang (2003)	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
das Neves et al. (2007a)	X		X		X	X	X	X	X		X	X

Se por um lado o nível de exigência e precisão deve ser sempre um fator importante, por outro lado, a facilidade com que se pode obter a solução também o é. À medida que se exige uma análise cada vez mais completa e refinada, o modelo torna-se cada vez mais complexo para se obter uma solução analítica, devendo por isso haver espaço para métodos numéricos [5].

Hoje em dia, a previsão da resistência da junta pode ser efetuada seguindo várias técnicas:

- Mecânica dos meios contínuos (em conjunto com modelos analíticos ou MEF);
- Mecânica da fratura;
- Mecânica do dano;
- Modelos de dano coesivo;
- Método de Elementos Finitos Extendido.

### 2.2.1 Modelos analíticos

A utilização de modelos analíticos iniciou-se a partir de um simples modelo estático no qual os aderentes foram considerados como corpos rígidos, enquanto o adesivo era considerado como um corpo elástico linear. Supôs-se que o adesivo apenas se deformava quando solicitado ao corte, situação em que a tensão de corte é constante ao longo do comprimento de ligação. Esta abordagem tem algumas limitações como a não consideração das tensões de arrancamento e simplificação grosseira da distribuição de tensões de corte no adesivo [37]. Em 1938, Volkersen [38] apresentou um modelo analítico com materiais elásticos e deformações do adesivo apenas em corte. Com estes pressupostos, a tensão de corte já não é constante ao longo da área colada. A tensão de corte no adesivo é máxima nas extremidades da ligação e mínima na zona intermédia. O grande inconveniente deste modelo é que não é considerado o efeito provocado pelo esforço de flexão. Uma vez que as cargas aplicadas nas extremidades dos substratos não são colineares, estas resultam num momento fletor.

Consequentemente, registam-se esforços de arrancamento nas extremidades da ligação [5, 17, 25, 37].

Anos mais tarde, em 1944, Goland and Reissner [39] melhoraram o modelo de Volkersen pela introdução na análise da rotação da junta, tornando o modelo de previsão mais preciso [5, 37]. Contudo, apesar de este modelo já ser mais refinado, também ele foi sujeito a aperfeiçoamento por não prever alguns fenómenos. De facto, este também se encontrava limitado a comportamentos elásticos e, na verdade, os adesivos e os substratos podem sofrer deformação plástica. Atualmente existem adesivos estruturais, como é o caso dos epóxidos modificados com borracha (*toughened epoxy*), que podem apresentar deformação plástica significativa antes da rotura [5, 17, 25].

Hart-Smith [40], em 1973, introduziu novos modelos de previsão, onde os substratos eram modelados separadamente. Considerou-se juntas de sobreposição simples e dupla, em que já se levou em conta o comportamento plástico do adesivo. Estes modelos permitiram demonstrar que a plasticidade do adesivo aumenta a resistência de uma junta comparativamente a uma análise elástica. De facto, no caso de um adesivo dúctil ceder plasticamente, este consegue suportar uma força adicional até alcançar a rotura [5, 25].

Estes modelos foram os grandes pioneiros na evolução dos estudos no que respeita a juntas adesivas. Mais modelos foram surgindo (Tabela 3), sempre com o intuito de tentar colmatar algumas limitações nos modelos existentes. De um modo geral, os modelos analíticos permitem o cálculo de tensões e deformações nas juntas, assumindo também aderentes elásticos, possibilitando obter a distribuição de momento fletor ao longo da junta. Atualmente, e com a finalidade de prever sempre com mais precisão, recorre-se a modelos numéricos, como por exemplo, o método de Elementos Finitos (MEF) [20, 37].

A utilização de modelos analíticos pressupõe a existência de critérios de rotura para averiguar a ocorrência de rotura. Neste âmbito, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação previstos pelos métodos analíticos são comparados com os valores suportados do material. Os modelos analíticos, apesar de terem como vantagem a sua simplicidade na aplicação, usualmente envolvem a consideração de simplificações sobre a geometria, carga e condições de fronteira para atingirem soluções razoáveis, havendo a necessidade de recorrer a estudos experimentais para caracterizar cada caso. Com o objetivo de estudar o comportamento coesivo do material, recorrendo à Resistência dos Materiais, desenvolveram-se análises onde são feitas comparações de tensões ou deformações nas regiões consideradas críticas, com as propriedades de resistência do material e são usados critérios como o Critério da Tensão Normal Máxima (Huang et al. [41]) ou o Critério da Deformação Transversal Máxima (Panigrahi and Pradhan [42]). As limitações destes critérios residem na existência de singularidades geométricas que

podem existir nas fendas a analisar. Ao recorrer a simulações pelo MEF, verifica-se que os valores de tensão no ponto de singularidade crescem com o refinamento da malha sem nunca atingir a convergência [41-43].

### 2.2.2 Métodos numéricos

Os métodos numéricos recorrem ao MEF onde as tensões ou deformações obtidas são utilizadas em critérios de rotura adequados que permitem estimar a resistência da ligação adesiva. A simulação pelo MEF tem a vantagem de permitir modelações de geometrias e configurações complexas. De facto, com o avanço computacional e desenho assistido por computador (CAD), todos os detalhes da geometria podem ser modelados com grande precisão. Na previsão da resistência das juntas adesivas, adotando uma abordagem da mecânica contínua, é uma técnica que requer a distribuição de tensões e critérios de rotura apropriados. Neste caso, os critérios de tensões apresentam algumas limitações porque nas extremidades da sobreposição podem observar-se singularidades de tensões. Ou seja, de acordo com uma análise linear elástica, as singularidades de tensões podem ser definidas como um ponto onde se obtém um valor infinito de tensões. Como tal, os resultados estão sempre dependentes da malha utilizada durante a simulação numérica [20].

A mecânica do dano usa práticas de modelação avançadas, que são muito utilizadas atualmente e garantem uma representação mais fiel do processo de rotura. Este tipo de critério possibilita a análise completa de estruturas até ao ponto final da sua rotura.

O método de EF pode ser usado também em conjunto com critérios da mecânica da fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade de tensão ou por métodos energéticos, como a técnica de fecho virtual da fenda. A modelação de dano por combinação de EF com MDC recorre à técnica de EF convencional para as regiões em que não é esperado dano e uma abordagem da mecânica da fratura através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação do dano. Relativamente ao Método dos Elementos Finitos Extendido, este é uma alternativa para a modelação de propagação de fendas que emprega funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

Assim, a previsão da resistência de juntas adesivas pode ser feita com recurso às seguintes técnicas:

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

### 2.2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A técnica da mecânica dos meios contínuos consiste na utilização de métodos analíticos ou numéricos para obter os valores máximos de tensões, de deformação ou energia de deformação nas juntas. Posteriormente, efetua-se uma comparação entre as tensões máximas obtidas com critérios de tensões ou deformações para se avaliar a resistência da junta [43].

Adams et al. [44] usaram o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF de forma a prever a resistência de juntas adesivas. Este critério foi indicado para materiais considerados frágeis. Apesar disto, as restantes componentes de tensão não foram consideradas no critério, apesar de estas não serem nulas. Quando se recorre a métodos numéricos, um dos aspetos fundamentais é a dimensão da malha. Este é um fator determinante na análise das tensões e deformações devido à existência de singularidades de tensões nas extremidades das juntas. Neste critério, deve-se ter em conta o facto de as juntas não terem, normalmente, os cantos retos na zona de sobreposição. Na verdade, existe um ligeiro arredondamento que ocorre durante o processo de fabrico (Figura 20). Como consequência deste arredondamento, deixa de existir uma singularidade, o que facilita a aplicação de um critério de tensão ou tensão limite [11, 43].

Para além do critério de tensão principal máxima, é possível recorrer a outros critérios para avaliação da resistência das juntas. O critério de von Mises afirma que a resistência do material está dependente de tensões multiaxiais, quando a energia de distorção atinge valores críticos [45], e que resulta em:

$$\sigma_{VM}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = \text{constante} \quad (1)$$

onde  $\sigma_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) representam as tensões principais.

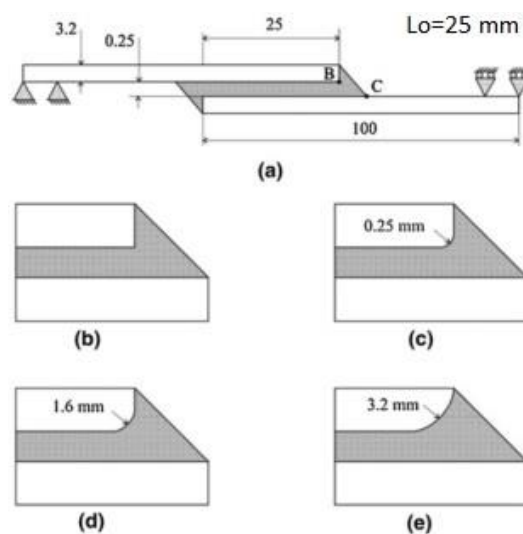


Figura 20 – JSS com cantos arredondados [43]

Zhao et al. [46, 47] estudaram o efeito originado pelo arredondamento das extremidades dos substratos, sendo possível constatar na Figura 21 a variação das tensões principais máximas em função do valor do raio de arredondamento. Este tipo de alterações na geometria da junta vai originar uma variação da distribuição de tensões na zona modificada geometricamente.

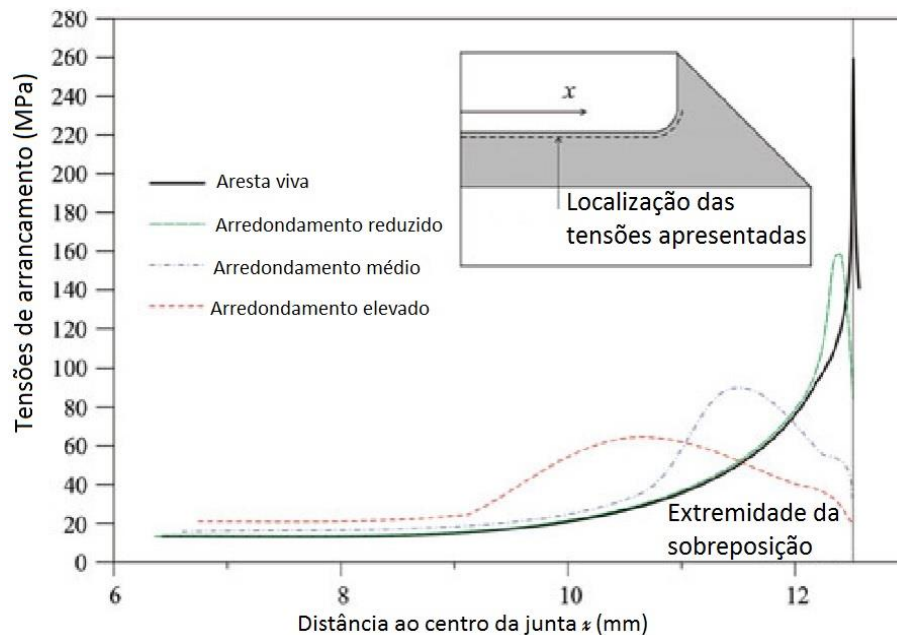


Figura 21 - Variação da tensão principal máxima do adesivo com uma carga aplicada de 20 kN [43]

Clark and McGregor [48], nos finais do século XX, previram a rotura de um adesivo maciço quando a tensão principal máxima excede a tensão máxima uniaxial ao longo de um determinado comprimento normal à direção da tensão principal máxima. Com este critério, a estimativa de força máxima não é muito afetada pela alteração da geometria. Contudo, tem a desvantagem de exigir uma calibração da distância característica para cada configuração de junta [47].

### 2.2.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica da fratura pode ser aplicada ao estudo do comportamento de estruturas que contêm defeitos, tais como fendas. Mas as estruturas não têm necessariamente que sofrer rotura pelo crescimento de fendas já existentes. Estas podem surgir também através de concentrações de tensões, normalmente localizadas em furos, entalhes ou pontos com materiais distintos. Em geral, existem dois tipos diferentes de concentrações de tensões: as concentrações finitas, como por exemplo em furos, ou concentrações de tensões infinitas, mais conhecidas por singularidades de tensões, que ocorrem em fendas ou cantos reentrantes [49].

Sabe-se que as singularidades ocorrem quando o ângulo entre duas superfícies contíguas é inferior a  $180^\circ$  [43]. Este facto foi descoberto por Williams [50] e este

efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais unidos. A descontinuidade de tensões continua a existir, porém deixam de existir superfícies livres.

A mecânica da fratura tem sido aplicada na resolução de muitos problemas na engenharia, em particular na indústria aeronáutica. Esta indústria introduziu um conceito de projeto com tolerância ao dano, que se expandiu para outros ramos de engenharia, e que se baseia no conceito da mecânica da fratura linear elástica (MFLE) [43, 51]. Este método também pode ser aplicado no estudo de juntas adesivas, usando a taxa de libertação de energia de deformação,  $G_I$  ou  $G_{II}$  e o respetivo valor crítico ou tenacidade à fratura  $G_c$  [52, 53].

Em 1988, Groth [54] assumiu que o início da fratura ocorre quando o fator de intensidade de tensão atinge o seu valor crítico. Alguns anos mais tarde, em 2001, Gleich et al. [4] realizaram um estudo semelhante ao calcular a singularidade de tensão para uma gama de valores de espessura de adesivos. Estas abordagens permitem uma boa aproximação para juntas onde os fatores críticos de intensidade de tensão foram determinados. Contudo, a extrapolação para formas geométricas distintas torna-se incerta. Num caso onde os materiais sofrem deformação plástica, os conceitos da mecânica da fratura linear elástica terão que ser alargados para a mecânica da fratura elasto-plástica recorrendo, por exemplo ao integral  $J$ . Este integral é usado por variados investigadores, de forma a prever a resistência de juntas adesivas e é definido pela expressão [55, 56]:

$$J = \int_C w dx_2 - T \frac{\partial u_j}{\partial x_1} dS \quad (2)$$

Na expressão (2),  $C$  representa a curva a rodear a ponta da fenda,  $S$  indica o comprimento do arco,  $w$  é a densidade de energia,  $u_j$  o vetor deslocamento,  $T_j$  o vetor de tração,  $x_1$  e  $x_2$  o sistema de coordenadas.

### 2.2.2.3 Modelos de dano coesivo

Os modelos de dano coesivos (MDC) são baseados em elementos de mola [57] ou elementos finitos de interface [58], ligando elementos sólidos bidimensionais ou tridimensionais. Uma das vantagens dos MDC está relacionada com a sua capacidade de simular o início e a propagação de dano, sem a exigência de uma fenda inicial, tal como exigem as abordagens clássicas da mecânica da fratura. A utilização de MDC acoplado à análise por elementos finitos convencionais é o método mais comum para prever o dano por fadiga ocorrido em estrutura [5, 59]. Barenblatt [60, 61] e Dugdale [62] desenvolveram o conceito de Zona Coesiva, para descrever o dano sob cargas estáticas da zona coesiva à frente da ponta da fenda. Desde então, os MDC foram sucessivamente estudados e melhorados de forma a prever o comportamento de fendas na zona coesiva e interfacial e em casos de delaminação de compósitos.

A aplicação desta técnica implica estabelecer leis de tração-separação (também denominadas de leis coesivas) para modelar interfaces ou regiões finitas, sendo necessário determinar um caminho de dano e valores de libertação de energia em tração e corte ( $G_n$  e  $G_s$ , respetivamente) e respetivos valores críticos ou tenacidade ( $G_n^c$  e  $G_s^c$ ), respetivamente. As forças coesivas em tensão e corte ( $t_n$  e  $t_s$ , respetivamente) são igualmente necessárias e estão relacionadas com o final do comportamento elástico e início do dano [47]. Diferentes técnicas estão hoje em dia disponíveis para a definição dos parâmetros coesivos ( $G_n^c$ ,  $G_s^c$ ,  $t_n^0$  e  $t_s^0$ ), tais como a técnica de identificação de propriedades, o método direto e o método inverso. Estes métodos geralmente estão associados com o *Double-Cantilever Beam* (DCB), *End-Notched Flexure* (ENF), normalmente com bons resultados [63-67].

Uma característica importante do MDC é que podem ser facilmente incorporados em *softwares* de Elementos Finitos convencionais para modelar a propagação do dano em vários materiais, incluindo juntas adesivas [43, 68]. Os MDC assumem que podem ser introduzidas artificialmente em estruturas uma ou mais regiões ou interfaces de fratura, onde o crescimento do dano é possibilitado com a introdução de uma descontinuidade no campo de deslocamentos. Esta técnica baseia-se no estabelecimento de leis de tração-separação (também conhecidas por leis coesivas) para modelar interfaces ou regiões finitas [43].

A utilização de MDC com recurso à análise do método de EF é um método bastante utilizado para prever a modelação do dano estático ou de fadiga [69]. Podem ser utilizadas duas técnicas de aproximação, já que os elementos coesivos podem ser utilizados para a modelação da fratura interfacial de camadas em compósitos ou interfaces entre o adesivo e o aderente, para simulação de roturas adesivas (aproximação local, Figura 22 a) ou, por outro lado, para a simulação de camadas de adesivo finas com espessura constante (aproximação contínua, Figura 22 b) [70, 71].

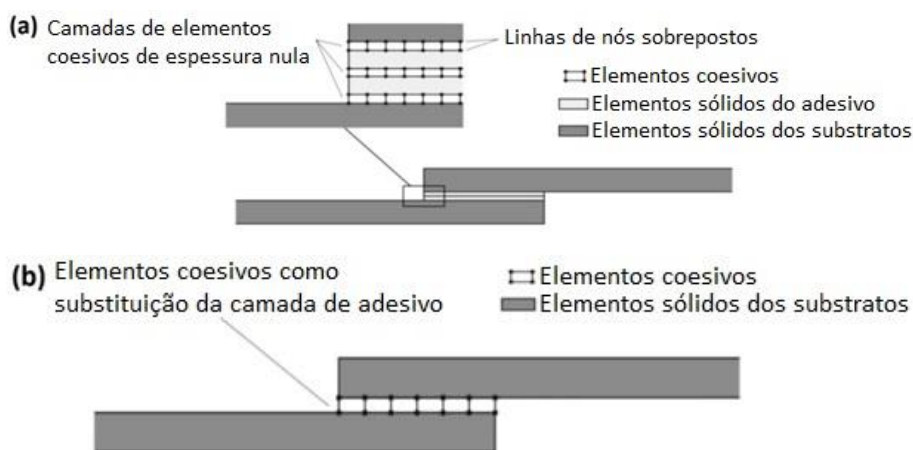


Figura 22 – Elementos coesivos (a) para simular espessura zero na interface – aproximação local (b) para simular uma pequena camada de adesivo com espessura constante – aproximação contínua [43]

### 2.2.2.3.1 Tipos de leis coesivas

Existem diferentes formas de leis coesivas, como a: triangular [72], linear parabólica [73], polinomial [74], exponencial [75] e o trapezoidal [76]. A lei coesiva triangular (Figura 23) tem sido a mais utilizada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [77]. Esta lei distingue dois modos. A lei de maiores dimensões caracteriza as leis em modo puro e é caracterizada pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respectivo são anulados na lei respectiva. A lei de menores dimensões caracteriza a lei de modo misto, onde são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar os modos puros de tensão e corte [20, 78].

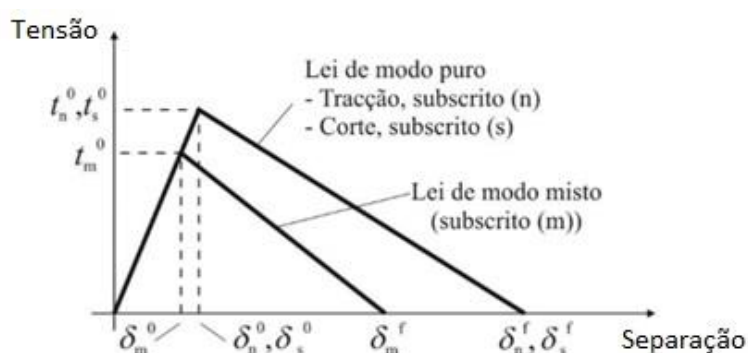


Figura 23 – Modelo coesivo de dano triangular [43]

A Figura 24 representa um modelo de dano coesivo trapezoidal. O objetivo do modelo trapezoidal é substituir os tradicionais elementos sólidos utilizados para modelar a camada fina de adesivo. O comportamento dúctil do adesivo é simulado considerando um patamar na lei coesiva, traduzindo o seu comportamento plástico [20, 79].

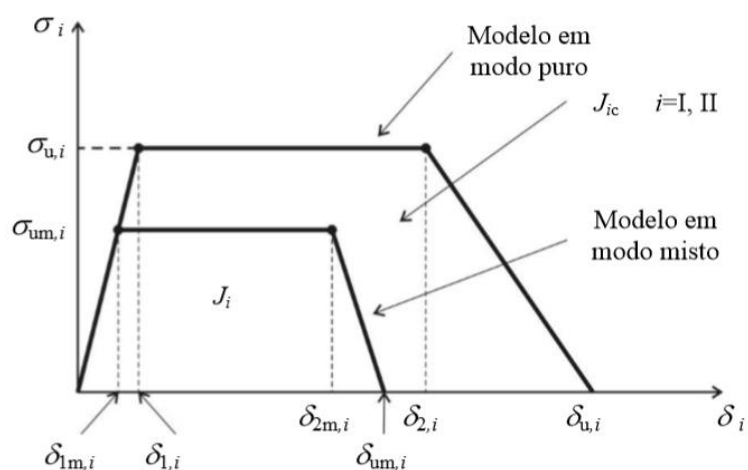


Figura 24 – Modelo coesivo de dano trapezoidal [79]

As áreas sob cada lei coesiva em cada modo são equiparadas à taxa crítica de libertação de energia de deformação do adesivo no devido modo (I ou II). No modo puro, quando as tensões são libertadas na lei de tração-separação, assume-se que ocorre a propagação de dano. Em modo misto, dependendo do tipo de análise a efetuar, bidimensional (modo puro I e II) ou tridimensional (modo puro I, II e III), são utilizados critérios de tensão e energéticos de forma a combinar os modos puros para simular o comportamento típico do modo misto próprio da junta. Desta forma consegue-se obter as curvas  $P$ - $\delta$  até à rotura e o modo de rotura respetivo [20].

### 2.2.2.3.2 Influência do tipo de lei coesiva na resistência das juntas

Os MDC têm sido utilizados nos últimos anos para efetuar previsões de resistência de juntas adesivas, como um suplemento das análises de EF que permite a simulação de crescimento de dano, considerando princípios energéticos [43, 80]. Uma característica útil dos MDC está relacionada com a possibilidade de desenvolver diferentes formas para as leis coesivas, dependendo da natureza dos materiais ou da interface a ser simulada, permitindo uma previsão de resistência muito mais precisa. As formas das leis coesivas e os respetivos parâmetros variam significativamente com  $t_A$ , variando de uma forma triangular para valores pequenos de  $t_A$ , para uma forma trapezoidal para valores grandes de  $t_A$ . É, portanto, recomendável ajustar as formas das leis de MDC para estar em conformidade com o comportamento do material ou a interface alvo de simulação.

Campilho et al. [81], em 2013, elaboraram um trabalho onde estudaram a influência das leis coesivas (triangular, exponencial e trapezoidal) na previsão da resistência de JSS sob diferentes condições materiais. Para tal, foram usadas juntas adesivas com aderentes de carbono-epóxico e um adesivo frágil (Araldite® AV138) e outro dúctil (Araldite® 2015) e com valores de  $L_0$  entre 10 e 80 mm. A Figura 25 detalha as diferentes leis coesivas para ambos os adesivos testados em tração (a) e a Figura 26 em corte (b). A Figura 27 traduz o desvio percentual obtido entre os valores experimentais e numéricos por MEF para o adesivo Araldite® 2015 (normalizados pelos respetivos valores de tensão máxima ( $P_{máx}$ ) experimentais).

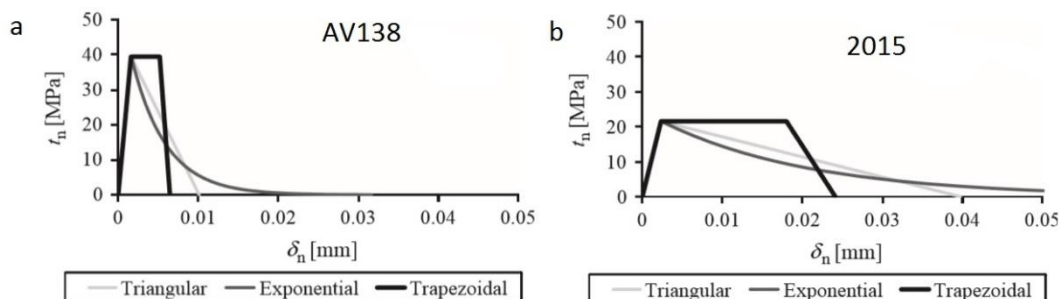


Figura 25 – Lei coesiva em tração para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 [81]

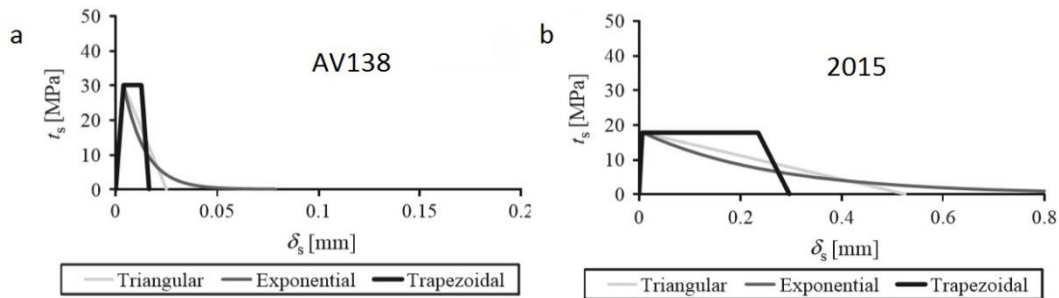


Figura 26 – Lei coesiva em corte para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 [81]

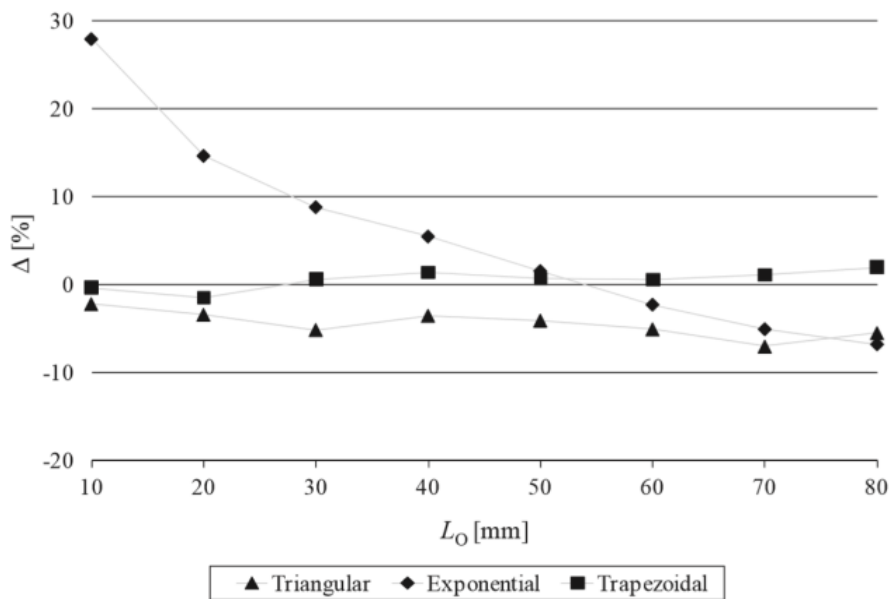


Figura 27 – Desvio percentual entre os valores experimentais e numéricos de  $P_{máx}$  para o Araldite® 2015 [81]

Observa-se que as previsões pela lei trapezoidal são as que mais se aproximam dos dados experimentais. Relativamente aos erros percentuais, os dados experimentais e o MEF apresentam um erro máximo de 1,9% para  $L_0 = 80$  mm. Estes resultados estão em conformidade com trabalhos anteriores realizados com este tipo de adesivo [76, 82].

Considerando a lei triangular, houve uma depreciação do valor de  $P_{máx}$ , com uma tendência óbvia para grandes discrepâncias com os maiores valores de  $L_0$  (variação percentual  $\Delta = -2,2\%$  para  $L_0 = 10$  mm, crescendo de forma sustentada para valores maiores de  $L_0$ ;  $\Delta = -5,5\%$  para  $L_0 = 80$  mm). Justificou-se esta tendência com as distribuições de tensões (nomeadamente as tensões de corte) nas JSS. De facto, quando  $L_0$  assume valores pequenos, a distribuição praticamente uniforme das tensões de corte entre as extremidades torna a forma da lei MDC praticamente irrelevante porque, quando  $P_{máx}$  é atingido, o adesivo encontra-se carregado de forma quase uniforme em toda a sua extensão. Pela análise de MEF, esta situação equivale a um cenário em que os níveis de tensão de todos os elementos coesivos estão na proximidade de  $t_{ns}^0$  em toda a camada de adesivo. Como tal, a forma da lei coesiva não

é muito relevante. Por outro lado, quando  $L_0$  assume valores maiores, os gradientes de tensão na camada de adesivo aumentam e os respetivos desvios aos dados experimentais também sofrem um aumento. Apesar das variações observadas para os resultados experimentais, a lei triangular ainda consegue prever  $P_{m\acute{a}x}$  com uma precisão razoável, o que é relevante porque a lei coesiva triangular é a de mais fácil utilização em termos de implementação, tempo de cálculo, definição dos parâmetros coesivos e disponibilidade nos códigos comerciais de MEF.

A lei coesiva exponencial apresentou resultados contrários para o intervalo considerado de valores de  $L_0$ . Para valores pequenos de  $L_0$ ,  $P_{m\acute{a}x}$  foi sobrestimado numericamente ( $\Delta$  máximo de 27,9% para  $L_0 = 10$  mm). Os valores de  $\Delta$  diminuem com o aumento de  $L_0$  e há uma aproximação aos valores experimentais para  $L_0 = 50$  mm. A partir deste ponto, registaram-se previsões por defeito de  $P_{m\acute{a}x}$  (até um máximo de  $\Delta = -6,8\%$  para  $L_0 = 80$  mm).

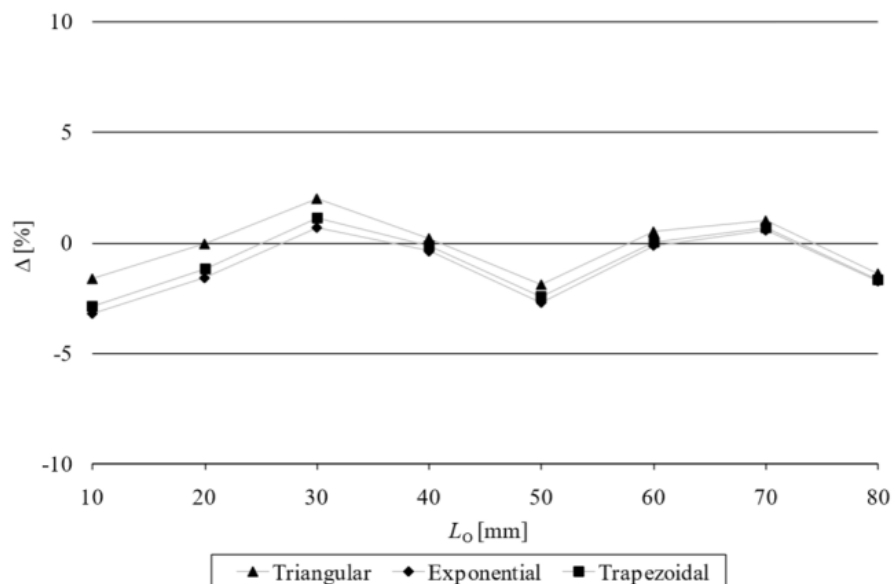


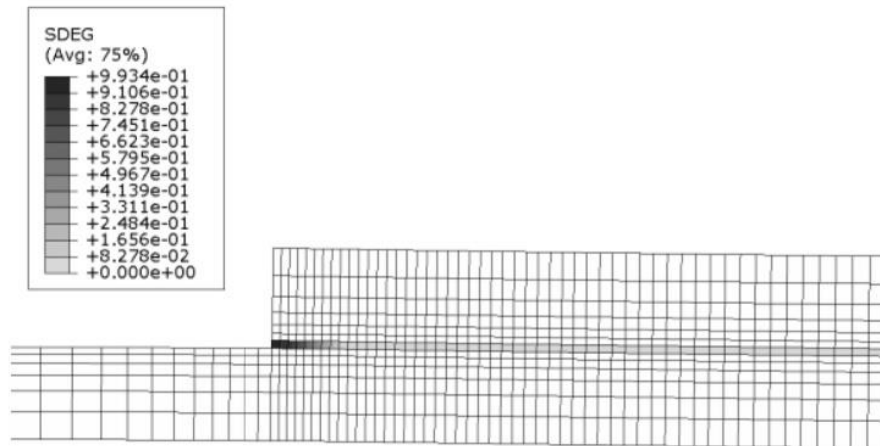
Figura 28 – Desvio percentual entre os valores experimentais e numéricos de  $P_{m\acute{a}x}$  para o Araldite® AV138 [81]

A Figura 28 apresenta a mesma comparação para o adesivo Aradite® AV138. Observa-se uma grande diferença na ordem de grandeza de  $\Delta$  uma vez que, para o adesivo Araldite® AV138, o desvio máximo é aproximadamente 3%, quando comparado com os 30% para o Araldite® 2015.

Por outro lado, os resultados obtidos nas três leis coesivas registaram a mesma tendência para toda a gama de valores de  $L_0$ . Isto está relacionado com a fragilidade do Araldite® AV138, em especial em comparação com a ductilidade do Araldite® 2015. De facto, a lei coesiva ao corte do Araldite® 2015 apresenta um valor de deslocamento de rotura ao corte na ponta da fenda ( $\delta_3^f$ ) superior em mais que uma ordem de grandeza relativamente ao Araldite® AV138. Como resultado desta diferença, a forma das leis coesivas do Araldite® AV138 é muito menos influente porque a zona em

amaciamento é praticamente insignificante relativamente à do Araldite® 2015. Na Figura 29 pode ser observada uma comparação com as juntas de  $L_0=80$  mm coladas com os adesivos Araldite® AV138 (a) e Araldite® 2015 (b) quando se atinge  $P_{\text{máx}}$  (lei coesiva trapezoidal). O parâmetro *stiffness degradation* (SDEG) corresponde à degradação da rigidez ao corte, em que  $\text{SDEG}=0$  corresponde à ausência de dano e  $\text{SDEG}=1$  indica a rotura completa.

a)



b)

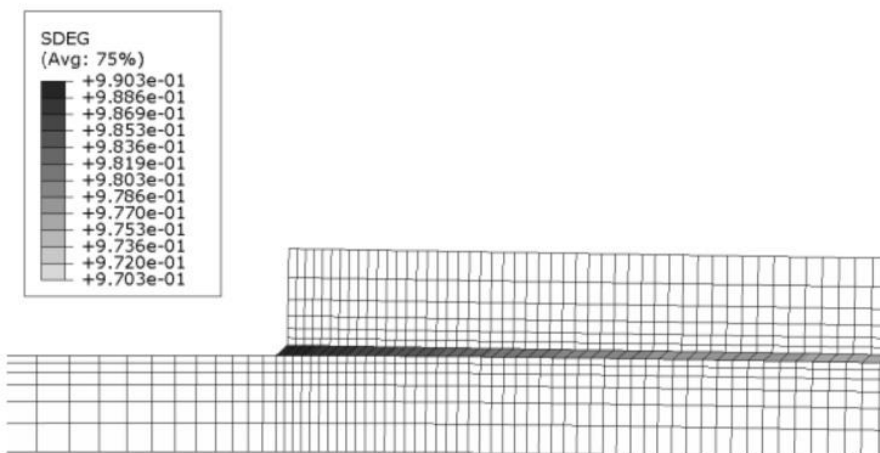


Figura 29 – Degradação da rigidez para as juntas com  $L_0=80$  mm e com o (a) Araldite® AV138 (b) e Araldite® 2015 quando  $P_{\text{máx}}$  é atingido (lei trapezoidal) [81]

A região de influência das leis coesivas para o Araldite® AV138 é restrita a uma pequena porção da sobreposição e quaisquer diferenças na forma das leis coesivas têm um efeito reduzido. Isto também ajuda a justificar a tendência igual para as três leis coesivas, apesar de se observar uma pequena redução de  $\Delta$  entre as três formas com o aumento de  $L_0$  e variações pouco expressivas para os valores maiores de  $L_0$ . Esta variação é explicada pelos aumentos dos gradientes de tensão na ligação adesiva,

tanto em corte como em arrancamento, reduzindo o comprimento de adesivo em amaciamento, onde as diferenças entre as três leis coesivas ocorrem.

Em condições de rotura frágil, as três leis coesivas revelaram-se adequadas para a previsão da resistência das juntas, apesar de os melhores resultados (especialmente para valores reduzidos de  $L_0$ ) terem sido alcançados com a lei triangular (valor máximo de  $\Delta$  de -1,9% para  $L_0=10$  mm). Analisando os resultados da lei trapezoidal, estes apresentaram desvios superiores (máximo  $\Delta = -2,9\%$  para  $L_0=10$  mm). Os resultados da lei exponencial apresentam uma redução ainda mais acentuada (máximo  $\Delta = -3,2\%$  para  $L_0 =10$  mm), embora seguindo a mesma tendência.

Conclui-se que a lei coesiva tem uma grande influência na previsão de resistência para as juntas com adesivos dúcteis (como é o caso do Araldite® 2015), caso em que uma lei trapezoidal é mais adequada. No caso dos adesivos frágeis (como é o caso do Araldite® AV138), a lei triangular é mais adequada apesar de a diferença entre as três leis ser reduzida.

#### 2.2.2.3.3 Influência dos parâmetros coesivos na resistência das juntas

As análises numéricas disponíveis para a previsão da resistência de juntas adesivas têm vindo a ser melhoradas ao longo dos anos. A previsão de resistência da junta adesiva era realizada por comparação das tensões máximas e métodos tradicionais relacionados com a resistência dos materiais, e a precisão das previsões dependia principalmente da quantidade de hipóteses que eram consideradas e que limitavam o verdadeiro problema a ser estudado. Recentemente, foram publicados alguns trabalhos sobre a definição dos parâmetros coesivos ( $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$ ,  $t_n^0$  e  $t_s^0$ ), que pode ser efetuada com diferentes técnicas, como: método da determinação de propriedades, método direto e método inverso, envolvendo diferentes graus de complexidade e precisão dos resultados. Independentemente do método de identificação de parâmetros utilizados, esperam-se desvios nos valores entre a previsão quantitativa dos parâmetros coesivos e o comportamento real da camada adesiva [14-15]. Alguns destes trabalhos são validados experimentalmente através de ensaios como DCB, ENF e JSS, normalmente com bons resultados [7-11]. Os parâmetros MDC dependem, invariavelmente, da espessura adesiva ( $t_A$ ) e espessura aderente ( $t_P$ ).

Campilho et al. [83], em 2012, estudaram numericamente a influência dos parâmetros coesivos mais importantes de um modelo de dano triangular em modo misto ( $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$ ,  $t_n^0$  e  $t_s^0$ ) na previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples sujeitas à tração com substratos de compósito de carbono-epóxico. O objetivo principal do estudo baseava-se em questões como a divergência na exatidão das técnicas de determinação de parâmetros coesivos e respetiva avaliação de desvios nos resultados da simulação com variações dos parâmetros coesivos.

Foi estudada a influência da variação percentual de cada um dos parâmetros coesivos ( $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$ ,  $t_n^0$  e  $t_s^0$ ) de forma isolada e também o resultado da combinação destes parâmetros, no valor de  $P_{m\acute{a}x}/P_{m0}$  da junta numérica em estudo ( $P_{m0}$  representa  $P_{m\acute{a}x}$  para os parâmetros iniciais dos modelos). De uma forma gradual, as propriedades iniciais foram sujeitas a variações desde -80 até +100% dos seus valores iniciais. A influência da variação de cada parâmetro na lei coesiva respectiva está representada na Figura 30 para  $G_{Ic}$  (a) e  $G_{IIc}$  (b) e na Figura 31 para  $t_n^0$  (a) e  $t_s^0$  (b). Na Figura 32, Figura 33 e Figura 34 estão apresentadas a influência de variações percentuais de  $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$ , e  $G_{Ic} + G_{IIc}$ , respetivamente, no valor de  $P_{m\acute{a}x}/P_{m0}$ .

Verifica-se que quando são aplicados valores de  $G_{Ic}$  e/ou  $G_{IIc}$  inferiores aos reais obteve-se resultados penalizadores para a precisão dos modelos numéricos (máxima subestimação de  $\approx 44,5\%$  para  $L_0 = 80$  mm, pela redução de 80% de  $G_{Ic} + G_{IIc}$  dos seus valores iniciais). Por outro lado, com a utilização de valores  $G_{Ic}$  e/ou  $G_{IIc}$  superiores aos reais obteve-se uma influência reduzida nos resultados (máxima previsão por excesso de  $\approx 9,3\%$  para  $L_0 = 80$  mm; aumento de  $G_{Ic} + G_{IIc}$  de +100%).

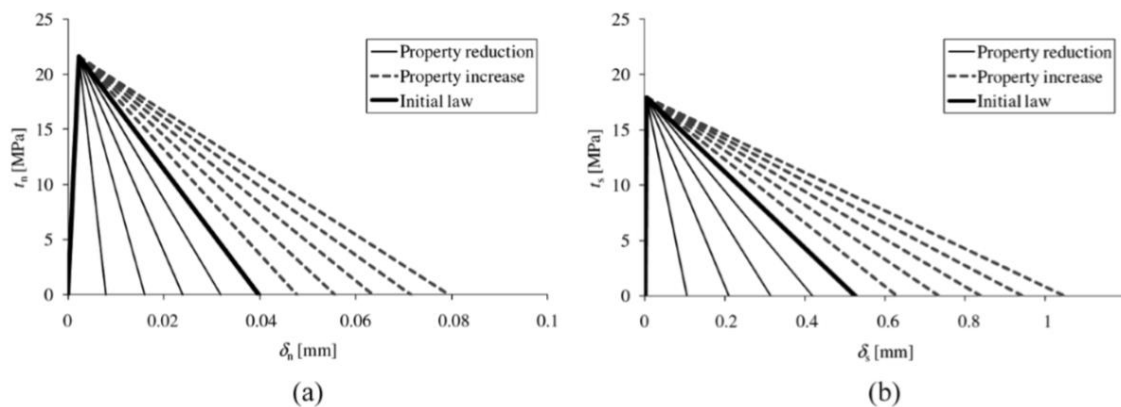


Figura 30 – Leis coesivas (a) à tração (b) e corte para alteração de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  entre -80 até +100% do valor inicial [83]

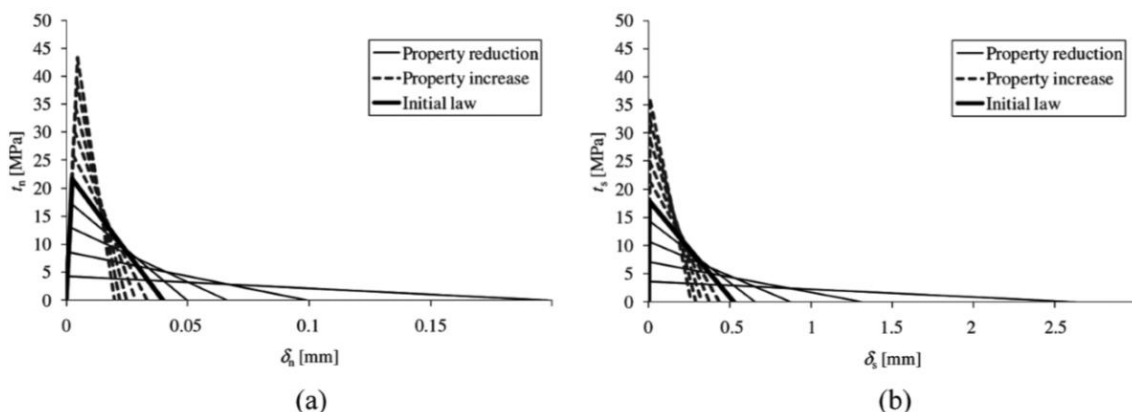


Figura 31 – Leis coesivas (a) à tração (b) e corte para alteração de  $t_n^0$  e  $t_s^0$  entre -80 até +100% do valor inicial [83]

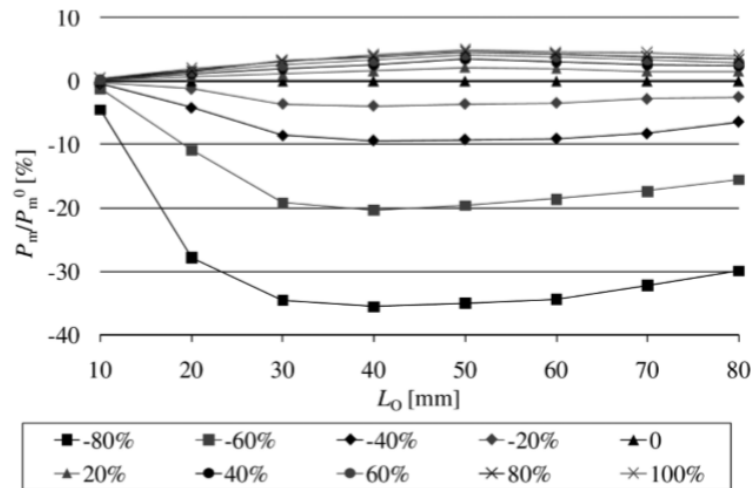


Figura 32 – Variação percentual de  $P_{m\acute{a}x}/P_{m0}$  com valores de  $G_{ic}$  desde -80 até +100% do valor inicial [83]

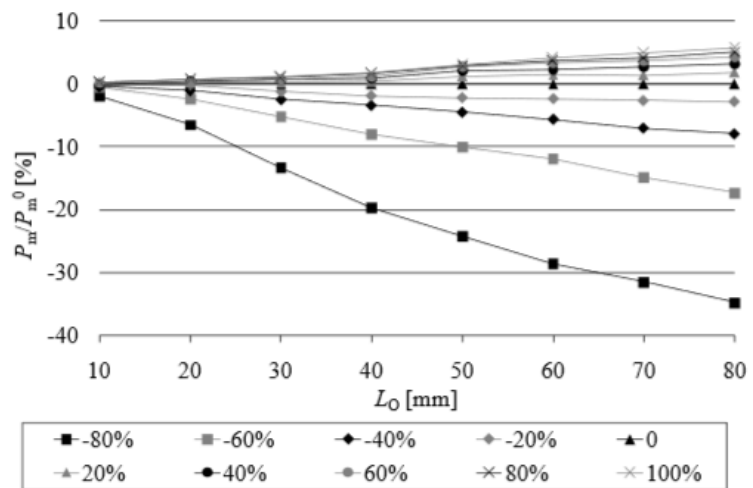


Figura 33 – Variação percentual de  $P_{m\acute{a}x}/P_{m0}$  com valores de  $G_{IIc}$  desde -80 até +100% do valor inicial [83]

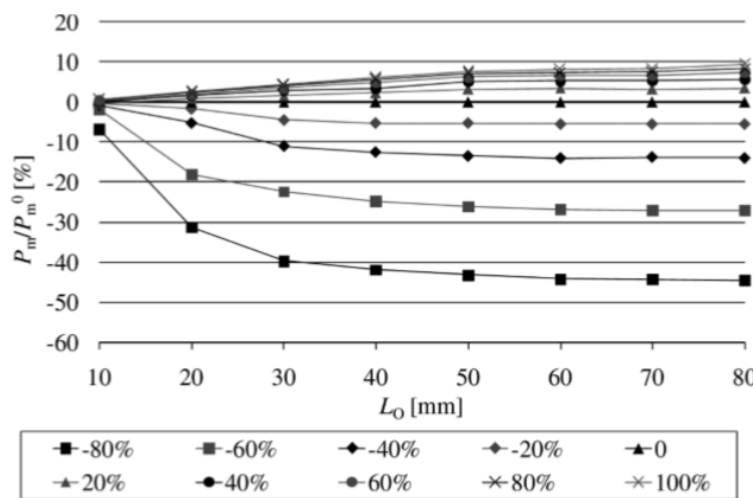


Figura 34 – Variação percentual de  $P_{m\acute{a}x}/P_{m0}$  com valores de  $G_{ic} + G_{IIc}$  desde -80 até +100% dos valores iniciais [83]

A Figura 35, Figura 36 e Figura 37 traduzem a influência da variação de  $t_n^0$ ,  $t_s^0$  e  $t_n^0 + t_s^0$  nos valores de  $P_{m\acute{a}x}/P_{m0}$ .

Verifica-se que a previsão por excesso de  $t_n^0$  é inconsequente (diferença máxima de  $\approx 3,2\%$  para  $L_0 = 20$  mm e aumento de +100%), apesar de existirem variações ligeiras quando os valores de  $t_n^0$  são inferiores aos reais, particularmente para valores pequenos de  $L_0$  (diferença máxima de  $\approx 29,1\%$  para  $L_0 = 20$  mm e -80% de redução). O valor de  $t_s^0$  apresenta uma grande influência nos resultados de  $P_{m\acute{a}x}/P_{m0}$ , com uma relação quase proporcional entre a variação por defeito de  $t_s^0$  e a previsão de  $P_{m\acute{a}x}/P_{m0}$  (diferença máxima de  $\approx 79,1\%$  para  $L_0 = 10$  mm e redução de -80%). Por outro lado, as previsões por excesso de  $t_s^0$  não apresentam melhorias evidentes de  $P_{m\acute{a}x}/P_{m0}$ , em particular para valores elevados de  $L_0$  (diferença máxima de  $\approx 78,7\%$  para  $L_0 = 10$  mm e aumento de +100%). Considerando o efeito combinado de  $t_n^0 + t_s^0$ , este apresenta-se idêntico ao de  $t_n^0$  isoladamente (aumento máximo de  $\approx 90,0\%$  para variação de  $t_n^0 + t_s^0$  de +100%, e redução máxima de 79,4% para variação de  $t_n^0 + t_s^0$  de -80%).

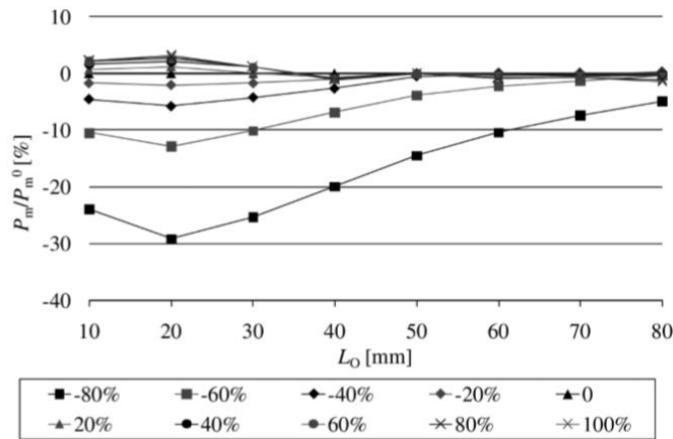


Figura 35 – Variação percentual de  $P_{m\acute{a}x}/P_{m0}$  com valores de  $t_n^0$  desde -80 até +100% do valor inicial [83]

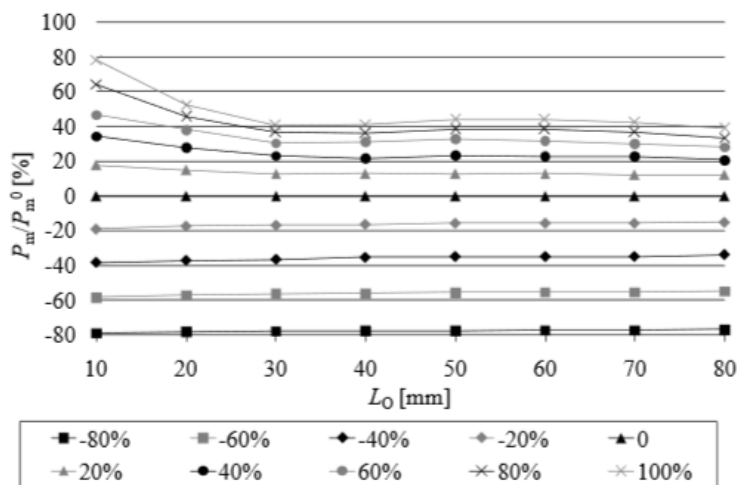


Figura 36 – Variação percentual de  $P_{m\acute{a}x}/P_{m0}$  com valores de  $t_s^0$  desde -80 até +100% do valor inicial [83]

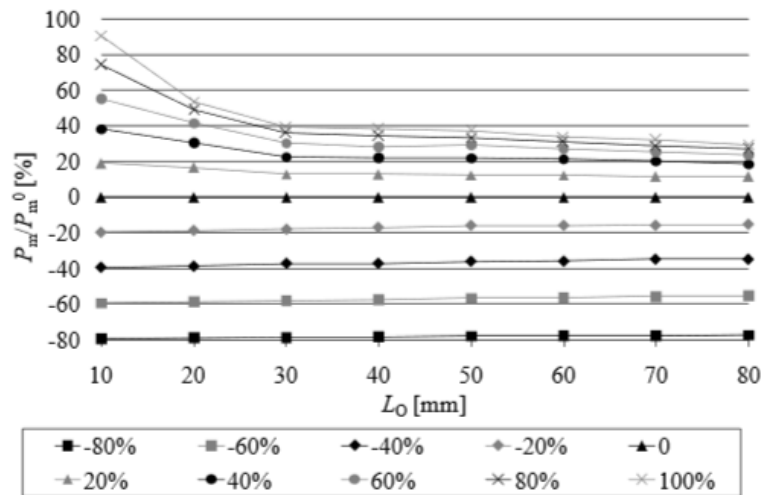


Figura 37 – Variação percentual de  $P_{máx}/P_{m0}$  com valores de  $t_n^0$  e  $t_s^0$  desde -80 até +100% dos valores iniciais [83]

A influência da variação combinada dos quatro parâmetros ( $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$ ,  $t_n^0$  e  $t_s^0$ ) nos valores de  $P_{máx}/P_{m0}$  é representada pela Figura 38. A redução dos parâmetros traduz-se em valores de  $P_{máx}/P_{m0}$  sensivelmente proporcionais às variações percentuais dos parâmetros. Por outro lado o aumento dos parâmetros coesivos não se traduz na mesma relação proporcional. Nestas condições, a melhoria não é tão expressiva, com um desvio máximo à proporcionalidade de  $L_0 = 80$  mm (previsão por excesso de  $\approx 69,6\%$  com + 100% de aumento dos parâmetros).

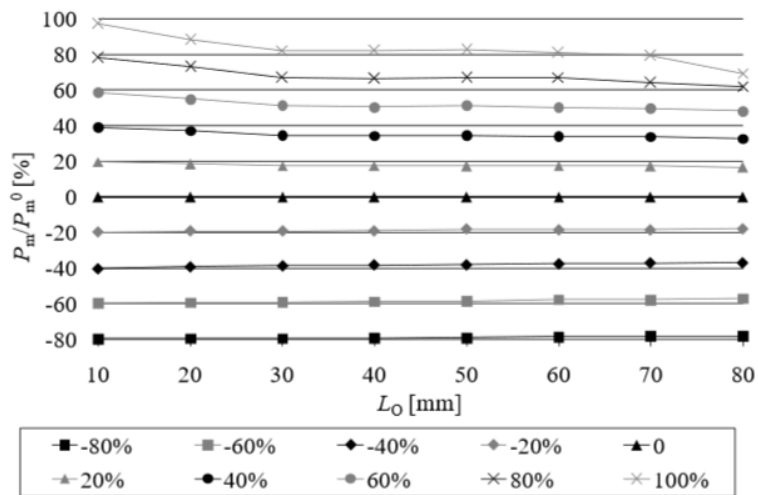


Figura 38 – Variação percentual de  $P_{máx}/P_{m0}$  com valores de  $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$ ,  $t_n^0$  e  $t_s^0$  desde -80 até +100% dos valores iniciais [83]

#### 2.2.2.3.4 Métodos de determinação dos parâmetros coesivos

Diversos estudos foram publicados nos últimos anos referentes à definição dos parâmetros coesivos ( $G_I$ ,  $G_{II}$ ,  $t_n^0$  e  $t_s^0$ ) e incluem diferentes graus de complexidade e precisão nos resultados esperados. Contudo, os parâmetros coesivos exigem

calibrações cuidadosas através de dados experimentais e respetiva validação com a finalidade de simular com precisão o processo de falha. A obtenção da lei coesiva pode ser obtida pelo método de determinação das propriedades, método direto e método inverso [43]. A aplicação de modelos coesivos permite a simulação do comportamento à fratura de um material, recorrendo às chamadas leis coesivas.

A técnica de determinação de propriedades consiste no cálculo separado de cada um dos parâmetros da lei coesiva, através de ensaios apropriados. O método inverso baseia-se num procedimento de ajuste por tentativa e erro entre os dados experimentais de juntas adesivas e as previsões obtidas através de EF, tais como a curva  $P-\delta$ , permitindo uma adaptação das leis simplificadas de MDC para condições particulares [43, 81]. Estas duas abordagens assumem inicialmente uma forma do MDC para a simulação de um determinado material, que o irá replicar de forma aproximada em termos de comportamento pós-elástico [84]. No método direto é obtida a forma precisa da lei de MDC, a partir dos ensaios de caracterização da fratura pela diferenciação das curvas  $G_I-\delta_I$  ou  $G_{II}-\delta_{II}$  [43].

Contrariamente ao método de determinação de propriedades, o método inverso e o método direto fornecem estimativas mais precisas, já que o adesivo é caracterizado sob condições idênticas às aplicações reais, dando estimativas precisas [85]. No entanto, o método direto é tido como o mais preciso, uma vez que fornece a forma exata das leis de MDC [43].

#### 2.2.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano é uma ferramenta para a modelação da degradação de materiais. Como exemplos de aplicação destes modelos para depreciação das propriedades referem-se ligações adesivas finas [86], delaminação de compósitos ou até rotura da matriz [87]. Nestes métodos estipulam-se parâmetros de dano para modificar a resposta constitutiva dos materiais através de uma redução de rigidez ou resistência. De um modo geral, o dano é implementado com a alteração das propriedades físicas dos materiais para simular o crescimento irreversível de microdefeitos [88].

Tal parâmetro pode ser usado numa lei de evolução de dano para modelação do dano antes da iniciação da fenda e durante a evolução da mesma. As variáveis de dano podem ser qualificadas em dois grupos. Num dos grupos as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, apesar de estas não estarem diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. Noutro grupo, as variáveis estão relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [89].

Hua et al. [90] estudaram juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a condições de degradação ambiental distintas. Na modelação numérica introduziu-se um parâmetro de dano com base em deslocamentos na equação constitutiva dos

materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro foi sujeito a uma calibração recorrendo ao teste *Mixed-Mode Flexure* (MMF) em amostras envelhecidas. O parâmetro de dano permitiu estabelecer uma resposta linear do material na ausência de dano, dando um valor depreciado das tensões atuais após dano que dependia do deslocamento plástico equivalente em vez da deformação, o que permitiu obter resultados independentes da malha. Desta forma, foi possível a definição de um comprimento equivalente, ligado a cada ponto de integração dos elementos sólidos. O deslocamento plástico equivalente foi calculado utilizando a energia de rotura como sendo o trabalho de fratura da tensão de cedência após o início do dano [43].

Pela mecânica do dano, o crescimento deste é definido em função da carga para simulações estáticas [91] ou do número de ciclos para análises de fadiga [92, 93]. Os modelos de dano têm sido usados para cenários de fadiga de amplitude constante e variável [94].

Chen et al. [95] previram o início da rotura e propagação numa JSS pela mecânica do dano, tal como a carga de rotura, recorrendo à energia de deformação plástica média. Através de uma análise de EF, realizou-se uma simulação do processo de rotura. Quando era obtida uma solução convergente após cada incremento de carga, era realizada uma verificação para averiguar se a condição de rotura tinha sido atingida em qualquer região da junta. Nestas circunstâncias, os valores de  $E$  e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) do material no interior da região são repostos a zero ou muito próximos de zero, de tal modo que o elemento ou elementos correspondentes podem deformar-se quase livremente sem transferir qualquer carga. A confrontação de resultados experimentais e pelo EF no que diz respeito às cargas de rotura evidenciou que o critério de energia específico utilizado foi bem sucedido para a previsão da fratura. Todas as análises realizadas foram baseadas em condições bastante realistas: todas consideram a teoria de grandes deslocamentos e todos os materiais foram tratados elasto-plasticamente com base em ensaios experimentais realizados, com ou sem um filete de adesivo [43].

#### 2.2.2.5 Método de Elementos Finitos Extendido

O Método de Elementos Finitos Extendido (MEFE) pode ser considerado como um melhoramento ao método de EF para modelar o crescimento de dano em estruturas. Este método utiliza leis de dano para a previsão da fratura, que se fundamentam na resistência dos materiais para a iniciação do dano e deformações para a rotura (definido pelo  $G_n^c$ ), em alternativa dos valores de  $t_n^0/t_s^0$  ou  $\delta_n^0/\delta_s^0$  utilizados pelos MDC. Quando comparados estes métodos, o MEFE tem grande vantagem, porque não apresenta a obrigatoriedade da fenda seguir um trajeto pré-definido. Na verdade, a fenda pode propagar-se de forma livre no interior do material, sem o requisito da geometria das descontinuidades coincidir com a malha e ainda sem a necessidade de corrigir a malha na proximidade da fenda [96].

O MEFE foi introduzido pela primeira vez no final dos anos 90, por Belytschko and Black [97]. Este método baseia-se num conceito de partição de unidade, e pode ser implementado no método de EF através da introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto da extremidade da fenda, de forma a permitir o crescimento do dano e separação entre as faces da fenda [98]. Com o crescimento da fenda, a sua extremidade está constantemente a alternar a sua posição e orientação de acordo com as condições de carga e da geometria da estrutura. Simultaneamente, são criadas as funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos EF em torno do percurso ou extremidade da fenda.

Em 2011, Campilho et al. [59] efetuaram um estudo onde se compararam os métodos de MDC e MEFE, para a simulação de JSS e JSD entre aderentes de alumínio, coladas com um adesivo frágil. Uma das conclusões do estudo foi que o MEFE não é o método mais adequado para a propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, devido à direção da fenda ser perpendicular à tensão principal máxima. No entanto, conseguiu-se uma precisão razoável da previsão da resistência das juntas ao considerar que a rotura iniciava na altura da iniciação da fenda. Por outro lado, os MDC obtiveram previsões precisas do comportamento da junta.

### 2.3 Ensaios de caracterização à fratura

A mecânica da fratura é normalmente utilizada para a caracterização do comportamento dos materiais à fratura (estudo da propagação de fenda), obtendo propriedades fundamentais para a previsão da resistência das ligações adesivas. Esta técnica assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo e também considera os defeitos nas estruturas.

Dois critérios são associados à mecânica da fratura para prever a propagação de uma fenda: o critério baseado na taxa de libertação de energia e no fator de intensidade de tensão.

Griffith [99], em 1920, deu os primeiros passos na mecânica da fratura recorrendo a ensaios experimentais. Comparou os valores teóricos e reais da resistência à rotura e verificou que o diferencial entre eles era devido à existência de fissuras nos materiais e que a rotura ocorre na fissura mais crítica [100]. Estabeleceu então que a propagação de um defeito interno ocorre quando a energia disponível na extremidade desse defeito ( $G$  – Taxa de Libertação de Energia) e devida à solitação aplicada, iguala a energia necessária da propagação da fenda ( $G_c$  – Taxa Crítica de Libertação de Energia), esta última considerada uma propriedade do material. A equação que traduz a taxa de libertação de energia é dada por [5]:

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA}, \quad (3)$$

sendo  $W$  o trabalho realizado pelas forças exteriores,  $U$  a energia de deformação interna do sólido e  $dA$  a variação de superfície da fissura.

O critério que se baseia no conceito do fator de intensidade de tensão, é caracterizado por um fator de escala que define a alteração do estado de tensão na vizinhança da extremidade da fenda. A expressão que define este estado é traduzida por:

$$K = Y\sigma_R\sqrt{\pi a}, \quad (4)$$

sendo  $Y$  um fator adimensional que depende da geometria e distribuição de carga e  $\sigma_R$  a tensão remota aplicada ao comprimento de fenda.

Quando a tensão atinge o valor crítico,  $\sigma_u$ , obtém-se a Tenacidade à Fratura. A equação que a traduz é definida como:

$$K_c = \sigma_u\sqrt{\pi a}. \quad (5)$$

Qualquer destes critérios subentende a presença de um defeito na zona de colagem. Contudo, em algumas aplicações estruturais a sua localização e o seu tamanho não é tão evidente, tornando-se numa clara dificuldade de aplicação dos métodos [5, 101].

Na Figura 39 estão representados três modos principais de propagação de fendas. O modo I caracteriza o modo de abertura (*opening*) e ocorre quando esforços de tração provocam a abertura da fenda. No modo II (*sliding*) as superfícies da fenda têm movimento relativo perpendicular à fenda. No modo III (*tearing*) o movimento é paralelo à frente da fenda [5, 102].

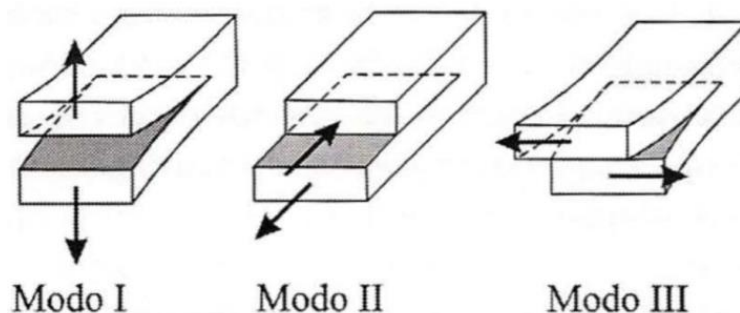


Figura 39 – Modos de rotura [5]

A solicitação na ponta da fenda de uma estrutura ocorre geralmente como resultado da combinação entre os modos principais. A Figura 40 apresenta as várias combinações entre os modos principais de carregamento.

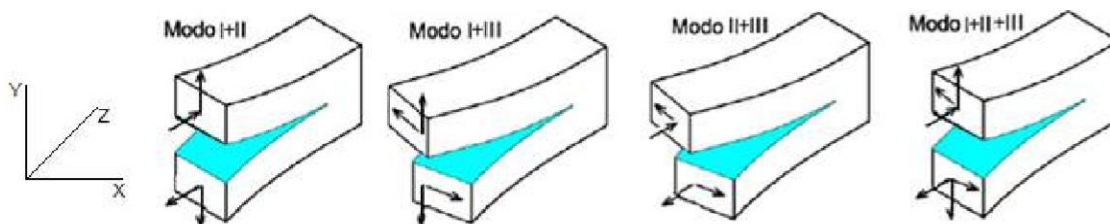


Figura 40 – Combinação entre os modos principais de carregamento [1]

Entre os dois critérios anteriormente descritos, o critério da taxa crítica de libertação de energia  $G_c$  é o mais utilizado. Por outro lado, os modos de carregamento mais estudados são o modo puro I e modo puro II [5]. Os ensaios de rotura em ligações adesivas servem para avaliar as propriedades dos adesivos à fratura e posteriormente efetuar a previsão da resistência de juntas adesivas. Para o estudo destes ensaios recorre-se normalmente aos conceitos da Mecânica da Fratura Linear Elástica.

Em modo I, os ensaios que assumem maior destaque para a caracterização à fratura de um adesivo carregado são o *Compact Tension* (CT), *Single Edge Notched Bend* (SENB), *Tapered Double Cantilever Beam* (TDCB) e mais tipicamente o DCB [103, 104]. Relativamente ao carregamento em modo II, os principais ensaios são o ENF, *End-Loaded Split* (ELS) e *Four-point End-Notched Flexure* (4ENF) [104]. Quanto aos carregamentos em modo I+II (misto), os ensaios mais relevantes são o *Asymmetric Double-Cantilever Beam* (ADCB), *Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam* (ATDCB), *Mixed-Mode Bending* (MMB) e *Mixed-Mode Flexure* (MMF) [105].

### 2.3.1 Modo puro I

O modo puro I (tração) é caracterizado pelo movimento de abertura da fenda na direção perpendicular ao seu plano provocado pelas tensões de tração nessa direção (Figura 41), sendo este considerado como o modo mais crítico referente à propagação da fenda. Entre os vários métodos de ensaio para determinar o modo I, o DCB é considerado como o mais simples e mais prático.

O ensaio DCB (Figura 41) está normalizado para a medição de  $G_{Ic}$  em juntas adesivas (D3433-99 [106]). Este ensaio consiste em solicitar com uma carga  $P$  a extremidade de um provete que contenha uma pré-fenda, sendo posteriormente registado o seu valor em função do deslocamento  $\delta$ , verificado no mesmo ponto. É considerada uma região inicial denominada de fenda inicial, cujo comprimento é definido por  $a_0$ , isenta de adesivo (pré-fenda). A velocidade de ensaio está compreendida entre 0,5 e 3 mm/min, variando conforme as dimensões dos substratos e as características dos materiais a serem ensaiados [5].

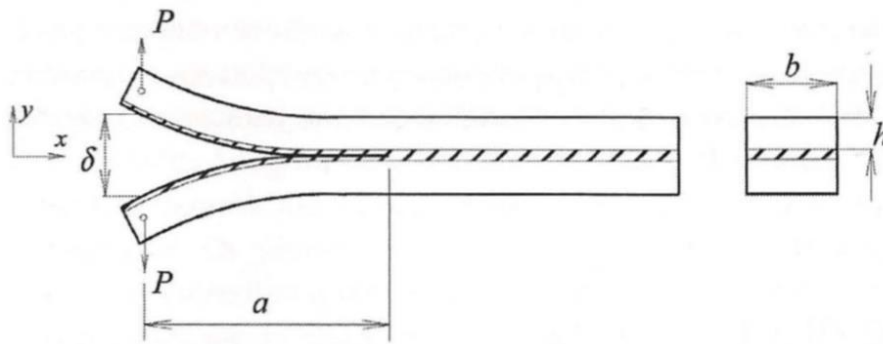


Figura 41 – Representação esquemática do ensaio DCB [5]

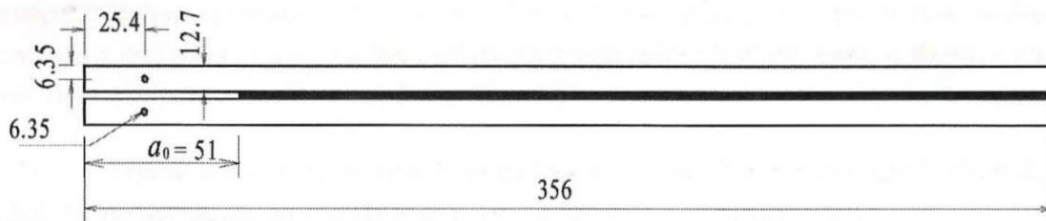


Figura 42 – Geometria do ensaio DCB adotada pela norma ASTM D3433-99 (dimensões em mm) [5]

Pela norma ASTM D3433 – 99 os substratos terão que apresentar as dimensões especificadas na Figura 42, enquanto a altura mínima dos substratos deva ser definida para evitar a deformação plástica dos mesmos durante o ensaio. Esta altura é representada pela equação (6):

$$h = \sqrt{\frac{6 T a}{B \sigma_y}}, \quad (6)$$

sendo  $h$  a espessura mínima que o substrato deve ter para que só ocorra deformação elástica,  $T$  corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda na ligação adesiva,  $B$  representa a largura do substrato,  $a$  a medição do comprimento da fenda e  $\sigma_y$  corresponde à tensão de cedência do material do substrato [106].

A taxa crítica de libertação de energia de deformação em modo I ( $G_{IC}$ ) pelo método *Compliance Calibration Method* (CCM) determina-se recorrendo à equação de Irwin-Kies [103]

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da}, \quad (7)$$

sendo  $C$  a sua flexibilidade, dada pela relação  $C = \frac{\delta}{P}$ . Como em variadas juntas coladas, dependendo do adesivo, a ponta da fenda pode não ser claramente visível, e esta dificuldade pode introduzir erros não desprezáveis na derivada da flexibilidade

relativamente ao comprimento da fenda  $\left(\frac{dC}{da}\right)$ . Para ajustar a curva de  $C = f(a)$ , utilizou-se o polinómio de 3º grau ( $C=C_3a^3+C_2a^2+C_1a+C_0$ ) que conduz a

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2B} (3C_3a^2 + 2C_2a + C_1) \quad (8)$$

A taxa crítica de libertação de energia de deformação em modo I ( $G_{IC}$ ) pelo método *Corrected Beam Theory* (CBT) é obtida recorrendo à Teoria das Vigas Corrigidas [103]

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)}, \quad (9)$$

onde  $\Delta$  é uma correção para a rotação e deslocamento do aderente junto à frente da fenda. Para o método *Compliance-Based Beam Method* (CBBM) o  $G_{IC}$  pode ser assim obtido a partir da equação (7)

$$G_{IC} = \frac{6P^2}{B^2h} \left( \frac{2a_{eq}^2}{h^2E_f} + \frac{1}{5G_{13}} \right), \quad (10)$$

sendo  $G_{13}$  as propriedades elásticas do material,  $E_f$  o módulo de flexão e  $a_{eq}$  a medição do comprimento da fenda equivalente.

### 2.3.2 Modo puro II

O modo puro II é caracterizado como o modo deslizante devido ao corte, onde as superfícies da fenda se deslocam uma sobre a outra, perpendicularmente à frente da fenda (Figura 39). Atualmente, não existe um consenso quanto à caracterização à fratura em modo II de juntas adesivas. Apesar de existirem vários tipos de ensaios para determinar  $G_{IIc}$ , destacam-se os ensaios ENF, ELS e 4ENF [5]. Um dos obstáculos que habitualmente se encontra está relacionado com a medição do comprimento da fenda em modo II. A propagação da fenda dá-se de uma forma algo complexa trazendo alguma incerteza na medição experimental do seu comprimento [107].

O ensaio ENF (Figura 43), devido à simplicidade de fabrico e de condições de ensaio, é usualmente o ensaio mais utilizado [5]. Este ensaio é utilizado regularmente para a determinação de  $G_{IIc}$  e consiste na utilização de um provete com espessura constante, simplesmente apoiado nas extremidades, sujeito a uma carga  $P$  a meio vão e a uma velocidade constante, onde num dos lados é criada uma pré-fenda. Este carregamento irá originar a propagação da fenda, sendo registada a carga  $P$  e o comprimento da fenda  $a$  em intervalos de tempo constantes. Devido à instabilidade do comprimento da fenda, este ensaio requer uma relação  $a_0/L > 0,7$  [108].

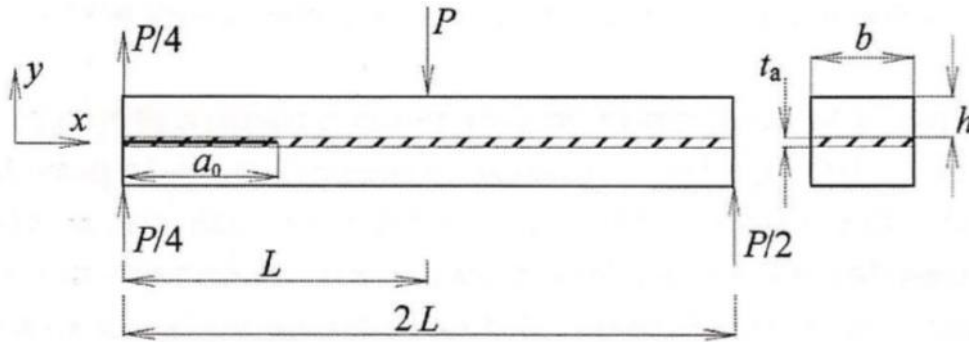


Figura 43 – Representação esquemática do ensaio ENF [5]

Pelo método CCM,  $G_{IIc}$  pode ser definido pela expressão [109]

$$G_{IIc} = \frac{P^2}{2B} m, \quad (11)$$

sendo  $m$  uma constante. Pelo método *Direct Beam Theory* (DBT) pode-se escrever

$$G_{IIc} = \frac{9P\delta a^2}{2B(2L^3 + 3a^3)}, \quad (12)$$

sendo  $L$  é o comprimento de metade da amostra. Pelo método CBT tem-se que

$$G_{IIc} = \frac{9(a + 0.42\Delta_1)^2 P^2}{16B^2 h^3 E_1}, \quad (13)$$

sendo  $E_1$  o módulo axial e  $\Delta_1$  a correção do comprimento da fenda. A taxa crítica de libertação de energia em modo II ( $G_{IIc}$ ) para o ensaio ENF pelo método CBBM é dada pela equação seguinte.

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16B^2 E_f h^3}. \quad (14)$$

### 2.3.3 Modo misto I+II

De uma forma geral, as juntas adesivas estão sujeitas em simultâneo a mais do que um modo de carregamento (normalmente I e II). Existe, portanto, interesse na determinação da resistência dessas juntas em modo misto (combinação de tensão normal e de corte). Assim sendo, a caracterização de um material sob solicitações em modo misto I+II pode ser efetuada recorrendo a vários ensaios [5].

Na Tabela 4 estão os ensaios mais representativos para a caracterização à fratura de juntas adesivas em modo misto ( $c$  representa a flexibilidade, dada por  $\delta/P$ ).

Tabela 4 – Exemplos de ensaios para o modo misto I+II [107, 110]

Tipo de Ensaio	Representação Esquemática	Grau de rácio de modos, $\varphi$ (°)
<i>Asymmetric Double-Cantilever Beam (ADCB)</i>		0 - 34
<i>Single Leg Bending (SLB)</i>		41
<i>Crack Lap Shear (CLS)</i>		49
<i>Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam (ATDCB)</i>		20
<i>Mixed-Mode Bending (MMB)</i>		$\varphi = f(c)$
<i>Fixed Ratio Mixed-Mode (FRMM)</i>		41

A caracterização à fratura em modo misto (I+II) fica dependente da definição do grau de rácio de modos,  $\varphi$ , útil para caracterizar a fratura em problemas planos, dado pela equação (15)

$$\varphi = \tan^{-1} \sqrt{\frac{G_{II}}{G_I}} \quad (15)$$

O teste MMB, apesar de permitir variar o parâmetro  $\varphi$ , requer uma configuração complexa. O ADCB também permite alguma variação do parâmetro  $\varphi$ , contudo na região de fratura assemelha-se ao modo puro I. Os testes como CLS, FRMM e SLB conseguem promover valores de modo misto intermédios. O teste SLB apresenta um excelente compromisso entre a sua simplicidade e equilíbrio entre as energias dissipadas nos dois modos [110]. As principais diferenças entre os ensaios residem nas montagens experimentais, entre as diferentes combinações de modo I e modo II, que são geralmente calculadas pela relação  $G_{II}/G_I$  ou pelo parâmetro  $\varphi$  e ainda pela possibilidade de ajuste da contribuição de cada um dos modos.

Em materiais homogêneos e isotrópicos as fendas tendem a propagar-se em modo I, perpendicularmente à direção da tensão principal máxima, independentemente da orientação da fenda original. Contudo, numa junta colada a direção de propagação da fenda está restringida pelos substratos originando, na grande maioria das situações, uma propagação de modo misto (I + II) [5]. Assim, é fundamental usar critérios energéticos adequados para combinação de modos, que geralmente aparecem na seguinte forma [111]

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^A + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^B = 1. \quad (16)$$

O critério linear ( $A=B=1$ ) e o quadrático ( $A=B=2$ ) são os mais usados.

# DESENVOLVIMENTO

## **3.1 Trabalho experimental**

- 3.1.1 Materiais utilizados
- 3.1.2 Ensaio DCB
- 3.1.3 Ensaio ENF
- 3.1.4 Análise do comportamento das juntas

## **3.2 Trabalho numérico**

- 3.2.1 Condições da análise numérica
- 3.2.2 Modelos de dano coesivo
- 3.2.3 Estimativa das leis coesivas em tração
- 3.2.4 Estimativa das leis coesivas em corte
- 3.2.5 Análise dos resultados obtidos



### 3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são documentados todos os passos que conduziram à preparação final dos provetes, bem como os ensaios. Toda esta componente experimental foi realizada nos laboratórios do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). É abordado também o tratamento de dados com vista à obtenção de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ , com a devida comparação de diferentes métodos de redução, bem como potencialidades e limitações dos mesmos. Naturalmente, é efetuada também uma comparação dos três adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

É abordada também a análise numérica pelo MEF, utilizando como plataforma de simulação o *software* Abaqus® que tem como objetivo principal a reprodução dos resultados experimentais através da utilização de leis de dano coesivo que sejam representativas do comportamento dos adesivos utilizados.

#### 3.1 Trabalho experimental

Os trabalhos experimentais descritos nesta secção foram realizados em trabalhos anteriores [1-3]. Estes consistiram em ensaios de juntas unidas por ligações adesivas, sujeitas a esforços de tração (ensaio DCB) e corte (ensaio ENF), com o intuito de determinar a tenacidade à fratura de adesivos estruturais. O trabalho realizado na presente dissertação consistiu no tratamento dos dados conducente à obtenção de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  e respetiva análise.

##### 3.1.1 Materiais utilizados

Neste subcapítulo são descritos todos os materiais usados no trabalho experimental, mais propriamente os substratos e os adesivos, sendo ainda feita uma análise das suas propriedades mecânicas mais relevantes para a análise numérica a realizar.

###### 3.1.1.1 Substratos

O material utilizado para os substratos foi a liga de alumínio AW 6082-T651, conhecida liga estrutural da série 6000. As ligações de alumínio apresentam como principais propriedades a leveza, boa condutividade elétrica, resistência à corrosão, durabilidade, facilidade de conformação, elevada energia de superfície, boa formabilidade e elevada relação resistência/peso [6]. Este material apresenta uma elevada resistência à tração, de cerca de 300 MPa, segundo informação técnica do fornecedor, obtida através do envelhecimento artificial, a uma temperatura de aproximadamente 180°C. As juntas adesivas entre componentes de alumínio são normalmente usadas na indústria de aeronaves e automóveis, tendo aplicações diversas como chassis de camiões, navios e em pontes. A Tabela 5 descreve a sua composição química e a Tabela 6 elenca as propriedades mecânicas, ambas conforme especificadas pelo fabricante [112].

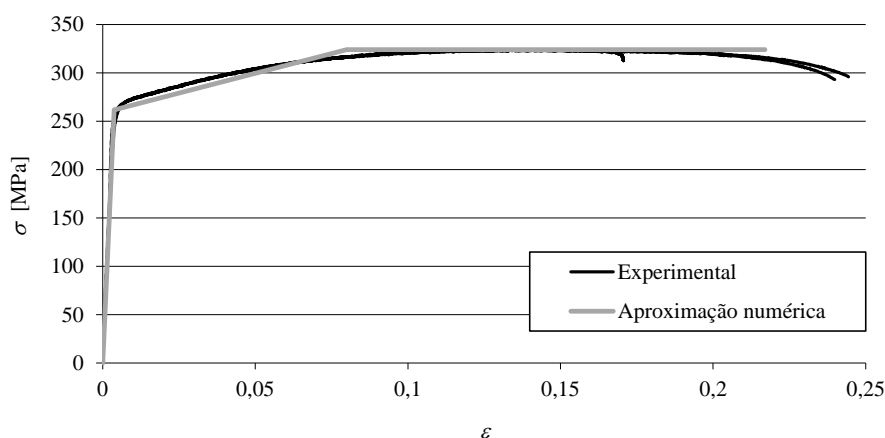
Tabela 5 – Composição química (%) da liga de alumínio AW 6082-T651 [112]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	Outros
Mínimo	0,7	0	0	0,4	0,6	0	0	0	----	0
Máximo	1,3	0,50	0,10	1	0,12	0,25	0,20	0,10	Restante	0,15

Tabela 6 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW6082-T651 [112]

Espessura [mm]	Tensão de rotura mínima [MPa]	Tensão de cedência 0,2% mínima [MPa]	Alongamento %	Dureza Brinell HB	Módulo de elasticidade longitudinal [GPa]
6-12.5	300	255	9	91	70

As curvas de tração–deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) desta liga de alumínio AW6082–T651 foram também obtidas em trabalhos anteriores [59] em conformidade com a norma ASTM–E8M–04 (*American Society for Testing and Materials*) e são apresentadas na Figura 44, onde foram definidas as seguintes propriedades: resistência à tração de  $324,00 \pm 0,16$  MPa, módulo de Young ( $E$ ) de  $70,07 \pm 0,83$  GPa, tensão de cedência à tração de  $261,67 \pm 7,65$  MPa e deformação de rotura à tração de  $21,70 \pm 4,24\%$ .

Figura 44 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  da liga de alumínio AW6082–T651 e respectiva aproximação para análise através do MEF [59]

### 3.1.1.2 Adesivos

Os adesivos utilizados nos ensaios já foram alvo de ensaios em trabalhos anteriores relativamente às propriedades mecânicas mais relevantes, que serão indicadas em tabelas para caracterização genérica de cada um dos adesivos. Neste trabalho foram usados três adesivos: o Araldite® AV138, o Araldite® 2015 e o SikaForce® 7752.

### 3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O Araldite® AV138 (Figura 45) é um adesivo estrutural de base epóxida e o seu fabricante é a empresa americana HUNTSMAN. É composto por dois componentes: resina AV138 e endurecedor HV998. A relação de mistura, em peso, é de 100g de resina AV138 para 40g de endurecedor HV998, com uma precisão de  $\pm 5\%$ . A mistura é feita manualmente e deve ser realizada num recipiente limpo (colocar a resina e o endurecedor juntos e mexer durante no mínimo 3 minutos para que a mistura fique homogénea). A aplicação deste adesivo é feita de forma manual com recurso a uma espátula. Segundo informações apresentadas na ficha do fabricante, possui um tempo de manuseamento (*working life* ou *pot life*), após mistura dos seus componentes, de 35 minutos a uma temperatura de 25°C e um tempo de cura para alcançar 13 MPa de resistência ao corte de 24 horas a 23°C ou 15 MPa em 1 hora a 60°C. Este adesivo é utilizado na área das telecomunicações, eletrónica e indústria aeroespacial devido à baixa emissão de gases durante a cura.



Figura 45 – Modo de fornecimento da resina Araldite® AV 138 e endurecedor HV 998 [113]

A partir da curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  (Figura 46), obtida em trabalhos anteriores [114] por ensaio de tração em provetes maciços, constatou-se que este adesivo apresenta um comportamento frágil.

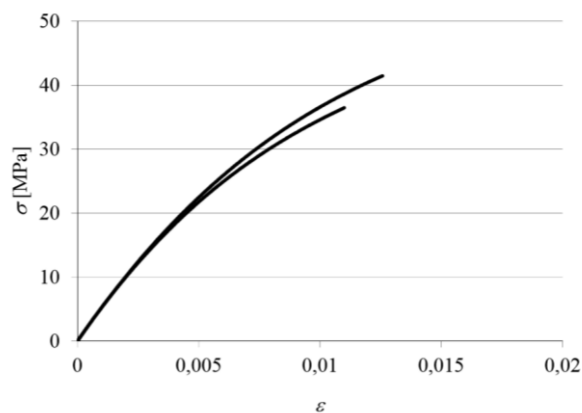


Figura 46 – Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  relativas ao adesivo Araldite® AV 138 [114]

Na Tabela 7 apresentam-se as principais propriedades do adesivo Araldite® AV138 que foram obtidas experimentalmente na referência [114].

Tabela 7 – Propriedades relativas ao adesivo Araldite® AV138 [114]

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, $E$ [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson, $\nu^*$	0,35
Tensão de cedência, $\sigma_y$ [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura, $\sigma_f$ [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura, $\epsilon_f$ [%]	1,21±0,10
Módulo de corte, $G$ [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência de corte, $\tau_y$ [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura de corte, $\tau_f$ [MPa]	30,2±0,40
Deformação de rotura de corte, $\gamma_f$ [%]	7,8±0,7
Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]	0,20
Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]	0,38

\* Dados do fabricante

### 3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O Araldite® 2015 (Figura 47) é um adesivo estrutural de base epóxida e o seu fabricante é a empresa americana HUNTSMAN. É composto por dois componentes (componente A resina e componente B endurecedor). É bastante utilizado na ligação de substratos metálicos e compósitos. A sua aplicação é efetuada tipicamente através de uma pistola manual de deposição, forçando a circulação dos componentes em quantidades idênticas através de um bico que promove a mistura, iniciando o adesivo de seguida o processo de cura. A sua razão de aplicação é de 50g/50g. Segundo informação disponibilizada na ficha técnica, este adesivo possui um tempo de manuseamento, após mistura de componentes, de cerca de 30 a 40 min a uma

temperatura de 25°C. O tempo de cura para alcançar 10 MPa de resistência ao corte é de 6 horas a 23°C ou 35 minutos a 60°C.



Figura 47 – Modo de fornecimento do adesivo Araldite® 2015 [115]

A resistência e durabilidade das ligações efetuadas 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, isopropanol (para plásticos) ou outros agentes desengordurantes, a fim de remover todos os vestígios de contaminações e sujidade. As curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 48, obtidas experimentalmente na referência [81].

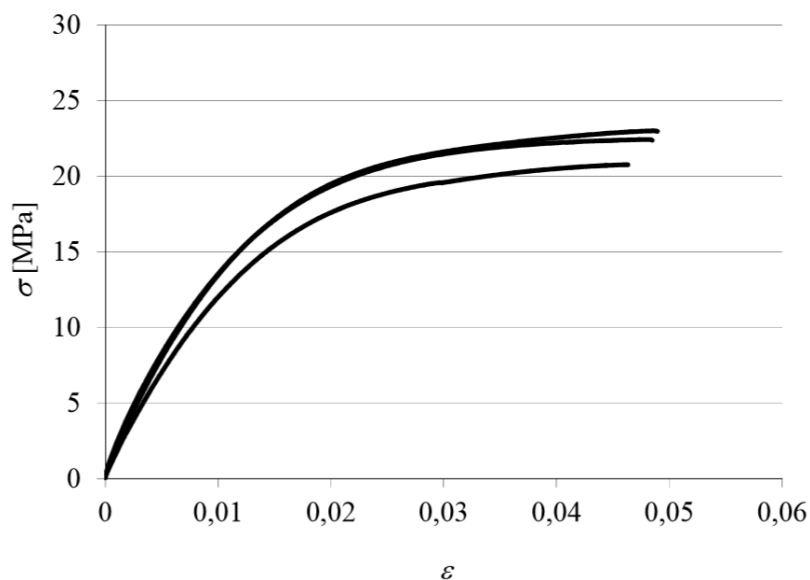


Figura 48 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  relativa ao adesivo Araldite® 2015 [114]

Na Tabela 8 estão apresentadas algumas das suas propriedades mecânicas, obtidas em trabalhos realizados anteriormente [114].

Tabela 8 – Propriedades relativas ao adesivo Araldite® 2015 [71, 81, 114]

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, $E$ [GPa]	1,85±0,21
Coeficiente de Poisson, $\nu^*$	0,33
Tensão de cedência, $\sigma_y$ [MPa]	12,63±0,61
Tensão de rotura, $\sigma_f$ [MPa]	21,63±1,61
Deformação de rotura, $\varepsilon_f$ [%]	4,77±0,15
Módulo de corte, $G$ [GPa]	0,56±0,21
Tensão de cedência de corte, $\tau_y$ [MPa]	14,6±1,3
Tensão de rotura de corte, $\tau_f$ [MPa]	17,9±1,8
Deformação de rotura de corte, $\gamma_f$ [%]	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

\* Dados do fabricante

### 3.1.1.2.3 SikaForce® 7752

O SikaForce® 7752 (Figura 49) é um adesivo de poliuretano de resistência moderada e ductilidade elevada e o seu fabricante é a empresa suíça SIKA. É composto por dois componentes (A e B). A mistura resina/endurecedor deve ser efetuada na razão de 5g/1g, respetivamente. Trata-se de um adesivo com uma estrutura bastante estável e flexível que possui uma boa resistência térmica e elevada resistência ao corte e ao arrancamento. A aplicação é manual, com recurso a uma espátula, colocando-se o adesivo nas superfícies a colar. Após a mistura dos componentes, o tempo de manuseamento do adesivo é de cerca de 60 minutos, segundo informações disponibilizadas na ficha técnica.



Figura 49 – Modo de fornecimento do adesivo SikaForce® 7752 [116]

É um adesivo que apresenta um comportamento dúctil, como é possível verificar na Figura 50, cuja curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  é representativa de um conjunto de curvas obtidas num trabalho anterior [117].

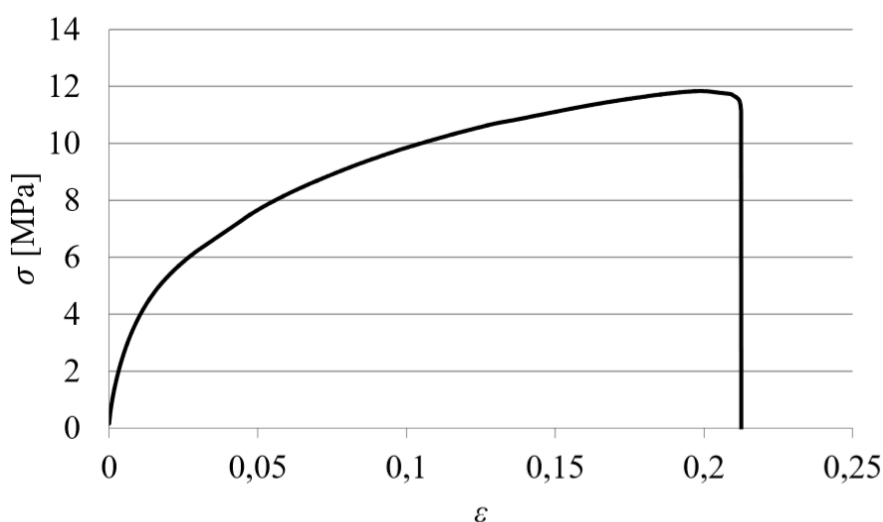


Figura 50 – Curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  relativa ao adesivo SikaForce® 7752 [117]

Este adesivo resiste a temperaturas até 120°C de forma permanente. O processo de cura pode ser realizado à temperatura ambiente, funciona como retardador de chama, é resistente ao envelhecimento e ao impacto, e apresenta excelente flexibilidade a baixas temperaturas.

Na Tabela 9 são apresentadas as principais propriedades do adesivo SikaForce® 7752, obtidas experimentalmente na referência [117].

Tabela 9 – Propriedades relativas ao adesivo SikaForce® 7752 [117]

Propriedades	SikaForce® 7752
Módulo de Young, $E$ [GPa]	493,81±89,60
Coeficiente de Poisson, $\nu^*$	0,32
Tensão de cedência, $\sigma_y$ [MPa]	5,16±1,14
Tensão de rotura, $\sigma_f$ [MPa]	11,49±0,25
Deformação de rotura, $\epsilon_f$ [%]	13,92±9,14
Módulo de corte, $G$ [GPa]	187,75±16,35
Tensão de cedência de corte, $\tau_y$ [MPa]	5,16±1,14
Tensão de rotura de corte, $\tau_f$ [MPa]	10,17±0,64
Deformação de rotura de corte, $\gamma_f$ [%]	54,82±6,39
Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]	2,36±0,17
Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]	5,41±0,47

### 3.1.2 Ensaio DCB

Nesta secção é apresentado o trabalho efetuado tendo em vista a caracterização do comportamento à fratura em modo I de juntas adesivas através do ensaio DCB. São descritos aspetos relevantes do trabalho experimental, incluindo a preparação dos provetes, a realização dos ensaios de fratura e a análise dos resultados obtidos.

#### 3.1.2.1 Geometria, fabrico e teste dos provetes DCB

A Figura 51 mostra a geometria característica de um provete para um ensaio DCB [103].

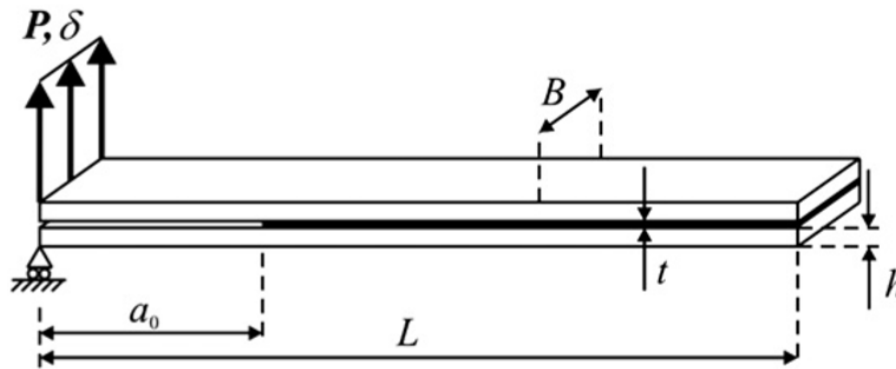


Figura 51 – Representação esquemática de um ensaio DCB [103]

Os parâmetros geométricos relevantes são os seguintes:

- $a_0$  - Comprimento de pré-fenda inicial [mm];
- $L$  - Comprimento total do provete [mm];
- $h$  - Espessura do substrato [mm];
- $t$  - Espessura do adesivo [mm];
- $P$  - Carregamento [N];
- $\delta$  - Deslocamento [mm];
- $B$  - Largura do substrato [mm].

Os substratos foram fabricados a partir de uma chapa laminada de 2000x1000x3 (dimensões em mm) de liga de alumínio AW6082-T651, que foi cortada em tiras com uma largura de 27 mm, posteriormente cortadas a um comprimento de 143 mm. Esta operação foi realizada pelo fornecedor da chapa (Lanema). Os substratos foram desengordurados com acetona e seguidamente, as tiras de alumínio foram granalhadas a seco com óxido de alumínio, um abrasivo em pó com alto poder de limpeza, elevada tenacidade e dureza. A granalhagem foi executada no Laboratório de Ensaio Tecnológicos do ISEP utilizando uma máquina CIDBLAST RT6S (Figura 52). De modo a garantir 1 mm de espessura de adesivo ao longo dos provetes, foram utilizados calços calibrados na extremidade colada dos provetes e na zona da pré-fenda, tal como representado na Figura 53. O calço utilizado na extremidade colada dos provetes foi uma fita de aço calibrada com espessura de 1 mm e a largura do provete. O outro calço permite não só garantir o valor de  $t_A$  como também criar a pré-fenda do adesivo. O calço consiste numa lâmina de barbear de 0,1 mm no meio de duas fitas de aço calibradas com 0,45 mm [1].



Figura 52 – Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S [1]

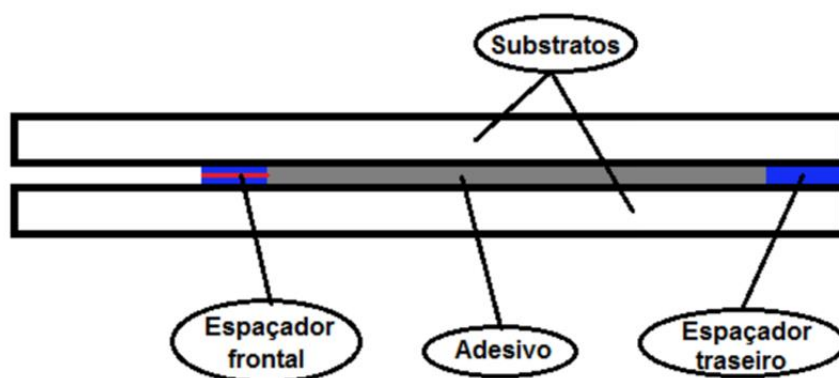


Figura 53 – Representação esquemática da localização dos calços [1]

Relativamente às dimensões utilizadas nos provetes, a Tabela 10 indica as dimensões dos provetes utilizados no ensaio DCB. Não sendo viável a execução de furos para solicitar os provetes em modo I devido à reduzida espessura dos substratos (3 mm), recorre-se a outra abordagem, optando-se por colar as dobradiças em aço na extremidade não colada dos provetes. Após a produção dos provetes, estes foram devidamente identificados e numerados unitariamente, utilizando a seguinte designação: A2 para Araldite® 2015, AV para Araldite® AV138 e SF para SikaForce® 7752. Com os provetes identificados por adesivo utilizado e numerados, realizou-se a medição das suas dimensões reais. Foram realizadas duas medições de  $L$ ,  $B$  e  $h$  em posições limite, consideradas nos tratamentos dos dados subseqüentes aos ensaios, e foi considerado o valor médio das duas medições [1].

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente numa máquina de ensaios Shimadzu AGX 100 (Figura 54), com uma célula de carga de 100 kN. Importante referir

também que todos os ensaios foram efetuados com uma velocidade de solitação de 0,5 mm/min. A gravação dos dados foi realizada a 5 Hz para a carga ( $P$ ) e deslocamento ( $\delta$ ), registados durante o ensaio, como uma função do tempo decorrido desde a sua iniciação. Foram tiradas fotos durante o teste dos provetes com 5 segundos de intervalo, usando uma camara digital CANON 70D com uma resolução de 18 megapixel e processador de imagem DIGIC 5, sem zoom e distância focal fixa de aproximadamente 100 mm à face visível dos provetes. A câmara foi posicionada de forma a captar a face lateral do provete desde o início da escala até um comprimento de fenda de aproximadamente 35 mm (Figura 55) [1].



Figura 54 – Máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 [3]

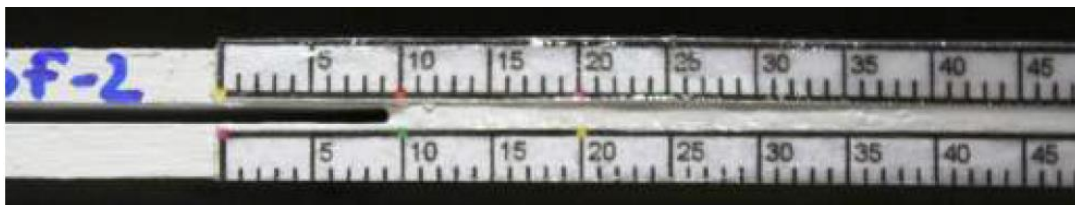


Figura 55 – Face lateral do provete captada pela câmara [1]

Tabela 10 – Dimensões dos provetes DCB [1, 118]

Adesivo	Provete	Comprimento $L$ [mm]	Largura $B$ [mm]	Espessura $h$ [mm]	Pré-fenda $a_0$ [mm]
Araldite® AV138	AV_1	143,06/143,03	27,05/26,94	3,03/3,03	49,35
	AV_2	143,06/143,08	26,81/26,55	3,02/3,01	47,26
	AV_3	143,07/143,13	26,89/26,77	3,06/3,01	46,43
	AV_4	143,03/143,34	26,93/26,90	3,01/3,02	47,84
	AV_5	143,06/143,13	26,91/26,95	3,02/3,03	45,89
	AV_6	143,19/143,08	26,90/27,05	3,01/3,04	46,89
Araldite® 2015	A2_1	143,06/143,02	27,02/26,73	3,06/3,06	46,68
	A2_2	143,07/143,13	26,82/26,81	3,01/3,03	47,35
	A2_3	143,12/143,12	26,91/26,88	3,03/3,00	47,40
	A2_4	143,02/143,11	26,89/26,89	3,02/3,04	46,37
	A2_5	143,10/143,00	26,98/27,02	3,01/3,02	46,92
	A2_6	143,04/143,04	27,03/26,86	3,03/3,00	46,06
SikaForce® 7752	SF_1	143	27	2,9	54,26
	SF_2				55,63
	SF_3				57,05
	SF_4				55,09
	SF_5				55,11
	SF_6				55,39

### 3.1.2.2 Resultados obtidos para o adesivo Araldite® AV138

Na Figura 56 são apresentadas as curvas  $P$ - $\delta$  experimentais correspondentes a cada um dos ensaios realizados com adesivo Araldite® AV138. Numa breve análise aos gráficos, verifica-se que todas as curvas  $P$ - $\delta$  apresentam no geral o mesmo comportamento. No entanto, os provetes com designação AV\_1 e AV\_4 apresentam quebras abruptas de carga ( $P$ ) durante a propagação da fenda, representativos da propagação instável da fenda. Contudo, como estes provetes apresentam também zonas de propagação estável e boa repetibilidade no que diz respeito ao comportamento geral e valores de  $G_{Ic}$  obtidos, estes provetes são incluídos na análise de  $G_{Ic}$  que se segue. De notar que as curvas  $P$ - $\delta$  apresentam também três fases distintas. Na primeira fase observa-se um regime elástico. Esta fase tem um comportamento reversível, em que a relação entre  $P$  e  $\delta$  é linear. Na segunda fase, verifica-se uma perda de linearidade na zona da carga máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ), correspondente a um processo irreversível. Nesta fase, a energia armazenada do provete atinge o valor crítico,  $G_{Ic}$ , originando o início de propagação da fenda. Na terceira fase, após  $P_{m\acute{a}x}$  ser atingida, verifica-se a propagação idealmente estável da fenda e a força vai diminuindo progressivamente. No final existe uma queda abrupta, originada pela rotura total do provete.

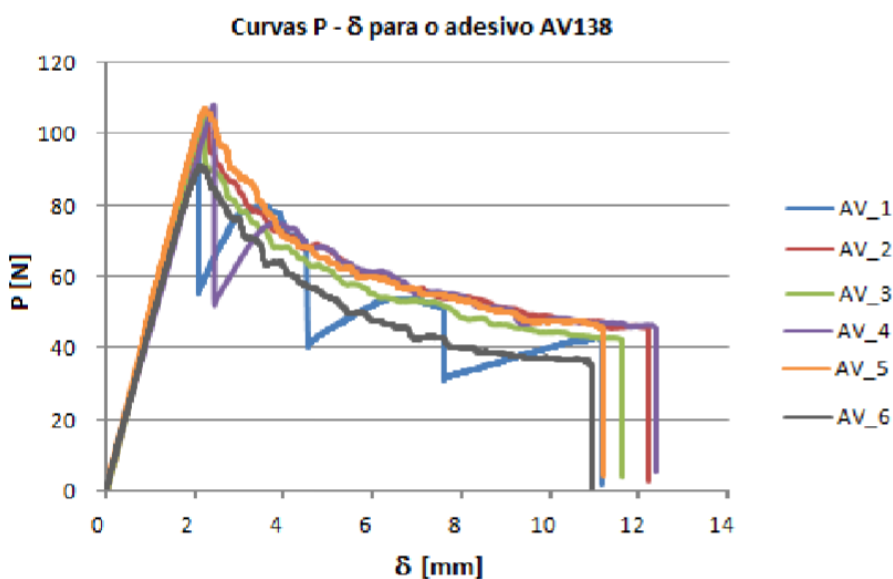


Figura 56 – Evolução das curvas  $P$ - $\delta$  do adesivo Araldite® AV138 [1]

Na Tabela 11 estão apresentados os dados referentes a  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$  (deslocamento para a carga máxima), deslocamento máximo ( $\delta_{m\acute{a}x}$ ), energia libertada desde o início até à carga máxima ( $E_{P_{m\acute{a}x}}$ ) e energia libertada desde o início até à rutura ( $E_{\delta_{m\acute{a}x}}$ ). Analisando os valores de desvio padrão, os dados refletem uma elevada repetibilidade, em especial no  $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ . Contudo, o parâmetro que resulta num maior desvio padrão é a

carga máxima, uma vez que o provete AV\_6, em termos percentuais, obteve o maior desvio, cerca de 11,8% em comparação com a média.

Tabela 11 – Valores de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta_{Pm\acute{a}x}$ ,  $\delta_{m\acute{a}x}$ ,  $E_{Pm\acute{a}x}$  e  $E_{\delta m\acute{a}x}$  para o adesivo Araldite® AV138 [1]

Provete	$P_{m\acute{a}x}$ [N]	$\delta_{Pm\acute{a}x}$ [mm]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$E_{Pm\acute{a}x}$ [J]	$E_{\delta m\acute{a}x}$ [J]
AV_1	101,56	2,05	11,12	0,10	0,56
AV_2	106,19	2,23	12,16	0,10	0,75
AV_3	105,19	2,17	11,61	0,10	0,63
AV_4	108,05	2,43	12,37	0,11	0,68
AV_5	107,19	1,49	11,19	0,17	0,66
AV_6	90,93	2,12	10,93	0,06	0,55
<b>Média</b>	103,19	2,08	11,57	0,13	0,63
<b>Desvio Padrão</b>	6,41	0,31	0,59	0,01	0,06

A Tabela 12 apresenta os valores de  $G_{Ic}$  obtidos para os quatro métodos. Os resultados mostram que a coerência entre provetes é ótima. Comparando os quatro métodos, observa-se uma diferença aceitável entre cada provete e os valores de desvio padrão para cada método de obtenção de  $G_{Ic}$ . Os dados referentes ao provete AV\_4 não foram considerados para efeitos de média e desvio padrão no método CCM. Para o CBBM obteve-se  $G_{Ic}=0,249\pm 0,033$  N/mm, para o CCM,  $G_{Ic}=0,199\pm 0,012$  N/mm, para o CBT,  $G_{Ic}=0,238\pm 0,030$  N/mm e, para o integral-J,  $G_{Ic}=0,245\pm 0,045$  N/mm. Claramente o método CCM é o que apresenta o valor de  $G_{Ic}$  mais baixo, estando os restantes valores muito próximos do método de referência CBBM.

A Figura 57 apresenta as curva-R pelos métodos CCM, CBT e CBBM para um provete representativo dos seis ensaios realizados com o adesivo Araldite® AV138. Estas apresentam boa repetibilidade no valor de patamar. Os três métodos preveem a propagação do dano a um valor aproximadamente constante de  $G_I$  ao longo de um comprimento de propagação ligeiramente inferior a 20 mm, sendo  $G_{Ic}$  o valor de patamar das curvas.

Tabela 12 – Valores de  $G_{Ic}$  pelos quatro métodos para o adesivo Araldite® AV138 [1]

Adesivo	Araldite® AV138			
	CBBM	CCM	CBT	Integral-J
Provete	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]
AV_1	0,231	0,200	0,237	0,224
AV_2	0,247	0,219	0,241	0,252
AV_3	0,234	0,193	0,215	0,231
AV_4	0,310	-	0,291	0,329
AV_5	0,254	0,189	0,237	0,237
AV_6	0,217	0,195	0,206	0,197
<b>Média</b>	0,249	0,199	0,238	0,245
<b>Desvio Padrão</b>	0,033	0,012	0,030	0,045

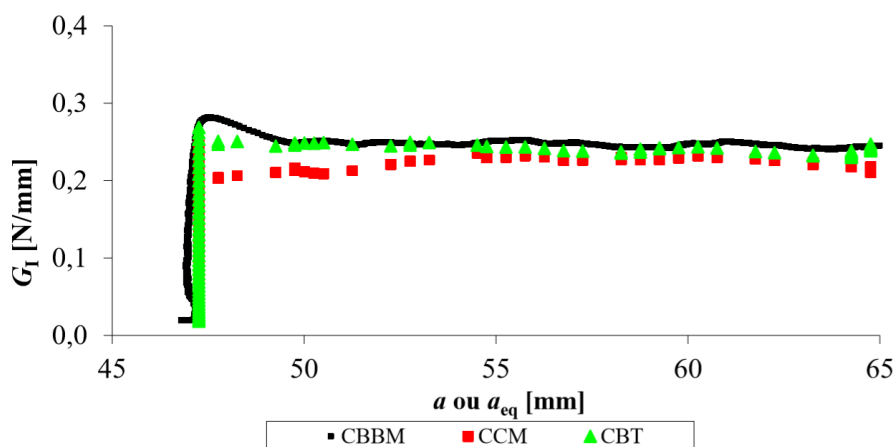


Figura 57 – Curvas-R de um provete DCB com o adesivo Araldite® AV138 [1]

### 3.1.2.3 Resultados obtidos para o adesivo Araldite® 2015

Na Figura 58 são apresentadas as curvas  $P-\delta$  experimentais dos provetes DCB com Araldite® 2015, correspondentes a cada um dos ensaios realizados. Numa análise às curvas, verifica-se que estas apresentam uma boa repetibilidade respeitante à rigidez

elástica (antes da propagação da fenda),  $P_{m\acute{a}x}$ , comportamento durante a propagação do dano e  $\delta_{m\acute{a}x}$ . Os gráficos apresentam três fases distintas. Na primeira fase corresponde ao regime elástico, a evolução de  $P$  com  $\delta$  tem um comportamento reversível. A segunda fase corresponde ao início de propagação da fenda. Na zona da  $P_{m\acute{a}x}$ , a energia armazenada no provete atinge o seu valor crítico,  $G_{Ic}$ . A perda de linearidade verificada é correspondente à formação da Zona de Processo de Fratura (ZPF). A terceira fase desenvolve-se após  $P_{m\acute{a}x}$ , em que a força aplicada diminui progressivamente, correspondendo a uma fase de crescimento de fenda. No final há uma quebra abrupta, motivada pela rotura total do provete. De notar que durante o período de propagação, a curva  $P$ - $\delta$  apresenta pequenas oscilações. Pode-se apontar como justificação o aparecimento de micro-fendas consecutivas propagando-se a uma curta distância, causando uma ligeira diminuição da força. Subsequentemente ao aparecimento da nova micro-fenda, ocorre um gradual aumento da força e assim sucessivamente, até à rotura total do provete [1].

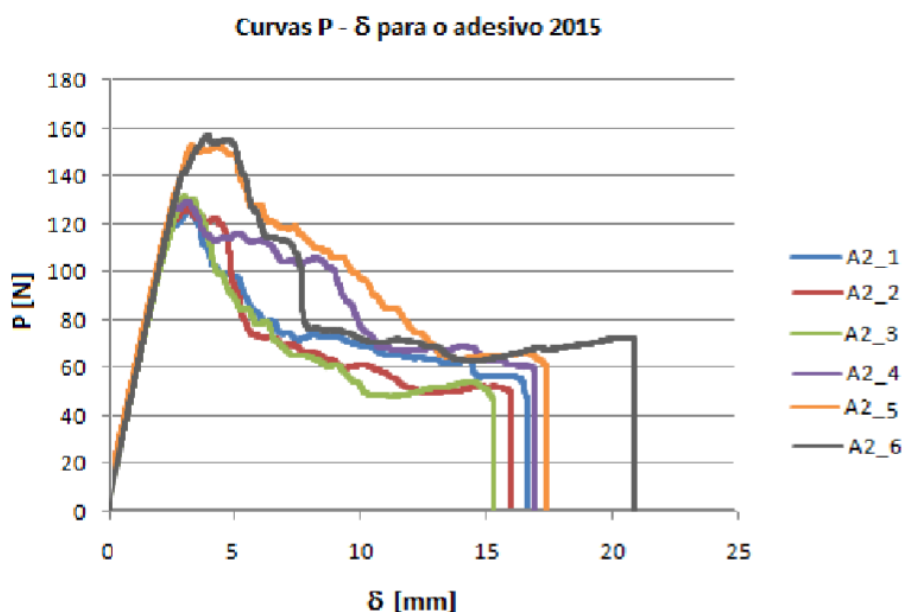


Figura 58 – Evolução das curvas  $P$ - $\delta$  do adesivo Araldite® 2015 [1]

A Tabela 13 apresenta os valores de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta_{Pm\acute{a}x}$ ,  $\delta_{m\acute{a}x}$ ,  $E_{Pm\acute{a}x}$  e  $E_{\delta m\acute{a}x}$ . Pela análise dos dados da tabela pode-se concluir que existe repetibilidade aceitável entre os resultados obtidos para os vários provetes. Nenhum provete foi excluído, pelo que todos os valores foram considerados para efeitos de cálculo da média e desvio padrão. No que concerne aos dados de  $P_{m\acute{a}x}$ , os provetes A2\_5 e A2\_6 destacam-se por apresentarem um valor superior à média de cerca de 10% e 11%, respetivamente. Este desvio leva a que o valor do desvio padrão para a  $P_{m\acute{a}x}$  seja bastante elevado.

Tabela 13 – Valores de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta_{Pm\acute{a}x}$ ,  $\delta_{m\acute{a}x}$ ,  $E_{Pm\acute{a}x}$  e  $E_{\delta m\acute{a}x}$  para o adesivo Araldite® 2015 [1]

Provete	$P_{m\acute{a}x}$ [N]	$\delta_{Pm\acute{a}x}$ [mm]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$E_{Pm\acute{a}x}$ [J]	$E_{\delta m\acute{a}x}$ [J]
A2_1	126,18	2,98	16,39	0,24	1,23
A2_2	125,82	2,89	15,67	0,24	1,11
A2_3	132,35	2,72	15,02	0,22	1,06
A2_4	129,44	2,63	16,46	0,23	1,43
A2_5	152,90	3,05	17,11	0,28	1,65
A2_6	157,64	3,44	20,39	0,34	1,78
<b>Média</b>	137,39	2,95	16,84	0,26	1,38
<b>Desvio Padrão</b>	14,13	0,28	1,88	0,04	0,29

A Tabela 14 resume os valores de  $G_{Ic}$  relativo aos ensaios realizados às juntas adesivas com o adesivo Araldite® 2015. Para este adesivo constata-se uma boa repetibilidade entre provetes. Comparando os quatro métodos, verifica-se uma diferença aceitável entre cada provete e os valores de desvio padrão para cada método de obtenção de  $G_{Ic}$ . Para o CBBM obteve-se  $G_{Ic}=0,539\pm 0,116$  N/mm, para o CCM,  $G_{Ic}=0,496\pm 0,110$  N/mm, para o CBT,  $G_{Ic}=0,530\pm 0,099$  N/mm, e para o integral-J,  $G_{Ic}=0,533\pm 0,123$  N/mm. Também para este adesivo, o método CCM é o que apresenta o valor de  $G_{Ic}$  mais baixo, estando os restantes valores muito próximos do método de referência CBBM.

A Figura 59 representa as curvas-R, determinadas pelos métodos CCM, CBT e CBBM, para um dos provetes testados, que representam os resultados globais obtidos com o adesivo Araldite® 2015. Verifica-se também neste caso uma boa correspondência entre os três métodos de obtenção de  $G_{Ic}$ . Observou-se um crescimento de fenda a  $G_I$  aproximadamente constante para todos os métodos e uma repetibilidade no valor de patamar.

Tabela 14 – Valores de  $G_{Ic}$  pelos quatro métodos para o adesivo Araldite® 2015 [1]

Adesivo	Araldite® 2015			
	CBBM	CCM	CBT	Integral-J
Provete	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]
A2_1	0,444	0,403	0,431	0,437
A2_2	0,467	0,387	0,484	0,434
A2_3	0,492	0,576	0,484	0,494
A2_4	0,460	0,399	0,471	0,456
A2_5	0,709	0,590	0,676	0,665
A2_6	0,663	0,619	0,632	0,712
<b>Média</b>	0,539	0,496	0,530	0,533
<b>Desvio Padrão</b>	0,116	0,110	0,099	0,123

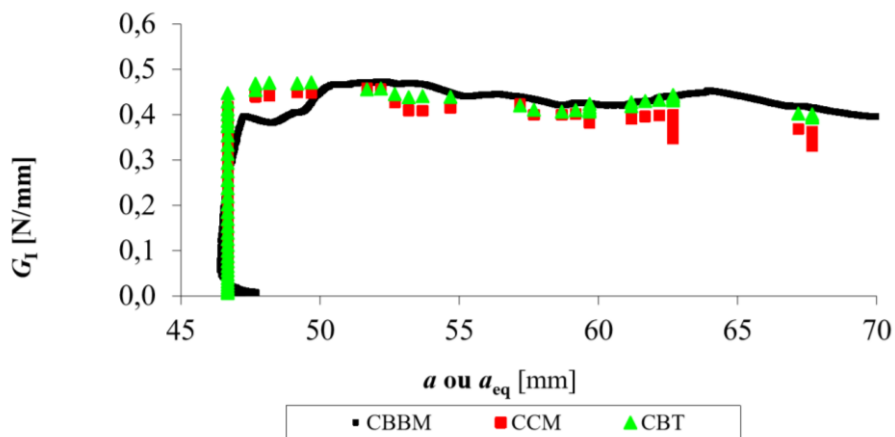


Figura 59 – Curvas-R de um provete DCB com o adesivo Araldite® 2015 [1]

### 3.1.2.4 Resultados obtidos para o adesivo Sikaforce® 7752

Na Figura 60 são apresentadas as curvas  $P-\delta$  experimentais correspondentes a cada um dos ensaios realizados com adesivo SikaForce® 7752. As curvas revelaram no geral o comportamento já descrito para os adesivos anteriores. Apresentam uma boa repetibilidade respeitante à rigidez elástica, à sua  $P_{m\acute{a}x}$  e ainda ao seu comportamento

durante a propagação do dano. Pela análise das curvas  $P-\delta$ , estas apresentam também três fases distintas. Na primeira fase a evolução de  $P$  com  $\delta$  é linear, com um comportamento assumidamente reversível, ou seja, regime elástico. Na segunda fase, um pouco antes da  $P_{m\acute{a}x}$ , observa-se uma perda de linearidade, correspondente à ocorrência de um processo irreversível no adesivo, nomeadamente formação da ZPF. Na vizinhança de  $P_{m\acute{a}x}$ , a energia armazenada no provete atinge o seu valor crítico,  $G_{Ic}$ , correspondente ao início de propagação da fenda. Após  $P_{m\acute{a}x}$  ser atingida, ocorre a terceira fase. Verifica-se a propagação estável da fenda e a força vai diminuindo progressivamente. No final existe uma queda abrupta, originada pela rotura total do provete.

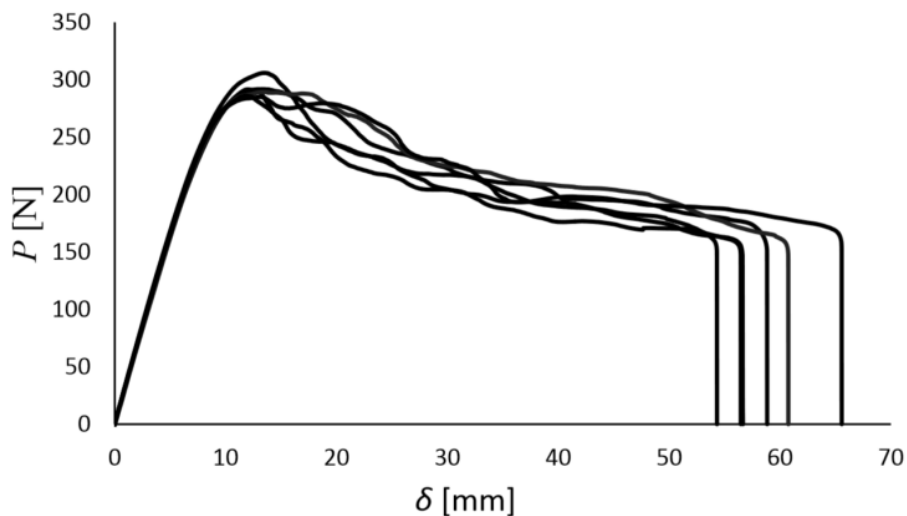


Figura 60 – Curvas  $P-\delta$  do adesivo SikaForce® 7752 [2]

A Tabela 15 apresenta os valores disponíveis para os parâmetros de  $P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ . Analisando os dados da tabela pode-se concluir que existe uma boa repetibilidade entre os resultados obtidos para os vários provetes. Nenhum provete foi excluído pelo que todos os valores foram considerados para efeitos de cálculo da média e desvio padrão. Tanto o parâmetro  $P_{m\acute{a}x}$  como  $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$  não apresentam grandes desvios em relação à sua média.

Quando comparados os três adesivos, o SikaForce® 7752 apresenta para  $P_{m\acute{a}x}$  valores cerca de 2,8 vezes superiores ao Araldite® AV138 e 2,1 vezes superior ao Araldite® 2015. Relativamente à  $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ , o Araldite® 2015 é superior 1,3 vezes ao SikaForce® 7752 e 8 vezes superior ao Araldite® AV138.

A Tabela 16 apresenta o resumo dos valores obtidos de  $G_{Ic}$  do SikaForce® 7752 obtidos pelo método direto. Também para o valor médio de  $G_{Ic}$  obtido, os provetes não apresentaram desvios consideráveis, como comprova o valor do desvio padrão.

Tabela 15 – Valores de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta_{Pm\acute{a}x}$  para o adesivo SikaForce® 7752

Provete	Carga máxima (N)	Deslocamento no ponto de carga máxima (mm)
1	291,627	12,038
2	305,978	13,514
3	291,820	13,055
4	289,288	13,297
5	286,063	11,870
6	285,047	13,159
<b>Média</b>	291,637	12,822
<b>Desvio Padrão</b>	7,559	0,691

Na Figura 61 está representada a curva- $R$  de um provete pelo método CBBM. Para este adesivo, os dados disponíveis apenas contemplam este método de redução de  $G_{Ic}$ .

Tabela 16 – Valores de  $G_{Ic}$  para o método CBBM para o adesivo SikaForce® 7752 [2]

Adesivo	SikaForce® 7752
Provete	CBBM [N/mm]
1	3,420
2	3,900
3	3,840
4	4,000
5	3,400
6	3,650
<b>Média</b>	<b>3,702</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,231</b>

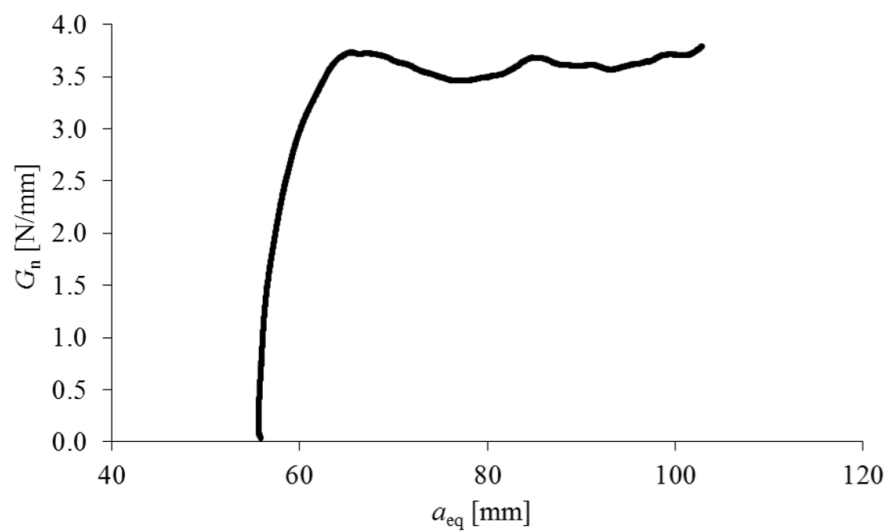


Figura 61 – Curva-R de um provete DCB com o adesivo SikaForce® 7752 [2]

### 3.1.3 Ensaios ENF

Nesta secção são descritos os aspetos mais relevantes dos ensaios ENF, tendo em vista a caracterização à fratura em modo II. São descritos aspetos do trabalho experimental incluindo a preparação dos provetes, a realização dos ensaios de fratura e a análise dos resultados obtidos.

#### 3.1.3.1 Geometria, fabrico e teste dos provetes ENF

A Figura 62 mostra a geometria caraterística de um provete para ensaio ENF, sendo definida pelos parâmetros que se seguem [101]:

- $a_0$  - Comprimento de pré-fenda inicial [mm];
- $L$  - Distância entre punção de carga e rolete de apoio [mm];
- $h$  - Espessura do substrato [mm];
- $t$  - Espessura do adesivo [mm];
- $P$  - Carregamento [N];
- $\delta$  - Deslocamento [mm];
- $B$  - Largura do substrato [mm].

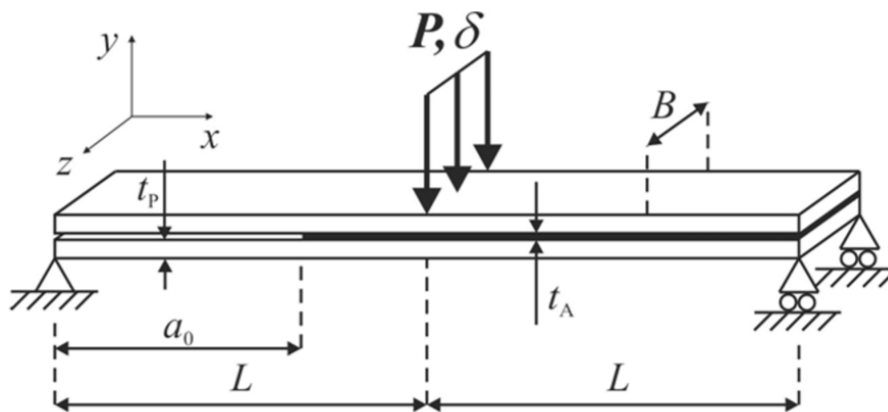


Figura 62 - Representação esquemática de um ensaio ENF [101]

Os substratos da liga de alumínio AW6082-T651 foram fabricados a partir de chapa de 3 mm de espessura, adquiridos em tiras de 27 mm de largura ao fornecedor Lanema. A partir destas, foram cortados 48 substratos com um comprimento de  $230 \pm 0,5$  mm. Na Tabela 17 estão representadas as principais medidas dos substratos. Relativamente às informações individuais das medições dos substratos, não estão disponíveis para os ensaios ENF.

Tabela 17 – Controlo dimensional dos substratos de alumínio (mm) [3]

Comprimento dos substratos ( $L$ )	$230 \pm 0,5$
Largura dos substratos ( $B$ )	$25 \pm 0,05$
Espessura dos substratos ( $h$ )	$3 \pm 0,05$

Após a obtenção de todos os substratos com as dimensões controladas, efetuou-se a preparação das superfícies através de uma decapagem mecânica e de seguida foi realizada a devida limpeza de todas as superfícies e identificação dos provetes. A forma escolhida para garantir uma espessura de adesivo constante e a obtenção da pré-fenda, inicial consistiu na utilização de fitas de aço calibrado para a produção dos calços (Figura 63) [3]. Na Tabela 18 estão representadas as dimensões obtidas das pré-fendas de todos os provetes.

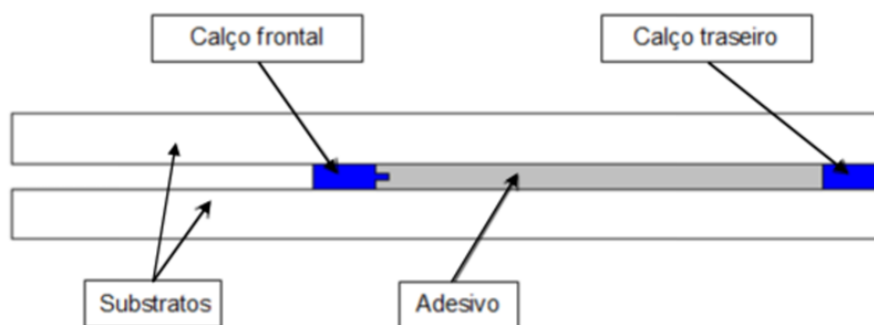


Figura 63 – Representação esquemática da localização dos calços calibrados [3]

No que respeita aos calços traseiros, foi utilizada uma fita de aço calibrado de 0,2 mm de espessura. Na produção do calço frontal, o método seguido foi proposto por Lee et al. [119], que consiste em fabricar um calço composto por uma lâmina de 0,1 mm de espessura intercalada por duas fitas de aço calibrado de 0,05 mm de espessura, com a lâmina ligeiramente adiantada com o objetivo de criar uma pré-fenda no adesivo [3].

Para o adesivo Araldite® 2015 foi utilizada uma pistola manual de mistura e para os adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752 a deposição foi efetuada manualmente com auxílio de espátula após mistura também manual dos dois componentes. O processo de cura decorreu à temperatura ambiente, a cerca de 20° C [3].

Todos os provetes foram sujeitos a carregamento contínuo numa máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100, com uma célula de carga de 100 kN. A velocidade de solitação para para os ensaios com o adesivo Araldite® AV138 foi de 0,75 mm/min e para os restantes adesivos de 2 mm/min. A monitorização da propagação da fenda foi efetuada com o auxílio de uma câmara de alta resolução apoiada numa base sólida

para gravação de imagens, numa cadência de intervalos de tempo especificados em 5 s [3].

Tabela 18 – Identificação dos provetes de ensaio e respetivas dimensões (mm) [3]

Adesivo	Provete	Pré-fenda
Araldite® AV138	AV138_1	65,90
	AV138_2	51,65
	AV138_3	50,60
	AV138_4	84,80
	AV138_5	66,10
	AV138_6	64,15
	AV138_7	67,80
	AV138_8	66,15
Araldite® 2015	A2015_1	48,84
	A2015_2	53,87
	A2015_3	51,60
	A2015_4	48,76
	A2015_5	49,67
	A2015_6	48,93
	A2015_7	52,19
	A2015_8	51,22
SikaForce® 7752	S7752_1	49,92
	S7752_2	60,13
	S7752_3	58,02
	S7752_4	58,84
	S7752_5	53,31
	S7752_6	51,49
	S7752_7	54,53
	S7752_8	55,97

### 3.1.3.2 Resultados obtidos para o adesivo Araldite® AV138

As curvas  $P$ - $\delta$  das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 estão representadas na Figura 64. As curvas  $P$ - $\delta$  apresentaram uma rigidez crescente na região inicial dos ensaios e este facto pode ser imputado à flexibilidade da máquina de ensaios. As curvas apresentadas foram corrigidas considerando a rigidez dos provetes na zona intermédia da região elástica antes do início da propagação da fenda [3]. Dos oito provetes ensaiados, apenas sete foram considerados como válidos. Numa análise aos gráficos, este adesivo mostra um comportamento frágil, verificando-se uma propagação de fenda abrupta após ser atingido  $P_{m\acute{a}x}$ . De seguida  $P$  cai abruptamente, originando uma propagação rápida da fenda. A repetibilidade das curvas é boa em termos de rigidez dos provetes até à iniciação da fenda. O comportamento durante a propagação foi algo instável, o que se atribui à elevada rigidez e baixa ductilidade do adesivo, que tipicamente conduzem a este comportamento [3].

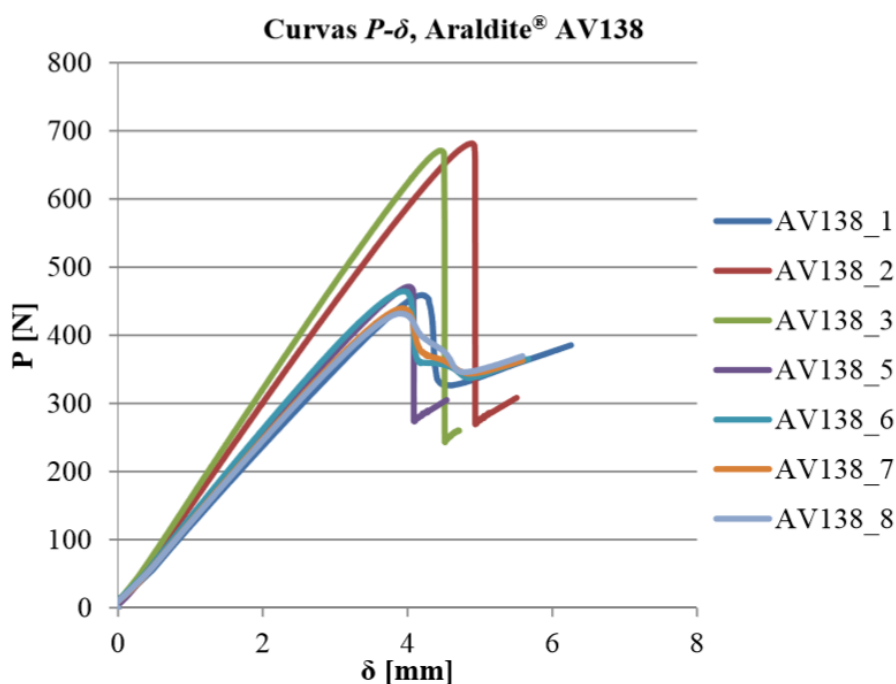


Figura 64 – Curvas  $P$ - $\delta$  para o Adesivo Araldite® AV138 [3]

A Tabela 19 apresenta os valores de carga máxima e deslocamento no ponto de carga máxima para o adesivo Araldite® AV138. Os dados referentes ao provete AV138\_4 não foram considerados para efeitos de média e desvio padrão dos parâmetros da tabela. Numa análise aos valores do desvio padrão, os dados refletem uma boa repetibilidade para o parâmetro de  $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ . No que concerne aos dados da  $P_{m\acute{a}x}$ , os provetes AV138\_2 e AV138\_3 destacam-se por apresentarem um desvio em relação à média de cerca de 31,8% e 29,8%, respetivamente. Este desvio leva a que o valor do desvio padrão para a  $P_{m\acute{a}x}$  seja bastante elevado. Este facto pode estar diretamente relacionado com a

existência de um valor de  $a_0$  inferior aos restantes, por questões relacionadas com o fabrico dos provetes.

Tabela 19 – Valores de  $P_{m\acute{a}x}$  e respetivo  $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$  das curvas  $P$ - $\delta$  do adesivo Araldite® AV138 [3]

Provete	Carga máxima (N)	Deslocamento no ponto de carga máxima (mm)
AV138_1	458,956	4,30000
AV138_2	681,575	4,97148
AV138_3	671,005	4,54958
AV138_4 <sup>a)</sup>	451,040	8,98829
AV138_5	471,290	4,07458
AV138_6	464,535	4,07773
AV138_7	439,533	4,05583
AV138_8	431,887	4,03708
<b>Média</b>	516,969	4,295
<b>Desvio Padrão</b>	109,741	0,352

De realçar que, para os três adesivos testados em geometria ENF, não estão disponíveis os dados referentes a  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ ,  $\delta_{m\acute{a}x}$ ,  $E_{P_{m\acute{a}x}}$  e  $E_{\delta_{m\acute{a}x}}$  apresentados no âmbito da discussão dos ensaios DCB.

A Tabela 20 resume os valores de  $G_{IIC}$  [N/mm] dos ensaios válidos por todos os métodos, bem como a média e desvio padrão associados a cada método. Verifica-se que os valores obtidos de  $G_{IIC}$  pelos diferentes métodos apresentam uma boa proximidade. Considera-se o valor do CBBM como referência porque este é um método robusto e que consegue descrever com precisão o valor de  $G_{IIC}$  [101]. Assim, em comparação com o método CBBM, o CCM apresenta um valor médio inferior em 9,16%, o DBT em 1,83% e o CBT em 17,25%. Claramente, o método CBT apresenta resultados muito inferiores aos restantes.

Tabela 20 – Valores de  $G_{IIc}$  do Araldite® AV138 obtidos pelos vários métodos [3]

Adesivo	Araldite® AV138			
	CCM [N/mm]	DBT [N/mm]	CBT [N/mm]	CBBM [N/mm]
AV138_1	0,469	0,566	0,440	0,572
AV138_2	*	0,709	0,566	0,712
AV138_3	*	0,650	0,608	0,724
AV138_4	-	-	-	-
AV138_5	*	0,578	0,519	0,594
AV138_6	0,568	0,579	0,487	0,562
AV138_7	0,605	0,581	0,478	0,576
AV138_8	0,603	0,583	0,481	0,585
<b>Média</b>	0,561	0,606	0,511	0,618
<b>Desvio Padrão</b>	0,064	0,053	0,058	0,069
* provete que não foi possível obter ajuste do polinómio $C=f(a)$				

As curvas- $R$  relativas ao adesivo Araldite® AV138 estão representadas na Figura 65 e verificou-se que o crescimento de fenda a  $G_{II}$  foi aproximadamente constante para os quatro métodos. Observou-se também que apresentam uma boa repetibilidade no valor de patamar de DBT, CCM e CBBM, excetuando o ensaio CBT que subestima o valor de  $G_{IIc}$ .

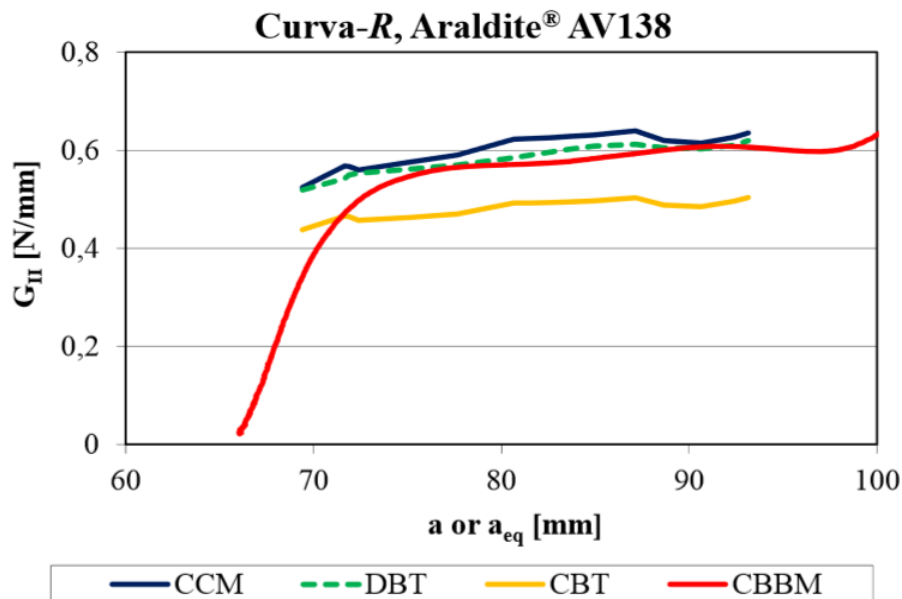


Figura 65 – Curvas-R de um provete ENF com o adesivo Araldite® AV138 [3]

### 3.1.3.3 Resultados obtidos para o adesivo Araldite® 2015

Na Figura 66 estão representadas as curvas  $P-\delta$  obtidas para os sete provetes considerados válidos das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015. Numa análise aos gráficos verifica-se uma grande repetibilidade dos ensaios, nomeadamente rigidez elástica e comportamento durante a propagação da fenda. Conseguiu-se aferir que o adesivo tem um comportamento com alguma ductilidade, já que é possível verificar uma rotura mais suave com valores de deslocamento próximos de 8,3 mm [3]. Analisando as curvas  $P-\delta$  do adesivo Araldite® 2015, pode-se afirmar que estas apresentam três fases distintas. Na primeira fase, a evolução da carga/deslocamento é linear, apresentando um comportamento elástico reversível. Numa segunda fase, antes de se atingir o ponto de carga máxima, nota-se uma perda de linearidade, correspondendo a um processo irreversível do adesivo, pela formação da ZPF. Na proximidade de  $P_{máx}$ , a energia armazenada no provete atinge o seu valor crítico,  $G_{IIc}$ , correspondente ao início da propagação da fenda. Quando a  $P_{máx}$  é atingida, inicia-se uma terceira fase caracterizada pela carga aplicada diminuir gradualmente, correspondendo a uma propagação estável da fenda [3].

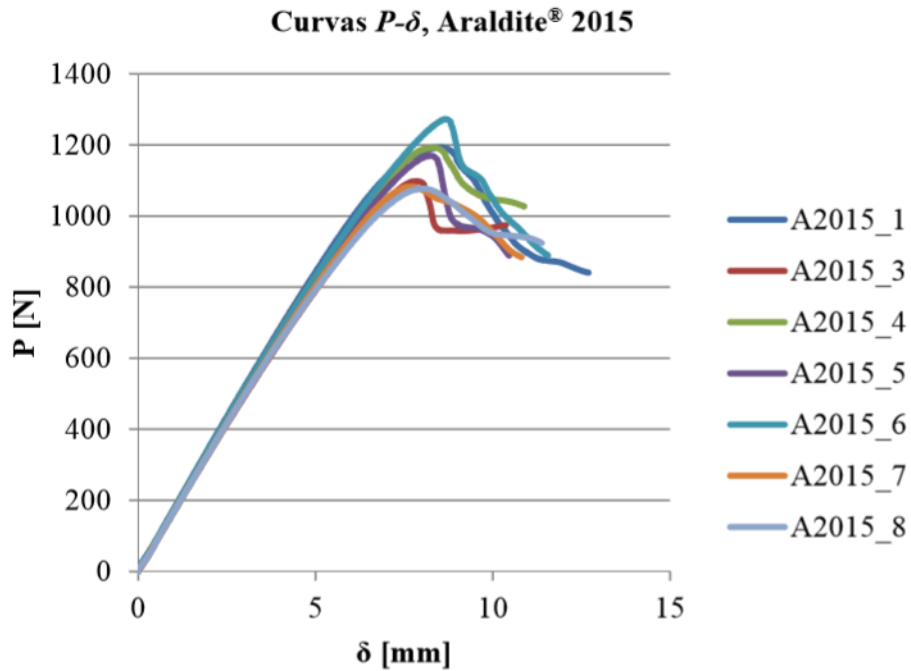


Figura 66 – Curvas  $P$ - $\delta$  para o Adesivo Araldite® 2015 [3]

A Tabela 21 apresenta os valores de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta_{P_{\text{máx}}}$  para o adesivo Araldite® 2015. Os dados referentes ao provete A2015\_2 não foram considerados para o cálculo da média e desvio padrão dos parâmetros da tabela. Analisando os valores do desvio padrão, os dados refletem uma boa repetibilidade dos ensaios em geral. Em comparação com o adesivo Araldite® AV138, o valor do desvio padrão associado ao parâmetro  $P_{\text{máx}}$  apresenta melhorias evidentes. Quando comparados os valores de  $\delta_{P_{\text{máx}}}$  entre os mesmos adesivos, o Araldite 2015 verifica aproximadamente o dobro do deslocamento de rotura comparativamente ao Araldite® AV138. O valor médio da carga máxima é ligeiramente superior ao dobro do apresentado pelo Araldite® AV138.

Tabela 21 - Velocidade de solitação, valores de  $P_{m\acute{a}x}$  e respetivo  $\delta_{Pm\acute{a}x}$  das curvas  $P$ - $\delta$  do adesivo Araldite® 2015 [3]

Provete	Carga máxima (N)	Deslocamento no ponto de carga máxima (mm)
A2015_1	1193,22	8,49056
A2015_2 <sup>a)</sup>	1162,62	9,30723
A2015_3	1097,85	7,94058
A2015_4	1192,65	8,52392
A2015_5	1170,06	8,27390
A2015_6	1272,76	8,89056
A2015_7	1082,77	7,82390
A2015_8	1076,84	7,96556
<b>Média</b>	1155,164	8,272
<b>Desvio Padrão</b>	72,531	0,386

A Tabela 22 resume os valores de  $G_{IIC}$  (N/mm) relativos aos ensaios válidos por todos os métodos, bem como a média e desvio-padrão associada a cada método, observando-se uma concordância entre as amostras razoavelmente boa. Uma vez mais, ao utilizar o método de CBBM como referência, verifica-se que o CCM exibe um valor médio superior em 4,69%, o DBT um valor inferior em 3,78% e o CBT um valor também inferior em 17,88%. Também para este adesivo o valor de CBT é bastante inferior aos restantes, uma vez que este método exige a medição do comprimento da fenda no decorrer da fase de propagação, o que foi efetuado de forma manual e pode induzir a erros adicionais [101].

Tabela 22 – Valores de  $G_{IIc}$  do Araldite® 2015 obtidos pelos vários métodos [3]

Adesivo	Araldite® 2015			
	CCM [N/mm]	DBT [N/mm]	CBT [N/mm]	CBBM [N/mm]
Provete				
A2015_1	3,029	3,083	2,644	3,420
A2015_2	-	-	-	-
A2015_3	3,675	2,401	2,177	2,545
A2015_4	3,214	2,916	2,544	2,943
A2015_5	2,812	2,741	2,476	2,801
A2015_6	3,357	3,088	2,644	3,136
A2015_7	2,696	2,831	2,624	2,901
A2015_8	3,008	2,952	2,512	3,025
<b>Média</b>	3,113	2,859	2,517	2,967
<b>Desvio Padrão</b>	0,334	0,238	0,164	0,273

Na Figura 67 estão representadas as curvas-R dos diversos métodos considerados. Observou-se um crescimento de fenda a  $G_{II}$  aproximadamente constante para todos os métodos e uma repetibilidade no valor de patamar, exceto para o método CBT.

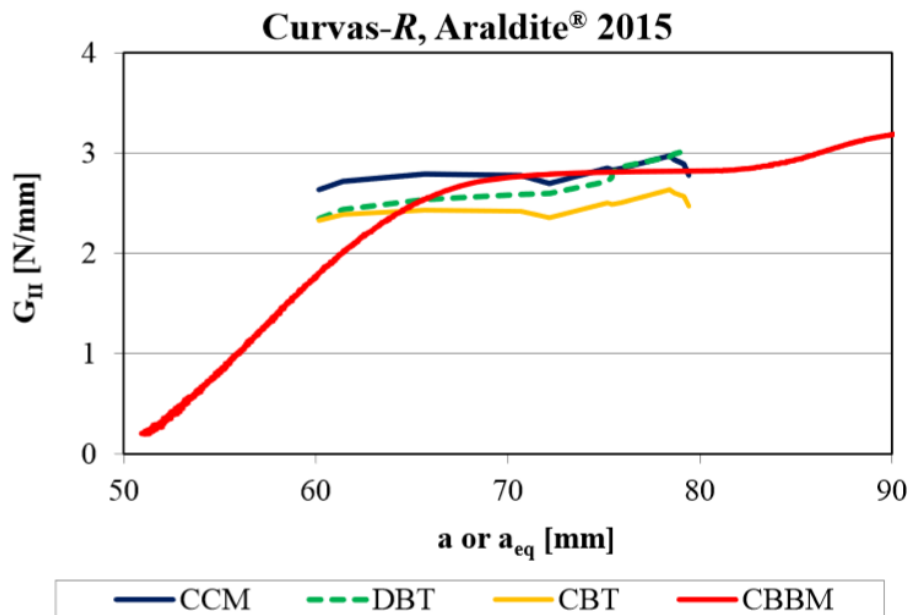


Figura 67 – Curvas-R de um provete ENF com o adesivo Araldite® 2015 [3]

#### 3.1.3.4 Resultados obtidos para o adesivo Sikaforce® 7752

A Figura 68 apresenta as curvas  $P-\delta$  obtidas para os provetes considerados válidos das juntas coladas com o adesivo SikaForce® 7752. Nesta série de ensaios verificou-se uma boa concordância entre as curvas  $P-\delta$  dos vários provetes a nível de rigidez no domínio elástico,  $P_{m\acute{a}x}$  e respetivo  $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ . As curvas  $P-\delta$  evidenciam um adesivo com um comportamento dúctil, onde se verifica uma rotura muito suavizada com valores de deslocamento aplicado de cerca de 14,4 mm, para a carga máxima [3].

No decorrer dos ensaios com este adesivo, observou-se que a aparente propagação da fenda medida pela rotura da camada de tinta branca não condizia com a realidade, já que a grande ductilidade levou a que a tinta rompesse antes da propagação real da fenda. Desta forma, estimou-se o valor de  $G_{IIc}$  apenas pelo método CBBM [3].

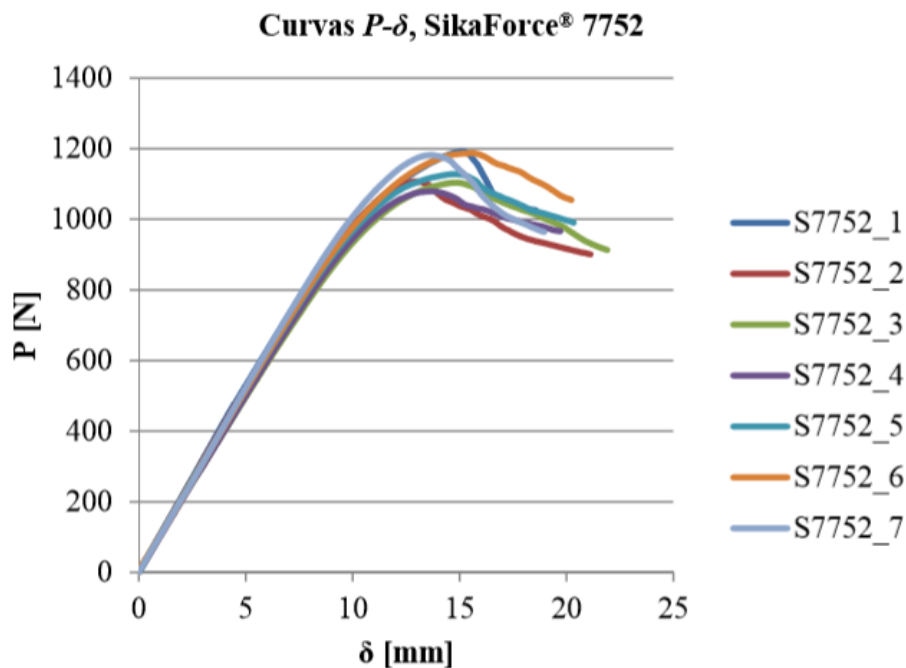


Figura 68 - Curvas  $P$ - $\delta$  para o Adesivo SikaForce® 7752 L60 [3]

A Tabela 23 apresenta os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$  para o adesivo SikaForce® 7752. Os dados referentes ao provete S7752\_8 não foram considerados para o cálculo da média e desvio padrão dos parâmetros da tabela. Observando os valores do desvio padrão, os dados refletem uma muito boa repetibilidade dos ensaios.

Quando comparados os três adesivos, o SikaForce® 7752 e o Araldite® 2015 apresentam para  $P_{m\acute{a}x}$  valores cerca de 2,2 vezes superiores ao Araldite® AV138. Relativamente a  $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ , o SikaForce® 7752 é superior 1,7 vezes ao Araldite® 2015 e 3,3 vezes ao Araldite® AV138.

Tabela 23 – Velocidade de solitação, valores de  $P_{m\acute{a}x}$  e respetivo  $\delta_{Pm\acute{a}x}$  das curvas  $P$ - $\delta$  do adesivo SikaForce® 7752 [3]

Provete	Carga máxima (N)	Deslocamento no ponto de carga máxima (mm)
S7752_1	1191,70	15,1578
S7752_2	1106,93	13,0322
S7752_3	1103,61	14,8656
S7752_4	1079,21	13,7156
S7752_5	1127,82	14,7822
S7752_6	1187,12	15,6656
S7752_7	1181,81	13,6739
S7752_8 <sup>a)</sup>	1062,62	13,6489
<b>Média</b>	1139,743	14,413
<b>Desvio Padrão</b>	46,372	0,949

A Tabela 24 resume os valores de  $G_{IIC}$  para os sete ensaios válidos pelo método CBBM, bem como a média e desvio padrão associados ao método. Observa-se que a concordância entre as amostras é razoável, evidenciada pelo reduzido valor de desvio padrão dos ensaios. Verifica-se a existência de repetibilidade entre os valores obtidos para os vários provetes, com exceção do provete S7752\_4 que apresenta um valor ligeiramente inferior, o que valida a execução de provetes com condições idênticas. Assim sendo, este é um bom indicador da coerência dos resultados obtidos.

Tabela 24 – Valores de  $G_{IIc}$  do SikaForce®7752 obtidos pelo método CBBM [3]

<b>Adesivo</b>	<b>SikaForce® 7752</b>
Provete	CBBM [N/mm]
S7752_1	5,825
S7752_2	5,877
S7752_3	5,474
S7752_4	4,813
S7752_5	5,676
S7752_6	5,648
S7752_7	5,619
S7752_8	-
<b>Média</b>	5,562
<b>Desvio Padrão</b>	0,356

A Figura 69 apresenta um exemplo da curva- $R$  obtida pelo método CBBM, sendo este o único método que não requer medição de comprimento de fenda. Observa-se que a curva- $R$  apresenta um patamar de crescimento de fenda a  $G_{II}$  aproximadamente constante, apesar de conter uma extensão inferior quando comparado com os outros dois adesivos em estudo.

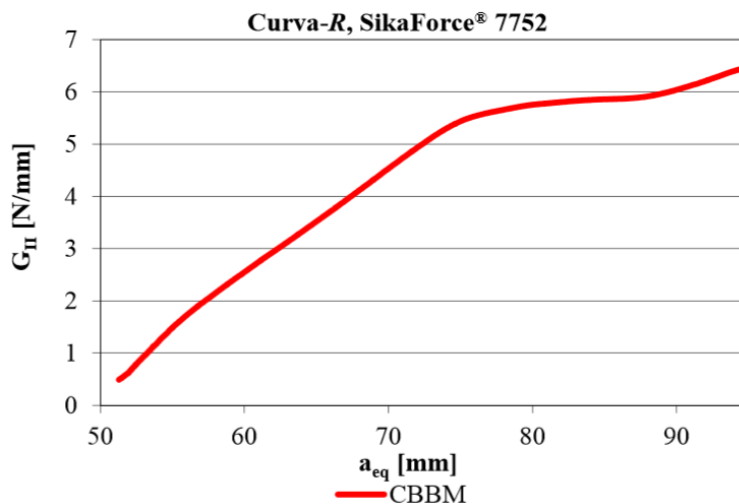


Figura 69 – Curva-R de um provete ENF com o adesivo SikaForce® 7752 [3]

### 3.1.4 Análise do comportamento das juntas

Na Tabela 25 estão representados a média de  $G_{Ic}$  e desvio padrão pelos vários métodos utilizados, para os três adesivos ensaiados. Confrontando os três adesivos, o adesivo SikaForce® 7752 destaca-se por apresentar o valor médio de  $G_{Ic}$  mais elevado, necessitando por isso de mais energia de deformação para ocorrer a propagação do dano. Quando comparado com o adesivo Araldite® AV138, o valor de  $G_{Ic}$  é cerca de 15,1 vezes superior. Em comparação com o adesivo Araldite® 2015, é 6,9 vezes superior.

Tabela 25 – Média e desvio-padrão de  $G_{Ic}$  para os vários métodos e adesivos [N/mm] [2, 118]

	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
<b>CBT</b>	0,238±0,030	0,530±0,099	-
<b>CCM</b>	0,199±0,012	0,496±0,110	-
<b>CBBM</b>	0,249±0,033	0,539±0,116	3,770±0,424
<b>INTEGRAL J</b>	-	-	3,702±0,231

Na Figura 70 pode observar-se os valores médios e desvio padrão de  $G_{Ic}$  obtidos pelos quatro métodos distintos. Os gráficos apresentam uma boa concordância entre os diferentes métodos. Dos resultados obtidos para os três adesivos estudados observa-se que o SikaForce® 7752 é o mais dúctil, sendo o Araldite® AV138 o mais frágil. O adesivo Araldite® 2015 apresenta um pouco mais do dobro do valor de  $G_{Ic}$  do que o Araldite® AV138.

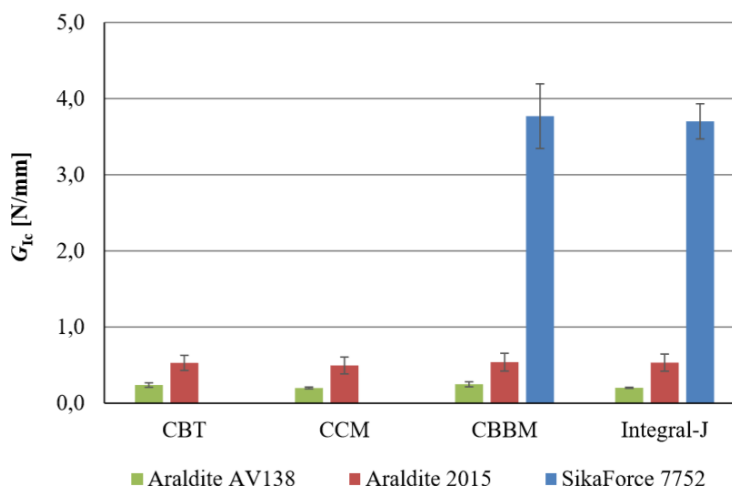


Figura 70 – Valor médio de  $G_{Ic}$  e desvios padrão pelos quatro métodos e para os três adesivos [118]

A Tabela 26 apresenta a média de  $G_{Ic}$  pelos vários métodos utilizados, para os três adesivos ensaiados. Comparando os três adesivos, o adesivo SikaForce® 7752 é o que apresenta o valor médio de  $G_{Ic}$  mais elevado, logo este necessita de mais energia de deformação para ocorrer a propagação do dano. Quando comparado com o adesivo Araldite® AV138, o valor de  $G_{Ic}$  é cerca de 9 vezes superior. Em comparação com o adesivo Araldite® 2015, este é 1,9 vezes superior.

Tabela 26 – Média e desvio-padrão de  $G_{Ic}$  para os vários métodos e adesivos [N/mm] [3]

	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
CCM	0,561±0,064	3,113±0,334	-
DBT	0,606±0,053	2,859±0,238	-
CBT	0,511±0,058	2,517±0,164	-
CBBM	0,618±0,069	2,967±0,273	5,562±0,356

A Figura 71 traduz os valores médios e desvio-padrão de  $G_{Ic}$  pelos quatro métodos e três adesivos em estudo. Graficamente verifica-se que existe uma boa concordância entre diferentes métodos para cada adesivo. A comparação entre os três adesivos evidencia mais uma vez a grande diferença de ductilidade do SikaForce® 7752 quando comparado com os outros dois adesivos. O adesivo Araldite® AV138 revelou ser o adesivo mais frágil.

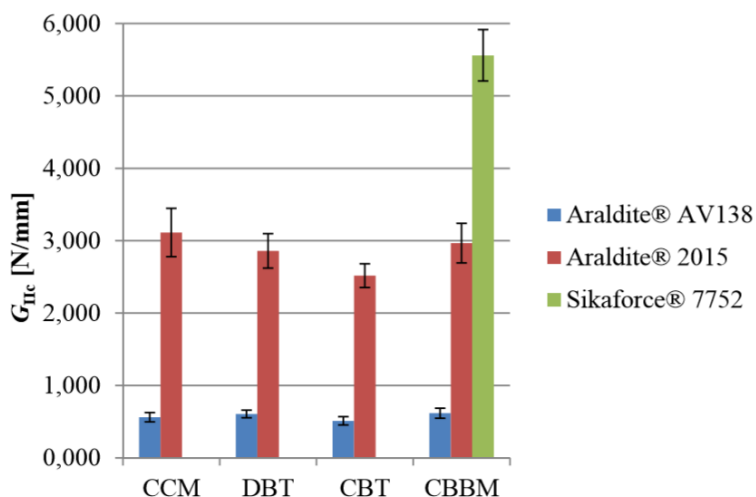


Figura 71 – Valor médio de  $G_{IIc}$  e desvios padrão pelos quatro métodos e para os três adesivos [3]

Em resumo, o Araldite® 2015, quando comparado com o Araldite® AV138, apresenta um valor de  $G_{IIc}$  superior em aproximadamente 4,8 vezes. O adesivo SikaForce® 7752 é claramente o que apresenta resultados mais elevados de  $G_{IIc}$ , destacando-se como o adesivo com maior ductilidade ao corte. Por sua vez, o adesivo Araldite® AV138 é nitidamente o adesivo mais frágil ao corte, apresentando os valores de  $G_{IIc}$  mais baixos.

As propriedades dos adesivos têm uma grande influência na resistência da junta adesiva. Todavia, uma resistência superior da junta adesiva pode não estar diretamente relacionada com um adesivo mais resistente. De facto, um adesivo de elevada resistência, mas considerado frágil, atinge uma tensão elevada de forma localizada nos bordos da junta adesiva uma tensão elevada, não permitindo uma redistribuição do esforço para o seu interior. Quando se verifica esta situação, a tensão de corte média de rotura é muito diminuta. Este é o comportamento expetável para juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138.

Considerando os adesivos com ductilidade elevada e de baixo módulo de elasticidade, estes possuem normalmente uma baixa resistência. Contudo, apresentam tensões mais uniformes devido à baixa rigidez e também têm uma capacidade de distribuir as tensões de forma mais uniforme ao longo da junta por deformação plástica, o que resulta em juntas mais resistentes quando comparadas com juntas adesivas coladas com adesivos mais resistentes e frágeis [23]. Enquadram-se nesta categoria o Araldite® 2015 e o SikaForce® 7752, que apresentam um comportamento dúctil, embora tenham uma resistência à tração e corte inferior à do Araldite® AV138.

### 3.2 Trabalho numérico

A simulação numérica com recurso a computador é hoje em dia uma ferramenta fundamental na conceção de projetos na engenharia. O desenvolvimento das técnicas de simulação são preponderantes para se alcançar resultados mais fiáveis. Assim,

nesta secção é apresentada toda a informação relacionada com as condições numéricas, leis de MDC mais representativas e os resultados obtidos usando o *software* Abaqus®. Este estudo tem como principal objetivo a reprodução dos resultados experimentais através da utilização de leis de dano coesivo que sejam representativas do comportamento dos adesivos utilizados e que, como tal, possam ser utilizadas posteriormente para efeitos de previsão da resistência de juntas adesivas com estes adesivos.

### 3.2.1 Condições da análise numérica

A análise numérica nos dois tipos de ensaios, DCB e ENF, foi levada a cabo no *software* Abaqus®, que detém um módulo integrado de MDC para prever o comportamento das juntas. O *software* ABAQUS® é tido como um dos principais *softwares* normalmente utilizados no estudo de juntas adesivas e estruturas complexas [69]. A modelação das juntas foi efetuada em duas dimensões (2D), com elementos sólidos de estado plano de deformação para a modelação dos aderentes (CPE4 do ABAQUS). Na simulação da junta colada, utilizou-se um elemento coesivo de quatro nós (COH2D4 do ABAQUS®), já utilizado em estudos anteriores [59], e que utilizou o modelo de dano coesivo com lei triangular de amaciamento. Para os elementos MDC na camada do adesivo, apenas foi considerado um elemento na direção da espessura do adesivo. Para a análise de rotura por MDC foram consideradas não-linearidades geométricas.

Os modelos numéricos foram construídos individualmente para cada provete em função das dimensões medidas na Tabela 10 (ensaios DCB) e Tabela 17 e Tabela 18 (ensaios ENF). Os aderentes de alumínio foram modelados por elementos contínuos como um material isotrópico de comportamento elástico-plástico com a lei  $\sigma$ - $\varepsilon$  da Figura 44. Na preparação numérica dos provetes configuraram-se as propriedades dos materiais e das ligações de contacto de forma a garantir que os resultados obtidos através das simulações numéricas sejam credíveis. É também importante a utilização do efeito *bias* na malha para diminuir o esforço computacional, possibilitando assim uma redução no tempo de obtenção dos resultados, sem comprometer a precisão dos resultados nas zonas com grandes variações de tensão [81].

Como se pode verificar na Figura 72, a malha dos provetes DCB exhibe um maior refinamento na zona do adesivo e, nos aderentes, na proximidade da face interior (adjacente à camada de adesivo), provocando uma variação da dimensão da malha e garantindo assim o maior refinamento nas zonas onde se esperam maiores gradientes de tensão [81].



Figura 72 – Malha do provete DCB

Na Figura 73 está apresentado um detalhe da malha de MEF na extremidade da pré-fenda, onde é evidente a variação do tamanho de elementos já referida. Está evidenciado numa tonalidade mais escura a camada de adesivo, que é constituída por elementos de  $0,2 \text{ mm} \times 0,2 \text{ mm}$ , apresentando os elementos de alumínio adjacentes ao adesivo também o mesmo tamanho de elemento. Utilizou-se um efeito de gradação do tamanho da malha (efeito bias) na direção da espessura dos aderentes a partir da camada de adesivo até às superfícies superior e inferior, e horizontalmente nos aderentes, desde a extremidade livre do provete até à zona da pré-fenda. As condições fronteira para os modelos DCB basearam-se na fixação no plano de um nó do aderente inferior na extremidade esquerda do provete (na zona da pré-fenda) e na restrição horizontal e deslocamento vertical ascendente num nó da mesma extremidade do provete, mas no aderente superior.

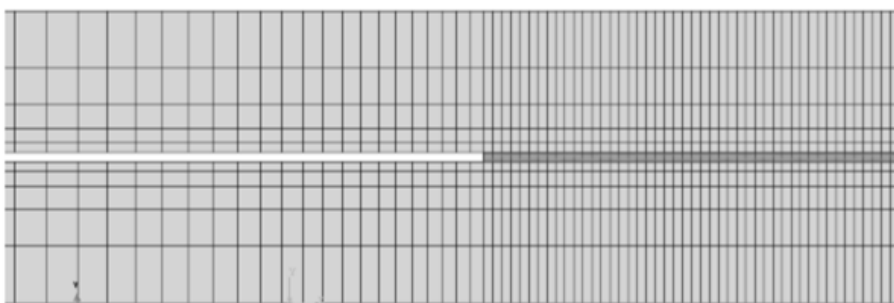


Figura 73 – Refinamento da malha do provete DCB na extremidade da pré-fenda

Na Figura 74 está ilustrado o refinamento de malha utilizado nos modelos dos provetes ENF. Utilizaram-se malhas bastante refinadas nos modelos, com elementos na camada adesiva de dimensões  $0,2 \text{ mm} \times 0,2 \text{ mm}$ .



Figura 74 – Refinamento geral de malha do modelo utilizado nos provetes ENF

A Figura 75 representa o nível de detalhe da malha na proximidade da extremidade da fenda, onde se podem observar os elementos coesivos representativos do adesivo com a dimensão de  $0,2 \text{ mm} \times 0,2 \text{ mm}$ . Na zona correspondente à pré-fenda, a malha não é tão refinada no sentido do comprimento dos provetes, uma vez que esta zona não estará sujeita a grandes gradientes de tensão. Relativamente à direção da espessura, utilizou-se uma gradação do tamanho dos elementos (efeito bias), no sentido do maior refinamento na proximidade do adesivo, devido à necessidade de modelação do adesivo com precisão, e também nas faces horizontais exteriores dos aderentes, para maior precisão das condições de contato com os cilindros de suporte e carregamento.

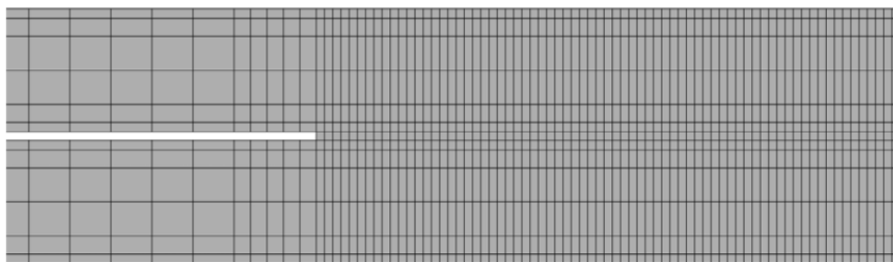


Figura 75 – Detalhe da malha MEF na proximidade da extremidade da fenda

Na Figura 76 está representado o refinamento da malha na zona de contacto entre o provete e um dos cilindros de suporte, na qual se utilizaram elementos com 0,05 mm de lado na zona que durante a análise estará em contato com o respetivo cilindro de suporte.

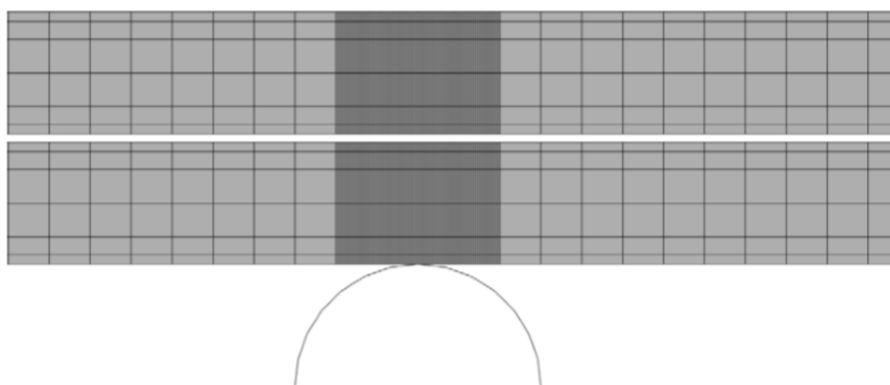


Figura 76 – Detalhe da malha de MEF na zona de contacto entre o provete e um dos cilindros de suporte

A Figura 77 representa um detalhe da malha na zona de contato entre o provete e o cilindro de solicitação, onde se pode observar um refinamento de malha idêntico ao descrito anteriormente, e também uma malha mais grosseira na zona de propagação de dano à direita do cilindro de solicitação, uma vez que esta região já excede os limites de análise do ensaio ENF. Tal como referido na descrição dos modelos DCB, as variações do número de elementos e do efeito bias na malha têm como principal finalidade a diminuição do esforço computacional, possibilitando uma redução do tempo para obtenção dos resultados, sem comprometer a precisão dos resultados nas zonas com grandes variações de tensão.

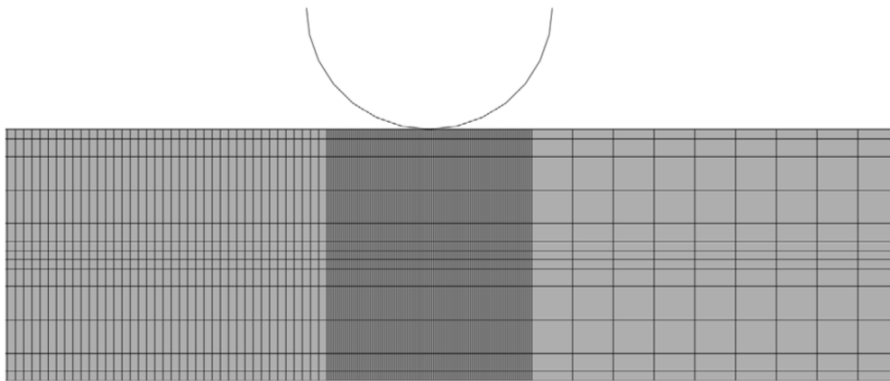


Figura 77 – Detalhe da malha de MEF na zona de contacto entre o provete e o punção de carregamento

Relativamente às condições fronteira e de carregamento, representadas na Figura 78, de forma a modelar as condições reais dos ensaios experimentais, restringiram-se os cilindros de suporte nas duas direções e rotação no plano, restringiu-se o cilindro de carregamento na direção horizontal e aplicou-se um deslocamento vertical com sentido descendente e, finalmente, restringiu-se um nó a meio do comprimento do provete na direção horizontal, para evitar o deslocamento horizontal do corpo rígido do mesmo.

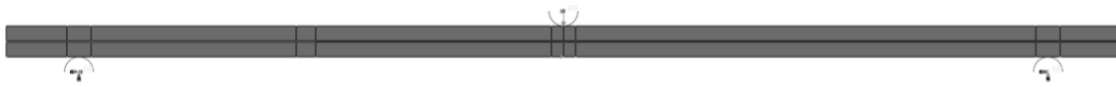


Figura 78 – Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos

Foi fundamental inserir condições de contato (Figura 79, Figura 80 e Figura 81) entre cada um dos três cilindros e o provete, e também entre os dois substratos na zona da pré-fenda, para garantir o deslizamento sem atrito e para evitar a interpenetração entre corpos. Foi utilizada uma formulação com pequeno deslizamento do tipo *surface to surface* e ainda um comportamento tangencial sem fricção e um comportamento normal do tipo *hard contact* [120].

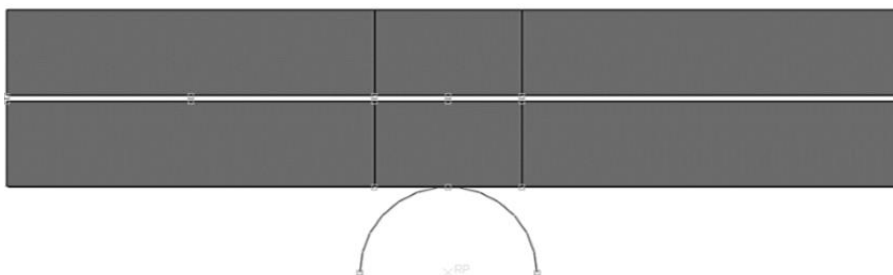


Figura 79 – Detalhe da zona de contacto no cilindro de suporte



Figura 80 – Detalhe da zona de contacto entre aderentes na proximidade da extremidade da fenda

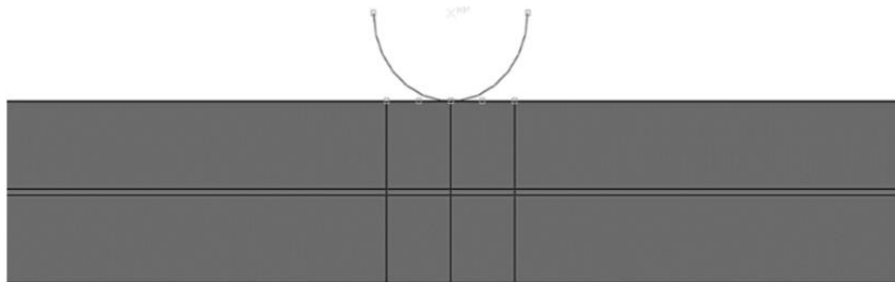


Figura 81 – Detalhe da zona de contacto no punção de carregamento

### 3.2.2 Modelos de dano coesivo

Os MDC têm como base a relação entre tensões e deslocamentos que unem nós homólogos dos elementos coesivos, de forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima e subsequente degradação das propriedades dos materiais até à rotura [43]. Normalmente são usadas as técnicas de aproximação local ou contínua, já que os MDC são considerados na modelação de fratura interfacial de camadas em compósitos ou em interfaces entre o adesivo e o aderente para simular roturas adesivas (aproximação local), ou ainda para simular uma pequena camada de adesivo de espessura constante (aproximação contínua) [76].

#### 3.2.2.1 Modelo de dano triangular

O modelo de dano triangular foi implementado em *software*, como é o caso do ABAQUS®, em 2D, para análise com cargas estáticas. Tal como representado na Figura 23, a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, enquanto a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

A lei de dano triangular assume numa fase inicial um comportamento linear elástico, seguido de degradação linear. O comportamento elástico é determinado por uma matriz constitutiva ( $\mathbf{K}_{COH}$ ) que compreende os parâmetros de rigidez, e relaciona as tensões e deformações em tração e corte ao longo dos elementos coesivos (subscritos n e s, respetivamente)

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

Para camadas finas de adesivo, uma aproximação viável é dada por

$$\begin{aligned} K_{nn} &= E \\ K_{ss} &= G, \\ K_{ns} &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

onde  $E$  corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e  $G$  ao módulo de elasticidade transversal. Considerando estes parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [76].

Em modo misto, a iniciação do dano pode ser pomenorizada por critérios distintos, como o critério quadrático de tensões, expresso pela seguinte expressão

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (19)$$

$\langle \rangle$  são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. Este critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [121]. Quando atingida a resistência máxima em modo misto ( $t_m^0$  na Figura 23), através da equação (19), a rigidez do material é degradada. A separação completa é prevista por um critério linear energético da forma

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (20)$$

### 3.2.3 Estimativa das leis coesivas em tração

Com a finalidade de determinar, para cada um dos adesivos testados, uma lei coesiva representativa do comportamento à tração dos adesivos, foram efetuadas simulações numéricas considerando condições de simulação anunciadas anteriormente, para que possam ser aplicadas para previsões de resistência de juntas adesivas.

A validação das leis coesivas triangulares para a modelação da camada de cada adesivo em tração consistiu no ajuste iterativo e comparação das curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais, nomeadamente no que concerne aos valores de  $P_{máx}$ , rigidez inicial e comportamento durante a propagação da fenda. Cada ensaio realizado (DCB) foi modelado individualmente pela consideração das dimensões medidas do provete respetivo. Assim, são expostos os resultados para os três tipos de adesivos e em função dos MDC abordados.

#### 3.2.3.1 Araldite® AV138

A Tabela 27 exhibe os valores de entrada utilizados em cada um dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com o adesivo Araldite® AV138, e cujo procedimento de ajuste

permitiu a estimativa de  $t_n^0$ . Relativamente aos valores médios registados,  $G_{Ic}$  obteve  $0,236 \pm 0,021$  N/mm, apresentando um desvio padrão percentual de 9%. Considerou-se assim que este parâmetro apresenta uma repetibilidade aceitável.

Tabela 27 – Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com adesivo Araldite® AV138

Provete	$t_n^0$ [MPa]	$E$ [MPa]	$G_{Ic}$ [N/mm]
AV_1	39,45	4890	0,24
AV_2	39,45	4890	0,25
AV_3	39,45	4890	0,23
AV_4	39,45	4890	0,27
AV_5	39,45	4890	0,215
AV_6	39,45	4890	0,215
<b>Média</b>	-	-	0,236
<b>Desvio Padrão</b>	-	-	0,021

A Figura 82 apresenta a curva  $P-\delta$  numérica e experimental obtida para um provete com adesivo Araldite® AV138, após concluído o ensaio do provete e respetivo procedimento de ajuste numérico. De uma forma geral, constatou-se que todas as curvas  $P-\delta$  apresentam o mesmo comportamento, apresentando zonas de propagação estável e boa repetibilidade. Assim, considerou-se que as curvas  $P-\delta$  obtidas numericamente caracterizam bastante bem as curvas experimentais de todos os provetes, pelo que as leis coesivas correspondentes foram consideradas como representativas do comportamento da camada adesiva.

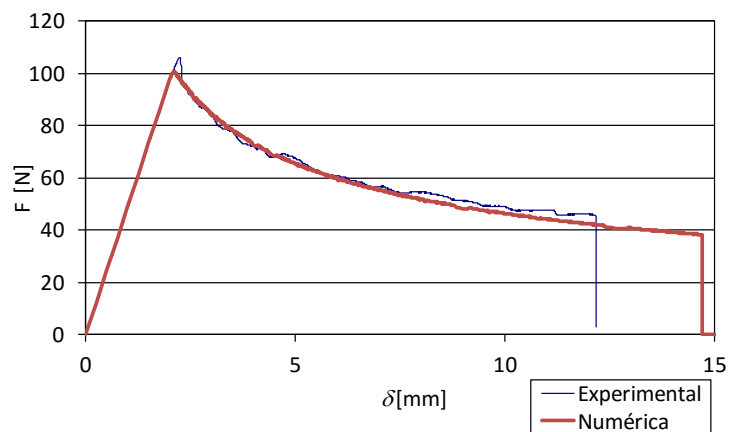


Figura 82 – Comparativo das curvas  $P$ - $\delta$  experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete DCB colado com o adesivo Araldite® AV138

Na Tabela 28 estão expostos os valores individuais adquiridos de  $\delta_n^0$  (deslocamento de carga máxima) e  $\delta_s^f$  (deslocamento de rotura). O valor médio registado do parâmetro  $\delta_s^f$  foi de  $0,0156 \pm 0,0014$  mm, o que corresponde a um desvio percentual de 9%. Considerou-se também que este apresenta uma repetibilidade igualmente aceitável.

Tabela 28 – Valores obtidos pela lei coesiva triangular, à tração, do adesivo Araldite® AV138

Provete	$\delta_n^0$ [mm]	$\delta_s^f$ [mm]
AV_1	0,003872	0,016
AV_2	0,003872	0,017
AV_3	0,003872	0,015
AV_4	0,003872	0,018
AV_5	0,003872	0,014
AV_6	0,003872	0,014
<b>Média</b>	-	0,0156
<b>Desvio Padrão</b>	-	0,0014

A Figura 83 exibe as leis coesivas triangulares alcançadas para cada um dos provetes, conseguidas através do ajuste das seis curvas  $P$ - $\delta$  experimentais do adesivo Araldite® AV138. Por forma a se obter uma referência na comparação entre amostras, foi considerada uma lei coesiva média, tendo sido obtida a partir das médias de  $t_n^0$  e  $G_{Ic}$  para os seis provetes ensaiados. É possível observar que as leis apresentam um bom grau de concordância entre si, dando boas indicações sobre a robustez dos resultados experimentais obtidos e processo iterativo de ajuste.

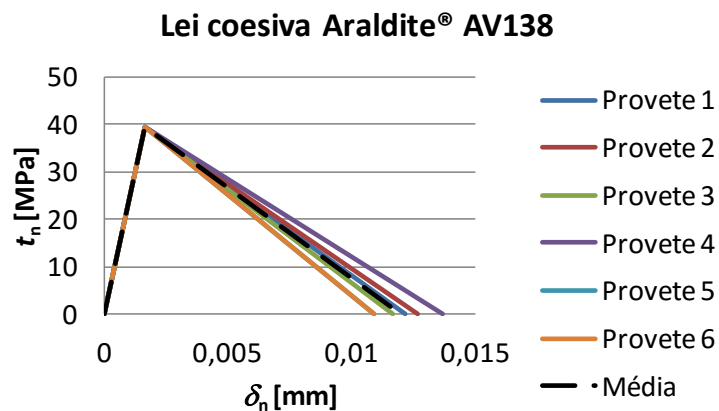


Figura 83 – Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes DCB colados com o adesivo Araldite® AV 138, e respetiva lei coesiva média

### 3.2.3.2 Araldite® 2015

Na Tabela 29 estão apresentados os valores de entrada utilizados em cada um dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com o adesivo Araldite® A2015, e cujo procedimento de ajuste permitiu a estimativa de  $t_n^0$ . Relativamente aos valores médios registados, para  $G_{Ic}$  obteve-se  $0,498 \pm 0,107$  N/mm, apresentando um desvio padrão percentual de 22%. Apesar de  $G_{Ic}$  apresentar um desvio um pouco elevado, devido aos resultados apresentados pelos provetes A2\_5 e A2\_6, considerou-se que este parâmetro apresenta uma repetibilidade aceitável.

Tabela 29 – Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com adesivo Araldite® 2015

Provete	$t_n^0$ [MPa]	$E$ [MPa]	$G_{Ic}$ [N/mm]
A2_1	21,63	1850	0,43
A2_2	21,63	1850	0,40
A2_3	21,63	1850	0,40
A2_4	21,63	1850	0,51
A2_5	21,63	1850	0,65
A2_6	21,63	1850	0,6
<b>Média</b>	-	-	0,498
<b>Desvio Padrão</b>	-	-	0,107

A Figura 84 mostra a curva  $P-\delta$  numérica e experimental obtida para um provete com o adesivo Araldite® 2015, após concluído o ensaio do provete e respetivo procedimento de ajuste. Na generalidade dos ensaios, verificou-se uma concordância bastante aceitável entre os resultados, mesmo no comportamento pós-pico, que é a zona que corresponde à propagação da fenda durante o ensaio. Observa-se assim, de um modo geral, que as curvas  $P-\delta$  obtidas numericamente reproduzem bastante bem as curvas experimentais de todos os provetes, pelo que se consideram as leis coesivas obtidas adequadas para a simulação do comportamento do adesivo Araldite® 2015 à tração.

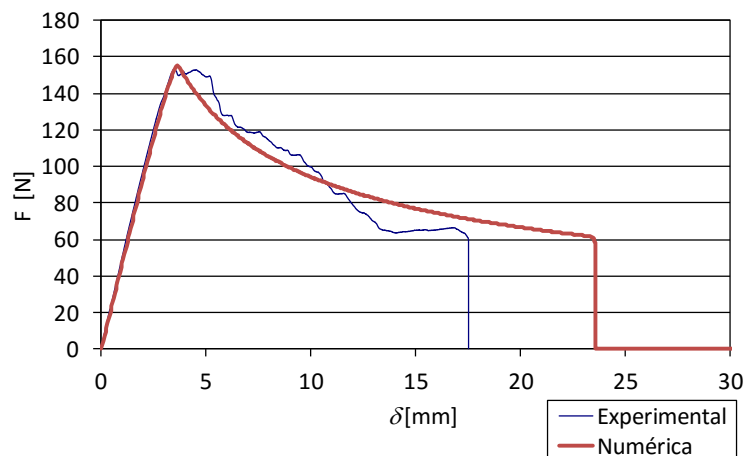


Figura 84 – Comparativo das curvas  $P$ - $\delta$  experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete DCB colado com o adesivo Araldite® 2015

Na Tabela 30 são apresentados os valores individuais obtidos para  $\delta_n^0$  e  $\delta_s^f$ . Para o parâmetro  $\delta_s^f$  registou-se um valor médio e respetivo desvio de  $0,055 \pm 0,011$  mm. Estes valores correspondem a um desvio percentual de 22%. Apesar destes desvios apresentarem alguma significância, estes parâmetros apresentam uma repetibilidade aceitável.

Tabela 30 – Valores obtidos pela lei coesiva triangular, à tração, do adesivo Araldite® 2015

Provete	$\delta_n^0$ [mm]	$\delta_s^f$ [mm]
A2_1	0,006393	0,048
A2_2	0,006393	0,045
A2_3	0,006393	0,045
A2_4	0,006393	0,057
A2_5	0,006393	0,073
A2_6	0,006393	0,067
<b>Média</b>	-	0,055
<b>Desvio Padrão</b>	-	0,011

A Figura 85 apresenta as leis coesivas triangulares para cada um dos provetes, alcançadas através do acerto das seis curvas  $P$ - $\delta$  experimentais do adesivo Araldite® 2015. Foi considerada uma lei coesiva média, obtida a partir das médias de  $t_n^0$  e  $G_{Ic}$  para os seis provetes ensaiados. Observa-se um desvio relativamente reduzido entre as leis coesivas dos diversos provetes.

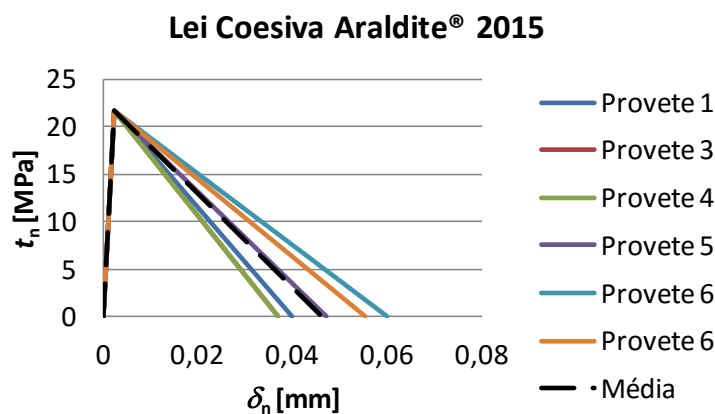


Figura 85 – Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes DCB colados com o adesivo Araldite® 2015, e respetiva lei coesiva média

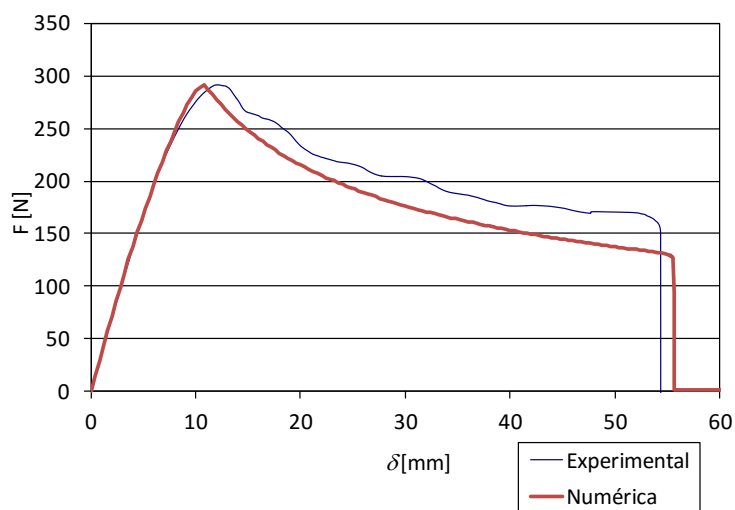
### 3.2.3.3 Sikaforce® 7752

Na Tabela 31 estão apresentados os valores de entrada utilizados em cada um dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com o adesivo SikaForce® 7752, e cujo procedimento de ajuste permitiu a estimativa de  $t_n^0$ . Relativamente aos valores médios registados, obteve-se para  $G_{Ic}$  o valor de  $3,65 \pm 0,310$  N/mm, apresentando um desvio percentual de 8%. Considerou-se que este parâmetro apresentou um bom grau de aproximação e é representativo de todos os ensaios.

A Figura 86 representa a curva  $P$ - $\delta$  de um provete representativo de todos os ensaios. Na generalidade dos ensaios, verificou-se uma previsão por defeito da carga na zona correspondente à propagação da fenda. Considera-se que este desvio se deve à modelação de um adesivo de grande ductilidade com uma lei coesiva triangular, que não é a mais adequada para este tipo de adesivo. De facto, a lei triangular promove uma redução das tensões transmitidas a partir do momento em que a tensão limite é atingida, o que não é coerente com o comportamento típico muito dúctil, em que existe um patamar de tensões após o início da plastificação. Conclui-se assim que as leis coesivas obtidas não são adequadas para a simulação do comportamento do adesivo SikaForce® 7752 à tração.

Tabela 31 – Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com adesivo SikaForce® 7752

Provete	$t_n^0$ [MPa]	$E$ [MPa]	$G_{Ic}$ [N/mm]
1	11,49	490	3,3
2	11,49	490	3,55
3	11,49	490	3,6
4	11,49	490	4,2
5	11,49	490	3,5
6	11,49	490	3,8
<b>Média</b>	-	-	3,65
<b>Desvio Padrão</b>	-	-	0,31

Figura 86 – Comparativo das curvas  $P$ - $\delta$  experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete DCB colado com o adesivo SikaForce® 7752

Na Tabela 32 são apresentados os valores individuais obtidos para  $\delta_n^0$  e  $\delta_s^f$ . relativamente ao parâmetro  $\delta_s^f$ , registou-se um valor médio e respetivo desvio de  $0,719 \pm 0,061$  mm, o que em termos percentuais corresponde a 8%. Apesar destes

desvios apresentarem alguma significância, estes parâmetros apresentam uma boa repetibilidade.

Tabela 32 – Valores obtidos pela lei coesiva triangular, à tração, do adesivo SikaForce® 7752

Provete	$\delta_n^0$ [mm]	$\delta_s^f$ [mm]
1	0,010705	0,649
2	0,010705	0,698
3	0,010705	0,708
4	0,010705	0,826
5	0,010705	0,688
6	0,010705	0,747
<b>Média</b>	-	0,719
<b>Desvio Padrão</b>	-	0,06

A Figura 87 exibe as leis coesivas triangulares alcançadas para todos os provetes, obtidas através do acerto das seis curvas  $P-\delta$  experimentais do adesivo SikaForce® 7752. Foi igualmente considerada uma lei coesiva média, tendo sido calculada a partir das médias de  $t_n^0$  e  $G_{Ic}$  para os seis provetes ensaiados. Constata-se um desvio reduzido das leis coesivas entre os vários provetes, o que mostra mais uma vez a repetibilidade dos ensaios realizados.

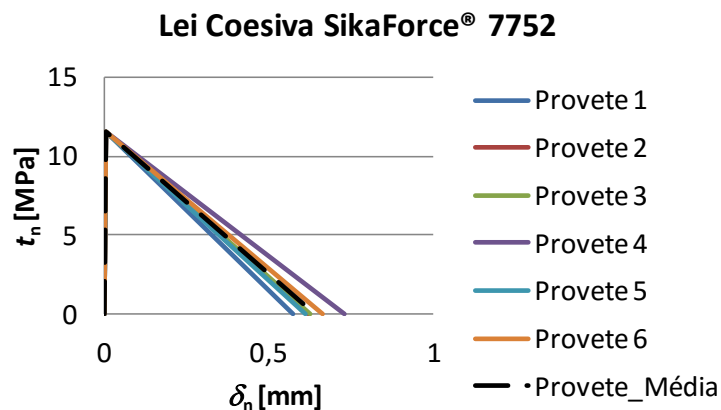


Figura 87 – Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes DCB colados com o adesivo SikaForce® 7752, e respetiva lei coesiva média

### 3.2.4 Estimativa das leis coesivas em corte

As simulações numéricas foram efetuadas sob as condições anunciadas previamente com a finalidade de determinar, para cada adesivo ensaiado, uma lei coesiva que represente o comportamento do mesmo ao corte, de tal forma que esta possa ser posteriormente aplicada para a previsão da resistência de juntas adesivas.

Recorreu-se a um método de ajuste de parâmetros, que se baseia na introdução no modelo numérico, do valor de  $G_{IIC}$  adquirido de forma experimental pelo CBBM. O valor de  $G$  foi obtido também experimentalmente a partir de  $E$  e  $\nu$ , tendo-se como consideração a relação da lei de Hooke para materiais isotrópicos. É usado inicialmente um valor típico de  $t_s^0$ , que é ajustado comparando as curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas de cada amostra. Este procedimento é efetuado individualmente para cada provete dos três adesivos em estudo, obtendo-se os valores médios de  $G_{IIC}$ ,  $t_s^0$  e  $\delta_s^0$  e as respetivas leis triangulares.

Verificou-se através do procedimento de ajuste efetuado que os valores de  $G_{IIC}$  e  $t_s^0$  possuem uma grande influência no perfil das curvas  $P$ - $\delta$  numéricas. O valor de  $G_{IIC}$ , utilizado nas simulações numéricas, influencia especialmente o valor da carga de pico. A consideração de valores mais elevados de  $t_s^0$  aumenta a carga de pico e a rigidez da amostra até o pico de carga, conduzindo a uma redução mais abrupta da carga pós-pico. Nos resultados apresentados seguidamente apresenta-se também o valor de deslocamento relativo máximo em corte,  $\delta_s^f$ , para que ocorra uma rotura completa. Este valor é obtido a partir de  $G_{IIC}$  e  $t_s^0$ , igualando a área abaixo da lei coesiva (Figura 23) ao respetivo valor de  $G_{IIC}$ .

### 3.2.4.1 Araldite® AV138

A Tabela 33 apresenta os valores de entrada utilizados em cada um dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com o adesivo Araldite® AV138, e cujo procedimento de ajuste permitiu a estimativa de  $t_s^0$ . Relativamente aos valores médios registados, o parâmetro  $t_s^0$  registou um valor de  $19,85 \pm 3,22$  MPa, o que corresponde a um desvio percentual de 16%. Quanto a  $G_{IIC}$ , obteve-se um valor de  $0,634 \pm 0,102$  N/mm, correspondendo também um desvio percentual de 16%. Considerou-se que estes parâmetros apresentam uma repetibilidade aceitável.

Tabela 33 – Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com adesivo Araldite® AV138

Provete	$t_s^0$ [MPa]	$E$ [MPa]	$G_{IIC}$ [N/mm]
AV138_1	20	1560	0,571
AV138_2	23	1560	0,826
AV138_3	22,5	1560	0,729
AV138_5	22,5	1560	0,594
AV138_6	20	1560	0,562
AV138_7	16	1560	0,578
AV138_8	15	1560	0,578
<b>Média</b>	19,85	-	0,634
<b>Desvio Padrão</b>	3,22	-	0,102

A Figura 88 apresenta as curvas  $P$ - $\delta$  numérica e experimental de um provete ENF colado com o adesivo Araldite® AV138, após o procedimento iterativo de ajuste cuja concordância final é representativa do conjunto das simulações realizadas para todos os provetes. Observou-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, principalmente no comportamento pós-pico, que corresponde à zona de propagação da fenda e, como tal, representa a zona de maior importância no processo de ajuste. Constata-se que, de um modo geral, as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas numericamente reproduzem bastante bem as curvas experimentais de todos os provetes.

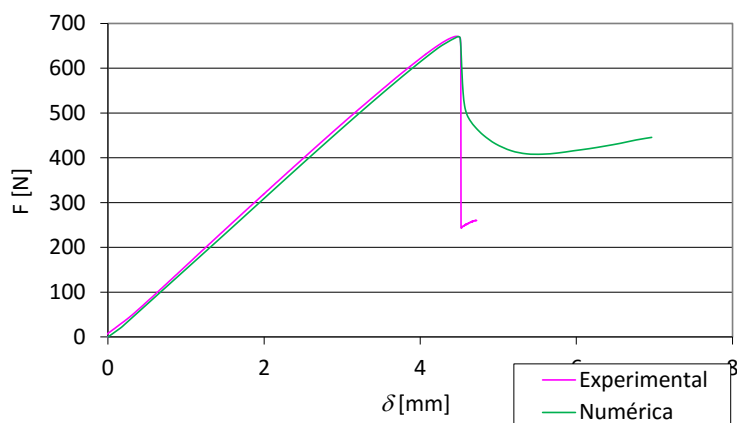


Figura 88 – Comparativo das curvas  $P$ - $\delta$  experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete ENF colado com o adesivo Araldite® AV138

Na Tabela 34 estão apresentados os valores individuais obtidos para  $\delta_n^0$  e  $\delta_s^f$ . O valor médio registado para cada um dos parâmetros foi de  $0,00255 \pm 0,00041$  mm e  $0,0645 \pm 0,0094$  mm, respetivamente, o que corresponde a um desvio percentual de 16,1% e 14,6% pela mesma ordem. Tal como os parâmetros obtidos anteriormente, estes apresentam uma repetibilidade igualmente aceitável.

Tabela 34 – Valores obtidos pela lei coesiva triangular, ao corte, do adesivo Araldite® AV138

Provete	$\delta_n^0$ [mm]	$\delta_s^f$ [mm]
AV138_1	0,00256	0,057
AV138_2	0,00295	0,072
AV138_3	0,00288	0,065
AV138_5	0,00288	0,053
AV138_6	0,00256	0,056
AV138_7	0,00205	0,072
AV138_8	0,00192	0,077
<b>Média</b>	0,00255	0,0645
<b>Desvio Padrão</b>	0,00041	0,0094

A Figura 89 apresenta as leis coesivas triangulares obtidas para cada um dos provetes, conseguidas através do ajuste das sete curvas  $P-\delta$  experimentais do adesivo Araldite® AV138. Considerou-se também uma lei coesiva média, obtida a partir das médias de  $t_s^0$  e  $G_{IIc}$  para os sete provetes ensaiados. É possível observar que as leis apresentam um grau aceitável de concordância entre elas, o que é indicativo da robustez dos resultados experimentais obtidos e processo iterativo de ajuste.

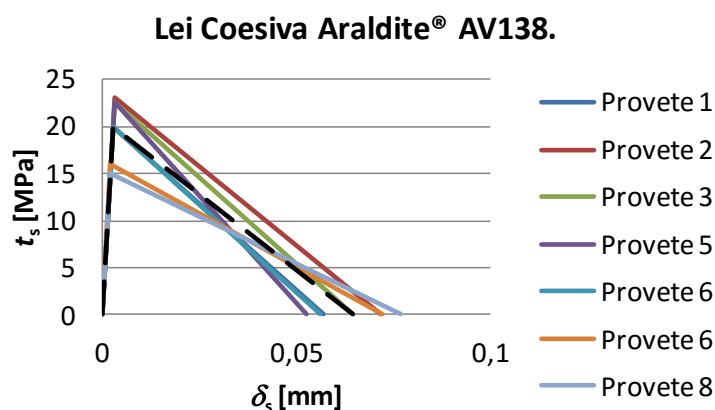


Figura 89 – Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes ENF colados com o adesivo Araldite® AV 138, e respetiva lei coesiva média

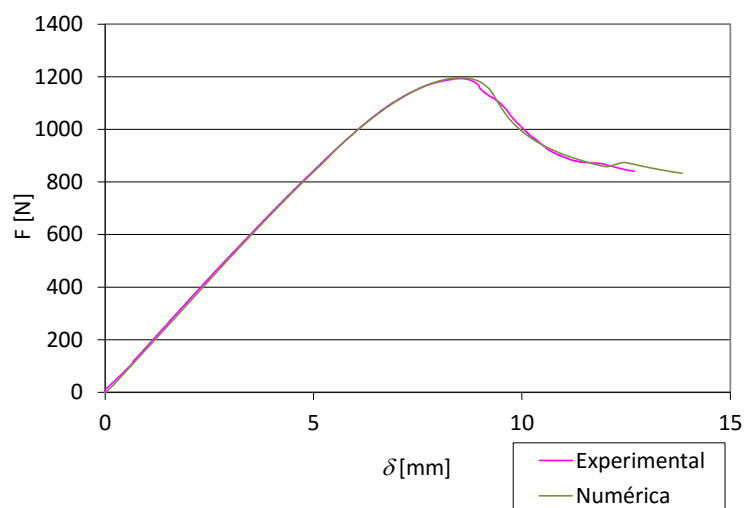
#### 3.2.4.2 Araldite® 2015

A Tabela 35 apresenta os valores de entrada utilizados em cada um dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com o adesivo Araldite® 2015, e cujo procedimento de ajuste permitiu a estimativa de  $t_s^0$ . O valor médio registado para  $t_s^0$  foi de  $19,21 \pm 1,65$  MPa, o que corresponde a um desvio percentual de 9%. Quanto ao valor médio obtido para  $G_{IIc}$ , este foi de  $3,01 \pm 0,32$  N/mm, apresentando um desvio percentual de 11%. Assim, considerou-se que estes parâmetros apresentam uma repetibilidade aceitável.

A Figura 90 mostra o resultado final do ajuste entre as curvas  $P-\delta$  numérica e experimental de um provete ENF colado com o adesivo Araldite® 2015, representativo da generalidade dos ensaios realizados no que concerne à reprodutibilidade conseguida nos resultados experimentais. Na globalidade dos ensaios, verificou-se uma concordância razoável, quando comparados os resultados numéricos com os experimentais. Atendendo ao comportamento pós-pico, observou-se também uma concordância razoável, correspondendo à zona de propagação da fenda. Verificou-se que, de um modo geral, as curvas  $P-\delta$  obtidas numericamente reproduzem com bastante eficácia as curvas experimentais de todos os provetes.

Tabela 35 – Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com adesivo Araldite® 2015

Provete	$t_s^0$ [MPa]	$E$ [MPa]	$G_{IIC}$ [N/mm]
A2015_1	17	560	3,42
A2015_3	20,5	560	2,58
A2015_4	19,5	560	3,1
A2015_5	20,5	560	2,801
A2015_6	21	560	3,43
A2015_7	19	560	2,85
A2015_8	17	560	2,9
<b>Média</b>	19,21	-	3,01
<b>Desvio Padrão</b>	1,65	-	0,32

Figura 90 – Comparativo das curvas  $P$ - $\delta$  experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete ENF colado com o adesivo Araldite® 2015

Na Tabela 36 estão expostos os valores individuais obtidos para  $\delta_n^0$  e  $\delta_s^f$ . Registou-se um valor médio de  $0,00686 \pm 0,00059$  mm e  $0,316 \pm 0,049$  mm, respetivamente, para

estes dois parâmetros. Estes valores correspondem a um desvio percentual de 8,6% e 15,5%, pela mesma ordem. Apesar destes desvios apresentarem alguma significância, estes parâmetros apresentam uma boa repetibilidade.

Tabela 36 – Valores obtidos pela lei coesiva triangular, ao corte, do adesivo Araldite® 2015

Provete	$\delta_n^0$ [mm]	$\delta_s^f$ [mm]
A2015_1	0,00607	0,402
A2015_3	0,00732	0,252
A2015_4	0,00696	0,318
A2015_5	0,00732	0,273
A2015_6	0,00750	0,327
A2015_7	0,00679	0,300
A2015_8	0,00607	0,341
<b>Média</b>	0,00686	0,316
<b>Desvio Padrão</b>	0,00059	0,049

A Figura 91 exibe as leis coesivas triangulares para cada um dos provetes obtidas através do ajuste das sete curvas  $P$ - $\delta$  experimentais do adesivo Araldite® 2015. É também apresentada uma lei coesiva média, obtida a partir das médias de  $t_s^0$  e  $G_{IIc}$  para os 7 provetes ensaiados. É possível verificar que as leis exibem um grau de concordância razoável entre elas, sendo um bom indicativo do rigor dos resultados experimentais obtidos e processo iterativo de ajuste.

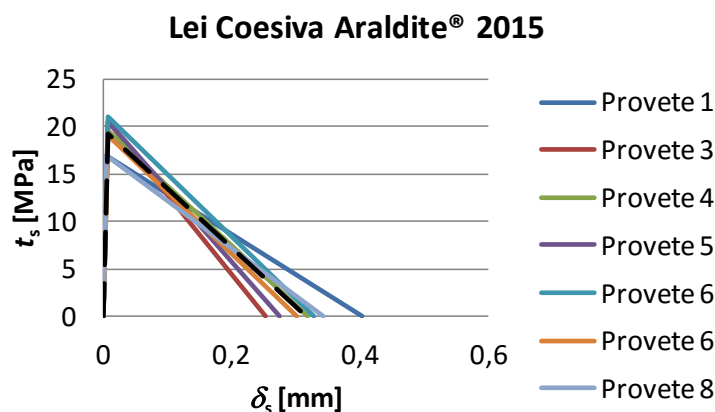


Figura 91 – Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes ENF colados com o adesivo Araldite® 2015, e respetiva lei coesiva média

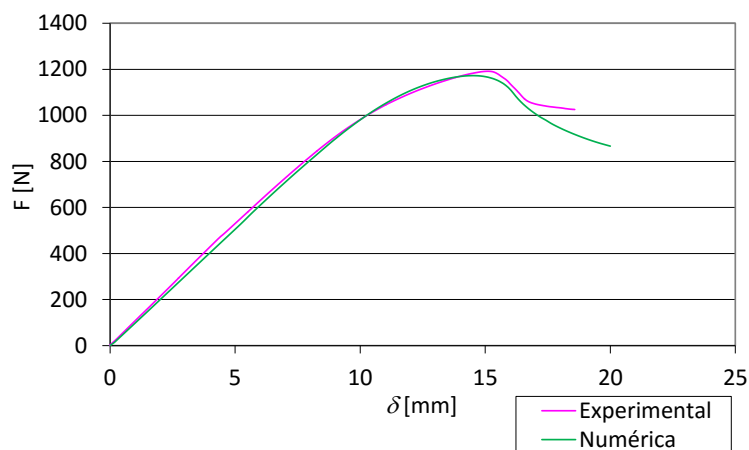
### 3.2.4.3 Sikaforce® 7752

A Tabela 37 apresenta os valores característicos de entrada utilizados em cada um dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com o adesivo SikaForce® 7752, e cujo procedimento de ajuste permitiu a estimativa de  $t_s^0$  do adesivo. Na análise efetuada, relativamente aos valores médios registados, obteve-se  $19,5 \pm 2,06$  MPa para o parâmetro  $t_s^0$ , correspondendo a um desvio percentual de 11%, enquanto para  $G_{IIc}$  se obteve  $5,666 \pm 0,476$  N/mm, o que corresponde a um desvio percentual de 8%. Considerou-se que estes parâmetros apresentam uma repetibilidade satisfatória.

A Figura 92 mostra o resultado final do ajuste entre as curvas  $P-\delta$  numérica e experimental de um provete ENF colado com o adesivo SikaForce® 7752, representativo da generalidade dos ensaios realizados no que concerne à reproduzibilidade conseguida nos resultados experimentais. De facto, globalmente verificou-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, nomeadamente no comportamento pós-pico, que corresponde à propagação da fenda e, como tal, representa a zona de maior importância no processo de ajuste. Verifica-se, de um modo geral, que as curvas  $P-\delta$  obtidas numericamente reproduzem de forma bastante satisfatória as curvas experimentais de todos os provetes.

Tabela 37 – Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com adesivo SikaForce® 7752

Provete	$t_s^0$ [MPa]	$E$ [MPa]	$G_{IIc}$ [N/mm]
S7752_1	18,5	190	5,950
S7752_2	21	190	5,465
S7752_3	20,5	190	5,949
S7752_4	23	190	4,800
S7752_5	17,5	190	5,600
S7752_6	18,5	190	6,300
S7752_7	17,5	190	5,600
<b>Média</b>	19,5	-	5,666
<b>Desvio Padrão</b>	2,06	-	0,476

Figura 92 – Comparativo das curvas  $P$ - $\delta$  experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete ENF colado com o adesivo SikaForce® 7752

Na Tabela 38 são apresentados os valores individuais obtidos para  $\delta_n^0$  e  $\delta_s^f$ , para os quais se obteve valores de  $0,002053 \pm 0,00217$  mm e  $0,588 \pm 0,092$  mm, respetivamente. Estes valores correspondem a um desvio percentual de 11%, e 16%, pela mesma

ordem. É possível observar que a lei triangular apresenta um grau de concordância satisfatório entre os vários provetes.

Tabela 38 – Valores obtidos pela lei coesiva triangular, ao corte, do adesivo SikaForce® 7752

Provete	$\delta_n^0$ [mm]	$\delta_s^f$ [mm]
S7752_1	0,01947	0,643
S7752_2	0,02211	0,520
S7752_3	0,02158	0,580
S7752_4	0,02421	0,417
S7752_5	0,01842	0,640
S7752_6	0,01947	0,681
S7752_7	0,01842	0,640
<b>Média</b>	0,02053	0,588
<b>Desvio Padrão</b>	0,00217	0,092

A Figura 93 ilustra as leis coesivas triangulares obtidas individualmente para cada um dos provetes, adquiridas através do ajuste das sete curvas  $P$ - $\delta$  experimentais do adesivo SikaForce® 7752. É também apresentada uma lei coesiva média, obtida a partir das médias de  $t_s^0$  e  $G_{IIc}$  para os sete provetes válidos, cujos valores individuais foram obtidos por ajuste das sete curvas  $P$ - $\delta$  experimentais do adesivo SikaForce® 7752. É possível observar que as leis manifestam um grau de concordância aceitável entre elas, indicando um bom nível de robustez dos resultados experimentais obtidos e processo iterativo de ajuste.

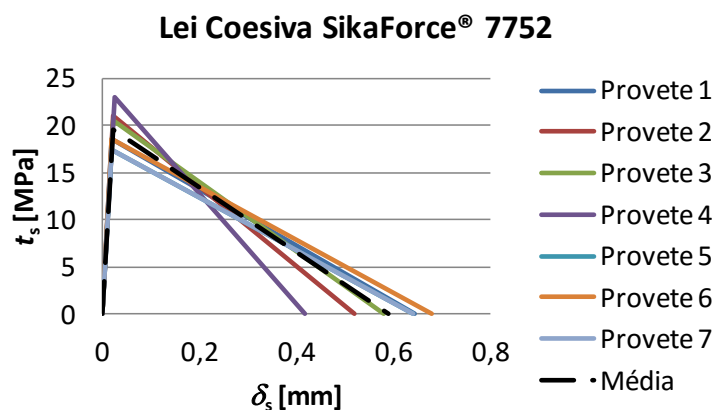


Figura 93 – Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes ENF colados com o adesivo SikaForce® 7752, e respetiva lei coesiva média

### 3.2.5 Análise dos resultados obtidos

A Figura 94 apresenta uma comparação entre os três adesivos em estudo, dos valores médios de  $G_{Ic}$  e respetivos desvios padrão. Como referenciado anteriormente, o método CBBM foi utilizado como referência por ser o mais fiável devido à consideração de  $a_{eq}$  que contabiliza a FPZ. Tanto o método CCM como o CBT requerem a medição do comprimento de fenda, obtida através de fotografias a cada provete em intervalos de tempo pré-definidos. Para se obter ótimos resultados é essencial que a foto seja tirada com desvio reduzido relativamente ao instante estipulado. Relativamente aos valores médios registados, o valor de  $G_{Ic}$  para o adesivo Araldite® AV138 foi de  $0,236 \pm 0,021$  N/mm, para o adesivo Araldite® 2015 foi de  $0,498 \pm 0,107$  N/mm e, por fim, para o adesivo SikaForce® 7752 foi de  $3,65 \pm 0,31$  N/mm. Os desvios percentuais foram de 9%, 21% e 8%, pela mesma ordem. Considerou-se que estes desvios, apesar de serem sempre significativos, representam com bastante fiabilidade o comportamento típico dos adesivos em estudo, quando ensaiados à tração.

Como se foi conferindo no decorrer da apresentação dos resultados dos ensaios DCB, o adesivo Araldite® AV138 é, claramente, o mais frágil dos três adesivos testados, apresentando o valor de  $G_{Ic}$  mais reduzido. Este facto levou a que este adesivo manifestasse uma propagação instável da fenda, intercalando regiões de propagação estável com instável. Relativamente ao adesivo Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, estes apresentam um comportamento moderadamente dúctil e dúctil, respetivamente.

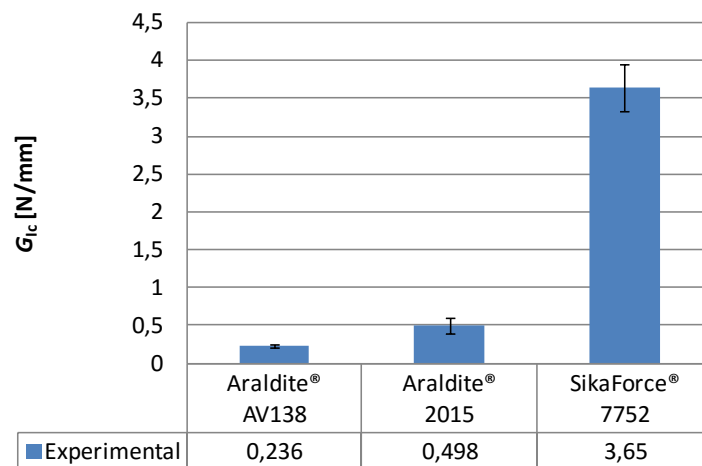


Figura 94 – Comparação de valores de  $G_{Ic}$  experimental, para os três adesivos

Na Figura 95 observam-se os valores médios e o desvio padrão de  $G_{IIc}$ , para os três adesivos estudados. Relativamente aos valores médios registados, o valor de  $G_{IIc}$  para o adesivo Araldite® AV138 foi de  $0,634 \pm 0,102$  N/mm, para o adesivo Araldite® 2015 foi de  $3,010 \pm 0,32$  N/mm e para o adesivo SikaForce® 7752 foi de  $5,666 \pm 0,476$  N/mm. Os desvios medidos foram de 16%, 11% e 8%, pela mesma ordem. Apesar de qualquer desvio ser sempre significativo, o estudo numérico apresenta uma ótima representatividade quanto ao comportamento típico dos adesivos em estudo, relativamente aos ensaios ao corte.

Relativamente aos resultados dos ensaios ENF, o adesivo SikaForce® 7752 é o mais dúctil ao corte, quando comparados os três adesivos, apresentando resultados mais elevados de  $G_{IIc}$ . Por outro lado, o Araldite® AV138 é o adesivo mais frágil. O adesivo Araldite® 2015 apresenta um resultado intermédio de tenacidade relativamente aos outros dois adesivos, tanto no ensaio DCB como no ENF.

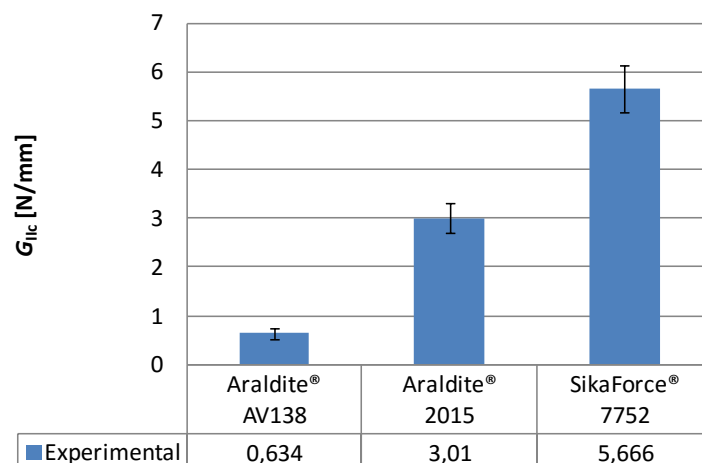


Figura 95 – Comparação de valores de  $G_{IIc}$  experimental, para os três adesivos

Naturalmente, as propriedades dos adesivos influenciam claramente a resistência da junta. Contudo, um adesivo mais resistente não implica que a resistência da junta seja também ela superior. Na verdade, um adesivo resistente mas frágil atinge localmente nos bordos da junta adesiva uma tensão elevada, não possibilitando a redistribuição do esforço para o interior desta. Nestas situações, a tensão de corte média de rotura é diminuta, sendo este o comportamento esperado para o Araldite® AV138. Por outro lado, os adesivos com elevada ductilidade e de baixo módulo têm normalmente uma baixa resistência. Contudo, estes têm uma capacidade de distribuição de tensões mais uniforme ao longo da junta por deformação plástica, e também devido à sua baixa rigidez, tornando assim as juntas mais resistentes quando comparadas com os adesivos mais resistentes e frágeis [122]. O Araldite® 2015 apresenta um comportamento com esta descrição, apresentando uma ductilidade moderada para adesivos estruturais e uma resistência à tração e corte inferiores ao Araldite® AV138.

Na Figura 96 observa-se que, para adesivos frágeis, com uma curva típica  $\sigma$ - $\varepsilon$  como indicado em (a), a rotura ocorre quando as tensões máximas nas extremidades da sobreposição atingem os valores limite do adesivo (b). Em adesivos dúcteis, com uma curva típica de  $\sigma$ - $\varepsilon$  como apresentado em (c), a rotura ocorrerá após plastificação do adesivo nas extremidades da sobreposição e aumento das tensões de corte na região intermédia (d), levando a uma tensão de corte média e a uma resistência global superior das juntas.

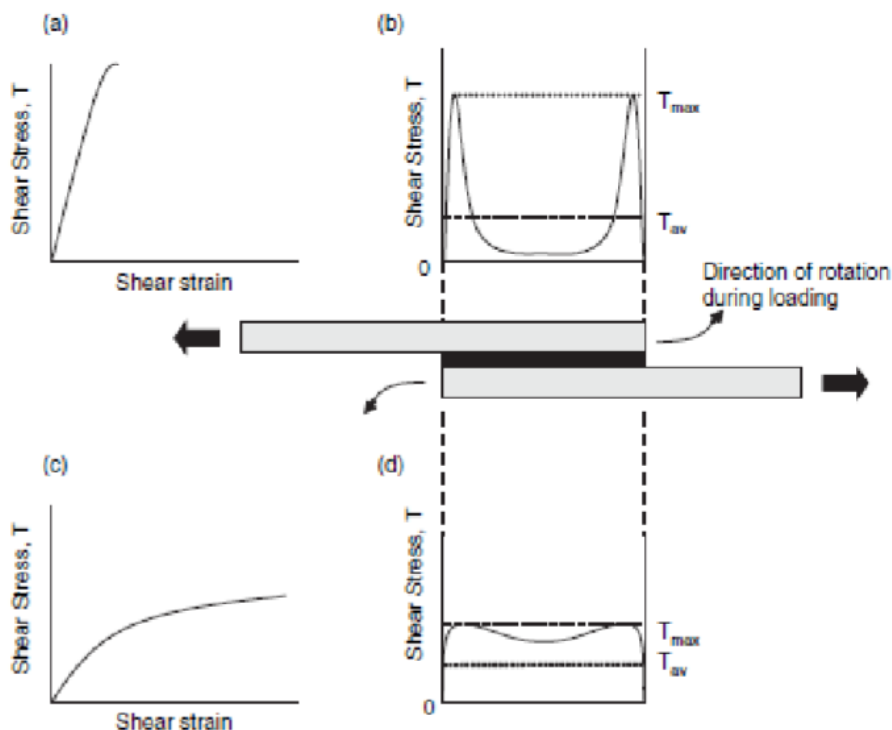


Figura 96 – Distribuição da tensão de corte em adesivos frágeis e dúcteis [23]

No que concerne ao adesivo Sikaforce® 7752, este apresenta uma resistência inferior aos restantes dois adesivos, mas oferece uma grande ductilidade. Assim, é um adesivo que possibilita uma maior redistribuição de tensões na camada de adesivo depois do seu limite elástico ser atingido. Para comprimentos de sobreposição reduzidos, estima-se uma resistência de junta inferior aos restantes dois adesivos, porém um melhor comportamento para os comprimentos de sobreposição mais elevados, para os quais a tenacidade tem um papel preponderante na resistência.

A resistência à fadiga de juntas adesivas é normalmente menor para adesivos frágeis. Esta característica pode ser explicada através da distribuição de tensões mais uniformes no adesivo e devido a uma maior energia de amortecimento das juntas coladas com adesivos dúcteis [6]. Os adesivos frágeis são sensíveis a defeitos, como por exemplo espaços vazios e microfissuras [123]. Os adesivos dúcteis apresentam uma maior aptidão para suportar esforços de clivagem e de arrancamento, daí serem recomendados para unir chapas finas [124].



# CONCLUSÕES



## 4 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho teve como objetivo principal a validação numérica de MDC para previsão de resistência de juntas adesivas sujeitas à tração e corte puros. Para tal, estudou-se o efeito da lei coesiva triangular na previsão da resistência de juntas adesivas em provetes DCB e ENF, e efetuou-se a devida comparação dos resultados obtidos de análises numéricas com ensaios experimentais de trabalhos anteriores. Os adesivos que serviram de base para o estudo foram o Araldite® AV138, que apresenta comportamento frágil, e Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, de comportamento moderadamente dúctil e dúctil, respetivamente. A análise numérica realizada no *software* Abaqus® teve como propósito inicial a validação das leis coesivas obtidas pelo método inverso, após simplificação destas a leis triangulares.

A parte inicial do trabalho consistiu então na determinação experimental dos valores de  $G_{Ic}$  por 4 métodos de redução distintos, como o CCM, CBT e CBBM, e através do integral- $J$ , e ainda dos valores de  $G_{Ic}$  pelos métodos CBBM, CCM, CBT e DBT. Os valores experimentais foram obtidos tendo como base trabalhos anteriores.

Assim sendo, considerando os ensaios à tração (DCB), os valores médios de  $G_{Ic}$  obtidos pelos vários métodos para o adesivo Araldite® AV138 foram os seguintes:  $0,249 \pm 0,033$  N/mm (CBBM),  $0,199 \pm 0,012$  N/mm (CCM),  $0,238 \pm 0,03$  N/mm (CBT) e  $0,245 \pm 0,045$  N/mm (Integral- $J$ ). No caso do adesivo Araldite® 2015 os valores médios obtidos de  $G_{Ic}$  foram os seguintes:  $0,539 \pm 0,116$  N/mm (CBBM),  $0,496 \pm 0,11$  N/mm (CCM),  $0,530 \pm 0,099$  N/mm (CBT) e  $0,533 \pm 0,123$  N/mm (Integral- $J$ ). Para o adesivo SikaForce® 7752 apenas se utilizou o método CBBM, que resultou em  $G_{Ic} = 3,702 \pm 0,231$  N/mm. Para o adesivo Araldite® AV138, a diferença percentual máxima entre o método de referência CCBM para os restantes valores médios foi de 20,1% para o CCM, de 4,4% para o CBT e de 1,6% para o Integral- $J$ . No caso do adesivo Araldite® 2015, esta mesma diferença foi a seguinte: 8,0% para o CCM, 1,7% para o CBT e 1,1% para o CBT. Analisando os valores individuais de  $G_{Ic}$ , o método CCM evidencia-se porque apresenta valores menores relativamente aos restantes. O facto de ser necessário um ajuste polinomial de  $C^{1/3} = f(a)$  poderá ter afetado estes valores. A obtenção de  $G_{Ic}$  através dos métodos CBBM e CBT foi muito morosa devido à necessidade de analisar visualmente em detalhe em média 100 imagens alusivas a cada ensaio para se efetuar a medição do comprimento de fenda. No global, todos os métodos demonstraram uma boa concordância e pode-se afirmar que o  $G_{Ic}$  obtido para os três adesivos estudados seguiu a mesma tendência em todos os métodos. Verificou-se que tanto as curvas  $P-\delta$ , assim como as curvas- $R$  obtidas experimentalmente, apresentaram boa reprodutibilidade, o que mostra a robustez dos resultados obtidos. Após a realização dos ensaios experimentais tornou-se mais evidente que o adesivo mais frágil era o Araldite® AV138, seguido pelo Araldite® 2015 e finalmente o Sikaforce® 7752, o que se

revelou estar de acordo com o comportamento observado na literatura para estes adesivos.

Para os ensaios de corte (ENF), os valores médios de  $G_{IIC}$  obtidos pelos vários métodos para o adesivo Araldite® AV138 foram os seguintes:  $0,618 \pm 0,069$  N/mm (CBBM),  $0,561 \pm 0,064$  N/mm (CCM),  $0,511 \pm 0,0058$  N/mm (CBT) e  $0,606 \pm 0,053$  N/mm (DBT). Para o adesivo Araldite® 2015, os valores obtidos foram:  $2,967 \pm 0,273$  N/mm (CBBM),  $3,113 \pm 0,334$  N/mm (CCM),  $2,517 \pm 0,164$  N/mm (CBT) e  $2,859 \pm 0,238$  N/mm (DBT). Finalmente, para o adesivo SikaForce® 7752, também se utilizou apenas o método CBBM, que resultou no valor de  $5,562 \pm 0,356$  N/mm. Para o adesivo Araldite® AV138, a diferença percentual máxima entre o método de referência CCBM para os restantes valores médios foi de 9,2% para o CCM, de 8,7% para o CBT e de 1,9% para o DBT. No caso do adesivo Araldite® 2015, esta mesma diferença foi a seguinte: 4,9% para o CCM, 15,2% para o CBT e 3,6% para o CBT. Comparando os vários métodos de redução, observa-se que o CBBM é o mais fiável, uma vez que evita a medição do comprimento da fenda, eliminando assim esta fonte de erro na medição de  $G_{IIC}$ , para além de considerar de forma rigorosa a plasticidade na medição de  $G_{IIC}$ . Os restantes métodos exigem a medição do comprimento da fenda, podendo dar origem a erros significativos, particularmente se existirem discrepâncias entre a rotura do adesivo e da tinta usada para melhorar a visualização da fenda. O CCM acumula a esta fonte de erro dificuldades o ajuste do polinómio usado para reproduzir  $C=f(a)$ , necessário para o cálculo de  $dC/da$ . De uma maneira geral, também para o  $G_{IIC}$  os diversos métodos utilizados evidenciaram boa concordância. As curvas  $P-\delta$  e as curvas- $R$  conseguidas experimentalmente exibiram boa reprodutibilidade, o que atesta a reprodutibilidade dos resultados obtidos. Os ensaios experimentais evidenciaram uma vez mais que o adesivo Araldite® AV138 é o mais frágil em estudo, seguido do Araldite® 2015 e por fim do Sikaforce® 7752, estando portanto de acordo com o comportamento típico esperado.

No que respeita à análise numérica, esta teve como objetivo inicial a validação numérica de MDC para previsão de resistência de juntas adesivas sujeitas à tração e corte puros, após a aplicação de uma lei coesiva triangular.

As leis coesivas à tração obtidas pelo método inverso confirmaram o comportamento frágil do Araldite® AV138, cujo comportamento pode ser modelado com alguma precisão com leis triangulares. O Araldite® 2015 também pode ser modelado por um MDC triangular com um grau de precisão aceitável. Tendo em conta a geometria da curva e a zona de  $P_{máx}$ , a lei triangular apresenta-se um pouco desajustada na previsão de rotura do adesivo SikaForce® 7752.

As leis coesivas ao corte obtidas pelo método inverso comprovam o comportamento frágil do Araldite® AV138, uma vez que este apresenta uma modelação bastante aceitável por uma lei triangular. Relativamente ao adesivo Araldite® 2015, este pode

ser modelado por um MDC triangular com um grau de precisão razoável. Porém, tendo em conta a geometria da curva e para capturar a zona de pico, a lei que se poderá adaptar de forma mais ajustada é talvez a lei trapezoidal. Para o adesivo SikaForce® 7752, considerado neste estudo como o adesivo mais dúctil, apesar de os resultados indicarem um ajuste razoável, deverá ser utilizada uma lei trapezoidal, para modelar de uma forma mais correta o comportamento plástico deste adesivo.

Como resultado deste trabalho, pode-se concluir que foi possível avaliar com algum detalhe as potencialidades dos MDC na avaliação da resistência das juntas e, desta forma, facultar informações sobre o comportamento de diferentes adesivos. Os MDC podem ser usados para efeitos de previsão do comportamento das juntas, uma vez que são um método fiável. Com a utilização das diferentes leis coesivas, abrem-se oportunidades para realizar previsões de resistência em juntas de geometria genéricas, com vantagens evidentes consequentes dos custos e tempos de projeto de estruturas com juntas adesivas.

Como sugestões de trabalhos a desenvolver no futuro indico os seguintes:

- Estudo da influência de parâmetros geométricos como a espessura do adesivo ou do aderente nas leis coesivas;
- Adequar diferentes tipos de leis coesivas para os adesivos em estudo nesta dissertação, para obter uma melhor modelação dos resultados experimentais obtidos;
- Estudo dos adesivos utilizados nesta dissertação recorrendo a leis coesivas em modo misto de forma a prever a resistência de juntas adesivas genéricas;
- Comparação do método inverso com outros métodos de obtenção de leis coesivas para análise comparativa das vantagens e desvantagens de cada um deles.



**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**



## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- L1. Constante, C.J., *Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
2. Campilho, R.D.S.G., D.C. Moura, M.D. Banea, and L.F.M. da Silva, *Adhesive thickness effects of a ductile adhesive by optical measurement techniques*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2015. **57**: p. 125-132.
3. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fractura em tracção de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
4. Gleich, D.M., M.J.L. Van Tooren, and A. Beukers, *Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2001. **15**(9): p. 1091-1101.
5. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais 2007*, Porto: Publindústria.
6. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, New York: McGraw-Hill.
7. Chaves, F.J.P., *Ligação Adesiva, workshop Técnicas avançadas nos processos de ligação e consolidação*. Ordem dos Engenheiros.
8. *Handbook of Adhesives and Sealants - ADHESIVES AND SEALANTS - Basic Concepts and High Tech Bonding*, ed. P. COGNARD. Vol. Volume 1. 2005. 511.
9. Adhesives, J., *Jowat adhesives in the automotive adhesives*, in *Automotive Adhesives*. 2016, Jowat Information.
10. Systems, D.A., *Structural bonding of lightweight cars: Crash durable, safe and economical*. Dow Automotive Systems: Michigan.
11. T.A.B., F., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas* in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
12. Banea, M.D., L.F.M. da Silva, and R.D.S.G. Campilho, *The effect of adhesive thickness on the mechanical behavior of a structural polyurethane adhesive*. *The Journal of Adhesion*, 2015. **91**(5): p. 331-346.
13. Dillard, D., *Advances in Structural Adhesive Bonding*. 2010, Amsterdam: Elsevier.
14. Marini, M., E. Rivalta, P. Molendi, F. Di Silvestri, and C. Bonacini, *Mechanical analysis of structural adhesive for marine joints*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2013. **27**(7): p. 820-824.
15. Dillard, D.A. and A.V. Pocius, eds. *The mechanics of adhesion* ed. A.V. Pocius. 2002, Elsevier: Amsterdam.
16. Ribeiro, A.S., A.M.P. De Jesus, and A.J.M. Ferreira, *Comportamento estático e à fadiga de juntas coladas com perfis pultrudidos*. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões* 2008. **16**: p. 81-87.

17. Ebnesajjad, S., *Adhesives technology handbook*. Second Edition ed. 2008, Norwich: William Andrew Inc.
18. Breto, R., A. Chiminelli, E. Duvivier, M. Lizaranzu, and M.A. Jiménez, *Finite Element Analysis of Functionally Graded Bond-Lines for Metal/Composite Joints*. *The Journal of Adhesion*, 2015. **91**(12): p. 920-936.
19. Pizzi, A. and K.L. Mittal, *Handbook of Adhesive Technology* Second Edition (Revised and Expanded ) ed. 2003, New York: Marcel Dekker.
20. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*, in *Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial*. 2007, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
21. Kosmac, A., *Adhesive Bonding of Stainless Steels*, in *Materials and Applications Series*. 2013, Euroinox – The European Stainless Steel Development Association.
22. Hashim, S.A., *Adhesive bonding of thick steel adherends for marine structures*. *Marine Structures*, 1999. **12**(6): p. 405-423.
23. Troughton, M.J., *Handbook of plastics joining: a practical guide* Second Edition ed. *Handbook of Plastics Joining*. 2008, Boston: William Andrew Publishing.
24. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*, in *Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial*. 2005, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
25. Adams, R.D., *Adhesive bonding - Science, technology and applications*. 2005: Woodhead Publishing Limited. 559.
26. Packham, D.E., *Handbook of adhesion* 2nd Edition ed. 2005, Hoboken: John Wiley & Sons.
27. Zhao, B. and Z.-H. Lu, *A Two-Dimensional Approach of Single-Lap Adhesive Bonded Joints*. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2009. **16**(2): p. 130-159.
28. Owens, J.F.P., *Studies on stiffness and fracture behaviour in adhesively bonded compositeto-metal sear joints*. 1998, Tese de Mestrado, Universidade de New Brunswinck: Fredericton.
29. Das, M., E. Madenci, and D.R. Ambur, *Three-dimensional nonlinear analyses of scarf repair in composite laminates and sandwich panels*. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2008. **3**(9).
30. Madrid, M., *Tecnología de la adhesión*, in *Barcelona*, D.T.d.L. España, Editor., Loctite España.
31. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*, in *Departamento de Engenharia Mecânica* 2015, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
32. *Composite Materials Handbook MIL-HDBK-17-3F* Vol. volume 3 of 5. 2002: Department of Defense-United States of America.
33. Liao, L., C. Huang, and T. Sawa, *Effect of adhesive thickness, adhesive type and scarf angle on the mechanical properties of scarf adhesive joints*. *International Journal of Solids and Structures*, 2013. **50**(25–26): p. 4333-4340.

34. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of Strain Analysis, 1974. **9**: p. 185-196.
35. Esteves, J.L.S., *Estudo do comportamento de adesivos estruturais*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 1990, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
36. Gleich, D., *Stress analysis of structural bonded joints*. 2002, Tese de Mestrado, Imperial College: Londres.
37. Abdel Wahab, M.M., I. Hilmy, I.A. Ashcroft, and A.D. Crocombe, *Evaluation of Fatigue Damage in Adhesive Bonding: Part 2: Single Lap Joint*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2010. **24**(2): p. 325-345.
38. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen mit konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**: p. 41-47.
39. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics, 1944: p. 66:A17-A27.
40. Hart-Smith, L.J., *Adhesive-bonded single-lap joints*. 1973, NASA Technical Report.
41. Huang, H., C. Yang, J. Tomblin, and P. Harter, *Stress and failure analyses of adhesive-bonded composite joints using astm d3165 specimens*. Journal of Composites, Technology and Research, 2002. **24**: p. 345-356.
42. Panigrahi, S.K. and B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
43. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints*. 2012, Heidelberg: Springer.
44. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural Adhesive Joints in Engineering*. Second Edition ed. 1997, London: Chapman & Hall.
45. Ikegami, K., T. Takeshita, K. Matsuo, and T. Sugibayashi, *Strength of adhesively bonded scarf joints between glass fibre-reinforced plastics and metals*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1990. **10**(3): p. 199-206.
46. Zhao, X., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Single lap joints with rounded adherend corners: Stress and strain analysis*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**: p. 819-836.
47. Zhao, X., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Single lap joints with rounded adherend corners: experimental results and strength prediction*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**: p. 837-856.
48. Clark, J.D. and I.J. McGregor, *Ultimate Tensile Stress over a Zone: A New Failure Criterion for Adhesive Joints*. The Journal of Adhesion, 1993. **42**(4): p. 227-245.
49. Weißgraeber, P. and W. Becker, *Crack Initiation at Weak Stress Singularities – Finite Fracture Mechanics Approach*. Procedia Materials Science, 2014. **3**: p. 153-158.
50. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.

51. Ribeiro, T.E.A., *Strength and damage analysis of composite-aluminum adhesively-bonded single-lap joints* in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2015, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto Porto.
52. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints: Part 1: Analytical method*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1991. **11**(4): p. 213-220.
53. Ayatollahi, M.R. and A. Akhavan-Safar, *Failure load prediction of single lap adhesive joints based on a new linear elastic criterion*. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2015. **80**: p. 210-217.
54. Groth, H.L., *Stress singularities and fracture at interface corners in bonded joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1988. **8**(2): p. 107-113.
55. Rice, J.R. and G.F. Rosengren, *Plane strain deformation near a crack tip in a power-law hardening material*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1968. **16**(1): p. 1-12.
56. Chen, Z., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *The use of the J-integral vector to analyse adhesive bonds with and without a crack*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2011. **31**(1): p. 48-55.
57. Cui, W. and M.R. Wisnom, *A combined stress-based and fracture-mechanics-based model for predicting delamination in composites*. *Composites*, 1993. **24**(6): p. 467-474.
58. Petrossian, Z. and M.R. Wisnom, *Prediction of delamination initiation and growth from discontinuous plies using interface elements*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1998. **29**(5-6): p. 503-515.
59. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, A.M.G. Pinto, L.F.M. da Silva, and A.M.P. de Jesus, *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2011. **31**(5): p. 363-372.
60. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1959. **23**(3): p. 622-636.
61. Barenblatt, G.I., *The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture*, in *Advances in Applied Mechanics*, T.v.K.G.K.F.H.v.d.D. H.L. Dryden and L. Howarth, Editors. 1962, Elsevier. p. 55-129.
62. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1960. **8**(2): p. 100-104.
63. Li, S., M.D. Thouless, A.M. Waas, J.A. Schroeder, and P.D. Zavattieri, *Use of a cohesive-zone model to analyze the fracture of a fiber-reinforced polymer-matrix composite*. *Composites Science and Technology*, 2005. **65**(3-4): p. 537-549.
64. Blackman, B.R.K., A.J. Brunner, and J.G. Williams, *Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2006. **73**(16): p. 2443-2455.
65. Biel, A. and U. Stigh, *Effects of constitutive parameters on the accuracy of measured fracture energy using the DCB-specimen*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008. **75**(10): p. 2968-2983.

66. Banea, M.D., L.F.M. da Silva, and R.D.S.G. Campilho, *Temperature Dependence of the Fracture Toughness of Adhesively Bonded Joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2010. **24**(11-12): p. 2011-2026.
67. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, and L.F.M.d. Silva, *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
68. May, M., H. Voß, and S. Hiermaier, *Predictive modeling of damage and failure in adhesively bonded metallic joints using cohesive interface elements*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **49**: p. 7-17.
69. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
70. Xie, D. and A.M. Waas, *Discrete cohesive zone model for mixed-mode fracture using finite element analysis*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(13): p. 1783-1796.
71. Campilho, R.D.S.G., A.M.G. Pinto, M.D. Banea, and L.F.M. da Silva, *Optimization study of hybrid spot-welded/bonded single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 86-95.
72. Alfano, G. and M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**: p. 1701-1736.
73. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture. **77**(2): p. 111-140.
74. Chen, J., *Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
75. Chandra, N., H. Li, C. Shet, and H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
76. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
77. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, and I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
78. de Moura, M.F.S.F., J.P.M. Gonçalves, A.T. Marques, and P.M.S.T. de Castro, *Prediction of compressive strength of carbon-epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures, 2000. **50**(2): p. 151-157.
79. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.

80. Feraren, P. and H.M. Jensen, *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(15): p. 2125-2142.
81. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, and L.F.M. da Silva, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
82. Ridha, M., V.B.C. Tan, and T.E. Tay, *Traction–separation laws for progressive failure of bonded scarf repair of composite panel*. Composite Structures, 2011. **93**(4): p. 1239-1245.
83. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, and L.F.M. da Silva, *Modelling of Single-Lap Joints Using Cohesive Zone Models: Effect of the Cohesive Parameters on the Output of the Simulations*. The Journal of Adhesion, 2012. **88**(4-6): p. 513-533.
84. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, A.M.G. Pinto, J.J.L. Morais, and J.J.M.S. Domingues, *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.
85. Pardoën, T., T. Ferracin, C.M. Landis, and F. Delannay, *Constraint effects in adhesive joint fracture*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005. **53**: p. 1951–1983.
86. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, and I.A. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
87. Daudeville, L. and P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1–4): p. 547-555.
88. Kondo, D., H. Weleman, and F. Cormery, *Basic concepts and models in continuum damage mechanics*. Revue Européenne de Génie Civil, 2007. **11**(7-8): p. 927-943.
89. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage mechanics with finite elements*. 2005, Heidelberg: Springer-Verlag.
90. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, and I.A. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
91. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
92. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, and S.J. Shaw, *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
93. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, and M. Kimoto, *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.

94. Bhattacharya, B. and B. Ellingwood, *Continuum damage mechanics analysis of fatigue crack initiation*. International Journal of Fatigue, 1998. **20**(9): p. 631-639.
95. Chen, Z., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
96. Soheil, M., *Extended finite element method: For fracture analysis of structures*. 2007, New Jersey: Blackwell Publishing.
97. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
98. Moës, N., J. Dolbow, and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
99. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
100. Branco, C.A.G.d.M., A.A. Fernandes, and P.M.S.T. de Castro, *Fadiga de estruturas soldadas*. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian ed. 1999, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
101. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
102. de Moura, M.F.S.F., A.B. de Morais, and A.G. de Magalhães, *Materiais compósitos - materiais, fabrico e comportamento mecânico*. 2006, Porto: Publindústria.
103. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10-11): p. 2224-2230.
104. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*, in *Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial*. 2009, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
105. Chaves, F.J.P., *Fracture mechanics applied to the design of adhesively bonded joints*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2013, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto: Porto.
106. D3433-99, A., *ASTM D3433-99 Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012.
107. da Silva, L.F.M., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*. 2011, Heidelberg: Springer-Verlag.
108. Carlsson, L.A., J.W. Gillespie, and R.B. Pipes, *On the Analysis and Design of the End Notched Flexure (ENF) Specimen for Mode II Testing*. Journal of Composite Materials, 1986. **20**(6): p. 594-604.

109. de Moura, M.F.S.F., *Interlaminar Mode II Fracture Characterization*. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
110. Fernández, M.V., M.F.S.F. de Moura, L.F.M. da Silva, and A.T. Marques, *Mixed-mode I + II fatigue/fracture characterization of composite bonded joints using the Single-Leg Bending test*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013. **44**: p. 63-69.
111. Dillard, D.A., H.K. Singh, D.J. Pohlit, and J.M. Starbuck, *Observations of Decreased Fracture Toughness for Mixed Mode Fracture Testing of Adhesively Bonded Joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009. **23**(10-11): p. 1515-1530.
112. Aalco, *Aluminium Alloy 6082 - T6~T651 Plate*, Aalco, Editor. 2016, Aalco: Surrey.
113. Pigmente, K. 2016 [cited 2016 01/04/2016]; Available from: <http://www.kremer-pigmente.com/en/product/araldit-av-138-m-1-hv-998-1-pack-97930.html?info=10570&sorting=model&xa0382=035a480323ed1d6142ac3e8b3a02da27>.
114. Campilho, R.D.S.G., A.M.G. Pinto, M.D. Banea, R.F. Silva, and L.F.M. da Silva, *Strength Improvement of Adhesively-Bonded Joints Using a Reverse-Bent Geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
115. Farnell. *ARALDITE 2015 50ML Adhesive*. 2016 [cited 2016 01/04/2016]; Available from: <http://pt.farnell.com/araldite/araldite-2015-50ml/adhesive-araldite-2015-50ml/dp/1759544>.
116. Gimeg. *Sikaforce 7752*. 2016; Available from: <http://www.gimeg.nl/nl/sikaforce-7752-10-2kg-2621400>.
117. Faneco, T.M.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade* in *Departamento de Engenharia Mecânica 2014*, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto Porto.
118. Fernandes, R.L., *Estudo numérico da adequação de diferentes tipos de leis coesivas na previsão da resistência de juntas adesivas por Modelos de Dano Coesivo*, in *Departamento de Engenharia Mecânica 2015*, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto Porto.
119. Lee, D.-B., T. Ikeda, N. Miyazaki, and N.-S. Choi, *Effect of Bond Thickness on the Fracture Toughness of Adhesive Joints*. Journal of Engineering Materials and Technology, 2004. **126**(1): p. 14-18.
120. Leitão, A.C.C., *Aplicação de um método de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fratura em corte de adesivos estruturais*, in *Departamento de Engenharia Mecânica 2015*, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto Porto.
121. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
122. Henkel, C., *Design Guide for Bonding Plastics*. Henkel Corporation, 2011.

123. da Silva, L.F.M., J.E. Ramos, M.A.V. de Figueiredo, and T.R. Strohaecker, *Influence of the adhesive, the adherend and the overlap on the single lap shear strength*. Journal of Adhesion and Interface, 2006. **7**: p. 1-9.
124. ESA-ESTEC, *Space engineering - Adhesive bonding handbook*. 2011, Noordwijk: ECSS - European Cooperation For Space.