



Utilização do método direto de obtenção de leis coesivas para previsão de resistência de juntas com chanfro interior

DANIEL FILIPE OLIVEIRA DA SILVA

dezembro de 2017

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DIRETO DE OBTENÇÃO DE LEIS COESIVAS PARA PREVISÃO DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS COM CHANFRO INTERIOR

Daniel Filipe Oliveira da Silva

1060548

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DIRETO DE OBTENÇÃO DE LEIS COESIVAS PARA PREVISÃO DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS COM CHANFRO INTERIOR

Daniel Filipe Oliveira da Silva

1060548

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva.

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutora Maria Teresa Ribeiro Pereira

Professor adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor adjunto, ISEP

Coorientador

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Sérgio Manuel Oliveira Tavares

Investigador, FEUP

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e ao meu coorientador Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva, por todo o apoio e tempo despendido ao longo da realização deste trabalho. Agradeço também a ajuda que me forneceram na parte da simulação numérica e tratamento de dados. Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), pela oportunidade concedida para a elaboração deste trabalho e por todos os ensinamentos que me foram transmitidos ao longo do meu percurso nesta instituição.

PALAVRAS CHAVE

Ligação adesiva; junta *scarf*; junta de chanfro interior; adesivo estrutural; Método de Elementos Finitos; modelos de dano coesivo; método direto.

RESUMO

Com o aumento do uso de estruturas com ligações adesivas ao nível industrial, diversos autores nas últimas décadas têm vindo a realizar estudos de modo a suprir as necessidades desse setor ao nível de métodos de previsão do comportamento e rotura de juntas adesivas com maior fiabilidade. Entre os métodos numéricos de previsão destacam-se os Modelos de Dano Coesivo, que tem revelado bons resultados nas previsões efetuadas. Uma das fases mais importantes neste método de previsão é a estimativa das leis coesivas em tração e corte, pelo que se torna de grande relevância a existência e validação de métodos precisos para a obtenção destas leis. Este trabalho resume-se a uma validação de leis coesivas em tração e corte, estimadas pela aplicação do método direto, na previsão da resistência de juntas em solitação mista. Neste âmbito, ensaiaram-se juntas de chanfro interior com diferentes ângulos (α) e adesivos com diferentes ductilidades. Foram considerados os adesivos Araldite® AV138, de elevada resistência e baixa ductilidade, Araldite® 2015, de moderada ductilidade e resistência intermédia e SikaForce® 7752, de baixa resistência e elevada ductilidade. As leis coesivas em modo puro serviram de base para a criação de leis simplificadas triangulares, trapezoidais e exponenciais, que foram testadas para cada um dos adesivos. A validação das mesmas consumiu-se por comparação das previsões numéricas com resultados experimentais. Procedeu-se também a uma análise de tensões de arrancamento e de corte no adesivo, de modo a compreender a influência das tensões na resistência das juntas. A utilização do método direto permitiu obter previsões de resistência bastante precisas, indicando as formas de leis coesivas mais adequadas para cada conjunto adesivo/geometria de junta. Para além disso, para as condições geométricas e materiais consideradas, este estudo permitiu concluir que não se cometem erros significativos na escolha de uma lei menos adequada.

KEYWORDS

Adhesive bonding; scarf joint; structural adhesive; Finite Element Method; models of cohesive damage; direct method.

ABSTRACT

With the increasing use of structures with adhesive bonds at the industrial level, several researchers in the last decades have been conducting studies in order to meet the needs of this sector in terms of methods of predicting the behaviour and strength of adhesive joints with greater reliability. Between the available numerical prediction methods, Cohesive Damage Models, which have shown good results, are particularly relevant. One of the most important phases in this prediction method is the estimation of the cohesive laws in tension and shear, which makes the existence and validation of precise methods to obtain these laws highly relevant. This work consists of a validation of cohesive laws in traction and shear, estimated by the application of the direct method, in the strength prediction of joints under a mixed-mode loading. In this context, scarf joints with different scarf angles (α) and adhesives of different ductility were tested. The Araldite® AV138, with high strength and low ductility, the Araldite® 2015, with moderate ductility and intermediate strength, and the SikaForce® 7752, with low strength and high ductility, were the considered adhesives. Pure-mode cohesive laws served as the basis for the creation of simplified triangular, trapezoidal and exponential laws that were tested for each of the adhesives. Their validation was accomplished by comparing the numerical predictions with the experimental results. An analysis of peel and shear stresses was also performed in the adhesive layer in order to understand the influence of stresses on the joints' strength. The use of the direct method allowed to achieve very precise strength predictions, indicating the cohesive law shape more suitable for each adhesive set/joint geometry. Furthermore, for the geometric and material conditions considered, this study has led to the conclusion that no significant errors are made in the choice of a less appropriate law.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
4ENF	<i>4-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>
BSM	<i>Block-Shear Method</i>
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>
DBT	<i>Direct Beam Theory</i>
DCB	<i>Double Cantilever Beam</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DoE	<i>Design of Experiments</i>
ELS	<i>End-Loaded Split</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Standard Organization</i>

JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
Junta <i>scarf</i>	Junta com chanfro interior
KM	Técnicas de metamodelo de <i>Kriging</i>
MDC	Modelo de dano coesivo
MMB	<i>Mixed-Mode Bending</i>
RIM	<i>Reaction Injection Molding</i>
SDEG	Variável de dano
SLB	<i>Single Leg Bending</i>
SMC	<i>Sheet Metal Compound</i>
SPELT	<i>Spelt loading jig</i>
TDCB	<i>Tapered Double-Cantilever Beam</i>
ZPF	Zona do Processo de Fratura

Lista de Símbolos

a	Comprimento de fenda
a	Comprimento de provete <i>scarf</i>
a_0	Pré-fenda
ae	Comprimento equivalente de fenda
B	Largura do provete
C	Flexibilidade dos substratos
C_0	Flexibilidade inicial
C_{0corr}	Flexibilidade inicial corrigida

C_{corr}	Flexibilidade corrigida
d_n	Variável de dano em tração
d_s	Variável de dano em corte
E, E_1	Módulo de elasticidade na direção longitudinal
E_a	Módulo de elasticidade dos substratos
E_f	Módulo de elasticidade à flexão equivalente
G	Taxa de libertação de energia
G_{13}	Módulo de elasticidade ao corte
G_c	Energia dissipada durante a fratura quando a fenda se propaga
G_I	Taxa de libertação de energia em modo I
G_{Ic}	Taxa crítica de libertação de energia em modo I
G_{IIc}	Taxa crítica de libertação de energia em modo II
h	Espessura do substrato
K_{nn}, K_{ns} e K_{ss}	Parâmetros de rigidez
L	Comprimento do provete ENF
L_s	Comprimento do provete DCB
m	Fator geométrico
M_f	Momento fletor
N	Solicitação na direção normal
P	Carga aplicada
$P_{máx}$	Carga máxima aplicada
$P_{mín}$	Carga mínima aplicada

P_u	Carga aplicada na extremidade dos provetes por unidade de largura
R^2	Coeficiente de correlação
t	Espessura do adesivo
T	Solicitação na direção transversal
t_A	Espessura do adesivo
t_m^0	Tensão máxima combinada em modo misto
t_n	Tensão coesiva normal
t_n^0	Tensão normal máxima
t_n^{und}	Tensão coesiva em tração sem degradação da rigidez
t_p	Espessura do substrato
t_s	Tensão coesiva ao corte
t_s^0	Tensão de corte máxima
t_s^{und}	Tensão coesiva em corte sem degradação da rigidez
x/L	Comprimento normalizado da camada de adesivo
δ	Deslocamento
$\delta_{\text{máx}}$	Deslocamento máximo
δ_m^f	Deslocamento em modo misto da extremidade da fenda na rotura
δ_n	Deslocamento atual da extremidade da fenda em tração
δ_n^0	Deslocamento correspondente ao início de propagação da fenda em tração
δ_n^f	Deslocamento de rotura à tração na extremidade da fenda
δ_n^s	Deslocamento de início de amaciamento de tensões em tração
$\delta_{P\text{máx}}$	Deslocamento de carga máxima

δ_s	Deslocamento atual em corte na extremidade da fenda
δ_s^0	Deslocamento correspondente ao início de propagação da fenda em corte
δ_s^f	Deslocamento de rotura ao corte na extremidade da fenda.
δ_s^s	Deslocamento de início de amaciamento de tensões ao corte.
ε	Deformação
ε_n e ε_s	Deformação normal e de corte
θ_0	Rotação relativa dos substratos na extremidade da fenda
θ_p	Rotação relativa dos substratos na linha de carga
σ	Tensão normal
σ_y	Tensão normal segundo a espessura
τ, τ_{xy}	Tensão de corte
$\tau_{méd}$	Tensão de corte média
Δ	Evolução dos desvios percentuais
α	Ângulo de <i>scarf</i>
δ_m^0	Deslocamento em modo misto correspondente ao início de propagação da fenda
ν	Coefficiente de Poisson
γ^f	Deformação de rotura ao corte
ε_f	Deformação de rotura à tração

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES (ADAPTADO DE DA SILVA ET AL. [3])	6
FIGURA 2 – COMPONENTES DE UMA JUNTA ADESIVA (ADAPTADO DE DA SILVA ET AL. [3])	6
FIGURA 3 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE UM ADESIVO ESTRUTURAL (LOCTITE [8])	8
FIGURA 4 - MODOS DE CARREGAMENTO (ADAPTADO DE ADHESIVETOOLKIT [9])	9
FIGURA 5 - MODOS DE ROTURA (ADAPTADO DE DA SILVA ET AL. [3])	10
FIGURA 6 - JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO E SUA AVALIAÇÃO (ADAPTADO DE PETRIE [10])	13
FIGURA 7 - JUNTAS DE CHANFRO E SUA AVALIAÇÃO (ADAPTADO DE PETRIE [10]).....	14
FIGURA 8 – COBRE-JUNTAS E SUA AVALIAÇÃO (ADAPTADO DE PETRIE [10]).....	15
FIGURA 9 - SOLUÇÕES PARA AUMENTO DA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO (ADAPTADO DE KOHEN [12]).....	15
FIGURA 10 - SOLUÇÕES PARA AUMENTO DA RESISTÊNCIA À CLIVAGEM (ADAPTADO DE KOHEN [12]) ...	16
FIGURA 11 - JUNTAS CILÍNDRICAS SEM CHANFRO (A) E COM CHANFRO (B) (ADAPTADO DE PETRIE [10])	16
FIGURA 12 - JUNTAS CILÍNDRICAS EM BARRAS (A) E EM TUBOS (B) (ADAPTADO DE PETRIE [10]).....	17
FIGURA 13 - JUNTAS EM T E SUA RESISTÊNCIA A ESFORÇOS (ADAPTADO DE [11]).....	17
FIGURA 14 - JUNTAS EM CANTO E SUA RESISTÊNCIA A ESFORÇOS (ADAPTADO DE DA SILVA [11]).....	18
FIGURA 15 – CARREGAMENTO EM MODO I (ADAPTADO DE CAMPILHO [14]).....	19
FIGURA 16 - ENSAIO DCB (ADAPTADO DE CHAVES [15]).....	19
FIGURA 17 - ENSAIO TDCB (ADAPTADO DE CHAVES [15]).....	20
FIGURA 18 - CARREGAMENTO EM MODO II (ADAPTADO DE CAMPILHO [14]).....	21
FIGURA 19 - ENSAIO ENF (ADAPTADO DE CAMPILHO [20])	22
FIGURA 20 - CARREGAMENTO EM MODO (I+II) (ADAPTADO DE CAMPILHO [14])	23
FIGURA 21 - ENSAIOS DE SOLICITAÇÃO COMBINADA (CHAVES ET AL. [31])	24
FIGURA 22 – REPRESENTAÇÃO DA ABORDAGEM LOCAL (ADAPTADO DE DA SILVA AND CAMPILHO [59])	28
FIGURA 23 – REPRESENTAÇÃO DA ABORDAGEM CONTÍNUA (ADAPTADO DE DA SILVA AND CAMPILHO [59]).....	28
FIGURA 24 - LEI TRIANGULAR OU EXPONENCIAL E TRAPEZOIDAL (ADAPTADO DE DA SILVA AND CAMPILHO	

[59]).....	30
FIGURA 25 - LEI DE MODO MISTO E MODO PURO (ADAPTADO DE DA SILVA AND CAMPILHO [59])	30
FIGURA 26 - LEI TRAPEZOIDAL (ADAPTADO DE DA SILVA AND CAMPILHO [59])	31
FIGURA 27 - PROVETE ENF DEFORMADO DURANTE A PROPAGAÇÃO, COM CONDIÇÕES DE FRONTEIRA E CARGA DEFINIDAS (DE MOURA ET AL. [70])	33
FIGURA 28 - COMPARAÇÃO DAS CURVAS P - δ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS DE UM PROVETE TESTADO (CAMPILHO [14])	34
FIGURA 29 - VALORES MÉDIOS DE CORTE PARA UMA LEI DE DANO COESIVO PELO MÉTODO INVERSO, EM CINCO PROVETES (CAMPILHO [14])	35
FIGURA 30 - EXTRAPOLAÇÃO LINEAR DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS EM SOLICITAÇÃO DE MODO MISTO (LEE ET AL. [71])	36
FIGURA 31 - ERRO DEFINIDO POR KM , PELA COMPARAÇÃO DE DADOS DE ELEMENTOS FINITOS E EXPERIMENTAIS (LEE ET AL. [71])	36
FIGURA 32 - CURVAS P - δ DOS ENSAIOS SLB EM SOLICITAÇÃO COMBINADA: ESPESSURA DO SUBSTRATO DE 1,28 MM (A) E 1,48 MM (B) (LEE ET AL. [71])	37
FIGURA 33 - PROVETE DCB SOB CARGA, COM DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ANÁLISE [72]	38
FIGURA 34 – LEIS COESIVAS REPRESENTATIVAS À TRAÇÃO PARA O ADESIVO FRÁGIL (AV138) E DÚCTIL (2015 E 7752) [78].....	39
FIGURA 35 - PROVETE ENF SOB CARGA, COM DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ANÁLISE [81].....	39
FIGURA 36 – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO (σ - E) DO ALUMÍNIO AW6082-T651 [83]	43
FIGURA 37 - CURVAS Σ - E DE PROVETES MACIÇOS DE ARALDITE® AV138 [84].....	44
FIGURA 38 - CURVAS Σ - E DE PROVETES MACIÇOS DE ARALDITE® 2015 [85]	45
FIGURA 39 – CURVAS Σ - E DE PROVETES MACIÇOS DE SIKAFORCE® 7752 [87]	46
FIGURA 40 – ESQUEMA DO ENSAIO DCB [88]	47
FIGURA 41 – ESQUEMA DO ENSAIO ENF [89]	47
FIGURA 42 - PROVETE SCARF OU DE CHANFRO INTERIOR	48
FIGURA 43 - DISCO DE CORTE [88]	49
FIGURA 44 – GRANALHADORA CIDBLAST RT6S [88]	49
FIGURA 45 - SUBSTRATOS APÓS O PROCESSO PASSIVO QUÍMICO [88]	50
FIGURA 46 - ESQUEMA DE APLICAÇÃO DOS ESPAÇADORES [88].....	50
FIGURA 47 - LÂMINA UTILIZADA NO ESPAÇADOR FRONTAL [88]	51
FIGURA 48 - APLICAÇÃO DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [88]	51

FIGURA 49 - PESAGEM E MISTURA DOS COMPONENTES DOS ADESIVOS [72]	52
FIGURA 50 - IMOBILIZAÇÃO DOS PROVETES DCB [88]	53
FIGURA 51 - IMOBILIZAÇÃO DOS PROVETES ENF [89].....	53
FIGURA 52 - MÁQUINA FRESADORA DE EIXO VERTICAL [1].....	54
FIGURA 53 - MAQUINAGEM DOS SUBSTRATOS DE ALUMÍNIO [1].....	54
FIGURA 54 - IMOBILIZAÇÃO DE UM DOS PROVETES SCARF [1].....	55
FIGURA 55 - IMOBILIZAÇÃO DOS PROVETES FABRICADOS [1]	55
FIGURA 56 - MÁQUINA FURADORA [1]	56
FIGURA 57 - MÁQUINA DE ENSAIOS MECÂNICOS [91]	57
FIGURA 58 - CONFIGURAÇÃO DA MÁQUINA PARA ENSAIO DCB [88].....	57
FIGURA 59 - CONFIGURAÇÃO DA MÁQUINA PARA ENSAIO ENF [89]	58
FIGURA 60 - CURVAS $P-\Delta$ DOS ENSAIOS DCB COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 [88]	60
FIGURA 61 - CURVAS $P-\Delta$ DOS ENSAIOS DCB COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 [88].....	60
FIGURA 62 - CURVAS $P-\Delta$ DOS ENSAIOS DCB COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [72].....	61
FIGURA 63 - MODOS DE ROTURA DOS ENSAIOS DCB COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 [88]	62
FIGURA 64 - MODOS DE ROTURA DOS ENSAIOS DCB COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 [88].....	62
FIGURA 65 - MODOS DE ROTURA DOS ENSAIOS DCB COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [72]	62
FIGURA 66 – EXEMPLO DE CURVA EXPERIMENTAL $G_I-\Delta_N$ OBTIDA A PARTIR DE UM ENSAIO DCB COM ARALDITE® AV138 [88].....	63
FIGURA 67 - EXEMPLO DE CURVA EXPERIMENTAL $G_I-\Delta_N$ OBTIDA A PARTIR DE UM ENSAIO DCB COM ARALDITE® 2015 [88]	64
FIGURA 68 - EXEMPLO DE CURVA EXPERIMENTAL $G_I-\Delta_N$ OBTIDA A PARTIR DE UM ENSAIO DCB COM SIKAFORCE® 7752 [72]	66
FIGURA 69 – EXEMPLO DE LEI COESIVA À TRAÇÃO OBTIDA A PARTIR DE UM ENSAIO DCB COM ARALDITE® AV138 E APROXIMAÇÕES TRIANGULAR E TRAPEZOIDAL [88]	67
FIGURA 70 - EXEMPLO DE LEI COESIVA À TRAÇÃO OBTIDA A PARTIR DE UM ENSAIO DCB COM ARALDITE® 2015 E APROXIMAÇÕES TRIANGULAR E TRAPEZOIDAL [88].....	68
FIGURA 71 - EXEMPLO DE LEI COESIVA À TRAÇÃO OBTIDA A PARTIR DE UM ENSAIO DCB COM SIKAFORCE® 7752 E APROXIMAÇÕES TRIANGULAR, TRAPEZOIDAL E EXPONENCIAL [72]	68
FIGURA 72 - CURVAS $P-\Delta$ DOS ENSAIOS ENF COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 [89].....	69
FIGURA 73 - CURVAS $P-\Delta$ DOS ENSAIOS ENF COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 [89]	70

FIGURA 74 - CURVAS $P-\Delta$ DOS ENSAIOS ENF COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [89]	71
FIGURA 75 - EXEMPLO DE CURVA EXPERIMENTAL $G_{II}-\Delta_5$ OBTIDA PARA UM ENSAIO ENF COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 [89].....	72
FIGURA 76 - EXEMPLO DE CURVA EXPERIMENTAL $G_{II}-\Delta_5$ OBTIDA PARA UM ENSAIO ENF COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 [89]	73
FIGURA 77 - EXEMPLO DE CURVA EXPERIMENTAL $G_{II}-\Delta_5$ OBTIDA PARA UM ENSAIO ENF COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [89]	74
FIGURA 78 - EXEMPLO DE LEI COESIVA AO CORTE OBTIDA A PARTIR DE UM ENSAIO ENF COM ARALDITE® AV138 E APROXIMAÇÕES TRIANGULAR, TRAPEZOIDAL E EXPONENCIAL [89]	76
FIGURA 79 - EXEMPLO DE LEI COESIVA AO CORTE OBTIDA A PARTIR DE UM ENSAIO ENF COM ARALDITE® 2015 E APROXIMAÇÕES TRIANGULAR, TRAPEZOIDAL E EXPONENCIAL [89]	77
FIGURA 80 - EXEMPLO DE LEI COESIVA AO CORTE OBTIDA A PARTIR DE UM ENSAIO ENF COM SIKAFORCE® 7752 E APROXIMAÇÕES TRIANGULAR, TRAPEZOIDAL E EXPONENCIAL [89]	77
FIGURA 81 - CURVAS $P-\delta$ PARA AS JUNTAS COM A DE 10° E ADESIVO ARALDITE® AV138 [1]	78
FIGURA 82 - CURVAS $P-\delta$ PARA AS JUNTAS COM A DE 45° E ADESIVO ARALDITE® AV138 [1]	79
FIGURA 83 - CURVAS $P-\delta$ PARA AS JUNTAS COM A DE 10° E ADESIVO ARALDITE® 2015 [1]	79
FIGURA 84 - CURVAS $P-\delta$ PARA AS JUNTAS COM A DE 45° E ADESIVO ARALDITE® 2015 [1]	80
FIGURA 85 - CURVAS $P-\delta$ PARA AS JUNTAS COM A DE 10° E ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [1].....	81
FIGURA 86 - CURVAS $P-\delta$ PARA AS JUNTAS COM A DE 45° E ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [1].....	81
FIGURA 87 – ROTURAS COESIVAS OBTIDAS NOS PROVETES SCARF COM A DE 3° [1].....	82
FIGURA 88 - ROTURAS COESIVAS OBTIDAS NOS PROVETES SCARF COM A DE 10° [1]	82
FIGURA 89 - ROTURAS COESIVAS OBTIDAS NOS PROVETES SCARF COM A DE 15° [1]	82
FIGURA 90 - ROTURAS COESIVAS OBTIDAS NOS PROVETES SCARF COM A DE 20° [1]	83
FIGURA 91 - ROTURAS COESIVAS OBTIDAS NOS PROVETES SCARF COM A DE 30° [1]	83
FIGURA 92 - ROTURAS COESIVAS OBTIDAS NOS PROVETES SCARF COM A DE 45° [1]	83
FIGURA 93 – EVOLUÇÃO DA FORÇA MÁXIMA EM FUNÇÃO DE A PARA AS JUNTAS COM ADESIVO ARALDITE® AV138 [1].....	84
FIGURA 94 - EVOLUÇÃO DA FORÇA MÁXIMA EM FUNÇÃO DE A PARA AS JUNTAS COM ADESIVO ARALDITE® 2015 [1].....	84
FIGURA 95 - EVOLUÇÃO DA FORÇA MÁXIMA EM FUNÇÃO DE A PARA AS JUNTAS COM ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [1]	85
FIGURA 96 - JUNTA A 45°	86

FIGURA 97 - JUNTA A 30°	86
FIGURA 98 - JUNTA A 20°	86
FIGURA 99 - JUNTA A 15°	87
FIGURA 100 - JUNTA A 10°	87
FIGURA 101 - JUNTA A 3,43°	87
FIGURA 102 - PROPRIEDADES PARA ARALDITE® AV138.....	87
FIGURA 103 - PROPRIEDADES PARA ARALDITE® 2015	88
FIGURA 104 - PROPRIEDADES PARA SIKAFORCE® 7752	88
FIGURA 105 - ATRIBUIÇÃO DE ELEMENTOS DE CAMADA AOS CONSTITUINTES DA JUNTA.....	89
FIGURA 106 - EVOLUÇÃO DOS ELEMENTOS COESIVOS AO LONGO DO COMPRIMENTO	89
FIGURA 107 – DEFINIÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO EM TRAÇÃO, D_N , NO ABAQUS® (QUE PODE SER EXTRAPOLADA PARA D_5).....	91
FIGURA 108 – EXEMPLOS DE LEIS EXPERIMENTAIS $G_I-\Delta_N$ PARA OS ADESIVOS TESTADOS, E RESPECTIVAS CURVAS POLINOMIAIS AJUSTADAS [91]	93
FIGURA 109 – EXEMPLOS DE LEIS EXPERIMENTAIS $G_{II}-\Delta_5$ PARA OS ADESIVOS TESTADOS, E RESPECTIVAS CURVAS POLINOMIAIS AJUSTADAS [91]	94
FIGURA 110 – LEIS COESIVAS EXPERIMENTAIS $T_N-\Delta_N$ PARA OS DIVERSOS ADESIVOS, E APROXIMAÇÕES TRIANGULAR PARA O ARALDITE® AV138 E TRAPEZOIDAIS PARA OS RESTANTES [91].....	95
FIGURA 111 – LEIS COESIVAS EXPERIMENTAIS $T_5-\Delta_5$ PARA OS DIVERSOS ADESIVOS, E APROXIMAÇÕES TRIANGULAR PARA O ARALDITE® AV138 E TRAPEZOIDAIS PARA OS RESTANTES [91]	95
FIGURA 112 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO NORMALIZADA DE ARRANCAMENTO ENTRE ADESIVOS PARA 3,43°.....	97
FIGURA 113 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO NORMALIZADA DE ARRANCAMENTO ENTRE ADESIVOS PARA 45°	97
FIGURA 114 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE ARRANCAMENTO NORMALIZADA ENTRE ÂNGULOS PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138.....	98
FIGURA 115 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE ARRANCAMENTO NORMALIZADA ENTRE ÂNGULOS PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015	98
FIGURA 116 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE ARRANCAMENTO NORMALIZADA ENTRE ÂNGULOS PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752	99
FIGURA 117 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO NORMALIZADA DE CORTE ENTRE ADESIVOS PARA 3,43°	100
FIGURA 118 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO NORMALIZADA DE CORTE ENTRE ADESIVOS PARA 45°	100
FIGURA 119 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE CORTE NORMALIZADA ENTRE ÂNGULOS PARA O ADESIVO	

ARALDITE® AV138	101
FIGURA 120 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE CORTE NORMALIZADA ENTRE ÂNGULOS PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015.....	101
FIGURA 121 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE CORTE NORMALIZADA ENTRE ÂNGULOS PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752	102
FIGURA 122 - EXTENSÃO DO DANO (SDEG) À CARGA MÁXIMA COM O COMPRIMENTO NORMALIZADO DA CAMADA DE ADESIVO (X/L) PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 EM JUNTAS COM DIFERENTES α	103
FIGURA 123 - EXTENSÃO DO DANO (SDEG) À CARGA MÁXIMA COM O COMPRIMENTO NORMALIZADO DA CAMADA DE ADESIVO (X/L) PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015 EM JUNTAS COM DIFERENTES α	103
FIGURA 124 - EXTENSÃO DO DANO (SDEG) À CARGA MÁXIMA COM O COMPRIMENTO NORMALIZADO DA CAMADA DE ADESIVO (X/L) PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 EM JUNTAS COM DIFERENTES α	104
FIGURA 125 - EVOLUÇÃO DO DANO (SDEG) COM O COMPRIMENTO NORMALIZADO DA CAMADA DE ADESIVO (X/L) PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 COM α DE 3,43°	105
FIGURA 126 - EVOLUÇÃO DO DANO (SDEG) PERCENTUAL COM O COMPRIMENTO NORMALIZADO DA CAMADA DE ADESIVO (X/L) PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 COM α DE 45°	105
FIGURA 127 - EVOLUÇÃO DO DANO (SDEG) PERCENTUAL COM O COMPRIMENTO NORMALIZADO DA CAMADA DE ADESIVO (X/L) PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 COM α DE 3,43°	106
FIGURA 128 - EVOLUÇÃO DO DANO (SDEG) PERCENTUAL COM O COMPRIMENTO NORMALIZADO DA CAMADA DE ADESIVO (X/L) PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 COM α DE 45°	106
FIGURA 129 – EVOLUÇÃO DA FORÇA MÁXIMA EM FUNÇÃO DE A PARA AS JUNTAS COM ADESIVO ARALDITE® AV138 NOS VÁRIOS ENSAIOS	107
FIGURA 130 - EVOLUÇÃO DA FORÇA MÁXIMA EM FUNÇÃO DE A PARA AS JUNTAS COM ADESIVO ARALDITE® 2015 NOS VÁRIOS ENSAIOS.....	108
FIGURA 131 - EVOLUÇÃO DA FORÇA MÁXIMA EM FUNÇÃO DE A PARA AS JUNTAS COM ADESIVO SIKAFORCE® 7752 NOS VÁRIOS ENSAIOS	108
FIGURA 132 - EVOLUÇÃO PERCENTUAL DO DESVIO DOS MODELOS DE DANO INDEPENDENTE EM RELAÇÃO AO MODO MISTO PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138	109
FIGURA 133 - EVOLUÇÃO PERCENTUAL DO DESVIO DOS MODELOS DE DANO INDEPENDENTE EM RELAÇÃO AO MODO MISTO PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015.....	109
FIGURA 134 - EVOLUÇÃO PERCENTUAL DO DESVIO DOS MODELOS DE DANO INDEPENDENTE EM RELAÇÃO AO MODO MISTO PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	110
FIGURA 135 - COMPARAÇÃO DAS LEIS TRAPEZOIDAL E EXPONENCIAL EM RELAÇÃO À TRIANGULAR PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138	111

FIGURA 136 - COMPARAÇÃO DAS LEIS TRAPEZOIDAL E EXPONENCIAL EM RELAÇÃO À TRIANGULAR PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015.....	111
FIGURA 137 - COMPARAÇÃO DAS LEIS TRAPEZOIDAL E EXPONENCIAL EM RELAÇÃO À TRIANGULAR PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	111

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FRATURA DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [84]	44
TABELA 2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FRATURA DO ARALDITE® 2015 [85, 86].....	45
TABELA 3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FRATURA DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [87]	46
TABELA 4 – INTEGRAL-J OBTIDO DE UM ENSAIO DCB COM ARALDITE® AV138 [88]	64
TABELA 5 - INTEGRAL-J OBTIDO DE UM ENSAIO DCB COM ARALDITE® 2015 [88]	65
TABELA 6 - INTEGRAL-J OBTIDO DE UM ENSAIO DCB COM SIKAFORCE® 7752 [72]	66
TABELA 7 - INTEGRAL-J OBTIDO PARA UM ENSAIO ENF COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 [89]	73
TABELA 8 - INTEGRAL-J OBTIDO PARA UM ENSAIO ENF COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 [89].....	74
TABELA 9 - INTEGRAL-J OBTIDO PARA UM ENSAIO ENF COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [89].....	75

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Organização da dissertação	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Ligações adesivas	5
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	6
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	7
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	8
2.1.4	Adesivos estruturais	10
2.1.5	Configurações possíveis de junta	13
2.1.5.1	Juntas de sobreposição	13
2.1.5.2	Juntas com chanfro	14
2.1.5.3	Outros tipos de juntas	14
2.2	Ensaaios para determinação da tenacidade à fratura	18
2.2.1	Ensaaios em tração (modo I)	19
2.2.2	Ensaaios em corte (modo II).....	21
2.2.3	Ensaaios em sollicitação combinada (modos I + II)	22
2.3	Previsão de resistência de juntas adesivas	24
2.3.1	Modelos analíticos	25
2.3.2	Métodos numéricos	25
2.3.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	25
2.3.2.2	Mecânica da fratura.....	25
2.3.2.3	Modelos de dano coesivo	26

2.3.2.4	Mecânica do dano.....	26
2.3.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido.....	27
2.4	Modelos de dano coesivo	27
2.4.1	Fundamentos do método.....	28
2.4.2	Tipos de leis coesivas.....	29
2.4.3	Métodos de estimação das leis coesivas.....	31
2.4.3.1	Método de identificação individual das propriedades coesivas	31
2.4.3.2	Método inverso.....	32
2.4.3.3	Método direto.....	37
3	DESENVOLVIMENTO	43
3.1	Trabalho experimental	43
3.1.1	Materiais utilizados	43
3.1.1.1	Substratos	43
3.1.1.2	Adesivos.....	44
3.1.1.2.1	Araldite® AV138	44
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	45
3.1.1.2.3	SikaForce® 7752	46
3.1.2	Geometria das juntas	47
3.1.3	Processo de fabrico	48
3.1.3.1	Provetes DCB e ENF	48
3.1.3.2	Provetes scarf	53
3.1.4	Ensaio das juntas	56
3.1.4.1	Provetes DCB	57
3.1.4.2	Provetes ENF.....	58
3.1.4.3	Juntas scarf	59
3.1.5	Resultados obtidos	59
3.1.5.1	Provetes DCB	59
3.1.5.1.1	Curvas $P-\delta$	59
3.1.5.1.2	Modos de rotura	61

3.1.5.1.3	Determinação de G_{IC} pelo método direto	63
3.1.5.1.4	Determinação da lei coesiva em tração	67
3.1.5.2	Provetes ENF	69
3.1.5.2.1	Curvas $P-\delta$	69
3.1.5.2.2	Modos de rotura	71
3.1.5.2.3	Determinação de G_{IIC} pelo método direto	71
3.1.5.2.4	Determinação da lei coesiva em corte	76
3.1.5.3	Juntas scarf	78
3.1.5.3.1	Curvas $P-\delta$	78
3.1.5.3.2	Modos de rotura	81
3.1.5.3.3	Resistência das juntas	84
3.2	Trabalho numérico	85
3.2.1	Condições da análise numérica	86
3.2.2	Modelo de dano coesivo	89
3.2.2.1	Modelo de dano triangular em modo misto	90
3.2.2.2	Modelos de dano triangular, trapezoidal e linear-exponencial em modos de dano independentes	90
3.2.3	Leis coesivas para simulação do adesivo	92
3.2.4	Análise de tensões na junta	96
3.2.4.1	Tensões de arrancamento	96
3.2.4.2	Tensões de corte	99
3.2.5	Estudo da variável de dano	102
3.2.5.1	Extensão do dano no instante à carga máxima	103
3.2.5.2	Evolução do dano em função do deslocamento aplicado	104
3.2.6	Previsão da resistência pelo método direto	107
3.2.6.1	Comparação de valores de $P_{m\acute{a}x}$	107
3.2.6.2	Comparação entre o modelo de modo misto e os modelos independentes	109
3.2.6.3	Comparação entre os diversos tipos de leis coesivas em modos independentes	110
3.2.7	Análise dos resultados obtidos	112

4	CONCLUSÕES.....	115
	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	119

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

1.2 Objetivos

1.3 Organização da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Atualmente, a utilização de ligações adesivas, sobretudo na indústria, tem vindo a assumir elevada preponderância em detrimento dos métodos de ligações convencionais como a soldadura, ligação por rebites, ligações aparafusadas e brasagem. De facto, as ligações adesivas oferecem diversas vantagens como a eliminação de concentração de tensões, boa resposta a solicitações de fadiga, capacidade de ligar materiais de diferente natureza e podem proporcionar maior leveza nas estruturas. No entanto, também apresentam algumas limitações, nomeadamente impossibilidade de desmontagem, tempos de cura por vezes elevados e condições de utilização de temperatura e humidade limitadas. A resistência e comportamento de ligações adesivas dependem de diversos fatores, nomeadamente do tipo de adesivo utilizado, do material dos substratos e do estado da sua superfície, da configuração de junta e de fatores dimensionais.

Com o aumento do uso de estruturas com ligações adesivas ao nível industrial, diversos autores nas últimas décadas têm vindo a realizar estudos, de modo a suprir as necessidades desse setor ao nível de métodos de previsão do comportamento e rotura de juntas adesivas com maior fiabilidade. Nesse âmbito, foram desenvolvidos métodos analíticos e numéricos, onde os numéricos têm vindo a substituir os analíticos na medida em que superaram algumas limitações. Entre os métodos numéricos destacam-se os Modelos de Dano Coesivo, uma técnica da mecânica do dano, utilizada como suplemento na análise por Elementos Finitos, e que tem revelado bons resultados nas previsões efetuadas. Uma das fases mais importantes neste método de previsão é a estimativa das leis coesivas em tração e corte, pelo que se torna de grande relevância a existência e validação de métodos precisos para a obtenção destas leis.

1.2 Objetivos

Os objetivos propostos no âmbito da obtenção de leis coesivas pelo método direto para a previsão de resistência de juntas adesivas são:

- Análise dos dados experimentais das juntas *scarf* com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, cujos dados foram obtidos de trabalhos anteriores [1, 2];
- Obter as leis coesivas em tração e corte pela aplicação do método direto aos dados experimentais de ensaios DCB e ENF, respetivamente;
- Construir leis coesivas aproximadas triangulares, trapezoidais e lineares-exponenciais para reproduzir o comportamento de cada adesivo;
- Executar uma análise numérica por elementos finitos das juntas *scarf*, de modo a

analisar as tensões de arrancamento e de corte instaladas nas camadas dos adesivos, para avaliar e compreender a influência das tensões no processo de rotura das juntas;

– Estudar a evolução e extensão do dano nos elementos coesivos da camada de adesivo na junta;

– Validar as leis coesivas, pela comparação direta dos resultados numéricos com os resultados experimentais;

– Estabelecer quais as leis coesivas mais ajustadas a cada conjunto adesivo/geometria em questão, e avaliar a influência do ângulo das juntas *scarf*, assim como das diferentes propriedades do adesivo.

1.3 Organização da dissertação

A organização deste trabalho consiste em quatro capítulos distintos, que são os seguintes:

No **Capítulo 1** é feita a contextualização do trabalho, definição de objetivos e descrita a organização da dissertação.

No **Capítulo 2**, encontra-se a revisão bibliográfica, onde se abordam diversos aspetos relacionados com adesivos e juntas adesivas. Descreve-se a evolução dos adesivos ao longo do tempo, caracterizam-se as juntas adesivas, enumerando vantagens e limitações, descrevem-se os tipos de esforços a que as juntas são sujeitas, modos de rotura, e configurações mais comuns de juntas adesivas. Referem-se ainda os diversos ensaios e respetivos métodos de determinação da tenacidade à fratura para os diferentes modos de solitação, bem como as técnicas de previsão de resistência de juntas, com destaque para os modelos de dano coesivo.

No **Capítulo 3** apresentam-se todos os aspetos relacionados com a componente experimental deste trabalho e componente numérica. No trabalho experimental destaca-se a descrição dos materiais envolvidos, etapas dos processos de fabrico dos provetes e respetivos ensaios, terminando com a análise detalhada dos resultados experimentais. Na parte numérica, descrevem-se as condições de análise numérica, o método utilizado na previsão de resistência de juntas, e as leis coesivas em corte e tração estimadas para cada um dos adesivos. Apresenta-se ainda a análise de tensões efetuada a cada uma das geometrias de juntas, uma explicação da resistência de juntas com base na análise de tensões, faz-se a comparação entre as previsões numéricas obtidas com as leis coesivas simplificadas e os resultados experimentais, para efeitos de validação e, por último, analisa-se de forma crítica e sumária alguns resultados obtidos.

No **Capítulo 4** enumeram-se as principais conclusões sobre este trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

2.2 Ensaios para determinação da tenacidade à fratura

2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

2.4 Modelos de dano coesivo

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os adesivos têm sido usados desde há centenas de anos e, até cerca de 100 anos atrás, a vasta maioria era de origem natural, provenientes de materiais tal como ossos, peles, peixe, leite e plantas. Por volta do ano de 1900, os adesivos baseados em polímeros sintéticos são introduzidos, e nos dias de hoje existem muitas aplicações industriais deste tipo de adesivos [3].

2.1 Ligações adesivas

As ligações adesivas são constituídas pelo adesivo e pelo material que se pretende ligar, o qual se denomina de substrato. É possível distinguir três fases na formação de uma ligação adesiva. Em primeiro lugar o adesivo tem de estar no estado viscoso, de forma a facilitar o seu espalhamento e molhagem sobre a superfície do substrato, para aumentar o contacto molecular entre estes. Em segundo lugar, para o adesivo suportar as cargas que encontrará em serviço, este terá de endurecer através de um processo de polimerização que é a cura. Existe uma exceção que é o adesivo sensível à pressão, já que este não endurece, mas permanece sempre viscoso. Em terceiro lugar é necessário ter em conta que as juntas estão afetadas por vários fatores, tais como a geometria da junta, forma de aplicação de cargas e o meio ambiente onde está inserida [3]. As ligações adesivas são uma tecnologia que envolve várias áreas da ciência, tais como química, física, engenharia de materiais e engenharia mecânica.

Em relação a outros métodos de ligação que se conhece, tais como ligações rebitadas, aparafusadas ou soldadas, as ligações adesivas apresentam diversas vantagens e desvantagens. Como vantagens, este tipo de ligação oferece uma distribuição mais uniforme de carga ao longo da junta, o que permite uma maior resistência mecânica, tem capacidade de amortecimento de vibrações, melhorando assim a resistência à fadiga dos próprios componentes ligados, pode ligar materiais de natureza diferente, permite uma eficiente ligação de chapas, principalmente de baixa espessura, é um método que pode ser automatizado e permite uma maior flexibilidade na conceção de um projeto, principalmente na ligação de materiais compósitos [3-5].

As desvantagens inerentes à ligação com adesivos passam por evitar em projeto a aplicação de forças de arrancamento, clivagem e impacto, dado que esta ligação é mais resistente quando solicitada ao corte, bem como usar geometrias que evitem as tensões localizadas, para não prejudicar a uniformidade de distribuição de carga (Figura 1). Apresentam limitada resistência em condições extremas, tais como calor e humidade, devido à natureza polimérica do adesivo. É necessária uma preparação da superfície do substrato antes da colocação do adesivo, assim como poderão ser necessárias ferramentas de fixação da junta para obter bons resultados. Os adesivos requerem uma cura frequentemente a alta temperatura, o que implica equipamento de custo elevado. O controlo de qualidade das juntas é difícil de realizar, e ainda não existe um critério de

dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura [4].

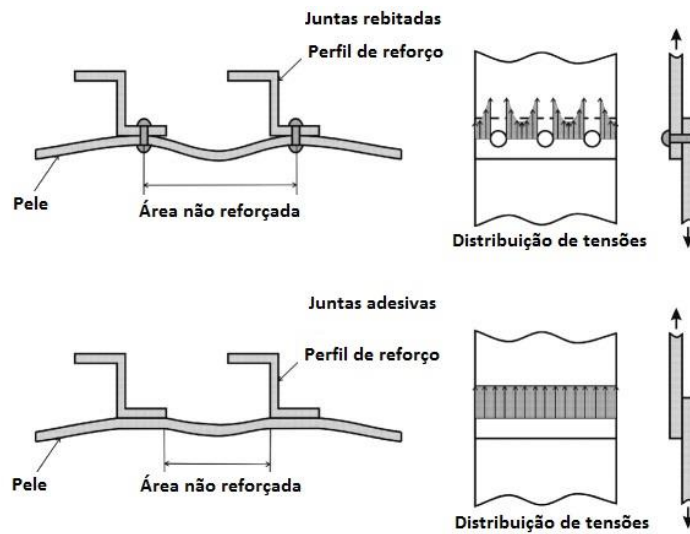


Figura 1 - Concentração de tensões (adaptado de da Silva et al. [3])

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Uma junta adesiva pode ser caracterizada por um adesivo que liga dois componentes, que são designados por substratos ou aderentes. A designação de aderente é frequentemente utilizada após a ligação, mas estes dois termos podem ser usados sem distinção. Um adesivo pode ser definido como um material polimérico que, quando aplicado em superfícies, pode ligá-las e resistir à sua separação. O adesivo também pode ser um vedante, dado que é uma substância capaz de ligar duas superfícies, preenchendo o espaço entre elas, formando uma barreira ou camada protetora. Adesivos e vedantes funcionam pela propriedade de adesão. A adesão é a atração entre duas substâncias, resultante das forças intermoleculares que se estabelecem entre elas. A coesão é o envolvimento das forças intermoleculares dentro de uma substância.

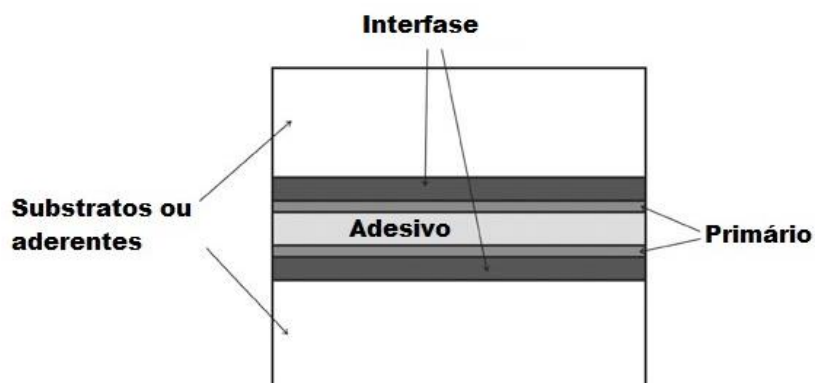


Figura 2 – Componentes de uma junta adesiva (adaptado de da Silva et al. [3])

Na Figura 2 pode-se observar os vários componentes de uma junta adesiva. A interfase é a região entre o adesivo e o substrato, e tem características químicas e físicas diferentes do adesivo, bem como do substrato. A natureza da interfase é um fator crítico na correta determinação das propriedades da ligação. A interface é o plano de contacto entre dois materiais e está contida na interfase. Numa interfase podem existir várias interfaces, dado que podem estar localizados diferentes materiais entre o adesivo e o substrato. A interface também pode ser designada por camada limite. O primário é um material que pode ser colocado entre o adesivo e o substrato. É uma substância que, por aplicação direta na superfície dos substratos, tem como objetivo melhorar a adesão ou proteger estas superfícies até à aplicação do adesivo [3, 4].

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

As aplicações onde se pode encontrar estas ligações hoje em dia são muito diversas, já que estas existem praticamente em todos os tipos de indústria. Sem o uso de adesivos, seria impossível fabricar materiais ou produtos que usamos na nossa vida quotidiana, como por exemplo painéis com forma em ninho de abelha, usados em múltiplos setores da indústria, que proporcionam uma força extraordinária com peso reduzido, compósitos para equipamentos médicos, como por exemplo, na reconstrução de dentes e outras aplicações, tais como material de escritório, por exemplo o *post-it* (ver Figura 3). A indústria aeronáutica é um dos percussores desta tecnologia, e com o aumento do uso de compósitos em aeronaves, também o uso de ligações adesivas cresce. Esta área foi a primeira que promoveu o uso de adesivos no processo de fabrico de aeronaves, devido às suas vantagens em relação aos métodos tradicionais, como a soldadura ou a ligação por parafusos ou rebites [3, 4].

A indústria automóvel está a utilizar cada vez mais esta tecnologia para a produção de veículos com peso reduzido. O uso de adesivos tem sido fortemente incrementado nos últimos anos neste tipo de indústria, já que os adesivos são aplicados durante o processo de fabrico, eliminando algumas das soldas e rebites, ficando carros mais leves e mais seguros em testes de colisão. Adesivos de poliuretano ajudam os fabricantes a ligar uma gama de materiais vasta como o aço, alumínio, fibra de carbono e outros compósitos. Os adesivos de policloropreno são ideais para aplicações como a colagem de espuma [6]. A construção civil está a implementar ligações adesivas na construção de pontes, postes, painéis e caixilharia. Nesta área, os adesivos e vedantes utilizados devem ser duráveis, estáveis e resistentes ao calor, clima, produtos químicos e humidade. Selantes e adesivos à base de poliuretano são idealmente adequados para a produção de produtos de madeira laminada, aplicação de pavimentos, vedação de juntas e projetos de atenuação de terremotos [6]. As indústrias do calçado e de componentes de eletrónica também começam a implementar esta tecnologia nos seus produtos. Os adesivos para a indústria de calçado, devem ter alta resistência ao impacto e boa maleabilidade. Os adesivos de poliuretano e policloropreno são frequentemente

preferidos, porque proporcionam ligações flexíveis, mas fortes e duráveis [6]. Os adesivos utilizados para o fabrico de móveis de madeira, devem fornecer ligações fortes e duradouras, que resistam a altas cargas. Mas estes adesivos também são económicos e proporcionam a estética desejada [6]. A enorme adaptabilidade dos polímeros de poliuretano permite que os fabricantes de adesivos forneçam polímeros adesivos personalizados, para aplicações em embalagens flexíveis. Estas vão desde embalagens de uso geral para alimentos secos, até às de alto desempenho para processos de esterilização a vapor a temperaturas de até 134 °C [6]. Para atender às rigorosas necessidades da indústria eletrónica, são usados adesivos epóxicos, para o fabrico de revestimentos, enchimentos e ligação de placas de circuitos impressos e semicondutores [7]. As áreas da biologia e da medicina são áreas onde a utilização destas ligações é emergente para o fabrico de próteses, órgãos artificiais e material cirúrgico.



Figura 3 - Exemplo de aplicação de um adesivo estrutural (Loctite [8])

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

As juntas adesivas são o conjunto formado pelos substratos, adesivo e interfase. Além destes elementos, quando existe necessidade, é aplicado um primário. Estas juntas estão sujeitas a vários modos de carregamento e podem romper por adesão, coesão ou uma combinação das duas. Essencialmente, existem quatro modos fundamentais de carregamento que são, o corte, a tração ou compressão, o arrancamento e a clivagem (ver Figura 4). Na prática, o que se encontra é uma combinação destes modos, aplicada a uma junta adesiva.

As tensões de tração desenvolvem-se quando as forças atuando perpendicularmente ao plano da junta são distribuídas uniformemente ao longo da área colada. Deve-se projetar a junta de maneira a ter as superfícies dos substratos paralelas e as forças normais. Infelizmente, na prática, a espessura do adesivo é difícil de controlar e as forças raramente são puramente axiais, o que origina tensões indesejáveis de clivagem ou arrancamento. As juntas que forem carregadas à tração, devem ser projetadas com guias para garantir um carregamento axial contínuo. Os substratos também devem ser suficientemente rígidos para garantir que a tensão fique uniformemente distribuída. Tal

como as tensões de tração, as tensões de compressão devem manter-se alinhadas, de modo a que o adesivo permaneça em compressão pura. Uma junta em pura compressão quase não precisa de adesivo.

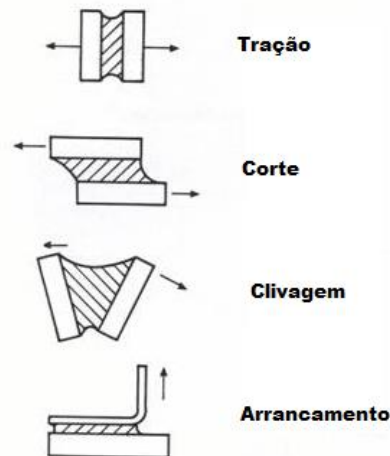


Figura 4 - Modos de carregamento (adaptado de Adhesivestoolkit [9])

As tensões de corte aparecem quando, forças atuando no plano do adesivo, tendem a separar os substratos. As juntas que dependem da resistência ao corte do adesivo são relativamente fáceis de fabricar, e são muito usadas na prática. As juntas são geralmente mais resistentes quando solicitadas ao corte, porque toda a área colada contribui, e é relativamente fácil manter os substratos alinhados.

A clivagem e o arrancamento são o principal inimigo das juntas adesivas. A clivagem é provocada por uma tensão que ocorre quando forças na extremidade de uma junta rígida atuam, de modo a separar os substratos na direção normal ao plano da junta. As tensões de arrancamento são semelhantes às que provocam clivagem, mas aplicam-se ao caso onde um ou ambos os substratos são flexíveis. Por conseguinte, o ângulo de separação pode ser muito maior para o arrancamento, do que para a clivagem. As juntas sob clivagem ou arrancamento são muito menos resistentes do que aquelas sujeitas a corte, porque a tensão está concentrada numa área muito pequena. Os adesivos frágeis são particularmente sensíveis às tensões de arrancamento. Por outro lado, os adesivos mais dúcteis e flexíveis, permitem uma distribuição de tensões menos concentrada e uma maior resistência. Os adesivos epóxicos rígidos têm uma resistência ao arrancamento da ordem de grandeza de apenas 0,35 N/mm, enquanto os adesivos mais tenazes podem chegar aos 4-8 N/mm.

A finalidade de uma ligação eficiente é a transmissão de carga entre dois componentes ligados, mantendo a sua integridade estrutural sob solicitações estáticas ou dinâmicas e condições ambientais adversas (humidade ou temperatura elevadas, por exemplo). Torna-se assim fundamental a correta avaliação da distribuição do perfil de tensões e, conseqüentemente, dos modos de rotura induzidos nas juntas coladas. De um modo

geral, podem-se distinguir três modos de rotura diferentes (Figura 5) em juntas coladas, que são a rotura coesiva, no adesivo ou no substrato, e rotura adesiva na interface.

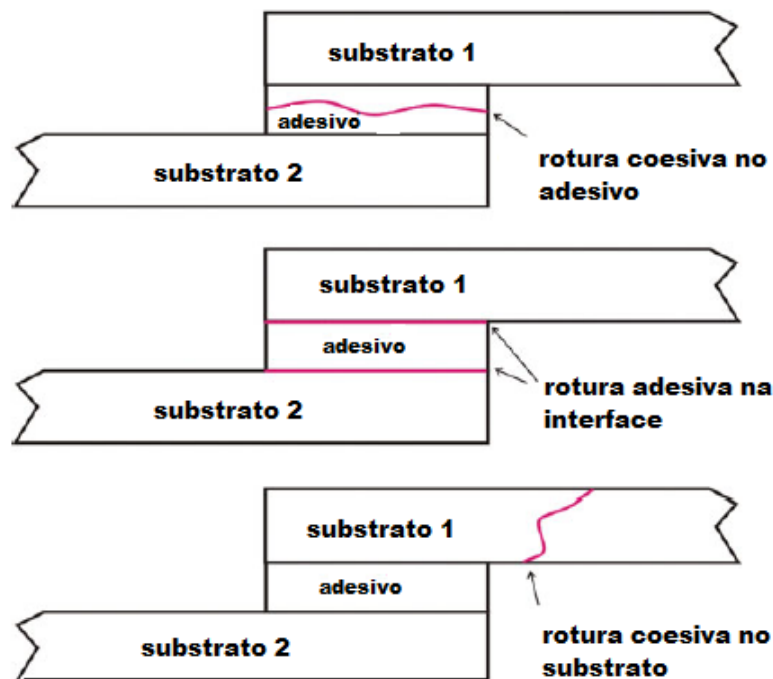


Figura 5 - Modos de rotura (adaptado de da Silva et al. [3])

A rotura coesiva ocorre quando, quer os substratos quer a ligação entre o adesivo e o substrato, são mais fortes do que a resistência interna do próprio adesivo. A rotura adesiva é aquela que ocorre apenas no adesivo, ou nas interfaces da ligação. Por vezes, a rotura ocorre por uma combinação dos referidos modos, designando-se nesse caso por rotura mista.

É geralmente aceite que a rotura adesiva se deve a má preparação das superfícies. Por outro lado, assume-se que uma junta deve ser projetada de modo a que a rotura nunca ocorra pelo adesivo, pelo que se depreende que uma junta corretamente projetada e concebida, será aquela onde ocorra a rotura do substrato [3, 4].

2.1.4 Adesivos estruturais

Como anteriormente falado, os adesivos são materiais de origem natural ou sintética, e as suas aplicações são amplas. Para classificar os adesivos, a indústria usa um método de acordo com os objetivos, que é a feita por:

- Função;
- Composição química;
- Modo de aplicação ou reação;

- Forma física;
- Custo;
- Aplicação.

A classificação funcional define os adesivos como sendo estruturais ou não estruturais. Os adesivos estruturais são materiais de elevada resistência e desempenho. Geralmente, os adesivos estruturais são definidos como aqueles que possuem uma resistência ao corte superior a 5-10 MPa e uma boa resistência aos meios-ambientes mais comuns. A sua função principal é a de manter ligadas as estruturas, e de serem capazes de resistir a cargas elevadas sem grande deformação. Muitas vezes, constituem o principal meio de ligação em aplicações estruturais. São geralmente termoendurecíveis, que necessitam de um endurecedor e/ou fornecimento de calor [4].

Os adesivos estruturais que se pode encontrar atualmente, são os seguintes:

- Epóxicos - são provavelmente a família de adesivos mais versátil, porque aderem bem a muitos substratos, exceto polímeros e elastómeros com uma energia de superfície muito baixa, e podem ser facilmente modificados para atingir uma grande variedade de propriedades. Podem ser encontrados em forma de filme, pasta ou dois componentes. Têm como vantagens a resistência e durabilidade, mas como desvantagens a cura lenta e/ou a alta temperatura, e a sua forma de armazenamento. A aplicação é manual;
- Fenólicos e fenol-formaldeídos - são resinas usadas principalmente para colar madeira. Devido à sua boa resistência ao calor e boa estabilidade dimensional, têm sido usadas em calços de travão, discos abrasivos, lixas e moldes de fundição. São relativamente baratas, e têm boa resistência ao meio ambiente. Podem ser encontradas em forma de soluções, pós ou filmes, e a aplicação é manual. Como desvantagens, apresentam elevadas pressões de cura e são frágeis;
- Formaldeído de resorcinol e formaldeído de fenol-resorcinol - estas resinas são mais caras do que as fenólicas, e são úteis quando é necessária uma cura à temperatura ambiente. São usadas para colar madeira, plásticos moldados de ureia, nylon, papel, têxteis, couro e painéis de fibras;
- Melamina-formaldeído e ureia-formaldeído - estas resinas são normalmente usadas como adesivos sem cor para madeiras, mas apresentam um custo elevado;
- Poliaromáticos de alta temperatura - estas resinas foram desenvolvidas para aplicações a altas temperaturas na aeronáutica, nomeadamente em painéis *sandwich*, mas têm uso limitado devido ao seu custo e dificuldade de processamento. Podem ser encontradas na forma de filme;
- Poliuretanos - devido à sua boa molhabilidade e boa flexibilidade, estes adesivos aderem bem a muitos substratos, incluindo polímeros difíceis de colar, e aderem excecionalmente bem a madeiras. São muito flexíveis e podem ser usados para

ligar filmes, folhas metálicas e elastómeros. Os uretanos estruturais são muito usados na indústria automóvel, devido às suas propriedades de adesão com painéis moldados por SMC (*sheet metal compound*) e polímeros de uretanos moldados por injeção RIM (*reaction injection molding*). Podem ser encontrados na forma de pasta ou soluções e a sua aplicação é feita a partir de cartuchos. Como desvantagens, pode-se apontar a baixa resistência à temperatura. Estes adesivos podem curar pela existência de humidade, e possuem uma razoável resistência ao meio ambiente;

- Poliésteres - são resinas relativamente baratas, e podem ser divididas em saturadas e não saturadas. As não saturadas permitem ligar metais, cerâmicos e laminados reforçados com vidro. São usadas para reparações de componentes automóveis e de estruturas em betão. As saturadas têm uma elevada resistência ao arrancamento e são usadas para laminar filmes plásticos. Também são perfeitamente transparentes, e podem ser aplicadas em equipamento ótico.
- Acrílicos - dentro deste grupo de adesivos, pode-se enumerar os Acrílicos modificados, os Anaeróbicos e os Cianoacrilatos;
- Acrílicos modificados - são sistemas termoendurecíveis que são também designados de acrílicos reativos, para os distinguir de outros que são normalmente usados em aplicações termoplásticas sensíveis à pressão. São de rápida cura e alta resistência, e por isso, são usados em operações altamente automatizadas. Estes acrílicos têm uma boa resistência ao arrancamento, ao impacto e ao corte entre -100°C a 120°C . Também têm boa resistência à humidade e podem ser encontrados em duas partes, que são os termoendurecíveis, e em uma parte, que são geralmente designados de aeróbicos. Podem ser aplicados em muitos metais, plásticos e montagens rápidas de componentes;
- Anaeróbicos - são assim chamados porque curam quando o ar é excluído da resina. São adequados para aplicações industriais e de maquinaria. As classes para maquinaria dão uma elevada resistência em conjuntos roscados e outras juntas. As classes estruturais permitem uma elevada resistência ao corte em juntas planas. O uso mais importante deste adesivo é como travão líquido para porcas de parafusos, vedação de flanges e suporte. Podem colar os metais comuns, vidro, cerâmicos e plásticos termoendurecíveis. Têm boa resistência à humidade, solventes e à pulverização com sal. Como desvantagem, pode-se apontar que criam uma espessura fina. Podem ser encontrados na forma de líquido ou pasta, e podem ser aplicados por um pequeno recipiente ou por aplicação automática;
- Cianoacrilatos ou “supercola” - a aplicação estrutural deste adesivo restringe-se aos casos onde o meio ambiente não é muito severo, e quando é fundamental ter uma ligação rápida de executar. São relativamente caros. Podem ser encontrados na forma líquida ou gel e aplicados por um pequeno recipiente ou

por aplicação automática. Permitem colar madeira, couro, tecidos, metais, borrachas e plásticos.

2.1.5 Configurações possíveis de junta

Nesta secção apresentam-se as configurações mais comuns de juntas adesivas.

2.1.5.1 Juntas de sobreposição

As juntas de sobreposição (Figura 6) são as juntas mais comuns, porque são as mais fáceis de produzir e o adesivo está em grande parte submetido a corte.

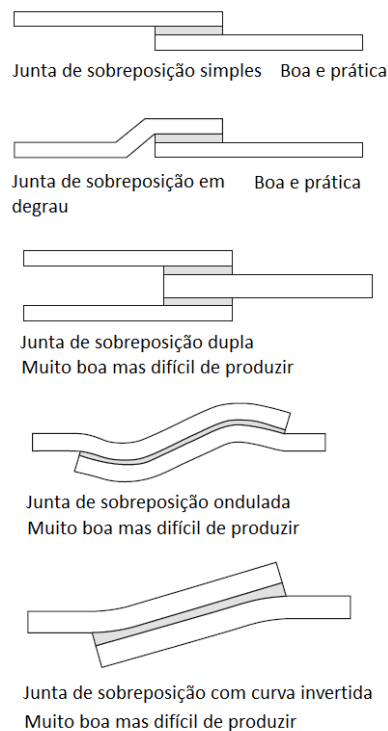


Figura 6 - Juntas de sobreposição e sua avaliação (adaptado de Petrie [10])

No entanto, a carga imposta não é colinear, especialmente em juntas de sobreposição simples, e isto leva a problemas na resistência ao arrancamento. A junta de sobreposição em degrau, é a solução mais simples para a obtenção de uma carga linear, se o substrato for facilmente deformável. A junta de sobreposição dupla é uma construção mais balanceada, que permite uma redução drástica do momento de flexão, mas pode-se ter problemas no substrato intermédio, devido a tensões causadas por arrancamento. Recentemente, foram desenvolvidas as técnicas de junta de sobreposição ondulada e de curva invertida, que permitem um incremento significativo em termos de resistência mecânica das juntas [10].

2.1.5.2 Juntas com chanfro

As juntas de chanfro (ver Figura 7) são as mais simples de produzir. No entanto, este tipo de junta não tem resistência considerável à flexão, o que coloca o adesivo em clivagem.

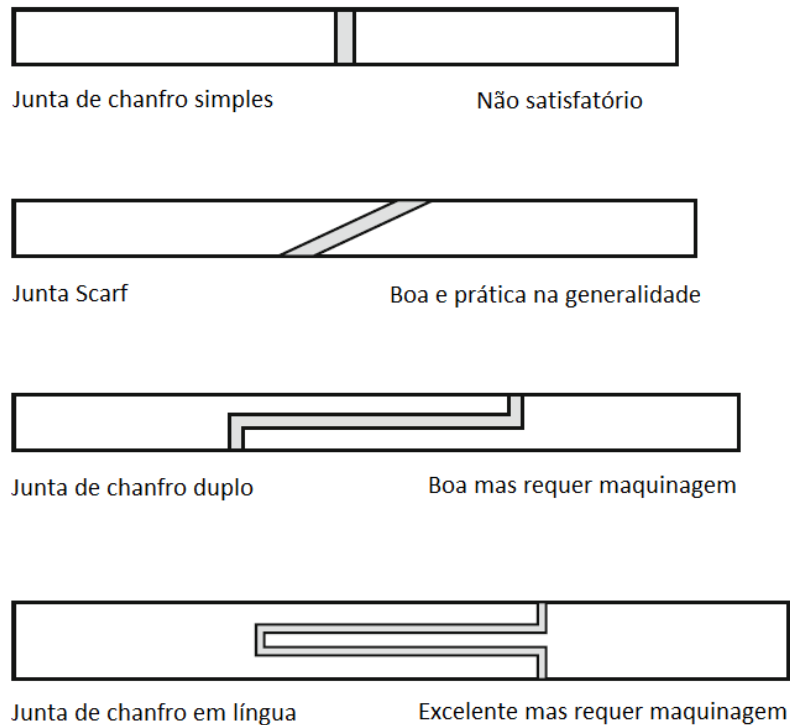


Figura 7 - Juntas de chanfro e sua avaliação (adaptado de Petrie [10])

As juntas *scarf*, chanfro duplo e chanfro em língua, apresentam melhorias na redução de clivagem, em relação ao chanfro simples. A junta *scarf* tem a particularidade de permitir uma distribuição linear de carga, quando é aplicado um ângulo otimizado. As juntas de chanfro em língua são eficientes, porque permitem o auto alinhamento e proteção do adesivo [10].

2.1.5.3 Outros tipos de juntas

Na Figura 8 apresentam-se outros tipo de juntas que são as cobre-juntas.

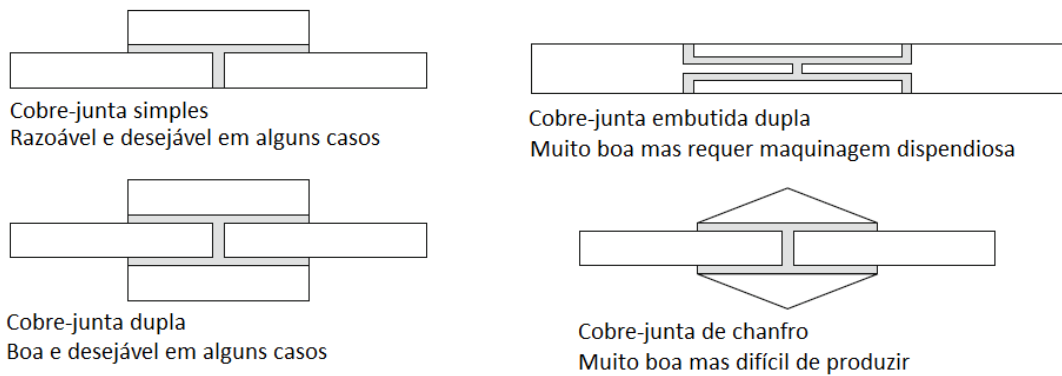


Figura 8 – Cobre-juntas e sua avaliação (adaptado de Petrie [10])

Dos vários tipos de cobre-juntas apresentadas, as mais eficientes são as embutidas, enquanto as de chanfro são usadas em reparações de fuselagem em aeronaves, mas como contrapartida requerem uma maquinagem dispendiosa. A cobre-junta dupla permite uma redução do momento de flexão, em comparação com a simples, que apresenta uma distribuição de tensões com gradientes elevados, o que se reflete negativamente na resistência da junta [11].

Na Figura 9 e Figura 10 são apresentadas diversas juntas de reforço.

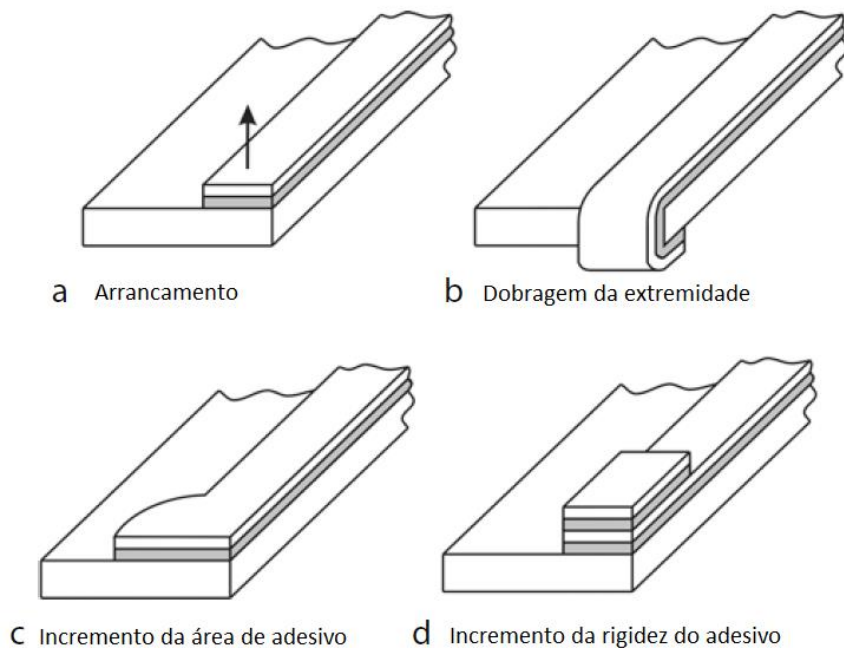


Figura 9 - Soluções para aumento da resistência ao arrancamento (adaptado de Kohen [12])

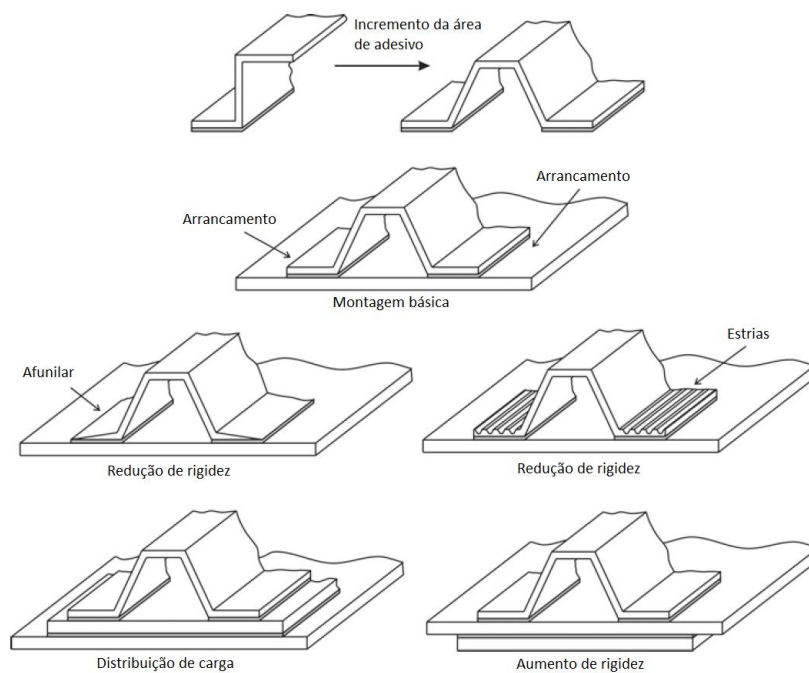


Figura 10 - Soluções para aumento da resistência à clivagem (adaptado de Kohen [12])

Os reforços são aplicados quando é necessário um aumento de resistência ao arrancamento ou clivagem. Para esse efeito, as soluções passam por um aumento da área do adesivo, flexibilidade das extremidades e rigidez da base [11].

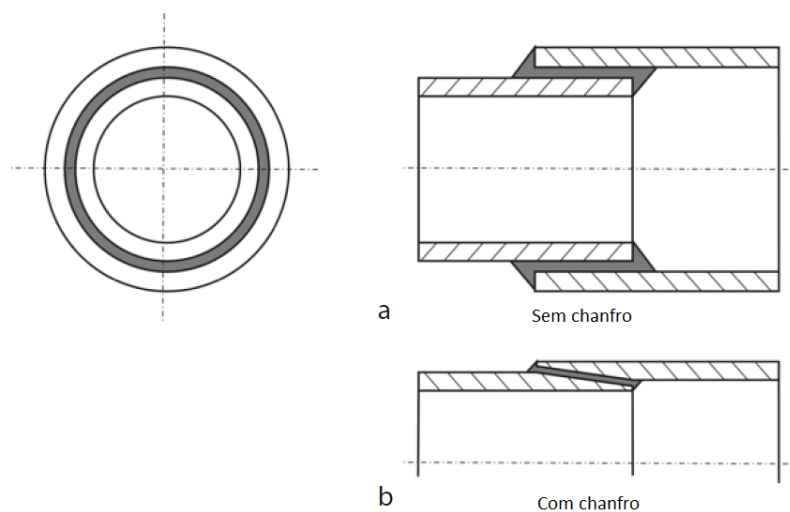


Figura 11 - Juntas cilíndricas sem chanfro (a) e com chanfro (b) (adaptado de Petrie [10])

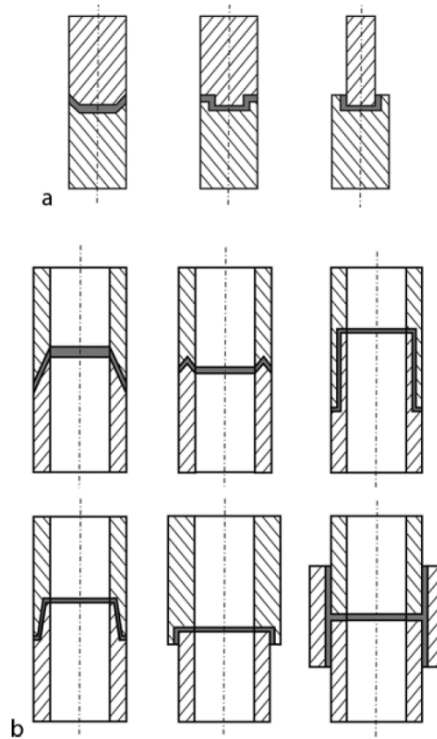


Figura 12 - Juntas cilíndricas em barras (a) e em tubos (b) (adaptado de Petrie [10])

As juntas adesivas cilíndricas são as mais convenientes, quando se trata de ligar tubos ou barras, e as cargas submetidas podem ser axiais ou de torção. As soluções apresentadas na Figura 12 são superiores às da Figura 11, na medida em que existe um aumento da área de adesivo e a resistência ao arrancamento é superior. No entanto, requerem um processo de fabrico mais dispendioso [11].

Na Figura 13 são representadas as juntas em T. As cargas N são as normais ao plano, enquanto as T dizem respeito às transversais.

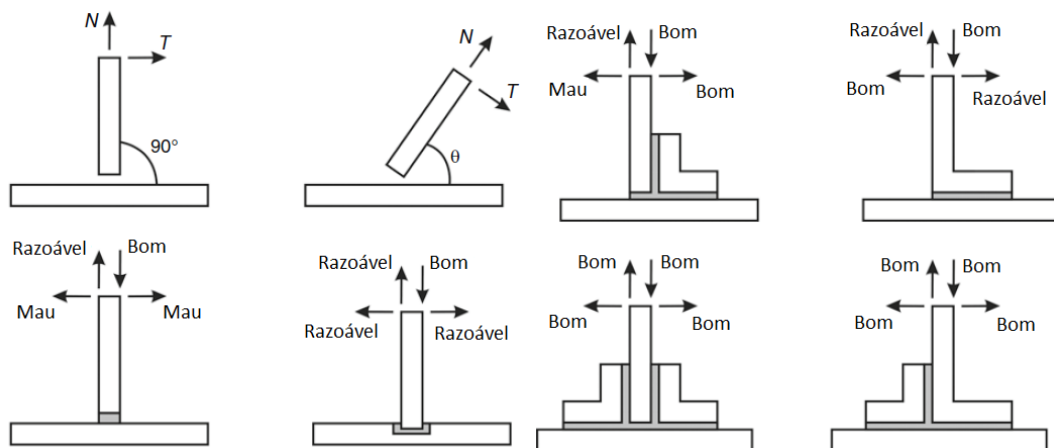


Figura 13 - Juntas em T e sua resistência a esforços (adaptado de [11])

Neste tipo de juntas, ainda não existem modelos de análise das várias configurações [11].

Na Figura 14 apresentam-se diferentes tipologias de juntas em canto. As cargas N correspondem às forças normais ao plano, enquanto as T dizem respeito às transversais.

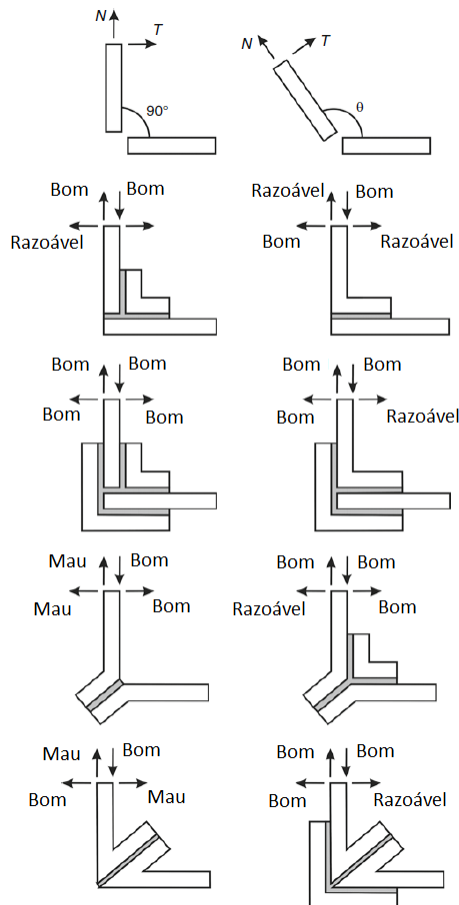


Figura 14 - Juntas em canto e sua resistência a esforços (adaptado de da Silva [11])

Como nas juntas em T, as juntas em canto apresentadas, têm como objetivo a redução do esforço de arrancamento e o aumento da resistência ao corte [11].

2.2 Ensaios para determinação da tenacidade à fratura

Para se avaliar a resistência de uma junta adesiva, um dos métodos preferenciais é a modelação por modelos de dano coesivo. A propriedade mais relevante a utilizar por esta técnica é a tenacidade (G_c), que representa a energia dissipada durante a fratura, quando a fenda se propaga. O modo de solitação de carga varia conforme o modo de carregamento, ou por uma combinação de vários modos de carregamento, sendo a solitação combinada a situação mais crítica.

A seguir, são apresentados os ensaios de mecânica da fratura mais relevantes para os

vários modos de sollicitação, assim como para uma sollicitação combinada.

2.2.1 Ensaio em tração (modo I)

Nos ensaios em modo I (Figura 15) são usados os provetes DCB ou TDCB sollicitados à tração. Este tipo de ensaio é objeto de normas ASTM e ISO [13].

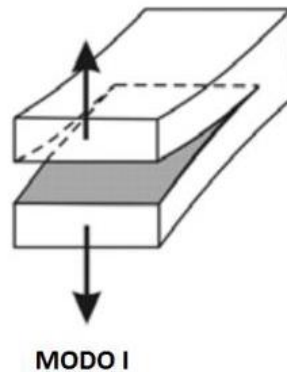


Figura 15 – Carregamento em modo I (adaptado de Campilho [14])

Ensaio com o provete *Double-Cantilever Beam* (DCB):

O provete DCB (Figura 16) é constituído por duas barras com o mesmo comprimento e espessura constante. A zona inicial, onde não existe adesivo, é considerada de pré-fenda e designa-se por a_0 (mm), h (mm) é a espessura do substrato e t (mm) é a espessura do adesivo.

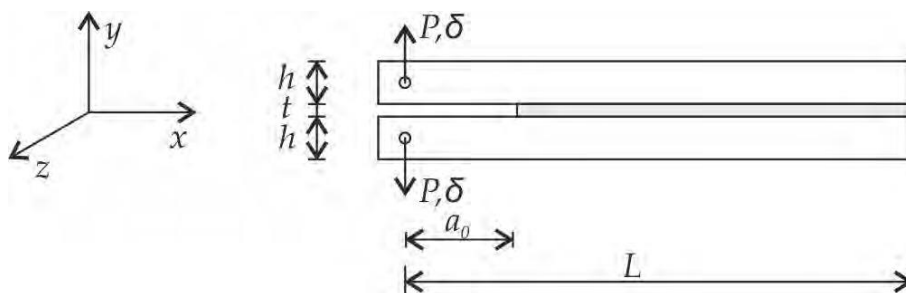


Figura 16 - Ensaio DCB (adaptado de Chaves [15])

O provete é carregado em tração, com velocidades de ensaio entre 0,5 e 3 mm/min, dependendo da geometria e das características do material. Durante o ensaio, a carga P e o deslocamento δ , são registados para cada comprimento de fenda, a .

Para provetes com pré-fenda e uma relação linear entre a carga e o deslocamento, G_c pode ser obtido pela equação de Irwin-Keyes,

$$G = \frac{P^2}{2B} + \frac{dC}{da}, \quad (1)$$

onde P é a carga aplicada, B é a largura do provete, C é a flexibilidade dos substratos e a é o comprimento da fenda [16].

A energia dissipada de propagação de fenda também pode ser calculada pela *Direct Beam Theory* (DBT), mas este método não tem em conta rotações na extremidade da fenda, assim como concentração de tensões que vão afetar a curva P - δ [14].

A *Direct Beam Theory* é baseada em teoria elementar de vigas, e diz que:

$$G_{lc} = \frac{(12a^2P^2)}{(B^2h^3E1)}, \quad (2)$$

onde h representa a altura de cada provete e $E1$ o módulo de Young dos substratos, na direção longitudinal [17].

Outro método que se pode utilizar é o *Compliance Based Beam Method* (CBBM), que tem em conta rotações na extremidade da fenda, assim como as concentrações de tensões. A energia dissipada de propagação de fenda é expressa por G_{lc} , e é obtida por:

$$G_{lc} = \frac{(6P^2)}{(b^2h^3)} \left(\frac{2ae^2}{E} + \frac{h^2}{5G} \right), \quad (3)$$

onde ae é o comprimento equivalente de fenda, que contabiliza o efeito da Zona de Processo de Fratura (ZPF).

Ensaio com o provete *Tapered Double Cantilever Beam* (TDCB)

De forma similar ao DCB, é usado um provete simétrico (Figura 17), mas com a extremidade em cunha. A altura h varia, conforme o comprimento de fenda a .

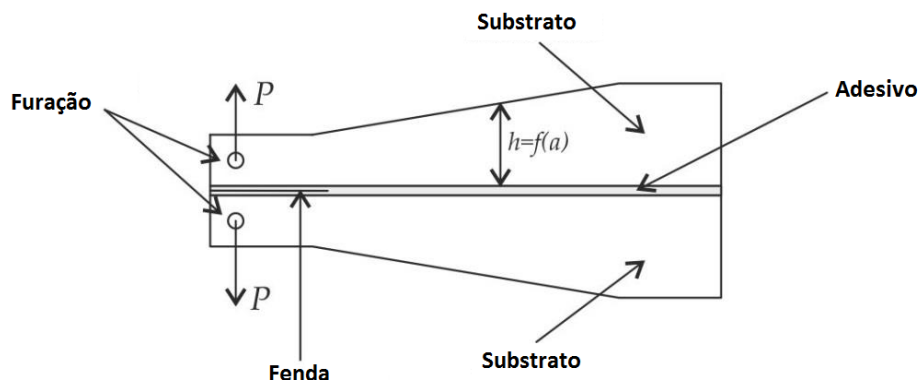


Figura 17 - Ensaio TDCB (adaptado de Chaves [15])

Neste ensaio, G_{Ic} pode ser obtido pela expressão:

$$G_{Ic} = \frac{(4P^2)}{(Eb^2)} m, \quad (4)$$

em que m é um fator geométrico definido por:

$$m = \frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h}. \quad (5)$$

Estes ensaios tornaram-se populares, e são usados para testes estáticos e de fadiga, assim como para descrever o envelhecimento dos adesivos sujeitos a degradação pelo clima. A grande vantagem é a obtenção de G_{Ic} , independentemente de a . A desvantagem é a complexidade de fabrico, comparado com o ensaio DCB [4, 18].

2.2.2 Ensaios em corte (modo II)

Os ensaios em modo II (Figura 18) podem ser executados através de provetes ENF, ELS e 4ENF, solicitados ao corte.

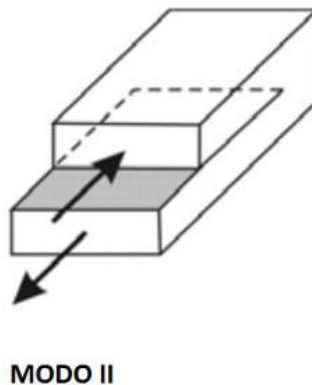


Figura 18 - Carregamento em modo II (adaptado de Campilho [14])

No entanto, não existem ainda normas para a sua execução. Destes provetes, o mais simples e mais comum, é o ensaio ENF [19].

Ensaio com o provete *End-Notched Flexure* (ENF):

Neste ensaio (Figura 19), os provetes são compostos por duas barras de espessura constante, coladas entre si, e apoiadas nas extremidades. É aplicada uma carga a meio vão, que causa corte no adesivo.

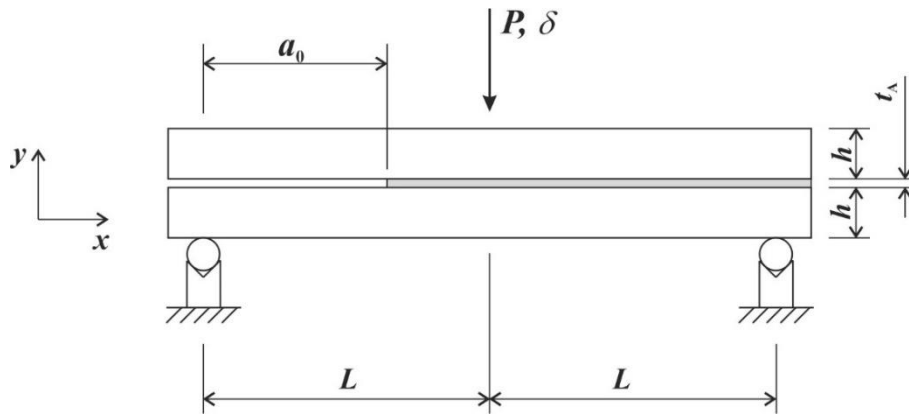


Figura 19 - Ensaio ENF (adaptado de Campilho [20])

Para se determinar G_{IIC} , podem-se usar os métodos *Direct Beam Theory* (DBT) e o *Corrected Beam Theory* (CBT), mas estes métodos não consideram o efeito de corte na extremidade da fenda e o efeito da Zona de Processo de Fratura. Para isso, teremos que usar o *Compliance Based Beam Method* (CBBM), o qual resulta em

$$G_{IIC} = \frac{9P^2}{16b^2 Eh^3} ae^3, \quad (6)$$

em que ae é o comprimento equivalente de fenda considerado devido à inclusão do efeito da ZPF, expresso por:

$$ae = \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{(1/3)} \quad (7)$$

onde C_{corr} é dado por:

$$C_{corr} = C - \frac{3L}{10Gbh} e \quad (8)$$

C_{0corr} é dado por:

$$C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10Gbh} \quad (9)$$

sendo a_0 a pré-fenda. O método CBBM é baseado na conformidade de material, e G_{IIC} pode ser obtido usando exclusivamente a curva $P-\delta$ [21-23].

2.2.3 Ensaios em solicitação combinada (modos I + II)

Nos ensaios de solicitação combinada (Figura 20), existem em simultâneo esforço de tração e de corte.

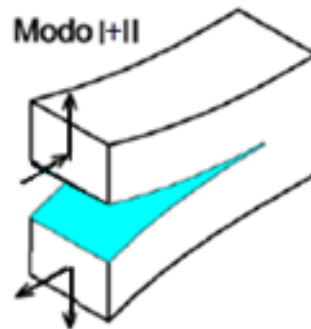


Figura 20 - Carregamento em modo (I+II) (adaptado de Campilho [14])

Nos ensaios de modo misto, é possível determinar o rácio de modo misto G_{Ic}/G_{IIc} . Ainda não existem normas para caracterizar a maioria dos tipos de provetes que se pode usar, mas destacam-se os seguintes (ver Figura 21) [24-28]:

SLB – *Single-Led Bending* é um ensaio proposto por *Yoon and Hong* [28], com um provete ENF modificado;

MMB – *Mixed-Mode Bending* é o único que apresenta uma norma, mas é mais adequado para materiais compósitos, e não para alumínio ou aço. É um ensaio que resulta da combinação do ensaio DCB com o ENF;

ATDCB – *Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam* é um ensaio em que um dos provetes tem uma secção constante, mas o outro é similar ao ensaio TDCB;

ADCB – *Asymmetric Double-Cantilever Beam* é muito similar ao ensaio anterior DCB, porém este possui um substrato com maior espessura.

Quanto ao ensaio SPELT, este permite variar o modo de carga aplicada e pode ser utilizado para a solitação combinada, assim como para realizar os ensaios DCB para modo I e ENF para modo II, sendo desta forma versátil no contexto da mecânica da fratura [29, 30].

Test	Tset scheme	Global mixity, ψ (degree)
Asymmetric double cantilever beam (ADCB)		$\approx 0-34^\circ$
Single leg bending (SLB)		$\approx 41^\circ$
Crack lap shear (CLS)		$\approx 49^\circ$
Asymmetric tapered double cantilever beam (ATDCB)		$\approx 20^\circ$
Mixed-mode bending (MMB)		$\psi = f(c)$
Spelt loading jig (SPELT)		$\psi = f(s_1, s_2, s_3, s_4)$

Figura 21 - Ensaio de solicitação combinada (Chaves et al. [31])

2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

No passado, a não existência de modelos precisos e apropriados para a previsão de rotura de juntas adesivas, levou a que se sobre dimensionasse as ligações adesivas, o que resultava em maiores e dispendiosas estruturas. Com a disponibilidade de metodologias fiáveis na previsão de rotura, emergiram novas possibilidades para o uso eficiente das ligações adesivas. Duas alternativas podem ser usadas, que são os modelos analíticos e os métodos numéricos. Dos métodos numéricos existentes, o método de elementos finitos é, sem dúvida, o mais utilizado.

2.3.1 Modelos analíticos

No início da análise estrutural das ligações adesivas, os métodos de previsão consistiam em modelos analíticos baseados nos trabalhos de Volkersen e Goland e Reissner [32, 33]. Estes foram precursores de estudos teóricos que tinham a vantagem da simplicidade para obtenção das distribuições de tensões nas ligações adesivas, devido à utilização de hipóteses simplificativas em termos de geometria, carregamento e condições fronteira, dando soluções elásticas de forma fechada. Com estes modelos, pode-se calcular facilmente as deformações e tensões nas juntas, juntamente com os momentos de flexão sobre a estrutura. A resistência pode ser prevista por critérios baseados em tensões ou deformações [32-34].

2.3.2 Métodos numéricos

Nos dias de hoje, os modelos analíticos foram substituídos por modelos numéricos, e estes modelos foram aperfeiçoados ao longo dos anos, em termos de capacidade de modelação, incluindo efeitos como a não linearidade do material do adesivo, ou a não linearidade geométrica [35, 36].

2.3.2.1 Mecânica dos meios contínuos

Pela mecânica dos meios contínuos, os valores máximos para as tensões, deformações e energia de deformação, podem ser previstos por elementos finitos, usando um critério de rotura para estimar a resistência do conjunto. Estes valores podem ser obtidos por critérios como o *Maximum Normal Stress Criterion*, ou *Maximum Shear Strain Criterion*.

Esta aproximação foi aplicada para propósitos gerais em aplicações estruturais, logo depois de os elementos finitos estarem disponíveis para cálculo em programas de computador. As vantagens desta técnica são a análise de ligações adesivas, com ou sem dano inicial, sob uma carga arbitrária. No entanto, esta técnica tem uma grande limitação, devido à existência de concentração de tensões nas extremidades da zona ligada, devido aos cantos retos. Numa análise por elementos finitos, as tensões numa zona aumentam com o refinamento da malha, o que torna a análise dependente deste fator. Foram feitas melhorias na técnica de modelação ao longo dos anos, mas existe sempre esta dependência [34].

2.3.2.2 Mecânica da fratura

As fendas são o defeito mais comum em estruturas, e as técnicas da mecânica da fratura foram desenvolvidas para prever a resistência nestes casos. Na mecânica de fratura linear elástica é aceite que as tensões calculadas são infinitas nas extremidades das fendas. Pelas teorias existentes da mecânica, esta singularidade existe sempre, quando o ângulo da fratura é menor que 180° . Este valor foi determinado por *Williams* [37] para

singularidades de tensão num entalhe em cunha, e também é aplicável em juntas adesivas com cantos retos. Esta técnica está a ser aplicada com sucesso em muitos problemas de engenharia recentes.

Muitos estudos que estão relacionados com a mecânica da fratura usam a tenacidade à fratura em vez dos fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determinados, quando a fenda se propaga perto ou numa interface. No entanto, a fratura em ligações adesivas ocorre sempre em solitação combinada, devido à variação das propriedades dos diferentes materiais [37, 38].

2.3.2.3 Modelos de dano coesivo

Os modelos de dano coesivo descrevem o dano sob cargas estáticas na zona coesiva da extremidade da fenda, oferecendo a possibilidade de prever o dano em estruturas com ligações adesivas.

Esta técnica é muito utilizada para modelação da iniciação e propagação de fendas em zonas coesivas ou em interfaces, assim como para a delaminação de compósitos. Os modelos de dano coesivo são baseados em elementos coesivos, que podem ser incorporados numa análise de elementos finitos, para modelar o comportamento da fratura em vários materiais.

As leis de dano coesivo são estabelecidas entre nós homólogos dos elementos coesivos, e podem ser usadas para conectar nós sobrepostos de elementos, representando materiais diferentes ou diferentes camadas em compósitos, para simular uma interface de espessura zero, ou podem ser aplicadas diretamente entre dois materiais sem contacto, para simular uma camada fina de espessura finita entre eles, por exemplo para simular uma ligação adesiva.

Os modelos de dano coesivo reproduzem os danos por tração e por corte nos pares de nós, e são baseados em parâmetros, tais como a energia libertada na fratura, e permite a modelação da evolução da resistência até à rotura, tendo em conta a degradação do material [39-41].

2.3.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano é uma técnica que induz dano nos elementos, através do controlo da carga aplicada, o que permite uma simulação passo-a-passo da fratura numa determinada zona, utilizando uma pré-fenda. Este método já existe há anos, mas só mais recentemente foi aplicado em materiais híbridos. É também uma técnica que está sob intenso desenvolvimento. Pode ser aplicada localmente, ou continuamente. Localmente, pode-se simular, por exemplo, uma falha ao nível de uma superfície, enquanto continuamente é possível simular, por exemplo, uma fratura coesiva do adesivo [42, 43].

Na técnica de mecânica do dano, é estabelecido um parâmetro de dano para modificar a resposta constitutiva de materiais pela depreciação da rigidez ou resistência, por exemplo para finas camadas de adesivo [44], ou delaminações e falha de matriz em compósitos [45], para representar a gravidade dos danos materiais durante o carregamento. Esta variável de estado pode ser usada numa lei de evolução de danos, para modelar a absorção de danos por pré-fenda, assim como o crescimento de fendas. Por esta técnica, o crescimento de dano é definido como uma função da carga para modelação estática [46] ou a contagem cíclica para análises de fadiga [47, 48]. Os modelos genéricos de danos mecânicos para materiais em bruto estão disponíveis na literatura (Lemaitre and Desmorat [49]), e respetivas modificações para casos particulares de modelação de danos, como por exemplo, danos em nucleação dos vazios e a formação de micro fendas [50-52]. A mecânica do dano também tem sido usada para modelar numericamente cenários de fadiga de amplitude constante e variável [53]. Para o campo das juntas adesivas, existe pouco trabalho publicado. Em comparação com os modelos de dano coesivo de fadiga, as técnicas de mecânica de dano não fornecem uma distinção clara entre as fases de iniciação à fadiga e de propagação, embora possam fornecer uma base para a análise preditiva [44]. No entanto, a evolução dos danos antes do crescimento de fendas, pode ser simulada. Por outro lado, a modelação de danos com modelos de dano coesivo de fadiga, é restrita a caminhos de fendas pré-definidos e, em aplicações específicas, a mecânica de dano pode ser recomendada se o dano estiver mais difundido, ou o caminho da fenda não for conhecido [54].

2.3.2.5 *Método de Elementos Finitos Extendido*

O método de elementos finitos extendido é um desenvolvimento recente do método de elementos finitos para o estudo da propagação de dano em estruturas. São usadas leis de dano para a previsão de fratura baseadas na resistência dos materiais em bruto, em vez de usar os valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (tensão normal ou corte), como nos modelos de dano coesivo. Uma vantagem desta técnica em relação aos modelos de dano coesivo, é que este não necessita que a fratura percorra uma orientação definida. Na realidade, as fraturas desenvolvem-se livremente, dependendo do tipo de carregamento e da geometria da estrutura.

Este método é baseado no conceito de partição da unidade, e pode ser implementado no tradicional método de elementos finitos [55, 56].

2.4 Modelos de dano coesivo

O conceito de zona coesiva foi proposto por Barenblatt [39] e Dugdale [57], para descrever o dano sob cargas estáticas na zona coesiva envolvente à extremidade da fenda. Este modelo foi melhorado e testado para simular a iniciação e propagação de fendas em regiões coesivas em interfaces, ou em delaminações de compósitos.

2.4.1 Fundamentos do método

Os modelos de dano coesivo são baseados em elementos de mola, ou mais tipicamente, em elementos coesivos, e permitem a ligação de elementos 2D ou 3D de estruturas. Uma característica importante desta técnica é que pode ser incorporada em modelos de elementos finitos, para estudar o comportamento de fratura de vários materiais [40, 41]. De facto, estes elementos podem ser introduzidos artificialmente numa estrutura para promover o crescimento de dano, pela criação de descontinuidades no campo de deslocamentos. Esta técnica consiste na utilização de leis de tração-separação para modelação de interfaces ou regiões sólidas de estruturas. Para este efeito, as leis são estabelecidas entre pares de nós dos elementos coesivos. Existem duas abordagens para a aplicação dos modelos coesivos, que é a abordagem local e a abordagem contínua. Na abordagem local (Figura 22), existe uma conexão de nós de elementos coesivos, representando diferentes materiais ou diferentes camadas em compósitos, para simular uma interface de espessura zero [43, 58].

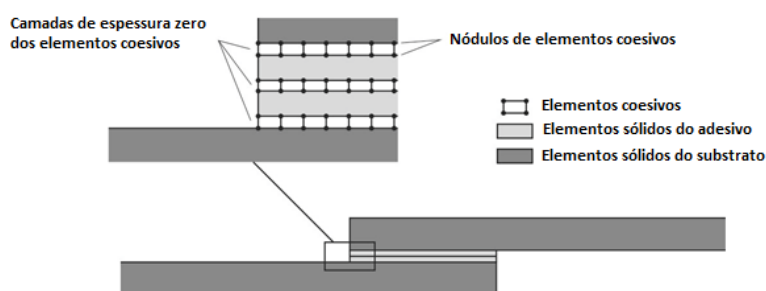


Figura 22 – Representação da abordagem local (adaptado de da Silva and Campilho [59])

Para a simulação de juntas adesivas, o adesivo é modelado como um material contínuo, com comportamento elástico-plástico por elementos finitos, e é considerada para as leis a "energia de fratura intrínseca", em vez de G_c .

Na abordagem contínua (Figura 23), os elementos podem ser aplicados diretamente entre dois materiais sem contacto, para simular uma camada fina de espessura finita entre eles, como, por exemplo, uma ligação adesiva [60].

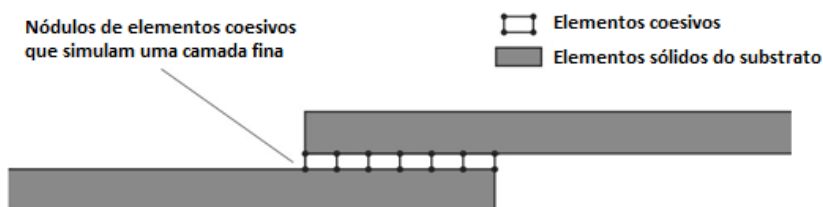


Figura 23 – Representação da abordagem contínua (adaptado de da Silva and Campilho [59])

Devido à simplicidade evidente desta abordagem, esta tem sido amplamente utilizada na simulação de propagação de dano em juntas adesivas, dando bons resultados desde que as leis do dano coesivo sejam definidas de forma precisa [14].

Apesar da eficiência computacional da abordagem contínua de juntas adesivas, existem algumas limitações a esta abordagem, nomeadamente: (1) o significado físico do processo de fratura foi de alguma forma perdido, uma vez que separações coesivas reais são geralmente acompanhadas por comportamentos plásticos localizados, através da camada intermédia adesiva, mesmo para adesivos frágeis, representados com este método por propriedades equivalentes médias, e (2) esta abordagem é dependente da geometria das estruturas, mais especificamente da espessura do substrato (t_p) e da espessura do adesivo (t_A), porque estas afetam em grande medida o tamanho da zona de processo de fratura (ZPF) e a plasticidade em redor da extremidade da fenda, tornando as leis dependentes desses parâmetros [41].

Os modelos de dano coesivo têm sido amplamente utilizados nos últimos anos para simular o comportamento das estruturas até à rotura, uma vez que permitem incluir nos modelos numéricos múltiplas possibilidades de rotura, dentro de diferentes regiões de materiais, ou entre interfaces de materiais (por exemplo, nas interfaces de uma ligação adesiva). O conhecimento dos locais de dano que ocorrem numa estrutura não é requerido como um parâmetro de entrada, porque o modelo pesquisa globalmente trajetos de rotura especificados, satisfazendo os critérios estabelecidos. No entanto, devem ser colocados elementos coesivos nos planos onde o dano é propenso a ocorrer, o que, em várias aplicações, pode ser difícil de conhecer antecipadamente. Embora uma grande quantidade de trajetos de rotura possa ser introduzida numa estrutura para simular diferentes fraturas, não é possível introduzir elementos coesivos entre cada elemento de campo, mesmo numa malha de tamanho moderado. No entanto, uma característica importante das juntas adesivas é que a propagação de dano é restrita a planos bem definidos, ou seja, nas interfaces de adesivo/substrato entre os adesivos e os aderentes, ou coesivamente na ligação adesiva, o que permite superar essa limitação [14, 61].

Vários tipos de lei de dano coesivo foram apresentados na literatura, dependendo da natureza do material ou interface a ser simulada. As formas triangular, exponencial e trapezoidal, são as mais comuns para previsão da resistência de materiais típicos.

2.4.2 Tipos de leis coesivas

Na Figura 24, são representadas as diferentes leis coesivas: triangular ou exponencial e trapezoidal.

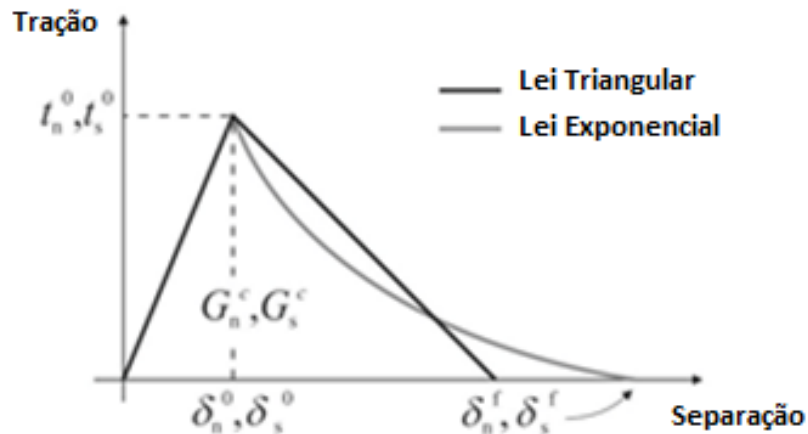


Figura 24 - Lei triangular ou exponencial e trapezoidal (adaptado de da Silva and Campilho [59])

Em relação ao tipo triangular ou exponencial, a nomenclatura utilizada consiste na consideração dos índices n e s para tração e corte, respetivamente. t_n e t_s são definidas como tensões normal e de corte, respetivamente, δ_n e δ_s são os deslocamentos na tensão normal e de corte máxima, respetivamente, e δ_n^f e δ_s^f os respetivos deslocamentos de rotura. Os valores de δ_n^f e δ_s^f são definidos por G_{Ic} ou G_{IIc} , respetivamente, pois estes representam a área sob as leis.

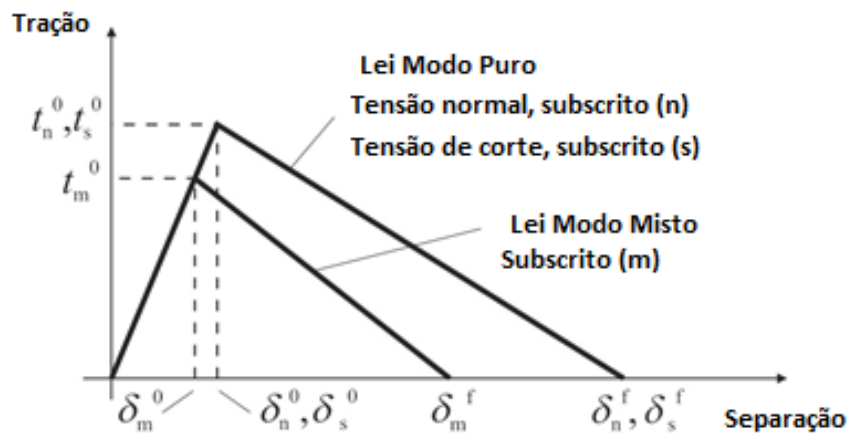


Figura 25 - Lei de modo misto e modo puro (adaptado de da Silva and Campilho [59])

Em relação à Figura 25, pode-se observar que, t_m^0 é a resistência coesiva em modo misto, δ_m^0 é o deslocamento correspondente e δ_m^f o deslocamento de rotura em modo misto. Sob carga em modo puro, o gráfico t - δ atinge o seu pico na resistência coesiva

(t_n^0 ou t_s^0), correspondendo ao início do dano provocado pela redução da rigidez do elemento coesivo. Para o tipo de lei trapezoidal (ver Figura 26) representado, além dos parâmetros já apresentados, δ_n^0 e δ_s^0 são os deslocamentos de início de amaciamento de tensão em tração e corte, respetivamente. δ_n^s e δ_s^s são os deslocamentos finais de amaciamento.

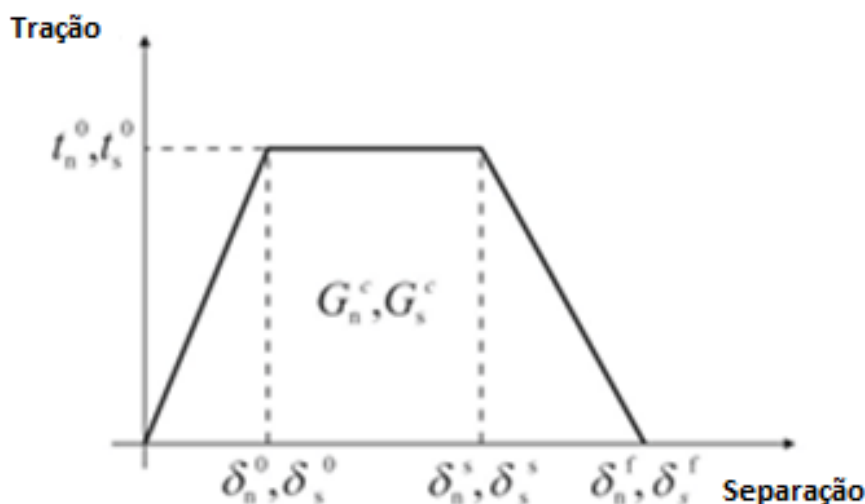


Figura 26 - Lei trapezoidal (adaptado de da Silva and Campilho [59])

2.4.3 Métodos de estimação das leis coesivas

A seguir apresentam-se três tipos de métodos de previsão das leis coesivas, que são o método de identificação individual das propriedades coesivas, o método inverso e o método direto.

2.4.3.1 Método de identificação individual das propriedades coesivas

No método de identificação individual das propriedades coesivas, pelo menos um dos parâmetros das leis coesivas é aproximado pela consideração de propriedades do adesivo em bruto.

Campilho et al. [61] avaliaram a resistência à tração de reparações por ligações adesivas em compósitos laminados, em função do comprimento de sobreposição e t_p . Foi feita uma análise de Elementos Finitos considerando uma lei coesiva trapezoidal, para simular uma camada fina de Araldite® 420 (Huntsman) pela abordagem contínua.

No trabalho desses autores, t_n^0 e δ_n^s foram obtidos a partir da curva tensão-deformação do adesivo em bruto, tendo por base trabalhos anteriores [62] que mostraram que t_n^0 é da mesma ordem de grandeza da resistência à tração medida em testes de adesivo em bruto, e que δ_n^0 e δ_n^s não influenciam significativamente os resultados numéricos. Por

outro lado, t_s^0 foi derivado de t_n^0 pelo critério de von Mises para materiais isotrópicos em bruto e devido à sua menor influência nos resultados, enquanto δ_s^s foi definido considerando um declive de amaciamento semelhante à lei coesiva à tração. Os valores de G_{Ic} e G_{IIc} foram estimados a partir dos ensaios DCB e ENF, respectivamente. As propriedades interlaminar e intralaminar do compósito foram obtidas de trabalhos anteriores, considerando leis de dano coesivo triangulares para modelação através de uma abordagem local.

Uma análise aos resultados feita por estes autores, mostra que os valores de δ_n^s e δ_s^s das leis de dano coesivo de uma ligação adesiva não alteram o modo de falha das reparações, nem afetam a falha através da carga. No caso de falha interlaminar de um compósito, os parâmetros das leis de dano coesivo de corte mostraram uma maior influência sobre a resistência, do que os de tração.

Pinto et al. [63] testaram uma lei de dano coesivo trapezoidal com uma formulação contínua, para modelar uma ligação adesiva com $t_A = 0,2$ mm (3M DP-8005®). Neste trabalho, foi feita uma estimativa da resistência à tração de juntas de sobreposição simples entre substratos com diferentes valores de t_A e materiais (polietileno, polipropileno, epóxido de vidro e compósitos de carbono-epóxi). A análise de Elementos Finitos foi realizada em Abaqus®, com elementos coesivos desenvolvidos pelo utilizador, implementados numa sub-rotina. Os valores de t_n^0 e δ_n^s foram assumidos como sendo iguais às propriedades em bruto do material correspondente. Embora os autores enfatizassem os possíveis erros de cálculo decorrentes desse procedimento, esta ação foi corroborada por resultados anteriores [62]. G_{Ic} foi estimado a partir de ensaios DCB, utilizando a norma ASTM [64]. O valor de δ_n^f foi obtido por aproximação da deformação de rotura à tração média obtida em ensaios de adesivo maciço, uma vez que este parâmetro não influencia significativamente os resultados das simulações numéricas. Em contrapartida, os parâmetros em corte foram obtidos pelo ensaio *Block-Shear Method* (ASTM [65]). Foi adotado o ensaio *Block-Shear Method*, pois a camada adesiva é principalmente solicitada em corte, enquanto as tensões normais são minimizadas. Após a realização das simulações com as leis coesivas do adesivo construídas, como se descreve, concluiu-se que as simulações de Elementos Finitos captaram com bastante precisão o comportamento experimental das juntas em termos de rigidez, carga máxima e o valor correspondente de δ para todas as configurações de geometria e material testadas.

2.4.3.2 Método inverso

O método inverso consiste num procedimento iterativo entre os dados medidos experimentalmente e as respetivas previsões por Elementos Finitos, considerando uma descrição precisa da geometria experimental e leis coesivas aproximadas, estabelecidas com base no comportamento típico do material a ser simulado. A caracterização inversa das ligações adesivas deve ser aplicada individualmente para cada provete testado, para

se ter em conta as ligeiras variações geométricas entre eles [66]. Através desta técnica, o valor de G_{Ic} ou G_{IIc} , que corresponde ao valor estacionário de G_I ou G_{II} durante a propagação de fenda na respetiva curva R , construída a partir dos dados de teste de caracterização de fratura, é introduzido no modelo de Elementos Finitos. Para definir completamente a lei de dano coesivo, podem ser considerados inicialmente valores aproximados do material em bruto de t_n^0 ou t_s^0 , para o início do processo iterativo de tentativa e erro [14]. A afinação dos parâmetros coesivos é realizada por algumas iterações numéricas, até que seja alcançada uma previsão exata dos dados experimentais. Alguns exemplos de dados experimentais que podem ser usados para o procedimento de ajuste iterativo são a curva R [67], o perfil de abertura da fratura [68] e, mais comumente, a curva $P-\delta$ [69].

No trabalho de Moura et al. [70], foi considerado um método inverso para a definição de uma lei de dano coesivo de corte pelo teste ENF (abordagem contínua), para uma ligação adesiva epóxi dúctil (Huntsman Araldite® 2015) com $t_A = 0,2$ mm. Não obstante as dificuldades de medição de G_{Ic} resultante do crescimento da fenda sem abertura, a utilização de um fluido de correção ao longo do percurso de crescimento da fratura permitiu uma estimativa precisa do valor atual de a através de um procedimento de análise de imagens, já que foram tiradas fotografias durante os testes com intervalos de 5 s, com uma câmara digital de 10 *Megapixel*. A estimativa de G_{Ic} foi possível pela correlação dos dados $P-\delta-a$, através do conhecimento do tempo decorrido desde o início do teste. O tempo de teste de cada ponto de dados $P-\delta$ foi calculado a partir do valor atual de δ e da taxa de carregamento. A correspondência com os valores de a foi estabelecida, sabendo o tempo de teste de cada imagem. G_{Ic} foi estimado por três métodos de redução: CCM, CBT e CBBM, este último não exigindo a medição de a durante a propagação da fenda, dado que este calcula G_{Ic} apenas usando a flexibilidade experimental. A redução dos dados pelos três métodos para os cinco provetes testados, mostrou resultados semelhantes entre os métodos CCM e CBBM, e valores inferiores pelo CBT. A análise de Elementos Finitos representou fielmente cada geometria de amostra e valor medido de a_0 (ver Figura 27).

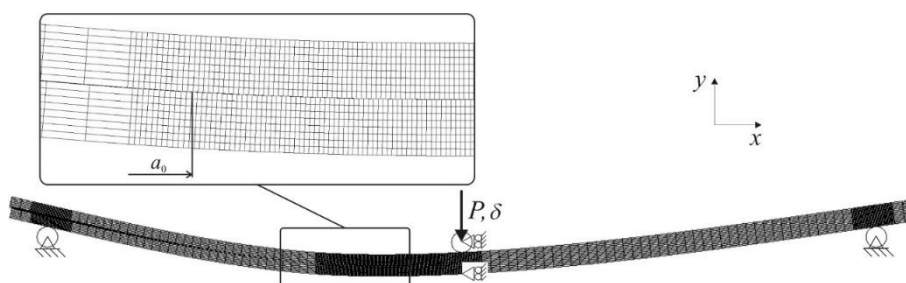


Figura 27 - Provette ENF deformado durante a propagação, com condições de fronteira e carga definidas (de Moura et al. [70])

Considerou-se que uma lei de dano coesivo trapezoidal com abordagem contínua

definida pelo utilizador [61], acoplada à simulação em Abaqus®, permitia modular corretamente a ductilidade do adesivo. Os valores do método CBBM de G_{IIC} , correspondentes ao valor estacionário das respetivas curvas R , foram utilizados como entrada nos modelos de Elementos Finitos. Os demais parâmetros coesivos (t_s^0 e δ_s^s) foram estimados ajustando as curvas P - δ experimentais e numéricas de cada amostra.

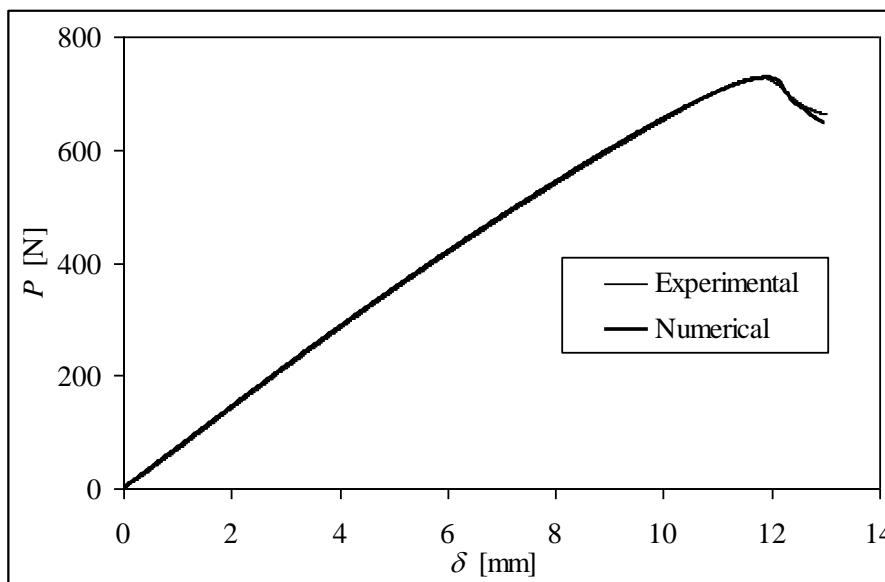


Figura 28 - Comparação das curvas P - δ experimentais e numéricas de um provete testado (Campilho [14])

A Figura 28 mostra as curvas P - δ experimentais e numéricas para um provete, após o procedimento de ajuste.

A Figura 29 mostra os valores médios e desvio de G_{IIC} (J_{IIC}), t_s^0 ($\sigma_{u,II}$), δ_s^s ($\delta_{2,II}$) e δ_s^f ($\delta_{u,II}$), e também o alcance das leis de dano coesivo após a aplicação individual dos princípios do método inverso a cinco curvas P - δ experimentais. O ajuste manual permitiu uma visão clara sobre a influência dos parâmetros das leis de dano coesivo na forma de curvas P - δ . G_{IIC} , que é o valor de entrada nas simulações, influencia principalmente a carga máxima. Valores mais elevados de t_s^0 aumentam a carga máxima e a rigidez do provete acima desse valor, levando a uma redução de carga pós-pico mais abrupta. Finalmente, δ_s^s desempenha um papel importante no arredondamento da curva P - δ perto do valor de pico. Estes resultados indicaram que uma solução única para as leis de dano coesivo de um adesivo ao corte pode ser obtida pelo método inverso.

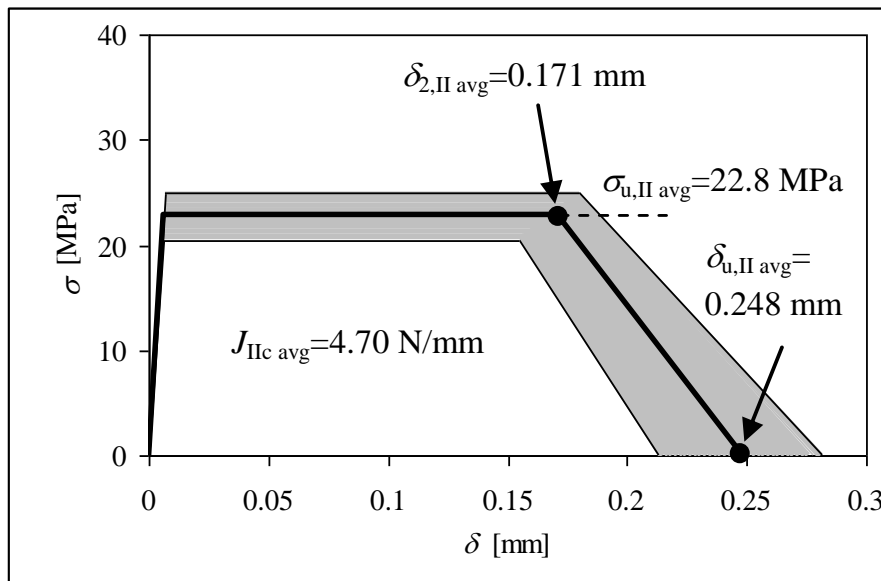


Figura 29 - Valores médios de corte para uma lei de dano coesivo pelo método inverso, em cinco provetes (Campilho [14])

Lee et al. [71] propuseram um procedimento sistemático para estimar os parâmetros locais de leis de dano coesivo de uma ligação adesiva, utilizando os ensaios SLB em modo misto com tensão ou corte como modos dominantes, para a extrapolação das leis de modo puro, simplificando assim o método inverso. Foram testados provetes SLB com diferentes solicitações, para validação dos dados obtidos de tração e de corte. Todos os provetes fraturados mostraram uma rotura coesiva da ligação, com evidência de adesivo e fibras na superfície de ligação dos substratos em aço. A medição de G_c foi realizada a partir dos dados de ensaio, e a combinação de modos foi definida a partir da teoria de vigas clássica. A extrapolação linear dos dados medidos (ver Figura 30) para ensaios dominantes de tração e de corte, permitiu a definição G_{Ic} e G_{IIc} . As decomposições de modo resultaram em $G_{Ic} = 140\ N/m$ e $G_{IIc} = 280\ N/m$, valores que se enquadram nos valores típicos para matrizes epóxicas.

Para a reprodução dos resultados dos ensaios usando leis de dano coesivo triangulares para tração e corte, foi considerada uma solicitação de modo misto. Para a definição dos parâmetros coesivos em falta (K_{nn} , K_{ss} , t_n^0 e t_s^0), utilizou-se o Desenho de Experiências (*Design of Experiments, DoE*) e técnicas de metamodelo de *Kriging* (KM). O *DoE* foi construído considerando os parâmetros acima mencionados, a serem determinados como as variáveis de projeto *DoE* e definindo os níveis de variáveis e as taxas de amostragem necessárias para as experiências pelo método composto central. Como resultado da análise, a quantidade de 50 simulações foi considerada como o número mínimo de ensaios para se obter os quatro parâmetros. O KM, ao permitir uma base matemática entre as entradas do sistema (pontos de amostragem dos parâmetros coesivos) e saídas (erros entre os resultados da simulação e dados experimentais),

permitiu obter uma solução otimizada, minimizando o erro (Figura 31).

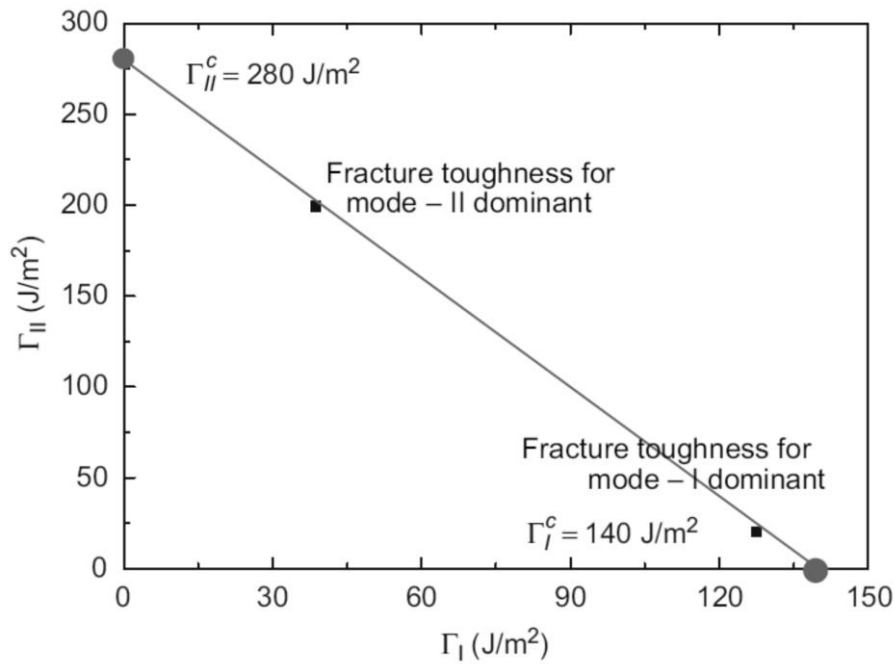


Figura 30 - Extrapolação linear dos resultados dos ensaios em solitação de modo misto (Lee et al. [71])

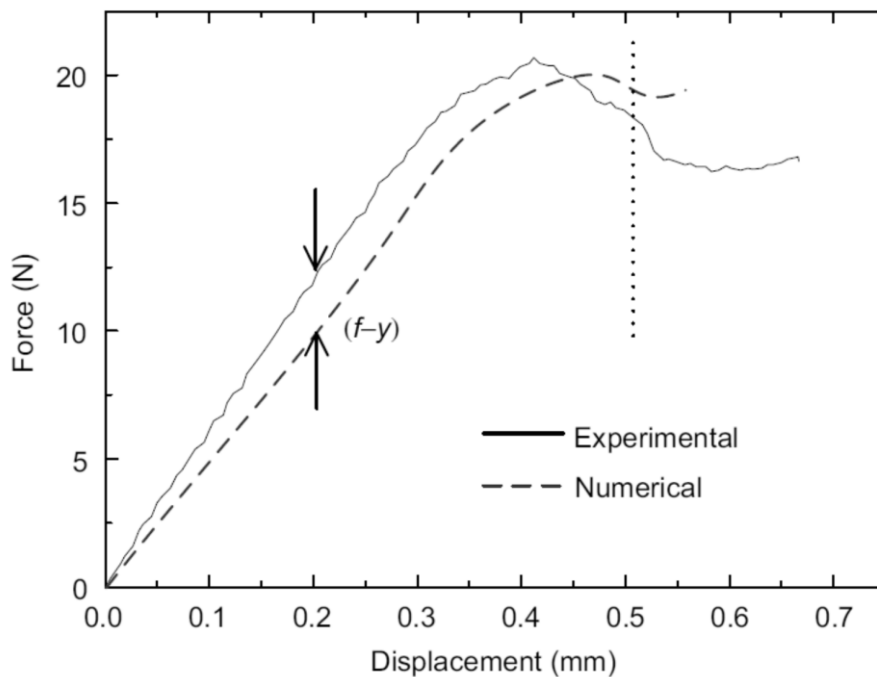


Figura 31 - Erro definido por KM , pela comparação de dados de Elementos Finitos e experimentais (Lee et al. [71])

Foi definida uma função para o erro como a diferença de carga entre as curvas numérica e experimental, em diferentes valores pré-estabelecidos de δ dentro da faixa de teste.

Os parâmetros das leis de dano coesivo a serem definidos em tração e corte puros foram então estimados por um algoritmo de otimização não linear, o algoritmo de programação quadrática sequencial, para minimização do desvio dos valores experimentais e numéricos. Foram considerados os valores obtidos dos parâmetros em cada modo puro de carregamento, para construir as leis de tração e corte. A validação das leis propostas foi realizada considerando dois ensaios em solitação combinada (Figura 32), por comparação dos resultados dos testes e simulações de Elementos Finitos com os parâmetros previamente definidos.

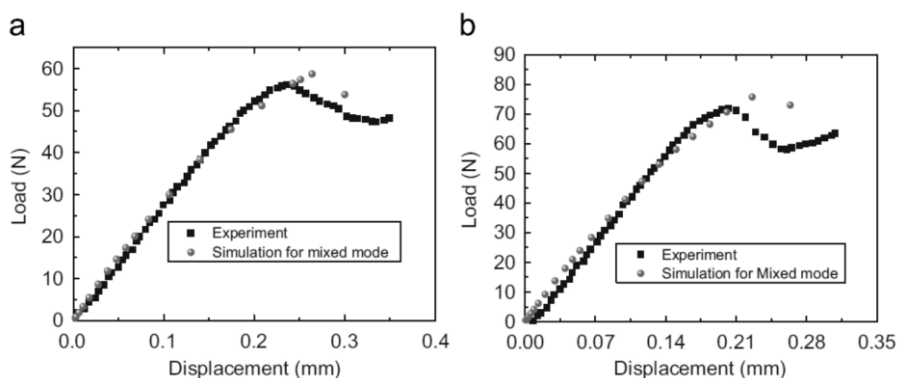


Figura 32 - Curvas $P-\delta$ dos ensaios SLB em solitação combinada: espessura do substrato de 1,28 mm (a) e 1,48 mm (b) (Lee et al. [71])

A comparação das curvas dos ensaios SLB, mostra que existem erros máximos de $\approx 5\%$ para ambas as condições de modelação. Os dados obtidos das solitações combinadas para as duas condições relatadas, foram sobrepostos no gráfico da Figura 30 e coincidem perfeitamente na relação linear proposta. De acordo com estes autores, a partir dos resultados globais, o procedimento proposto descreve com precisão o comportamento da fratura de juntas em solitação de modo misto, mostrando a vantagem da não realização de dois testes separados, como normalmente é feito (por exemplo DCB para tração e ENF para corte).

2.4.3.3 Método direto

Pelo método direto, a lei de dano coesivo e a respetiva forma para um determinado material ou interface, podem ser estimadas com precisão pela diferenciação das curvas $G_I-\delta_h$ ou $G_{II}-\delta_s$. Nesta secção, é feita uma distinção entre a estimativa da lei em tensão (ensaio DCB) e em corte (ensaio ENF).

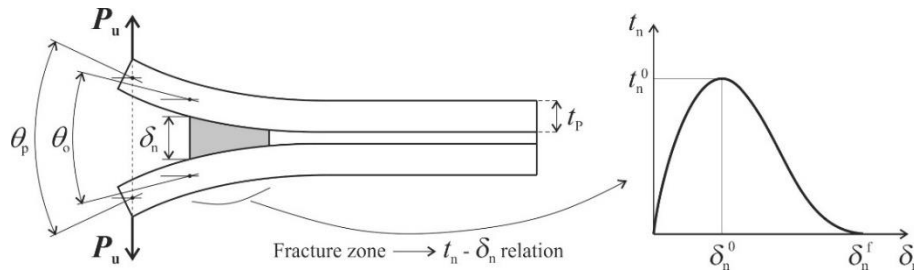


Figura 33 - Provete DCB sob carga, com descrição dos parâmetros de análise [72]

Para o ensaio DCB (Figura 33), a independência de trajetória do integral J pode ser usada para extrair relações entre a carga aplicada e a lei coesiva do percurso da fratura (Stigh et al. [73]). Com base na expressão fundamental para J definida por Rice [74], é possível derivar uma expressão para o valor de G_I aplicado ao provete DCB, a partir do conceito de força energética e também pela teoria de vigas para esta geometria em particular, como se segue (as seguintes fórmulas são desenvolvidas assumindo que a integral J fornece uma medida de G_I) [75],

$$G_I = 12 \frac{(P_u a)^2}{E_a t_p^3} + P_u \theta_o \quad \text{ou} \quad G_I = P_u \theta_p, \quad (10)$$

onde P_u representa a carga aplicada na extremidade dos provetes por unidade de largura, E_a é o módulo de Young dos substratos, θ_o é a rotação relativa dos substratos na extremidade da fenda e θ_p é a rotação relativa dos substratos na linha de carga. No trabalho de Campilho et al. [76], foi utilizado θ_o em vez de θ_p nesta equação, devido a uma extração mais simples do parâmetro pelo método ótico. O integral J pode ser calculado ao longo de um percurso arbitrário que circunda o início da camada adesiva, resultando em [73]

$$G_I = \int_0^{\delta_n^f} t_n(\delta_n) d\delta_n, \quad (11)$$

onde δ_n^f é medido na extremidade inicial da fratura. G_{Ic} pode ser considerado o valor de G_I no início da propagação de fenda. Assim, G_{Ic} é dado pelo valor de patamar de G_I , obtido durante a propagação estável da fenda [77].

A curva $t_n(\delta_n)$ pode ser facilmente obtida por diferenciação da seguinte equação em relação a δ_n ,

$$t_n(\delta_n) = \frac{\partial G_I}{\partial \delta_n}. \quad (12)$$

Como resultado, o procedimento de uma experiência é medir a evolução de P , a , δ_n e θ_o . A lei coesiva em tensão pode então ser estimada obtendo G_I pela equação anterior, ou por ajuste polinomial da curva obtida e diferenciação [73].

No trabalho de Constante et al. [78] foi realizado um trabalho experimental, com o objetivo de estimar G_{Ic} de juntas adesivas pelo ensaio DCB. Foi utilizado o integral J, uma vez que permite obter a lei de dano coesivo. Foi desenvolvido um método de medição ótico para avaliar o deslocamento da extremidade da fenda (δ_n) e a rotação dos substratos (θ_0). As leis de dano coesivo obtidas daquele trabalho, representadas na Figura 34, resultaram numa forma aproximadamente triangular para o adesivo frágil, e trapezoidal para os adesivos dúcteis testados.

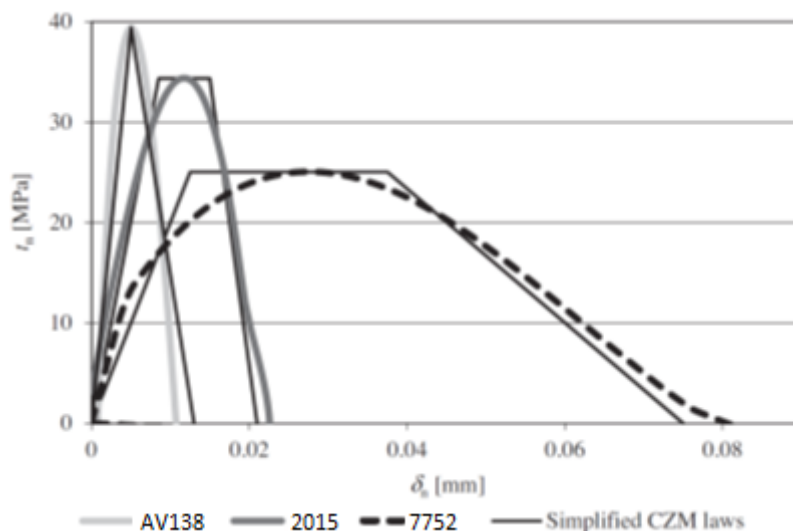


Figura 34 – Leis coesivas representativas à tração para o adesivo frágil (AV138) e dúctil (2015 e 7752) [78]

De seguida (ver Figura 35) descreve-se o método direto para G_{Ic} , e estimativa da lei coesiva por ensaios ENF [77, 79, 80].

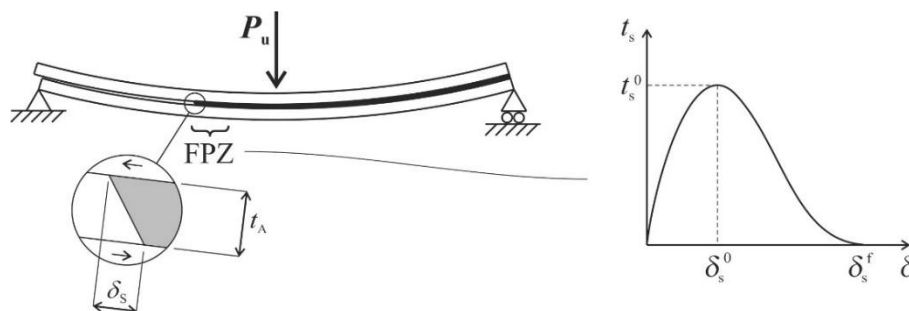


Figura 35 - Provete ENF sob carga, com descrição dos parâmetros de análise [81]

Esta técnica baseia-se na medição simultânea do integral J e δ_s . O integral J é adequado ao comportamento elástico não-linear dos materiais, mas permanece aplicável para cargas plásticas monótonas, como é o caso do ensaio ENF. A expressão de avaliação G_{II} proposta, resulta da utilização de caminhos de integração alternativos para extrair o integral J , Rice [74], resultando na seguinte expressão em forma fechada para o cálculo

de G_{II} [80],

$$G_{II} = \frac{9}{16} \frac{(P_u a)^2}{E_a t_p^3} + \frac{3}{8} \frac{P_u \delta_s}{t_p}, \quad (13)$$

onde P_u é medido no cilindro de carga. O primeiro termo corresponde à solução da Mecânica da Fratura Linear Elástica. O segundo termo refere-se à influência de uma camada adesiva flexível, e pode dar uma grande contribuição para G_{II} [80]. A precisão desta expressão requer a verificação do comportamento elástico linear dos substratos, durante a definição da geometria dos provetes e verificado após cada teste realizado. Similarmente ao provete DCB, analisando o integral J em torno da região de dano ou da zona de processo de fratura da camada adesiva, é possível descrever que,

$$G_{II} = \int_0^{\delta_s^f} t_s(\delta_s) d\delta_s. \quad (14)$$

Esta equação dá uma relação direta entre o estado de tensão na extremidade da fenda e G_{II} . A evolução de G_{II} com δ_s é a seguinte: antes da propagação da fenda, G_{II} aumenta até alcançar G_{IIc} . Nesta fase, a fenda começa a propagar. G_{IIc} é assim obtido pelo valor de estado estacionário de G_{II} no gráfico de G_{II} - δ_s . Este ponto, no gráfico, corresponde ao início de formação de uma fenda. A lei $t_s(\delta_s)$ ou a lei coesiva de corte da camada adesiva é assim estimada por ajuste da curva G_{II} - δ_s resultante, e diferenciação em relação a δ_s [80],

$$t_s(\delta_s) = \frac{\partial G_{II}}{\partial \delta_s}. \quad (15)$$

A diferenciação pode ser realizada por funções polinomiais ou por séries de Prony aos dados de G_{II} . Esta última técnica é recomendada quando as expressões polinomiais revelam aproximações grosseiras dos dados experimentais [77]. Devido aos efeitos de compressão e fricção nas faces de fratura do provete ENF, comprometendo eventualmente a precisão da lei coesiva, alguns autores, como Zhu and Liechti [79], consideraram o método de teste de Arcan, para obter a lei coesiva de corte de camadas finas de adesivos.

DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

3.2 Trabalho numérico

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

Neste capítulo pretende-se descrever os materiais, técnicas utilizadas e obtenção das leis coesivas dos adesivos pelo método direto no trabalho experimental, assim como a obtenção da resistência máxima experimental das juntas *scarf*.

3.1.1 Materiais utilizados

Em relação aos materiais, utilizaram-se substratos em alumínio e vários adesivos, com o objetivo de testar a precisão dos modelos de dano coesivo em diferentes condições.

3.1.1.1 Substratos

O material usado como substrato em todas as juntas consiste na liga de alumínio AW6082-T651. Esta liga de alumínio é obtida através de envelhecimento artificial, a uma temperatura de 180°C. A sua seleção deveu-se não só às boas propriedades mecânicas, mas também ao amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada. Esta liga de alumínio foi caracterizada em trabalhos anteriores (Campilho et al. [82]), onde foram definidas as seguintes propriedades: resistência à tração de 324,00±0,16 MPa, módulo de Young (E) de 70,07±0,83 GPa, tensão de cedência de 261,67±7,65 MPa e deformação à tração na rotura de 21,70±4,24%. As curvas tensão-deformação (σ - ϵ) dos substratos de alumínio foram obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [82], e encontram-se representadas na Figura 36. Também está representada a aproximação numérica usada nos modelos de dano coesivo e elementos finitos.

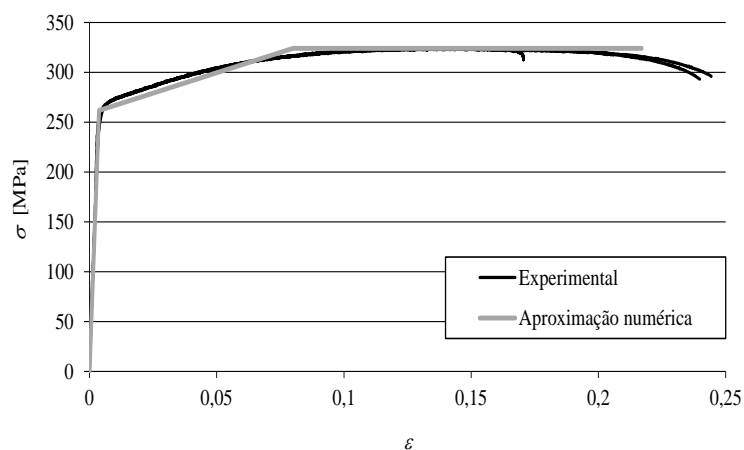


Figura 36 – Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) do alumínio AW6082-T651 [83]

3.1.1.2 Adesivos

Os adesivos selecionados para este trabalho, de forma a cobrir uma gama alargada de ductilidades, foram o adesivo epóxico frágil Araldite® AV138, o adesivo epóxico moderadamente dúctil Araldite® 2015 e o adesivo poliuretano dúctil Sikaforce® 7752. As propriedades dos adesivos usados neste trabalho foram determinadas em trabalhos anteriormente realizados, e são representados de seguida.

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138/HV988 é um adesivo frágil, conforme se pode observar nas curvas σ - ϵ da Figura 37. Trata-se de um adesivo epóxico, que se apresenta sob a forma de líquido de dois componentes, a resina Araldite® AV138M-1 e o endurecedor HV988. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100 g / 40 g, respetivamente. Estas informações foram retiradas da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante. Na Tabela 1 apresentam-se as propriedades mecânicas e de fratura relevantes relativas ao adesivo.

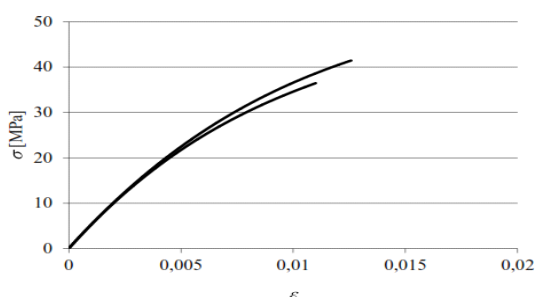


Figura 37 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Araldite® AV138 [84]

Tabela 1 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [84]

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

Em que, os valores com ^a são valores do fabricante e os valores com ^b são valores estimados no trabalho de Campilho et al. [82].

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

Este adesivo é caracterizado como um adesivo epóxico estrutural de dois componentes, com ductilidade moderada, e com bom comportamento quando sujeito à tração ou ao corte. Como se trata de um adesivo dúctil, em junta adesiva permite alguma redistribuição das concentrações de tensões nas extremidades da camada de adesivo, o que se traduz numa resistência na junta muito aceitável. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 1/1 em peso.

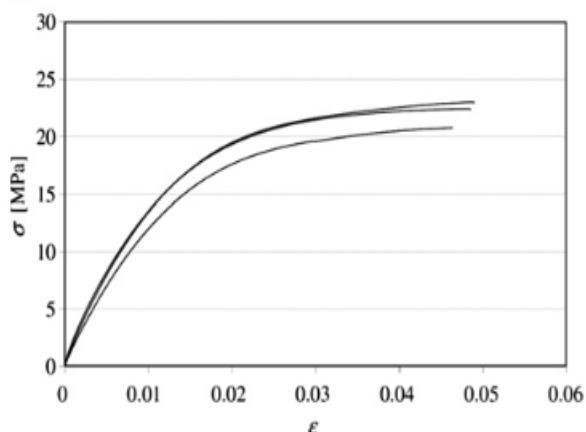


Figura 38 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Araldite® 2015 [85]

A Figura 38 mostra as curvas σ - ϵ para este adesivo, que foram obtidas no trabalho de Campilho et al. [85].

Tabela 2 - Propriedades mecânicas e de fratura do Araldite® 2015 [85, 86]

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	$1,85 \pm 0,81$
Coefficiente de Poisson, ν	0,33 ^a
Tensão de Cedência à tracção, σ_y [MPa]	$12,63 \pm 0,61$
Tensão de Rotura à tracção, σ_f [MPa]	$21,63 \pm 1,61$
Deformação de Rotura à tracção, ϵ_f [%]	$4,77 \pm 0,15$
Módulo de corte, G [GPa]	$0,56 \pm 0,21$
Tensão de Cedência ao corte τ_y [MPa]	$14,6 \pm 1,3$
Tensão de Rotura ao corte, τ_f [MPa]	$17,9 \pm 1,8$
Deformação de Rotura ao corte, γ_f [%]	$43,9 \pm 3,4$
Tenacidade à Tracção, G_{IC} [N/mm]	$0,43 \pm 0,02$
Tenacidade ao Corte, G_{IIC} [N/mm]	$4,7 \pm 0,34$

Na Tabela 2 estão apresentadas as propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo, em que os valores com ^a foram fornecidos pelo fabricante.

Comparando os valores deste adesivo com os do Araldite® AV138, verifica-se que a deformação de rotura ao corte é quase seis vezes superior. Por outro lado, a tensão de rotura ao corte e à tração do Araldite® AV138 é praticamente o dobro do Araldite® 2015.

3.1.1.2.3 SikaForce® 7752

O adesivo SikaForce® 7752 é um adesivo dúctil, conforme se pode observar nas curvas σ - ϵ da Figura 39.

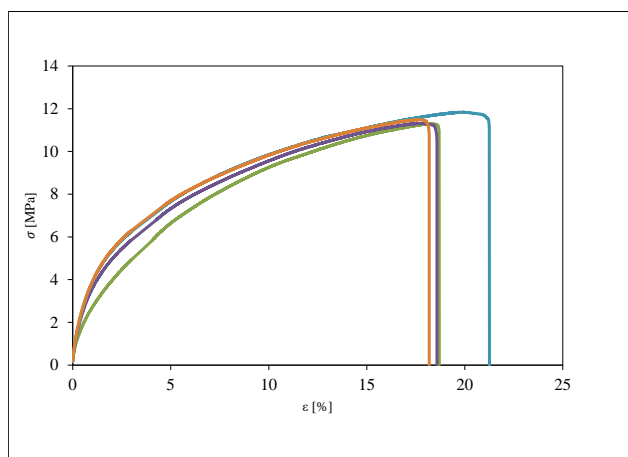


Figura 39 – Curvas σ - ϵ de provetes maciços de SikaForce® 7752 [87]

Trata-se de um adesivo à base de poliuretano, que se apresenta sob a forma de dois componentes, resina e endurecedor. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100 g / 20 g, respetivamente. Estas informações foram retiradas da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo SikaForce® 7752 [87]

Propriedades	SikaForce® 7752 L60
Módulo de Young, E [MPa]	493,81 ± 89,6
Coefficiente de Poisson, ν	0,33 ^a
Tensão de Cedência à tração, σ_y [MPa]	3,24 ± 0,5
Tensão de Rotura à tração, σ_f [MPa]	11,49 ± 0,3
Deformação de Rotura à tração, ϵ_f [%]	19,18 ± 1,4
Módulo de corte, G [MPa]	187,75 ± 16,4
Tensão de Cedência ao corte, τ_y [MPa]	5,16 ± 1,1
Tensão de Rotura ao corte, τ_f [MPa]	10,17 ± 0,6
Deformação de Rotura ao corte, γ_f [%]	54,82 ± 6,4
Tenacidade à Tração, G_{IC} [N/mm]	2,36 ± 0,2
Tenacidade ao Corte, G_{IIC} [N/mm]	5,41 ± 0,5

Na Tabela 3 apresentam-se as propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo, em que os valores com ^a foram fornecidos pelo fabricante.

Em função das propriedades obtidas, é expectável que a resistência de juntas adesivas coladas com este adesivo seja elevada, pois este adesivo combina uma resistência muito aceitável com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Assim, são permitidas tensões elevadas na camada de adesivo, bem como um efeito acentuado de plastificação sem rotura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência.

3.1.2 Geometria das juntas

As juntas ensaiadas para este trabalho experimental foram realizadas em trabalhos anteriores [1, 72, 88, 89] e são de três configurações diferentes, que a seguir se descrevem. Para a realização dos ensaios DCB foram fabricadas dezoito juntas, sendo seis para cada um dos três tipos de adesivo.

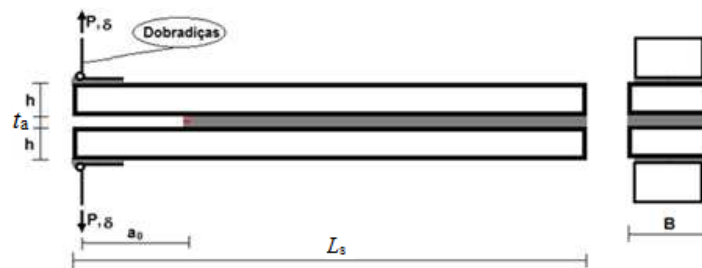


Figura 40 – Esquema do ensaio DCB [88]

Os provetes DCB (Figura 40) têm largura (B) de 27 mm, comprimento (L_s) de 143 mm e espessura (h) de 3 mm. O comprimento de pré-fenda é de +/-55 mm (a_0). A carga é aplicada à tração na extremidade, como se pode observar pela representação das setas. A espessura de adesivo (t_a) é de 0,2 mm [88].

Para a realização dos ensaios ENF, foram fabricadas vinte e quatro juntas, oito para cada um dos três tipos de adesivo.

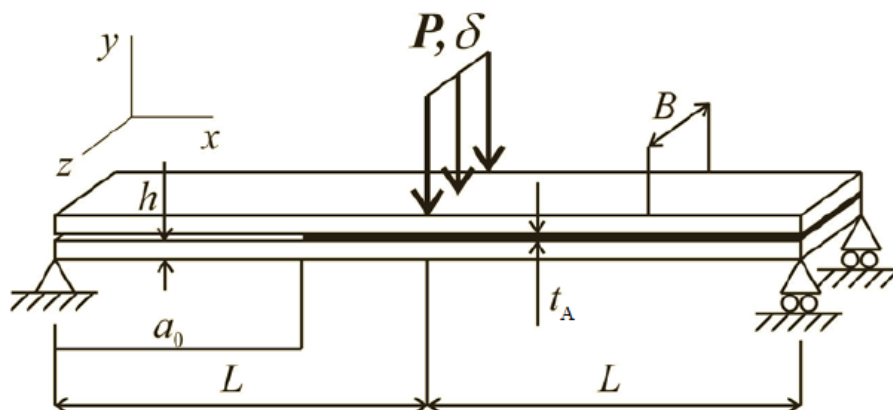


Figura 41 – Esquema do ensaio ENF [89]

Os provetes ENF (Figura 41) têm largura (B) de 25 mm, comprimento (L) de 100 mm e espessura (h) de 3 mm. O comprimento de pré-fenda é de ± 60 mm (a_0). A carga é aplicada a meio vão, o que provoca flexão e esforço de corte nos substratos, mas no adesivo só provoca esforço de corte. A espessura de adesivo t_a é de 0,2 mm. Os valores de a_0 são variáveis uma vez que, como será apresentado posteriormente, a colocação de espaçadores com uma lâmina para criação de uma pré-fenda, apesar de ser um método recorrente, revela um problema: a lâmina colocada apresenta um raio de curvatura na sua extremidade que não pode ser desprezado, uma vez que uma fenda teoricamente não o possui. Deste modo, para se conseguir uma pré-fenda real, teve que se propagar a pré-fenda original manualmente, o que origina variações entre provetes [89].

Para a realização dos ensaios com juntas *scarf* (juntas de chanfro interior), foram fabricados 10 provetes para cada ângulo de *scarf* (α).

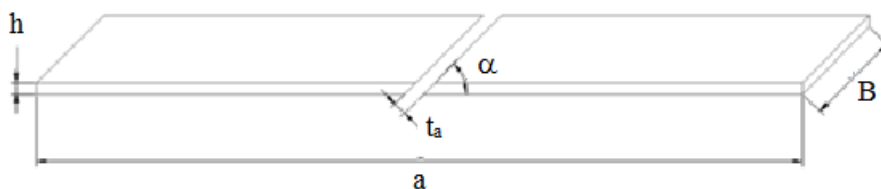


Figura 42 - Provete *scarf* ou de chanfro interior

O provete *scarf* (Figura 42) tem comprimento (a) de 200 mm, largura (B) de 25 mm, a espessura da camada de adesivo (t_a) é de 0,2 mm, a espessura dos substratos (h) é de 3 mm e o ângulo (α) tem valores de $3,43^\circ$, 10° , 15° , 20° , 30° ou 45° [1].

3.1.3 Processo de fabrico

3.1.3.1 Provetes DCB e ENF

Todos os provetes para os ensaios DCB foram fabricados a partir de chapa de 3 mm de espessura. Os substratos utilizados para os ensaios ENF nos vinte e quatro provetes foram obtidos também a partir de chapa de 3 mm de espessura, adquirida em tiras de 25 ± 1 mm de largura. No entanto, devido à inviabilidade de execução de furos em chapa de espessura tão reduzida, para solicitar os provetes em modo I, optou-se por colar dobradiças em aço na extremidade não colada dos provetes, para se proceder à solicitação. Os substratos de juntas DCB e ENF foram obtidos por corte realizado numa máquina de disco (Figura 43) existente nas Oficinas Mecânicas do ISEP, a partir de tiras já fornecidas com o valor de B desejado [72, 88, 89].



Figura 43 - Disco de corte [88]

Para a preparação da superfície, efetuou-se uma decapagem mecânica nos substratos dos provetes DCB e ENF, numa granalhadora *Cidblast RT6S* (Figura 44), de modo a remover camadas de óxido, aumentar a rugosidade superficial, a área de contacto e a molhabilidade, para posteriormente melhorar o processo de colagem.



Figura 44 – Granalhadora Cidblast RT6S [88]

Após este procedimento, todos os substratos foram submetidos a um processo passivo

químico de desgorduramento com solvente (acetona), de modo a remover manchas de gordura ou partículas abrasivas da granalhadora, potenciadores de fraca molhagem. O processo consistiu em aplicar solvente num papel de limpeza, até este ficar saturado, e depois efetuar várias passagens com este sobre os provetes nos locais abradidos, até a sujidade do papel e substrato desaparecerem [72, 88, 89].

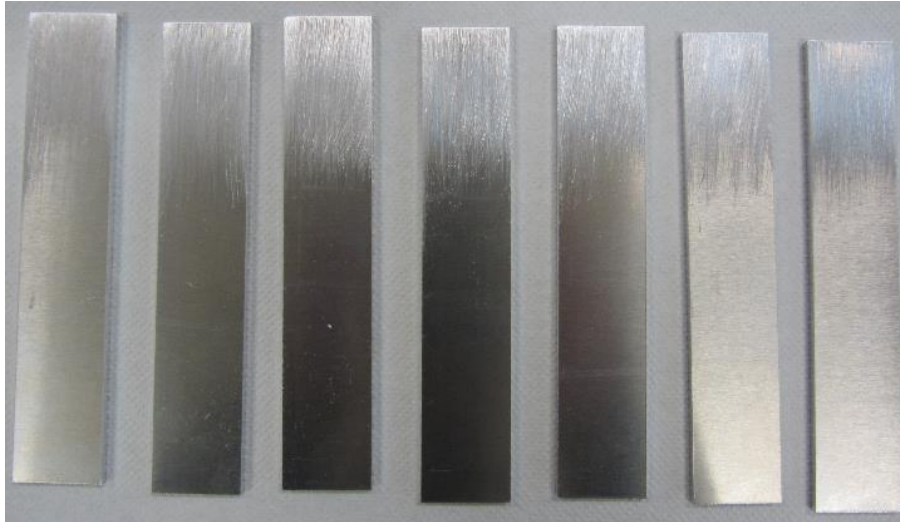


Figura 45 - Substratos após o processo passivo químico [88]

Nos provetes DCB e ENF, os espaçadores foram colocados segundo o esquema da Figura 46.

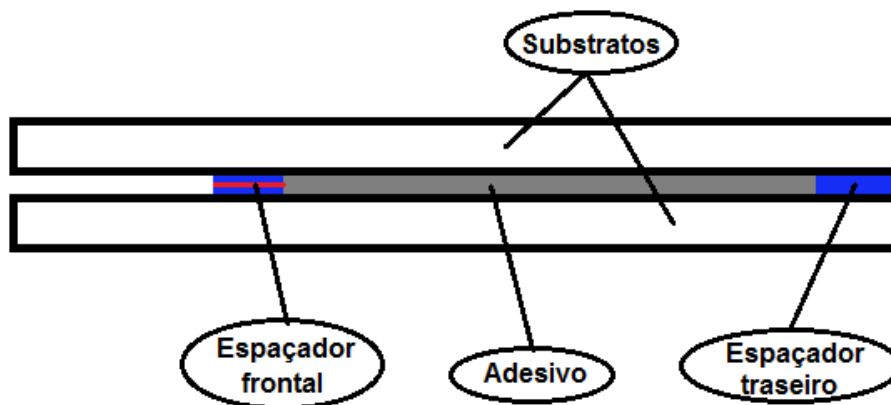


Figura 46 - Esquema de aplicação dos espaçadores [88]

Os espaçadores são utilizados para garantir um valor constante de t_a e também para promover a criação da pré-fenda. Nos provetes DCB e ENF foram usados dois espaçadores calibrados por cada provete, um traseiro, que permite assegurar uma espessura constante de adesivo, no caso de 0,2 mm, e um frontal, que para além de contribuir para a espessura constante de adesivo, permite também criar uma pré-fenda.

O espaçador traseiro foi fabricado a partir de uma fita de aço calibrada com 0,2 mm de espessura e 30 mm de largura. No fabrico do espaçador frontal, utilizou-se o método proposto por Lee et al. [90], que consiste na utilização de uma lâmina de barbear com 0,1 mm de espessura interposta entre duas fitas de aço calibradas com 0,05 mm de espessura cada, deixando-se o gume da lâmina de barbear ligeiramente adiantado em relação às duas fitas para a criação da pré-fenda, tal como ilustrado na Figura 47 [72, 88, 89].



Figura 47 - Lâmina utilizada no espaçador frontal [88]

A preparação dos três adesivos usados não é feita da mesma forma. Deste modo, para o Araldite® 2015 é introduzido um cartucho de dois componentes numa pistola adequada, que impulsiona a resina e endurecedor, fazendo-os convergir num bico onde ocorre a mistura dos componentes. A deposição do adesivo foi feita sob a forma de linhas transversais ao provete, de modo a preencher quase a totalidade da área a colar, como se apresenta na Figura 48 [72, 88, 89].



Figura 48 - Aplicação do adesivo Araldite® 2015 [88]

Os adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752 são fornecidos em duas embalagens, de resina e endurecedor. Misturaram-se manualmente e pesaram-se os dois componentes

na balança digital, na razão mássica de 2,5:1 no caso do adesivo Araldite® AV138, e de 5:1 no caso do adesivo SikaForce® 7752, homogeneizando-se a mistura no final com uma espátula (ver Figura 49). A ativação dos adesivos ocorreu após mistura dos dois componentes. A deposição foi feita também com a espátula, realizando várias passagens e depositando uma quantidade de adesivo suficiente, para que este fosse expelido da zona de ligação quando pressionado, de modo a evitar vazios ou porosidades nessa zona.



Figura 49 - Pesagem e mistura dos componentes dos adesivos [72]

Nos provetes DCB e ENF, os espaçadores não podem conter adesivo em nenhuma das duas faces, caso contrário, iria aumentar o valor pretendido de t_a . Assim, estes provetes foram alvo de especial atenção, a fim de evitar qualquer deslocamento da posição pretendida e adição de adesivo nas faces dos espaçadores. No espaçador frontal foi necessário adicionar adesivo suficiente, de modo a envolver superiormente e inferiormente o gume da lâmina, que está adiantado, mas evitando também a deposição de adesivo nas faces exteriores do espaçador. Os substratos dos provetes DCB e ENF foram colocados sobre barras de madeira revestidas com folha de Teflon®, de modo a evitar que os excessos de adesivo colassem os provetes à madeira. Após a aplicação do adesivo, os provetes são imobilizados com recurso a grampos, de modo a garantir a espessura desejada de adesivo. Em todos os casos, foi necessário efetuar um reajuste da posição dos substratos, devido a desalinhamentos decorrentes da colocação dos grampos (Figura 50 e Figura 51).

A cura dos adesivos foi realizada tendo em consideração as especificações dos fabricantes, isto é, à temperatura ambiente, durante pelo menos uma semana para cada adesivo. Após a cura completa dos adesivos, retiraram-se os excessos dos bordos de todos os provetes com auxílio de uma furadora equipada com mó abrasiva. Este procedimento é realizado de modo a permitir uma correta visualização da propagação da fenda (caso dos ensaios dos provetes DCB e ENF), e evitar resultados adulterados

relativamente às geometrias teóricas que não contemplam os excessos de adesivo [72, 88, 89].



Figura 50 - Imobilização dos provetes DCB [88]



Figura 51 - Imobilização dos provetes ENF [89]

3.1.3.2 *Provetes scarf*

Os substratos foram obtidos a partir de barras de alumínio com cerca de 140 mm de comprimento, 25 mm de largura e 3 mm de espessura. A matéria-prima foi cortada de forma a obter as dimensões dos provetes anteriormente definidas. Uma das extremidades dos substratos foi maquinada numa fresadora, (Figura 52 e Figura 53), para obter o chanfro interior com a inclinação desejada.



Figura 52 - Máquina Fresadora de eixo vertical [1]



Figura 53 - Maquinagem dos substratos de alumínio [1]

As rampas dos substratos foram realizadas nas oficinas do ISEP, através de uma fresadora GambinSA, modelo 1m, que trabalhou com um avanço de 10 mm/min., a uma velocidade de rotação de 1120 rpm, usando uma fresa Dormer S142 Alu. S.D.S Carbide 12.00K10 Micrograin, de forma a garantir o ângulo desejado. Para fixar o substrato, utilizou-se uma prensa sobre a mesa da fresadora.

De seguida, os substratos foram decapados na granalhadora Cidblast RT6S com granalha de alumina, disponível no Laboratórios de Ensaios Mecânicos do ISEP.

Procedeu-se à limpeza com acetona, que é um processo passivo químico e que tem como objetivo o desgorduramento da superfície, remoção de poeiras, óleos, humidades e de camadas frágeis de óxidos que pudessem estar presentes nas superfícies. Este processo é de extrema importância, e deve ser realizado com o devido cuidado, pois deste modo garante-se uma superfície com melhores características de molhabilidade, o que permite uma maior área de contato entre aderentes e adesivo.

Para a colagem e aplicação do adesivo Araldite® 2015, recorreu-se ao uso de uma pistola com bico de mistura do adesivo bi-componente. Depois de efetuada a colagem dos substratos aguardou-se alguns dias para garantir que o adesivo se encontrava devidamente curado. Para se garantir que t_a não se altera durante o processo de cura, aplicaram-se grampos para ser exercida pressão entre os dois substratos (Figura 54 e Figura 55).



Figura 54 - Imobilização de um dos provetes scarf [1]

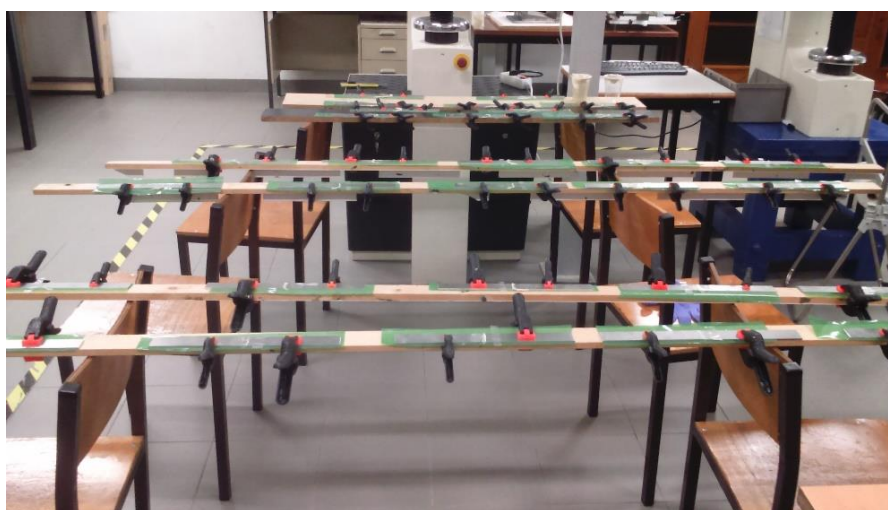


Figura 55 - Imobilização dos provetes fabricados [1]

Após o adesivo estar curado, é necessário remover o excedente de adesivo que ficou nos substratos. A remoção do excedente de adesivo foi efetuada recorrendo-se ao uso de uma mó, aplicada na furadora “EFI Máquinas”, modelo FB3c (Figura 56).

Após a remoção do adesivo, dá-se uma limpeza ligeira com acetona, de modo a remover poeiras, óleos e humidades que pudessem estar presentes nas superfícies. Foram produzidos cinco provetes para cada ângulo, perfazendo um total de trinta provetes para cada adesivo.



Figura 56 - Máquina furadora [1]

3.1.4 Ensaio das juntas

As juntas foram ensaiadas no equipamento de ensaios Shimadzu AG-X, disponível no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP, com célula de carga de 100 kN. Na Figura 57, a máquina encontra-se na configuração genérica para realizar ensaios de tração, utilizada nos ensaios DCB e ensaios para as juntas *scarf*. Para ENF, esta foi adaptada para realizar ensaios de flexão em três pontos.

O equipamento encontra-se ligado a um sistema de aquisição de dados que regista o tempo de ensaio, carga aplicada e deslocamento das maxilas ou punção de solitação do equipamento, consoante o ensaio. Tais valores serão usados na elaboração das curvas $P-\delta$. Todos os ensaios foram realizados em condições de temperatura e humidade ambiente [91].



Figura 57 - Máquina de ensaios mecânicos [91]

3.1.4.1 *Provetes DCB*

Os ensaios destes provetes foram realizados segundo a configuração representada na Figura 58.



Figura 58 - Configuração da máquina para ensaio DCB [88]

Os provetes foram tracionados através das dobradiças colocadas nas extremidades dos

substratos, de modo a tornar possível a solicitação em modo puro de tração. Os provetes foram solicitados a uma velocidade de ensaio de 0,5 mm/min, com gravação de dados (P e δ) realizada a uma frequência de 5 Hz. Na realização deste ensaio, recorreu-se a um método ótico para a obtenção de três parâmetros importantes na determinação de G_{Ic} : δ_n , θ_0 e α . Para este efeito, foram tiradas fotos durante o teste dos provetes com 5 segundos de intervalo [88, 91].

3.1.4.2 Provetes ENF

Os provetes ENF foram ensaiados à flexão em três pontos, de acordo com a configuração da Figura 59.

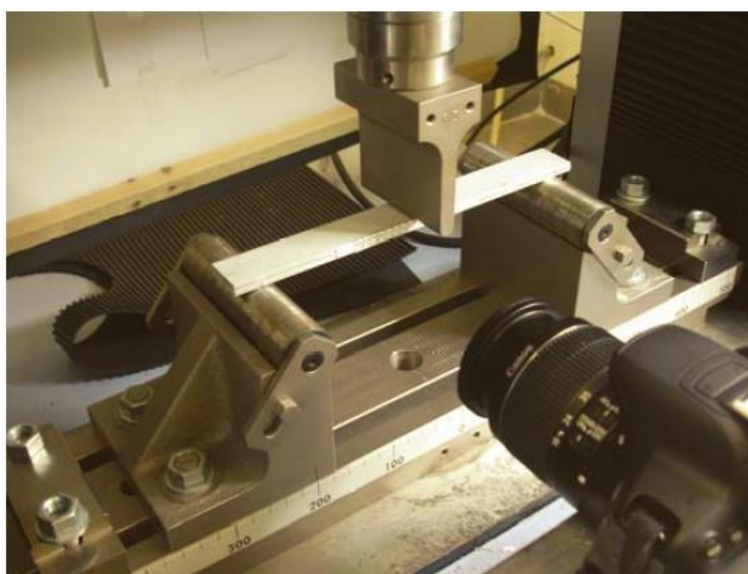


Figura 59 - Configuração da máquina para ensaio ENF [89]

Como se observa na Figura 59, foi usado um dispositivo inferior com dois rolos para apoio do provete e um dispositivo superior (punção) para aplicação da carga. Durante o ensaio, os rolos de suporte rodam com atrito muito baixo em torno de dois veios fixos, de modo a permitir que o provete se deforme livremente durante o ensaio. A velocidade de ensaio foi escolhida em função do adesivo a ensaiar, tendo esta de ser suficientemente pequena, de forma a permitir a monitorização da fenda, e para que o ensaio decorra em condições quase estáticas. Assim, para o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, foram adotadas respetivamente as seguintes velocidades de ensaio: 0,5 mm/s, 2,0 mm/s e 2,0 mm/s, cuja variação entre adesivos se justifica pelo diferente deslocamento de rotura entre adesivos. São sugeridas, pelo menos, 20-30 medições do valor de α durante a fase de preparação, para construir a curva- R [89].

3.1.4.3 Juntas scarf

Foram realizados cinco ensaios de tração até à rotura, para cada configuração de junta, obtendo-se as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) e os modos de rotura. Os ensaios de tração foram realizados na máquina Shimadzu AG-X com uma célula de carga de 100 kN [1]. As condições de ensaio foram as seguintes:

- Temperatura: ambiente (aproximadamente 18 °C);
- Humidade relativa de 40 %;
- Velocidade de ensaio: 1 mm/min;
- Distância entre maxilas: 220 mm.

3.1.5 Resultados obtidos

Neste subcapítulo é feita a descrição das curvas $P-\delta$ obtidas separadamente para DCB, ENF, scarf e por tipo de adesivo. Segue-se uma breve caracterização dos modos de rotura obtidos para cada tipo de junta e adesivo. Será ainda descrito o método usado para determinação dos valores de G_c e das leis coesivas para cada tipo de junta e adesivo testado.

Nos ensaios realizados em juntas DCB e ENF, ocorreram na maioria das vezes oscilações de rigidez no início das curvas $P-\delta$ registadas. Tal facto acontece devido à flexibilidade e folgas dos equipamentos de ensaio. No entanto, este aspeto foi corrigido através da consideração da rigidez dos provetes na região elástica após o desaparecimento deste efeito, pelo que nas figuras que contêm as curvas $P-\delta$ que se apresentam de seguida, este fenómeno de oscilação de rigidez inicial já não é visível.

Quanto aos ensaios realizados em juntas scarf, não ocorreram oscilações de rigidez no início das curvas $P-\delta$ registadas.

3.1.5.1 Provetes DCB

3.1.5.1.1 Curvas $P-\delta$

A seguir são apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas no ensaio DCB para os três adesivos usados. A Figura 60 mostra que nas curvas se observa uma repetibilidade razoável entre provetes, com exceção das juntas AV_1 e AV_4, que se diferenciam pelas quedas abruptas de P durante a fase de propagação da fenda, no decorrer dos ensaios. Este comportamento deve-se à natureza frágil do adesivo, combinada com a elevada rigidez dos substratos [78]. Verifica-se ainda que as curvas $P-\delta$ apresentam um comportamento que se divide em duas fases distintas. A primeira corresponde ao regime elástico, onde P aumenta linearmente com δ . A segunda fase corresponde à propagação da fenda, caracterizada por uma diminuição gradual de P até à rotura total do adesivo, momento em que P cai abruptamente [92].

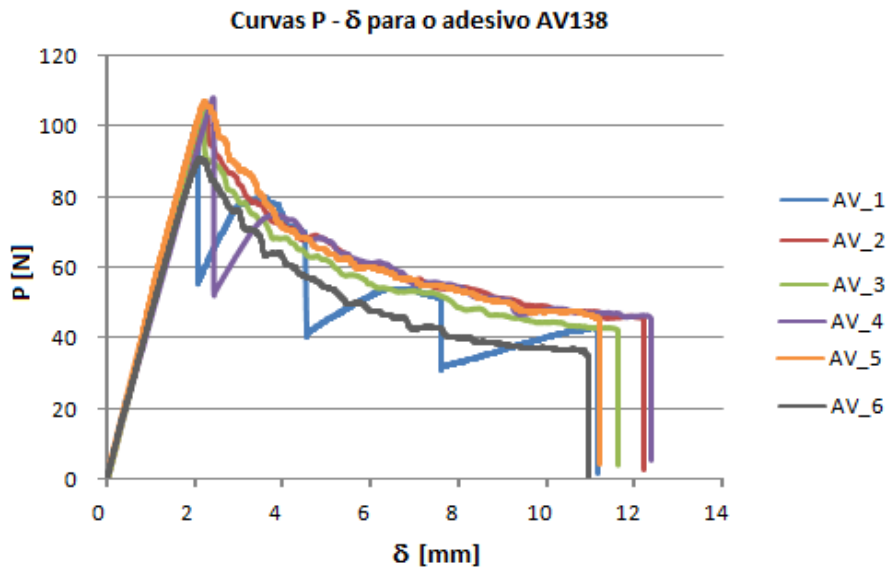


Figura 60 - Curvas $P - \delta$ dos ensaios DCB com o adesivo Araldite® AV138 [88]

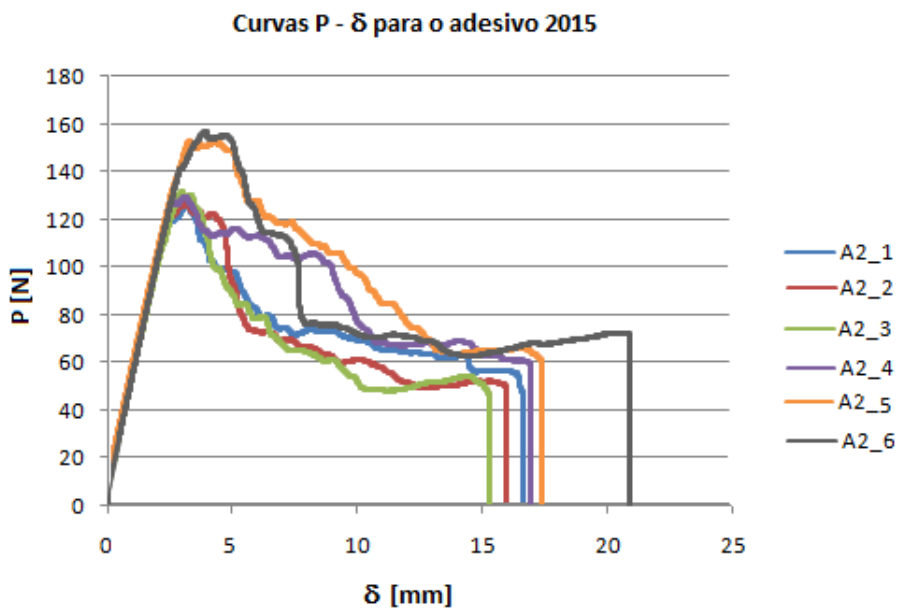


Figura 61 - Curvas $P - \delta$ dos ensaios DCB com o adesivo Araldite® 2015 [88]

A Figura 61 representa as curvas $P - \delta$ obtidas para todos os provetes DCB ensaiados com o adesivo Araldite® 2015. Observa-se uma boa repetibilidade das curvas, no que diz respeito à rigidez elástica, $P_{máx}$ e deslocamento máximo ($\delta_{máx}$) para os primeiros quatro provetes. A exceção verifica-se para os provetes A2_5 e A2_6, que diferem significativamente dos restantes. O A2_5 difere na carga máxima, enquanto o A2_6 difere na carga máxima e valor de $\delta_{máx}$ atingidos. Tal como no adesivo Araldite® AV138, os provetes ensaiados com o Araldite® 2015 apresentam também as mesmas duas fases

distintas no seu comportamento. No entanto, na última fase, verifica-se que a propagação da fenda ocorre com maior estabilidade, dada a ductilidade do adesivo Araldite® 2015.

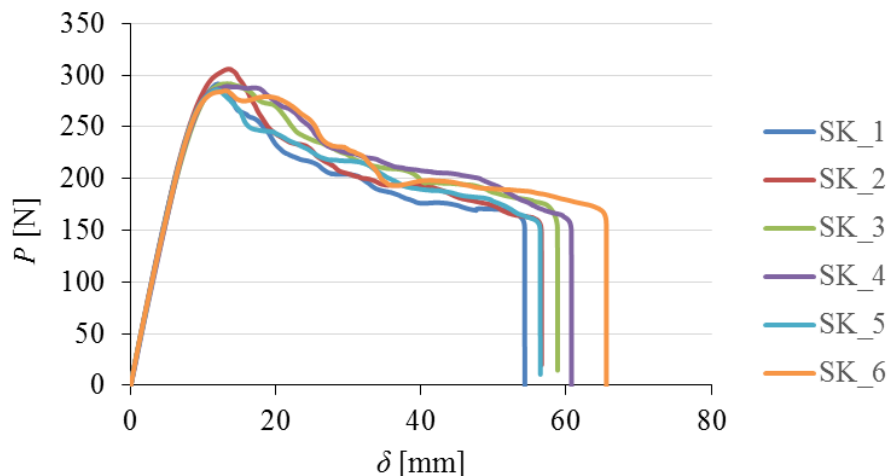


Figura 62 - Curvas P - δ dos ensaios DCB com o adesivo SikaForce® 7752 [72]

A Figura 62 representa as curvas P - δ obtidas para todos os provetes DCB ensaiados, em que se pode observar na generalidade uma boa repetibilidade das curvas, no que concerne à rigidez elástica, $P_{m\acute{a}x}$, $\delta_{m\acute{a}x}$ e comportamento durante a propagação do dano para todos os provetes. Contrariamente aos dois adesivos anteriormente analisados, as curvas P - δ apresentam um comportamento que se divide em três fases. A primeira fase é semelhante, onde P aumenta de forma linear com δ . No entanto, surge uma segunda nova fase, que corresponde à formação da Zona de Processo de Fratura, e que se caracteriza por uma perda de linearidade das curvas na proximidade de $P_{m\acute{a}x}$, bem como pela ocorrência de plastificação do adesivo e irreversibilidade do comportamento do mesmo. Ainda nesta fase, é atingido o valor crítico da energia armazenada, G_{Ic} , que corresponde ao início da fissuração do adesivo. A última e terceira fase, onde se verifica a propagação de fenda, ocorre de forma mais estável do que nos dois adesivos anteriores, uma vez que o SikaForce® 7752 é o adesivo com maior ductilidade do conjunto [72].

3.1.5.1.2 Modos de rotura

A seguir apresentam-se os modos de rotura obtidos para os três adesivos usados. A Figura 63 representa os modos de rotura obtidos no ensaio de provetes DCB com o adesivo Araldite® AV138. Observa-se que em todos os provetes ocorreu uma rotura coesiva, próxima ao plano médio da espessura de adesivo. O tipo de rotura obtido denota a excelente adesão entre adesivo e substratos. De salientar que nos provetes AV_1 e AV_4 existem duas tonalidades, uma delas correspondente à rotura estável e a outra à instável, o que pode ser comprovado também nas curvas P - δ [88].

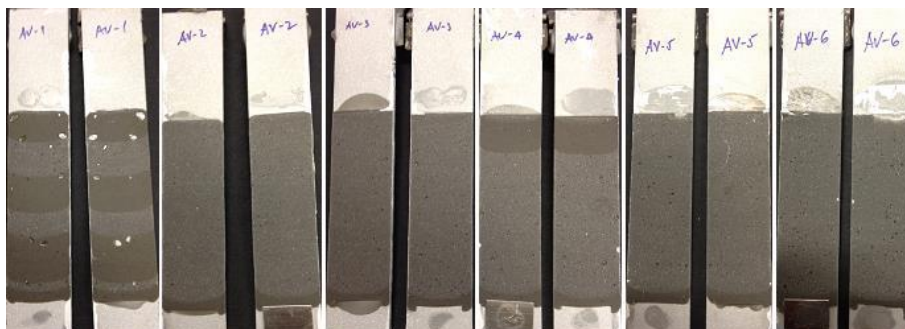


Figura 63 - Modos de rotura dos ensaios DCB com o adesivo Araldite® AV138 [88]

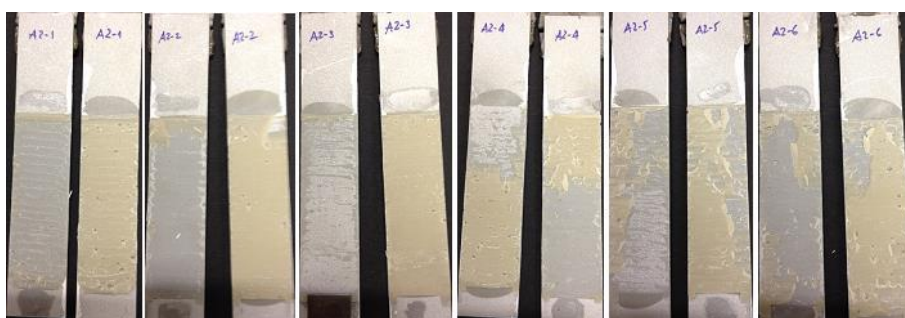


Figura 64 - Modos de rotura dos ensaios DCB com o adesivo Araldite® 2015 [88]

A Figura 64 demonstra os modos de rotura obtidos no ensaio de provetes DCB com o adesivo Araldite® 2015. Observa-se que ocorreram roturas coesivas em todos os provetes testados no adesivo. Nos três primeiros provetes (à esquerda na figura) o adesivo ficou predominantemente num dos substratos. Nos últimos três provetes, a remanescência de adesivo ocorre de forma aproximadamente equitativa em cada um dos substratos. De salientar assim a boa preparação de superfície, que se traduziu na boa adesão entre adesivo e substratos [88].

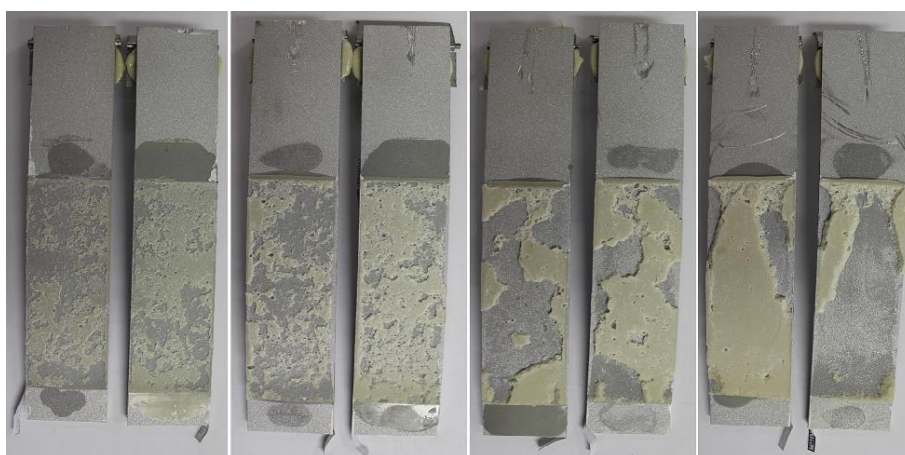


Figura 65 - Modos de rotura dos ensaios DCB com o adesivo SikaForce® 7752 [72]

A Figura 65 representa os modos de rotura obtidos no ensaio de provetes DCB com o adesivo SikaForce® 7752. Observa-se que em todos os provetes se verificam roturas coesivas, com adesivo remanescente em ambos os substratos de cada par de provetes. Nos dois provetes à esquerda, observa-se que o adesivo se encontra distribuído de forma aproximadamente equitativa entre os substratos de cada provete. No entanto, nos dois provetes da direita, a remanescência de adesivo incide com maior frequência apenas num dos provetes [72].

3.1.5.1.3 Determinação de G_{Ic} pelo método direto

O método direto permite determinar a lei coesiva em tração através da diferenciação da curva G_I - δ_n após o ajuste polinomial da mesma. Deste modo, os valores de G_{Ic} foram definidos para cada provete pelo valor de patamar de G_I , obtido da equação (10). A seguir apresentam-se os resultados para os vários ensaios.

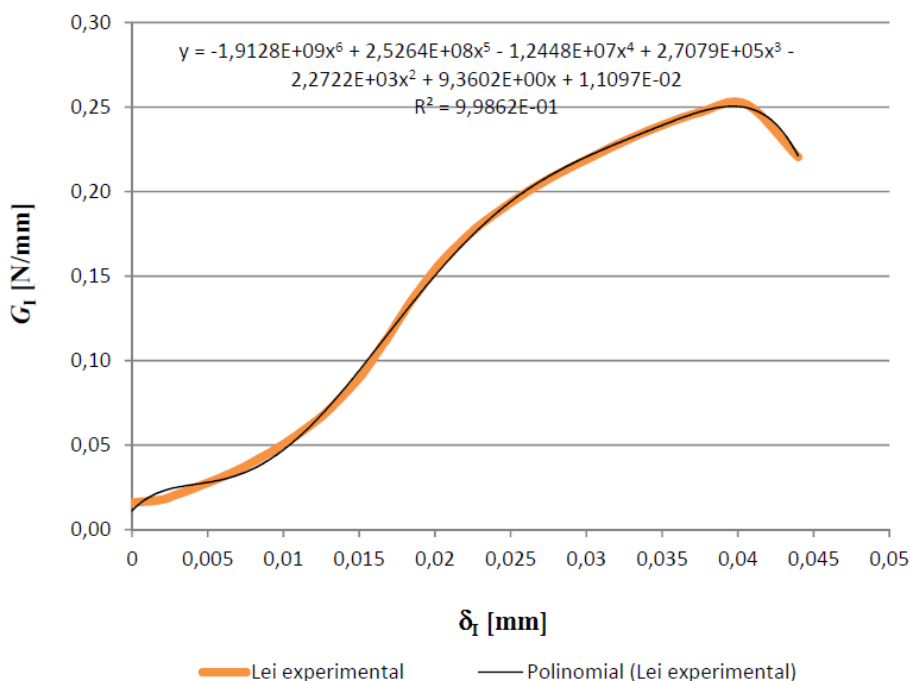


Figura 66 – Exemplo de curva experimental G_I - δ_n obtida a partir de um ensaio DCB com Araldite® AV138 [88]

A Figura 66 representa um exemplo de curva experimental G_I - δ_n obtida de um ensaio DCB com o adesivo Araldite® AV138. Analisando a curva, observa-se que G_I aumenta inicialmente de forma lenta com δ_n , no entanto, para δ_n compreendido entre 0,01 mm e 0,02 mm, ocorre um crescimento rápido de G_I . A partir de $\delta_n=0,02$ mm, a taxa de crescimento de G_I diminui com δ_n , até G_I atingir o valor de patamar. Este valor corresponde ao início de propagação de fenda, e é a partir do qual é estimado G_{Ic} [41]. O valor de G_{Ic} obtido para o provete ensaiado foi de 0,252 N/mm para $\delta_n \approx 0,04$ mm. A curva experimental G_I - δ_n foi semelhante para todos os ensaios. Após obtenção desta lei, foi ajustada uma curva polinomial do grau mais adequado, entre 2 e 6, de forma a obter

a melhor correlação com a curva experimental. O coeficiente de correlação (R^2) indica um ajuste elevado da curva polinomial aos dados experimentais entre 0,96346 e 0,99941, nos ensaios realizados [88].

Tabela 4 – Integral- J obtido de um ensaio DCB com Araldite® AV138 [88]

Provete	Integral – J (G_{Ic})
AV_1	0,224
AV_2	0,252
AV_3	0,231
AV_4	0,329
AV_5	0,237
AV_6	0,197
<i>Média</i>	0,245
<i>Desvio Padrão</i>	$\pm 0,045$

A Tabela 4 sumariza os resultados obtidos pelo método do Integral- J para os provetes testados. Esta mostra uma boa repetibilidade nos valores de G_{Ic} obtidos para cada provete, motivo pelo qual todos os provetes foram validados para análise. Os valores de G_{Ic} obtidos pelo método Integral- J resultam num valor médio de $G_{Ic} = 0,245$ N/mm, com um desvio padrão de $\pm 0,045$ N/mm, correspondente a um desvio percentual de 18,4%. No trabalho de da Silva et al. [93], onde se ensaiaram provetes DCB com substratos em aço DIN St33, obteve-se um valor médio de $G_{Ic} = 0,3459$ N/mm com desvio padrão de $\pm 0,0478$, o que representa uma diferença não desprezável, mas que pode ser justificada por questões relacionadas com o fabrico dos provetes.

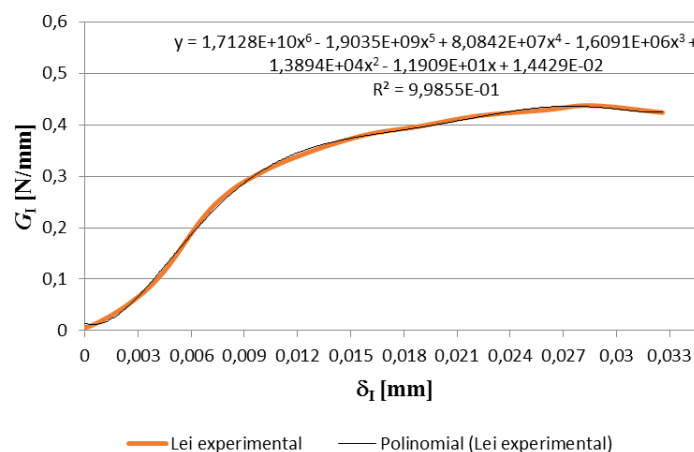


Figura 67 - Exemplo de curva experimental G_I - δ_n obtida a partir de um ensaio DCB com Araldite® 2015 [88]

A Figura 67 representa um exemplo de curva experimental $G_I-\delta_n$ obtida de um ensaio DCB com Araldite® 2015. Observa-se que no início do ensaio o incremento de G_I até cerca de $\delta_n=0,003$ mm é baixo, comparativamente ao verificado entre $\delta_n=0,003$ mm e $\delta_n=0,009$ mm, momento em que ocorre a maior taxa de crescimento de G_I , que é praticamente constante. O valor estacionário de G_I é alcançado para $\delta_n \approx 0,021$ mm. Neste ensaio, o valor de G_{Ic} obtido foi de 0,437 N/mm. Em todos os ensaios, a curva experimental $G_I-\delta_n$ foi representada de forma semelhante, com o ajuste da curva polinomial ao grau mais preciso. O valor de R^2 variou entre 0,96282 e 0,99817 [88].

Tabela 5 - Integral-J obtido de um ensaio DCB com Araldite® 2015 [88]

Provete	Integral - J (G_{Ic})
A2_1	0,437
A2_2	0,434
A2_3	0,494
A2_4	0,456
A2_5	0,665
A2_6	0,712
<i>Média</i>	0,533
<i>Desvio Padrão</i>	$\pm 0,123$

A Tabela 5 sumariza os resultados de G_{Ic} obtidos pelo Integral-J, para o conjunto de provetes ensaiados com o adesivo Araldite® 2015. Os resultados evidenciam uma razoável coerência de valores de G_{Ic} entre os provetes testados, embora inferior à registada com o adesivo anterior, denotada por um desvio padrão de 0,123 N/mm e desvio percentual de 23%. Ainda assim, todos os provetes foram considerados válidos para análise. O valor de G_{Ic} médio obtido dos ensaios realizados foi de 0,533 N/mm. Uma vez que o adesivo em questão foi alvo de estudo por diversos autores, importa fazer uma breve comparação de resultados. Deste modo, no estudo de Campilho et al. [94] realizado em provetes DCB com substratos de compósito unidirecional a 0° de fibra de carbono/epóxido, obteve-se um valor médio de $G_{Ic} = 0,43 \pm 0,2$ N/mm. Já no trabalho de da Silva et al. [93] obteve-se um valor médio de $G_{Ic} = 0,5257 \pm 0,0808$ N/mm. O resultado obtido por Campilho et al. [94] apresenta uma maior discrepância do obtido neste trabalho, principalmente devido às diferenças na geometria dos provetes, com valor inferior de h . O material utilizado nos substratos também revela alguma influência no resultado final.

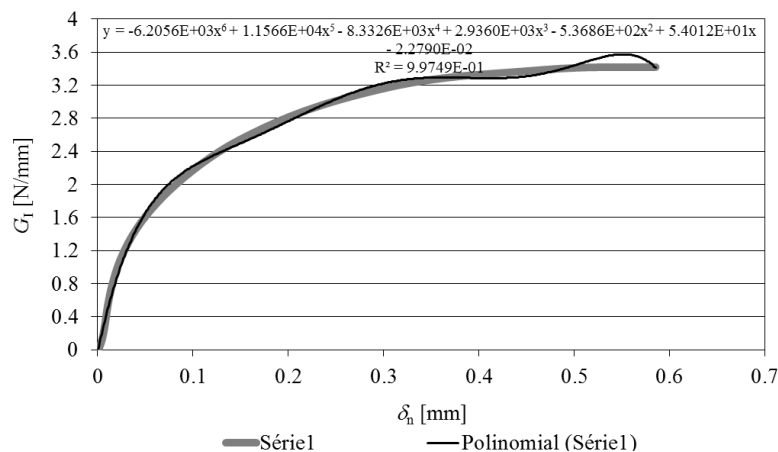


Figura 68 - Exemplo de curva experimental G_I - δ_n obtida a partir de um ensaio DCB com SikaForce® 7752 [72]

Por último, no contexto da determinação de G_{Ic} pelo método direto, a Figura 68 representa um exemplo de curva experimental G_I - δ_n , obtida de um ensaio DCB com SikaForce® 7752. Observa-se que, inicialmente, G_I aumenta de forma praticamente constante com δ_n até um valor de $\delta_n \approx 0,03$ mm. De seguida, a taxa de crescimento de G_I diminui, até que este atinge o seu valor de estado estacionário, que no caso foi de 3,420 N/mm para um valor de $\delta_n = 0,585$ mm. Denota-se ainda que a fase correspondente à estabilização de G_I evidencia uma elevada preponderância, face à mesma fase patente nos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Esta diferença deve-se principalmente à maior ductilidade do adesivo SikaForce® 7752 face aos restantes adesivos [95], o que terá implicações na forma da lei coesiva obtida pelo método direto, apresentada posteriormente.

Tabela 6 - Integral-J obtido de um ensaio DCB com SikaForce® 7752 [72]

Provete	Integral - J (G_{Ic})
SK_1	3,420
SK_2	3,900
SK_3	3,840
SK_4	4,000
SK_5	3,400
SK_6	3,650
<i>Média</i>	3,702
<i>Desvio Padrão</i>	±0,231

A Tabela 6 demonstra os valores de G_{Ic} obtidos pelo método Integral- J , para os provetes DCB ensaiados com o adesivo SikaForce® 7752. Verifica-se uma excelente repetibilidade entre os valores de G_{Ic} obtidos, a melhor registada dos três adesivos em análise, marcada por um desvio padrão de 0,231 N/mm e respetivo desvio percentual de apenas 6,2%, o menor entre os adesivos ensaiados. Deste modo, consideram-se todos os provetes válidos para análise. Do conjunto dos ensaios, obteve-se um valor médio de $G_{Ic}=3,702$ N/mm [72].

3.1.5.1.4 Determinação da lei coesiva em tração

A lei coesiva em tração é determinada pela diferenciação da curva $G_I-\delta_n$ obtida experimentalmente, após o seu ajuste ao grau polinomial mais preciso.

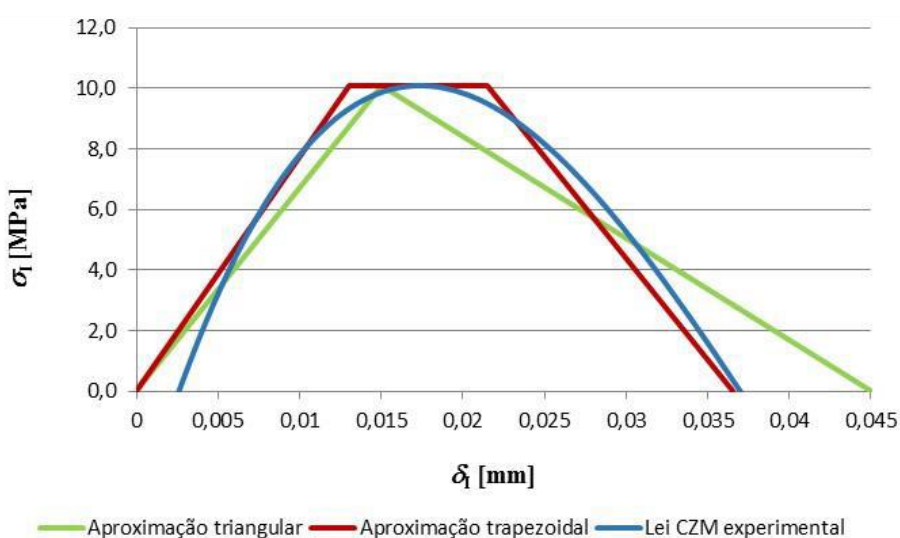


Figura 69 – Exemplo de lei coesiva à tração obtida a partir de um ensaio DCB com Araldite® AV138 e aproximações triangular e trapezoidal [88]

A Figura 69 representa um exemplo de lei coesiva à tração obtida a partir de um ensaio DCB com Araldite® AV138, e aproximações triangular e trapezoidal. Verifica-se que ambas as leis coesivas se encontram bastante aproximadas à lei coesiva experimental, o que revela que estas conseguem reproduzir com boa aproximação às características do adesivo [88]. No ensaio deste provete, foram encontrados os seguintes valores experimentais de parâmetros coesivos, tendo em consideração a lei coesiva experimental:

$t_n^0=10,02$ MPa e $\delta_n^f=0,0375$ mm.

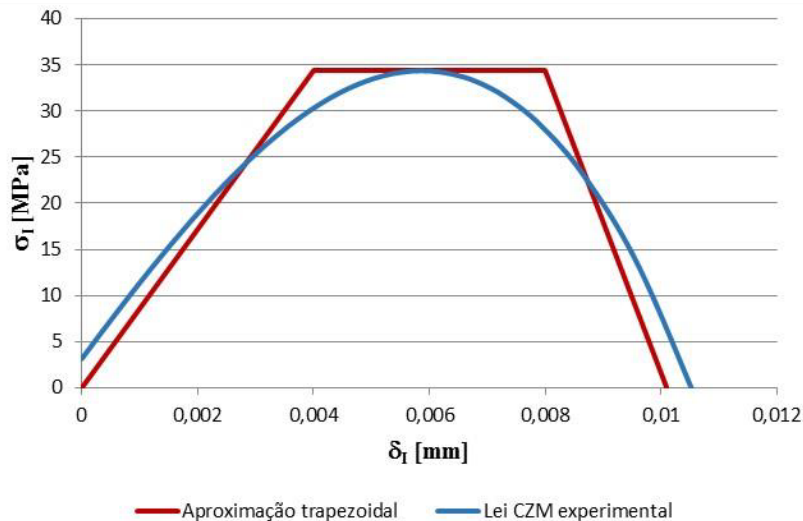


Figura 70 - Exemplo de lei coesiva à tração obtida a partir de um ensaio DCB com Araldite® 2015 e aproximações triangular e trapezoidal [88]

A Figura 70 representa um exemplo de lei coesiva à tração, obtida a partir de um ensaio DCB com Araldite® 2015, e aproximações triangular e trapezoidal. Verifica-se uma boa aproximação da lei coesiva trapezoidal à lei coesiva experimental. Tal facto demonstra que a referida lei coesiva se adequa ao adesivo, uma vez que consegue reproduzir com precisão o comportamento dúctil do mesmo [88]. No ensaio deste provete foram obtidos os seguintes valores de parâmetros coesivos, tendo em conta a lei coesiva experimental:

$t_n^0 = 34,75$ MPa e $\delta_n^f = 0,0108$ mm.

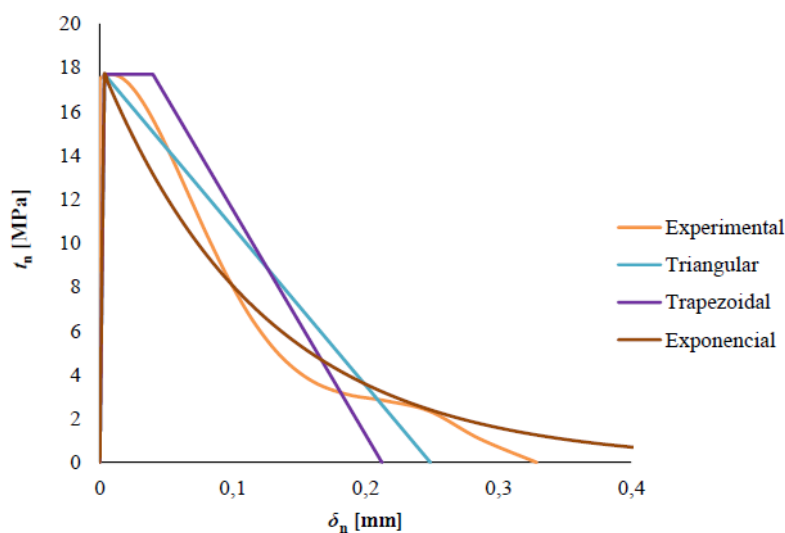


Figura 71 - Exemplo de lei coesiva à tração obtida a partir de um ensaio DCB com SikaForce® 7752 e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial [72]

A Figura 71 representa um exemplo de lei coesiva à tração, obtida a partir de um ensaio DCB com SikaForce® 7752, e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial. Observa-se que as três leis coesivas obtidas numericamente se aproximam da lei coesiva obtida experimentalmente, o que indica que estas são minimamente adequadas para prever o comportamento do adesivo. No entanto, a que revela maior aproximação às características de ductilidade do adesivo é a lei coesiva trapezoidal, seguida da triangular, e em último a lei exponencial [72]. Para o provete em questão, foram obtidos os seguintes valores de parâmetros coesivos experimentais:

$$t_n^0 = 17,69 \text{ MPa e } \delta_n^f = 0,3287 \text{ mm.}$$

3.1.5.2 Provetes ENF

3.1.5.2.1 Curvas $P-\delta$

A seguir são apresentadas as curvas obtidas a partir do ensaio ENF para os três adesivos usados.

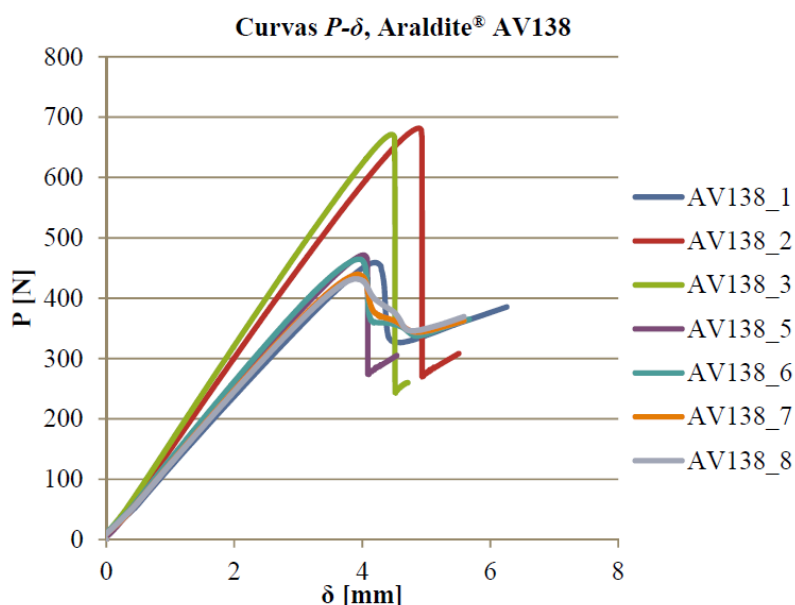


Figura 72 - Curvas $P-\delta$ dos ensaios ENF com o adesivo Araldite® AV138 [89]

A Figura 72 representa as curvas $P-\delta$ experimentais dos ensaios realizados em provetes ENF com o adesivo Araldite® AV138. Do conjunto de provetes ensaiados, apenas um foi descartado, devido à disparidade de resultados com os restantes (AV138_4). Observa-se que o adesivo ensaiado apresenta um comportamento frágil, revelado principalmente pela queda abrupta de P no momento em que $P_{\text{máx}}$ é atingido. No momento da rotura, a queda abrupta de P induz uma propagação rápida de fenda, o que dificulta o processo de monitorização do comprimento da mesma, implicando um número significativo de imagens necessário para o subsequente tratamento dos dados.

De salientar que os provetes AV138_2 e AV138_3 se diferenciam dos restantes, principalmente nas cargas máximas atingidas, devido ao uso de valores de α_0 inferiores aos dos restantes provetes, por questões relacionadas com o fabrico dos mesmos. Apesar disso, este efeito foi contabilizado no tratamento de dados pelo método direto, pelo que não terá influência nos valores calculados de G_{IIc} . Nos restantes provetes, verificou-se uma boa repetibilidade de curvas, tanto ao nível da rigidez, como também na proximidade dos valores de $P_{máx}$ e respetivo deslocamento de carga máxima ($\delta_{Pmáx}$) registados. De notar ainda alguma instabilidade na propagação de fenda, dada a elevada rigidez do adesivo e baixa ductilidade, que normalmente induzem o comportamento observado [89].

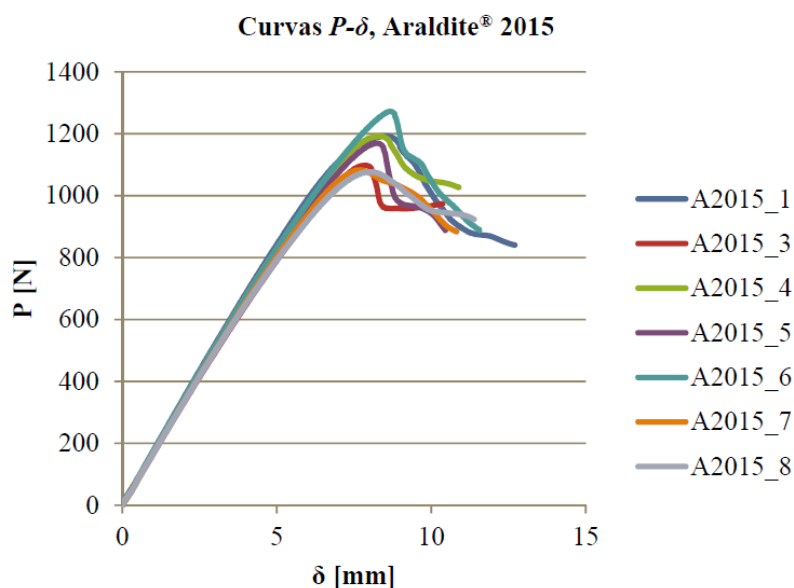


Figura 73 - Curvas P - δ dos ensaios ENF com o adesivo Araldite® 2015 [89]

A Figura 73 representa as curvas P - δ experimentais dos ensaios ENF realizados com o adesivo Araldite® 2015. Observa-se também uma boa reprodutibilidade de curvas P - δ , no que diz respeito à rigidez elástica, $P_{máx}$ e $\delta_{Pmáx}$. Neste ensaio, todos os provetes foram validados para análise, dada a coerência de valores de $P_{máx}$ e $\delta_{Pmáx}$. Contrariamente ao adesivo Araldite® AV138, denotam-se três fases distintas nas curvas P - δ do adesivo Araldite® 2015. Na primeira fase ocorre uma evolução de P praticamente linear, numa região com um comportamento elástico assumidamente reversível. Numa segunda fase ocorre a plastificação do adesivo, um pouco antes da carga máxima, caracterizada por uma perda de linearidade de P e pela formação da Zona de Processo de Fratura. Nesta fase, a energia armazenada atinge o seu valor crítico, G_{IIc} , que corresponde ao início de propagação da fenda. A terceira fase ocorre após atingido o valor de $P_{máx}$, onde a carga aplicada diminui progressivamente, verificando-se uma propagação estável de fenda [89].

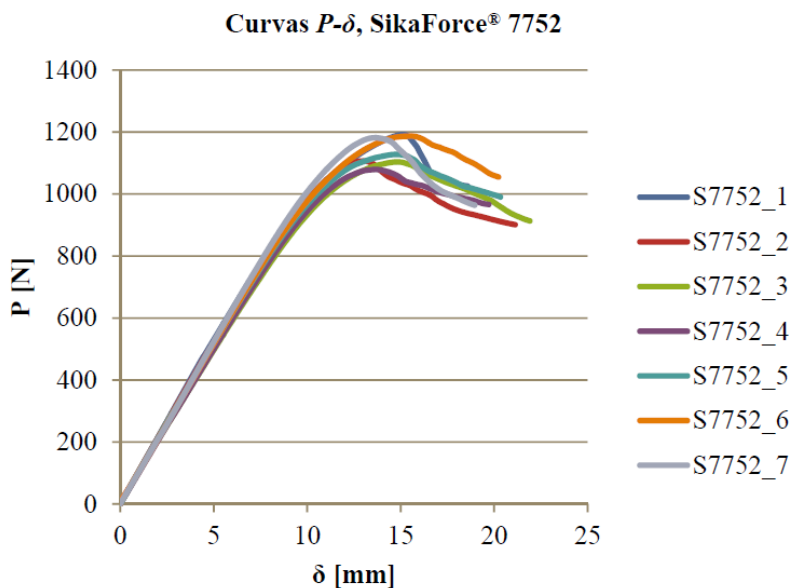


Figura 74 - Curvas P - δ dos ensaios ENF com o adesivo SikaForce® 7752 [89]

A Figura 74 representa as curvas P - δ experimentais dos ensaios realizados em provetes ENF, com o adesivo SikaForce® 7752. Observa-se um bom acordo entre curvas P - δ experimentais, principalmente no que concerne à rigidez elástica, $P_{\text{máx}}$ e $\delta_{P_{\text{máx}}}$. Dada a concordância dos valores referidos, nenhum provete foi descartado para análise. Neste adesivo, à semelhança do Araldite® 2015, verificam-se três fases distintas no comportamento do adesivo. A primeira, que representa a linearidade da carga/deslocamento no domínio elástico, ocorre de forma semelhante aos dois adesivos anteriormente ensaiados. Posteriormente, a segunda fase surge com maior ênfase do que a registada com o adesivo Araldite® 2015, uma vez que a perda de linearidade da carga/deslocamento antes da carga máxima, surge de forma mais precoce. Por último, a terceira fase evidencia maior estabilidade na propagação da fenda, do que o observado para o Araldite® 2015 e Araldite® AV138, uma vez que a carga diminui com maior suavidade e progressividade [89].

3.1.5.2.2 Modos de rotura

Na realização destes ensaios, não foi possível obter imagens das superfícies de rotura dos provetes, uma vez que a fenda só foi propagada parcialmente, não sendo suficiente para separar completamente os provetes. No entanto, por inspeção visual dos provetes fraturados, verificou-se que em todos eles ocorreram roturas coesivas [91].

3.1.5.2.3 Determinação de G_{IIC} pelo método direto

O procedimento para determinar G_{IIC} pelo método direto é semelhante ao utilizado nos provetes DCB para determinar G_{IC} , diferindo apenas em alguns aspetos, nomeadamente a quantidade de variáveis que é necessário obter de um ensaio para além dos valores de P e δ . De facto, o método direto também permite determinar a lei coesiva em corte,

através da diferenciação da curva $G_{II}-\delta_s$ após o ajuste polinomial da mesma. Os valores de G_{IIc} foram definidos para cada provete pelo valor de patamar de G_{II} , obtido a partir da equação (13). A seguir apresentam-se os resultados para os vários ensaios.

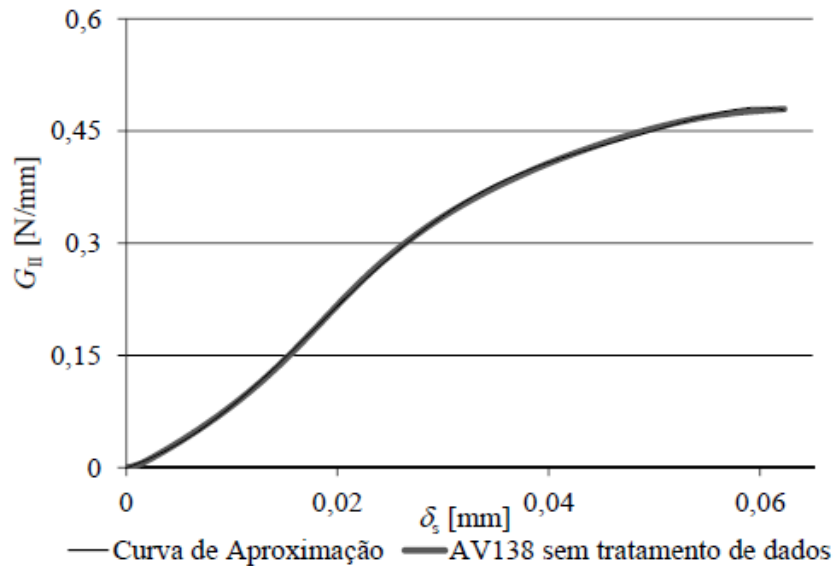


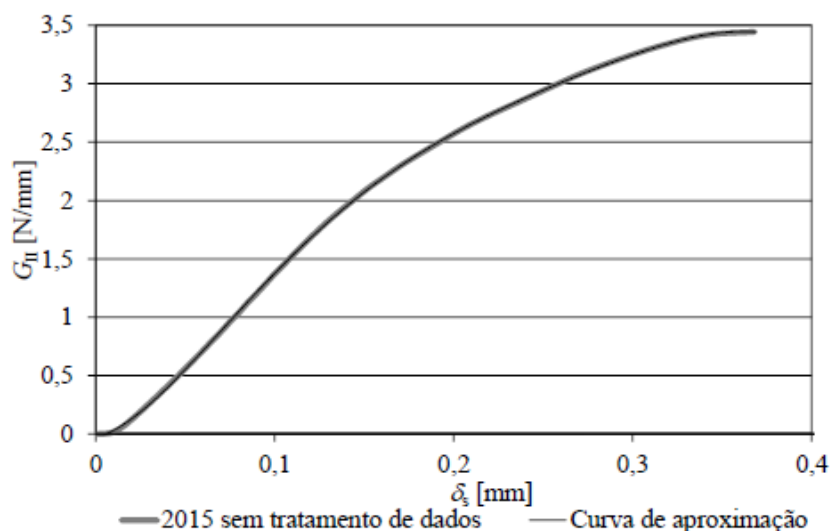
Figura 75 - Exemplo de curva experimental $G_{II}-\delta_s$ obtida para um ensaio ENF com o adesivo Araldite® AV138 [89]

A Figura 75 representa um exemplo de curva experimental $G_{II}-\delta_s$, obtida para um ensaio ENF com o adesivo Araldite® AV138. As curvas polinomiais adotadas no conjunto dos ensaios com o referido adesivo variaram entre os graus 4 e 6, de modo a se obter o melhor valor de R^2 . Do ensaio do provete apresentado, observa-se inicialmente uma taxa reduzida de crescimento de G_{II} . De seguida, esta aumenta e estabiliza num valor aproximadamente constante, entre $\delta_s \approx 0,015$ e $0,025$ mm. Por fim, a taxa de crescimento de G_{II} volta a diminuir, até se atingir um valor de patamar, a partir do qual é estimado G_{IIc} . Para o provete em questão, obteve-se um valor de $G_{IIc}=0,479$ N/mm com $\delta_s=0,0623$ mm [89].

Na Tabela 7 estão representados os valores de G_{IIc} obtidos pelo Integral- J , para o adesivo Araldite® AV138. Um dos provetes foi descartado, dada a discrepância do resultado de G_{IIc} obtido. No entanto, no que respeita aos restantes provetes, estes revelaram uma proximidade razoável entre os valores de G_{IIc} obtidos, denotada também pelo baixo valor do desvio padrão, que no caso é de $0,090$ N/mm (desvio percentual de $\approx 15,5\%$). Pela aplicação do método direto, obteve-se um valor médio de $G_{IIc}=0,582$ N/mm [89].

Tabela 7 - Integral-J obtido para um ensaio ENF com o adesivo Araldite® AV138 [89]

Provete	Integral – J (G_{IIc})
AV_1	0,552
AV_2	0,732
AV_3	0,676
AV_4	-
AV_5	0,566
AV_6	0,533
AV_7	0,523
AV_8	0,479
<i>Média</i>	0,582
<i>Desvio Padrão</i>	±0,090

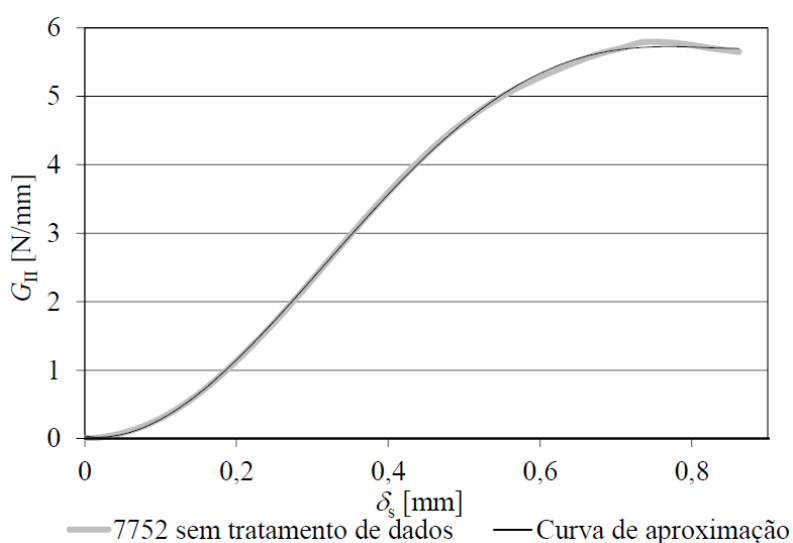
Figura 76 - Exemplo de curva experimental G_{II} - δ_s obtida para um ensaio ENF com o adesivo Araldite® 2015 [89]

A Figura 76 representa um exemplo de curva experimental G_{II} - δ_s , obtida para um ensaio ENF com o adesivo Araldite® 2015. Denota-se que a forma da curva G_{II} - δ_s se assemelha à do Araldite® AV138, na medida em que inicialmente G_{II} apresenta um baixo crescimento, seguindo-se um acréscimo da sua taxa de crescimento, e estabilização entre $\delta_s \approx 0,05$ mm e $\delta_s \approx 0,15$ mm, terminando com G_{II} a atingir o valor de patamar correspondente a G_{IIc} . Deste modo, para o provete em análise, obteve-se um valor de $G_{IIc} = 3,444$ N/mm, com um valor de $\delta_s = 0,3681$ mm [89].

Tabela 8 - Integral-J obtido para um ensaio ENF com o adesivo Araldite® 2015 [89]

Provete	Integral - J (G_{IIc})
A2_1	3,444
A2_2	3,585
A2_3	2,873
A2_4	3,298
A2_5	3,123
A2_6	3,140
A2_7	3,080
A2_8	2,901
<i>Média</i>	3,181
<i>Desvio Padrão</i>	$\pm 0,249$

A Tabela 8 resume os resultados obtidos de G_{IIc} para os provetes testados pelo método Integral-J. Todos os provetes foram validados nesta análise, dada a coerência entre valores de G_{IIc} , confirmada pelo desvio padrão de 0,249 N/mm, e respetivo valor percentual de $\approx 7,8\%$. Face ao adesivo anterior, pode-se afirmar que, com o presente adesivo, se obteve melhor repetibilidade de valores de G_{IIc} . Para este adesivo obteve-se um valor médio de $G_{IIc}=3,181$ N/mm. Fazendo uma analogia relativamente ao adesivo anterior, regista-se um aumento de tenacidade à fratura ($\approx 448,4\%$) [89].

Figura 77 - Exemplo de curva experimental $G_{II}-\delta_s$ obtida para um ensaio ENF com o adesivo SikaForce® 7752 [89]

A Figura 77 apresenta um exemplo de curva experimental $G_{II}-\delta_s$, obtida para um ensaio ENF com o adesivo SikaForce® 7752. Regista-se a similaridade na forma da curva $G_{II}-\delta_s$ obtida relativamente aos dois adesivos anteriormente analisados. De facto, o valor de G_{II} inicialmente cresce de forma lenta, começando a aumentar rapidamente entre $\delta_s \approx 0,2$ mm e $\delta_s \approx 0,4$ mm. Na fase final, o valor de G_{II} estabiliza, atingindo um valor de patamar. Para o provete ensaiado, obteve-se um valor de $G_{IIc}=5,790$ N/mm para um valor de $\delta_s=0,870$ mm. Esta curva evidencia ainda as diferenças de ductilidade deste adesivo face aos dois anteriores, pela superioridade dos valores de G_{II} e δ_s atingidos [89].

Tabela 9 - Integral-J obtido para um ensaio ENF com o adesivo SikaForce® 7752 [89]

Provete	Integral – J (G_{IIc})
SK_1	-
SK_2	5,067
SK_3	6,050
SK_4	5,360
SK_5	6,070
SK_6	5,173
SK_7	5,790
SK_8	6,160
<i>Média</i>	5,667
<i>Desvio Padrão</i>	$\pm 0,459$

A Tabela 9 apresenta os valores de G_{IIc} obtidos, para os provetes ensaiados pelo método do Integral-J. Existe uma boa coerência entre valores de G_{IIc} , comprovada por um valor de desvio padrão de 0,459 N/mm, e respetivo valor percentual de $\approx 8,1\%$. Estes dados permitem afirmar que, ao nível da repetibilidade dos valores obtidos, nomeadamente do desvio padrão percentual, o presente adesivo apresenta menor dispersão do que o adesivo Araldite® AV138 (8,1% versus 15,5%), embora apenas ligeiramente superior ao Araldite® 2015 (8,1% versus 7,8%). Denota-se ainda que um dos provetes foi rejeitado, dada a inconsistência do G_{IIc} obtido, relativamente aos restantes valores. Para o conjunto de ensaios respeitantes à presente tabela, obteve-se um valor médio de $G_{IIc}=5,667$ N/mm. Fazendo uma analogia entre o valor de G_{IIc} obtido neste adesivo e os correspondentes aos dois adesivos anteriores, verifica-se que o SikaForce® 7752 é o que apresenta o valor mais elevado, com aumentos percentuais de 78,2% (Araldite® AV138) e de 877% (Araldite® 2015) [89].

3.1.5.2.4 Determinação da lei coesiva em corte

A lei coesiva em corte é determinada pela diferenciação da curva $G_{II}-\delta_s$ obtida experimentalmente, após o seu ajuste ao grau polinomial mais preciso. De seguida são apresentados os resultados obtidos para os adesivos utilizados.

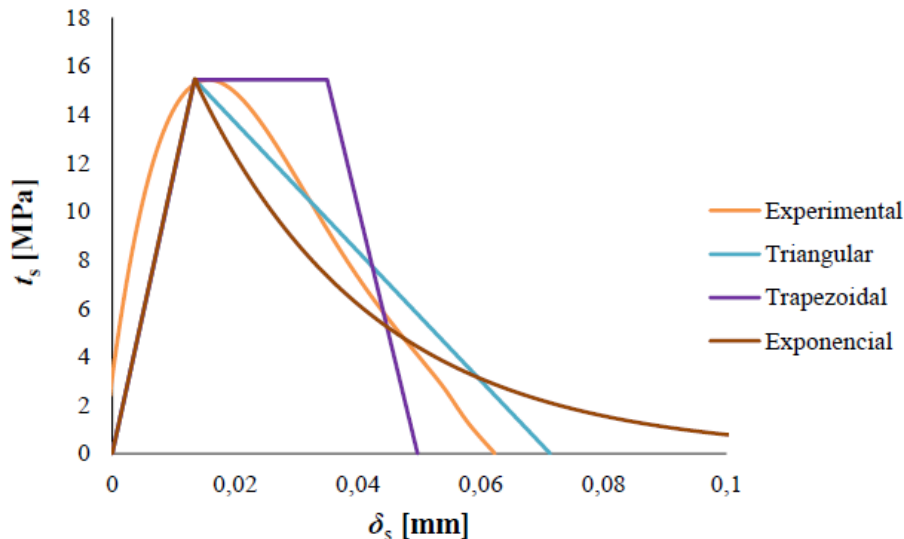


Figura 78 - Exemplo de lei coesiva ao corte obtida a partir de um ensaio ENF com Araldite® AV138 e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial [89]

Após a aplicação deste procedimento aos dados experimentais, apresenta-se na Figura 78 um exemplo de lei coesiva ao corte, obtida a partir de um ensaio ENF com Araldite® AV138 e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial. Pode-se ver que nem todas as leis coesivas se conseguem aproximar da lei coesiva experimental da mesma forma. Deste modo, as leis coesivas triangular e trapezoidal, são as que apresentam maior concordância com a lei experimental, uma vez que evidenciam uma forma de curva semelhante, e exibem uma fase de amaciamento de tensões relativamente próxima, conseguindo reproduzir com maior exatidão o comportamento e características do adesivo. Por outro lado, a lei coesiva exponencial regista a pior aproximação, evidente na forma da curva pouco semelhante à lei experimental [89]. Para o provete ensaiado, obtiveram-se os seguintes valores de parâmetros coesivos:

$t_s^0=15,43$ MPa e $\delta_s^f=0,06228$ mm.

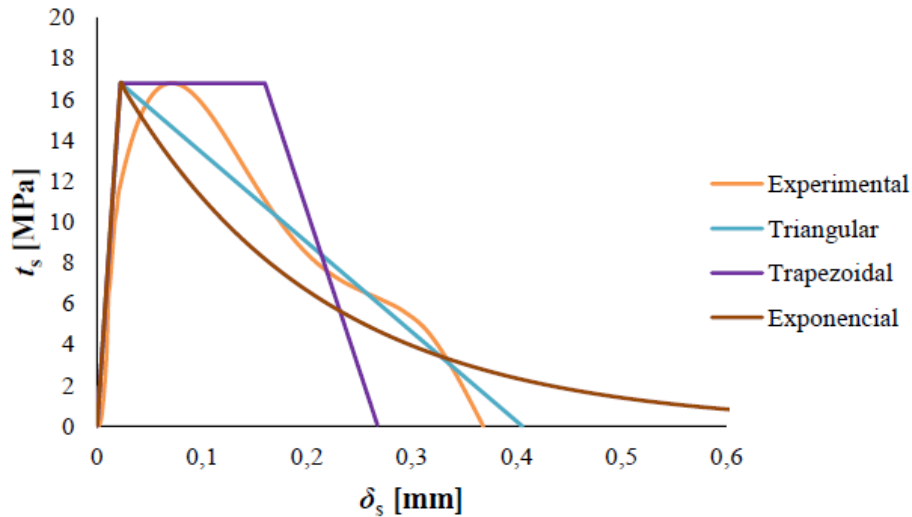


Figura 79 - Exemplo de lei coesiva ao corte obtida a partir de um ensaio ENF com Araldite® 2015 e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial [89]

Na Figura 79 é apresentado um exemplo de lei coesiva ao corte, obtida a partir de um ensaio ENF com Araldite® 2015, e respectivas aproximações. Denota-se maior proximidade das leis triangular e trapezoidal face à lei experimental, tal como para o adesivo Araldite® AV138. Neste caso, a lei trapezoidal consegue reproduzir a fase de amaciamento de tensões após o valor de pico de t_s^0 com melhor exatidão. No entanto, a lei triangular, a partir de $\delta_s \approx 0,18$ mm, consegue-se sobrepôr à trapezoidal. A lei exponencial demarca-se das restantes por um amaciamento de tensões pouco compatível com a lei coesiva experimental [89]. Para este ensaio, obteve-se:

$t_s^0=16,78$ MPa e $\delta_s^f=0,3682$ mm.

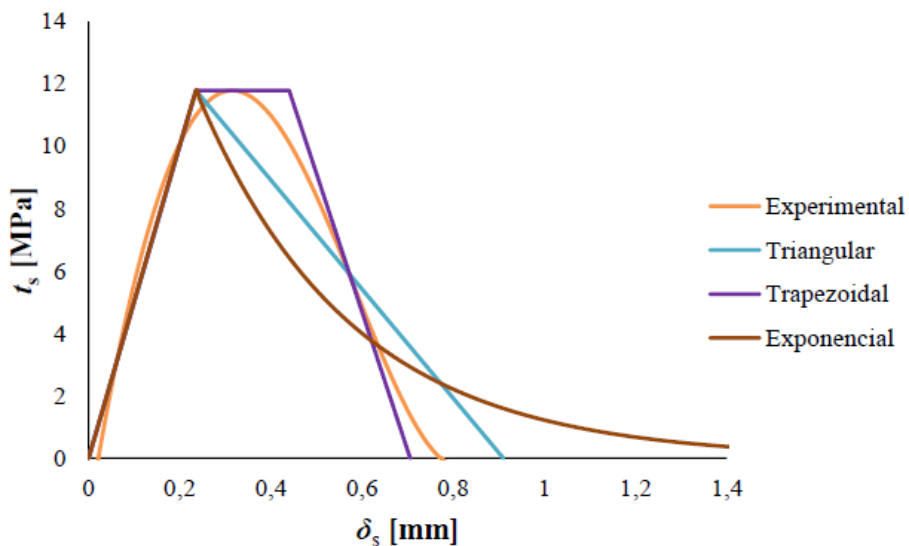


Figura 80 - Exemplo de lei coesiva ao corte obtida a partir de um ensaio ENF com SikaForce® 7752 e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial [89]

Na Figura 80 está representado um exemplo de lei coesiva ao corte, obtida a partir de um ensaio ENF com SikaForce® 7752, e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial. Existe uma excelente aproximação da lei coesiva trapezoidal à lei coesiva experimental, sendo a melhor das três leis coesivas obtidas, e a melhor até aqui observada do conjunto dos três adesivos ensaiados em provetes ENF. De facto, a aproximação trapezoidal, apresenta uma forma muito próxima à curva da lei coesiva experimental, e consegue também uma aproximação bastante boa ao nível do amaciamento de tensões, quer após t_s^0 , quer na proximidade de δ_s^f . As aproximações triangular e exponencial demarcam-se da aproximação trapezoidal na medida em que não conseguem reproduzir com a mesma exatidão a ductilidade do adesivo [89]. Para este ensaio, obtiveram-se os seguintes valores dos parâmetros coesivos:

$t_s^0=11,78$ MPa e $\delta_s^f=0,7681$ mm.

3.1.5.3 Juntas scarf

3.1.5.3.1 Curvas $P-\delta$

De seguida, são representadas as curvas obtidas para os vários adesivos ensaiados. A Figura 81 e Figura 82 mostram as curvas para $\alpha = 10^\circ$ e 45° , respetivamente, para o adesivo Araldite® AV138, o que permite comparar a evolução destas de acordo com o aumento do ângulo.

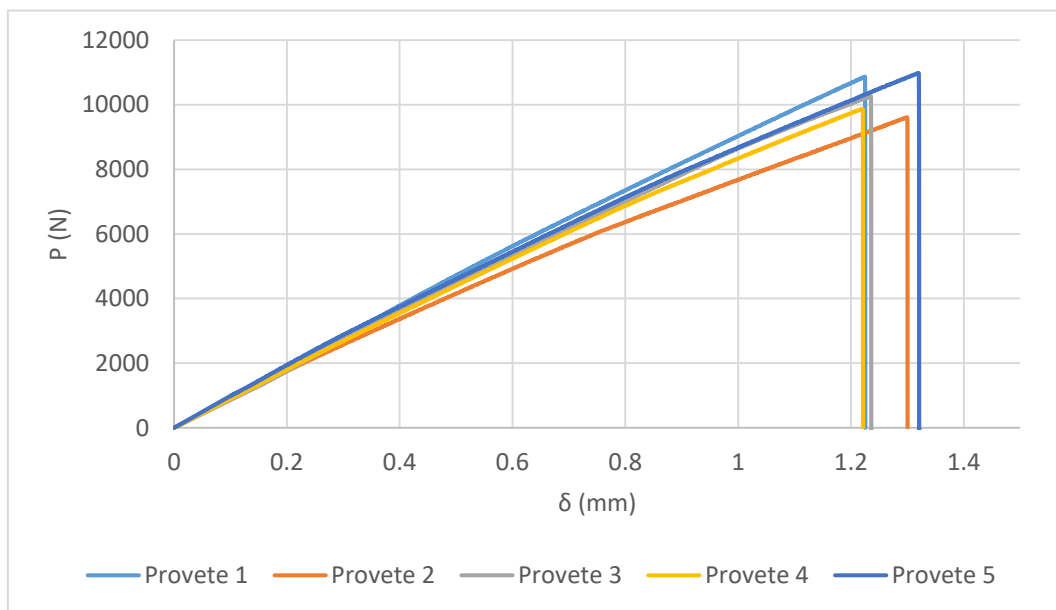


Figura 81 - Curvas $P-\delta$ para as juntas com α de 10° e adesivo Araldite® AV138 [1]

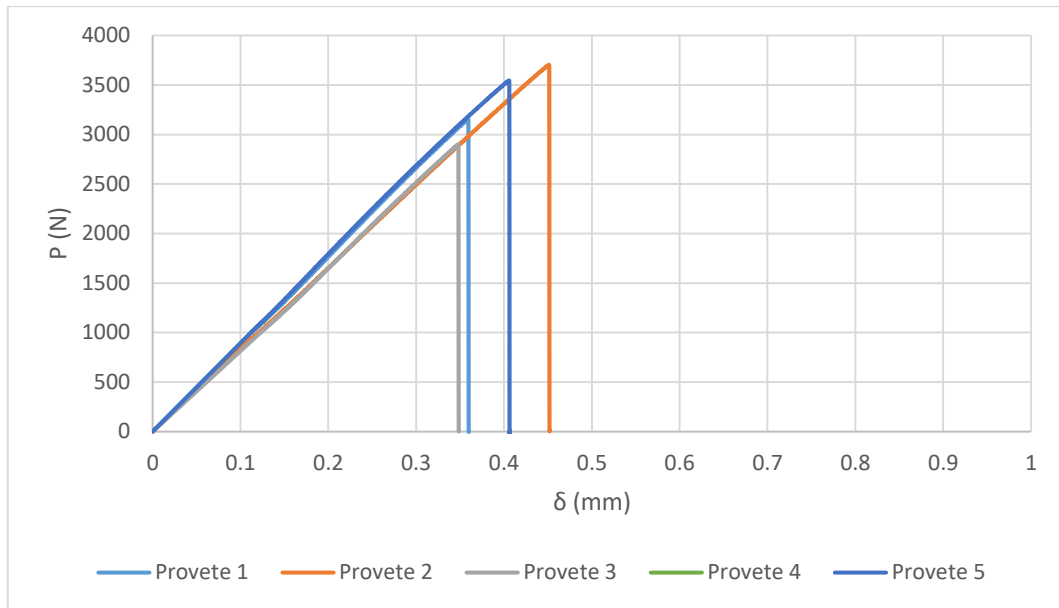


Figura 82 - Curvas P - δ para as juntas com α de 45° e adesivo Araldite® AV138 [1]

Na Figura 81 e Figura 82 pode-se observar que este adesivo tem um comportamento frágil e, à medida que α aumenta, a força máxima obtida até à rotura diminui. O deslocamento comporta-se de forma semelhante à força máxima, já que diminui com o aumento de α . Para $\alpha=10^\circ$, existem valores aproximadamente três vezes superiores de força e deslocamento, em relação a 45° . Em termos de rigidez (relação P - δ), os vários provetes têm comportamento similar (declive da reta) até à rotura, independente de α , mas existe maior desvio nos valores obtidos com o aumento do ângulo.

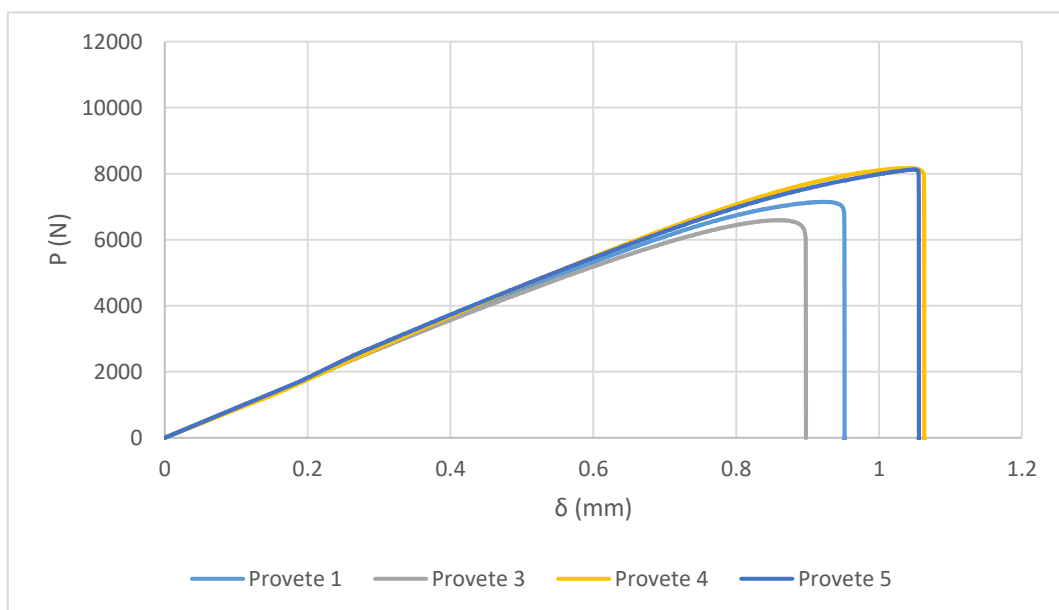


Figura 83 - Curvas P - δ para as juntas com α de 10° e adesivo Araldite® 2015 [1]

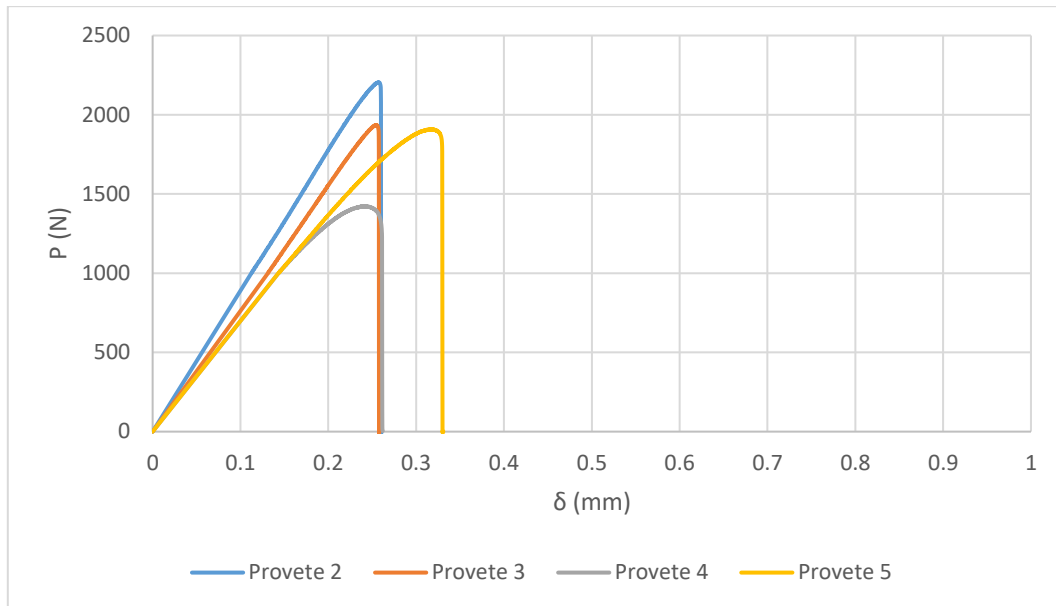
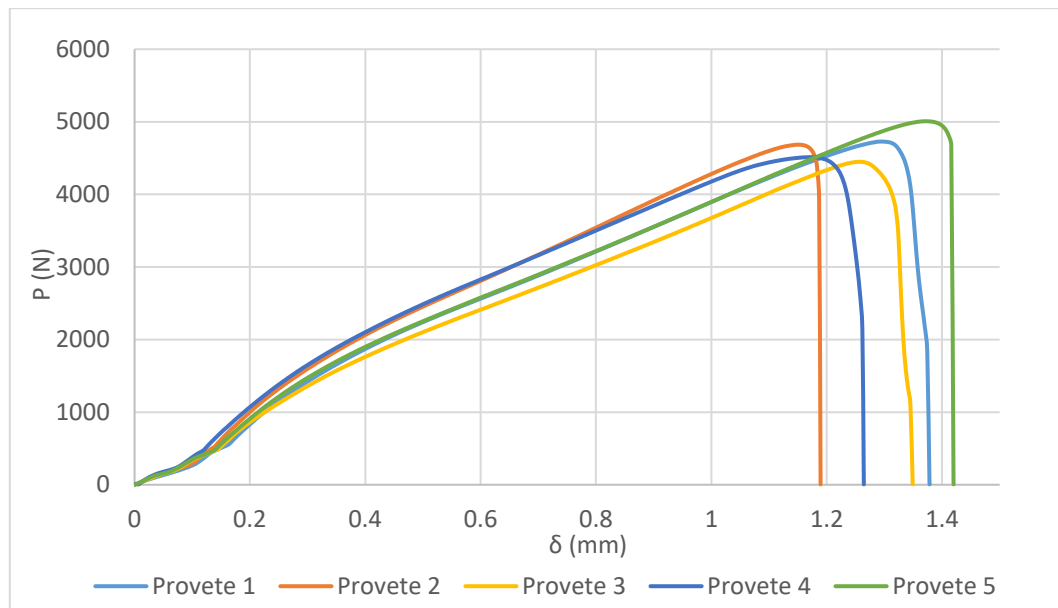
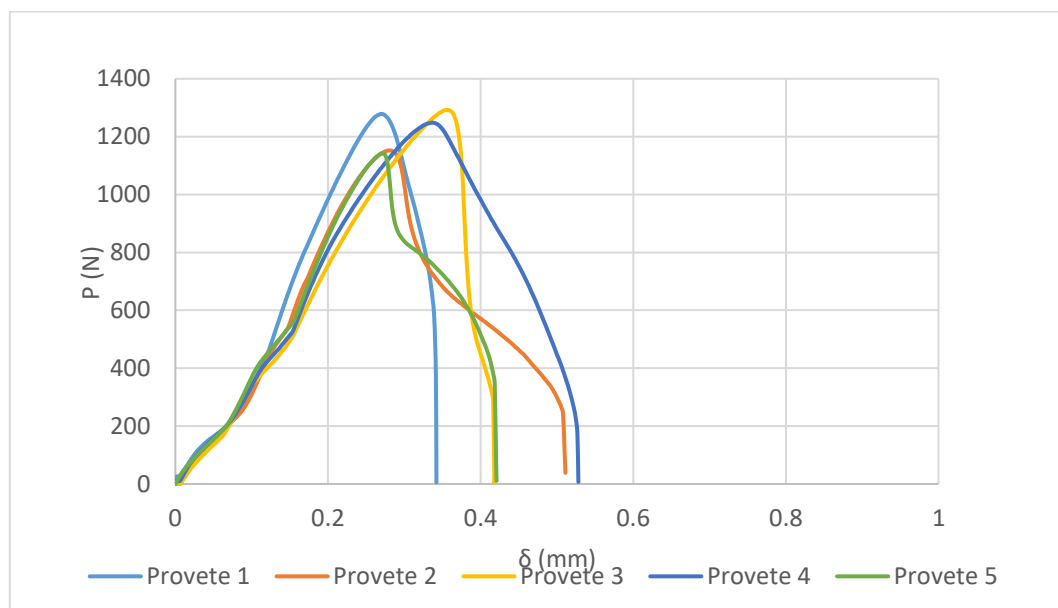


Figura 84 - Curvas P - δ para as juntas com α de 45° e adesivo Araldite® 2015 [1]

Observando as curvas anteriores (Figura 83 e Figura 84), verifica-se também que à medida que o ângulo aumenta, a força máxima obtida decresce. Neste caso, para o ângulo de 10° , existem valores aproximadamente quatro vezes superiores em termos de força e em termos de deslocamento, comparativamente com o ângulo de 45° . Nestas curvas é possível observar que existe uma ligeira perda de linearidade da curva antes da rotura devido a deformação plástica do adesivo, o que indica que este tem um comportamento menos frágil em relação ao anterior. Este fator é mais preponderante à medida que o ângulo diminui. Em termos de rigidez (relação P - δ), os vários provetes têm comportamento similar (declive da reta) até à rotura, independente do ângulo, mas existe maior desvio nos valores obtidos com o aumento do ângulo.

Observando as curvas da Figura 85 e Figura 86, mais uma vez se pode verificar que, à medida que o ângulo aumenta, a força máxima obtida até à rotura decresce consideravelmente. Isto é, para o ângulo de 10° , existem valores de aproximadamente quatro vezes superiores em termos de força e em termos de deslocamento, quando comparados com o ângulo de 45° . As curvas para este adesivo não têm um comportamento muito linear, principalmente a 45° , mas, em relação aos anteriores, este apresenta maior ductilidade, dado que antes da rotura existe maior estabilização de valores.

Figura 85 - Curvas P - δ para as juntas com α de 10° e adesivo SikaForce® 7752 [1]Figura 86 - Curvas P - δ para as juntas com α de 45° e adesivo SikaForce® 7752 [1]

3.1.5.3.2 Modos de rotura

Neste subcapítulo, apresentam-se os modos de rotura após a realização dos ensaios de tração, para as juntas com diferentes α . Após observação visual das juntas ensaiadas, registou-se a obtenção de roturas coesivas no adesivo para todas as juntas.

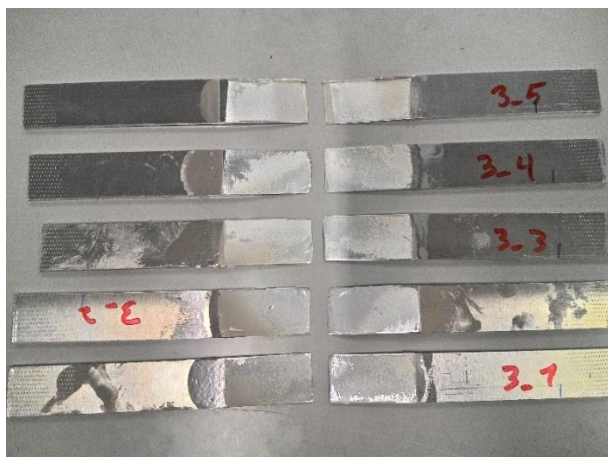


Figura 87 – Roturas coesivas obtidas nos provetes *scarf* com α de 3° [1]

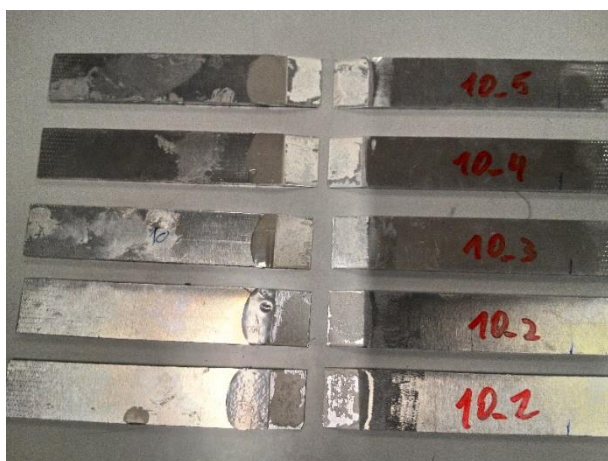


Figura 88 - Roturas coesivas obtidas nos provetes *scarf* com α de 10° [1]



Figura 89 - Roturas coesivas obtidas nos provetes *scarf* com α de 15° [1]

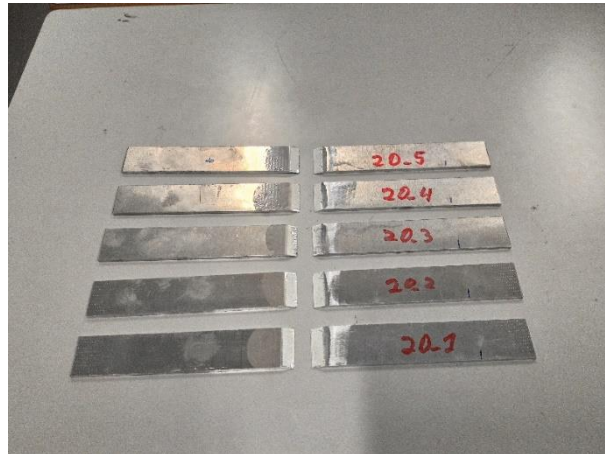


Figura 90 - Roturas coesivas obtidas nos provetes *scarf* com α de 20° [1]

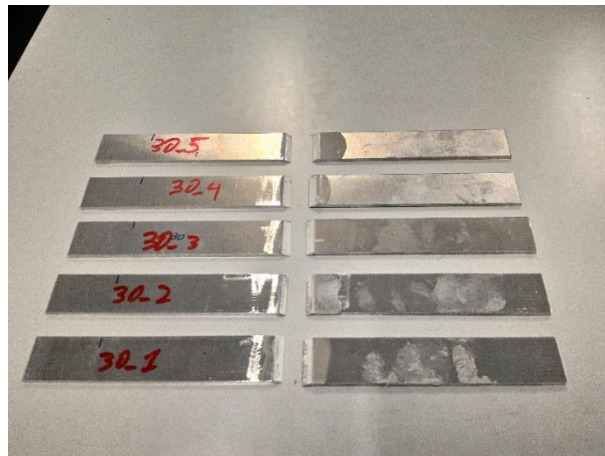


Figura 91 - Roturas coesivas obtidas nos provetes *scarf* com α de 30° [1]



Figura 92 - Roturas coesivas obtidas nos provetes *scarf* com α de 45° [1]

3.1.5.3.3 Resistência das juntas

A Figura 93, Figura 94 e Figura 95 mostram a evolução da força máxima obtida com a variação de α , para as juntas com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respectivamente. Desta forma, é possível analisar a resistência da junta conforme o adesivo e o ângulo utilizado.

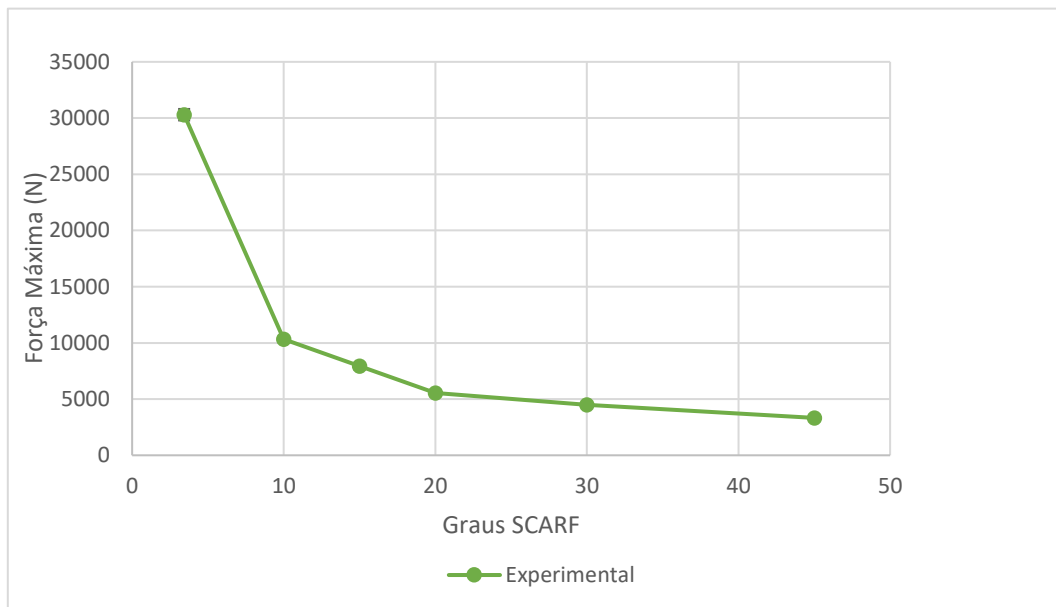


Figura 93 – Evolução da força máxima em função de α para as juntas com adesivo Araldite® AV138 [1]

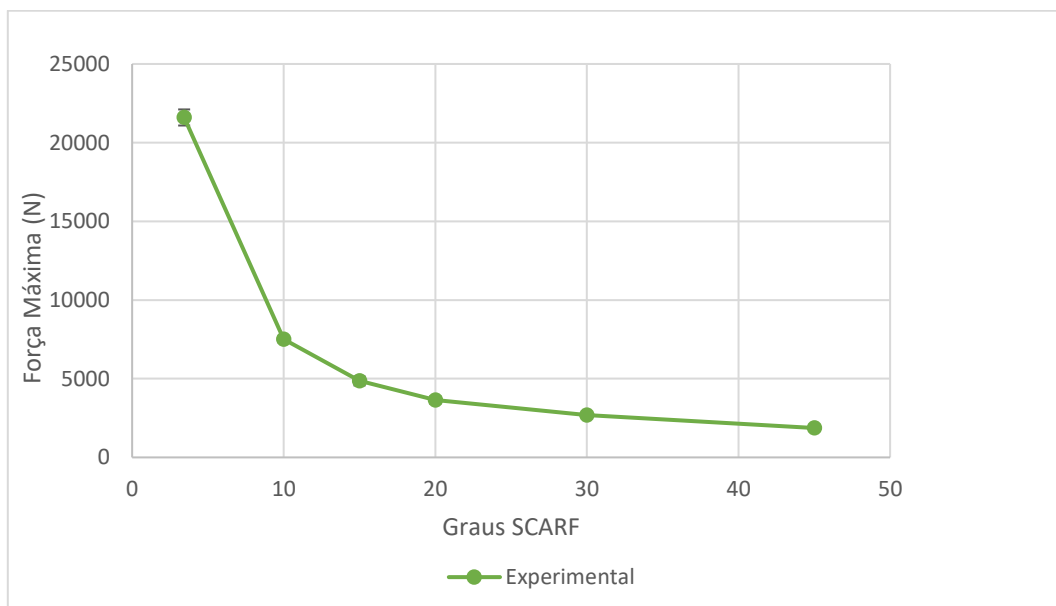


Figura 94 - Evolução da força máxima em função de α para as juntas com adesivo Araldite® 2015 [1]

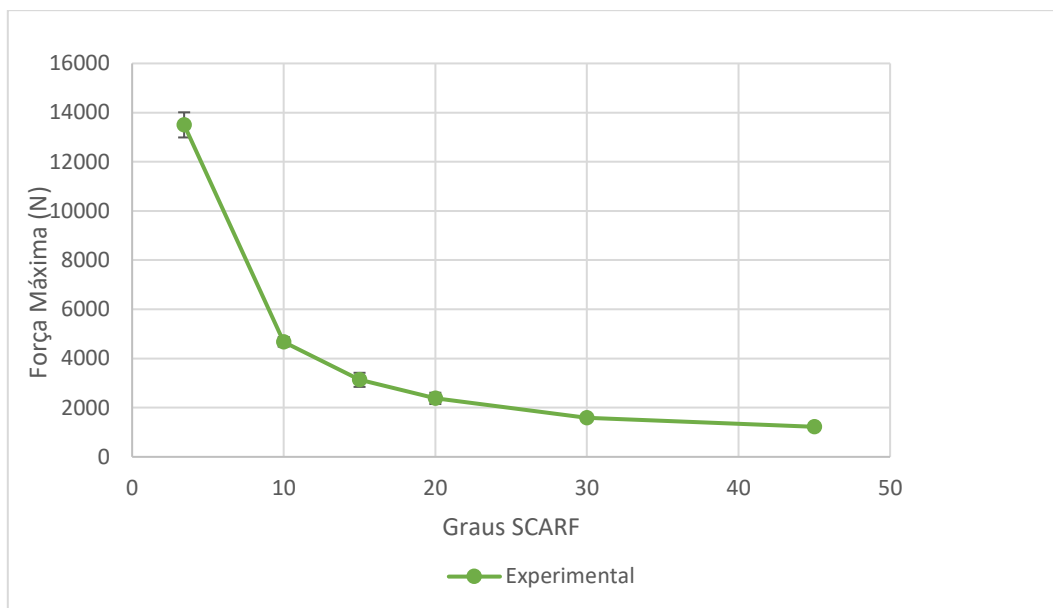


Figura 95 - Evolução da força máxima em função de α para as juntas com adesivo SikaForce® 7752 [1]

Nas curvas anteriores, é possível observar que a resistência neste tipo de junta é tanto maior, quanto menor for o seu ângulo, com uma evolução tipicamente exponencial [83], o que ocorre principalmente devido ao aumento da área de adesivo e distribuição de tensões mais favoráveis, com a diminuição de ângulo [96, 97]. De facto, existe um aumento significativo de resistência para ângulos inferiores a 20°, quando comparada com aqueles situados acima de 20°. No caso do adesivo Araldite® AV138, existe um aumento de 67% de 45° aos 20°, e um aumento de 445% entre os ângulos de 20° a 3,43°. Para o adesivo Araldite® 2015, existe um aumento de 95% de 45° aos 20°, e um aumento de 492% entre os ângulos de 20° a 3,43°. Por fim, para o adesivo SikaForce 7752, regista-se um aumento de 99% de 45° aos 20°, e um aumento de 439% entre os ângulos de 20° a 3,43°.

Comparando os três adesivos, o que permite maior resistência em todos os ângulos é o Araldite® AV138, apesar deste ser o mais frágil. Este comportamento é explicado pela inexistência de grandes variações de tensão ao longo da camada de adesivo, o que permite que um adesivo frágil, mas mais resistente, apresente melhores resultados do que adesivos dúcteis, mas menos resistentes.

3.2 Trabalho numérico

Neste capítulo, descreve-se o trabalho numérico realizado. Referem-se os aspetos relevantes da modelação das juntas, desde a sua representação geométrica, passando pela introdução dos valores respeitantes às propriedades dos materiais, pela definição dos parâmetros das malhas, até à definição das condições de fronteira e de carregamento impostas nos modelos. Apresenta-se também o modelo de dano coesivo

utilizado no ABAQUS®, o processo de obtenção das leis coesivas em modo puro pelo método direto, e as respectivas leis coesivas obtidas.

3.2.1 Condições da análise numérica

A análise numérica foi realizada no ABAQUS®. Este *software* baseia-se no método de Elementos Finitos, e foi escolhido pela possibilidade de utilização de um módulo integrado de Modelos de Dano Coesivo, que permite simular o dano e prever a resistência das juntas.

Em primeiro lugar, foram criadas as geometrias das juntas, representando as juntas em 2D e definindo as respectivas dimensões, de acordo com o apresentado anteriormente.

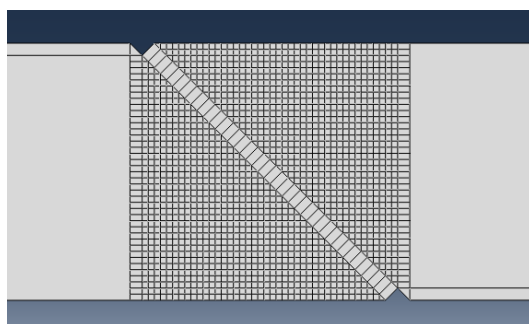


Figura 96 - Junta a 45°

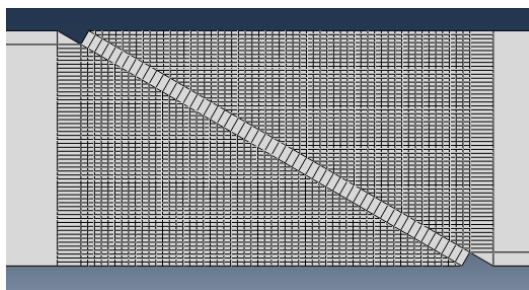


Figura 97 - Junta a 30°

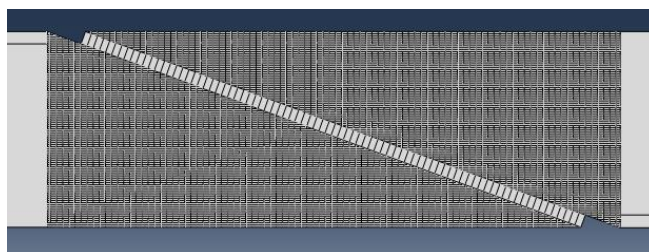


Figura 98 - Junta a 20°

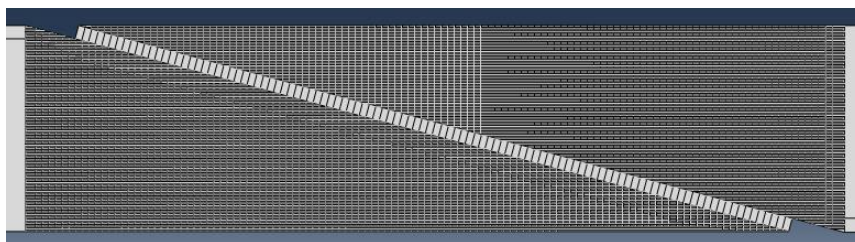


Figura 99 - Junta a 15°

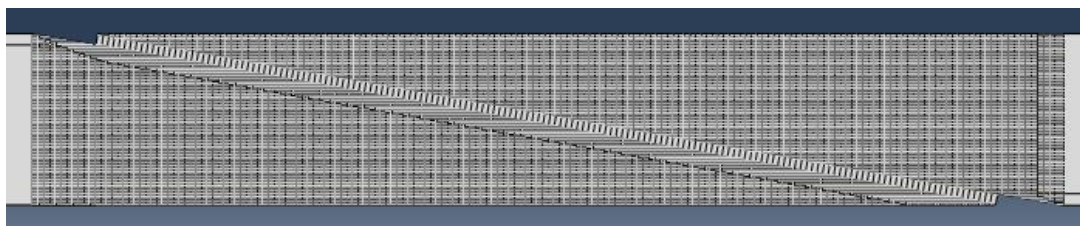


Figura 100 - Junta a 10°

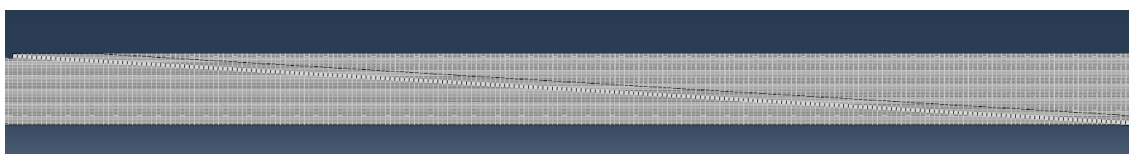


Figura 101 - Junta a 3,43°

Posteriormente, foram introduzidas as propriedades dos materiais a simular no ABAQUS®, para a posterior atribuição do tipo de elementos a cada um dos materiais.

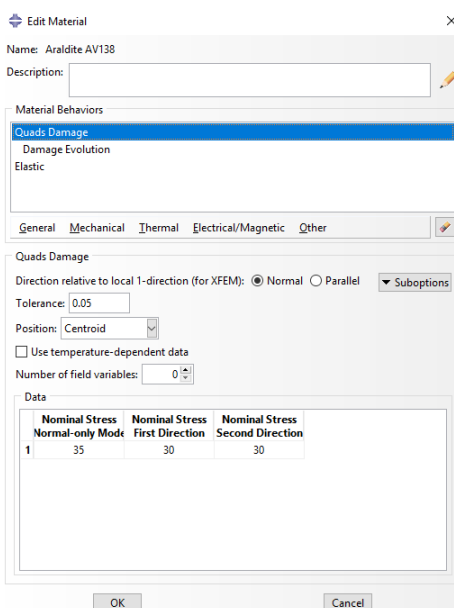


Figura 102 - Propriedades para Araldite® AV138

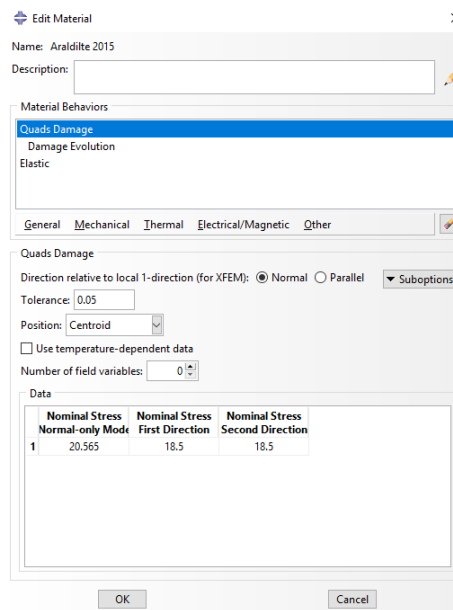


Figura 103 - Propriedades para Araldite® 2015

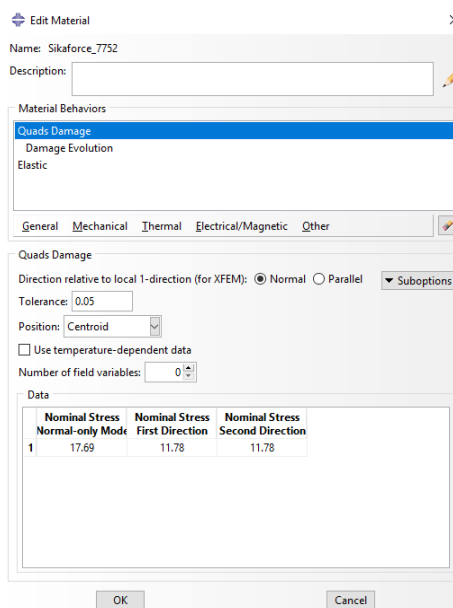


Figura 104 - Propriedades para SikaForce® 7752

Os substratos foram modelados como uma camada elasto-plástica contínua de elementos sólidos, enquanto para a camada de adesivo foram utilizados elementos coesivos.

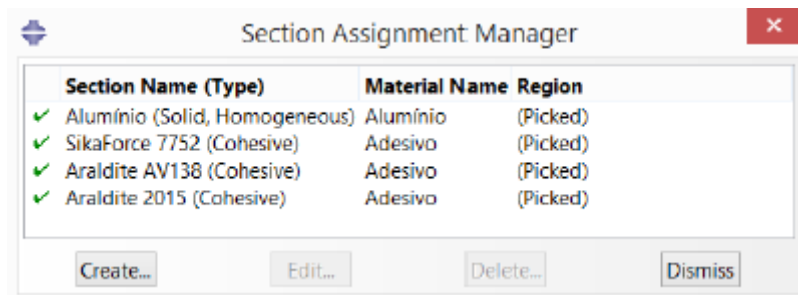


Figura 105 - Atribuição de elementos de camada aos constituintes da junta

As juntas foram modeladas em 2D, com recurso a elementos sólidos de estado plano de deformação para a modelação dos substratos (CPE4 do ABAQUS®).

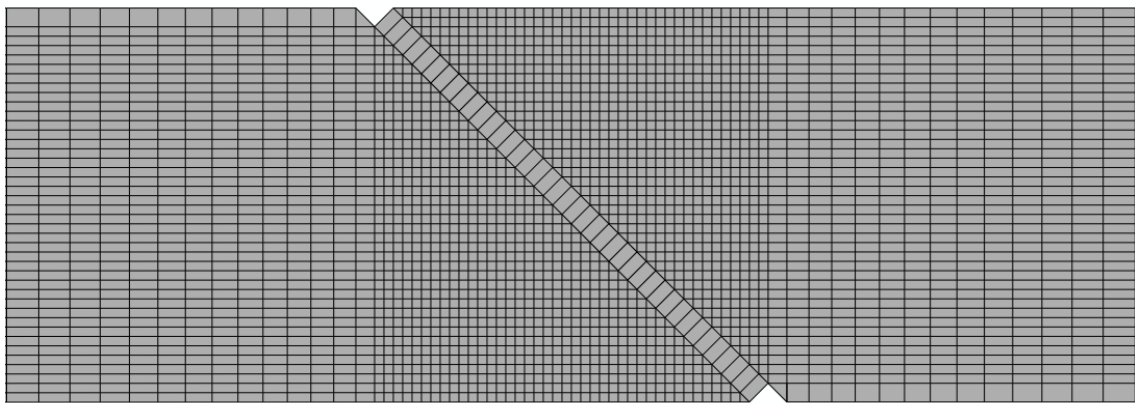


Figura 106 - Evolução dos elementos coesivos ao longo do comprimento

A camada de adesivo foi modelada por uma fila de elementos coesivos na direção da espessura (aproximação contínua), e uma lei de tração-separação triangular que inclui a rigidez da camada adesiva. No Modelo de Dano Coesivo utilizado, foram consideradas não linearidades geométricas, para efeitos de análise de rotura.

Na direção do comprimento dos substratos das juntas, foi considerado um refinamento crescente de malha, através do *bias ratio*, no sentido da camada de adesivo.

As condições fronteira e de carregamento foram aplicadas de modo a simular as condições reais dos ensaios experimentais. Como tal, as juntas foram encastradas numa das extremidades (esquerda), e restringidas na direção transversal da junta, na extremidade oposta. Nesta última extremidade, também foi aplicado um deslocamento de tração.

3.2.2 Modelo de dano coesivo

Como falado anteriormente, os modelos de dano coesivo baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos que ligam nós homólogos dos elementos coesivos, de

forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima, e subsequentemente, degradação das propriedades dos materiais até à rotura.

3.2.2.1 Modelo de dano triangular em modo misto

Das leis coesivas anteriormente apresentadas, as que mais frequentemente se usam são as triangulares, devido à sua simplicidade, reduzido número de parâmetros a usar e obtenção de resultados aceitáveis para a maioria das condições reais. Na lei triangular a aplicação de carga pode existir em modo misto ou em modo puro [82]. Em modo puro, a propagação do dano ocorre num conjunto específico de pares de nós homólogos de elementos coesivos. Em modo misto, são frequentemente usados critérios de tensão e energéticos, para combinar os modos de tração e corte [61].

A análise do início do dano em modo misto pode ser feita através de um critério quadrático de tensões na forma

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1 \quad (16)$$

em que $\langle \rangle$ são os parêntesis de *Macaulay*, enfatizando que um estado de tensão puramente compressivo não inicia dano, t_n é a tensão normal e t_s é a tensão de corte [98].

A previsão da propagação do dano em modo misto pode ser realizada pelo seguinte critério linear de energias de fratura [98]

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} = 1. \quad (17)$$

3.2.2.2 Modelos de dano triangular, trapezoidal e linear-exponencial em modos de dano independentes

Para este trabalho, consideraram-se leis triangulares, trapezoidais e exponenciais, para reproduzir o comportamento à tração e ao corte da camada adesiva.

A formulação que se apresenta de seguida é válida para ambos os modos puros de carregamento, ou seja, tração e corte. Como pode ser visualizado na Figura 24, a lei exponencial é linear até t_n^0 ou t_s^0 e, a partir deste ponto, ocorre um amaciamento até à rotura total. Esta forma de lei coesiva, é uma aproximação da lei exponencial completa. Utilizando esta aproximação, observa-se que a queda da tensão coesiva após a carga de pico, é mais abrupta do que na lei triangular. Independentemente da forma da lei coesiva, os valores de G_I e G_{II} são as áreas sob as leis do modelo de dano coesivo em tração ou corte, respetivamente. Nas leis coesivas apresentadas, o comportamento linear elástico é definido por uma matriz que relaciona tensões normais e de corte da seguinte forma,

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}\boldsymbol{\varepsilon}, \quad (18)$$

onde ε_n e ε_s são a deformação normal e de corte, pela mesma ordem. A matriz \mathbf{K} , representada na equação, contém os parâmetros de rigidez (K_{nn} , K_{ns} e K_{ss}). Segundo Campilho et al. [99], uma aproximação adequada para camadas finas de adesivo, consiste em fazer $K_{nn}=E$, $K_{ss}=G$ e $K_{ns}=0$. As fases de amaciamento das leis são definidas pelo *software* Abaqus®, através da especificação da variável de dano (d_n para tração e d_s para corte), definida em função de $\delta_n - \delta_n^0$ (tração) ou $\delta_s - \delta_s^0$ (corte), ou seja, em função do deslocamento efetivo após a iniciação do dano (δ_n^0 e δ_s^0 representam o deslocamento correspondente a t_n^0 e t_s^0 , respetivamente). Esta formulação é descrita nas expressões seguintes, enquanto a Figura 107 permite visualizar o significado de d_n para a lei triangular, que pode ser extrapolado para o cálculo de d_s [98].

Através desta formulação, t_n e t_s são definidos como,

$$\begin{aligned} t_n &= (1 - d_n) t_n^{\text{und}} \\ t_s &= (1 - d_s) t_s^{\text{und}} \end{aligned} \quad (19)$$

onde t_n^{und} e t_s^{und} são os valores de tensão coesiva de tração e corte, respetivamente, sem degradação da rigidez. Nesta expressão, tem-se $d_{n,s}=0$ para um material não danificado (na região elástica), e $d_{n,s}=1$ para um material totalmente danificado.

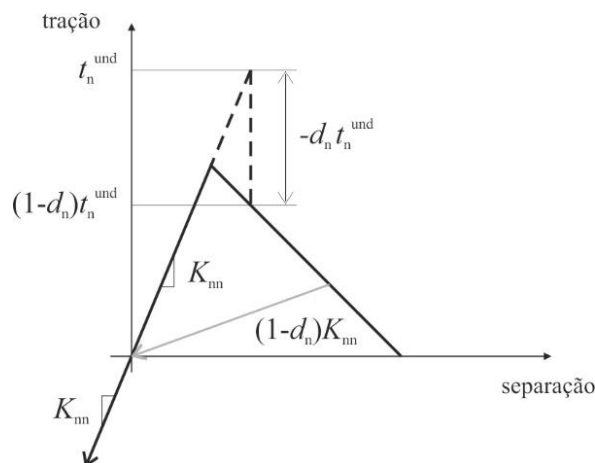


Figura 107 – Definição da variável de dano em tração, d_n , no Abaqus® (que pode ser extrapolada para d_s)

Tendo como base estes pressupostos, a expressão genérica (em tração ou corte) de $d_{n,s}$ para a lei triangular assume a forma, [98]

$$d_{n,s} = \frac{\delta_{n,s}^f (\delta_{n,s} - \delta_{n,s}^0)}{\delta_{n,s} (\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^0)}. \quad (20)$$

Para a lei exponencial, a expressão de $d_{n,s}$ é [98]

$$d_{n,s} = 1 - \frac{\delta_{n,s}^0}{\delta_{n,s}} \left(1 - \frac{1 - e^{\left(-\alpha \left(\frac{\delta_{n,s} - \delta_{n,s}^0}{\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^0} \right) \right)}}{1 - e^{(-\alpha)}} \right), \quad (21)$$

onde α é um parâmetro adimensional definido em função do material, que estabelece a taxa de evolução do dano com $t_{n,s}$ (obtem-se um lei triangular fazendo $\alpha=0$). Neste trabalho, considerou-se $\alpha=7$ para proporcionar uma diferença significativa entre as leis triangular e exponencial, através de uma rápida degradação, depois de atingido $t_{n,s}^0$. O valor de $d_{n,s}$ é dividido na região de tensão constante ($\delta_{n,s}^0 < \delta \leq \delta_{n,s}^s$), e na região de amaciamento ($\delta_{n,s}^s < \delta \leq \delta_{n,s}^f$), como seguidamente se apresenta, [98]

$$\left| \begin{array}{ll} d_{n,s} = 1 - \frac{\delta_{n,s}^0}{\delta_{n,s}} & \text{se } \delta_{n,s}^0 < \delta \leq \delta_{n,s}^s \\ d_{n,s} = 1 - \frac{m\delta_{n,s} + b}{K_{nn,ss} \delta_{n,s}} & \text{se } \delta_{n,s}^s < \delta \leq \delta_{n,s}^f \end{array} \right. \quad (22)$$

Os valores de m e b referem-se aos parâmetros da reta de decréscimo de $t_{n,s}$ desde o fim do patamar até à rotura, relativamente à origem da lei coesiva, e são dados por,

$$m = \frac{-t_{n,s}^0}{\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^s}; \quad b = t_{n,s}^0 - m\delta_{n,s}^s \quad (23)$$

Os valores de $\delta_{n,s}^f$ são obtidos considerando que a área abaixo da lei coesiva correspondente é igual a $G_{Ic,IIc}$. Por outro lado, podem ser utilizadas várias técnicas para definir $\delta_{n,s}^s$ (lei trapezoidal), tais como razões pré-estabelecidas entre $\delta_{n,s}^s$ e $\delta_{n,s}^f$ [100], a utilização de dados experimentais de deformação de rotura [101], ou uma inclinação pré-estabelecida da reta de degradação até $\delta_{n,s}^f$ (por exemplo, inclinação idêntica entre as leis de tração e de corte) [102]. Neste trabalho, foi adotada a primeira abordagem, considerando $\delta_{n,s}^s/\delta_{n,s}^f=0,7$.

Tendo por base esta formulação, foi desenvolvida uma série de dados por adesivo, para as várias formas de leis coesivas anteriormente descritas, de forma a estas serem inseridas no Abaqus® para reproduzir os três comportamentos de forma independente.

3.2.3 Leis coesivas para simulação do adesivo

Para determinar as leis coesivas em tração e corte, é necessário obter as propriedades coesivas das mesmas (t_n^0 e G_{Ic} para tração e t_s^0 e G_{IIc} para corte). No passado, foram publicados alguns estudos que, por aproximação, assumiam que estes parâmetros eram

idênticos aos obtidos para ensaios de tração [61]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos e propagação de fenda, tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [62, 80]. Assim sendo, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores, que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados. Deste modo, foram realizados ensaios DCB e ENF, que permitiram obter as referidas propriedades coesivas em modo I (tração) e modo II (corte), respetivamente. Assim, as leis coesivas foram determinadas após a realização dos ensaios, pela aplicação do método direto, que consistiu na diferenciação de uma curva polinomial ajustada às leis experimentais $G_I-\delta_n$ e $G_{II}-\delta_s$, obtidas pelas equações correspondentes.

O método direto permitiu extrair os valores médios dos parâmetros coesivos referidos, usados para formular as leis coesivas triangulares, trapezoidais e exponenciais, com recurso a uma sub-rotina em Matlab®, desenvolvida para o efeito num trabalho anterior [85].

A Figura 108 e Figura 109, representam exemplos das leis experimentais $G_I-\delta_n$ e $G_{II}-\delta_s$, pela mesma ordem, para os diversos adesivos e respetivas curvas polinomiais ajustadas.

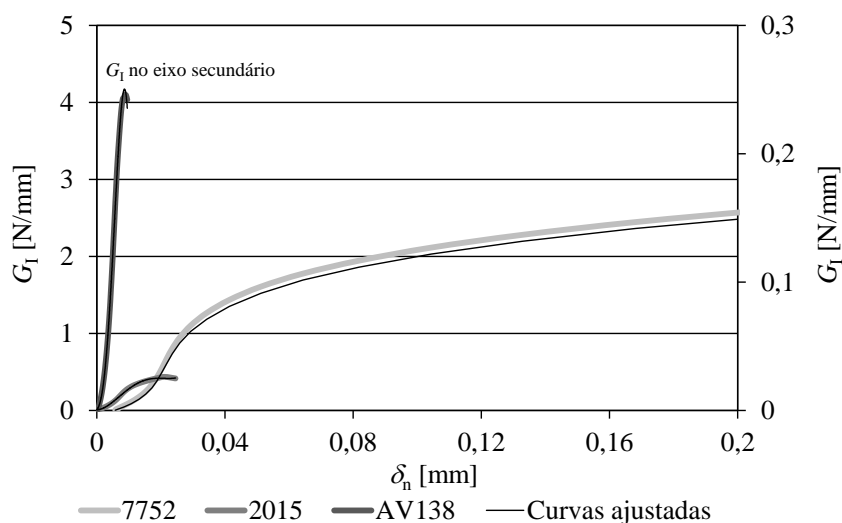


Figura 108 – Exemplos de leis experimentais $G_I-\delta_n$ para os adesivos testados, e respetivas curvas polinomiais ajustadas [91]

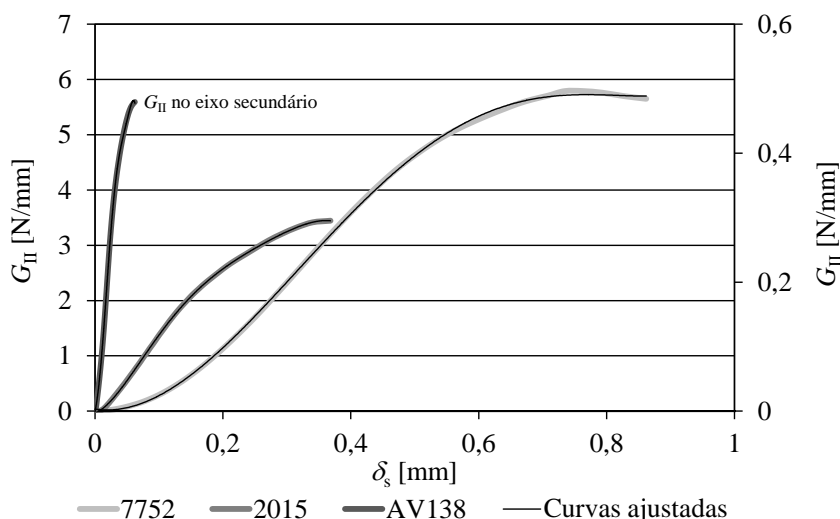


Figura 109 – Exemplos de leis experimentais G_{II} - δ_s para os adesivos testados, e respectivas curvas polinomiais ajustadas [91]

Pode-se observar que as leis experimentais para o adesivo Araldite® AV138 estão representadas no eixo secundário, dado que os valores de G_I são de magnitude inferior, relativamente aos dos restantes adesivos. De referir ainda que, na Figura 108, o eixo das abcissas foi limitado a $\delta_n=0,2$ mm, com o intuito de melhorar a visualização geral das leis experimentais. Procedeu-se desta forma, uma vez que se obteve para o adesivo Sikaforce® 7752 um valor de $\delta_n^f \approx 0,68$ mm que, caso estivesse contido no gráfico, impediria a visualização correta das curvas dos outros dois adesivos.

Analisando ambas as figuras, denotam-se três fases distintas na evolução das curvas G_I - δ_n e G_{II} - δ_s . Numa primeira fase G_I/G_{II} aumentam de forma lenta com δ_n/δ_s . Na segunda, verifica-se a tendência de uma taxa de crescimento de G_I/G_{II} aproximadamente constante. Na última fase, G_I/G_{II} ascende até atingir um valor de patamar. É patente entre as curvas experimentais uma clara diferença no comportamento dos três adesivos ensaiados. De facto, verifica-se que, para ambas as leis experimentais, quanto maiores os valores de δ_n e δ_s , correspondentes aos valores de patamar de G_I/G_{II} , maior é a ductilidade do adesivo, o que se traduzirá também em valores superiores de δ_n^f e δ_s^f nas leis coesivas apresentadas posteriormente. Para além disso, as curvas do adesivo Araldite® AV138 (DCB e ENF) contrastam com as correspondentes ao adesivo Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, na medida em que não apresentam uma suavização na proximidade de G_{Ic} e G_{IIc} , dada a sua fragilidade. Os valores de G_{Ic} e G_{IIc} são obtidos pelo valor de patamar nas curvas G_I - δ_n e G_{II} - δ_s , correspondente ao início da propagação da fenda [41]. Nas figuras podem-se observar diferenças claras no que concerne aos valores de G_{Ic}/G_{IIc} e respetivos δ_n/δ_s entre as diferentes curvas.

Para os provetes DCB obtiveram-se os seguintes valores de G_{Ic} : 0,252 N/mm (Araldite® AV138), 0,437 N/mm (Araldite® 2015) e 3,903 N/mm (Sikaforce® 7752; cujo valor não

se observa na respectiva figura).

Nos ensaios ENF, registaram-se valores de G_{IIc} de 0,479 N/mm (Araldite® AV138), 3,444 N/mm (Araldite® 2015) e 5,790 N/mm (Sikaforce® 7752). Verifica-se que o adesivo SikaForce® 7752 apresenta sempre valores superiores de G_{Ic}/G_{IIc} e δ_n^f / δ_s^f , relativamente aos restantes.

A Figura 110 e Figura 111, apresentam as leis coesivas experimentais $t_n-\delta_n$ e $t_s-\delta_s$, respetivamente, para os diversos adesivos e correspondentes aproximações triangulares ou trapezoidais. Conforme referido anteriormente, estas leis são obtidas por diferenciação das curvas polinomiais, ajustadas às leis experimentais $G_I-\delta_n$ e $G_{II}-\delta_s$, respetivamente.

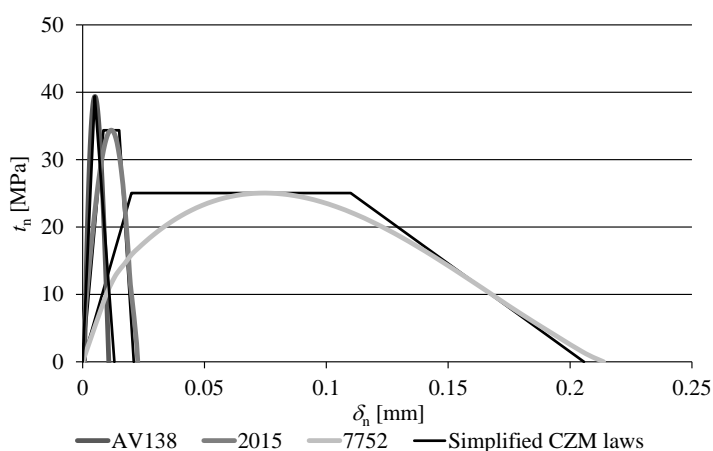


Figura 110 – Leis coesivas experimentais $t_n-\delta_n$ para os diversos adesivos, e aproximações triangular para o Araldite® AV138 e trapezoidais para os restantes [91]

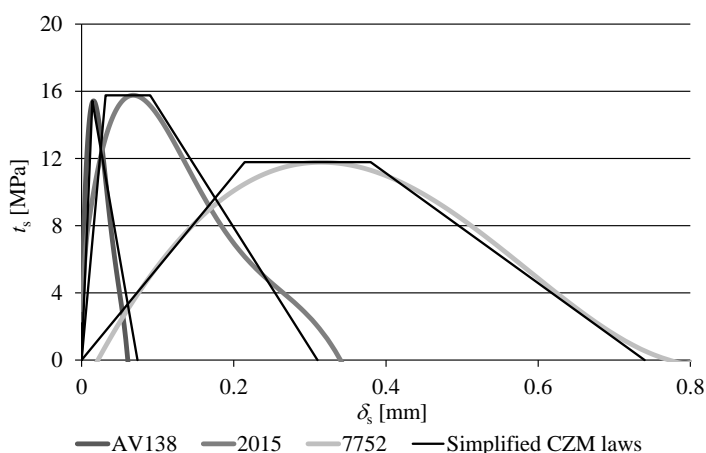


Figura 111 – Leis coesivas experimentais $t_s-\delta_s$ para os diversos adesivos, e aproximações triangular para o Araldite® AV138 e trapezoidais para os restantes [91]

Mediante o adesivo em questão, utilizam-se diferentes aproximações, de modo a

caracterizar da forma mais fidedigna possível o comportamento dos mesmos. Deste modo, para o adesivo Araldite® AV138, ambas as leis coesivas são melhor representadas por aproximações triangulares, dado o comportamento frágil do adesivo, que não demonstra uma suavização na zona de transição elasto-plástica. No caso dos adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, as aproximações trapezoidais são as que melhor se ajustam às correspondentes leis coesivas $t_n-\delta_n$ e $t_s-\delta_s$, uma vez que providenciam a melhor aproximação, tendo em conta a extensão da plastificação ocorrida, subsequente a uma transição elasto-plástica suave. Tanto as aproximações triangulares como as aproximações trapezoidais adotadas, conseguem reproduzir o comportamento e características de fragilidade ou ductilidade de cada um dos adesivos na fase de amaciamento de tensões. O diferente comportamento dos três adesivos ensaiados está de acordo com as propriedades dos mesmos, apresentadas na Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3, nomeadamente no que respeita a ε_f e G_{Ic} para as leis coesivas à tração, e γ_f e G_{IIc} para as leis coesivas em corte.

3.2.4 Análise de tensões na junta

Neste subcapítulo é feita uma análise às tensões de corte e arrancamento existentes nas juntas *scarf* testadas com os três adesivos, através de gráficos que relacionam a evolução da tensão com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L), que está compreendido entre os valores de 0 e 1. Estes dados são obtidos pelo Abaqus®, e posteriormente tratados em MS Excel®, com o objetivo de poderem ser analisados na forma de tensão normalizada *versus* posição na junta. As tensões σ_y e τ_{xy} são apresentadas normalizadas pela tensão de corte média ($\tau_{méd}$), para cada valor de α .

De modo a obter-se a distribuição das tensões e a efetuar-se a comparação entre os valores obtidos para as várias juntas *scarf*, considerou-se para todos os casos de estudo o primeiro incremento (ou seja, considerou-se valores idênticos de deslocamento aplicado) dos resultados obtidos pelo *software* Abaqus®, e as tensões a meio da camada de adesivo (*path* definido na modelação das juntas foi a meio da camada do adesivo).

3.2.4.1 Tensões de arrancamento

De seguida, apresentam-se várias figuras que mostram a evolução das tensões σ_y normalizadas em função do adesivo, e para $\alpha=3,43^\circ$ (Figura 112) e $\alpha=45^\circ$ (Figura 113).

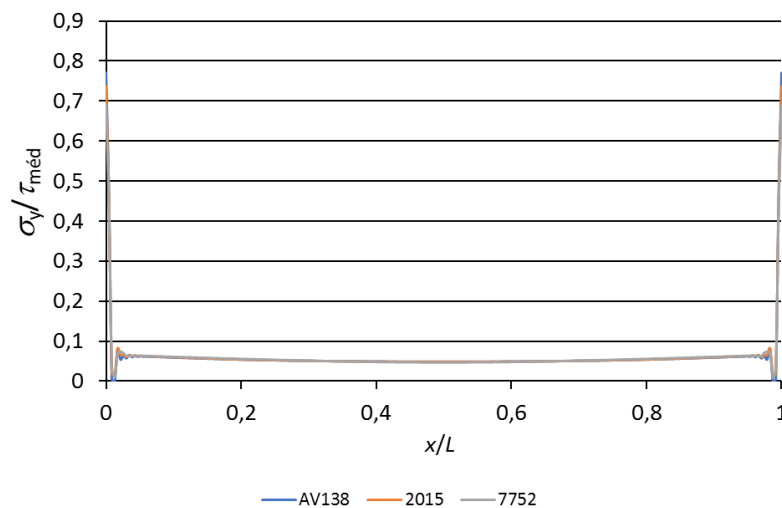


Figura 112 - Comparação da tensão normalizada de arrancamento entre adesivos para 3,43°

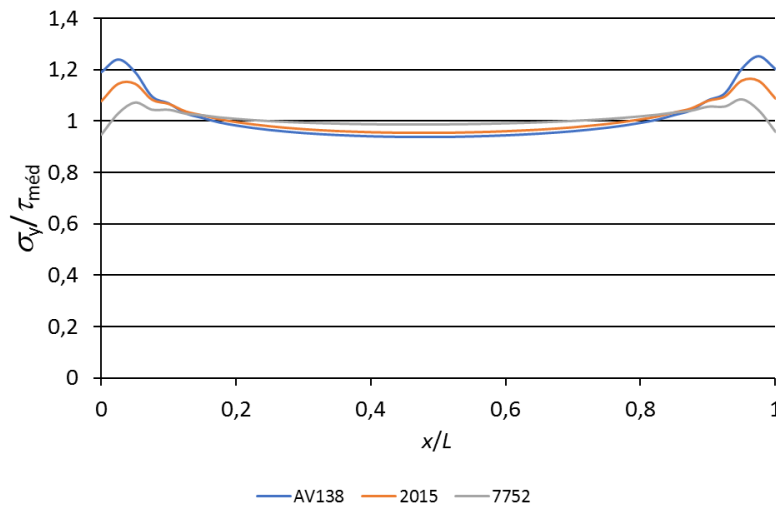


Figura 113 - Comparação da tensão normalizada de arrancamento entre adesivos para 45°

Pode-se observar que as tensões σ_y crescem (mais acentuadamente em forma de picos) com o aumento da rigidez do adesivo, isto é, as curvas de tensões para o adesivo Araldite® AV138 apresentam os picos de tensões mais altos, e o adesivo SikaForce® 7752 o comportamento mais uniforme. Este comportamento está diretamente relacionado com a rigidez do adesivo, e vai de encontro a análises semelhantes com outras configurações de juntas, nomeadamente juntas de sobreposição simples e dupla [103], e é particularmente crítico no caso de adesivos que combinem elevada rigidez e fragilidade [104]. Neste caso, a camada de adesivo não consegue acomodar os picos de tensão que se geram na camada de adesivo, o que afeta negativamente a resistência da junta. Comparando as curvas da Figura 112 e Figura 113, é possível verificar que existe uma aproximação da tensão de arrancamento à de corte com o aumento de α ,

independentemente do adesivo testado. No entanto, esta variação é abordada em mais detalhe nos capítulos seguintes.

A Figura 114, Figura 115 e Figura 116 apresentam as tensões σ_y normalizadas para cada adesivo em várias juntas *scarf*, em função de α .

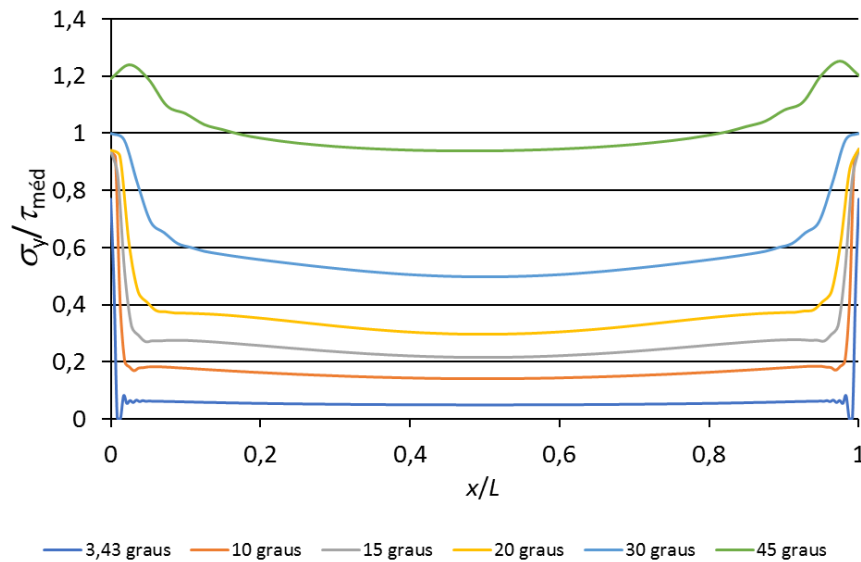


Figura 114 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos para o adesivo Araldite® AV138

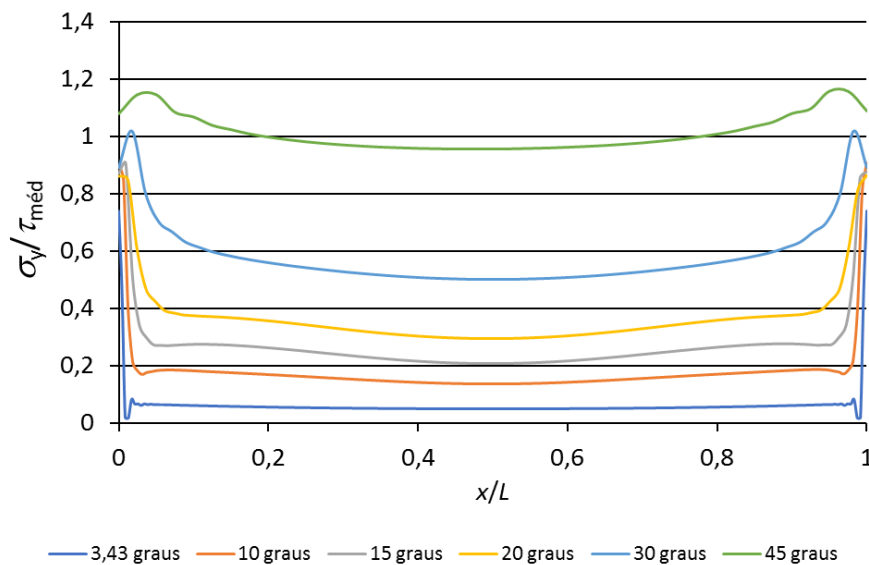


Figura 115 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos para o adesivo Araldite® 2015

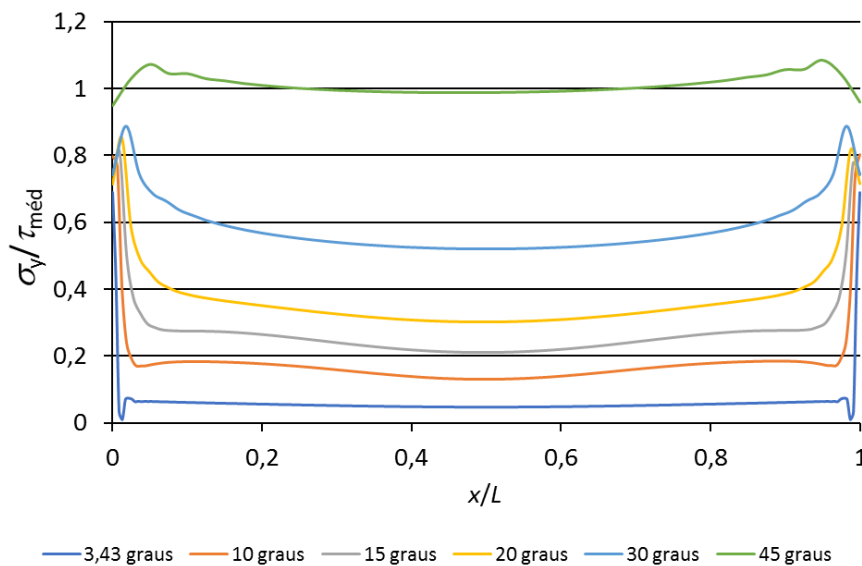


Figura 116 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos para o adesivo SikaForce® 7752

O que se observa é que, com o aumento de α , as tensões σ_y normalizadas aumentam de forma significativa, tendendo para valores próximos da tensão de corte média, o que pode ser explicado pelo facto de o ângulo *scarf* de 45° proporcionar uma preponderância idêntica destas tensões [96]. A variação de α de 3,43° para 45° corresponde a um aumento de σ_y mais de dez vezes na zona intermédia da camada do adesivo, o que mostra que a diminuição do ângulo nestas juntas diminui consideravelmente o esforço de arrancamento. Esta modificação pode ser explicada pela orientação dos esforços na junta *scarf* na zona de ligação, que se aproximam de uma sollicitação de corte da camada adesiva. O efeito da redução de espessura do substrato, particularmente para valores de α reduzidos, traduz-se em tensões σ_y de magnitude insignificante, o que é bastante benéfico para o comportamento à rotura da junta adesiva, especialmente para adesivos frágeis que não conseguem acomodar este tipo de tensões. Este comportamento contrasta com o observado numa junta de sobreposição simples, em que a espessura de substrato se mantém constante, o que conduz a tensões σ_y significativas nas extremidades do adesivo [105]. A comparação entre os três adesivos mostra uma tendência semelhante, embora o aumento da rigidez do adesivo conduza a maiores gradientes e picos de tensão nas extremidades da ligação.

3.2.4.2 Tensões de corte

Neste subcapítulo, apresentam-se várias figuras que mostram a evolução da tensão normalizada de corte em função de α para os vários adesivos. A Figura 117 e Figura 118 mostram a evolução das tensões τ_{xy} normalizadas em função do adesivo, e para $\alpha=3,43^\circ$ e $\alpha=45^\circ$, respetivamente.

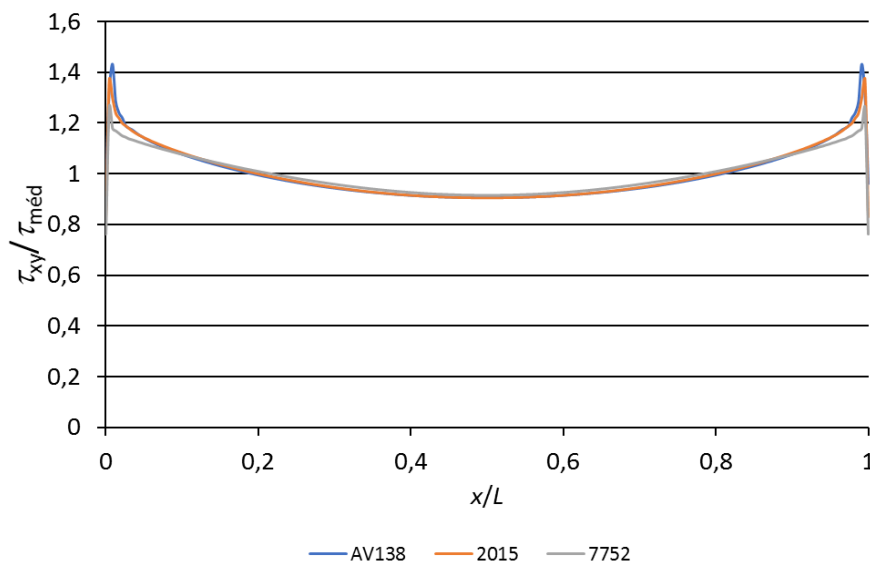


Figura 117 - Comparação da tensão normalizada de corte entre adesivos para 3,43°

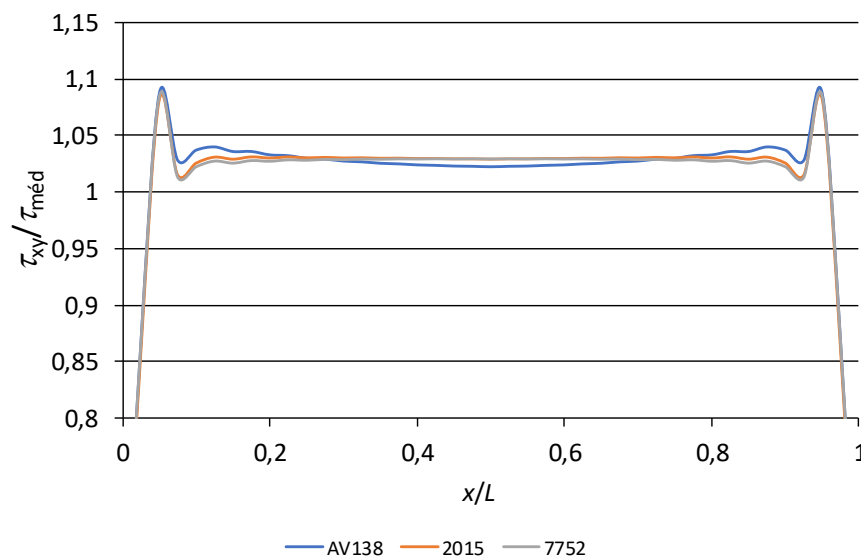


Figura 118 - Comparação da tensão normalizada de corte entre adesivos para 45°

Analisando a Figura 117 e Figura 118, verifica-se que quanto maior for a rigidez do adesivo, maiores serão os picos de tensão obtidos, o que é prejudicial para as juntas, na medida em que o adesivo poderá não ter ductilidade suficiente para acomodar estas tensões, o que por sua vez, pode provocar rotura. A magnitude dos picos de tensões τ_{xy} diminui com o aumento de α , o que será, no entanto mais detalhado, no estudo que se segue.

A Figura 119, Figura 120 e Figura 121 apresentam as curvas obtidas para o comportamento de cada adesivo em várias juntas *scarf*, em função de α .

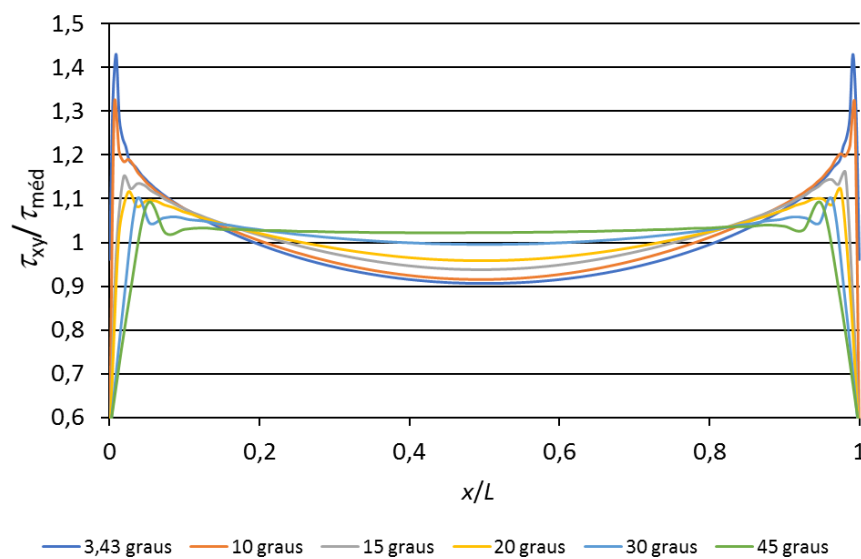


Figura 119 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos para o adesivo Araldite® AV138

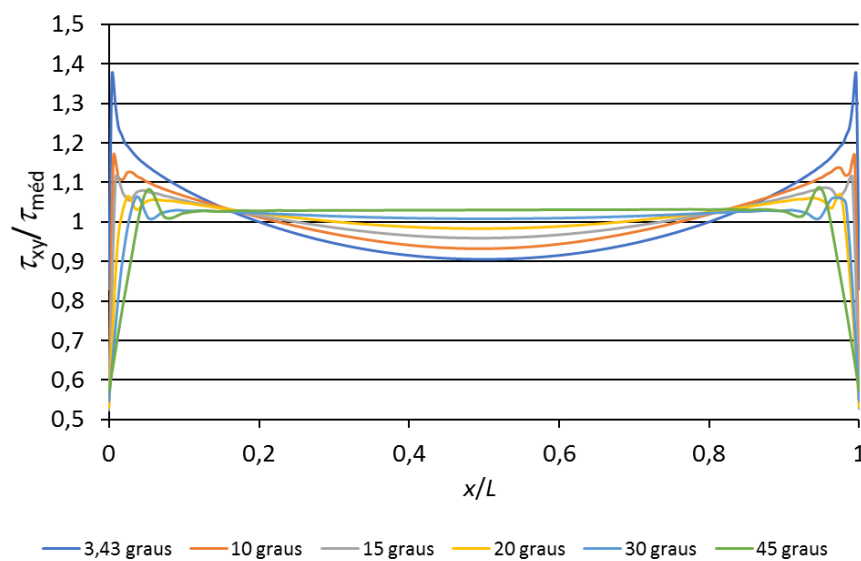


Figura 120 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos para o adesivo Araldite® 2015

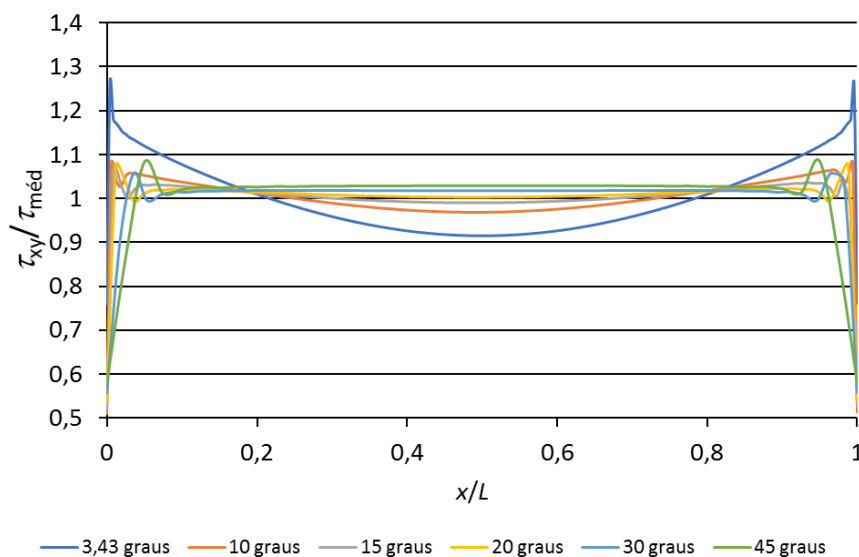


Figura 121 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos para o adesivo SikaForce® 7752

Observando a Figura 119, Figura 120 e Figura 121, pode-se dizer que as tensões τ_{xy} normalizadas caracterizam-se pela existência de picos nas extremidades, e um comportamento mais uniforme na zona interior da ligação, independentemente do valor de α . Pela comparação de diferentes valores de α , verifica-se que os picos de tensão tendem a aumentar com a redução de α . Esta variação é particularmente significativa para α inferior a 10° , principalmente para os adesivos Araldite®. Isto pode ser explicado pelo facto de que a variação da geometria *scarf* aumenta o efeito de esforço diferencial dos substratos nas extremidades da ligação [66], e que se pode encontrar frequentemente, por exemplo, em juntas de sobreposição [106]. O comportamento observado para valores de α reduzidos pressupõe uma degradação do estado de tensão na camada adesiva, que por si só tenderia a diminuir a resistência da junta. No entanto, a diminuição de α também aumenta exponencialmente o comprimento da zona ligada, o que tipicamente se sobrepõe ao efeito das tensões e permite um grande aumento da resistência da junta [107]. O adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta picos de valores mais altos, e o SikaForce® 7752 é o que apresenta o comportamento mais uniforme. Esta modificação deve-se essencialmente à rigidez dos adesivos, na medida em que, à medida que existe mais rigidez no adesivo, maior é a influência da deformação diferencial dos substratos nas extremidades da ligação [96].

3.2.5 Estudo da variável de dano

Neste subcapítulo, é feito um estudo do dano existente nas juntas *scarf* ensaiadas com os três adesivos, através de gráficos que relacionam a evolução do dano (SDEG) com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L). SDEG está compreendido entre os valores de 0 (material não danificado) e 1 (rotura completa) e é obtido pelo Abaqus®,

para posteriormente ser tratado em MS Excel®. Em Abaqus®, é criado o *path* ao longo da camada de adesivo e retirada a curva $P-\delta$ para identificar a força máxima, deslocamento e o seu incremento, o qual é usado para retirar a curva SDEG.

3.2.5.1 Extensão do dano no instante à carga máxima

De seguida, são representados os gráficos que relacionam a extensão do dano (SDEG) no instante de carga máxima com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L) para os vários adesivos.

A Figura 122, Figura 123 e Figura 124 mostram a extensão do dano (SDEG) com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L) em juntas com diferentes α , para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente.

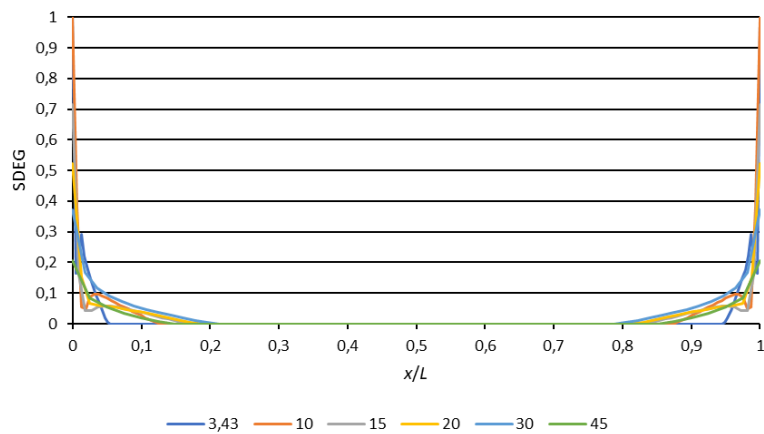


Figura 122 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L) para o adesivo Araldite® AV138 em juntas com diferentes α

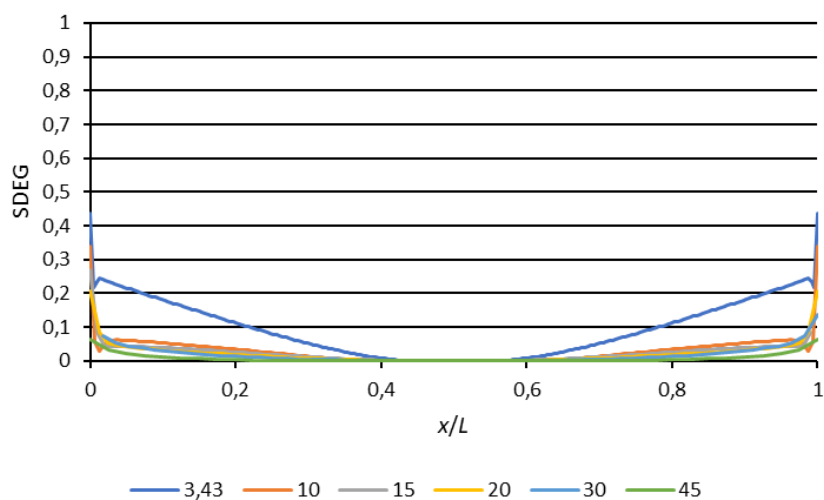


Figura 123 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L) para o adesivo Araldite® 2015 em juntas com diferentes α

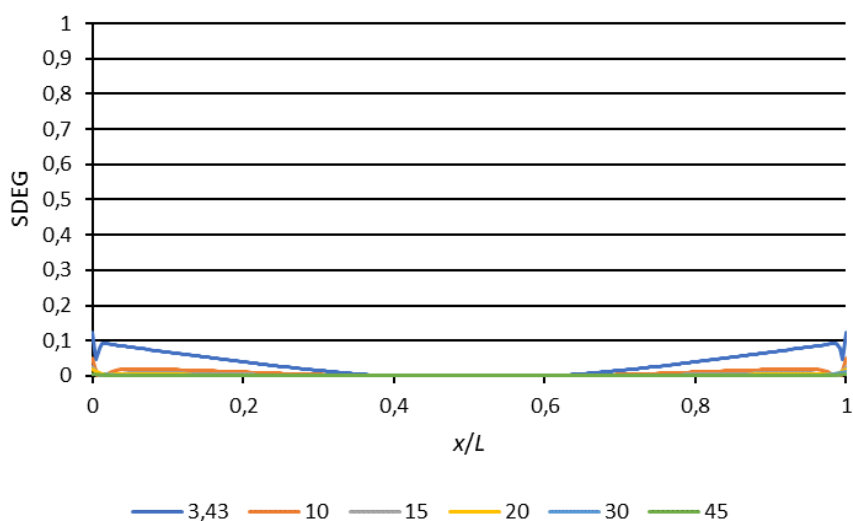


Figura 124 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L) para o adesivo Sikaforce® 7752 em juntas com diferentes α

Da análise da Figura 122, Figura 123 e Figura 124 pode-se dizer que a maior incidência de dano neste tipo de junta dá-se nas extremidades, de forma coerente com a distribuição de tensões que foi apresentada no capítulo anterior. Na zona intermédia da ligação, o dano é tipicamente nulo no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingida. Analisando entre os vários α , observa-se que com o seu aumento se obtém menor magnitude localizada nas extremidades, e uma maior uniformidade no dano ao longo da camada adesiva, também no seguimento da variação da distribuição de tensões em função de α , na medida em que as tensões também se tornam mais uniformes para valores de α superiores. Entre adesivos, verifica-se que com o aumento da sua rigidez, a magnitude do dano nos vários α aumenta, e concentra-se em zonas mais reduzidas nas extremidades da ligação, apresentando mais oscilações. Por outro lado, o aumento da ductilidade do adesivo permite uma distribuição do dano mais uniforme no instante em que ocorre $P_{\text{máx}}$, o que conduz a uma melhor utilização da resistência do adesivo em toda a extensão da ligação.

3.2.5.2 Evolução do dano em função do deslocamento aplicado

De seguida, são representados os gráficos que relacionam a evolução do dano (SDEG) em vários pontos de carga, em função do comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L) para as condições extremas de rigidez, em termos de adesivos e ângulo *scarf* utilizados. A variável de dano é representada para valores crescentes de $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}\times 100$ [%], onde $\delta_{P_{\text{máx}}}$ é o deslocamento em $P_{\text{máx}}$ (como resultado, um valor de $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}$ de 100% corresponde a $P_{\text{máx}}$).

A Figura 125 e Figura 126 apresentam a evolução do dano (SDEG) com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L), para o adesivo Araldite® AV138 com $\alpha=3,43^\circ$

e 45° , respetivamente.

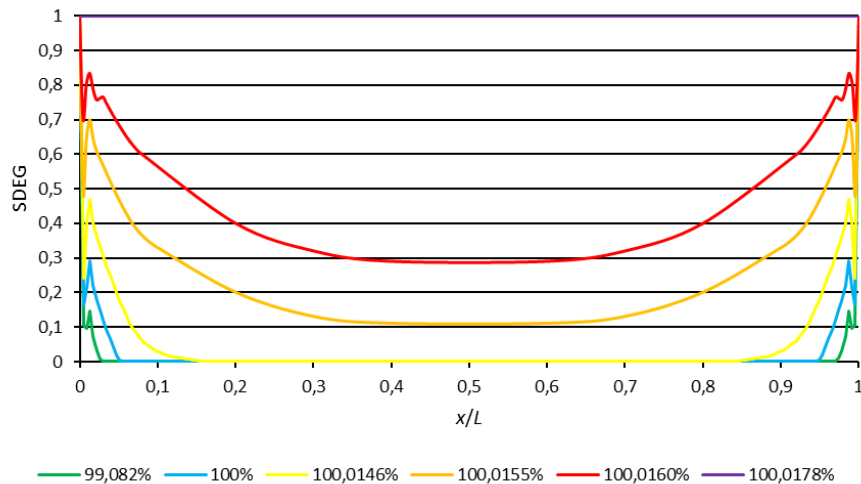


Figura 125 - Evolução do dano (SDEG) com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L) para o adesivo Araldite® AV138 com α de $3,43^\circ$

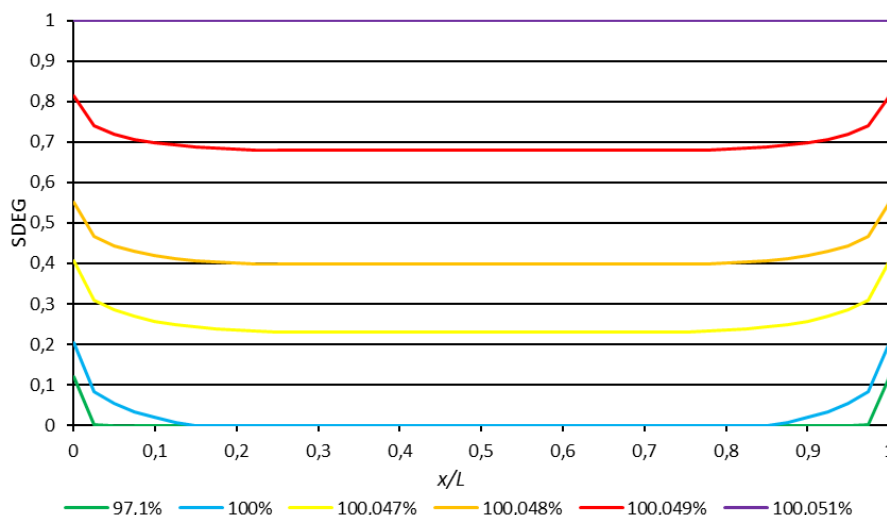


Figura 126 - Evolução do dano (SDEG) percentual com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L) para o adesivo Araldite® AV138 com α de 45°

A Figura 125 e Figura 126 reforçam o anteriormente concluído, no que diz respeito aos elevados gradientes de dano na extremidade da junta. Por outro lado, observa-se que o dano tem um processo de evolução extremamente rápido até à rotura final, em virtude do adesivo Araldite® AV138 ser frágil. De facto, para $\alpha=3,43^\circ$, a rotura completa ocorre para $\delta/\delta_{p\text{máx}} \approx 100,02\%$, enquanto para $\alpha=45^\circ$, este valor sobe marginalmente para $\approx 100,05\%$. No seguimento da discussão apresentada anteriormente relativa às distribuições de tensões, as curvas de dano, para $\alpha=45^\circ$ são bastante mais uniformes durante todo o processo de dano comparativamente às registadas para $\alpha=3,43^\circ$.

A Figura 127 e Figura 128 apresentam um estudo idêntico, embora neste caso para o adesivo Sikaforce® 7752.

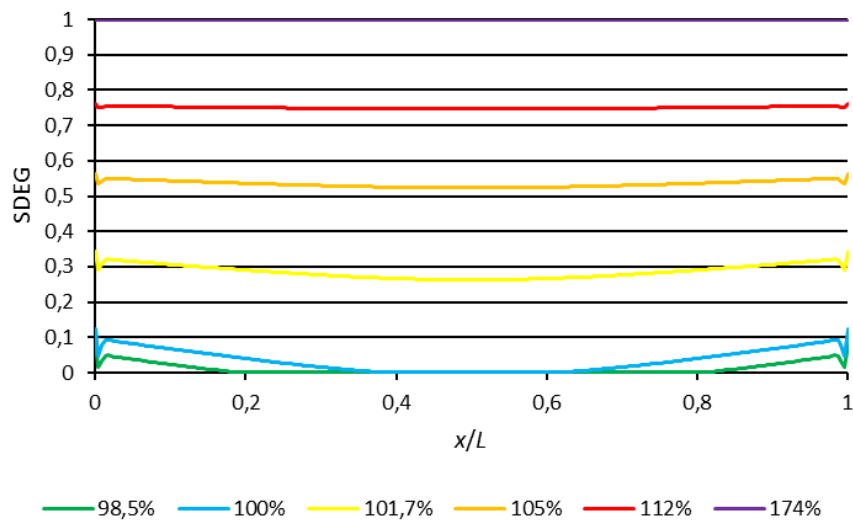


Figura 127 - Evolução do dano (SDEG) percentual com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L) para o adesivo Sikaforce® 7752 com α de $3,43^\circ$

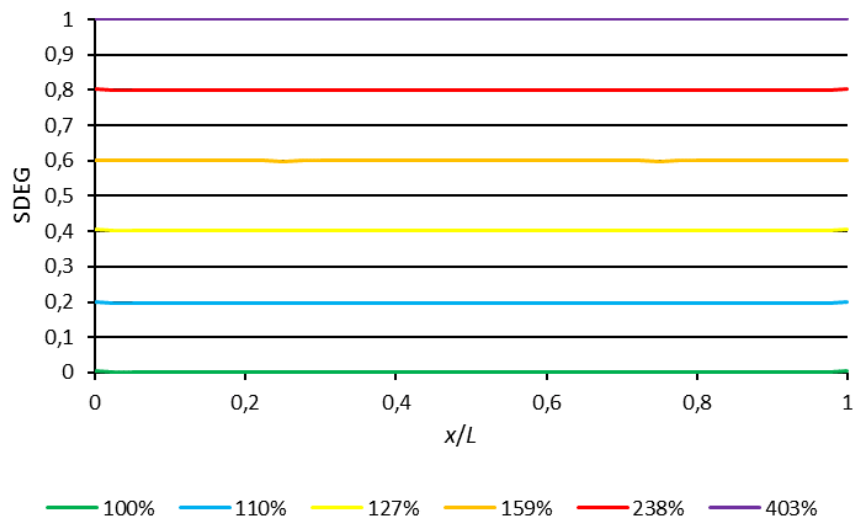


Figura 128 - Evolução do dano (SDEG) percentual com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L) para o adesivo Sikaforce® 7752 com α de 45°

Para o adesivo Sikaforce® 7752, pode-se afirmar que o dano tem um comportamento muito mais uniforme ao longo de todo o processo de dano, o que resulta da combinação de dois fatores: a menor rigidez do adesivo, que por si só já proporciona distribuições de dano mais uniformes ao longo da camada de adesivo, e a ductilidade do adesivo, que resulta numa grande extensão da zona plástica, no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingido.

Devido a estes fatores, também $\delta/\delta_{P_{\max}}$ apresenta valores bastante elevados, o que significa que a rotura da junta não ocorre de forma abrupta, como no adesivo Araldite® AV138, mas, ao invés disto, ocorre para um deslocamento bastante superior ao correspondente a P_{\max} . Mais especificamente, para $\alpha=3,43^\circ$ registou-se $\delta/\delta_{P_{\max}}=174\%$, e para $\alpha=45^\circ$ obteve-se $\delta/\delta_{P_{\max}}=403\%$. A comparação entre $\alpha=3,43^\circ$ e 45° , tal como no caso do adesivo Araldite® AV138, mostra que valores de α mais elevados, tendem a promover curvas de dano mais uniformes, ao longo de todo o processo de rotura.

3.2.6 Previsão da resistência pelo método direto

Neste subcapítulo, é demonstrada uma previsão de resistência para as juntas *scarf* com os três adesivos utilizados. Esta previsão é apresentada através de um gráfico que relaciona P_{\max} com α , em função do modelo de dano considerado (modelo triangular em modo misto, e modelos de dano independente em forma triangular, trapezoidal e exponencial). Apresenta-se outro gráfico que mostra a diferença percentual dos resultados numéricos para os modelos de dano independente, relativamente ao modelo de modo misto. As curvas que se pode observar nestes gráficos, são o resultado dos dados obtidos nos ensaios experimentais, bem como no ensaio numérico e nos modelos de dano independente e modo misto, obtidos pelo ABAQUS®.

3.2.6.1 Comparação de valores de P_{\max}

A Figura 129 mostra a evolução de P_{\max} em função de α , para as juntas com adesivo Araldite® AV138. A Figura 130 mostra a evolução de P_{\max} em função de α , para as juntas com adesivo Araldite® 2015. A Figura 131 mostra a evolução de P_{\max} em função de α para as juntas com adesivo SikaForce® 7752. São considerados os modelos de modo misto e dano independente, assim como os resultados obtidos experimentalmente.

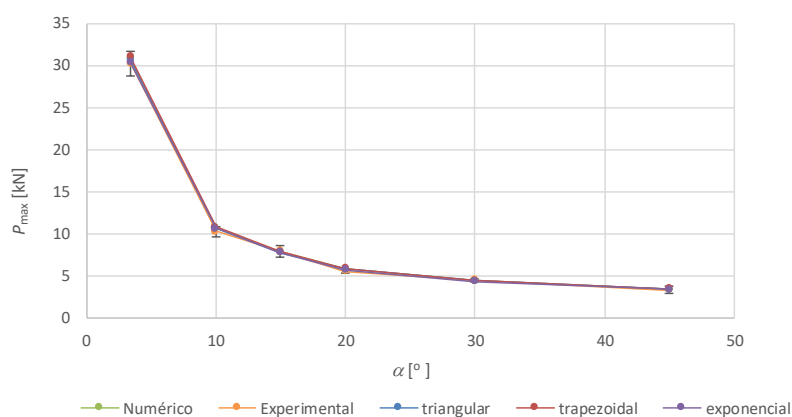


Figura 129 – Evolução da força máxima em função de α para as juntas com adesivo Araldite® AV138 nos vários ensaios

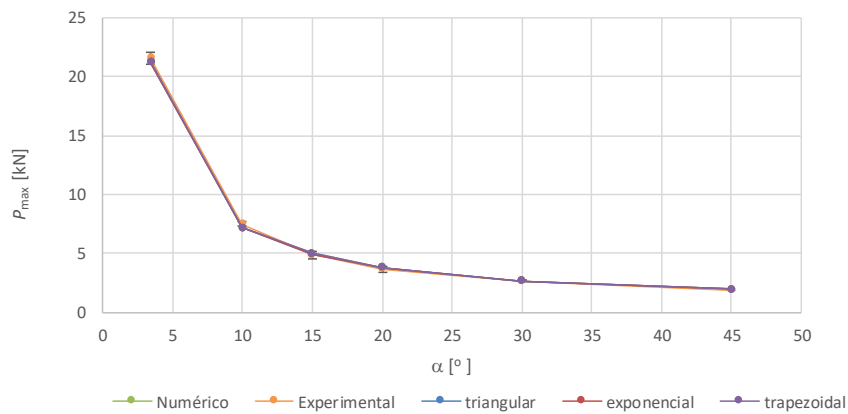


Figura 130 - Evolução da força máxima em função de α para as juntas com adesivo Araldite® 2015 nos vários ensaios

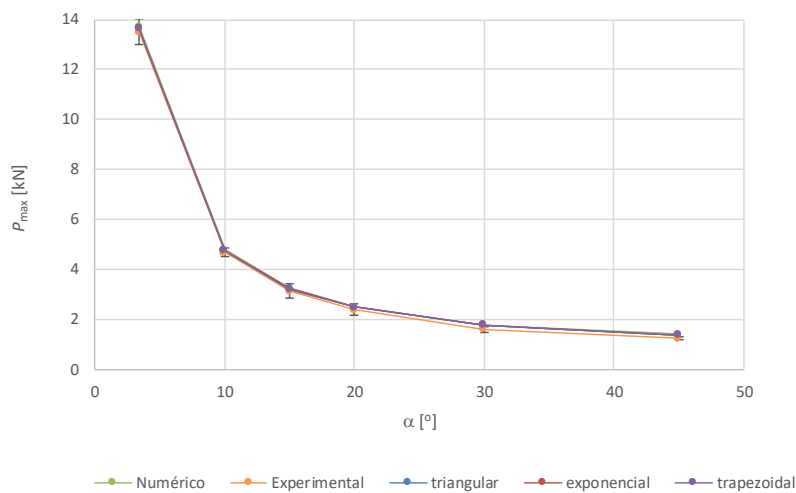


Figura 131 - Evolução da força máxima em função de α para as juntas com adesivo Sikaforce® 7752 nos vários ensaios

Observando os gráficos da evolução da força máxima (Figura 129, Figura 130 e Figura 131), pode-se afirmar que as previsões realizadas numericamente coincidem com as realizadas experimentalmente, o que leva à conclusão que a previsão de resistência pelo método direto com a ajuda de *software* adequado, produz resultados semelhantes à realidade.

Como os resultados numéricos são muito semelhantes aos experimentais, o que foi descrito no capítulo anterior para as curvas experimentais pode-se novamente afirmar para estas curvas. Novamente é possível observar que a resistência neste tipo de junta é tanto maior, quanto menor for o seu ângulo, com uma evolução tipicamente exponencial, o que ocorre principalmente devido ao aumento da área de adesivo, apesar de a distribuição de tensões ser menos favorável com a diminuição de α . De facto, existe um aumento significativo de resistência para ângulos inferiores a 20°,

quando comparada com aqueles situados acima de 20°.

Comparando os três adesivos, o que permite maior resistência em todos os ângulos é o Araldite® AV138, apesar de este ser o mais frágil. Este comportamento é explicado pela inexistência de grandes variações de tensão ao longo da camada de adesivo, o que permite que um adesivo frágil, mas mais resistente, apresente melhores resultados do que adesivos dúcteis, mas menos resistentes.

3.2.6.2 Comparação entre o modelo de modo misto e os modelos independentes

As figuras seguintes mostram a evolução dos desvios percentuais (Δ) entre os resultados de $P_{\text{máx}}$, para os modelos de modo independente e o modelo de modo misto, para todos os adesivos testados.

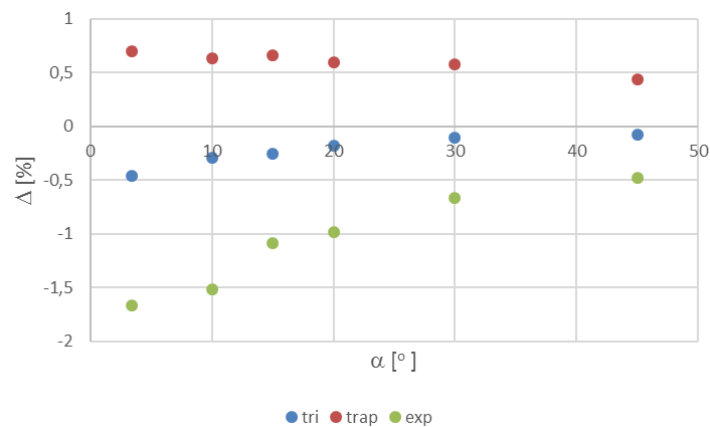


Figura 132 - Evolução percentual do desvio dos modelos de dano independente em relação ao modo misto para o adesivo Araldite® AV138

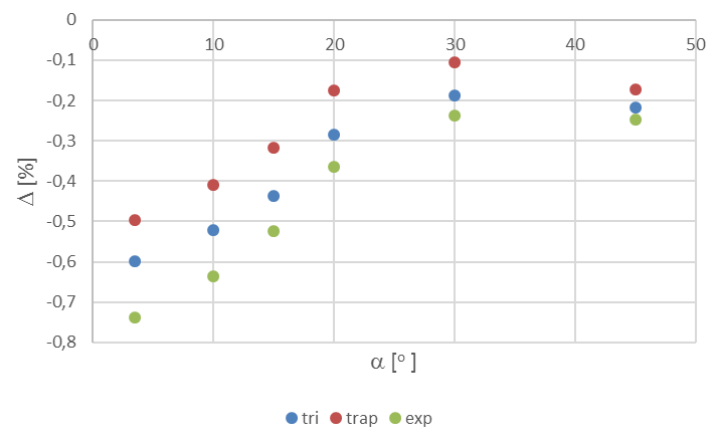


Figura 133 - Evolução percentual do desvio dos modelos de dano independente em relação ao modo misto para o adesivo Araldite® 2015

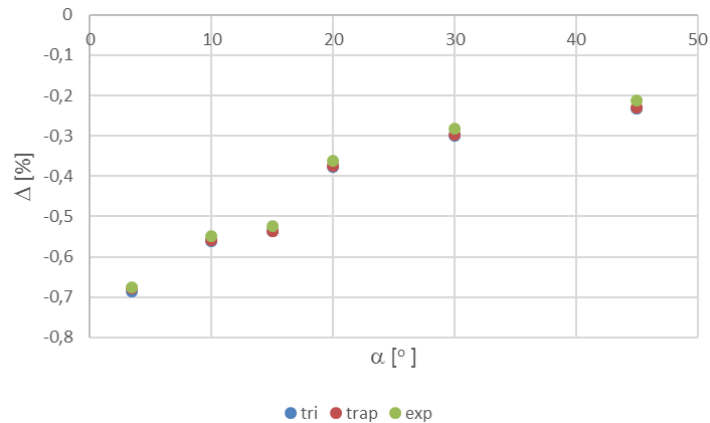


Figura 134 - Evolução percentual do desvio dos modelos de dano independente em relação ao modo misto para o adesivo SikaForce® 7752

Analisando a evolução dos desvios percentuais (Figura 132, Figura 133 e Figura 134), é possível afirmar que, para cada adesivo utilizado, existe um modelo de dano independente que apresenta menor desvio em relação ao modo misto (numérico), logo, pode-se dizer que existe um modelo que mais se identifica com o comportamento de determinado adesivo.

No caso do Araldite® AV138, o modelo independente que mais se aproxima do modelo de modo misto é o triangular. Os dados obtidos para este modelo de modo independente, apresentam um desvio percentual relativamente ao modelo de modo misto de cerca de 0,5% para $\alpha=3,43^\circ$, e de 0,1% para $\alpha=45^\circ$.

Quanto ao Araldite® 2015, o modelo independente trapezoidal é o modelo que mais se adequa ao modelo de modo misto, já que se verifica que, com o aumento da ductilidade do adesivo, os modelos de modo independente apresentam desvios crescentes, por defeito, relativamente ao modelo de modo misto. Para o modelo independente trapezoidal, as previsões numéricas apresentam um desvio percentual cerca de 0,5% para $\alpha=3,43^\circ$, e de 0,2% para $\alpha=45^\circ$.

Para o SikaForce® 7752, as diferenças entre modelos independentes são mínimas, embora o modelo que mais se adequa é o exponencial, com um desvio percentual de cerca de 0,7% para $\alpha=3,43^\circ$, e de 0,2% para $\alpha=45^\circ$.

3.2.6.3 Comparação entre os diversos tipos de leis coesivas em modos independentes

As figuras seguintes mostram uma comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos pelos modelos de modo independente trapezoidal e exponencial, em relação ao modelo independente triangular.

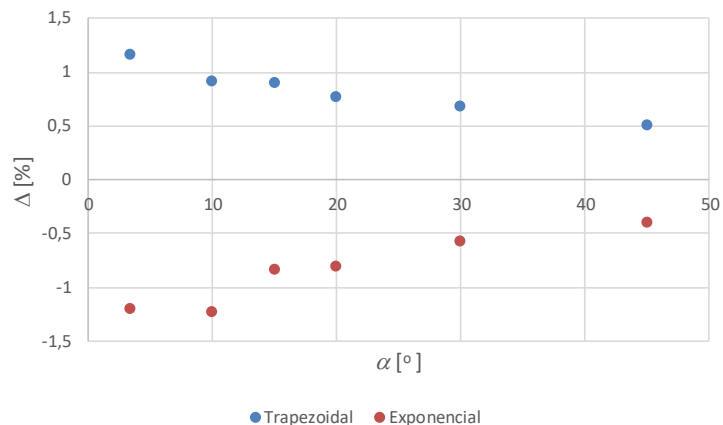


Figura 135 - Comparação das leis trapezoidal e exponencial em relação à triangular para o adesivo Araldite® AV138

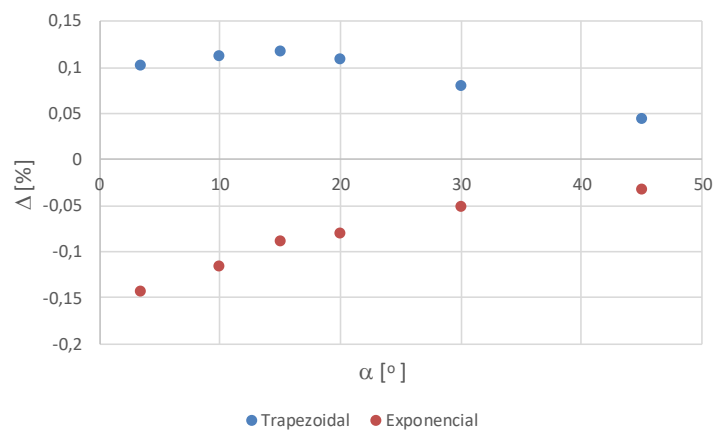


Figura 136 - Comparação das leis trapezoidal e exponencial em relação à triangular para o adesivo Araldite® 2015

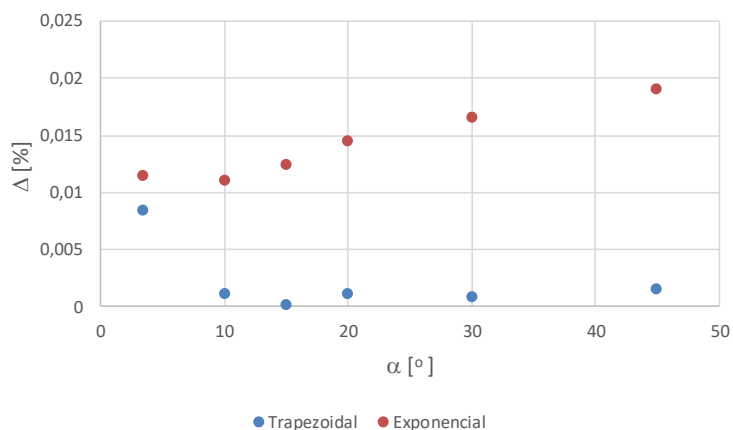


Figura 137 - Comparação das leis trapezoidal e exponencial em relação à triangular para o adesivo Sikaforce® 7752

Analisando de uma forma geral os gráficos anteriores, é possível afirmar que, para uma lei menos adequada, os erros não iriam ser muito díspares. Também é possível verificar

que, à medida que a ductilidade do adesivo aumenta, é possível observar que os gráficos apresentam menor desvio percentual. Para os adesivos Araldite® AV138 e 2015, apesar da tendência não ser perfeita, regista-se uma diminuição gradual da diferença entre os modelos trapezoidal e exponencial, relativamente ao triangular, com o aumento de α . Esta tendência não é tão notória para o adesivo Sikaforce® 7752.

3.2.7 Análise dos resultados obtidos

Após análise dos resultados obtidos, pode-se afirmar que em termos de estudo de tensões para estas juntas, se verifica que existem picos de tensão nas extremidades, e que estes tendem a aumentar com a redução de α . Também se pode dizer que, à medida que existe maior rigidez no adesivo, maiores são os efeitos de concentração de tensões e da magnitude dos picos de tensão existentes nas extremidades.

Em termos de variável de dano, é possível dizer que na zona intermédia da junta o dano tende a estabilizar, deixando de existir os picos que se observam nas extremidades, independentemente do adesivo utilizado. Analisando entre os vários α , observa-se que com o seu aumento se obtém menor magnitude e mais estabilidade no dano. Entre adesivos, verifica-se que, com o aumento da sua rigidez, a magnitude do dano nos vários α aumenta, e a sua estabilidade ao longo da junta diminui, apresentando mais oscilações. Pode-se afirmar que o dano tem um crescimento muito mais rápido num adesivo mais frágil, e também se verifica que o dano num adesivo mais dúctil ocorre de forma mais linear.

Quanto à previsão de resistência, pode-se afirmar que as previsões realizadas numericamente coincidem com as realizadas experimentalmente, o que leva à conclusão que a previsão de resistência pelo método direto, com a ajuda de *software* adequado, produz resultados semelhantes à realidade.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi uma avaliação de diferentes formulações de modelos de dano coesivo, para a previsão da resistência mecânica de juntas *scarf*. Considerou-se o modelo coesivo triangular de modo misto, e modelos de modos independentes com forma triangular, trapezoidal e exponencial, com as leis obtidas pelo método direto. Consideraram-se três tipos de adesivos, um frágil, um moderadamente dúctil e outro dúctil. Outro objetivo subjacente a este tipo de junta é a análise do seu ângulo α , dado que este assume um papel importante na resistência destas juntas.

Os resultados obtidos mostraram que o comportamento mecânico das juntas é dependente do tipo de adesivo e do ângulo α . Um adesivo mais rígido e frágil, leva a picos de tensões e instabilidade de dano na junta, enquanto um adesivo mais flexível e dúctil, apresenta maior estabilidade, tanto em tensão como em dano. Estes fatores são ampliados pela diminuição de α , mas como vantagem observa-se um aumento significativo de $P_{m\acute{a}x}$ com a diminuição de α , porque o aumento da área de adesivo correspondente se sobrepõe ao efeito de aumento dos picos de tensão.

As previsões realizadas numericamente coincidem com as realizadas experimentalmente para estas juntas adesivas, o que leva à conclusão que a previsão de resistência pelo método direto com a ajuda de *software* adequado, produz resultados semelhantes à realidade. A utilização do método direto permitiu obter previsões de resistência bastante precisas, indicando as formas de leis coesivas mais adequadas para cada conjunto adesivo/geometria de junta. No caso do Araldite® AV138, o modelo independente que mais se aproxima do modelo de modo misto é o triangular, enquanto para o Araldite® 2015, o modelo independente trapezoidal é aquele que mais se adequa ao modelo de modo misto. Para o SikaForce® 7752, as diferenças entre modelos independentes são mínimas, embora o modelo que mais se adequa é o exponencial. Verifica-se que, com o aumento da ductilidade do adesivo, os modelos de modo independente apresentam desvios crescentes, por defeito, relativamente ao modelo de modo misto. Também se pode afirmar que, para as condições geométricas e materiais consideradas, este estudo permitiu concluir que não se cometem erros significativos na escolha de uma lei menos adequada, e que, à medida que a ductilidade do adesivo aumenta, é possível observar que os gráficos apresentam menor desvio percentual. Para os adesivos Araldite® AV138 e 2015, apesar de a tendência não ser perfeita, regista-se uma diminuição gradual da diferença entre os modelos trapezoidal e exponencial, relativamente ao triangular, com o aumento de α . Esta tendência não é tão notória para o adesivo Sikaforce® 7752.

Partindo deste estudo, podem ser desenvolvidos trabalhos futuros com outros adesivos de propriedades distintas dos que foram usados e, se possível, de fabricantes também diferentes, com a intenção de reforçar ou chegar a novas conclusões sobre este tipo de estudo. Outro ponto que pode ser utilizado em estudos futuros, é o ângulo α , na medida

em que podem ser realizados novos ensaios, iniciando nos 20° para valores inferiores de α , porque a junta *scarf* comporta-se de forma diferente a partir deste ângulo. Considera-se também importante testar a metodologia numérica considerada para geometrias de juntas distintas, em que os campos de tensões sejam marcadamente diferentes daqueles obtidos neste trabalho, para um teste mais abrangente da técnica proposta.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Barbosa, N.G.C.B., *Comparação experimental e numérica por modelos de dano coesivo de diversos tipos de juntas adesivas*. 2017, Tese de Mestrado, em curso. Departamento de Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
2. Silva, J.O.S., *Estudo de juntas adesivas em degrau: análise experimental e numérica por modelos de dano coesivo*. 2017, Tese de Mestrado, em curso. Departamento de Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
3. da Silva, L.F.M., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Introduction to Adhesive Bonding Technology*, in *Handbook of Adhesion Technology*, L.F.M. da Silva, A. Öchsner, and R.D. Adams, Editors. 2011, Springer: Heidelberg. p. 1-7.
4. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007, Porto: Publindústria.
5. Marchezin, E., L.C. Pardini, and V.A. Guimarães, *Avaliação do comportamento em fadiga de juntas estruturais de ligas de Al2024T3 coladas com adesivo epóxi*. Matéria (Rio de Janeiro), 2012. **17**: p. 889-900.
6. AG, C. *Página oficial da Covestro AG (adhesives)*. [cited 2017 Abril]; Available from: <http://www.adhesives.covestro.com/en/Applications/Applications-Overview.aspx>.
7. Inc., M.B. *Página oficial da Master Bond Inc. (Adhesives for Electronic Applications)*. [cited 2017 Abril]; Available from: <http://www.masterbond.com/catalog/adhesives-electronic-applications>.
8. Loctite. *Página oficial da Loctite Portugal, Henkel Ibérica Portugal*. 2016 [cited 2016 Dezembro]; Available from: www.loctite.pt.
9. Adhesivestoolkit. *Página oficial da adhesivestoolkit, TWI Ltd - Cambridge*. [cited 2016 Dezembro]; Available from: www.adhesivestoolkit.com.
10. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, New York: McGraw-Hill.
11. da Silva, L.F.M., *Design Rules and Methods to Improve Joint Strength*, in *Handbook of Adhesion Technology*, L.F.M. da Silva, A. Öchsner, and R.D. Adams, Editors. 2011, Springer: Heidelberg. p. 689-723.
12. Kohen, G.W., *Design manual on adhesives*. Machine Design, 1954. **April**: p. n.a.
13. Blackman, B.R.K., *Quasi-Static Fracture Tests: Double Cantilever Beam and Tapered Double Cantilever Beam Testing*, in *Testing Adhesive Joints: Best Practices*, L.F.M. da Silva, et al., Editors. 2012, Wiley: Weinheim. p. 169-177.
14. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*. 2009, Tese de Doutoramento. Departamento de Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
15. Chaves, F.J.P., *Fracture Mechanics Applied to the Design of Adhesively Bonded Joints*. 2013, Tese de Doutoramento. Departamento de Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
16. Kanninen, M.F. and C.H. Popelar, *Advanced Fracture Mechanics*. 1985, Oxford: Oxford University Press.
17. 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.
18. Moore, D., A. Pavan, and J.G. Williams, *Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers, Adhesives and Composites*. 2001, Amsterdam: Elsevier.
 19. da Silva, L.F.M., F.A.C.R.G. de Magalhães, F.J.P. Chaves, and M.F.S.F. de Moura, *Mode II Fracture Toughness of a Brittle and a Ductile Adhesive as a Function of the Adhesive Thickness*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(9): p. 891-905.
 20. Campilho, R.D.S.G., *End-Notched Flexure*, in *Testing Adhesive Joints: Best Practices*, L.F.M. da Silva, et al., Editors. 2012, Wiley: Weinheim.
 21. Wang, Y. and J.G. Williams, *Corrections for mode II fracture toughness specimens of composites materials*. Composites Science and Technology, 1992. **43**(3): p. 251-256.
 22. De Moura, M.F.S.F., J.P.M. Gonçalves, J.A.G. Chousal, and R.D.S.G. Campilho, *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(8): p. 419-426.
 23. da Silva, L.F.M., V.H.C. Esteves, and F.J.P. Chaves, *Fracture toughness of a structural adhesive under mixed mode loadings Bruchzähigkeit eines Strukturklebstoffs bei Mixed-Mode Belastung*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2011. **42**(5): p. 460-470.
 24. Szekrényes, A. and J. Uj, *Beam and finite element analysis of quasi-unidirectional composite SLB and ELS specimens*. Composites Science and Technology, 2004. **64**(15): p. 2393-2406.
 25. Park, S. and D.A. Dillard, *Development of a simple mixed-mode fracture test and the resulting fracture energy envelope for an adhesive bond*. International Journal of Fracture, 2007. **148**(3): p. 261-271.
 26. Xiao, F., C.Y. Hui, and E.J. Kramer, *Analysis of a mixed mode fracture specimen: the asymmetric double cantilever beam*. Journal of Materials Science, 1993. **28**(20): p. 5620-5629.
 27. Tong, L. and Q. Luo, *Analysis of Cracked Lap Shear (CLS) Joints*, in *Modeling of Adhesively Bonded Joints*, L.F.M. da Silva and A. Öchsner, Editors. 2008, Springer: Heidelberg. p. 25-51.
 28. Yoon, S.H. and C.S. Hong, *Modified end notched flexure specimen for mixed mode interlaminar fracture in laminated composites*. International Journal of Fracture, 1990. **43**(1): p. R3-R9.
 29. Xie, D., A.M. Waas, K.W. Shahwan, J.A. Schroeder, and R.G. Boeman, *Fracture criterion for kinking cracks in a tri-material adhesively bonded joint under mixed mode loading*. Engineering Fracture Mechanics, 2005. **72**(16): p. 2487-2504.
 30. Ameli, A., M. Papini, J.A. Schroeder, and J.K. Spelt, *Fracture R-curve characterization of toughened epoxy adhesives*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(3): p. 521-534.
 31. Chaves, F.J.P., L.F.M. da Silva, M.F.S.F. de Moura, D.A. Dillard, and V.H.C. Esteves, *Fracture Mechanics Tests in Adhesively Bonded Joints: A Literature Review*. The Journal of Adhesion, 2014. **90**(12): p. 955-992.
 32. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. 1938. p. 41-47.

33. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics 1944. **66**: p. 17-27.
34. 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.
35. Hart-Smith, L.J., *Stress analysis: a continuum mechanics approach*. Developments in Adhesives, 1973.
36. Penado, F.E., *A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint*. Journal of Thermoplastic Composite Materials 1998. **11**: p. 272-287.
37. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**: p. 199–204.
38. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Failure load prediction*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**: p. 213–227.
39. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks*. . Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. **23**: p. 622–636.
40. Feraren, P. and H.M. Jensen, *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**: p. 2125–2142.
41. Ji G, O.Z., Li G, Ibekwe S, Pang SS *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**: p. 2445–2458.
42. Duan K., H.X., Mai Y.W. , *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**: p. 39–53.
43. 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**: p. 147–161.
44. 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**: p. 1146-1158.
45. Daudeville, L. and P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures 1993. **25**: p. 547-555.
46. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials 2005. **37**: p. 955-979.
47. 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**: p. 763-781.
48. 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**: p. 981-994.
49. Lemaitre, J. and R. Desmorat, *Engineering Damage Mechanics*. 2005, Heidelberg:

- Springer. 380.
50. Gurson, A.L., *Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I—Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media*. Journal of Engineering Materials and Technology, 1977. **99**: p. 2-15.
 51. Tvergaard, V. and A. Needleman, *Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar*. Acta Metallurgica 1984. **32**: p. 157-169.
 52. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage mechanics with finite elements*. 2005, Heidelberg: Springer. 113.
 53. Bhattacharya, B. and B. Ellingwood, *Continuum damage mechanics analysis of fatigue crack initiation*. International Journal of Fatigue 1998. **20**: p. 631-639.
 54. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, and A.D. Crocombe, *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics 2010. **77**: p. 1073-1090.
 55. Mohammadi, S., *Extended finite element method for fracture analysis of structures*. 2008, New Jersey: Blackwell Publishing.
 56. 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**: p. 131–150.
 57. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 1960. **8**: p. 100-104.
 58. 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.
 59. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. 2012, Heidelberg: Springer.
 60. Xie, D. and A.M. Waas, *Discrete cohesive zone model for mixed-mode fracture using finite element analysis*. Engineering Fracture Mechanics 2006. **73**: p. 1783-1796.
 61. 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**: p. 1497-1512.
 62. Andersson, T. and U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41**: p. 413-434.
 63. Pinto, A.M.G., A.G. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, and A.P.M. Baptista, *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion 2009. **85**: p. 351-376.
 64. ASTM, *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*, in ASTM D3433-99(2012). 2012, PA: West Conshohocken.
 65. ASTM, *Standard Test Method for Shear Strength of Adhesive Bonds Between Rigid Substrates by the Block-Shear Method*, in ASTM D4501-01(2014). 2014, PA: West Conshohocken.
 66. 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 2009a. **40**: p. 149-157.

67. Flinn, B.D., C.S. Lo, F.W. Zok, and A.G. Evans, *Fracture Resistance Characteristics of a Metal-Toughened Ceramic*. Journal of the American Ceramic Society, 1993. **76**: p. 369-375.
68. Mello, A.W. and K.M. Liechti, *The Effect of Self-Assembled Monolayers on Interfacial Fracture*. Journal of Applied Mechanics 2004. **73**: p. 860-870.
69. 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**: p. 537-549.
70. 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.
71. Lee, M.J., T.M. Cho, W.S. Kim, B.C. Lee, and J.J. Lee, *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives 2010. **30**: p. 322-328.
72. 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.
73. Stigh, U., K.S. Alfredsson, T. Andersson, A. Biel, T. Carlberger, and K. Salomonsson, *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. International Journal of Fracture 2010. **165**: p. 149-162.
74. Rice, J.R., *A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks*. Journal of Applied Mechanics 1968. **35**: p. 379-386.
75. 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**: p. 2011-2026.
76. Campilho, R.D.S.G., D.C. Moura, D.J.S. Gonçalves, J.F.M.G. da Silva, M.D. Banea, and L.F.M. da Silva, *Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites*. Composites Part B: Engineering, 2013. **50**: p. 120-126.
77. Carlberger, T. and U. Stigh, *Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study*. The Journal of Adhesion 2010. **86**: p. 816-835.
78. Constante, C.J., R.D.S.G. Campilho, and D.C. Moura, *Tensile fracture characterization of adhesive joints by standard and optical techniques*. Engineering Fracture Mechanics, 2015. **136**: p. 292-304.
79. Zhu, Y. and K.M.R.-C. Liechti, K., *Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**: p. 31-51.
80. Leffler, K., K.S. Alfredsson, and U. Stigh, *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids and Structures 2007. **44**: p. 530-545.
81. Leitão, A.C.C., R.D.S.G. Campilho, and D.C. Moura, *Shear Characterization of Adhesive Layers by Advanced Optical Techniques*. Experimental Mechanics, 2016. **56**(3): p. 493-506.
82. 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-lap and double-lap joints by standard and*

- extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
83. Moreira, R.D.F., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remedo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência*. 2013, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
84. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, and L.F.M. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
85. 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.
86. 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.
87. Faneco, T., R. Campilho, F. Silva, and R. Lopes, *Strength and Fracture Characterization of a Novel Polyurethane Adhesive for the Automotive Industry*. 2017.
88. Constante, C.J., *Utilização de métodos óticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fratura de adesivos estruturais*, in *Engenharia Mecânica*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
89. 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 *Engenharia Mecânica*. 2015, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
90. 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**: p. 14-18.
91. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*, in *Engenharia Mecânica*. 2016, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
92. 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 *Engenharia Mecânica*. 2015, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
93. da Silva, L.F.M., R.J.C. Carbas, G.W. Critchlow, M.A.V. Figueiredo, and K. Brown, *Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009. **29**: p. 621-632.
94. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, D.A. Ramantani, and J.P.M. Gonçalves, *Obtaining the Cohesive Laws of a Trapezoidal Mixed-Mode Damage Model Using an Inverse Method*. Ciência e Tecnologia dos Materiais, 2008. **20**: p. 81-86.
95. Campilho, R.D.S.G., D.C. Moura, M.D. Banea, and L.F.M. da Silva, *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2014. **53**: p. 15-22.
96. 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.

97. Wang, C.H. and A.J. Gunnion, *On the design methodology of scarf repairs to composite laminates*. Composites Science and Technology, 2008. **68**: p. 35-46.
98. Abaqus, *Documentation*. 2009, Dassault Systèmes: Vélizy-Villacoublay.
99. 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.
100. Yang, Q.D., M.D. Thouless, and S.M. Ward, *Numerical simulations of adhesively-bonded beams failing with extensive plastic deformation*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1999. **47**(6): p. 1337-1353.
101. 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.
102. Carlberger, T. and U. Stigh, *An explicit FE-model of impact fracture in an adhesive joint*. Engineering Fracture Mechanics, 2007. **74**(14): p. 2247-2262.
103. Nunes, S.L.S., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. da Silva, C.C.R.G. de Sousa, T.A.B. Fernandes, M.D. Banea, and L.F.M. da Silva, *Comparative Failure Assessment of Single and Double Lap Joints with Varying Adhesive Systems*. The Journal of Adhesion, 2016. **92**(7-9): p. 610-634.
104. Alves, D.L., *Ligações adesivas com chanfro interior entre aderentes distintos*, in *Engenharia Mecânica*. 2016, ISEP: Porto.
105. Davis, M. and D. Bond, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1999. **19**(2-3): p. 91-105.
106. Odi, R.A. and C.M. Friend, *An improved 2D model for bonded composite joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004. **24**(5): p. 389-405.
107. Moreira, R.D.F. and R.D.S.G. Campilho, *Strength improvement of adhesively-bonded scarf repairs in aluminium structures with external reinforcements*. Engineering Structures, 2015. **101**(Supplement C): p. 99-110.