



Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto

ULISSES TIAGO FERREIRA CARVALHO

Abril de 2016

Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto

Ulisses Tiago Ferreira Carvalho

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



30 de abril de 2016

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação/Projecto/Estágio do 2º ano do Mestrado
em Engenharia Mecânica

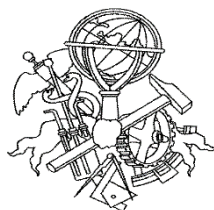
Candidato: Ulisses Tiago Ferreira Carvalho, N° 1060806, 1060806@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, rds@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



30 de abril de 2016

Dedico este trabalho aos meus pais e família pelo apoio incondicional...

Agradecimentos

Ao Orientador e Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pela sua disponibilidade, transmissão de conhecimentos e apoio prestado nas diversas etapas que compuseram este trabalho.

Aos meus pais, família e amigos pelo suporte e incentivo incondicional durante a elaboração da presente dissertação.

Finalmente ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, enquanto instituição que me transmitiu os conhecimentos devidos ao longo da minha formação académica e que disponibilizou as instalações e meios para a realização da componente experimental integrante deste trabalho.

Resumo

A utilização de adesivos hoje em dia encontra-se de tal forma disseminada que é transversal a diversos setores do mercado, como a indústria aeroespacial, aeronáutica, automóvel e do desporto. De facto, o uso de ligações adesivas em estruturas mecânicas têm vindo a crescer, na medida em que estes têm substituído os métodos de ligação convencionais, tais como brasagem, rebitagem, ligações aparafusadas e soldadura. No geral, as ligações adesivas apresentam diversas vantagens, desde a diminuição do peso, redução da concentração de tensões, facilidade de fabrico, bom comportamento a solicitações cíclicas e capacidade de unir materiais dissimilares. O crescente interesse da indústria nas ligações adesivas tem por base o aumento da confiabilidade nos métodos de previsão de resistência de estruturas adesivas. Neste contexto surgem os Modelos de Dano Coesivo, que permitem simular o crescimento do dano em estruturas, após introdução das leis coesivas previamente estimadas nos modelos numéricos. 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 visa a validação de leis coesivas em tração e corte, estimadas pela aplicação do método direto, na previsão da resistência de juntas com geometria de solicitação mista. Neste âmbito, ensaiaram-se JSS e JSD com diferentes comprimentos de sobreposição e com adesivos de diferente ductilidade. Foram considerados os adesivos Araldite® AV138, de elevada resistência e baixa ductilidade, o Araldite® 2015, de moderada ductilidade e resistência intermédia, e o 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 lineares-exponenciais, que foram testadas para cada um dos adesivos. A validação das mesmas consumou-se por comparação das previsões numéricas com os 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.

Palavras-Chave

Ligações adesivas, adesivos estruturais, modelos de dano coesivo, método direto, juntas de sobreposição simples, juntas de sobreposição dupla, leis coesivas.

Abstract

Nowadays, the use of adhesives is widespread in such a manner that it covers different market sectors, such as the aerospace, aeronautic, automotive and sports industries. In fact, the use of adhesive bonds in mechanical structures has been growing in the replacement of conventional bonding methods such as brazing, riveting, fastening and welding. In general, adhesive bonds offer several advantages, such as the weight reduction, reduction of stress concentrations, easy fabrication, good fatigue behaviour and possibility to join dissimilar materials. The industry's growing interest in adhesive bonds is based on the increased reliability of the strength prediction methods to adhesive structures. In this context, Cohesive Zone Models are available, which allow simulating damage growth in structures, after introduction of previously estimated cohesive laws in numerical models. One of the most important stages of this predictive method is the estimation of the tensile and shear cohesive laws; so it is highly important the existence and validation of accurate methods for obtaining these laws.

This work aims the validation of tensile and shear cohesive laws, estimated by the application of the direct method, in order to predict the failure of bonded joints under mixed-mode loading. In this context, single and double-lap joints were tested with different overlap lengths and adhesives with distinct ductility. The adhesives Araldite® AV138, which reveals high strength and low ductility, the Araldite® 2015, a moderate ductility and intermediate strength adhesive and the SikaForce® 7752, with low strength and high ductility, were considered. The cohesive laws in pure modes enabled obtaining simplified cohesive laws with triangular, trapezoidal and linear-exponential shapes, which were tested for each one of the adhesives. The validation of the referred cohesive law shapes was accomplished by comparing the numerical predictions with the experimental tests. A peel and shear stress analysis in the adhesive was also performed, in order to understand the influence of stresses on the joints' strength. The use of the direct method allowed obtaining accurate strength predictions, providing the most adequate cohesive law shape for each set of adhesive/joint geometry. Moreover, for the considered geometric and material conditions, this study allowed concluding that no significant errors are committed by choosing a less suitable law.

Keywords

Adhesive bonds, structural adhesives, cohesive zone models, direct method, single-lap joints, double-lap joints, cohesive laws

Índice

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE TABELAS	XXV
NOMENCLATURA	XXVII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 LIGAÇÕES ADESIVAS	5
2.1.1 <i>História dos primeiros adesivos</i>	6
2.1.2 <i>História dos adesivos modernos</i>	6
2.1.3 <i>Caraterização das juntas adesivas</i>	9
2.1.4 <i>Esforços em juntas adesivas</i>	10
2.1.5 <i>Modos de rotura juntas adesivas</i>	15
2.1.6 <i>Configurações possíveis de junta</i>	17
2.1.7 <i>Comparação entre JSS e JSD</i>	27
2.2 ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA	29
2.2.1 <i>Ensaio em tração (modo I)</i>	31
2.2.1.1 Ensaio DCB	31
2.2.1.2 Ensaio em provetes TDCB	37
2.2.2 <i>Ensaio em corte (modo II)</i>	38
2.2.2.1 Ensaio ENF	39
2.2.3 <i>Ensaio em solitação combinada (modo misto I + II)</i>	43
2.3 TÉCNICAS DE PREVISÃO DE RESISTÊNCIA	46
2.3.1 <i>Métodos analíticos</i>	47
2.3.2 <i>Métodos numéricos</i>	47
2.3.2.1 Mecânica dos meios contínuos	47
2.3.2.2 Mecânica da Fratura	48
2.3.2.3 Mecânica do Dano	49
2.3.2.4 XFEM	50
2.4 PREVISÃO DE RESISTÊNCIA POR MODELOS DE DANO COESIVO	50

2.4.1	<i>Métodos para a obtenção das leis coesivas</i>	53
2.4.1.1	Método de determinação individual das propriedades coesivas	54
2.4.1.2	Método inverso	55
2.4.1.3	Método direto	56
3	TRABALHO EXPERIMENTAL	59
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	59
3.1.1	<i>Substratos</i>	59
3.1.2	<i>Adesivos</i>	60
3.1.2.1	Araldite® AV138	60
3.1.2.2	Araldite® 2015.....	61
3.1.2.3	Sikaforce® 7752 FRW L60.....	62
3.2	FABRICO DOS PROVETES.....	64
3.2.1	<i>Provetes DCB, ENF, JSS e JSD</i>	64
3.3	ENSAIO DOS PROVETES.....	74
3.3.1	<i>Provetes DCB</i>	75
3.3.2	<i>Provetes ENF</i>	75
3.3.3	<i>JSS e JSD</i>	76
3.4	RESULTADOS OBTIDOS	77
3.4.1	<i>Provetes DCB</i>	77
3.4.1.1	Curvas $P-\delta$ experimentais.....	77
3.4.1.2	Modos de Rotura	80
3.4.1.3	Determinação de G_{Ic} pelo método direto	81
3.4.1.4	Determinação da lei coesiva em tração.....	86
3.4.2	<i>Provetes ENF</i>	88
3.4.2.1	Curvas $P-\delta$ experimentais.....	88
3.4.2.2	Modos de rotura.....	91
3.4.2.3	Determinação de G_{IIc} pelo método direto	92
3.4.2.4	Determinação da lei coesiva em corte	96
3.4.3	<i>Juntas de sobreposição simples</i>	99
3.4.3.1	Curvas $P-\delta$ experimentais.....	99
3.4.3.2	Modos de rotura.....	101
3.4.3.3	Resistência das JSS	103
3.4.4	<i>Juntas de sobreposição dupla</i>	106
3.4.4.1	Curvas $P-\delta$ experimentais	106
3.4.4.2	Modos de Rotura	109
3.4.4.3	Resistência das JSD.....	113
4	TRABALHO NUMÉRICO	117
4.1	CONDIÇÕES DA ANÁLISE NUMÉRICA.....	117
4.2	MODELO DE DANO COESIVO	123
4.2.1	<i>Modelos de dano triangular, trapezoidal e linear-exponencial</i>	124
4.3	LEIS COESIVAS PARA SIMULAÇÃO DO ADESIVO	126

4.3.1	<i>Leis experimentais $G_I-\delta_n$ e $G_{II}-\delta_s$</i>	127
4.3.2	<i>Leis coesivas $t_n-\delta_n$ e $t_s-\delta_s$</i>	129
4.4	PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DAS JUNTAS	130
4.4.1	<i>Análise de tensões nas juntas</i>	130
4.4.1.1	Tensões de arrancamento	131
4.4.1.2	Tensões de corte.....	135
4.4.2	<i>Explicação dos valores de $P_{máx}$ obtidos</i>	139
4.4.3	<i>Comparação entre as previsões numéricas e resultados experimentais</i>	141
4.5	ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	146
5	CONCLUSÕES	151
	REFERÊNCIAS	155

Índice de Figuras

Figura 1 – Estrutura de madeira colada com adesivo de caseína, usada na aviação em 1915 [1].	7
Figura 2 – Ligação entre duas estruturas de madeira tridimensionais, efetuada com adesivo em 1915 [1].	7
Figura 3 – 5 tipos de esforços fundamentais em juntas adesivas: a) compressão; b) tração; c) corte; d) arrancamento e e) clivagem. Adaptado de: <i>Adhesives Technology Handbook</i> [11].	11
Figura 4 – Distribuição da tensão normal (t_n) numa junta topo a topo sob carregamento axial e não axial [9].	12
Figura 5 – Distribuição da tensão τ_{xy} numa JSS solicitada à tração [9].	13
Figura 6 – Ângulo de separação entre substratos sob esforço: a) de clivagem b) arrancamento.	13
Figura 7 – Distribuição de tensão numa junta carregada em clivagem [11].	14
Figura 8 – Distribuição de tensão numa junta carregada em arrancamento [11].	14
Figura 9 – Junta submetida a esforços de arrancamento: a) com adesivo frágil; b) com adesivo flexível. Adaptado de: <i>Handbook of adhesives and sealants</i> [9].	14
Figura 10 – Modos de rotura em ligações adesivas. Adaptado de: <i>Plastics Decoration Magazine</i> [12].	15
Figura 11 – Rotura maioritariamente coesiva obtida após ensaio em modo I em provetes <i>Tapered Double Cantilever Beam</i> (TDCB) [15].	16
Figura 12 – Rotura mista obtida do ensaio de JSS [16].	17
Figura 13 – Principais tipos e configurações de juntas adesivas [17].	18
Figura 14 – Tração de uma junta topo a topo simples, com possíveis desalinhamentos de forças aplicadas. Adaptado de <i>GlueOnline</i> [18].	19
Figura 15 – Configurações de juntas topo a topo [19].	19
Figura 16 – JSS após deformação, causada pela força aplicada, colocando as extremidades da sobreposição em arrancamento [3].	20
Figura 17 – Diferentes configurações de juntas de sobreposição. Adaptado de: <i>Mapeng – Assembly considerations, Joint Design</i> [19].	21
Figura 18 – Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS: 1 – Sem chanfro e espessura finita de adesivo; 2 – Com chanfro e espessura finita de adesivo; 3 – com chanfro e espessura nula de adesivo [9].	21
Figura 19 – Efeito do chanframento em JSS, na força máxima admissível. Adaptado de <i>Handbook of adhesives and Sealants</i> [9].	22
Figura 20 – Juntas com tira de reforço. Adaptado de <i>Handbook of adhesives and Sealants</i> [9].	23
Figura 21 – Juntas cilíndricas para varões sujeitos a esforços axiais e de torção [11].	23
Figura 22 – Juntas cilíndricas para tubos sujeitos a esforços axiais e de torção [11].	24

Figura 23 – Juntas cilíndricas para tubos e varões sujeitos as esforços axiais ou de torção. Adaptado de <i>Structural Adhesive Joints in Engineering</i> [20].	24
Figura 24 – Configurações de juntas em T. Adaptado de <i>Structural Adhesive Joints in Engineering</i> [20].	25
Figura 25 – Configurações de juntas de canto. Adaptado de <i>Structural Adhesive Joints in Engineering</i> [20].	26
Figura 26 – a) Representação esquemática dos momentos fletores induzidos nos substratos exteriores; b) diagrama de distribuição de tensões σ_y ao longo de L_0 [21].	28
Figura 27 – Modos de rotura [29].	30
Figura 28 – Modo misto de rotura.	31
Figura 29 – Representação do ensaio DCB [29].	31
Figura 30 – Dimensões (mm) e geometria dos provetes DCB usados no ensaio em modo I segundo a Norma ASTM D3433 – 99 [10].	32
Figura 31 – Representação esquemática do carregamento da junta para determinar Δ [29].	33
Figura 32 – Representação esquemática da regressão linear para obter Δ devido à rotação dos substratos quando solicitados em modo I [29].	34
Figura 33 – Representação esquemática da ZPF e do conceito de a_e [15].	35
Figura 34 – Representação esquemática dos provetes TDCB [32].	37
Figura 35 – Configurações utilizadas em ensaios realizados em Modo II [29].	39
Figura 36 – Configuração do ensaio ENF [32].	40
Figura 37 – Comparação entre ensaios realizados em modo II (ELS) e em modo misto (I+II) (FRRM). Adaptado de <i>Testing Adhesive Joints</i> [32].	44
Figura 38 – Configuração de Ensaio SLB.	45
Figura 39 – Configuração do ensaio CLS [32].	45
Figura 40 – Pontos de aplicação de carga no dispositivo de solicitação CMM [32].	45
Figura 41 – Substratos CMM [32].	45
Figura 42 – Configuração do ensaio ADCB.	46
Figura 43 – Elementos coesivos para simular uma espessura nula de material – a) aproximação local; elementos coesivos para modelar uma espessura finita de material entre dois aderentes – b) aproximação contínua [41].	51
Figura 44 – Diferentes formatos das leis coesivas para modos puros de carregamento: a) lei triangular e exponencial, e b) lei trapezoidal [41].	53
Figura 45 – Localização de elementos coesivos na zona reparada do compósito (JSS) [41].	55
Figura 46 – Lei experimental (G_I - δ_n) com ajuste polinomial de 6º grau obtida para o adesivo SikaForce® 7888 em substratos DCB de material compósito (juta/epóxico) [37].	57
Figura 47 – Lei coesiva experimental (t_n - δ_n) para o adesivo SikaForce® 7888 em substratos DCB de material compósito (juta/epóxico) [37].	57

Figura 48 – Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AL6082-T651 [83].....	60
Figura 49 – Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [85].....	61
Figura 50 – Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [85].....	62
Figura 51 – Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Sikaforce® 7752 [88].	63
Figura 52 – Representação esquemática dos provetes DCB [3].....	64
Figura 53 – Representação esquemática dos provetes ENF [6].	65
Figura 54 – Geometria das juntas: a) JSS b) JSD.....	66
Figura 55 – Corte por disco de chapa de alumínio.....	67
Figura 56 – Granalhadora Cidblast RT6S.	67
Figura 57 – Abrasão com lixa de água dos substratos para as JSS e JSD.	68
Figura 58 – Substratos após desengorduramento com acetona.	68
Figura 59 – Esquema de colocação de espaçadores para provetes DCB e ENF [3].....	69
Figura 60 – Espaçador frontal para a criação da pré-fenda (proвете ENF) [6].	69
Figura 61 – Esquema de colocação de calços nas a) JSS e b) JSD.	70
Figura 62 – Aplicação do adesivo Araldite® 2015 em provetes ENF [6].....	71
Figura 63 – Pesagem dos componentes e homogeneização da mistura do adesivo Araldite® AV138 [3].	71
Figura 64 – Colocação de substratos DCB sobre folha de Teflon® [3].....	72
Figura 65 – Colocação de substratos para JSS sobre folha de Teflon® 72	72
Figura 66 – Imobilização de provetes DCB com recurso a grampos [3].	73
Figura 67 – Imobilização de provetes ENF com recurso a grampos [6].	73
Figura 68 – Imobilização de JSD com recurso a grampos.	73
Figura 69 – Remoção de excessos de adesivos com mó em JSS.	74
Figura 70 – Equipamento de ensaios Shimadzu AG-X 100, na configuração para ensaios de tração.	75
Figura 71 – Configuração do ensaio dos provetes DCB [3].....	75
Figura 72 – Configuração do ensaio dos provetes ENF [6].	76
Figura 73 – Ensaio e fixação dos provetes: a) JSS e b) JSD.	77
Figura 74 – Curvas P - δ dos ensaios DCB para o adesivo Araldite® AV138 [3].....	78
Figura 75 – Curvas P - δ dos ensaios DCB para o adesivo Araldite® 2015 [3].	79
Figura 76 – Curvas P - δ dos ensaios DCB para o adesivo SikaForce® 7752 [91].	79
Figura 77 – Modos de rotura em provetes DCB ensaiados com o adesivo Araldite® AV138 [3]....	80
Figura 78 – Modos de rotura em provetes DCB ensaiados com o adesivo Araldite® 2015 [3].....	80
Figura 79 – Modos de rotura de alguns dos provetes DCB ensaiados com o adesivo SikaForce® 7752 [91].	81
Figura 80 – Lei G_1 - δ_n experimental obtida do ensaio de um dos provetes DCB com o adesivo Araldite® AV138 e ajuste polinomial de sexto grau [3].	82

Figura 81 – Lei $G_I-\delta_n$ experimental obtida do ensaio de um dos provetes DCB com o adesivo Araldite® 2015 e ajuste polinomial de sexto grau [3].	83
Figura 82 – Lei $G_I-\delta_n$ experimental obtida do ensaio de um dos provetes DCB com o adesivo SikaForce® 7752 e ajuste polinomial de sexto grau [91].	85
Figura 83 – Lei coesiva experimental $t_n-\delta_n$ e aproximações trapezoidal e triangular para um provete DCB ensaiado com o adesivo Araldite® AV138 [3].	87
Figura 84 – Lei coesiva experimental $t_n-\delta_n$ e aproximação trapezoidal para um provete DCB ensaiado com o adesivo Araldite® 2015 [3].	87
Figura 85 – Lei coesiva experimental $t_n-\delta_n$ e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial para um provete DCB ensaiado com o adesivo SikaForce® 7752.	88
Figura 86 – Curvas $P-\delta$ experimentais dos ensaios ENF para o adesivo Araldite® AV138 [6].	89
Figura 87 – Curvas $P-\delta$ experimentais do ensaio ENF para o adesivo Araldite® 2015 [6].	90
Figura 88 – Curvas $P-\delta$ experimentais do ensaio ENF para o adesivo SikaForce® 7752 [6].	91
Figura 89 – Lei $G_{II}-\delta_s$ experimental obtida do ensaio de um dos provetes ENF com o adesivo Araldite® AV138 e ajuste polinomial [7].	92
Figura 90 – Lei experimental $G_{II}-\delta_s$ experimental obtida do ensaio de um dos provetes ENF com o adesivo Araldite® 2015 e ajuste polinomial [7].	94
Figura 91 – Lei experimental $G_{II}-\delta_s$ experimental obtida do ensaio de um dos provetes ENF com o adesivo SikaForce® 7752 e ajuste polinomial [7].	95
Figura 92 – Lei coesiva experimental $t_s-\delta_s$ e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial para um provete ENF ensaiado com o adesivo Araldite® AV138 [5].	97
Figura 93 – Lei coesiva experimental $t_s-\delta_s$ e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial para um provete ENF ensaiado com o adesivo Araldite® 2015 [5].	98
Figura 94 – Lei coesiva experimental $t_s-\delta_s$ e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial para um provete ENF ensaiado com o adesivo SikaForce® 7752 [5].	98
Figura 95 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente do ensaio de JSS com o adesivo Araldite® AV138, para valores de L_O de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [1].	99
Figura 96 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente do ensaio de JSS com o adesivo Araldite® 2015, para valores de L_O de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [1].	100
Figura 97 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente do ensaio de JSS com o adesivo Sikaforce® 7752, para valores de L_O de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm.	101
Figura 98 – Superfícies de rotura de JSS ensaiadas com o adesivo Araldite® AV138 para valores de L_O de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [1].	102
Figura 99 – Superfícies de rotura de JSS ensaiadas com o adesivo Araldite® 2015 para valores de L_O de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [1].	102
Figura 100 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo SikaForce® 7752 para valores de L_O de: a) 12,5 mm; b) 25 mm; c) 37,5 mm; d) 50 mm.	103

Figura 101 – $P_{\text{máx méd}}$ em função de L_0 para cada adesivo ensaiado em JSS.....	105
Figura 102 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente do ensaio de JSD com o adesivo Araldite® AV138, para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [2]......	107
Figura 103 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente do ensaio de JSD com o adesivo Araldite® 2015, para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [2]......	107
Figura 104 – Curvas P - δ experimentais obtidas do ensaio de JSD com o adesivo Sikaforce® 7752 para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm.....	108
Figura 105 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo Araldite® AV138 para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [2].	109
Figura 106 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo Araldite® 2015 para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [2]......	110
Figura 107 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo SikaForce® 7752 para valores de $L_0=12,5$ mm.	111
Figura 108 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo SikaForce® 7752 para valores de $L_0=25$ mm.	111
Figura 109 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo SikaForce® 7752 para valores de $L_0=37,5$ mm.	112
Figura 110 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo SikaForce® 7752 para valores de $L_0=50$ mm.	112
Figura 111 – $P_{\text{máx méd}}$ em função de L_0 para cada adesivo ensaiado em JSD.	115
Figura 112 – Introdução de propriedades de plásticas para os aderentes de alumínio.....	118
Figura 113 – Atribuição de secções sólidas e coesivas no ABAQUS® aos materiais constituintes das juntas.....	118
Figura 114 – Sentido de refinamento no comprimento livre dos substratos em JSS e JSD.....	121
Figura 115 – Sentido de refinamento da malha na espessura dos substratos em JSS.	121
Figura 116 – Sentido de refinamento da malha na espessura dos substratos em JSD.....	121
Figura 117 – Sentido de refinamento da malha na região da sobreposição dos substratos em JSS e JSD.	122
Figura 118 – Condições fronteira e de carregamento aplicadas às JSS no ABAQUS®.	122
Figura 119 – Condições fronteira e de carregamento aplicadas às JSD no ABAQUS®.....	122
Figura 120 – Definição da variável de dano em tração, d_n , no Abaqus® (que pode ser extrapolada para d_s) [27]......	125
Figura 121 – Exemplos de leis experimentais G_I - δ_n para os adesivos testados, e respetivas curvas polinomiais ajustadas.	127
Figura 122 – Exemplos de leis experimentais G_{II} - δ_s para os adesivos testados, e respetivas curvas polinomiais ajustadas.	128

Figura 123 – Leis coesivas experimentais t_n - δ_n para os diversos adesivos, e aproximações triangular para o Araldite® AV138 e trapezoidais para os restantes.	129
Figura 124 – Leis coesivas experimentais t_s - δ_s para os diversos adesivos, e aproximações triangular para o Araldite® AV138 e trapezoidais para os restantes.	130
Figura 125 – Distribuição de tensões σ_y em JSS com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0	131
Figura 126 – Distribuição de tensões σ_y em JSS com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0	132
Figura 127 – Distribuição de tensões σ_y em JSS com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0	132
Figura 128 – Distribuição de tensões σ_y em JSD com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0	133
Figura 129 – Distribuição de tensões σ_y em JSD com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0	134
Figura 130 – Distribuição de tensões σ_y em JSD com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0	134
Figura 131 – Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0	136
Figura 132 – Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0	136
Figura 133 – Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0	137
Figura 134 – Distribuição de tensões τ_{xy} em JSD com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0	138
Figura 135 – Distribuição de tensões τ_{xy} em JSD com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0	138
Figura 136 – Distribuição de tensões τ_{xy} em JSD com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0	139
Figura 137 – Valores experimentais e numéricos de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 para as JSS com o adesivo Araldite® AV138.....	142
Figura 138 – Valores experimentais e numéricos de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 para as JSS com o adesivo Araldite® 2015.....	142
Figura 139 – Valores experimentais e numéricos de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 para as JSS com o adesivo SikaForce® 7752.....	143
Figura 140 – Valores experimentais e numéricos de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 para as JSD com o adesivo Araldite® AV138.....	144

Figura 141 – Valores experimentais e numéricos de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 para as JSD com o adesivo Araldite® 2015..... 145

Figura 142 – Valores experimentais e numéricos de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 para as JSD com o adesivo SikaForce® 7752. 145

Figura 143 – Valores de G_{Ic} para os diversos adesivos, obtidos pela aplicação do Integral- J aos dados experimentais resultantes de ensaios em provetes DCB. 148

Figura 144 – Valores de G_{IIc} para os diversos adesivos, obtidos pela aplicação do Integral- J aos dados experimentais resultantes de ensaios em provetes ENF..... 148

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Evolução da história moderna dos adesivos e ligações adesivas [9].	8
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [86].	61
Tabela 3 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [84].	62
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce® 7752 [88].	63
Tabela 5 – Dimensões teóricas dos provetes DCB (mm).	64
Tabela 6 – Dimensões teóricas dos provetes ENF (mm).	65
Tabela 7 – Dimensões teóricas das JSS e JSD (mm).	66
Tabela 8 – Valores de L_e^0 em função L_0 .	70
Tabela 9 – Valores de G_{Ic} (N/mm) obtidos pelo Integral- J para o adesivo Araldite® AV138 [3].	83
Tabela 10 – Valores de G_{Ic} (N/mm) obtidos pelo Integral- J para o adesivo Araldite® 2015 [3].	84
Tabela 11 – Valores de G_{Ic} (N/mm) obtidos pelo Integral- J para o adesivo SikaForce® 7752 [5].	86
Tabela 12 – Valores de G_{IIc} (N/mm) obtidos pelo Integral- J para o adesivo Araldite® AV138 [7].	93
Tabela 13 – Valores de G_{IIc} (N/mm) obtidos pelo Integral- J para o adesivo Araldite® 2015 [7].	94
Tabela 14 – Valores de G_{IIc} (N/mm) obtidos pelo Integral- J para o adesivo SikaForce® 7752 [7].	96
Tabela 15 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_0 de JSS com o adesivo Araldite® AV138 [1].	104
Tabela 16 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_0 de JSS com o adesivo Araldite® 2015 [1].	104
Tabela 17 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_0 de JSS com o adesivo Sikaforce® 7752.	105
Tabela 18 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_0 de JSD com o adesivo Araldite® AV138 [2].	113
Tabela 19 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_0 de JSD com o adesivo Araldite® 2015 [2].	114
Tabela 20 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_0 de JSD com o adesivo Sikaforce® 7752.	114
Tabela 21 – Parametrização da malha em função de L_0 no comprimento livre dos substratos em JSS e JSD.	119
Tabela 22 – Parametrização da malha em função de L_0 na zona de sobreposição em JSS e JSD.	119
Tabela 23 – Parametrização da malha em função de L_0 na espessura dos substratos em JSS.	120
Tabela 24 – Parametrização da malha em função de L_0 na espessura do substrato interior em JSD.	120
Tabela 25 – Totalidade de elementos por valor de L_0 e tipo de junta.	122

Tabela 26 – Deslocamentos impostos nos modelos de JSS e JSD em função do adesivo utilizado e valor de L_0	123
Tabela 27 – Resumo dos valores médios dos valores individuais de G_{Ic} e G_{IIc} obtidos pelo Integral- J , para os adesivos indicados.....	149

Nomenclatura

Caracteres Romanos

a – Comprimento de fenda

a_0 – Comprimento de fenda inicial.

a_e – Comprimento de fenda equivalente

B – Largura do provete

C – Flexibilidade (δ/P)

C_0 – Flexibilidade inicial

C_{0c} – Flexibilidade inicial corrigida

C_c – 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

EF – Elementos Finitos

E_f – Módulo de elasticidade à flexão equivalente

G – Taxa de libertação de energia

G_{13} – Módulo de elasticidade ao corte

G_I – Taxa de libertação de energia em modo I

G_{Ic} – Taxa crítica de libertação de energia em modo I

h – Espessura dos substratos

I – Momento estático de segunda ordem da seção reta do substrato

K – Fator intensidade de tensão

K_I – Fator intensidade de tensão em modo I

K_{II} – Fator intensidade de tensão em modo II

L_p – Comprimento do provete/junta

L_s – Comprimento do substrato

m – Fator geométrico de inclinação do substrato

M_f – Momento fletor

N – Solicitação na direção normal

P – Carga aplicada

$P_{\text{máx}}$ – Carga máxima aplicada

$P_{\text{mín}}$ – Carga mínima aplicada

P_u – Carga aplicada na extremidade dos substratos por unidade de largura

s – Comprimento do arco da curvatura que envolve a ponta de fenda

T – Solicitação na direção transversal

T_1 – Vetor de tração

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_s – Tensão coesiva ao corte

t_s^0 – Tensão de corte máxima

t_s^{und} – Tensão coesiva em em corte sem degradação da rigidez

U – Energia de deformação dos aderentes devido à flexão e efeitos de corte

u – Vetor de deslocamento

v_0 – Deslocamento em corte entre o aderente superior e inferior

W – Densidade de Energia

x – Distância desde uma das extremidades de sobreposição até à oposta, eixo de abcissas

y – eixo de coordenadas

Caracteres Gregos

δ – Deslocamento

Δ – Fator de correção devido à rotação e deslocamento dos substratos

Δ_I – Fator de correção do comprimento de fenda devido à sollicitação de abertura em modo I

Δ_{II} – Fator de correção do comprimento de fenda devido à sollicitação de corte em modo II.

δ_m^0 – Deslocamento em modo misto correspondente ao início de propagação da fenda

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

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.

θ_0 – Rotação relativa dos substratos na extremidade da fenda

θ_p – Rotação relativa dos substratos na linha de carga

ν – Coeficiente de Poisson

σ – Tensão normal

σ_y – Tensão normal segundo a espessura

τ, τ_{xy} – Tensão de corte

$\tau_{méd}$ – Tensão de corte média

φ – Curvatura que rodeia a ponta de fenda

ψ – Razão de modos

Abreviaturas

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

ADCB – *Asymmetric Double Cantilever Beam*

AECMA – *European Association of Aerospace Industries*

ARCAN – *Notched plate shear method*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CBBM – *Compliance Based Beam method*

CBT – *Corrected Beam Theory*

CCM – *Compliance Calibration Method*

CLS – *Crack Lap Shear*

CMM – *Compact Mixed Mode*

DBT – *Direct Beam Theory*

DCB – *Double Cantilever Beam*

ENF – *End Notched Flexure*

FRMM – *Fixed Ratio Mixed Mode*

JIS – *Japanese Industrial Standardization*

JSD – Junta de sobreposição dupla

JSS – Junta de sobreposição simples

MDC – Modelo de dano coesivo

MEFE – Método dos elementos finitos estendido

MFLE – Mecânica da fratura linear elástica

MMF – *Mixed mode flexure*

MNSC – *Maximum Normal Stress Criterion*

MSSC – *Maximum Shear Strain Criterion*

PrEN – *Pre Standard European Norms*

SLB – *Single leg bend*

TDCB – *Tapered Double Cantilever Beam*

VCCT – *Virtual Crack Closure Techique*

XFEM – *Extended Finite Element Method*

ZPF – Zona de Fratura do Processo

1 Introdução

1.1 Contextualização

Como é sabido, a utilização de ligações adesivas, sobretudo na indústria, tem vindo a assumir elevada preponderância em detrimento dos métodos de ligações convencionais como a brasagem, rebitagem, ligações aparafusadas e soldadura. 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 dissimilares e leveza das 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, da configuração de junta e de fatores dimensionais, como é o caso de valor de comprimento de sobreposição (L_0), espessura do adesivo e substratos.

Atualmente existem diversas geometrias de juntas, em que algumas desenvolvem apenas um tipo de esforço quando solicitadas, como o caso dos provetes *Double Cantilever Beam* (DCB) ou *End Notched Flexure* (ENF). No entanto existem outras que, quando solicitadas, incorrem num carregamento de modo misto. As juntas de sobreposição simples (JSS) e dupla (JSD) são duas das geometrias mais comumente utilizadas. As JSS são menos resistentes do que as JSD para a mesma área colada. Tal facto ocorre porque as JSS sofrem uma deformação transversal significativa nos substratos, decorrente da excentricidade do carregamento, que induz em elevadas tensões normais segundo a espessura (σ_y) nas extremidades da sobreposição. Por outro lado, as JSD eliminam a excentricidade do carregamento, que reduz as referidas tensões.

Com a intensificação do uso de estruturas adesivas ao nível industrial, diversos autores nas últimas décadas têm vindo a realizar estudos de modo a suprir as necessidades desse sector ao nível de métodos de previsão do comportamento e rotura de juntas adesivas com maior confiabilidade. Nesse âmbito, foram desenvolvidos métodos analíticos e numéricos, em que estes últimos têm vindo a substituir os primeiros na medida em que superaram algumas limitações. Entre os métodos

numéricos destacam-se os Modelos de Dano Coesivo (MDC), uma técnica da mecânica do dano, utilizada como suplemento na análise por Elementos Finitos (EF), 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 primordiais deste trabalho no âmbito na obtenção de leis coesivas pelo método direto para a previsão de resistência de juntas adesivas são:

- Fabricar e realizar ensaios experimentais de JSS e JSD com o adesivo SikaForce® 7752, e com valores de L_0 entre $12,5 \leq L_0 \leq 50$ mm, de modo a fornecer dados experimentais para posterior comparação com as previsões numéricas;
- Análise dos dados experimentais das JSS e JSD com o adesivo SikaForce® 7752, e também de JSS e JSD com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujos dados foram obtidos de trabalhos anteriores ([1] para as JSS e [2] para as JSD);
- Executar uma análise numérica por EF de modo a analisar as tensões (σ_y) e de corte (τ_{xy}) instaladas nas camadas dos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, de modo a avaliar e compreender a influência das tensões no processo de rotura das juntas;
- Obter as leis coesivas em tração e corte pela aplicação do método direto aos dados experimentais de ensaios DCB e ENF, respetivamente, obtidos anteriormente nas referências [3-5] (DCB) e [6, 7] (ENF), de modo a prever a resistência de JSS e JSD com os referidos adesivos e valores de L_0 ;
- Construir leis coesivas aproximadas triangulares, trapezoidais e lineares-exponenciais para reproduzir o comportamento de cada adesivo;
- Validar as referidas leis coesivas pela comparação direta dos resultados numéricos com os resultados experimentais das JSS e JSD;
- Estabelecer quais as leis coesivas mais ajustadas a cada conjunto adesivo/geometria de junta em questão, determinando os erros médios de cada um relativamente aos resultados experimentais.

1.3 Organização do relatório

A informação contida nesta dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos distintos:

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

No **Capítulo 2**, correspondente à revisão bibliográfica, abordam-se 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, configurações mais comuns e menos usuais de juntas adesivas, destacando no final do **subcapítulo 2.1** uma comparação entre as JSS e JSD, alvo de estudo e análise neste trabalho. 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 MDC.

No **Capítulo 3** apresentam-se todos os aspetos relacionados com a componente experimental deste trabalho. 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.

O **Capítulo 4** dedica-se à componente numérica da dissertação, onde se descrevem as condições de análise numérica, o método utilizado na previsão de resistência de juntas (MDC) 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 5** enumeram-se as principais conclusões da presente dissertação e referem-se sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Ligações adesivas

As ligações adesivas têm desempenhado um papel muito importante nos últimos anos, na medida em que têm vindo a substituir os métodos convencionais de ligações mecânicas.

Por definição, uma ligação adesiva é uma união entre 2 superfícies que podem ser de materiais iguais ou dissimilares, usando uma substância normalmente composta por um material diferente dos substratos, que adere às superfícies dos dois aderentes a serem unidos, transferindo forças de um aderente para o outro.

A tecnologia das ligações adesivas atualmente encontra-se fortemente disseminada no mercado, e oferece uma grande flexibilidade ao nível de conceção e projeto de juntas. É uma técnica que ao nível dos processos de fabrico, é aplicável tanto nas produções em série, como em produções singulares, ou seja, peça a peça. Nos últimos tempos, estas ligações têm vindo a obter o reconhecimento de alta eficácia e elevado rendimento. A maioria dos materiais de ligação naturais tem vindo a ser substituídos por adesivos sintéticos. Um exemplo é o caso das resinas fenólicas, que foram introduzidas no final dos anos 20, perdurando até cerca de 1940, ano em se desenvolveram e foram induzidas no mercado resinas de epóxido e poliuretano, que tornaram possível a produção de adesivos sintéticos [1]. À medida que a indústria química foi avançando ao nível do conhecimento, têm sido desenvolvidos adesivos que aderem com elevada resistência a materiais orgânicos e inorgânicos. No que diz respeito à resistência e deformação admissíveis dos adesivos, estes são cada vez mais obrigados a cumprir certos requisitos, em função da configuração das juntas e solicitações de mercado. Entretanto, surgiram também sistemas de adesivos de elevada resistência com tempos de cura bastante reduzidos. Na verdade, este é um problema que se encontra praticamente resolvido, muito em virtude de constantes e novos avanços químicos. Em suma, o ceticismo que existia ao nível da durabilidade e resistência das ligações adesivas a longo termo em condições ambientais adversas, já não se justifica, desde que as ligações sejam bem concebidas de acordo com as indicações dos fabricantes.

2.1.1 História dos primeiros adesivos

As primeiras evidências de uso de adesivos remontam há milhares de anos atrás. Existe mesmo uma lenda, que retrata o 1º uso de adesivos pela humanidade entre 1000 a.C. e 1300 a.C.: a lenda de Dédalo e Ícaro. Dédalo era um inventor, que se viu prisioneiro juntamente com o seu filho Ícaro, na ilha de Creta. A fim de conseguirem escapar, Dédalo construiu umas asas acopláveis no dorso, a partir de penas de aves e cera derretida. A cera funcionava como adesivo entre as penas. Antes da fuga, Dédalo advertiu o filho que, caso este voasse a altitudes elevadas, o calor proveniente do sol seria tal forma elevado que derreteria a cera das asas. Caso este voasse demasiado baixo, a humidade do mar tornaria as asas demasiado pesadas, e este cairia [8]. Estas condições assemelham-se hoje em dia aos desafios enfrentados pelos utilizadores de adesivos estruturais sintéticos, que tentam evitar condições extremas de humidade e calor [8]. A viagem consumou-se e segundo a lenda Ícaro voou demasiado alto e as suas asas perderam a integridade pelo amolecimento da cera decorrente do excessivo calor, acabando por cair.

No entanto, os registos arqueológicos mostram que nos tempos primórdios, caçadores usavam cera de abelha como forma primitiva de adesivo, para fixarem as penas de aves nas flechas. A torre de Babel foi construída com recurso a argamassa e alcatrão [9]. Nas Cavernas de Tebas em 1300 a.C., foram encontrados potes de cola e uma espécie de pincel, usados para colarem folhas nas paredes [9].

Portanto, até há algumas décadas atrás, a maioria dos adesivos e vedantes, tinham origem em substâncias vegetais, animais e minerais.

2.1.2 História dos adesivos modernos

No início do século XX os adesivos poliméricos sintéticos começaram a substituir muitos dos adesivos de origem orgânica, devido à sua maior capacidade de adesão, maior possibilidade para diferentes formulações, e maior resistência operatória em condições ambientais adversas. Contudo, os adesivos não poliméricos são ainda amplamente utilizados, e representam um volume significativo do total de adesivos e vedantes existentes [9]. As aplicações mais comuns para estes adesivos não poliméricos incluem substratos porosos, tais como madeiras e seus derivados. Os exemplos são os adesivos à base de caseína (subproduto de laticínios), e silicato de sódio solúvel (material inorgânico, de origem cerâmica), que são utilizados principalmente na indústria de papel e da aviação. De origem natural, existem os materiais betuminosos e asfalto, que têm sido aplicados como vedantes, nos últimos séculos.



Figura 1 – Estrutura de madeira colada com adesivo de caseína, usada na aviação em 1915 [1].



Figura 2 – Ligação entre duas estruturas de madeira tridimensionais, efetuada com adesivo em 1915 [1].

A **Figura 1** e **Figura 2** mostram as primeiras estruturas técnicas coladas, concebidas a partir de madeira (substrato) e cola à base de caseína, para uso na aviação [1].

O desenvolvimento dos adesivos poliméricos modernos coincidiu com a sua industrialização, no início do século XX. De facto, o início da indústria de resinas elastómericas e poliméricas ocorreu praticamente de modo simultâneo com o início da indústria de adesivos. A **Tabela 1** sumariza os momentos mais relevantes do desenvolvimento industrial de adesivos e vedantes. A era dos adesivos modernos começou mais precisamente em 1910, com o desenvolvimento de adesivos de fenol-formaldeído, para a indústria da madeira prensada. Os adesivos também foram amplamente utilizados no ramo da construção civil, sendo responsáveis pelo forte crescimento e desenvolvimento de infraestruturas dos Estados Unidos na época [9].

Ocorreu novamente um crescimento significativo na década de 40 e 50, com o desenvolvimento de adesivos estruturais para a indústria da aviação militar. Devido à sua excepcional relação resistência/peso, o desenvolvimento de adesivos modernos esteve intimamente ligado com a história da indústria da aviação e da indústria aeroespacial. A durabilidade das ligações adesivas foi um problema na indústria da aviação, que foi solucionada mais tarde, já no final dos anos 70. Com avanços sucessivos nestas indústrias, rapidamente se percebeu que os adesivos poderiam ser uma solução economicamente viável para substituir métodos tradicionais de ligação, como era o caso da soldadura, brasagem e rebitagem, o que se tem confirmado nos últimos anos [9].

A ciência da adesão é bem aceite hoje em dia, e os princípios básicos e métodos para atingir bons resultados ao nível do desempenho de juntas estão hoje perfeitamente definidos, como será abordado mais à frente. A própria indústria adquiriu uma base sólida de conhecimentos e fundamentos, decorrentes de anos e anos de experiência. Hoje em dia, a indústria tenta desenvolver

adesivos com custo e tempo de ciclo de produção reduzidos, com compatibilidade ambiental ao nível da biodegradabilidade, e que sejam aplicáveis a diversos substratos, tais como plásticos de engenharia, compósitos avançados e cerâmicos, cuja aplicação nestes últimos têm vindo a crescer [9].

Tabela 1 – Evolução da história moderna dos adesivos e ligações adesivas [9].

Ano de criação	Adesivo
Antes de 1910	Colas obtidas a partir de ossos animais Cola de peixe Adesivos vegetais
1910	Fenol-formaldeídos Colas à base de caseína (derivados de laticínios)
1920	Acetato de celulose Resina alquídica Borracha ciclizada em adesivos Policloropreno (neopreno) Adesivos à base de soja
1930	Ureia-formaldeído Adesivos (fitas) sensíveis à pressão Filmes adesivos de resina fenólica Acetato de polivinil (cola de madeira)
1940	Adesivo nitrilo fenólico Borracha colorada Resina Melamínica (melamina formaldeído) Adesivo nitrilo fenólico Acrílico Poliuretano
1950	Adesivo de epóxido Cianoacrilatos Anaeróbios Ligas epóxidas
1960	<i>Polyimide</i> Polibenzimidazol <i>Polyquinoxaline</i>
1970	Acrílicos de segunda geração Acrílicos sensíveis à pressão Poliuretanos estruturais
1980	Endurecedor para resinas termoendurecíveis Epóxidos de veiculação hídrica (base de água) Adesivos de contacto à base de água Espumas deformáveis com o calor
1990	Epóxido modificado Poliuretano modificado Adesivos ativados por calor (pistolas de adesivos) Sistemas de cura por ultra violeta

2.1.3 Caracterização das juntas adesivas

A resistência de uma junta adesiva é determinada principalmente pelas propriedades mecânicas dos materiais que constituem a ligação, pelo comprimento da ligação, e pelas tensões residuais no seio da junta [9]. As juntas adesivas são projetadas tendo em consideração os requisitos de serviço para a mesma, incluindo as tensões a que esta será submetida e as condições ambientais a que será sujeita. Por vezes aplicam-se adesivos em juntas que foram projetadas para outros tipos de ligação, e isso conduzirá a resultados desfavoráveis. Quando as juntas são projetadas para adesivos, são pensadas de modo obterem o melhor rendimento das propriedades do adesivo em questão.

As juntas, quando projetadas, também têm em consideração o material a utilizarem, as suas propriedades físicas e mecânicas, bem como as condições de cura que serão empregues. Outra questão considerada na conceção de juntas prende-se com os custos da produção, que depende do material utilizado e da complexidade da geometria de junta.

Posto isto, importa referir quais as principais vantagens das juntas adesivas [9, 10]:

- Proporcionam uma distribuição de tensões mais uniforme, uma vez que a carga é distribuída por uma área e não por locais específicos (caso de juntas rebitadas ou aparafusadas), permitindo assim maior transmissão de carga;
- Apresentam bom aspeto visual, com contornos regulares e evitam marcas (caso de soldadura, furação e rebitagem);
- A natureza visco elástica do adesivo usado nas juntas permite um bom amortecimento de vibrações e absorção de choques, melhorando assim a resistência à fadiga;
- Minimizam ou impedem a corrosão galvânica entre materiais dissimilares;
- Permitem uniões em diversas geometrias de substratos e com diversas espessuras de adesivos;
- Permitem ligações de materiais similares ou dissimilares;
- Ideais para ligarem materiais compósitos, evitando delaminações e concentração de tensões, como no caso das ligações aparafusadas;
- Boa relação resistência/peso.

Em relação às desvantagens, apontam-se as seguintes [9, 10]:

- Necessidade de preparação de superfície, com diversos tratamentos (granalhagem, ataques químicos, desengorduramento, entre outros) de modo a permitir a melhor adesão possível entre adesivo e substrato;
- Dependendo do adesivo, os tempos de cura podem ser elevados;
- Limitação de operação em modo contínuo a temperaturas superiores a aproximadamente 175 °C;
- Por vezes, para estabelecimento da ligação, pode ser necessário aplicar calor e pressão à junta;
- Como a ligação não é instantânea, por vezes tem de se recorrer a acessórios de fixação para imobilizar os componentes da junta durante a cura, acrescentando ligeiramente o custo de produção;
- A inspeção da junta é de difícil execução;
- A durabilidade da junta dependerá das condições ambientais, uma vez que a resistência da junta a condições extremas é limitada. O calor e a humidade em excesso são os principais fatores de degradação dos adesivos;
- Por vezes é necessário possuir formação para executar estas juntas.

Por fim, uma vez que os esforços e as tensões são fatores importantes a considerar no projeto de juntas, no **subcapítulo 2.1.4** serão abordados os tipos de esforços a que as juntas adesivas podem ser solicitadas.

2.1.4 Esforços em juntas adesivas

Numa junta adesiva, pode-se verificar distribuições de tensões uniformes ou não uniformes. No entanto, raramente se observa uma distribuição de tensões uniforme quando uma força externa é aplicada. De facto, o que normalmente ocorre são tensões distribuídas de modo não uniforme [9]. As solicitações externas podem produzir concentrações de tensões em determinados pontos da área colada, que podem ultrapassar largamente a tensão média de rotura da junta. Tais concentrações de tensão são muitas vezes inesperadas, e são elas que determinam a solicitação a que a junta pode ser submetida [9]. Nestas circunstâncias, o engenheiro de projeto tem a responsabilidade de minimizar ou de contornar esses efeitos.

Existem 5 tipos de esforços que são fundamentais em juntas adesivas: compressão, tração, corte, arrancamento e clivagem.

Esforços de tração

Os esforços de tração surgem quando forças atuam em sentidos opostos e perpendicularmente ao plano da junta, o que resulta em tensões normais distribuídas uniformemente ao longo da área colada. Na tração, o adesivo sofre picos de tensão nas suas extremidades (**Figura 4**), sendo portanto essas as zonas críticas da junta, e as zonas mais sujeitas ao início de dano. A mais pequena fenda que possa surgir nessas bordas da área colada irá propagar-se até ao colapso total da ligação. Se a junta for bem projetada, demonstrará boa resistência à tração devido à melhor distribuição de carga, paralelismo de substratos, e cargas alinhadas axialmente [9]. No entanto, nas aplicações práticas, a tolerância da espessura do adesivo é difícil de controlar, o que pode impedir a total axialidade de cargas, levando ao aparecimento indesejável de esforços de clivagem ou de arrancamento. Os substratos também devem de possuir a rigidez necessária, para que a tensão seja distribuída somente sobre a área colada, interferindo assim o menos possível na transferência de tensões [9, 11].

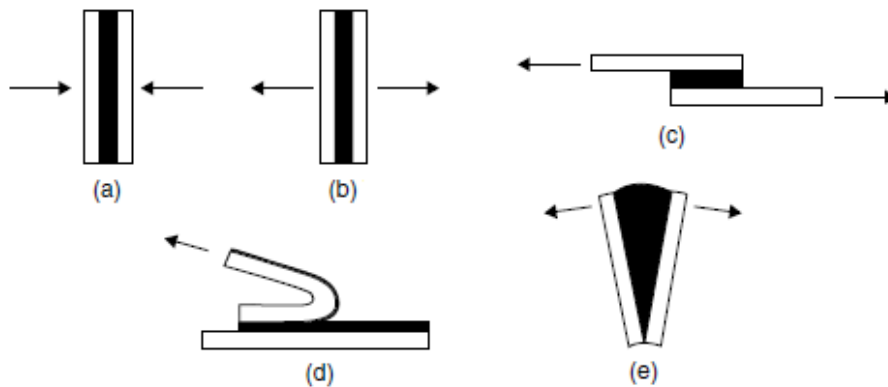


Figura 3 – 5 tipos de esforços fundamentais em juntas adesivas: a) compressão; b) tração; c) corte; d) arrancamento e e) clivagem. Adaptado de: *Adhesives Technology Handbook* [11].

Esforços de compressão

Neste tipo de esforços, a força é aplicada em sentido oposto à força de tração. Tal como acontece na tração, neste tipo de esforços também é necessário manter as cargas alinhadas, de modo a ocorrerem na junta esforços puramente compressivos. Um adesivo sob compressão dificilmente rompe, a não ser em alguns pontos fracos devido à distribuição desigual de tensões. Na verdade, uma junta em compressão pura praticamente não necessita de adesivo [9]. Se a força de compressão for suficientemente elevada, e não houver movimento relativo entre substratos (na direção perpendicular à da aplicação das forças), estes irão assim permanecer durante a solicitação, a não ser que o adesivo falhe atingindo a rotura [1, 9].

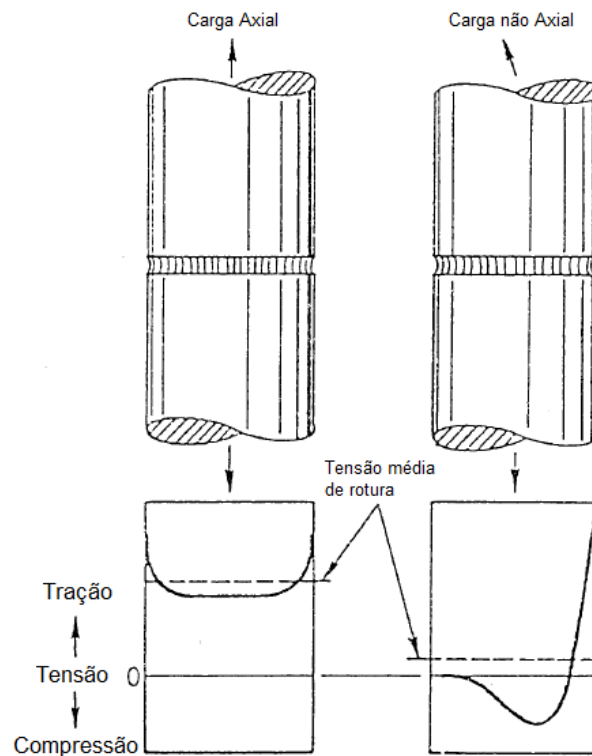


Figura 4 – Distribuição da tensão normal (t_n) numa junta topo a topo sob carregamento axial e não axial [9].

Esforços de corte

Os esforços de corte resultam de forças que atuam no plano do adesivo que tentam separar os substratos. As juntas fabricadas para operarem em condições de carregamento de corte são relativamente fáceis de produzir e são também das mais utilizadas [9]. Verifica-se também que os adesivos são geralmente mais resistentes quando solicitados a esforços de corte, devido a toda a área colada contribuir para a resistência da junta [9]. Para além disso, os substratos mantêm-se facilmente alinhados. A **Figura 5** representa uma JSS, a mais utilizada para solicitação ao corte. Como se verifica nessa figura, a tensão mais elevada ocorre nas extremidades da sobreposição, enquanto no centro a tensão tem o seu valor mais baixo. Portanto, a zona central do adesivo contribui menos para a resistência da junta. Na realidade, dependendo da geometria da junta e das propriedades físicas do adesivo, duas tiras de adesivo colocadas em cada extremidade da sobreposição poderiam proporcionar a mesma resistência de junta do que a aplicação de adesivo ao longo da totalidade de L_0 .

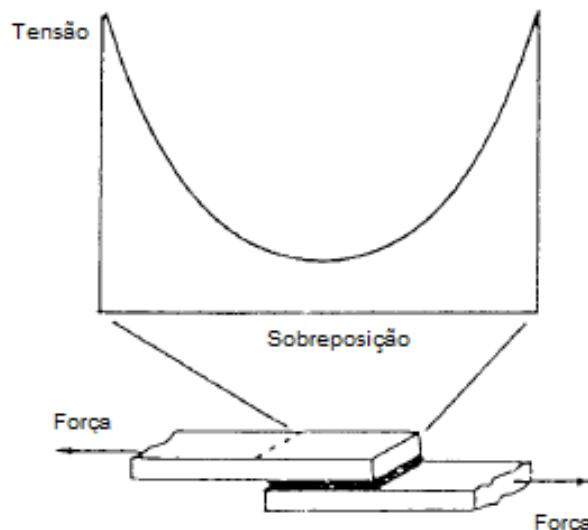


Figura 5 – Distribuição da tensão τ_{xy} numa JSS solicitada à tração [9].

Esforços de clivagem e arrancamento

A clivagem e o arrancamento são esforços indesejáveis em juntas adesivas. A clivagem define-se como o tipo de esforço que surge quando forças aplicadas numa das extremidades da junta atuam de modo a separar os substratos um do outro [9]. Este tipo de esforço ocorre em substratos rígidos. As tensões σ_y são semelhantes às de clivagem, mas ocorrem em juntas onde um ou ambos os substratos são flexíveis [11]. Subsequentemente, o ângulo de separação entre substratos (**Figura 6**) tende a ser muito superior no carregamento por arrancamento do que no carregamento por clivagem.

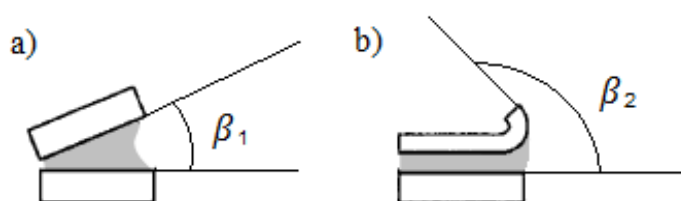


Figura 6 – Ângulo de separação entre substratos sob esforço: a) de clivagem b) arrancamento.

As juntas carregadas sob clivagem ou arrancamento oferecem muito menor resistência do que as juntas carregadas em corte, porque apenas uma pequena área da junta está a ser solicitada [9]. A distribuição de tensões numa junta sob esforço de clivagem encontra-se representada na **Figura 7**. Uma grande parte da tensão está localizada na extremidade direita da junta, que corresponde à região que está a suportar a carga. A outra extremidade encontra-se também sob alguma tensão, mas muito inferior à tensão limite de resistência da junta. Também em esforços de arrancamento

(**Figura 8**) se verifica a mesma situação, embora a tensão se encontre ainda mais concentrada no final na extremidade solicitada [9, 11].

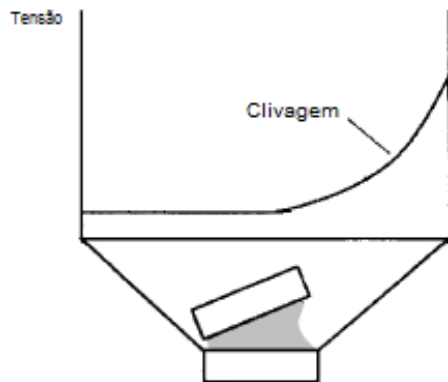


Figura 7 – Distribuição de tensão numa junta carregada em clivagem [11].

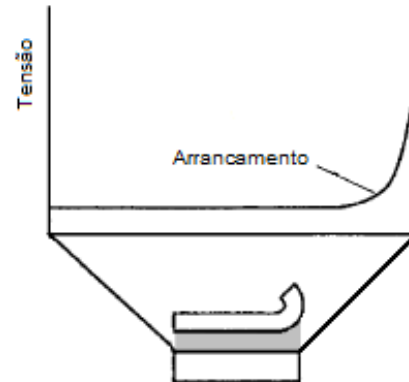


Figura 8 – Distribuição de tensão numa junta carregada em arrancamento [11].

Os adesivos frágeis apresentam pouca resistência ao arrancamento porque a tensão fica localizada praticamente numa linha ou numa área muito restrita da extremidade da sobreposição [10]. A falta de flexibilidade do adesivo rígido não permite uma distribuição de tensões ao longo da área de sobreposição, à medida que a junta é solicitada, concentrando as tensões numa área equivalente ao valor da espessura do adesivo utilizado [9]. Por outro lado, os adesivos flexíveis permitem distribuir as tensões σ_y por uma área de ligação mais extensa, garantindo assim maior resistência às forças de arrancamento [9].

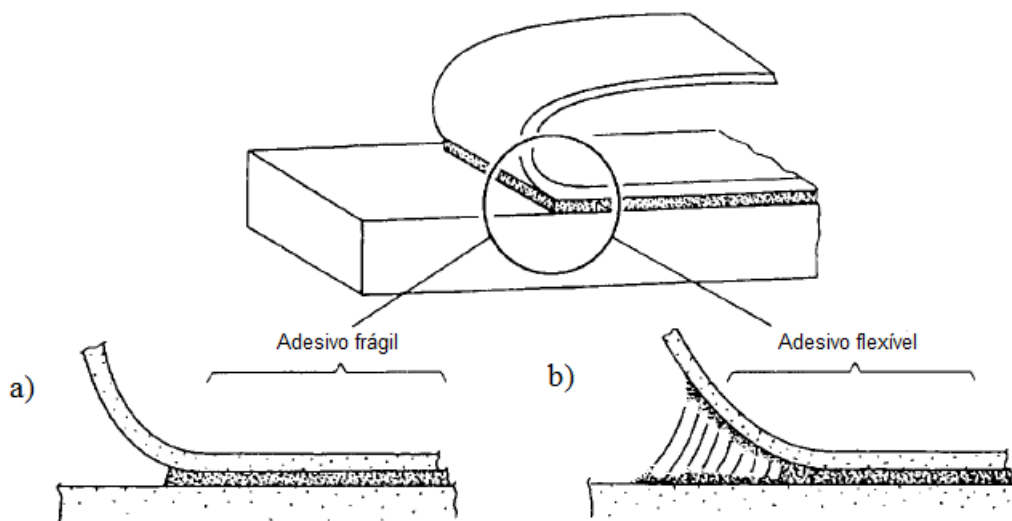


Figura 9 – Junta submetida a esforços de arrancamento: a) com adesivo frágil; b) com adesivo flexível.

Adaptado de: *Handbook of adhesives and sealants* [9].

Conforme obtido por Petrie [9] os adesivos frágeis (**Figura 9**) de epóxico, conseguem garantir resistência a tensões τ_{xy} superior a 18 MPa, mas quando solicitados ao arrancamento, o comportamento é diferente, conseguindo apenas suportar tensões máximas na ordem dos 0,35 N/mm. Comparativamente, os adesivos flexíveis (**Figura 9**), pela sua maior tenacidade, são os indicados para esforços de arrancamento, conseguindo resistências entre 4,38 N/mm e 8,76 N/mm.

2.1.5 Modos de rotura juntas adesivas

Quando uma junta adesiva é projetada, existem vários aspetos que são considerados para evitar a rotura da junta, fundamentalmente pelo adesivo. Numa junta bem projetada, a rotura ocorre pelo substrato, evidenciando que as forças de ligação adesivas entre substrato e adesivo (interface), mas também coesivas, no seio do substratos (interfase) são suficientemente fortes para vencer a resistência dos substratos [10]. Assim, existem fundamentalmente 4 tipos de rotura que se podem verificar em juntas adesivas, como se pode observar na **Figura 10**.

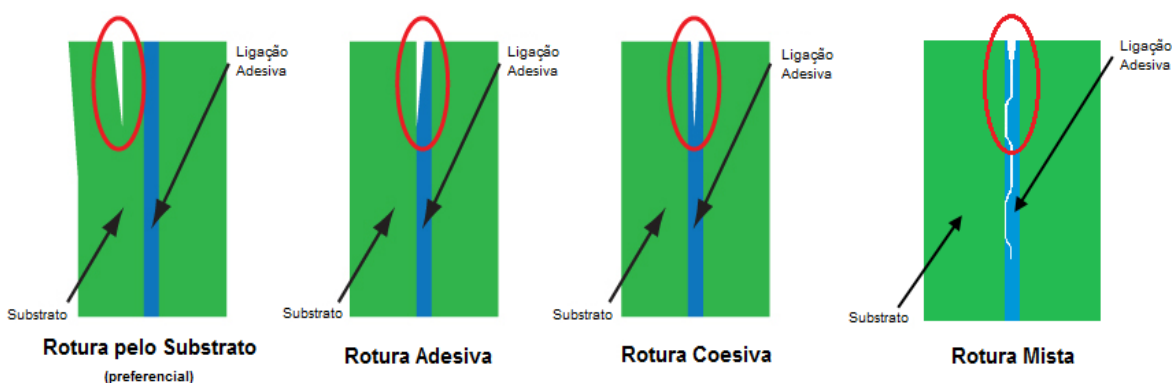


Figura 10 – Modos de rotura em ligações adesivas. Adaptado de: *Plastics Decoration Magazine* [12].

- Rotura pelo substrato

Este tipo rotura ocorre quando as forças adesivas de ligação na interface adesivo-substrato e na interfase do adesivo são de maior magnitude comparativamente às forças de ligação do substrato. Normalmente a rotura ocorre somente num dos substratos. Apesar de ser o caso preferível, é o que menos se verifica. Dentro das possíveis causas podem estar [13]:

- Mau dimensionamento do substrato para suportar a solicitação imposta;
- Ataque físico ou químico do substrato por soluções ácidas, alcalinas, ou corrosão, que deteriorem a integridade do substrato ao nível das suas propriedades mecânicas;
- A tensão de rotura do material substrato pode ser menor que tensão de rotura da ligação adesiva em geral.

- Rotura adesiva

Este tipo de rotura ocorre entre a camada adesiva e o substrato, designando-se zona de interface. O adesivo separa-se do substrato total ou parcialmente. A separação pode ocorrer num ou em ambos os substratos. Para se evitar este tipo de rotura em alumínios ou aços, tonar-se-á necessário efetuar previamente um tratamento de superfície de acordo com as condições a que a junta irá operar [8]. As principais causas são [13]:

- Má seleção da preparação a efetuar à superfície, ou má execução da mesma;
 - Aplicação do adesivo após ultrapassar o seu tempo de manuseio (aumento de viscosidade), impedindo uma correta molhagem da superfície;
 - Má seleção do adesivo, impedindo a adesão ideal do mesmo ao substrato;
 - Uso inadequado de solventes, de substâncias para ataque químico ou do ativador do adesivo;
 - Tempo de evaporação inadequado ou espessura inadequada do adesivo;
 - Fenómeno de envelhecimento entre adesivo e substrato.
- Rotura coesiva

É o tipo de rotura que ocorre no próprio adesivo, caracteriza-se pela remanescência de adesivo em ambas as superfícies do substrato (**Figura 11**). Possíveis causas [13]:

- A ligação adesiva foi submetida a tensões de trabalho superiores para as quais foi projetada;
- O utilizador não respeitou o tempo de cura, principalmente em adesivos de um só componente (existentes no estado sólido, pré-misturados, mas não ativados) [14];
- Defeitos na cura do adesivo;
- Defeitos do adesivo (bolhas, porosidades, entre outros).
- Fenómenos de envelhecimento na ligação adesiva.



Figura 11 – Rotura maioritariamente coesiva obtida após ensaio em modo I em provetes *Tapered Double Cantilever Beam* (TDCB) [15].

- Rotura mista

É a combinação de rotura adesiva e coesiva numa só. É um modo de rotura caracterizado por diversas transições entre ambos os modos. Quando o dano é adesivo, deve-se ao facto da superfície estar degradada ou má preparação da mesma, traduzindo-se em forças de interface inferiores às da interfase do adesivo, ou seja, na transição adesivo substrato. Quando se verifica dano coesivo, a situação é contrária, e portanto as forças de ligação na interface são superiores às forças de ligação internas do adesivo, ou seja, na interfase (**Figura 12**).

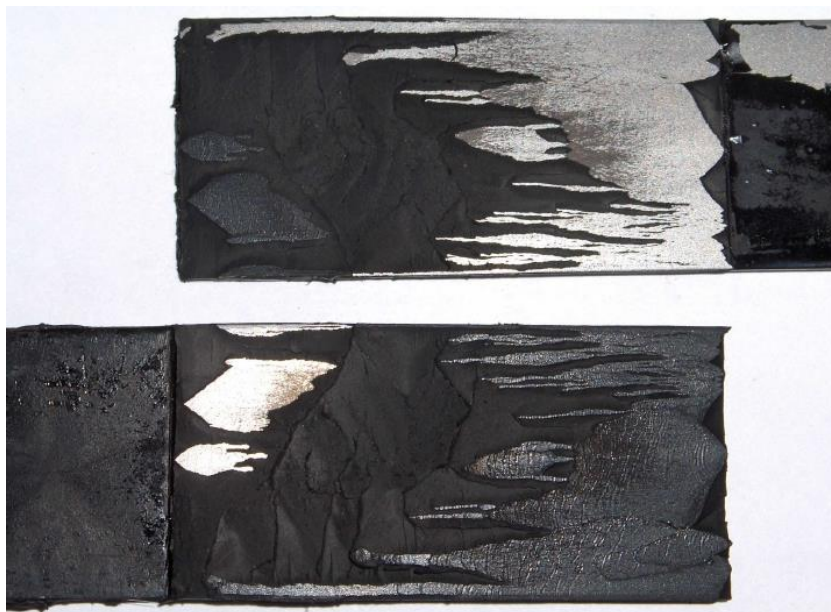


Figura 12 – Rotura mista obtida do ensaio de JSS [16].

2.1.6 Configurações possíveis de junta

Uma junta adesiva ideal é aquela que perante qualquer modo de carregamento o adesivo é sempre solicitado na direção que mais resiste à rotura [3]. No entanto, isso nem sempre é possível. Algumas geometrias podem ser inviáveis de fabricar principalmente devido a custos elevados ou a falta de meios técnicos para as realizar. O engenheiro projetista terá de pesar estes aspetos e averiguar se é proveitoso realizar juntas mais complexas a fim de obter o melhor rendimento da junta e do adesivo [3-5]. A **Figura 13** mostra alguns dos tipos mais comuns de juntas, não obstante ao facto de existirem outros.

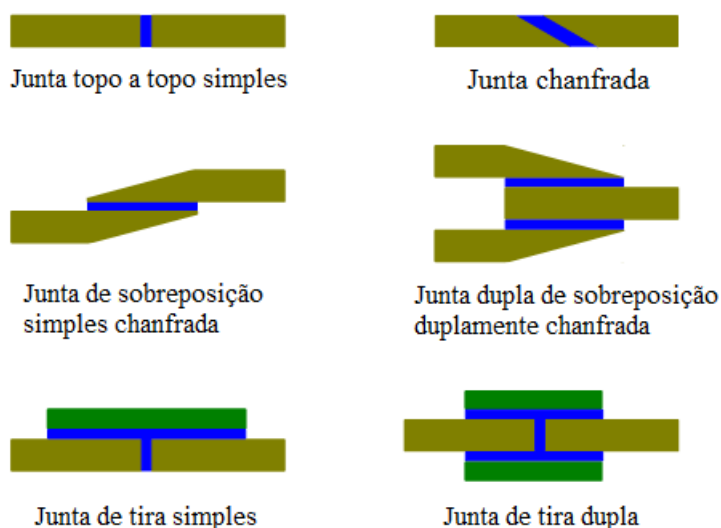


Figura 13 – Principais tipos e configurações de juntas adesivas [17].

Portanto, as várias configurações de juntas podem ser agrupadas em juntas topo a topo, juntas de sobreposição, juntas de tira, juntas cilíndricas, juntas em T e juntas de canto. De seguida será abordado cada tipo.

Juntas topo a topo

São dos tipos de juntas mais fáceis de fabricar. No entanto, na sua configuração mais simples, revelam-se juntas extremamente instáveis, e qualquer desalinhamento de forças pode gerar carregamento de clivagem no adesivo, como se pode observar na **Figura 14** [18]. Na mesma configuração, também não são indicadas para flexão, pois tal solicitação colocaria o adesivo sob clivagem. De modo a minimizar esse efeito, a junta de topo a topo simples foi sofrendo algumas modificações, surgindo assim novas configurações (**Figura 15**). Estas configurações são também ideais para quando existe a impossibilidade de conceber juntas de sobreposição devido à espessura elevada dos substratos. Todas as configurações da **Figura 15**, desde a **b)** até à **e)**, conseguem reduzir o efeito de clivagem causado por carregamento lateral [9, 11, 19].

Como se pode observar na **Figura 15**, as juntas **b)** e **c)** permitem um melhor alinhamento de forças relativamente à junta topo a topo **a)**, uma vez que o chanfro atua no sentido de evitar o desalinhamento de forças no eixo. O chanfro pode ser executado com relativa facilidade por maquinaria. As juntas **d)** e **e)**, macho-fêmea, permitem um auto centramento dos substratos, para além de permitirem alocar maior quantidade de adesivo, o que permite maior área adesiva contribuindo assim para uma maior resistência da junta [9, 11, 19].

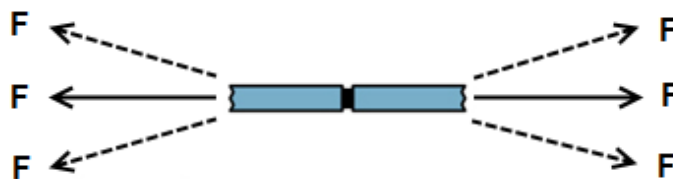


Figura 14 – Tração de uma junta topo a topo simples, com possíveis desalinhamentos de forças aplicadas.

Adaptado de *GlueOnline* [18].

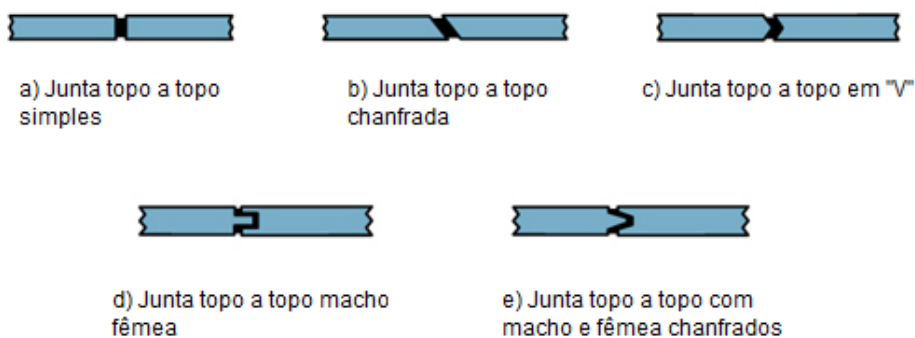


Figura 15 – Configurações de juntas topo a topo [19].

Juntas de sobreposição

São o tipo de juntas mais fáceis de fabricar, são também aplicáveis em substratos de baixa espessura e induzem um esforço maioritariamente de corte no adesivo, que é o esforço preferencial como referido no **subcapítulo 2.1.4**. Por estas razões são o tipo de juntas mais frequentemente utilizadas. No entanto, devido à sobreposição dos substratos, é criada uma diferença de alturas, que se traduz desalinhamento de forças quando a junta é solicitada como é demonstrado na **Figura 16**, nomeadamente na JSS. Isto leva ao aparecimento de esforços de arrancamento nas extremidades da junta, que limita as condições de funcionamento da junta. Posto isto, surgiram algumas modificações importantes [9, 11, 19]:

- Redesenho da junta de modo a colocar as forças aplicadas em linha;
- Aumento da espessura dos substratos, na zona da área de sobreposição, de modo a torná-los mais rígidos localmente;
- Aumentar a flexibilidade das extremidades da sobreposição, de modo a minimizar os esforços de arrancamento, chanfrando os bordos dos substratos.

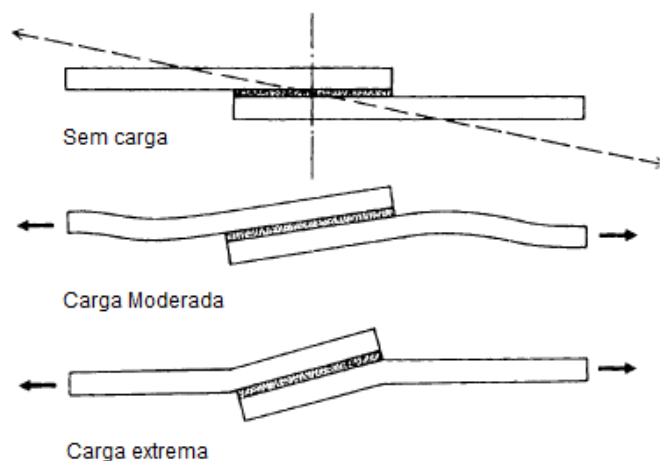


Figura 16 – JSS após deformação, causada pela força aplicada, colocando as extremidades da sobreposição em arrancamento [3].

Na **Figura 17** estão ilustradas as várias configurações da junta de sobreposição. Como se pode observar, as juntas com ressalto **d)**, **e)** e **f)** são as que permitem alinhar as forças quando a junta é solicitada, minimizando assim a deflexão transversal da junta [19]. O ressalto pode ser feito por dobragem de chapa. O uso de tiras nas juntas **e)** e **f)** tem como função o aumento da área adesiva, o que aumenta a resistência da junta [9, 11, 19].

A JSD apresenta bom equilíbrio estrutural e é apenas sujeita a deflexão transversal caso as forças aplicadas nos substratos superiores e inferiores sejam de diferentes intensidades [9]. A junta de sobreposição chanfrada da **Figura 17 b)**, consegue também ser mais eficiente que a JSS da **Figura 17 a)**. Isto porque a redução da espessura dos bordos dos substratos pelos chanfros permite uniformizar a distribuição de tensão de corte durante o carregamento, tal como se pode observar na **Figura 18**. Assim verifica-se uma redução dos esforços de arrancamento nas extremidades da junta [9, 19].

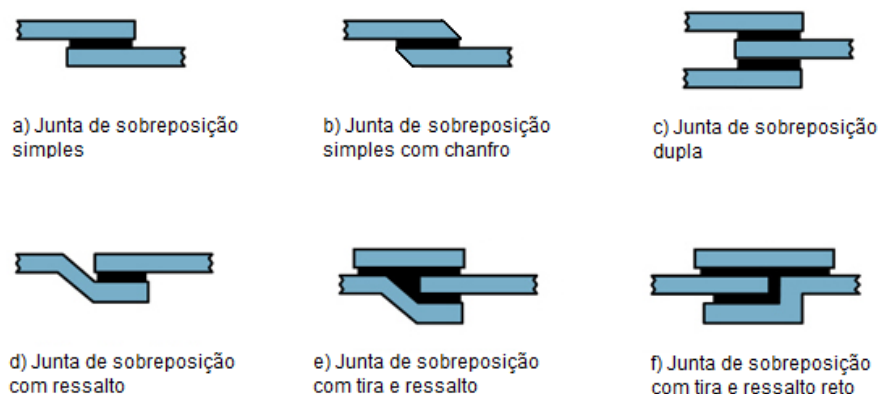


Figura 17 – Diferentes configurações de juntas de sobreposição. Adaptado de: *Mapeng – Assembly considerations, Joint Design* [19].

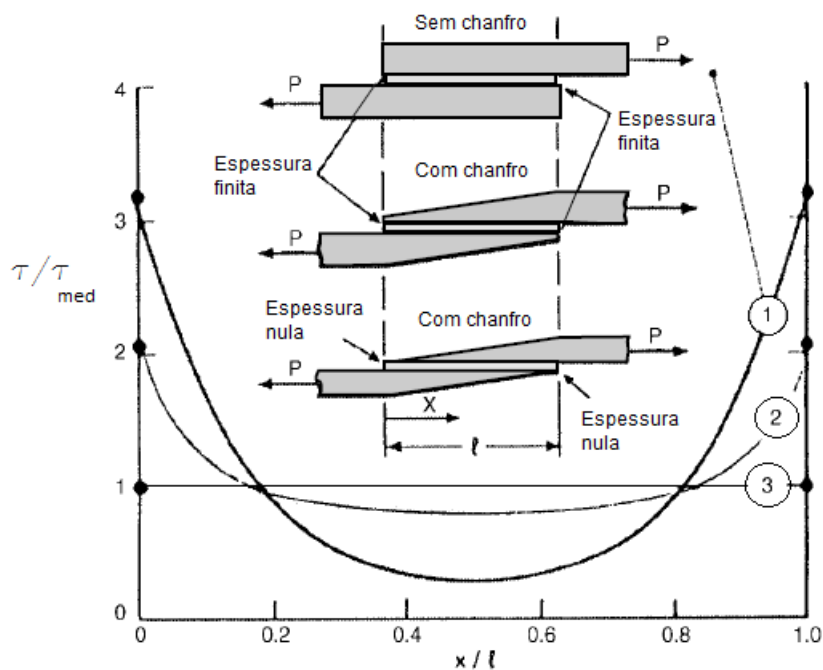


Figura 18 – Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS: 1 – Sem chanfro e espessura finita de adesivo; 2 – Com chanfro e espessura finita de adesivo; 3 – com chanfro e espessura nula de adesivo [9].

Como é observável na **Figura 18**, o chanframento ou aligeiramento dos bordos dos substratos permite distribuir a tensão τ_{xy} de modo mais uniforme ao longo de L_0 , diminuindo os picos da tensão, e assim aumentar a capacidade de carga da junta. Tal acontece devido à diminuição de rigidez das zonas chanfradas, que permite um aumento de flexão das mesmas, aligeirando os picos de tensão de corte nos bordos. Essa diferença é perfeitamente notória principalmente entre a curva 1 e 2, onde os picos de tensão decrescem respectivamente de 3 para 2 unidades [9-11].

A **Figura 19** permite ver a diferença entre uma junta de sobreposição chanfrada e sem chanfro, na força máxima admissível até à rotura do adesivo, em função de L_0 .

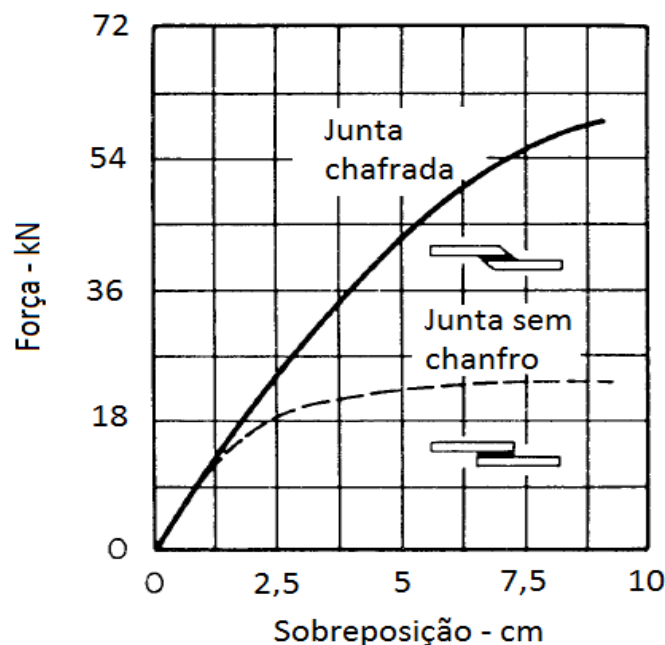


Figura 19 – Efeito do chanframento em JSS, na força máxima admissível. Adaptado de *Handbook of adhesives and Sealants* [9].

Junta com tira

Este tipo de juntas é frequentemente utilizado como alternativa às juntas de sobreposição, nomeadamente quando a espessura do substrato é demasiado elevada. Estas juntas têm a vantagem de permitir manter no mesmo eixo de carregamento os esforços aplicados [9]. As várias configurações deste tipo de juntas estão representadas na **Figura 20**. Esta tipologia de juntas na sua configuração mais simples revela-se suscetível a esforços de arrancamento mediante flexão, tal como acontece nas juntas topo a topo simples e nas JSS [11]. Como alternativa mais eficaz, pode ser usada a junta de tira dupla, que suporta melhor a sollicitação à flexão [10]. No entanto, para melhor resistência à flexão as melhores juntas nesta tipologia são as juntas de tira dupla com duplo rebaixo ou a junta de tira dupla chanfrada (**Figura 20**), com o inconveniente de ambas requererem maquinagem e seus custos associados [9-11].

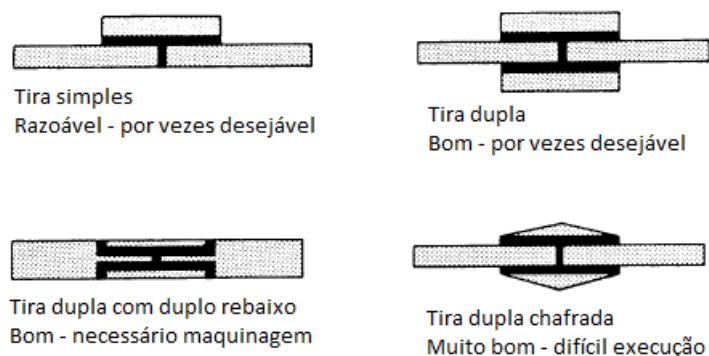


Figura 20 – Juntas com tira de reforço. Adaptado de *Handbook of adhesives and Sealants* [9].

Juntas cilíndricas

Na **Figura 21** e **Figura 22** estão representadas algumas das configurações recomendadas para juntas cilíndricas em tubos e varões/veios. Estas configurações devem ser usadas no lugar das juntas topo a topo simples devido à sua maior resistência a esforços de clivagem decorrentes da flexão, mas também porque a área adesiva é maior, como tal, estas juntas conseguem proporcionar maior resistência. No entanto, estas juntas apresentam algumas desvantagens, tais como serem difíceis de inspecionar pelo interior, mas também por grande parte requerer operações de maquinagem. A aplicação do adesivo também não é simples. Por vezes é necessário recorrer a orifícios para injetar o adesivo na junta (via seca) (**Figura 23 a**). Esses mesmos orifícios também podem servir para baixar a pressão no interior da junta, libertando o ar que é aprisionado à medida que o adesivo preenche a cavidade da junta (**Figura 23 b**, **c**). É aconselhável o uso de espaçadores em todas as configurações de juntas cilíndricas, como por exemplo um fio, para garantir o alinhamento dos tubos ou varões, mas também para assegurar uma espessura constante de adesivo. Por fim, no final da montagem de cada junta, deve-se efetuar uma rotação entre os substratos cilíndricos de modo a espalhar o adesivo e a uniformizá-lo na junta [9, 11, 20].

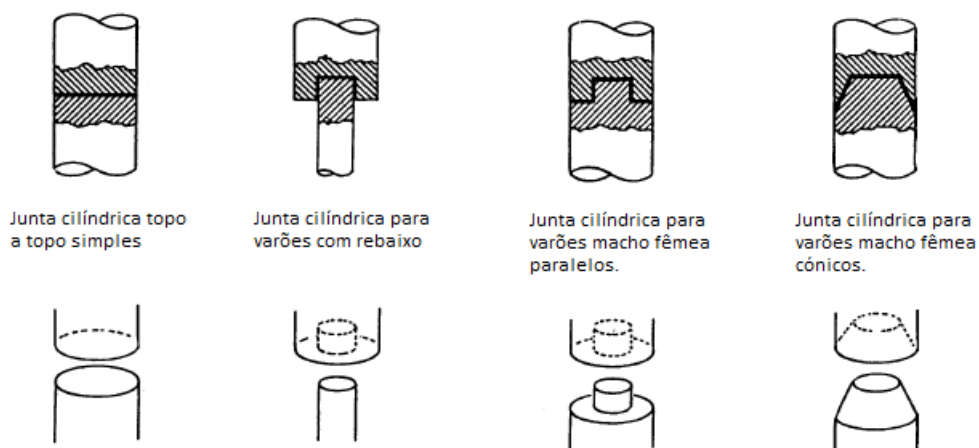


Figura 21 – Juntas cilíndricas para varões sujeitos a esforços axiais e de torção [11].

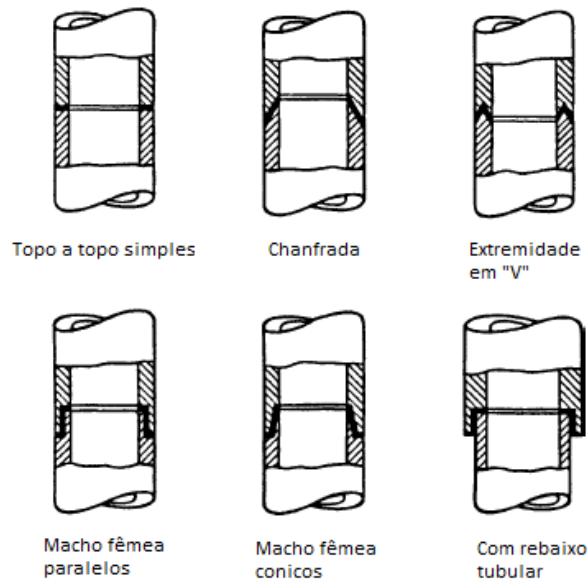


Figura 22 – Juntas cilíndricas para tubos sujeitos a esforços axiais e de torção [11].

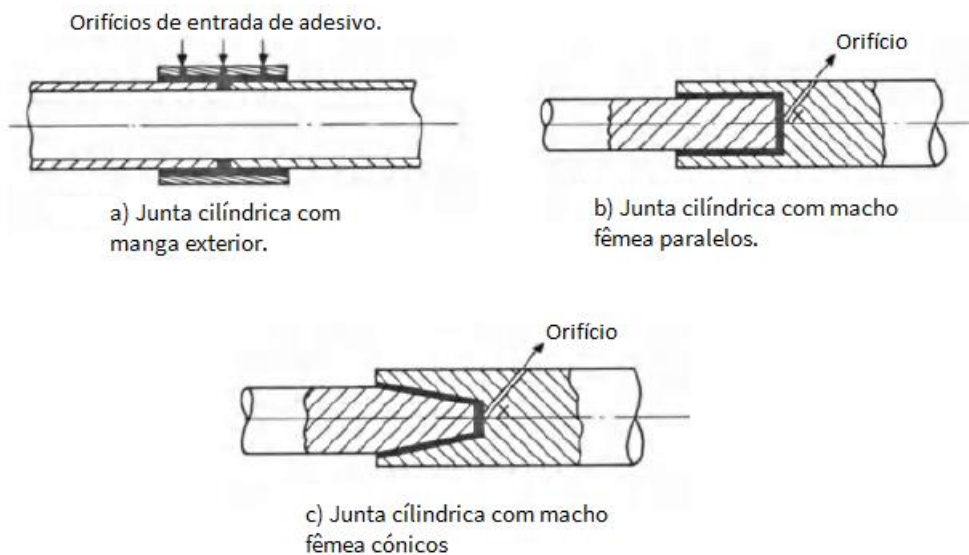


Figura 23 – Juntas cilíndricas para tubos e varões sujeitos as esforços axiais ou de torção. Adaptado de *Structural Adhesive Joints in Engineering* [20].

Juntas em T

Este tipo de juntas pode-se dividir em juntas com componentes a 90° ou com os componentes desfasados de um angulo diferente de 90° , como representado na **Figura 24 a)** e **Figura 24 b)**. Nestas juntas, existem duas formas de aplicar o carregamento, na direção normal (N) ou transversal (T). As tensões provocadas pelo carregamento normal de tração são as menos desejáveis, pois a junta apresenta menor resistência a este tipo de esforços. Também podem surgir tensões normais de compressão. No 1º caso, representam um problema muito severo já que normalmente causam a

rotura prematura da junta. No caso da compressão na direção normal, esta não é muito relevante tendo em conta que esta solicitação dificilmente causará rotura no adesivo. No entanto, pode causar encurvadura no substrato se este não possuir a rigidez necessária, como se pode observar na **Figura 24 i)** e **Figura 24 j)**. No entanto em cada uma das juntas, os efeitos da compressão são diferentes. No caso da junta da i), ocorre um arrancamento bastante severo devido a encurvadura do substrato para o lado direito, ao passo que na junta da j), que tem a encurvadura para o lado esquerdo, a arrancamento não existe e portanto não representa uma situação tão gravosa como a da **Figura 24 i)**. Como alternativa à junta da **Figura 24 a)** às solicitações de compressão na direção normal, podem ser usadas as juntas da **Figura 24 d), e), f), g) e h)**, que são mais resistentes, mas ainda assim são frágeis. Por último existe a opção da junta da **Figura 24 k)**, em que o substrato inferior é ranhurado, mas se a profundidade desse rasgo não for suficiente, podem ocorrer também o problema anteriormente mencionado. Pelo facto de ter de ser uma junta maquinada, o seu custo de fabrico é superior em relação às outras configurações da **Figura 24** [11, 20].

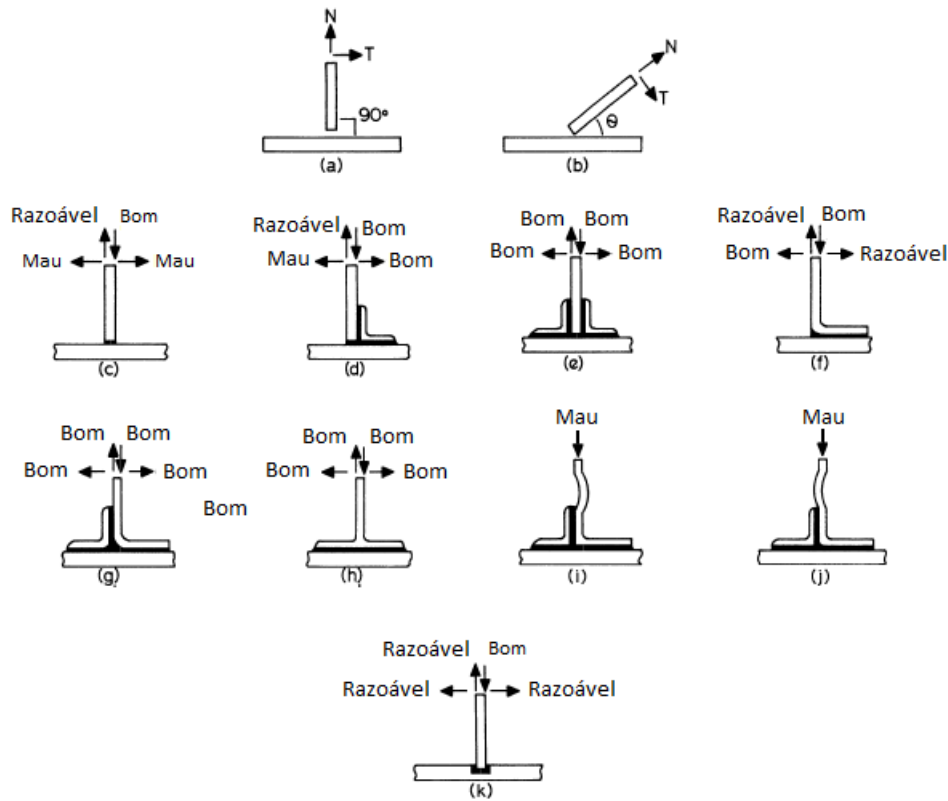


Figura 24 – Configurações de juntas em T. Adaptado de *Structural Adhesive Joints in Engineering* [20].

Juntas de canto

Estas juntas dividem-se tal como as juntas em T, em juntas com substratos a 90° ou com substratos desfasados com um ângulo diferente de 90°. O carregamento também pode ser efetuado na direção

normal (N) ao substrato inferior, ou na direção transversal (T) ao mesmo substrato, como representado na **Figura 25 a) e b)**. Na mesma **Figura 25** estão representadas as diferentes configurações deste tipo de juntas. A junta da **Figura 25 c)** é considerada geralmente fraca, sendo a que apresenta pior desempenho de todas as representadas. Já a junta da **Figura 25 d)**, tem apenas comportamento discutível num único sentido e modo de carregamento, sendo que nos restantes modos tem um comportamento classificado como bom. No entanto, é necessário ter em consideração que o carregamento de compressão na direção normal nesta junta pode causar encurvadura lateral no substrato vertical, causado arrancamento do adesivo. A junta da **Figura 25 e)** é uma junta classificada como boa, apesar de ser de difícil montagem. Ao nível de operações para conceber estas juntas, é necessária dobragem de chapa para as juntas da **Figura 25 d)** até à **k)** [11, 20].

Ao nível de aplicações, estas juntas de canto podem ser utilizadas por exemplo em reservatórios cúbicos ou paralelepípedos sujeitos a pressão interna. Neste caso, a junta da **Figura 25 i)** é preferível à junta da **Figura 25 h)**, uma vez que suporta melhor a pressão, apesar de ambas apresentarem pouca resistência a solicitações aplicadas no plano da ligação. Neste caso, a modificação da **Figura 25 k)** surge com um reforço, que resolve o problema [20].

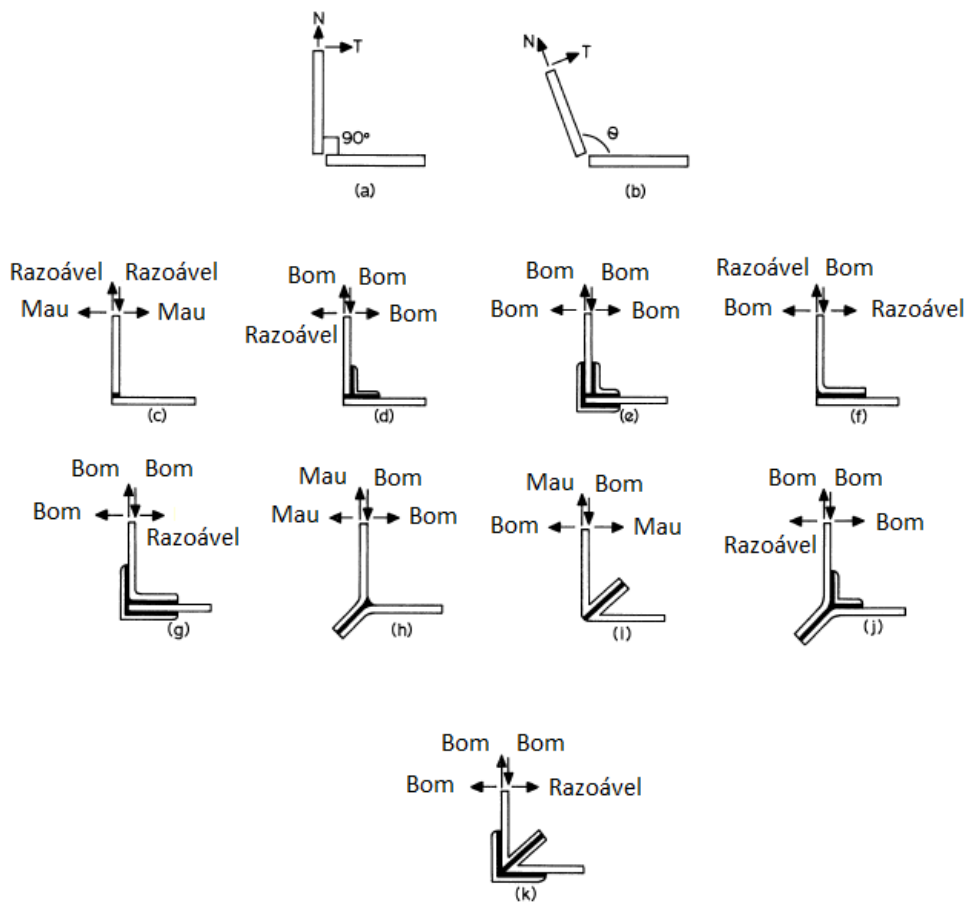


Figura 25 – Configurações de juntas de canto. Adaptado de *Structural Adhesive Joints in Engineering* [20].

2.1.7 Comparação entre JSS e JSD

De todas as geometrias de juntas, as JSS são a tipologia de juntas que mais tem sido alvo de estudos nestes últimos anos. Tal tem-se verificado porque, como referido, as JSS apresentam numa configuração extremamente simples e amplamente utilizada na indústria. Para além disso, a simplicidade da geometria facilita a execução de ensaios que permitem avaliar o comportamento da junta, nomeadamente através de ensaios normalizados [21]. No entanto, a distribuição de tensões neste tipo de juntas não é uniforme, quer sejam tensões τ_{xy} ou σ_y , e apresentam valores mais elevados nas extremidades da sobreposição. As tensões τ_{xy} , apesar de menos críticas do que as σ_y , resultam da deformação longitudinal dos substratos. Já as tensões σ_y resultam principalmente da excentricidade da carga aplicada, que por sua vez provoca uma flexão significativa dos substratos na zona de ligação [22]. Deste modo, as tensões σ_y , induzidas pela excentricidade de cargas, assumem uma elevada importância na medida em que são consideradas um fator primordial na fratura de JSS [21]. Tal acontece porque em primeiro lugar as tensões σ_y são responsáveis pela iniciação e propagação de fendas a partir das extremidades. Em segundo lugar, porque nas juntas com substratos metálicos, como é o caso em estudo, as mesmas tensões são por diversas vezes tão elevadas que excedem a tensão de cedência dos substratos, e num cenário subsequente a uma fratura de junta, os substratos podem sofrer plastificação [21]. O efeito de Poisson nas JSS, que resulta na estricção transversal dos substratos, é também significativo pois também contribui para o aumento das tensões nas extremidades de sobreposição [23]. Deste modo, esta configuração de junta não é utilizada para aplicações críticas de carregamento.

A JSD representada esquematicamente na **Figura 26** apresenta uma geometria simétrica, contrariamente à JSS, o que resulta em tensões normais bastante reduzidas ao longo da camada de adesivo. No entanto, os momentos fletores internos também podem causar tensões normais ao longo do comprimento da camada adesiva, como se pode observar na **Figura 26 b)**. Assim a JSD consegue reduzir de um modo significativo e simultâneo tanto as tensões τ_{xy} como as tensões σ_y . As tensões τ_{xy} são reduzidas em virtude da redução da deformação diferencial dos substratos. As tensões σ_y são diminuídas através da eliminação da excentricidade das cargas que estava na origem de elevadas tensões σ_y nas extremidades de sobreposição [24]. Isto resulta num aumento da capacidade de carregamento da JSD relativamente à JSS superior ao aumento da área de adesivo resistente ao corte entre ambas as juntas. No entanto, a JSD apresenta algumas desvantagens relativamente à JSS: peso relativamente elevado, custos de fabrico superiores e maior morosidade no processo de fabrico.

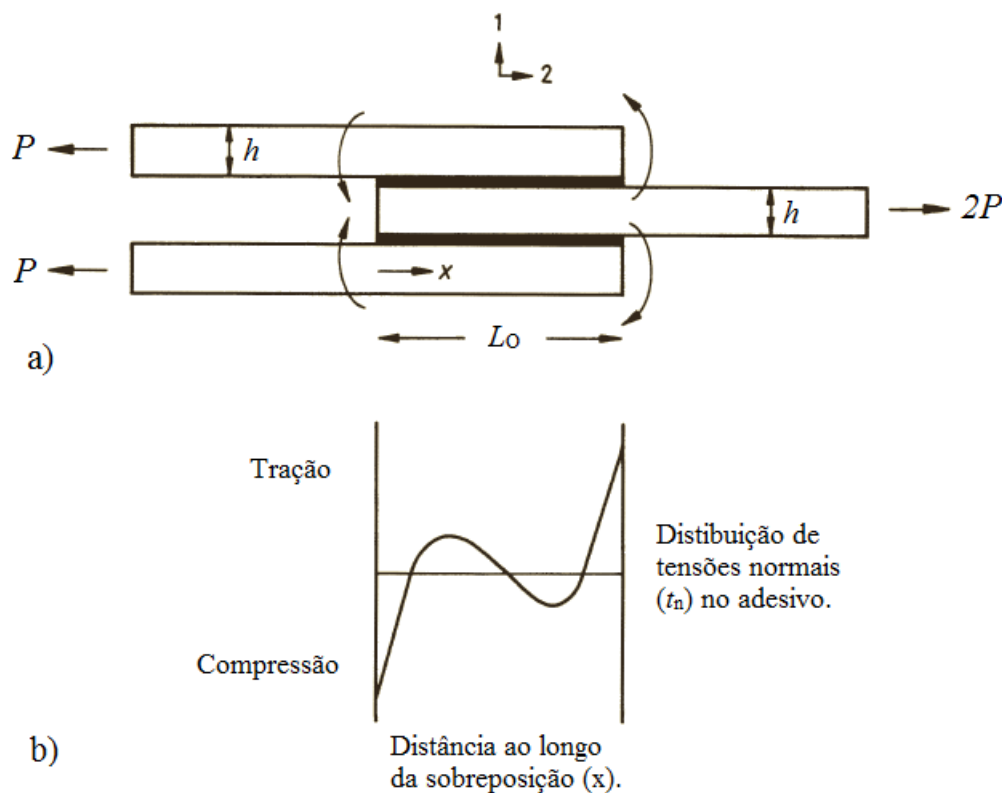


Figura 26 – a) Representação esquemática dos momentos fletores induzidos nos substratos exteriores; b) diagrama de distribuição de tensões σ_y ao longo de L_0 [21].

Foram realizados alguns trabalhos que comparam as JSD com as JSS. Neste contexto, Shin e Lee [25] compararam ensaios experimentais com a modelação por EF, avaliando o desempenho de JSS e JSD entre substratos co-curados de material compósito e de metal. Por comparação da distribuição de tensões σ_y e τ_{xy} em cada uma das juntas, verificou-se que a JSD obteve um melhor comportamento decorrente da eliminação da deflexão transversal, reduzindo os picos das tensões σ_y , e suprimindo os picos das tensões τ_{xy} na extremidade interior da sobreposição. Como resultado, a melhoria das JSD face às JSS traduziu-se num valor superior a duas unidades, ou seja, num valor superior à relação entre as áreas coladas de ambas as juntas. Kinloch [21] também comparou os perfis de tensões τ_{xy} entre JSS e JSD, em substratos de alumínio unidos com adesivo epóxico, comprovando também a diminuição da concentração de tensões ao longo de L_0 para as JSD.

Para além das configurações das juntas, as características do adesivo desempenham um papel determinante na resistência das juntas, principalmente a resistência e ductilidade/tenacidade dos adesivos. De facto, uma boa resistência do adesivo permite a transferência de cargas elevadas através da camada de adesivo. Por outro lado, uma boa tenacidade permite que a transferência de cargas ocorra por uma elevada porção da camada de adesivo. Um adesivo resistente mas frágil é capaz de transferir elevadas cargas nas juntas, mas apenas numa região de sobreposição muito limitada, não sendo capaz de permitir a plastificação de adesivo, culminado na rotura prematura do

mesmo [26]. Tal facto foi observado no trabalho realizado por Campilho et al. [27], que consistiu no estudo experimental e numérico de JSS fabricadas com substratos de material compósito e ensaiadas à tração com um adesivo frágil (Araldite® AV138) e com um adesivo dúctil (Araldite® 2015). Foram ensaiadas juntas com valores de L_0 entre 10 e 80 mm, em intervalos de 10 mm. Os resultados demonstraram que, para ambos os adesivos, a carga de rotura ($P_{\text{máx}}$) aumentou linearmente com o incremento de L_0 , sem que fosse atingido um valor de patamar de $P_{\text{máx}}$, que corresponde à não cedência ou rotura do substrato. Comparando ambos os adesivos, para um $L_0=10$ mm, o Araldite® AV138 conseguiu atingir um valor de $P_{\text{máx}}$ ligeiramente superior ao do Araldite® 2015, o que se deveu ao facto de juntas com comprimentos de sobreposição muito reduzidos apresentarem perfis de distribuição de tensões τ_{xy} praticamente uniformes. Portanto, nestas condições a resistência do adesivo é um fator determinante na resistência da junta, sobrepondo-se à tenacidade do adesivo. Uma vez que o adesivo Araldite® AV138 apresenta maior resistência face ao Araldite® 2015, a resistência da respetiva junta também é superior. No entanto, o aumento de $P_{\text{máx}}$ com o incremento de L_0 foi mais significativo para o adesivo Araldite® 2015, ao passo que se revelou praticamente insignificante para o Araldite® AV138. Isto porque a ductilidade do adesivo permite que a rotura da junta ocorra após a plastificação do adesivo, que se inicia nas extremidades de sobreposição e que progride em direção ao seu centro, culminando no aumento da tensão de corte média ($\tau_{\text{méd}}$) no momento da rotura.

2.2 Ensaios para a determinação da tenacidade à fratura

A tenacidade à fratura é a quantidade de energia necessária para propagar uma fenda pré-existente no material, causada por defeitos de fabrico ou do próprio material [28]. A tenacidade à fratura é uma propriedade que é do material e denomina-se geralmente por taxa crítica de libertação de energia de deformação – G_c (G_{Ic} para tração e G_{IIc} para corte).

Na teoria da Resistência de Materiais, é assumida a ausência de defeitos dos materiais. Por outro lado, a teoria da Mecânica da Fratura revela-se um método mais adequado para prever a rotura de materiais, na medida em que assume a existência desses defeitos. Neste caso, o objetivo da Mecânica da Fratura é saber se a existência de defeitos no material pode causar falhas catastróficas, ou se durante o tempo de utilização do material os seus defeitos se podem propagar de forma estável, sem que as dimensões destes atinjam ou ultrapassem o seu tamanho crítico [29].

Assim, existem atualmente na Mecânica da Fratura dois métodos importantes. O primeiro é baseado no fator intensidade de Tensão – K , enquanto o segundo é baseado em conceitos energéticos, mais especificamente na taxa de libertação de energia de deformação – G .

Muitos autores e investigadores usam os conceitos da Mecânica da Fratura para preverem a resistência à rutura de juntas coladas [29]. Os trabalhos realizados por estes são maioritariamente baseados no método energético. Tal acontece porque este método apresenta vantagens face ao método baseado nos fatores K (Kinloch, 1987) [21]. Em primeiro lugar, G tem maior significância física quando relacionada com a absorção de energia do material. Em segundo lugar, o fator K não é fácil de determinar, nomeadamente quando a fissura se propaga na interface ou na sua vizinhança. Também Ripling [30], uma das referências no estudo de adesivos, propôs que o uso de taxas de libertação de energia em detrimento de fatores de intensidade de tensão pois consegue considerar a não homogeneidade nas juntas coladas. No entanto o uso de G não está isento de algumas desvantagens associadas, como a obrigatoriedade da existência de dano no material, o que nem sempre existe, e o reajuste da malha no caso da utilização de modelos numéricos para simular a propagação do dano [31].

Sendo que a tenacidade à fratura é das propriedades mais importantes para caracterizar materiais, inclusive adesivos, foram criados ensaios que permitem determinar essa propriedade em 3 modos de carregamento diferentes, sob os quais a propagação da fenda pode ocorrer, como demonstrado na **Figura 27**. O modo I representa o modo de abertura, enquanto o modo II e modo III representam modos de corte. Na maioria das situações reais, a carga aplicada origina a combinação diferentes modos de carregamento no início da fenda, o que implica o uso de um critério de modo misto para melhor prever e simular a propagação do dano [29], como será abordado posteriormente. O ensaio DCB para modo I está perfeitamente caracterizado e normalizado [10]. Para o modo II até ao momento não existem ensaios normalizados para caracterização da fratura de adesivos, pelo que se adotam os ensaios e os estudos para caracterizar a fratura interlaminar em materiais compósitos, nomeadamente os ensaios ENF, *End Loaded Split* (ELS), e *Four Point End Notched Flexure* (4ENF) [10], os quais serão abordados no subtópico 2.2.2. Para o modo misto (I+II) (**Figura 28**), existirem vários ensaios para caracterizar o comportamento das juntas coladas, embora nenhum deles se encontre normalizado.

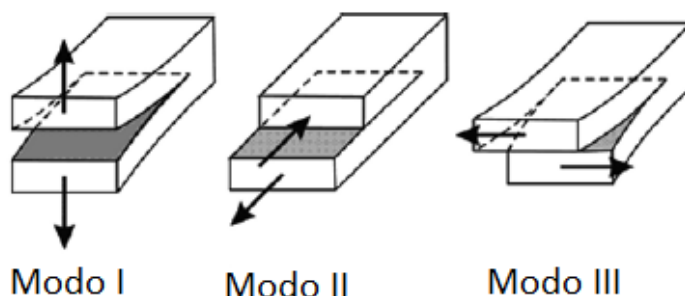
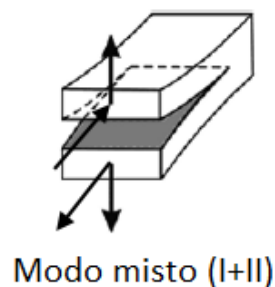


Figura 27 – Modos de rotura [29].



Modo misto (I+II)

Figura 28 – Modo misto de rotura.

2.2.1 Ensaios em tração (modo I)

Os ensaios mais comuns para determinar G_{Ic} são o DCB e o TDCB, que se encontram normalizados pela norma ASTM D3433 – 99.

2.2.1.1 Ensaio DCB

Este ensaio é realizado de modo a tracionar 2 vigas (substratos) unidas por um adesivo com a espessura definida pela norma, no qual é criada uma pré-fenda com um determinado comprimento. O equipamento deve de possuir um mecanismo auto-alinhante de modo a garantir que a sollicitação se mantém alinhada. A carga é aplicada promovendo a abertura da junta, com início na pré-fenda (**Figura 29**) [29].

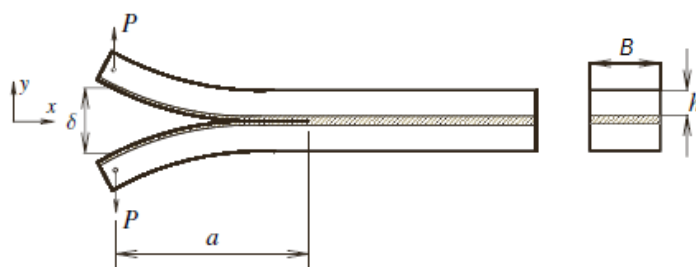


Figura 29 – Representação do ensaio DCB [29].

Na **Figura 29**, P corresponde à carga aplicada, δ o deslocamento, x e y o eixo das abcissas e ordenadas, respetivamente, a o comprimento de fenda, B a largura do provete e h a espessura do substrato.

A referida norma ASTM especifica as dimensões dos substratos para o ensaio. Alguns requisitos são um comprimento total de 356 mm, uma distância de 25,4 mm desde a extremidade esquerda do

provete até ao ponto de aplicação da carga, e $h=12,7$ mm. A **Figura 30** apresenta as restantes dimensões requeridas pela norma.

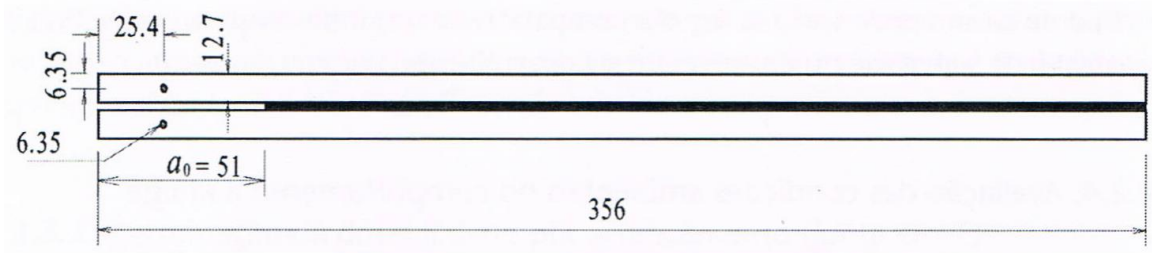


Figura 30 – Dimensões (mm) e geometria dos provetes DCB usados no ensaio em modo I segundo a Norma ASTM D3433 – 99 [10].

O ensaio segundo a norma ASTM referida é um ensaio descontínuo na medida em que o carregamento é interrompido assim que a fenda começa a se propagar. Durante este período, o crescimento da fenda é observado enquanto os valores de carga P são simultaneamente registados até atingirem um valor aproximadamente constante. Durante o início da propagação da fenda até esta parar de crescer, são registados alguns valores significativos que posteriormente serão utilizados para determinação da taxa crítica de libertação de energia, neste caso em modo I – G_{Ic} . Esses valores são a carga máxima ($P_{máx}$) e a , medido a partir do comprimento de fenda inicial (a_0). Este processo é novamente repetido iniciando nova propagação de fenda e nova estagnação do crescimento da mesma, no mesmo provete de modo a se obterem valores repetidos de $P_{máx}$ [32]. A norma ASTM D3433 – 99 recomenda que devem ser testados pelo menos 12 provetes [32]. Assim a energia de fratura segundo esta norma é determinada por:

$$G_{Ic} = \frac{(4P_{máx}^2)(3a^2 + h^2)}{EB^2h^3}. \quad (1)$$

em que E é módulo de elasticidade dos substratos.

Métodos para determinar o G_{Ic}

Existem diversos métodos para a determinação do G_{Ic} quando o ensaio é realizado em provetes DCB. Podem ser métodos que requerem a medição de a , como é o caso do *Compliance Calibration Method* (CCM), *Corrected Beam Theory* (CBT) e *Direct Beam Theory* (DBT), métodos baseados no comprimento de fenda equivalente (a_e), como o *Compliance Based Beam Method* (CBBM) e métodos baseados no Integral- J .

O método CCM, ou método de calibração da flexibilidade, é baseado na equação de Irwin – Kies [33]:

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

sendo o C (δ/P) a flexibilidade (deslocamento/carga). Este método necessita do registo contínuo dos valores de P , δ e a [29].

O método CBT, ou teoria das vigas corrigida, pode ser usada como alternativa ao anterior, e usa um fator de correção teórico (Δ) para a rotação e deslocamento do substrato junto à frente de fenda. Por este método, G_{lc} pode ser obtido por [29]:

$$G_{lc} = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)}. \quad (3)$$

A determinação de Δ pode ser realizada através de um carregamento numa junta com 3 comprimentos diferentes de a_0 (**Figura 31**) de modo a obter uma regressão linear de $C^{1/3}=f(a_0)$ ilustrada na **Figura 32**.

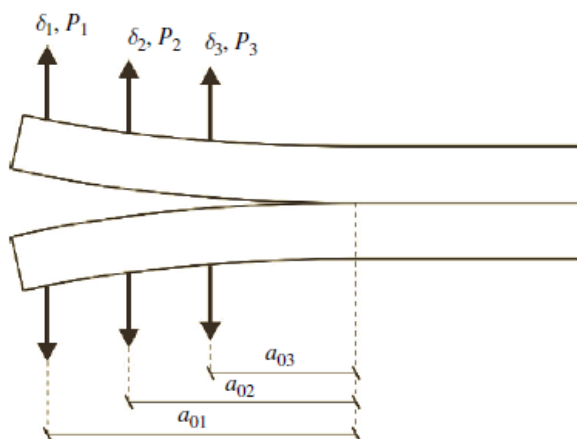


Figura 31 – Representação esquemática do carregamento da junta para determinar Δ [29].

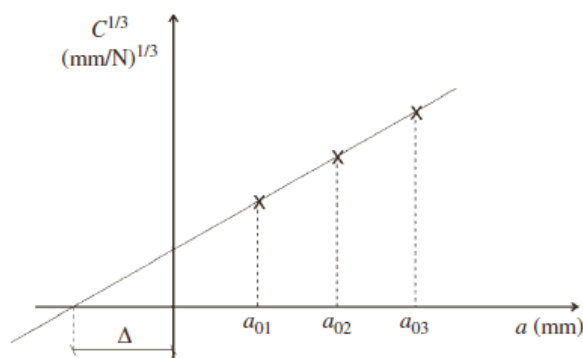


Figura 32 – Representação esquemática da regressão linear para obter Δ devido à rotação dos substratos quando solicitados em modo I [29].

Alternativamente, Wang e Williams [34] propuseram outra forma de determinar os efeitos de rotação e deslocamento dos substratos junto à frente de fenda em modo I, pela alternância dos valores de a através do parâmetro Δ_1 , que é dado por:

$$\Delta_1 = h \sqrt{\frac{E_f}{11G_{13}} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]} \quad (4)$$

em que:

$$\Gamma = 1,18 \frac{\sqrt{E_f E_3}}{G_{13}}, \quad (5)$$

onde E_3 é o módulo de elasticidade transversal e G_{13} o módulo de elasticidade ao corte.

Deste modo, segundo o método CBT, C em função de a é dada por [29, 35]:

$$C = \frac{8(a + |\Delta|)^3}{E_1 B h^3}, \quad (6)$$

que modificando dá:

$$C^{1/3} = \frac{2}{h(E_1 B)^{1/3}} (a + |\Delta|), \quad (7)$$

onde h é a espessura do substrato e E_1 é o módulo de elasticidade do material do substrato na direção longitudinal [35].

Existe também o método baseado na teoria das vigas direta (DBT), que tem-se revelado menos preciso que o CCM e CBT. O cálculo de G_{Ic} por este método é definido pela equação:

$$G_{Ic} = \frac{12a^2 P^2}{B^2 h^3 E_1}. \quad (8)$$

Todos os referidos métodos têm em comum o facto de estarem dependentes da medição do valor de a durante o ensaio. Tal facto pode levar a erros de leitura nos valores de a , que podem adulterar o valor final de G_{Ic} calculado.

O Método das Vigas Baseado na Flexibilidade (CBBM) que surge no sentido de ultrapassar as limitações anteriormente apresentadas, portanto, não requer a medição dos valores de a e contabiliza a energia dissipada na Zona de Processo de Fratura (ZPF). A ZPF desenvolve-se imediatamente à frente da fenda devido à nucleação de micro fissuras através do adesivo e devido à sua plastificação. Este fenómeno dificulta a localização precisa da extremidade da fenda. A extensão desta zona é tanto maior quanto mais dúctil for o adesivo. Esta zona é também demasiado importante para ser desprezada, uma vez que afeta a tenacidade medida do adesivo bem como a energia nele dissipada. Deste modo, a **Figura 33** representa a ZPF e o conceito de a_e [29, 35].

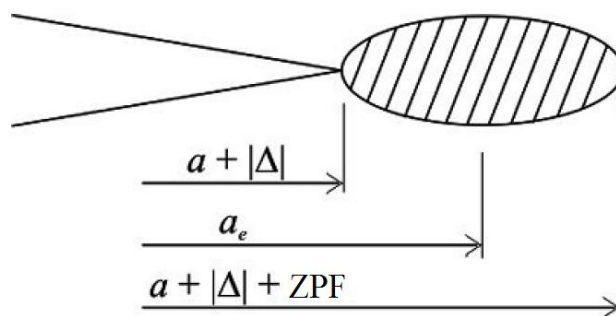


Figura 33 – Representação esquemática da ZPF e do conceito de a_e [15].

Segundo a Resistência de Materiais, a energia de deformação dos aderentes devido à flexão dos mesmos e efeitos de corte é dada por:

$$U = 2 \left[\int_0^a \frac{M_f^2}{2E_1I} dx + \int_0^a \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\tau^2}{2G_{13}} B dy dx \right]. \quad (9)$$

Neste caso M_f é o momento fletor, I é o momento estático de segunda ordem da seção reta de cada substrato e τ é a tensão de corte dada por:

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{P}{Bh} \left(1 - \frac{4y^2}{h^2} \right), \quad (10)$$

onde y é a coordenada ao longo da espessura do adesivo. A partir do teorema de Castigliano o deslocamento (δ) pode ser escrito como:

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{8Pa^3}{E_1Bh^3} + \frac{12Pa}{5BhG_{13}}. \quad (11)$$

Esta equação é uma aproximação baseada na teoria das vigas, e não considera ainda todos os efeitos que influenciam o comportamento da junta, como é o caso das concentrações de tensões que

surgem em torno da frente de fenda devido à rotação e flexão dos aderentes [15]. Para superar estas limitações, recorre-se a um módulo de flexibilidade equivalente ou corrigido – E_f , que surge para o lugar de E_1 :

$$E_f = \left(C_0 - \frac{12(a_0 + |\Delta|)}{5BhG_{13}} \right)^{-1} \frac{8(a + |\Delta|)^3}{Bh^3}, \quad (12)$$

que tem em consideração duas condições iniciais dos ensaios: a_0 e a flexibilidade inicial (C_0). Para além disso, esta aproximação considera a variação das propriedades do material entre diferentes substratos.

Devido às dificuldades mencionadas em monitorizar a e a energia dissipada na ZPF, usa-se a_e em vez de a . O valor de a_e pode ser obtido através da equação (11) como função do valor de C registado durante o ensaio, em que $a_e = a + |\Delta| + |\Delta_{FPZ}|$. A solução desta equação pode ser obtida com recurso ao *software* Matlab®. Deste modo o valor de G_{IC} pode ser obtido pela seguinte equação:

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

Este método de cálculo apenas depende dos dados de carga (P) e do deslocamento (δ). Como já referido, não necessita do registo de valores de a ao longo do ensaio, uma vez que é usado a_e obtido a partir do valor de C durante o ensaio. Uma outra vantagem tem a ver com o facto de a_e incluir os efeitos da ZPF, o que não acontece nos métodos que se baseiam na medição do valor de a (CCM, CBT e DBT) [29, 35].

Método do Integral – J

A Mecânica da Fratura pode ser usada para prever a resistência de juntas quando existe uma pré fenda. No entanto quando os materiais se deformam plasticamente, têm de ser considerados os conceitos elasto – plásticos da Mecânica da Fratura. Neste sentido, surge a equação fundamental do Integral- J , proposta por Rice [36], aplicável a esta situação:

$$J = \int_{\varphi} (Wdy - T_1 \frac{\partial u}{\partial x} ds), \quad (14)$$

onde φ é a curvatura que rodeia a extremidade da fenda, s indica o comprimento do arco de curvatura, W a densidade de energia, T_1 o vetor de tração, u o vetor de deslocamento e x e y são os eixos de coordenadas [36].

A partir do desenvolvimento da equação (14) é possível obter duas outras equações baseadas em conceitos energéticos e na teoria de vigas que permitem o cálculo da taxa de libertação de energia em modo I (G_I) em provetes DCB:

$$G_I = 12 \frac{(P_u a)^2}{Eh^3} + P_u \theta_0 \quad (15)$$

ou

$$G_I = P_u \theta_p, \quad (16)$$

onde P_u representa a carga aplicada nas extremidades dos aderentes por unidade de largura, θ_0 representa a rotação relativa dos aderentes na extremidade da fenda e θ_p é a rotação relativa dos aderentes na linha de carga. A equação (15) é usada por vezes em detrimento da equação (16) devido ao facto de ser mais simples extrair o parâmetro θ_0 por métodos óticos do que θ_p [37].

2.2.1.2 Ensaio em provetes TDCB

Este ensaio encontra-se também normalizado pela norma ASTM D3433-99. A geometria dos provetes utilizados encontra-se representada na **Figura 34**.

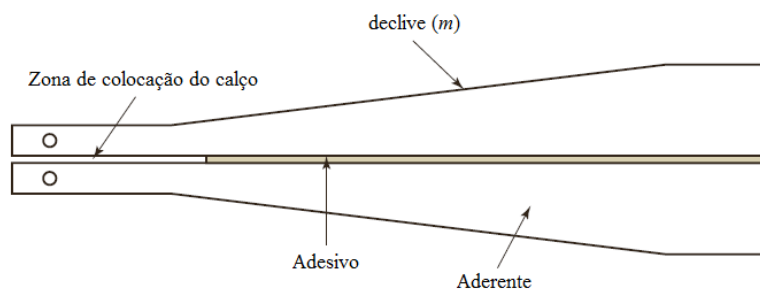


Figura 34 – Representação esquemática dos provetes TDCB [32].

O ensaio é realizado segundo o mesmo procedimento de ensaio em provetes DCB com a norma homóloga. Portanto é aplicada a solitação e esta é retirada após o início de propagação da fenda, e aplicada novamente quando a propagação da fenda cessa. Isto é repetido ao longo do comprimento de adesivo, num mínimo de 5 ciclos de “paragem – recomeço” por cada par de substratos [32]. Os

provetes utilizados apresentam uma geometria caracterizada por uma zona de inclinação, definida pela equação:

$$m = \frac{1}{h} + \frac{3a^2}{h^3}, \quad (17)$$

em que m é um fator geométrico correspondente à inclinação do substrato e que relaciona h com a . A taxa crítica de libertação de energia em modo I ou tenacidade à fratura é determinada pela seguinte equação:

$$G_{Ic} = \frac{4P_{máx}^2 m}{EB^2}. \quad (18)$$

A vantagem do cálculo de G_{Ic} pela equação (18) está no facto de ser independente do valor de a , dispensando assim a monitorização do mesmo durante o ensaio [32].

2.2.2 Ensaio em corte (modo II)

Até ao momento não existe nenhum ensaio normalizado para caracterizar a tenacidade à fratura de juntas adesivas carregadas unicamente sob modo II. No entanto, para caracterizar estas juntas, têm sido adaptados com sucesso os ensaios destinados a avaliar a fratura interlaminar de compósitos nas juntas adesivas [29]. Deste modo destacam-se os seguintes ensaios: ENF, o *End Loaded Split* (ELS) e o 4ENF. Na **Figura 35** encontram-se representados esquematicamente cada um deles [29].

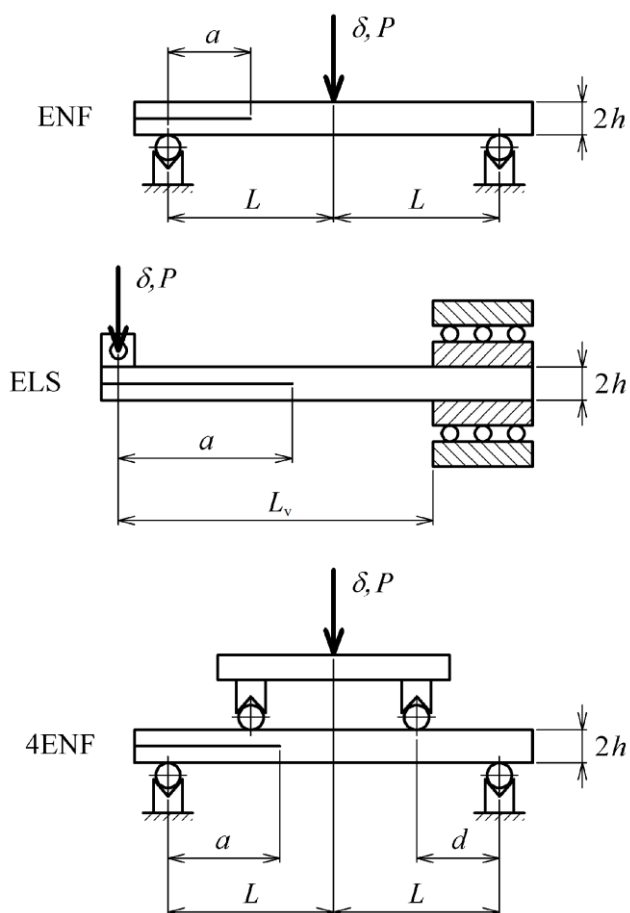


Figura 35 – Configurações utilizadas em ensaios realizados em Modo II [29].

Na **Figura 35**, L é o comprimento entre o ponto de apoio do provete e o ponto de aplicação da carga, L_v é o comprimento entre o ponto de aplicação da carga e o início de encastramento do provete e d é a distância entre os pontos de apoio superior inferior mais próximos. Contudo, na presente revisão bibliográfica apenas se descreve o ensaio ENF.

2.2.2.1 Ensaio ENF

Este ensaio consiste em duas vigas suportadas inferiormente nas suas extremidades, e carregadas superiormente na metade do seu comprimento total (**Figura 36**). Existe também uma pré-fenda numa das extremidades do adesivo.

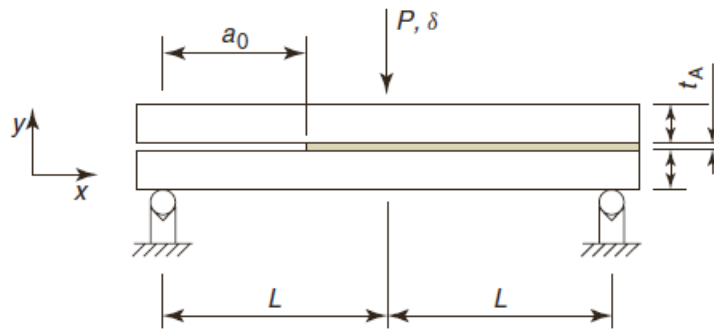


Figura 36 – Configuração do ensaio ENF [32].

Este é o ensaio mais utilizado para determinar a taxa crítica de libertação de energia em modo II (G_{IIc}) de juntas coladas, dada a sua simplicidade [10]. No entanto podem-se esperar algumas dificuldades durante a realização do ensaio, nomeadamente relacionadas com a instabilidade de propagação da fenda [32].

O ensaio é normalmente realizado em dispositivos de ensaio eletromecânicos ou hidráulicos que permitem o registo dos valores de carga – deslocamento ($P-\delta$) e aquisição dos mesmos para um dispositivo informático [32]. Segundo as normas Japonesa (JIS 7086) e Europeia (AECMA prEN 6034) adaptadas, durante o ensaio e desde que ocorre a propagação de fenda a um valor constante de G_{IIc} , devem de ser efetuadas pelo menos 20 a 30 medições do valor de a para construir a curva R , que relaciona G_{II} com a [32].

Métodos para determinar o G_{IIc}

Tal como no ensaio DCB realizado em modo I, no ensaio ENF também existem 3 tipos de métodos para determinar o G_{IIc} . São eles os que dependem da medição de a (CCM, CBT e DBT), os métodos baseados no a_e (CBBM) e o método baseado no Integral- J .

O método CCM para determinar o G_{IIc} também é baseado na equação (2) de Irwin – Kies [33]. Para determinar do valor de C da referida equação, existem duas formas possíveis. Uma delas consiste em realizar ensaios de flexão ENF em provetes com diferentes valores de a_0 . Alternativamente o valor de C pode ser determinado pela medição dos comprimentos de fenda durante a sua propagação. Neste caso um ajuste cúbico polinomial ($C=C_3 a^3 + C_2 a^2 + C_1 a + C_0$) deve de ser realizado para ajustar as curvas de $C=f(a)$, originando [38, 39]:

$$G_{IIc} = \frac{3P^2 C_1 a^2}{2B}. \quad (19)$$

Pelo método DBT, baseado na teoria das vigas direta, a determinação de G_{IIc} é dada por:

$$G_{IIc} = \frac{9P\delta a^2}{2B(2L^3 + 3a^3)}, \quad (20)$$

onde L é corresponde a metade da distância entre apoios do provete (**Figura 36**) [39].

O CBT é outro método que também pode ser aplicado. Para determinar G_{IIc} , Wang e Williams [34] propuseram a seguinte equação:

$$G_{IIc} = \frac{9P^2(a + |\Delta_{II}|)^2}{16B^2E_1h^3}, \quad (21)$$

onde Δ_{II} é a correção para a devido ao esforço de corte. Segundo os autores, tem-se que $\Delta_{II}=0,42 \Delta_I$, em que Δ_I é definido pela equação (4).

É de referir que as dificuldades experimentais para obter valores dos comprimentos de fenda são maiores nos ensaios realizados em modo II [29]. De facto, devido à forma como a carga é aplicada, a fenda tende a fechar durante a sua propagação, o que impede uma visualização e localização correta da frente da mesma. Nos métodos apresentados até ao momento, não são contabilizados os efeitos da extensão da ZPF, uma vez que se considera o comprimento real da fenda [39]. De modo a superar estas limitações, um método de fenda equivalente (CBBM) semelhante ao referido no ensaio em provetes DCB pode ser aplicado de modo a obter o valor da tenacidade à fratura sob carregamento puro em modo II em provetes ENF. Tal como no ensaio DCB, o método também é baseado no conceito de flexibilidade das vigas e na teoria de vigas.

Pela teoria de vigas e pelo teorema de Castigliano, a equação para determinar C para o provete ENF é dada por:

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_1 Bh^3} + \frac{3L}{10G_{13} Bh}. \quad (22)$$

O módulo de elasticidade à flexão equivalente (E_f) é obtido usando C_0 e a_0 :

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8Bh^3} \left(C_0 - \frac{3L}{10G_{13} Bh} \right)^{-1}. \quad (23)$$

De facto, este procedimento tem em consideração as diferenças de propriedades entre substratos de diferentes materiais e os vários efeitos que não estão incluídos na teoria de vigas, isto é, concentração de tensões na ponta da fenda, contacto entre substratos na região da pré-fenda e os efeitos de deslocamento e rotação dos aderentes na frente da fenda [38]. Estes efeitos têm influência sobre a curva $P - \delta$ mesmo no regime elástico. Portanto, todos estes efeitos são incluídos quando C_0 é utilizado para determinar E_f . Substituindo E_f da equação (23) por E_1 na equação (22) obtém-se uma fenda equivalente que representa os efeitos da ZPF em função de C [29]. Assim, a_e é dado por:

$$a_e = a + \Delta a_{FPZ} = \left[\frac{C_c}{C_{0c}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_c}{C_{0c}} - 1 \right) L^3 \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (24)$$

onde C_c é a flexibilidade corrigida e C_{0c} é a flexibilidade inicial corrigida que são dados por:

$$C_c = C - \frac{3L}{10G_{13} Bh} \quad \text{e} \quad (25)$$

$$C_{0c} = C_0 - \frac{3L}{10G_{13} Bh}. \quad (26)$$

G_{IIc} pode ser agora obtido pela relação de Irwin – Kies [33]:

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 a_e^2}{16B^2 E_f h^3}. \quad (27)$$

A aplicação do método CBBM para caracterizar a fratura de juntas solicitadas em modo I e II apresenta diversas vantagens. Com este método não é necessário medir os comprimentos de fenda durante o ensaio uma vez que é usado a_e no lugar de a [38]. Experimentalmente só é necessário registar os valores de carga (P) e deslocamento (δ) para o cálculo de G_{IIc} . Usando este procedimento os efeitos da ZPF, que são mais pronunciados no modo II, estão incluídos no cálculo

de G_{Ic} [29]. Para além disso, o módulo de elasticidade equivalente é um valor calculado que depende de C_0 e de a_0 , evitando-se assim a influência da variabilidade dos substratos nos resultados. A única propriedade do material necessária nesta aproximação é o valor de G_{13} dos aderentes. No entanto segundo estudos realizados [40] demonstram que a influência de G_{13} é muito menor do que a de E_1 , e que pode ser usado um valor típico de G_{13} em detrimento de um valor específico [29, 38]. Para além disso, esta metodologia permite ainda obter a curva R completa.

Método do Integral- J

O integral- J é adequado para o comportamento elástico não linear de determinados materiais, mas também é aplicável a comportamentos plásticos monotónicos, como é o caso do ensaio ENF [41].

Segundo Leffler et al. [42], para o ensaio realizado em modo II em provetes ENF o valor de G_{II} é dado pela equação (28), que resulta da integração de um percurso aleatório em torna da ponta da fenda pela equação fundamental (14) de Rice [36], o que origina:

$$G_{II} \approx \frac{9}{16} \frac{(P_u a)^2}{Eh^3} + \frac{3}{8} \frac{P_u v_0}{h}, \quad (28)$$

onde v_0 é o deslocamento em corte entre o aderente superior e inferior. O primeiro termo da equação corresponde à solução da MFLE (Mecânica da Fratura Linear Elástica), enquanto o segundo termo refere-se à influência da flexibilidade da camada adesiva nos valores resultantes de G_{II} [42]. A precisão desta técnica está dependente do comportamento elástico por parte dos aderentes, que tem de ser verificado durante o seu projeto e depois de cada ensaio [41, 43].

2.2.3 Ensaios em solitação combinada (modo misto I + II)

Nos materiais homogéneos e isotrópicos as fendas tendem a propagar-se exclusivamente em modo I (**Figura 27**), perpendicularmente à direção da tensão principal máxima, independentemente da orientação original da pré-fenda [29]. Por outro lado, em juntas coladas, a direção da propagação da fenda é influenciada pelos aderentes, e estes levam a que na maior parte dos casos aconteça uma propagação de fenda em modo misto (I+II) (**Figura 27**) [29]. Nestes casos, é necessário o uso de um critério energético adequado para a previsão da rotura como o da equação (29):

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}} \right)^A + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}} \right)^B = 1, \quad (29)$$

onde G_{Ic} e G_{IIc} são os valores críticos da taxa de libertação de energia de deformação em modo I e II, respetivamente. Pode-se usar o critério linear ($A=B=1$) ou o critério quadrático ($A=B=2$), sendo estes os mais aplicados [15]. Existe um parâmetro importante que é utilizado para caracterizar a fratura em modo misto em materiais homogêneos, a razão de modos (ψ), que permite calcular a proporção de modo misto e que é dado por:

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{K_{II}}{K_I} \right) = \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{G_{II}}{G_I} \right)}, \quad (30)$$

onde K_I e K_{II} representam os fatores de intensidade de tensão em modo I e II, respetivamente.

Existem diversos ensaios para caracterizar a fratura juntas adesivas solicitadas em modo misto, dos quais se destacam o *Fixed Ratio Mixed Mode (FRMM)*, *Mixed-Mode Flexure/Single-Leg Bending (MMF/SLB)*, *Crack Lap Shear (CLS)*, *Compact Mixed Mode (CMM)*, e *Asymmetric-Double Cantilever Beam (ADCB)*.

O ensaio FRMM é bastante utilizado pois é muito semelhante ao ensaio ELS para modo II, o que permite a utilização do mesmo equipamento laboratorial [32]. A diferença entre os ensaios está na aplicação da carga. No ensaio ELS, a carga é aplicada nos provetes superior e inferior, enquanto no FRMM a carga é aplicada apenas no provete superior, permitindo que o provete inferior se deforme livremente (**Figura 37**) [32].

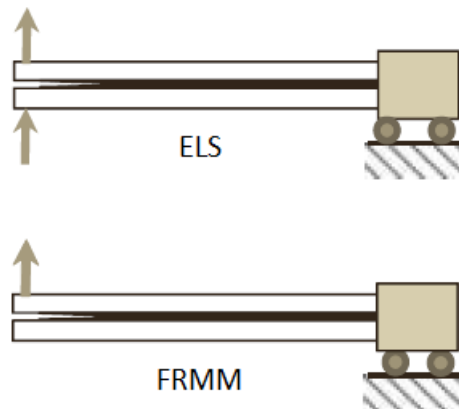


Figura 37 – Comparação entre ensaios realizados em modo II (ELS) e em modo misto (I+II) (FRMM).

Adaptado de *Testing Adhesive Joints* [32].

O ensaio MMF/SLB recorre a provetes semelhantes aos utilizados nos ensaios DCB, ELS e FRMM, mas com um provete inferior mais curto. Este ensaio é um ensaio de flexão em 3 pontos, onde a carga é aplicada a meio vão do comprimento do substrato superior, enquanto ambos os provetes são apoiados inferiormente com o apoio do substrato superior a permitir rolamento (**Figura 38**) [32].

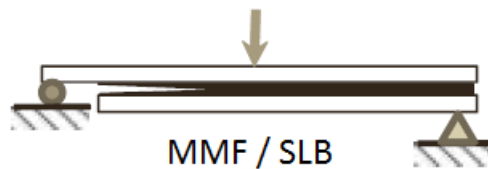


Figura 38 – Configuração de Ensaio SLB.

O ensaio CLS é bastante utilizado em ligações adesivas, incluindo em solicitações à fadiga, dada a simplicidade da aplicação da carga. Consiste em dois substratos de diferentes comprimentos, sobrepostos, em que a carga é aplicada longitudinalmente numa das extremidades do substrato superior. Na extremidade oposta à da aplicação da carga, ambos os substratos são encastrados (**Figura 39**). A solicitação aplicada resulta num modo de carregamento misto (I + II) semelhante ao que se verifica em juntas coladas usadas na aviação, onde os esforços corte são dominantes [32].

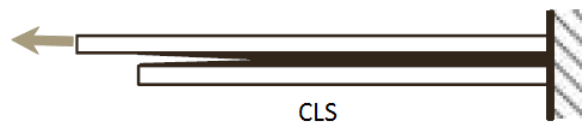


Figura 39 – Configuração do ensaio CLS [32].

O ensaio CMM é bastante versátil e pode ser realizado em modo I puro, modo II puro, ou a combinação dos dois (modo misto). Tal é possível mediante alteração do local onde a carga é aplicada, neste caso nos diferentes orifícios do dispositivo de solicitação (**Figura 40**). Os substratos CMM (**Figura 41**) são fixados ao dispositivo de solicitação por intermédio de pinos.

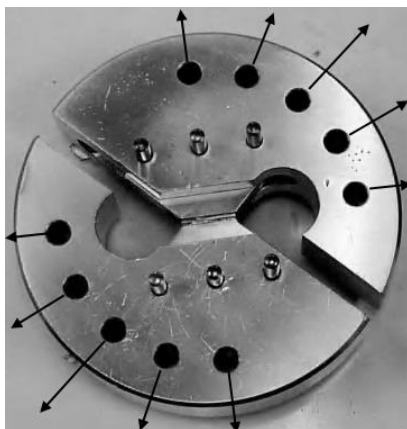


Figura 40 – Pontos de aplicação de carga no dispositivo de solicitação CMM [32].



Figura 41 – Substratos CMM [32].

O Ensaio ADCB é uma generalização do ensaio DCB. Neste caso os substratos podem ser fabricados do mesmo material ou materiais diferentes, e podem apresentar ou não diferentes espessuras. O ensaio é adequado para avaliar em modo misto a tenacidade à fratura de juntas coladas e a resistência à delaminação em matérias compósitos [44].

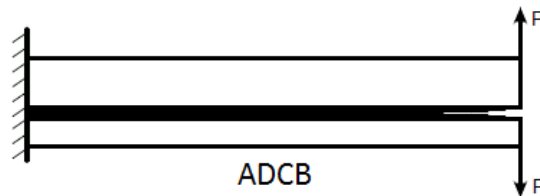


Figura 42 – Configuração do ensaio ADCB.

2.3 Técnicas de previsão de resistência

No passado a inexistência de modelos de materiais complexos e critérios de rotura adequados conduziam geralmente ao sobredimensionamento das juntas adesivas, o que invariavelmente resultava em estruturas mais pesadas e dispendiosas. Com o surgimento de métodos de previsão e de projeto fiáveis, surgiram também novas possibilidades para o aumento da eficiência no uso de juntas adesivas. Existem basicamente duas alternativas para analisar juntas adesivas: os métodos analíticos e os métodos numéricos (caso da análise da análise por EF). Assim, o início do estudo das juntas adesivas remonta aos anos 30, com o modelo analítico de Volkersen [45] que considerava o comportamento elástico dos materiais e a deformação do adesivo apenas ao corte. Contudo, a formulação analítica de juntas adesivas torna-se mais complexa quando os adesivos se deformam plasticamente, se os substratos são em material compósito ou na presença de substratos de diferentes materiais (juntas híbridas). A análise por EF é o método numérico mais popular para analisar juntas adesivas, no qual Adams e Peppiatt [46] foram pioneiros. A rotação da junta, a plastificação dos substratos, do adesivo e a influência do filete de adesivo foram estudados em primeira mão por Harris e Adams [47].

A mecânica dos meios contínuos para a prever a resistência de juntas coladas foi usada nas primeiras análises efetuadas, mas requeria uma distribuição de tensão e critérios de rotura adequados. A análise de EF também pode ser usada conjuntamente com critérios da Mecânica da Fratura para a previsão de resistência, tanto pelo fator de intensidade de tensão ou pela aproximação energética como é o caso da técnica do fecho virtual de fenda (VCCT – *Virtual Crack Closure Technique*). No entanto, o uso destas técnicas no modelamento do crescimento de fendas torna-se complicado devido ao reajuste de malha que se torna necessário durante a análise e o respetivo custo computacional que isso implica [48]. Com novos desenvolvimentos surgiu a

combinação do método de EF convencional com elementos coesivos locais. Esta técnica junta o método dos EF convencional para as regiões onde não são esperadas a ocorrência de dano e as aproximações da Mecânica da Fratura através de elementos coesivos para simular o crescimento de fenda. Recentemente surgiu uma alternativa para modelar a propagação de fendas no seio de materiais, denominada de Método dos Elementos Finitos Estendido (MEFE), que usa funções de forma mais elaboradas para representar campos de deslocamentos descontínuos. Deste modo, para prever a resistência de juntas existem dois métodos distintos: os métodos analíticos e os métodos numéricos.

2.3.1 Métodos analíticos

Inicialmente, os métodos de previsão de juntas adesivas consistiam em formulações analíticas. Os trabalhos de Volkersen [45] e de Goland e Reissner [49] foram os precursores de um número de estudos teóricos que apresentavam a vantagem de obter facilmente estados de tensão em estruturas coladas devido ao assumir de pressupostos simplificadores em termos de geometria de juntas, carregamento e condições fronteira, permitindo obter uma solução analítica explícita para o comportamento no domínio elástico. Portanto, cada estrutura colada podia ser analisada rapidamente, apesar dos vários pressupostos considerados. Com estes modelos, as tensões e deformações eram facilmente calculadas, juntamente com a distribuição do momento fletor na estrutura. A previsão da resistência era normalmente realizada através de critérios baseados em tensões ou deformações limites. Até aos dias de hoje, estes estudos foram progressivamente substituídos por análises numéricas, apesar desses estudos teóricos terem sido refinados ao longo dos anos em termos de capacidades de modelação, com o surgimento da consideração da não linearidade dos materiais ou da não linearidade geométrica [50].

2.3.2 Métodos numéricos

2.3.2.1 Mecânica dos meios contínuos

Na mecânica dos meios contínuos, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos pela análise de EF, são normalmente usados no critério de rotura para estimar a resistência das juntas. Isto é conseguido quando os valores previstos da tensão ou da deformação, obtidos por critérios baseados em tensões ou deformações, como o MNSC (*Maximum Normal Stress Criterion*) ou o MSSC (*Maximum Shear Strain Criterion*), atingem a resistência dos elementos constituintes da estrutura. Esta aproximação foi primeiramente aplicada à generalidade das juntas coladas em aplicações estruturais logo após o momento em que o método de EF e de

cálculo computacional estavam disponíveis [47]. As vantagens desta técnica incluíam a análise de estruturas coladas, com ou sem dano inicial (pré – fenda) sob um carregamento arbitrário. Não obstante ao facto desta técnica apresentar uma limitação intrínseca, uma vez que as estruturas coladas são suscetíveis a singularidades de tensão, nomeadamente nas extremidades da sobreposição. De facto, na análise de EF de estruturas coladas, os valores de tensão nas regiões de singularidade tendem a aumentar com o refinamento da malha e não se obtém convergência de valores o que torna as previsões dependentes do refinamento da malha [50]. Ao longo dos anos, foram realizados melhoramentos nesta técnica de modelação, tais como a definição de critérios de rotura mais complexos baseados na tensão ou deformação, para diferentes materiais e mecanismos de fratura, ou utilizando modelos de materiais contínuos mais realistas. No entanto, o problema da dependência da malha persiste nesta técnica.

2.3.2.2 Mecânica da Fratura

A aproximação da mecânica dos meios contínuos assume que uma dada estrutura e os materiais que a constituem são meios contínuos. Logo, a existência de defeitos ou alterações bruscas geométricas resultam em singularidades de tensão ou de deformação para os quais esta técnica não oferece solução. Neste sentido surge o conceito da mecânica da fratura para lidar com o tipo de defeitos mais comum em estruturas, ou seja, as fendas. Na Mecânica da Fratura é aceite que tensões calculadas na extremidade das fendas pela mecânica dos meios contínuos resultem em casos de singularidade (valores infinitos). As singularidades de tensão existem sempre que o ângulo da fenda é menor que 180° . Tal conclusão foi obtida por Williams [51] no estudo de singularidades de tensão com entalhes. O mesmo argumento é válido para casos de singularidade de tensão entre dois materiais ligados entre si por reentrâncias. A mecânica da fratura tem sido aplicada a vários problemas de engenharia nos últimos anos. Muitos estudos realizados em ligações adesivas por diversos autores, entre os quais Fernlund e Spelt [52], usam G e o respetivo valor crítico ou de tenacidade à fratura (G_c) no lugar dos fatores de intensidade de tensão (K), devido ao facto de estes últimos não serem facilmente determináveis quando a fenda se propaga perto ou numa interface entre 2 materiais. No entanto, a fratura de juntas adesivas ocorre principalmente sob condições de carregamento em modo misto devido à variação de propriedades entre os diferentes materiais envolvidos mas também devido à complexidade das tensões instaladas. Para lidar com estes casos, podem ser desenvolvidos critérios de rotura para a fratura em modo misto de forma análoga aos critérios clássicos de rotura, apesar de ser necessário introduzir o conceito de superfície ou envelope de fratura.

2.3.2.3 Mecânica do Dano

Atualmente estão disponíveis técnicas de modelação avançadas que asseguram resultados precisos para a previsão de resistência, ultrapassando as limitações das aproximações anteriormente mencionadas. De um modo geral, os danos estruturais podem ocorrer por micro fissuras num volume finito ou numa zona de interface, reduzindo a capacidade transferência de esforços. A simulação de EF baseada na modelação contínua de sólidos induz erradamente plastificação generalizada nos elementos sem evolução de dano, enquanto os modelos da mecânica do dano podem de facto introduzir dano em elementos através da redução de transferência de esforços. Como resultado, é possível executar uma simulação de dano e fratura passo a passo, num caminho de fenda pré definido ou arbitrário, numa região finita de material [53]. Estes métodos estão disponíveis há algum tempo para aplicação em estruturas coladas, mas só recentemente começaram a ser aplicados a estruturas híbridas. Apesar disso, a mecânica do dano ainda continua a ser uma área inovadora e sob constante desenvolvimento, nomeadamente em termos de técnicas de modelação mais precisas e fiáveis, em métodos mais simples de estimação de parâmetros de materiais, no aumento de robustez da técnica e na eliminação de problemas de convergência [54]. As técnicas de modelação do dano podem ser locais ou contínuas. No modelo de dano local, o dano ocorre numa área ou volume nulos, respetivamente numa análise em 2D (duas dimensões) ou 3D (três dimensões), simulando uma falha na interface de materiais, por exemplo entre uma ligação adesiva e o aderente, ou entre laminados de um compósito (fratura interlaminar) ou na interface entre fases sólidas de materiais. Na modelação de dano contínua, o dano estende-se por uma área ou volume (respetivamente numa análise 2D ou 3D) de modo a simular uma rotura interna de um sólido ou a modelar uma fratura coesiva do adesivo.

As técnicas da mecânica do dano dividem-se em MDC e técnicas alternativas aos MDC. Uma vez que os MDC vão ser abordados num capítulo à parte no presente capítulo são apenas referidas as técnicas alternativas. Nestas metodologias, considera-se um parâmetro de dano para modificar a resposta constitutiva de materiais através da redução da rigidez ou da resistência, como por exemplo nas ligações adesivas [55], delaminações ou rotura de matrizes em compósitos [56], de modo a representar o dano incorrido nos materiais durante o carregamento. Esta variável de dano pode ser usada numa lei de evolução de dano para modelar o dano antes do início da criação da fenda e o crescimento da mesma. Segundo Voyiadjis e Kattan [57], as variáveis de dano podem ser classificadas em 2 grupos principais: variáveis que introduzem dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, mas que não se relacionam diretamente com o mecanismo de dano, e as variáveis relacionadas com a definição física de um tipo de dano específico, tais como as porosidades ou áreas relativas de micro cavidades. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para problemas estáticos e do número de ciclos para problemas

de fadiga. Para juntas coladas, foram publicados poucos trabalhos neste domínio. Para fadiga, a mecânica do dano não faz uma distinção clara entre a iniciação de fadiga e as fases subsequentes de propagação da mesma, apesar de fornecer uma base para análise de previsão [55]. Ainda assim, a evolução do dano antes da macro fissuração pode ser simulada.

2.3.2.4 XFEM

O MEFE ou *Extended Finite Element Method* (XFEM) é um melhoramento recente do método de EF tradicional para modelação da propagação de dano em estruturas. Este método recorre a leis de dano para prever a fratura, que são baseadas na resistência dos materiais em bruto para a iniciação do dano, e em deformações para a previsão da rotura (definidas por G_c), em detrimento de valores de t_n^0 / t_s^0 , ou de δ_n^0 / δ_s^0 usados nos MDC, em que t_n^0 , t_s^0 , δ_n^0 e δ_s^0 são respetivamente a resistência coesiva à tração, a resistência coesiva ao corte, o deslocamento correspondente ao início de dano em tração e o deslocamento correspondente ao início de dano em corte. O MEFE tem a vantagem sobre os MDC de não necessitar de uma fenda para seguir um percurso pré definido. De facto, as fendas podem crescer livremente no interior do material, sem a necessidade da malha corresponder à geometria das descontinuidades nem de voltar a criar a malha na zona da fenda à medida que esta propaga [58]. Este método é uma extensão do método de EF, cujas características principais foram apresentadas no final dos anos 90 por Belytschko e Black (1999) [59]. O MEFE baseia-se no conceito de partição de unidades e pode ser implementado no método tradicional de EF através da introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos dos nós perto da fenda, de modo a permitirem o crescimento de dano e separação entre as faces da fenda [60]. Durante o crescimento da fenda, a sua extremidade altera constantemente de posição e orientação, dependendo das condições de carregamento e da geometria da junta ou substratos, simultaneamente à criação de funções de enriquecimento necessárias para os deslocamentos dos nós dos EF em torno do percurso ou da extremidade da fenda.

2.4 Previsão de resistência por modelos de dano coesivo

Os MDC, na última década têm sido usados para prever a resistência de juntas adesivas, como um suplemento da análise de EF permitindo a simulação do crescimento do dano em regiões maciças de material contínuo ou na interface entre diferentes materiais [41, 61]. Em relação à análise convencional de EF, consegue-se maior fiabilidade e precisão das previsões, uma vez que podem ser desenvolvidas diferentes formas para as leis coesivas, dependendo da natureza do material ou da interface a simular.

Quando o adesivo apresenta um comportamento frágil, o uso da MFLE pode ser aplicado para caracterizar o processo de rotura. Esta técnica teve bastante sucesso há algumas décadas atrás, mas tinha a desvantagem de ser restrita a deformações de pequena escala zona em torno da extremidade da fenda. Como nos adesivos estruturais modernos a zona de plastificação se pode estender por um comprimento superior à espessura dos aderentes, foram desenvolvidos estudos em 1959 e 1960, respetivamente por Barenblatt [62] e Dugdale [63], no sentido de modelar este processo de dano. Foram estes autores que propuseram o conceito de zona coesiva para descrever situações de dano sob condições estáticas de carregamento na zona coesiva do processo, à frente da ponta da fenda. Surgiram então os MDC, que podem ser baseados em elementos de mola ou mais convencionalmente em elementos coesivos, que ligam os elementos sólidos de 2D ou 3D das estruturas [61]. Os MDC baseiam-se no pressuposto de que uma ou múltiplas regiões/interfaces de fratura podem ser artificialmente introduzidas nas estruturas, nas quais a propagação do dano é propiciada pela existência de uma possível descontinuidade. Posto isto, uma das principais vantagens do uso dos MDC é o facto de estes serem facilmente incorporados em *softwares* de simulação de EF para modelar o comportamento à fratura de diversos materiais, incluindo juntas adesivas [41].

A técnica dos MDC consiste na aplicação de leis de tração – separação para modelar interfaces ou regiões finitas. Estas leis estabelecem-se entre pares de nós homólogos dos elementos coesivos e podem ser consideradas 2 aproximações para a modelação: a aproximação local e a aproximação contínua (**Figura 43**) [41].

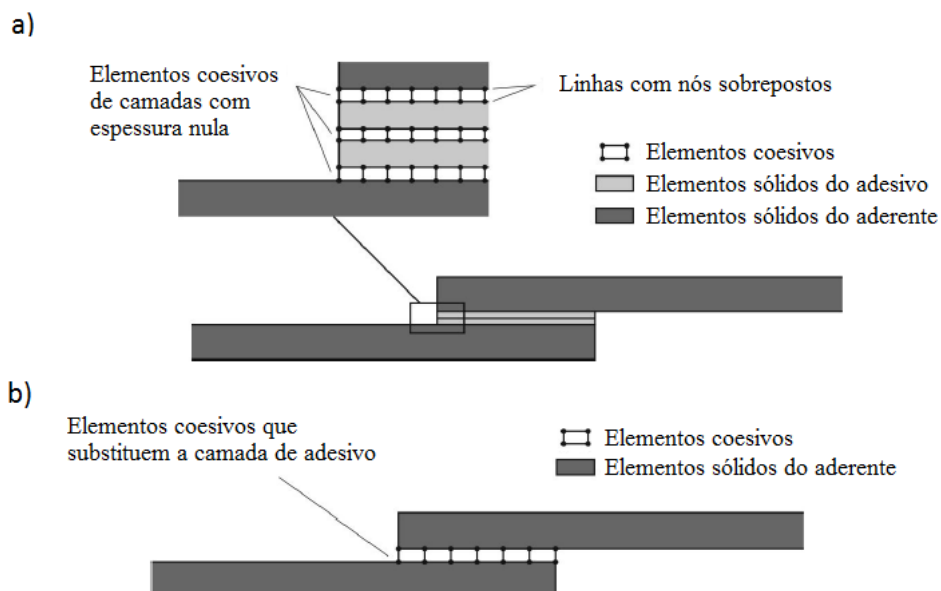


Figura 43 – Elementos coesivos para simular uma espessura nula de material – a) aproximação local; elementos coesivos para modelar uma espessura finita de material entre dois aderentes – b) aproximação contínua [41].

Na **aproximação local (Figura 43 a)** as leis coesivas são usadas para ligar nós de elementos sólidos sobrepostos que representam diferentes materiais ou diferentes camadas de compósitos, de modo a simular uma espessura nula, como é o caso das interfaces [64]. Com esta metodologia, as dissipações plásticas de uma ligação adesiva são simuladas com EF sólidos, enquanto o uso de elementos coesivos é restrito à simulação do crescimento do dano. As leis do MDC normalmente apresentam uma rigidez inicial extremamente elevada (método da função da penalidade), para não alterar a rigidez global da estrutura. Segundo Campilho et al. [65], o uso de elementos coesivos em diferentes planos de crescimento de dano, em diferentes planos da espessura do adesivo permite a obtenção dos respectivos gradientes de concentração de tensões para as regiões a analisar.

Na simulação de juntas coladas, o adesivo é modelado como uma camada elasto-plástica contínua por elementos sólidos, ao passo que a sua energia de fratura intrínseca é considerada nas leis do MDC no lugar de G_c , correspondendo à energia dissipada requerida para a formação de uma nova superfície, enquanto as dissipações plásticas dos materiais dúcteis ocorrem nos elementos sólidos que representam a ligação adesiva [66]. Portanto o G_c é a soma destas duas componentes energéticas, que inclui as dissipações plásticas dos materiais nos modelos. Sob estas premissas, a propagação do dano é governada pelo trabalho de separação das superfícies de fratura em vez de G_c , devido à energia dissipada pelos elementos contínuos. Segundo Ji et al. [67] os efeitos das restrições internas e externas nas dissipações plásticas de uma ligação adesiva são também contabilizadas nesta abordagem local [41]. Por outro lado, comparativamente à aproximação contínua, são necessários mais parâmetros e trabalho computacional.

Na **aproximação contínua (Figura 43 b)** as leis são aplicadas diretamente entre dois materiais (diferentes ou não) que não se contactam, de modo a simular a existência de um outro material entre eles com uma espessura finita, como é o caso de uma camada de adesivo [68]. No caso da simulação do comportamento de ligações adesivas, toda a ligação adesiva é representada por uma linha de elementos coesivos (**Figura 43 b**) que assumem a representação do comportamento da ligação. A rigidez inicial dos elementos coesivos, ao contrário do que acontece na aproximação local, representa a rigidez da ligação adesiva em cada modo de carregamento. Neste caso, apenas se considera uma camada de elementos coesivos entre os aderentes a ligar. Este método tem sido bastante usado na simulação da propagação do dano em juntas coladas, dada a sua simplicidade, mas também porque permite obter resultados precisos desde que as leis coesivas tenham sido obtidas em condições idênticas às juntas em que vão ser aplicadas [69]. Apesar da sua eficácia e simplicidade, este método também apresenta algumas limitações, nomeadamente [41, 67]:

- a) A significância do processo de fratura é de certa forma desvanecida com esta aproximação, pois as separações coesivas reais são acompanhadas com comportamentos plásticos

localizados ao longo das camadas adesivas, mesmo em adesivos frágeis, representados por este método com propriedades médias equivalentes;

- b) Os MDC tornam-se dependentes da geometria da estrutura, nomeadamente da espessura de adesivo e do substrato, dado que estes parâmetros afetam a extensão da ZPF bem como a zona da plastificação em torno da ponta da fenda, tornando as leis do MDC dependentes destes parâmetros.

Os MDC têm sido bastante usados recentemente na simulação do comportamento de estruturas até à rotura, pois permitem incluir nos modelos numéricos a possibilidade de rotura múltipla, em diferentes regiões dos materiais ou entre interfaces, como é o caso das interfaces nas ligações adesivas. A grande desvantagem dos MDC é a necessidade de colocação dos elementos coesivos nos potenciais planos de rotura. No entanto, em juntas adesivas a rotura encontra-se restrita a poucos planos possíveis de propagação de dano, o que torna o método adequado para juntas adesivas.

Existem várias formas para as leis coesivas que têm sido apresentadas na literatura, dependendo da natureza do material ou da interface a ser simulada. Dentro das formas mais comuns destacam-se a triangular, exponencial e a trapezoidal, representadas na **Figura 44**, e que são usadas para prever a resistência de determinados materiais [41].

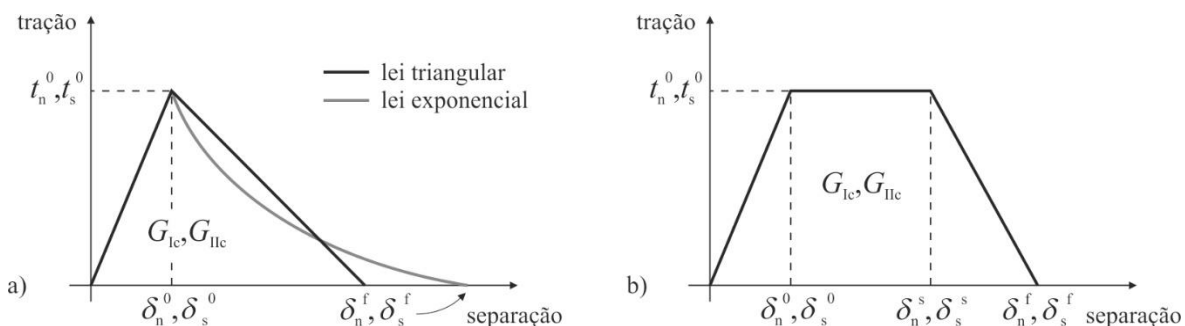


Figura 44 – Diferentes formatos das leis coesivas para modos puros de carregamento: a) lei triangular e exponencial, e b) lei trapezoidal [41].

Os valores de $\delta_n^s, \delta_s^s, \delta_n^f$ e δ_s^f são respetivamente o deslocamento de início de amaciamento de tensões à tração, ao corte, o deslocamento de rotura à tração na extremidade da fenda e ao corte na extremidade da fenda.

2.4.1 Métodos para a obtenção das leis coesivas

A análise por MDC é uma ferramenta bastante poderosa para juntas a adesivas, pois permite explicar o comportamento à fratura em grande parte não linear das juntas adesivas, apesar de ser

necessário efetuar uma calibração cuidadosa dos parâmetros do MDC através de dados experimentais e sua respectiva validação de modo a simular com precisão o processo de fratura [70]. Até ao momento, foram publicados diversos trabalhos [41, 67, 71] sobre a definição dos parâmetros do MDC (G_{Ic} ; G_{IIc} ; t_n^0 e t_s^0). Existem três métodos diferentes para obtenção das leis coesivas. São eles o método de determinação individual das propriedades, o método direto e o inverso, que apresentam diferentes graus de complexidade e precisão de resultados. Estes trabalhos validaram em ensaios de modo misto os MDC obtidos com experiências realizadas recorrendo a provetes DCB, ENF ou JSS, com bons resultados [71].

2.4.1.1 Método de determinação individual das propriedades coesivas

O método de determinação individual das propriedades coesivas consiste na definição isolada de todos os parâmetros das leis coesivas através de testes apropriados. No entanto, esta metodologia não é a mais apropriada para juntas adesivas devido às diferenças de propriedades dos adesivos em camada fina e em maciço [72]. Tal acontece devido ao efeito de restrição às deformações por parte dos aderentes nas juntas coladas e também pela propagação de dano em modo misto. Segundo Chai [73], em adesivo maciço, a fenda tende a propagar-se perpendicularmente à direção da tensão máxima aplicada. Em ligações adesivas de baixa espessura a propagação da fenda segue normalmente o caminho da própria ligação, desde que o adesivo seja menos resistente do que os restantes componentes da junta, o que neste caso se traduz numa rotura coesiva do adesivo [41].

Por este método, existe pelo menos um dos parâmetros da lei coesiva que é caracterizado por provetes de adesivo maciço. Vários autores utilizaram este método para previsão de resistência de juntas adesivas. Campilho et al. [74] realizaram um trabalho que permitiu avaliar a resistência de uma reparação efetuada em material compósito (laminado) em configuração de junta de tira simples, em função de L_0 e da espessura do remendo. Foi feita uma análise de EF com uma lei coesiva trapezoidal de modo a simular uma camada fina do adesivo Araldite® 420 pela aproximação contínua. Neste trabalho, t_n^0 e δ_n^s foram obtidos a partir da curva σ - ε (tensão-deformação) do adesivo, suportados por evidências prévias de Andersson e Stigh [75] de que t_n^0 é da mesma ordem da grandeza da resistência máxima à tração medida em ensaio de adesivo maciço e de que δ_n^0 e δ_n^s não têm uma influência significativa nos resultados numéricos. Por outro lado, t_s^0 foi obtido a partir de t_n^0 pelo critério de Von Mises para materiais isotrópicos maciços. Já o valor de δ_n^f , devido à menor influência sobre os resultados, foi definido considerando uma inclinação similar da curva da lei coesiva à tração. Os valores de G_{Ic} e de G_{IIc} foram estimados a partir dos ensaios DCB e ENF, respetivamente. As propriedades de rotura interlaminares, intralaminares e da fibra do compósito foram obtidas a partir de outros trabalhos prévios [76, 77], considerando as leis coesivas triangulares. Foram equacionados diferentes caminhos para a fratura (**Figura 45**), de modo a

considerar a possível ocorrência de diferentes modos de falha. Neste trabalho chegou-se a um resultado razoável para a rigidez e carga de rotura, apesar das aproximações supramencionadas efetuadas aos parâmetros [41].

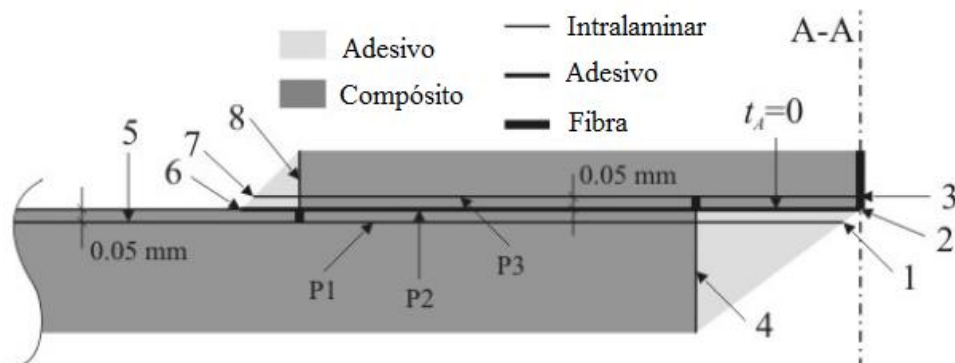


Figura 45 – Localização de elementos coesivos na zona reparada do compósito (JSS) [41].

No entanto, para avaliar o efeito das aproximações efetuadas, foi efetuada uma análise mais cuidadosa, demonstrando que os valores de δ_n^s e δ_s^s das leis coesivas da ligação adesiva não alteram o modo de rotura da junta, nem afetam a carga de rotura. Nas roturas representadas pelas linhas 1 e 3 (roturas interlaminares), os parâmetros coesivos de corte interlaminar mostraram maior influência na resistência da junta do que os parâmetros coesivos de tração [41].

2.4.1.2 Método inverso

O método inverso consiste num procedimento de ajuste iterativo entre dados experimentais obtidos e a respetiva previsão feita por EF, considerando modelos numéricos com uma representação fiel dos provetes testados e leis coesivas aproximadas que são baseadas no comportamento típico do material a simular. A caracterização inversa de juntas adesivas deve de ser aplicada individualmente a cada provete testado de modo a que sejam consideradas as variações de geometria entre provetes [69]. Através desta técnica, os valores G_{Ic} e G_{IIc} , que correspondem aos valores estacionários de G_I e de G_{II} durante a propagação da fenda nas suas respetivas curvas R (G_I ou G_{II} em função de a), são construídos a partir dos dados de ensaio da caracterização à fratura, e inseridos no modelo de EF. Segundo Campilho [78], para definir completamente uma lei coesiva, usam-se valores aproximados para t_n^0 e t_s^0 (Figura 44), para o início do processo iterativo de ajuste. Os parâmetros finais para cada provete são obtidos com iterações numéricas até se atingir uma previsão o mais próxima possível dos valores experimentais. Alguns exemplos de dados experimentais fiáveis para usar no processo iterativo são a curva R [79], o perfil de abertura de fenda [80] e o mais comum a curva $P-\delta$ [81].

2.4.1.3 Método direto

Por este método, é possível estimar a lei coesiva completa para um determinado material ou interface através da diferenciação da curva G_I – deslocamento atual à tração na extremidade da fenda (δ_n) ou G_{II} – deslocamento atual em corte na extremidade da fenda (δ_s), consoante o ensaio. De tal modo, é feita a distinção entre a estimação da lei coesiva em tração (ensaio DCB) ou em corte (ensaio ENF) [41]. Para cada um dos ensaios o método direto consiste na aplicação do integral- J , já referido nos capítulos 2.2.1.1 e 2.2.2.1., e na determinação da respetiva lei coesiva.

Para o ensaio DCB, a partir das equações (15) e (16), o integral- J pode ser calculado ao longo de um caminho arbitrário que circunda o início da camada adesivo dando:

$$G_I = \int_0^{\delta_n^f} t_n(\delta_n) d\delta_n, \quad (31)$$

em que t_n é a tensão coesiva normal. G_{Ic} pode ser um valor de G_I se considerado o início de propagação da fenda [37]. De tal modo, G_{Ic} é dado pelo valor de patamar de G_I , correspondente a um valor de δ_n^f [70]. A curva $t_n(\delta_n)$ é obtida por diferenciação da equação (15) ou (16) em ordem a δ_n [37], resultando em

$$t_n(\delta_n) = \frac{\partial G_I}{\partial \delta_n}. \quad (32)$$

Assim o procedimento impõe a medição dos valores de P , a , δ_n e θ_0 . A lei coesiva à tração pode ser estimada através da representação gráfica de G_I obtida das equações (15) ou (16) em função de δ_n , com ajuste polinomial da curva e respetiva diferenciação [82].

Como resultado de um trabalho realizado por Campilho et al. [37], que consistiu na aplicação do método direto para determinar G_c das ligações adesivas em substratos DCB (compósito) e as respetivas leis coesivas, a **Figura 46** representa graficamente a evolução de G_I com δ_n , e a curva ajustada à referida lei através de um polinómio de 6º grau para um determinado provete. No início do ensaio G_I aumenta lentamente com os valores de δ_n , de seguida ocorre um aumento repentino dos valores de G_I de $0,02 \leq \delta_n \leq 0,04$ mm. Por fim G_I atinge um valor estacionário para $\delta_n \approx 0,09$ mm. Para este provete, o valor obtido de G_{Ic} foi de 1,429 N/mm. Para os seis substratos ensaiados, os dados obtidos permitiram chegar a um valor médio e desvio padrão de $G_{Ic} = 1,182 \pm 0,215$ N/mm.

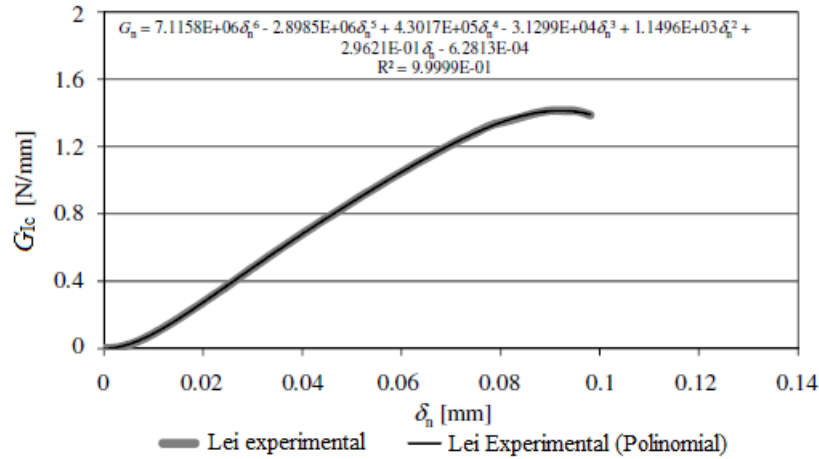


Figura 46 – Lei experimental ($G_I-\delta_n$) com ajuste polinomial de 6º grau obtida para o adesivo SikaForce® 7888 em substratos DCB de material compósito (juta/epóxico) [37].

A **Figura 47** representa a lei coesiva experimental obtida para um provete (curva $t_n-\delta_n$), que permite constatar a ductilidade do adesivo depois de atingido o valor de pico de t_n . Para o provete testado, chegaram-se aos seguintes valores $t_n^0=20,73$ MPa e $\delta_n^f=0,0935$ mm. Para os seis provetes testados, foram obtidos os seguintes valores médios: $t_n^0=23,18\pm 3,57$ MPa e $\delta_n^f=0,0843\pm 0,156$ mm. Também se encontram representadas na mesma figura leis coesivas simplificadas triangulares e trapezoidais, permitindo concluir que, para o adesivo SikaForce® 7888, a lei trapezoidal ajusta-se melhor à lei experimental, uma vez que esta contabiliza melhor a ductilidade do adesivo.

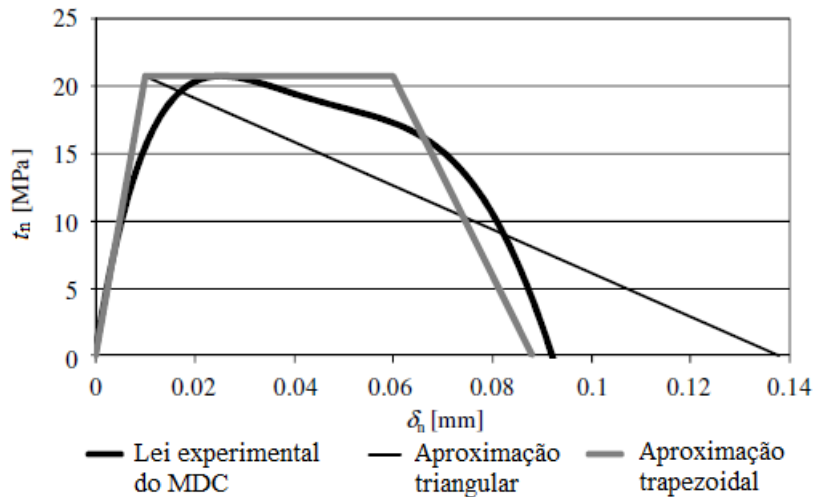


Figura 47 – Lei coesiva experimental ($t_n-\delta_n$) para o adesivo SikaForce® 7888 em substratos DCB de material compósito (juta/epóxico) [37].

Para o ensaio ENF o método direto baseia-se na medição simultânea do integral- J e de δ_s . É sabido que o integral- J é adequado para o comportamento elástico não linear de materiais, mas também é aplicável a cargas lineares monotónicas, como é o caso do ensaio ENF [41].

À semelhança do ensaio realizado em modo I em provetes DCB, neste ensaio (modo II) e no seguimento da equação (28) a avaliação do integral- J também pode ser feita por um caminho arbitrário exterior à ZPF e que permite o cálculo de G_{II} da seguinte forma

$$G_{II} = \int_0^{\delta_{sc}} t_s(\delta_s) d\delta_s, \quad (33)$$

em que δ_{sc} e δ_s são respetivamente o deslocamento de rotura ao corte na extremidade da fenda e o deslocamento atual em corte na extremidade da fenda e t_s é a tensão coesiva ao corte. A equação (33) fornece uma relação direta entre o estado de tensão na ponta da fenda e G_{II} . A evolução de G_{II} em função de δ_s ocorre com G_{II} a aumentar até atingir um valor estacionário, correspondente a G_{IIc} . Neste ponto, a fenda começa a propagar-se e G_{IIc} é obtido por um valor de estado estacionário de G_{II} no gráfico $G_{II}-\delta_s$. Simultaneamente a tensão coesiva atinge o valor nulo e ocorre a formação da fenda [41, 43]. O gráfico $t_s(\delta_s)$ corresponde à lei coesiva em corte da camada de adesivo. Esta é obtida através do ajuste polinomial da curva $G_{II}-\delta_s$ e respetiva diferenciação em ordem a δ_s [42]. Portanto, através da diferenciação da equação (33) obtém-se

$$t_s(\delta_s) = \frac{\partial G_{II}}{\partial \delta_s}. \quad (34)$$

A diferenciação pode ser obtida por funções polinomiais ou pela adaptação do método dos mínimos quadrados às séries de dados de G_{II} , em que este último método é recomendado quando com expressões polinomiais não se conseguem boas aproximações aos dados experimentais [70]. É ainda de referir que este ensaio realizado em provetes ENF apresenta alguns problemas, nomeadamente a compressão e fricção que podem ocorrer entre as faces da fenda e que pode comprometer a precisão da lei coesiva em corte. Para reduzir os problemas de fricção, pode ser usado um fio de aço (por exemplo) como espaçador, ou alternativamente pode-se realizar o ensaio *Notched plate shear method* (ARCAN) em detrimento do ensaio ENF de modo a obter a lei coesiva em corte das camadas de adesivo [41, 43].

3 Trabalho Experimental

Este capítulo aborda a componente experimental da presente dissertação. Neste faz-se uma descrição generalizada dos materiais envolvidos nos ensaios DCB, ENF, JSS e JSD, ao nível dos substratos e adesivos, e também se detalham as etapas do processo de fabrico de cada um dos provetes. Neste último ponto também se especificam as dimensões e geometrias dos provetes. De seguida faz-se uma descrição dos ensaios realizados, DCB, ENF, JSS e JSD, cada um deles com o conjunto de adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. Os ensaios de JSS e JSD são abordados de forma simultânea dada a similaridade das condições de ensaio. Por último segue-se a descrição e análise dos dados obtidos de cada um dos referidos ensaios. Refere-se que alguns resultados dizem respeito a ensaios realizados em trabalhos anteriores, nomeadamente os ensaios DCB [3-5], ENF [6, 7] e os ensaios de JSS [1] e JSD [2] com o Araldite® AV138 e Araldite® 2015. As JSS e JSD com o SikaForce® 7752 foram fabricadas e ensaiadas no âmbito do presente trabalho.

3.1 Materiais utilizados

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

3.1.1 Substratos

O material usado como substrato em todas as juntas consiste na liga de alumínio AL6082-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 [83], 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 à tração de 261,67±7,65 MPa e deformação de rotura à tração 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 [83], e encontram-se representadas na **Figura 48**. Também está representada a aproximação numérica usada nos MDC.

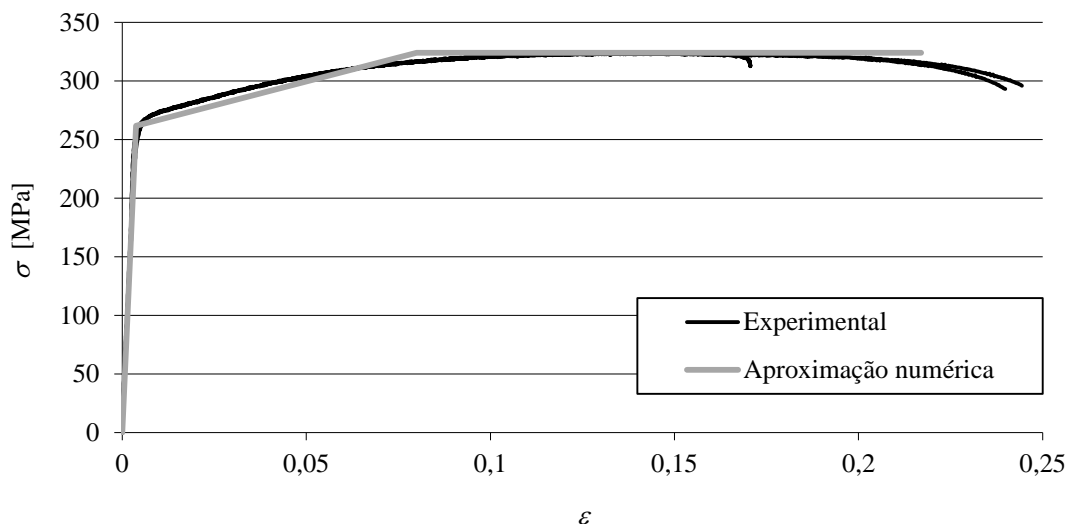


Figura 48 – Curvas tensão-deformação (σ - ε) da liga de alumínio AL6082-T651 [83].

3.1.2 Adesivos

Neste tópico descrevem-se os adesivos usados no trabalho experimental e suas propriedades. Nos ensaios efetuados usaram-se três tipos de adesivos: o Araldite[®] AV138, que se caracteriza por ser um adesivo epóxico frágil, o Araldite[®] 2015, definido como sendo um adesivo epóxico dúctil, e o adesivo Sikaforce[®] 7752, que se caracteriza como um adesivo poliuretano estrutural que combina elevada ductilidade com resistência mecânica moderada.

3.1.2.1 Araldite[®] AV138

O adesivo Araldite[®] AV138 descreve-se como um adesivo epóxico frágil mas de elevada resistência, adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [84]. As curvas σ - ε dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na **Figura 49** [84]. Na **Tabela 2** visualizam-se as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

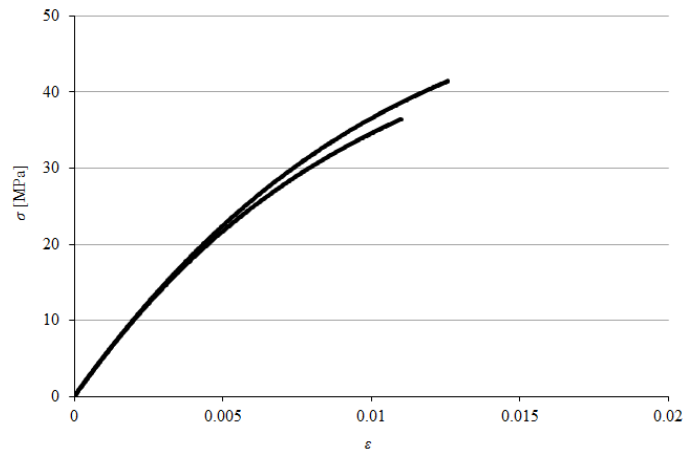


Figura 49 – Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [85].

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [86].

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson, ν	0,35^b
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	1,21±0,10
Módulo de elasticidade ao corte, G_{13} [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	30,2±0,40
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	7,8±0,7
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	0,20^a
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	0,38^a
^a valores estimados na referência [87].	
^b valor do fabricante.	

3.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 define-se como um adesivo epóxico estrutural de duas partes, de ductilidade moderada e que, comparando com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração, tipicamente nas extremidades das juntas, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes [84].

Na **Figura 50** apresentam-se as curvas σ - ϵ dos provetes maciços para este adesivo [85]. Na **Tabela 3** estão apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo. Comparando os valores deste adesivo com o 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 da do Araldite® 2015.

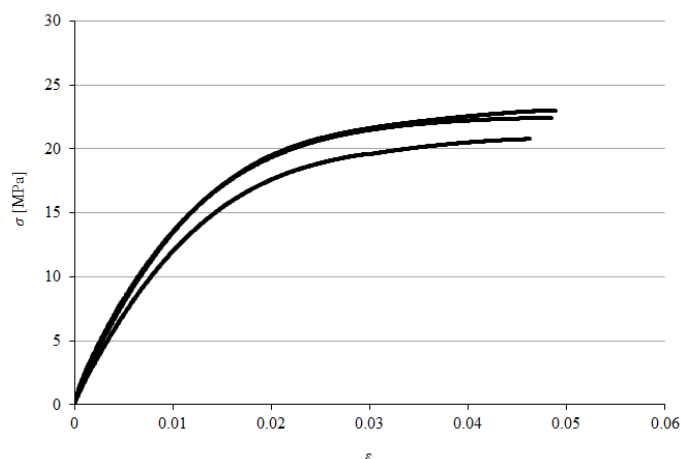


Figura 50 – Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [85].

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [84].

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	1,85±0,21
Coefficiente de Poisson, ν	0,33^a
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	12,63±0,61
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	21,63±1,61
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	4,77±0,15
Módulo de elasticidade ao corte, G_{13} [GPa]	0,56±0,21
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	14,6±1,3
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	17,9±1,8
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	43,9±3,4
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	0,43±0,02
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	4,70±0,34
^a valor do fabricante.	

3.1.2.3 Sikaforce® 7752 FRW L60

O adesivo Sikaforce® 7752 é um adesivo dúctil, conforme se pode observar na curva σ - ϵ da **Figura 51** [88]. Comparativamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, o SikaForce® 7752 é

o que apresenta a menor resistência ao corte e tração dos três adesivos, no entanto é o mais dúctil do conjunto. 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. Na **Tabela 4** apresentam-se as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo [88].

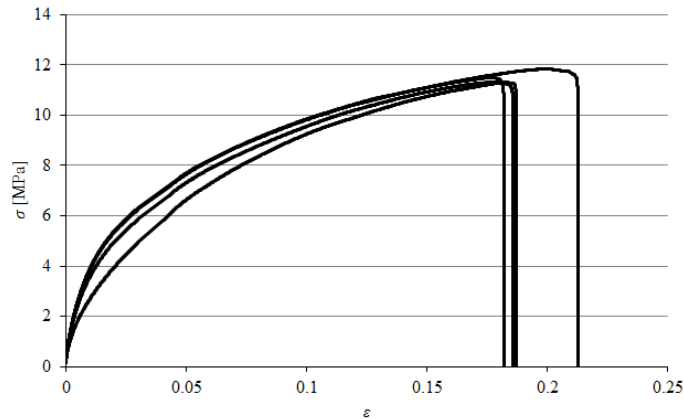


Figura 51 – Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Sikaforce® 7752 [88].

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce® 7752 [88].

Propriedades	Sikaforce® 7752 L60
Módulo de Young, E [GPa]	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 elasticidade ao corte, G_{13} [GPa]	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
^a valor do 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 [89].

3.2 Fabrico dos provetes

3.2.1 Provetes DCB, ENF, JSS e JSD

Para a realização dos ensaios em modo I foram fabricados 18 provetes DCB, 6 por cada tipo de adesivo. A **Figura 52** mostra a geometria dos provetes e respectivas dimensões.

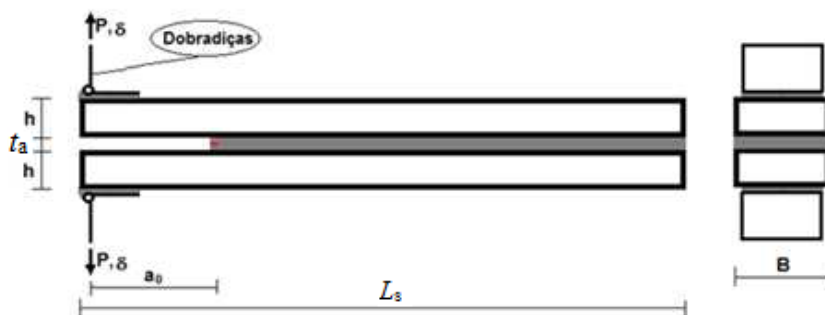


Figura 52 – Representação esquemática dos provetes DCB [3].

A seguinte tabela indica as dimensões dos provetes DCB fabricados.

Tabela 5 – Dimensões teóricas dos provetes DCB (mm).

Comprimento do substrato (L_s)	143
B	27
Espessura do substrato (h)	3
Espessura do adesivo (t_a)	0,2
a_0	≈ 55

Todos os provetes foram fabricados a partir de chapa de 3 mm de espessura. 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 (**Figura 52**) [3].

Para a realização dos ensaios em modo II foram fabricados 24 provetes ENF segundo a geometria da **Figura 53** (8 provetes para cada adesivo). Os substratos utilizados nos 24 provetes foram obtidos também a partir de chapa de 3 mm de espessura, adquirida em tiras de 25 ± 1 mm de largura [6].

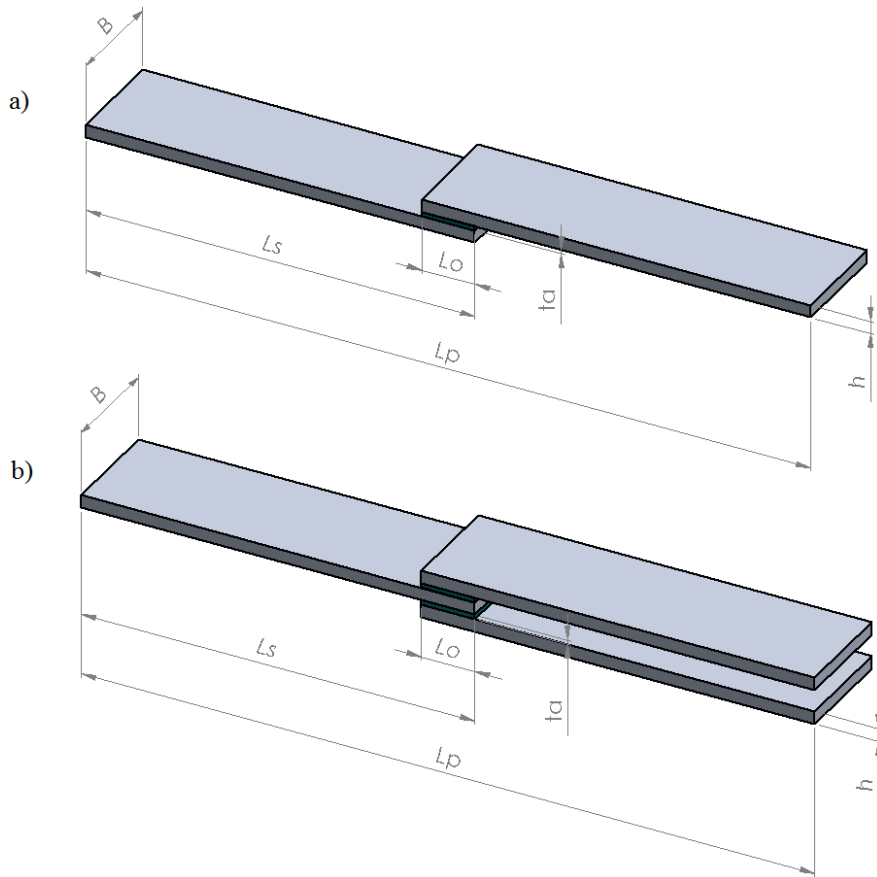


Figura 54 – Geometria das juntas: a) JSS b) JSD.

Na **Figura 54**, L_p e L_s são respectivamente o comprimento do provete/junta e o comprimento do substrato. Os substratos foram fabricados considerando as dimensões apresentadas na **Tabela 7**.

Tabela 7 – Dimensões teóricas das JSS e JSD (mm).

L_p	220
L_s	140
L_o	12,5/25/37,5/50
B	25
H	3
t_a	0,2

Todos os substratos dos quatro tipos de juntas (DCB, ENF, JSS e JSD) foram obtidos por corte realizado numa máquina de disco existente nas Oficinas Mecânicas do ISEP (**Figura 55**), a partir de tiras já fornecidas com o valor de B desejado.



Figura 55 – Corte por disco de chapa de alumínio.

- Preparação da superfície

Após a realização do corte efetuou-se uma decapagem mecânica nos substratos dos provetes DCB e ENF, numa granalhadora Cidblast RT6S (**Figura 56**), 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 [3, 10].



Figura 56 – Granalhadora Cidblast RT6S.

Já nos substratos para os provetes das JSS e JSD foi utilizado um processo passivo mecânico alternativo, nomeadamente abrasão com lixa de água nas extremidades dos substratos a serem

colados (**Figura 57**), por indisponibilidade da granalhadora. Nas JSS, ambos os substratos foram lixados apenas numa das faces, nomeadamente aquela em que o adesivo será aplicado. No caso das JSD, os dois substratos exteriores da junta também foram sujeitos a este processo apenas numa das faces, à semelhança das JSS. Por outro lado, o substrato interior foi lixado em ambas as faces da extremidade a contactar com o adesivo. A realização deste processo visa essencialmente aumentar a rugosidade superficial, a área de contacto e consequentemente garantir uma boa adesão entre substrato e adesivo.

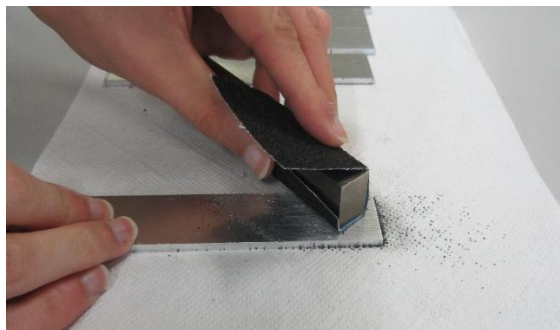


Figura 57 – Abrasão com lixa de água dos substratos para as JSS e JSD.

Após a realização dos processos passivos mecânicos mencionados, 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, quer da lixa, quer 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 abrasados, até a sujidade do papel e substrato desaparecerem [3, 10]. O resultado final encontra-se representado na **Figura 58**.

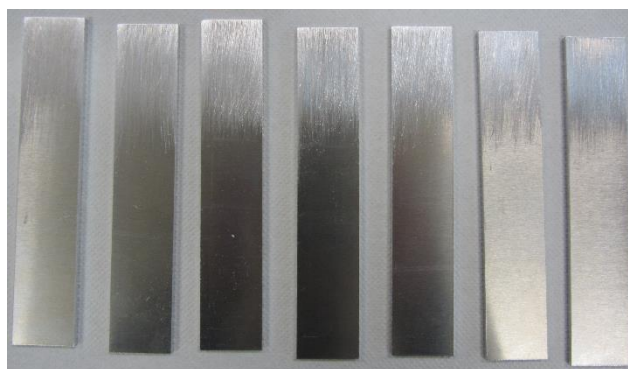


Figura 58 – Substratos após desgorduramento com acetona.

- Colocação de espaçadores e calços

Nos provetes DCB e ENF os espaçadores foram colocados segundo o esquema da **Figura 59**.

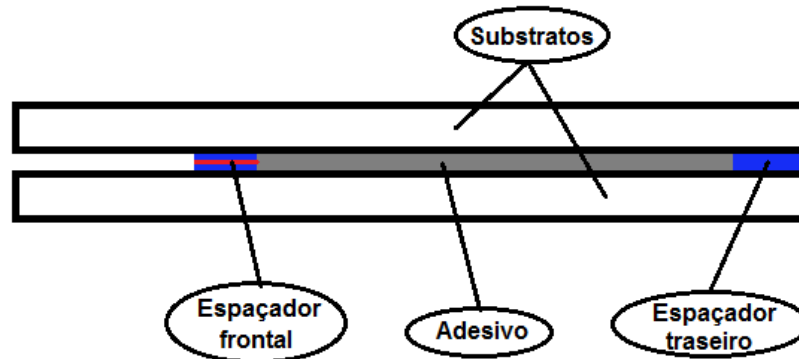


Figura 59 – Esquema de colocação de espaçadores para provetes DCB e ENF [3].

Os espaçadores são utilizados para garantir um valor constante de t_a e também para promover a criação da pré-fenda. Já os calços nas JSS e JSD servem para garantir o alinhamento da solicitação imposta aos provetes. Assim, 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 (**Figura 60**), utilizou-se o método proposto por Lee et al. [90], que consiste no fabrico do espaçador utilizando uma lâmina de barbear com 0,1 mm de espessura interposta entre 2 fitas de aço calibradas com 0,05 mm espessura cada, deixando o gume da lâmina de barbear ligeiramente adianta em relação às duas fitas para a criação da pré-fenda, tal como ilustrado na **Figura 60** [3].



Figura 60 – Espaçador frontal para a criação da pré-fenda (provetes ENF) [6].

A colocação de calços nas JSS e JSD foi realizada de acordo com o esquema da **Figura 61**.

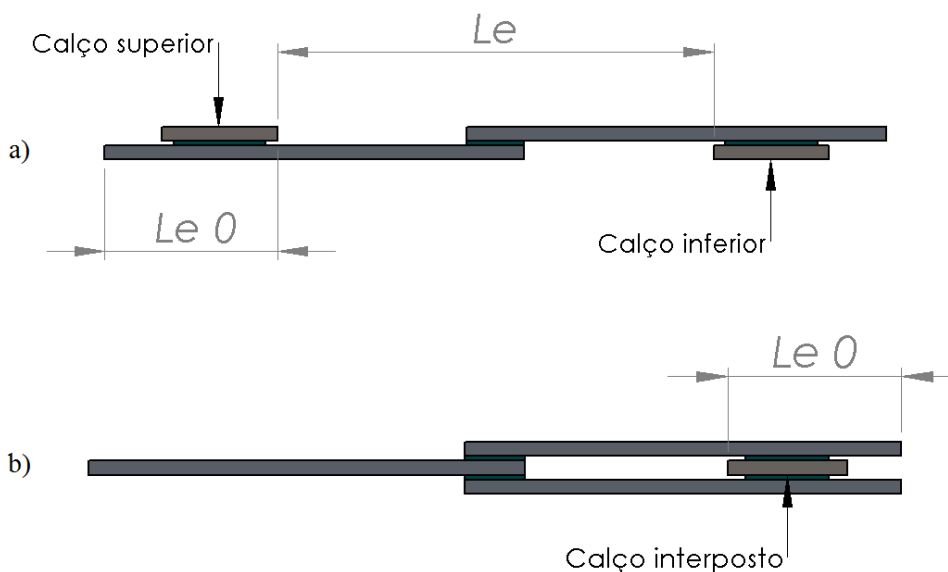


Figura 61 – Esquema de colocação de calços nas a) JSS e b) JSD.

Para as JSS foram utilizados 2 calços, ao passo que nas JSD apenas foi necessário um calço. Os calços utilizados em ambas as juntas apresentam 3 mm de espessura. Para garantir o valor de $t_a=0,2$ mm, foram utilizados adicionalmente 2 fios de pesca por cada local de aplicação de adesivo (incluindo calços). A distância entre amarras em ambas as juntas foi de 170 mm. De notar que nas JSS, para que a distância entre espaçadores (L_e) fosse constante (170 mm), correspondente também ao valor entre amarras em ambas as juntas, a distância dos espaçadores relativamente à extremidade dos substratos (L_e^0) teve de ser ajustada consoante o valor de L_0 (**Tabela 8**).

Tabela 8 – Valores de L_e^0 em função L_0 .

L_0 (mm)	L_e^0 (mm)
12,5	50
25	43,75
37,5	37,5
50	31,25

- Preparação e deposição dos adesivos

A preparação dos 3 adesivos usados não é feita da mesma forma. Deste modo, para o Araldite® 2015 é introduzido um cartucho bi-componente 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 linhas transversais ao provete de modo a preencher quase a totalidade da área a colar (**Figura 62**) [6].



Figura 62 – Aplicação do adesivo Araldite® 2015 em provetes ENF [6].

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 na razão de 5:1 no caso do adesivo SikaForce® 7752, homogeneizando-se a mistura no final com uma espátula (**Figura 63**). 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 quando pressionado, de modo a evitar vazios ou porosidades na zona da ligação.



Figura 63 – Pesagem dos componentes e homogeneização da mistura do adesivo Araldite® AV138 [3].

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 o seu desposicionamento e adição de adesivo nas faces dos espaçadores. No espaçador frontal teve de se adicionar adesivo 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.

Já no caso das JSS e JSD, o adesivo foi depositado na zona da sobreposição entre aderentes e entre calços e aderente, e o conjunto foi montado utilizando fios de pesca calibrados nestas zonas de

ligação, a fim de garantir o valor de t_a desejado para a camada adesiva. Este procedimento promove o alinhamento do provete durante a posterior sollicitação.

- Montagem dos provetes

Os substratos dos provetes DCB, ENF, JSS e JSD 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 (**Figura 64** e **Figura 65**).



Figura 64 – Colocação de substratos DCB sobre folha de Teflon® [3].

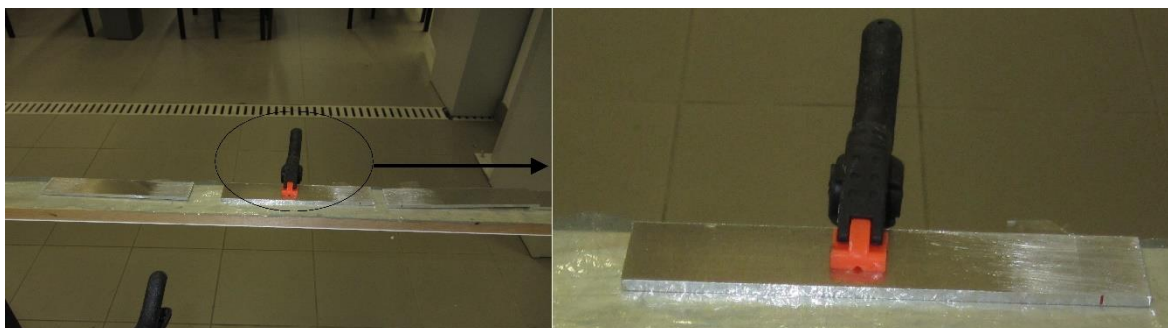


Figura 65 – Colocação de substratos para JSS sobre folha de Teflon®.

Após a aplicação do adesivo, imobilizam-se os provetes 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 66**, **Figura 67** e **Figura 68**). 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, superando assim os tempos recomendados de modo a garantir cura completa dos adesivos.



Figura 66 – Imobilização de provetes DCB com recurso a grampos [3].



Figura 67 – Imobilização de provetes ENF com recurso a grampos [6].



Figura 68 – Imobilização de JSD com recurso a grampos.

- Preparação dos provetes

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 (**Figura 69**). Este procedimento é realizado de

modo 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 adesivos.



Figura 69 – Remoção de excessos de adesivos com mó em JSS.

3.3 Ensaio dos provetes

Todos os provetes foram ensaiados no equipamento de ensaios Shimadzu AG-X, disponível no Laboratório de Ensaio Mecânicos do ISEP, com célula de carga de 100 kN (**Figura 70**). Na **Figura 70** a máquina encontra-se na configuração genérica para realizar ensaios de tração, utilizada nos ensaios de JSS, JSD e provetes DCB. Para os provetes ENF, esta foi adaptada para realizar ensaios de flexão em 3 pontos.



Figura 70 – Equipamento de ensaios Shimadzu AG-X 100, na configuração para ensaios de tração.

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 do punção de solicitação 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 ambientes.

3.3.1 Provetes DCB

Os ensaios destes provetes foram realizados segundo a configuração representada na **Figura 71**.



Figura 71 – Configuração do ensaio dos provetes DCB [3].

Os provetes foram tracionados através das dobradiças colocadas nas extremidades dos substratos (**Figura 52 e Figura 71**) de modo a tornar possível a solicitação. 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 [3]. 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 a . Para este efeito, foram tiradas fotos durante o teste dos provetes com 5 segundos de intervalo [3].

3.3.2 Provetes ENF

Os provetes ENF foram ensaiados à flexão em três pontos, de acordo com a configuração da **Figura 72**.

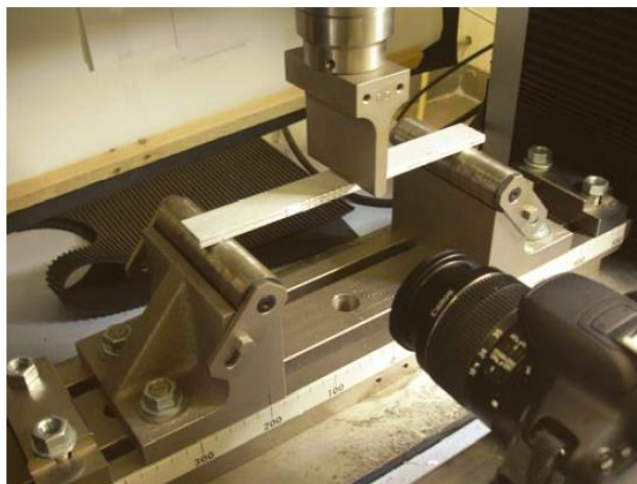


Figura 72 – Configuração do ensaio dos provetes ENF [6].

Como se observa na **Figura 72**, 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 rodam com atrito muito baixo em torno de 2 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 a para construir a curva- R [91].

3.3.3 JSS e JSD

As JSS e JSD foram ensaiadas à tração de acordo com a configuração da **Figura 73**, em condições de temperatura e humidade ambientes, com velocidade de solitação de 0,5 mm/min para as juntas com L_0 de 12,5 mm e 25 mm, e de 1 mm/min para as juntas com L_0 de 37,5 mm e 50 mm. Considerou-se esta diferença para aproximar o tempo total de ensaio de todas as juntas, embora considerando velocidades suficientemente reduzidas e próximas para garantir condições quase estáticas de ensaios e evitar efeitos viscoelásticos.

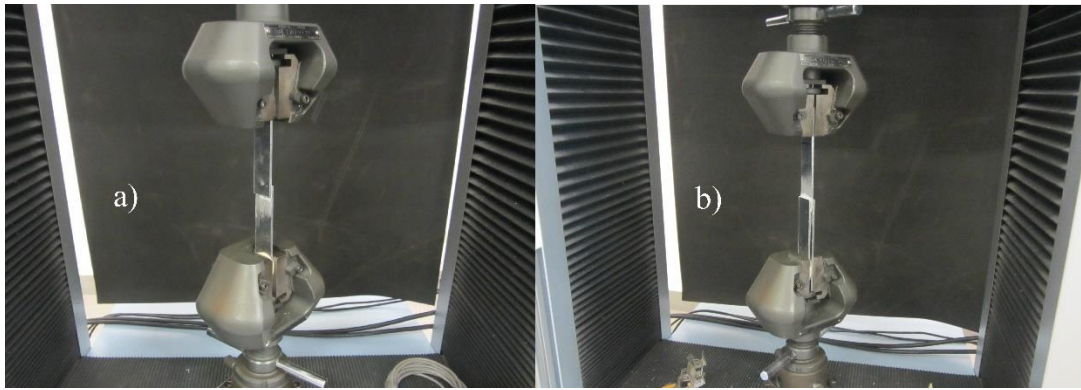


Figura 73 – Ensaio e fixação dos provetes: a) JSS e b) JSD.

Os provetes foram solicitados pelas extremidades dos substratos, com uma distância entre amarras de 170 mm para ambas as juntas. De modo a facilitar a colocação das amarras nos provetes, foi efetuada previamente a marcação dos provetes.

3.4 Resultados obtidos

Neste subcapítulo é feita a descrição das curvas $P-\delta$ obtidas separadamente por tipo de junta, por tipo de adesivo e, no caso das JSS e JSD, por cada valor de L_0 da junta. Segue-se uma breve caracterização dos modos de rotura obtidos para cada tipo de junta, adesivo e valores de L_0 . 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. Por último faz-se a análise dos valores de carga máxima média ($P_{\text{máx méd}}$) e desvios padrão para as JSS e JSD, segundo as condições referidas inicialmente.

3.4.1 Provetes DCB

3.4.1.1 Curvas $P-\delta$ experimentais

Nos ensaios realizados em provetes DCB, ENF, JSS e JSD, 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.

A **Figura 74** representa as curvas P - δ obtidas para todos os provetes DCB ensaiados com o adesivo Araldite® AV138.

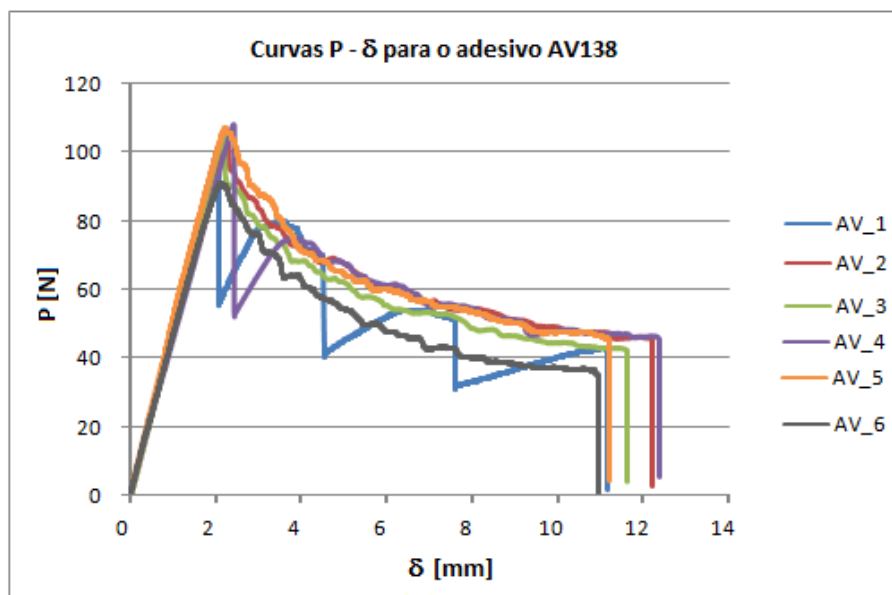


Figura 74 – Curvas P - δ dos ensaios DCB para o adesivo Araldite® AV138 [3].

Pela análise da **Figura 74** observa-se uma repetibilidade razoável entre provetes, com exceção dos provetes 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 [5]. Verifica-se ainda que as curvas P - δ da **Figura 74** apresentam um comportamento que se divide em 2 fases distintas. A primeira corresponde ao regime elástico, onde P aumenta linearmente com δ . A segunda fase corresponde à propagação de fenda, caracterizada por uma diminuição gradual de P até à rotura total do adesivo, momento em que P cai abruptamente.

A **Figura 75** representa as curvas P - δ obtidas para todos os provetes DCB ensaiados com o adesivo Araldite® 2015. Observa-se uma boa repetibilidade de curvas no que diz respeito à rigidez elástica, $P_{\text{máx}}$ e deslocamento máximo ($\delta_{\text{máx}}$) para os primeiros 4 provetes. A exceção verifica-se para os dois últimos provetes, em que o provete A2_5 e A2_6 diferem significativamente dos restantes. O A2_5 difere na carga máxima, enquanto o A2_6 difere na carga máxima e valor de $\delta_{\text{máx}}$ 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.

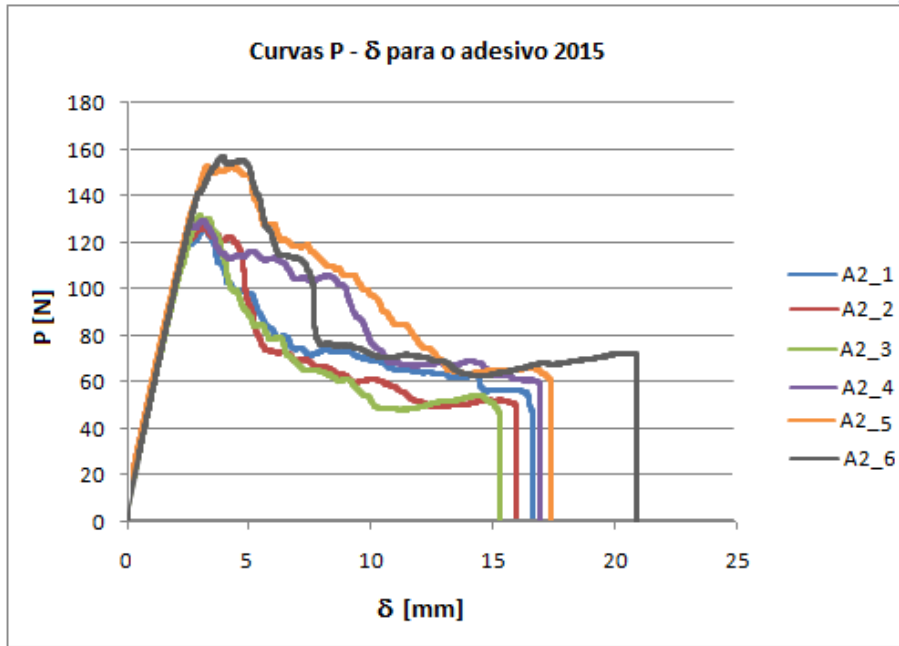


Figura 75 – Curvas P - δ dos ensaios DCB para o adesivo Araldite® 2015 [3].

A **Figura 76** representa as curvas P - δ obtidas para todos os provetes DCB ensaiados com o adesivo SikaForce® 7752.

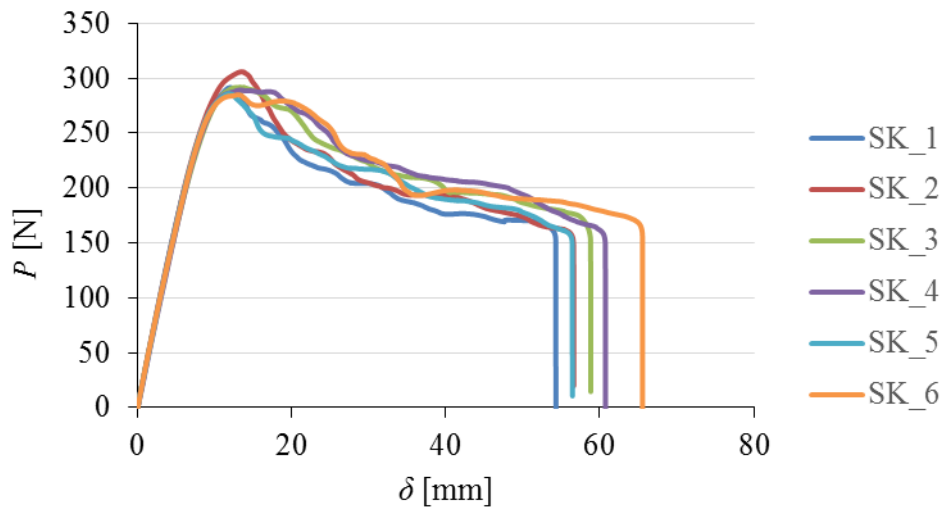


Figura 76 – Curvas P - δ dos ensaios DCB para o adesivo SikaForce® 7752 [91].

Na **Figura 76** observa-se na generalidade uma boa repetibilidade de curvas no que concerne à rigidez elástica, $P_{\text{máx}}$, $\delta_{\text{máx}}$ e comportamento durante a propagação do dano para todos os provetes. Contrariamente aos dois adesivos anteriormente analisados, as curvas P - δ da **Figura 76** apresentam um comportamento que se divide em 3 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 ZPF

e que se caracteriza por uma perda de linearidade das curvas na proximidade de $P_{\text{máx}}$ 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.

3.4.1.2 Modos de Rotura

A **Figura 77** representa os modos de rotura obtidos do ensaio de provetes DCB com o adesivo Araldite® AV138.

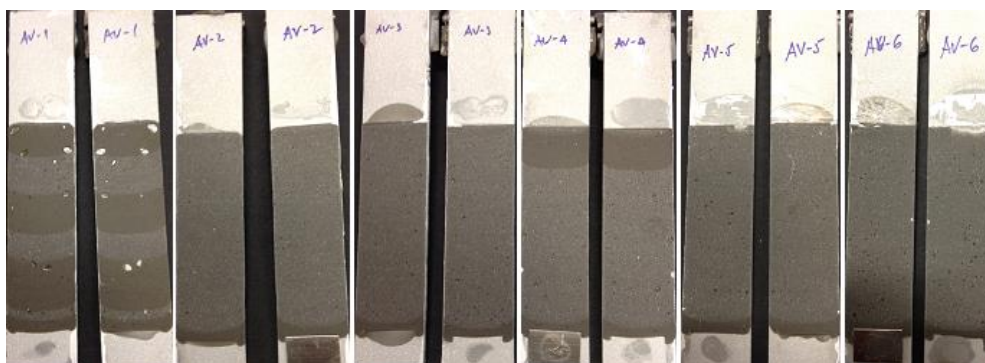


Figura 77 – Modos de rotura em provetes DCB ensaiados com o adesivo Araldite® AV138 [3].

Analisando a **Figura 77** 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 2 tonalidades, uma delas correspondente à rotura estável e a outra à instável, o que pode ser comprovado também nas curvas $P-\delta$ da **Figura 74**. A **Figura 78** demonstra os modos de rotura obtidos do ensaio de provetes DCB com o adesivo Araldite® 2015.

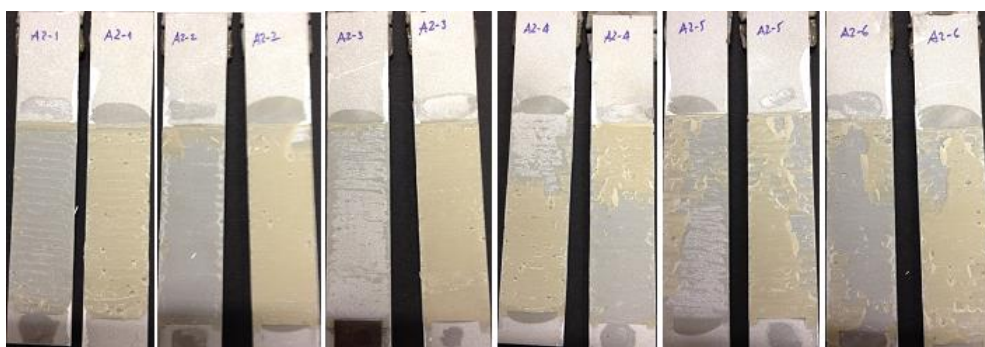


Figura 78 – Modos de rotura em provetes DCB ensaiados com o adesivo Araldite® 2015 [3].

Observa-se que ocorreram roturas coesivas em todos os provetes testados, com adesivo predominantemente num dos substratos dos três primeiros provetes. 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.

A **Figura 79** representa os modos de rotura obtidos do ensaio de provetes DCB com o adesivo SikaForce® 7752.



Figura 79 – Modos de rotura de alguns dos provetes DCB ensaiados com o adesivo SikaForce® 7752 [91].

Analisando a **Figura 79** 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 na referida figura, 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.

3.4.1.3 Determinação de G_{Ic} pelo método direto

O método direto (**subcapítulo 2.4.1.3**) permite determinar a lei coesiva em tração através da diferenciação da curva $G_I-\delta_n$ 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 (15).

A **Figura 80** representa um exemplo de lei experimental $G_I-\delta_n$ obtida para o adesivo Araldite® AV138.

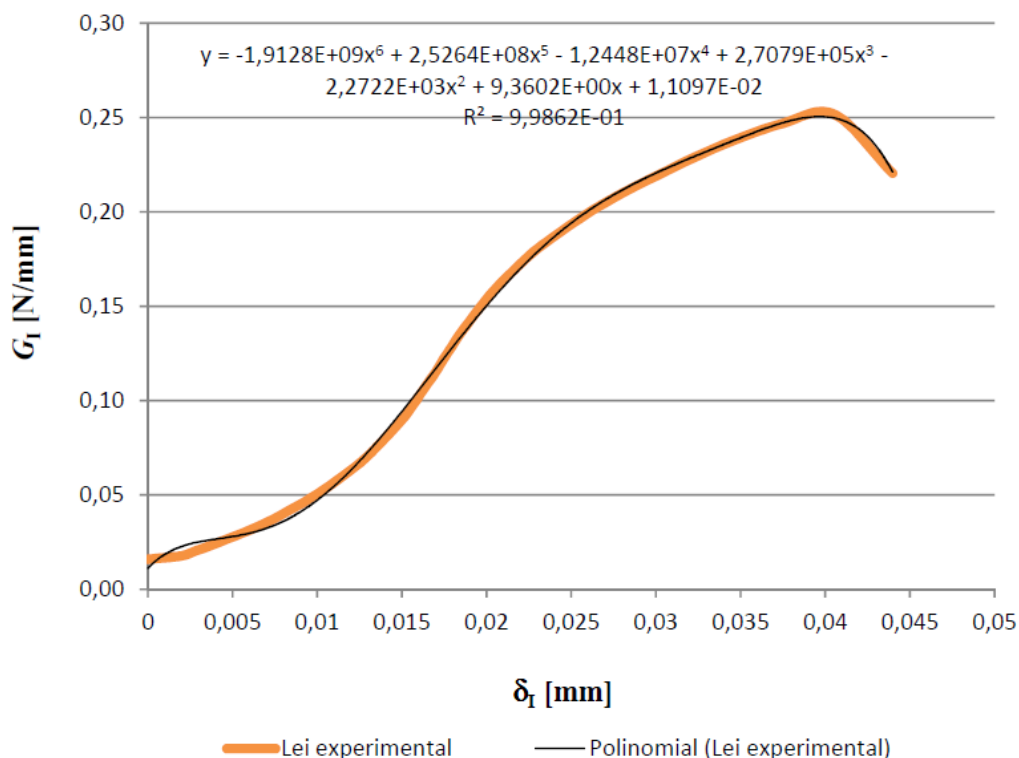


Figura 80 – Lei G_I - δ_n experimental obtida do ensaio de um dos provetes DCB com o adesivo Araldite® AV138 e ajuste polinomial de sexto grau [3].

Analisando a **Figura 80**, 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} [67]. O valor de G_{Ic} obtido para o provete ensaiado foi de 0,252 N/mm para $\delta_n \approx 0,04$ mm. A lei 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.

A **Tabela 9** sumariza os resultados obtidos de G_{Ic} 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 e apresentados na **Tabela 9** resultam num valor médio de $G_{Ic}=0,245$ N/mm, com um desvio padrão de $\pm 0,045$ N/mm e respetivo desvio percentual de 18,4%. No trabalho de da Silva et al. [92], 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 pela diferente geometria dos provetes.

Tabela 9 – Valores de G_{Ic} (N/mm) obtidos pelo Integral- J para o adesivo Araldite® AV138 [3].

Provete	Integral- J
A2_1	0,224
A2_2	0,252
A2_3	0,231
A2_4	0,329
A2_5	0,237
A2_6	0,197
Média	0,245
Desvio Padrão	0,045

A **Figura 81** representa uma lei experimental G_I - δ_n obtida para adesivo Araldite® 2015.

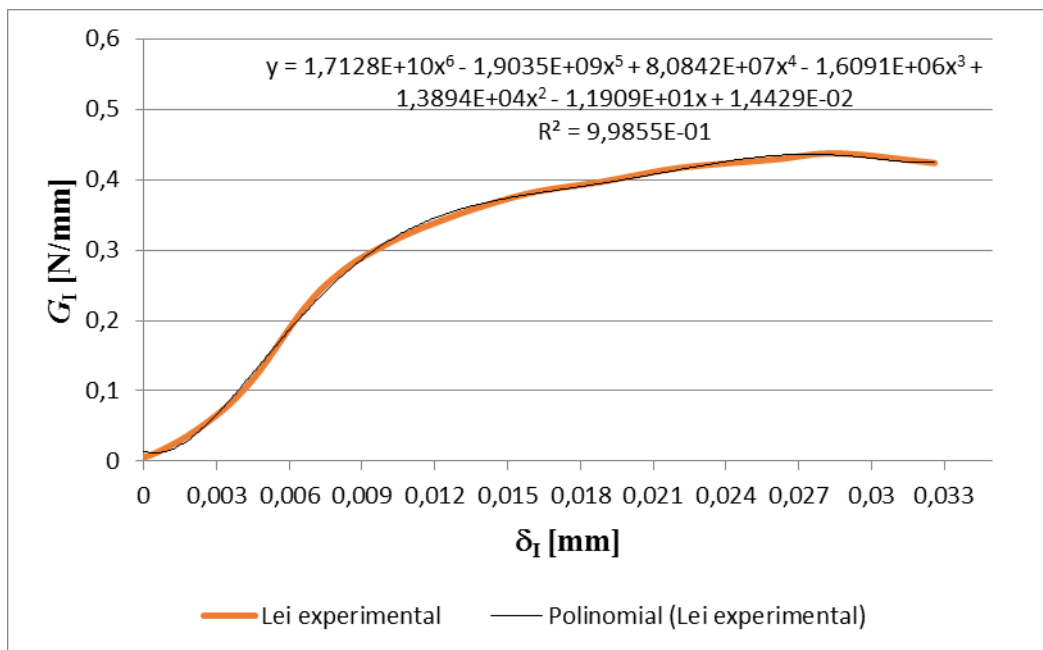


Figura 81 – Lei G_I - δ_n experimental obtida do ensaio de um dos provetes DCB com o adesivo Araldite® 2015 e ajuste polinomial de sexto grau [3].

Na **Figura 81** 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 $\delta_n=0,003$ e $\delta_n=0,009$, 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 lei

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.

A **Tabela 10** sumariza os resultados obtidos de G_{Ic} pelo método Integral- J para o conjunto de provetes ensaiados com o adesivo Araldite® 2015.

Tabela 10 – Valores de G_{Ic} (N/mm) obtidos pelo Integral- J para o adesivo Araldite® 2015 [3].

Proвете	Integral- J
A2_1	0,437
A2_2	0,434
A2_3	0,494
A2_4	0,456
A2_5	0,665
A2_6	0,712
Média	0,533
Desvio Padrão	0,123

Os resultados presentes na **Tabela 10** evidenciam uma razoável coerência de valores de G_{Ic} entre os provetes testados, inferior à registrada 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. [93] realizado em provetes DCB com substratos de compósito unidirecional a 0° de fibra de carbono/epóxico, obteve-se um valor médio de $G_{Ic}=0,43\pm0,2$ N/mm. Já no trabalho de da Silva et al. [92] obteve-se um valor médio de $G_{Ic}=0,5257\pm0,0808$ N/mm. O resultado obtido por Campilho et al. [93] apresenta uma maior discrepância do obtido neste trabalho [3], 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.

Por último, no contexto da determinação de G_{Ic} pelo método direto, a **Figura 82** representa uma lei experimental G_I - δ_n obtida para adesivo 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 na **Figura 80** e **Figura 81**, que correspondem respetivamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Esta diferença deve-se principalmente à maior ductilidade do adesivo SikaForce® 7752 face aos restantes adesivos [91], o que terá implicações na forma da lei coesiva obtida pelo método direto apresentada posteriormente.

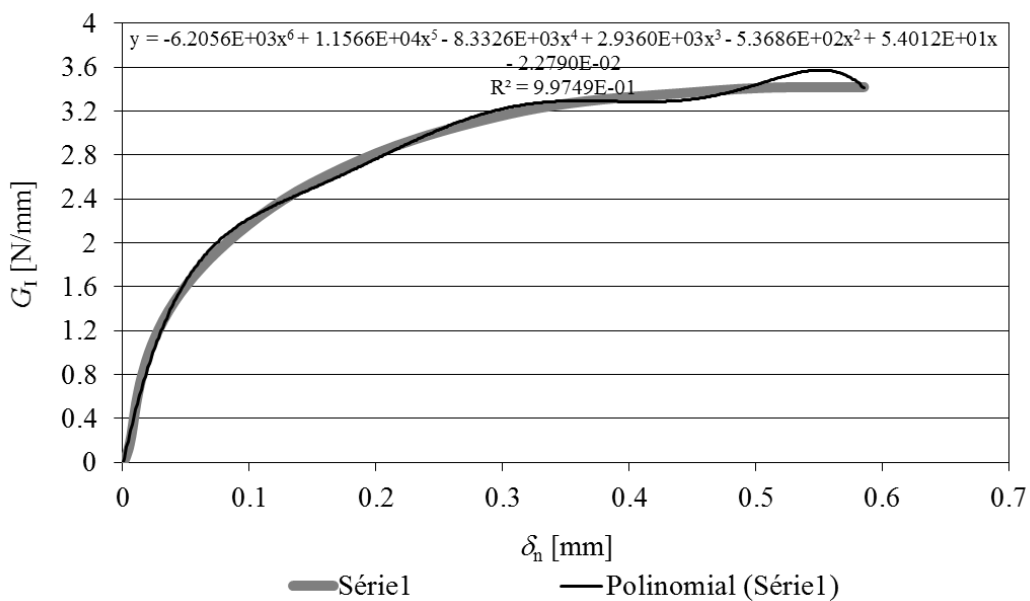


Figura 82 – Lei G_I - δ_n experimental obtida do ensaio de um dos provetes DCB com o adesivo SikaForce® 7752 e ajuste polinomial de sexto grau [91].

A **Tabela 11** demonstra os valores obtidos de G_{Ic} 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 3 adesivos em análise, conotada por um desvio padrão de 0,231 N/mm e respetivo desvio relativamente à média de valores 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. No trabalho realizado por Faneco [88] e Lopes [94], que ensaiaram provetes DCB em substratos de Al 6082-T651 e aço C45E, obtiveram-se valores médios de $G_{Ic} = 2,36 \pm 0,17$ N/mm e de $4,51 \pm 0,566$ N/mm, respetivamente. De facto, ambos os resultados apresentam uma diferença significativa relativamente ao resultado de Fernandes [5]. O resultado obtido por Faneco [88] é o que mais se

distancia do obtido por Fernandes [5]. Já o valor obtido por Lopes [94] está mais próximo, embora com diferença não desprezável, o que se justifica pela diferente geometria dos substratos, nomeadamente na espessura dos mesmos. De salientar que os valores comparativos apresentados foram obtidos pelo método CBBM, que é um método que se baseia no a_e .

Tabela 11 – Valores de G_{Ic} (N/mm) obtidos pelo Integral- J para o adesivo SikaForce® 7752 [5].

Provete	Integral- J
SK_1	3,420
SK_2	3,900
SK_3	3,840
SK_4	4,000
SK_5	3,400
SK_6	3,650
Média	3,702
Desvio Padrão	0,231

3.4.1.4 Determinação da lei coesiva em tração

Conforme a descrição apresentada no capítulo 2.4.1.3, a lei coesiva em tração é determinada pela diferenciação da curva G_I - δ_n obtida experimentalmente, após o seu ajuste ao grau polinomial mais preciso.

A **Figura 83** representa uma lei coesiva experimental t_n - δ_n , obtida de um dos ensaios DCB com o adesivo Araldite® AV138, bem como aproximações triangular e trapezoidal. Verifica-se que ambas as leis coesivas se encontram bastante aproximadas à lei coesiva experimental t_n - δ_n , o que revela que estas conseguem reproduzir com boa aproximação as características do adesivo. 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; $\delta_n^f=0,0375$ mm.

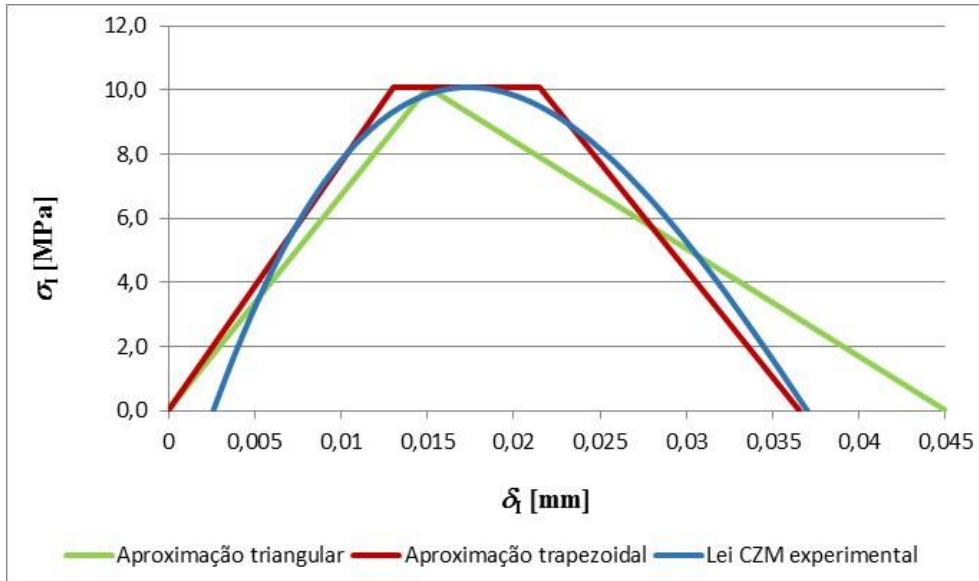


Figura 83 – Lei coesiva experimental t_n - δ_n e aproximações trapezoidal e triangular para um provete DCB ensaiado com o adesivo Araldite® AV138 [3].

A **Figura 84** representa uma lei coesiva experimental t_n - δ_n obtida de um dos ensaios DCB com o adesivo Araldite® 2015, bem como a aproximação trapezoidal obtida.

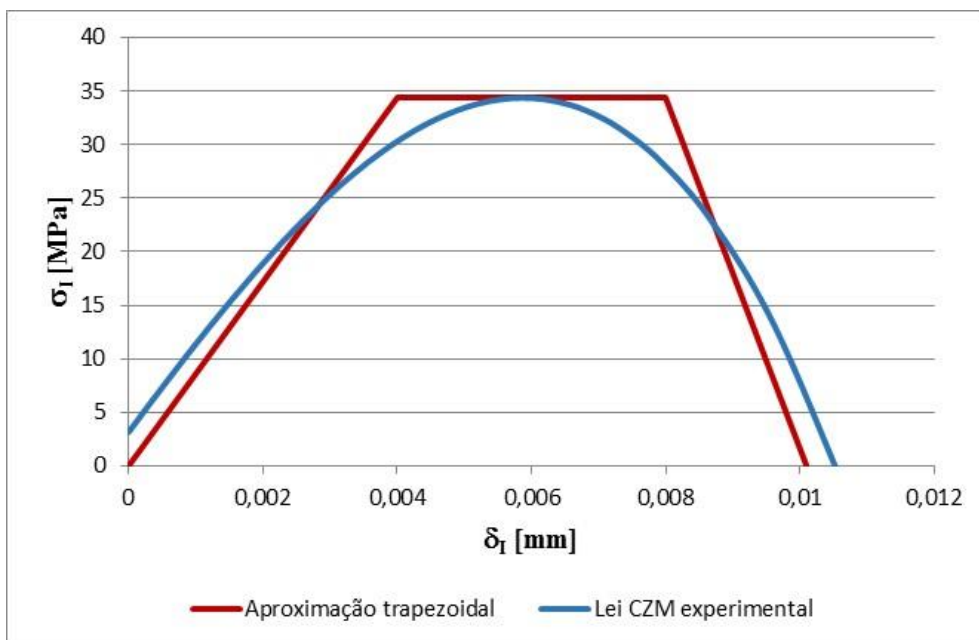


Figura 84 – Lei coesiva experimental t_n - δ_n e aproximação trapezoidal para um provete DCB ensaiado com o adesivo Araldite® 2015 [3].

A **Figura 84** mostra 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. 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; $\delta_n^f=0,0108$ mm.

A **Figura 85** representa uma lei coesiva experimental $t_n-\delta_n$ obtida de um dos ensaios DCB com o adesivo SikaForce® 7752, bem como as aproximações triangular, trapezoidal e exponencial obtidas.

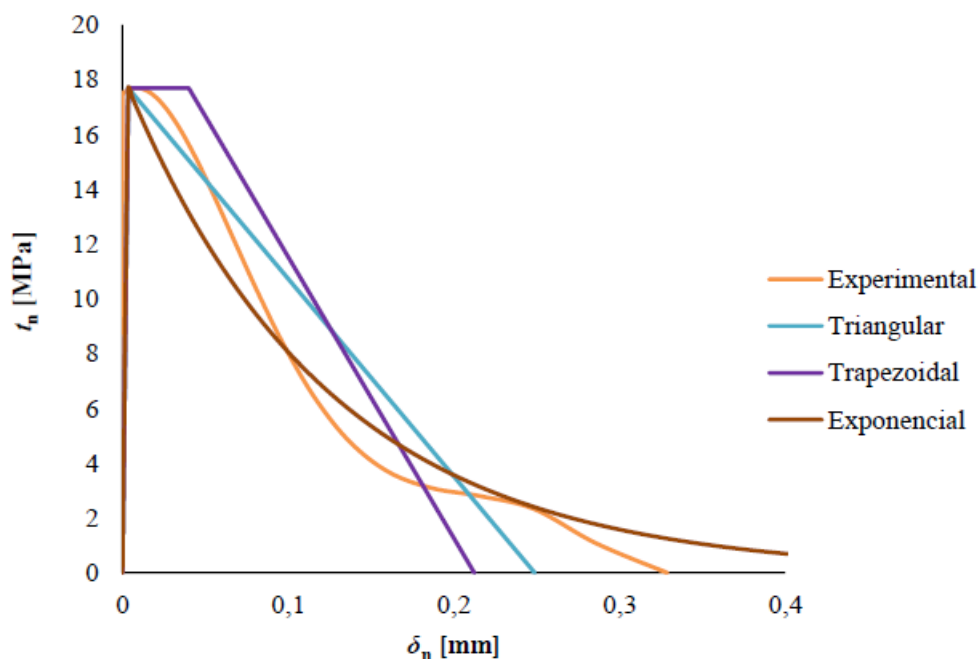


Figura 85 – Lei coesiva experimental $t_n-\delta_n$ e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial para um provete DCB ensaiado com o adesivo SikaForce® 7752.

Da análise da **Figura 85** 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 triangular, seguida da trapezoidal, e em último a lei exponencial. Para o provete em questão foram obtidos os seguintes valores de parâmetros coesivos experimentais: $t_n^0=17,69$ MPa; $\delta_n^f=0,3287$ mm.

3.4.2 Provetes ENF

3.4.2.1 Curvas $P-\delta$ experimentais

A **Figura 86** 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).

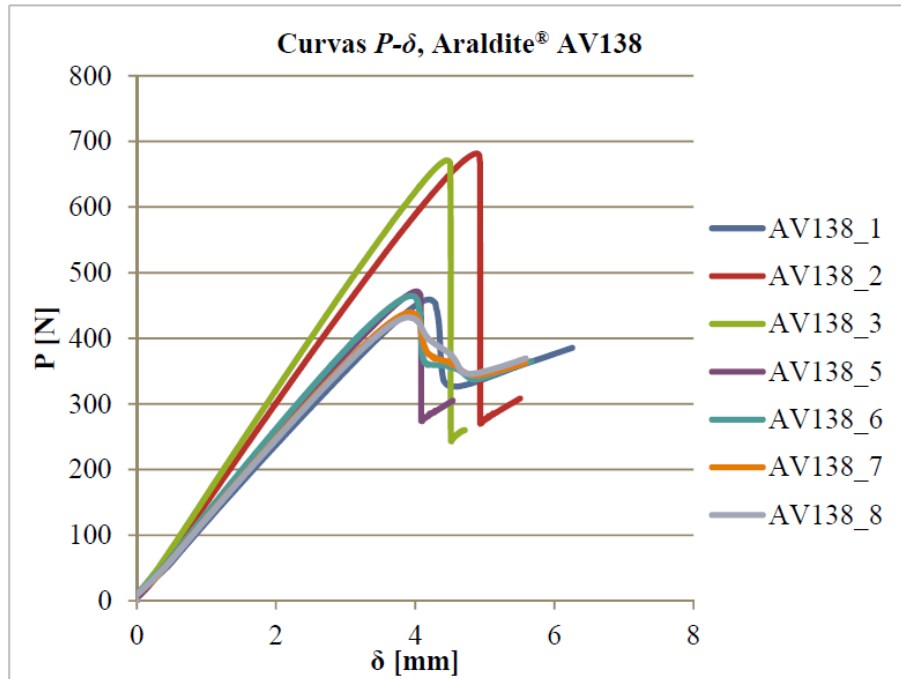


Figura 86 – Curvas P - δ experimentais dos ensaios ENF para o adesivo Araldite® AV138 [6].

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 a_0 inferiores aos dos restantes provetes, por questões relacionadas com o fabrico dos mesmos. Apesar disso, a existência deste efeito foi contabilizada 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 $P_{\text{máx}}$ e respetivo deslocamento de carga máxima ($\delta_{P_{\text{máx}}}$) registados. De notar ainda alguma instabilidade na propagação de fenda, dada a elevada rigidez do adesivo e baixa ductilidade, que normalmente induzem ao comportamento observado.

A **Figura 87** representa as curvas P - δ experimentais dos ensaios ENF realizados com o adesivo Araldite® 2015.

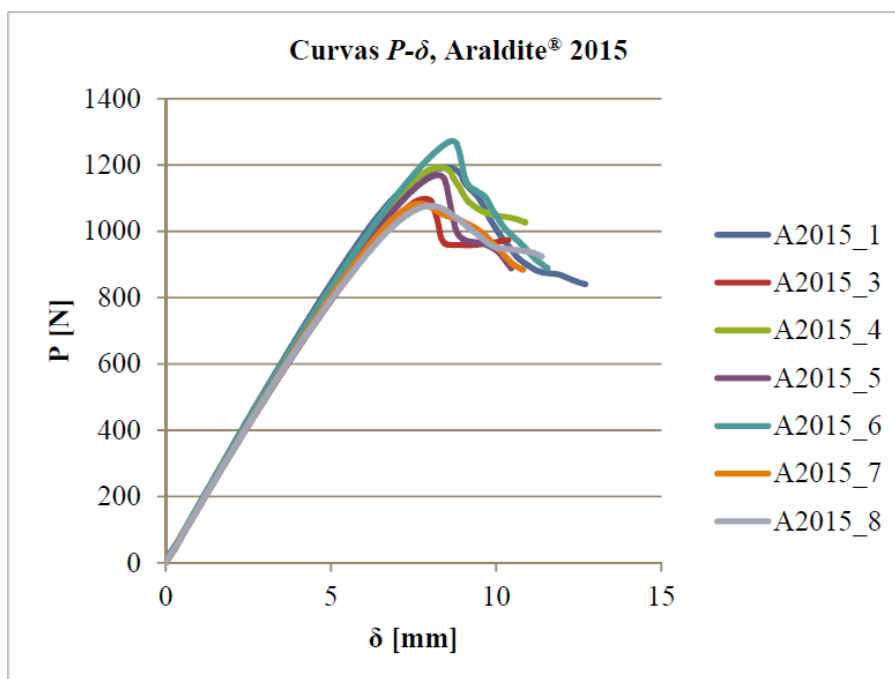


Figura 87 – Curvas P - δ experimentais do ensaio ENF para o adesivo Araldite® 2015 [6].

Na **Figura 87** 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 3 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 ZPF. 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.

A **Figura 88** representa as curvas P - δ experimentais dos ensaios realizados em provetes ENF com o adesivo SikaForce® 7752.

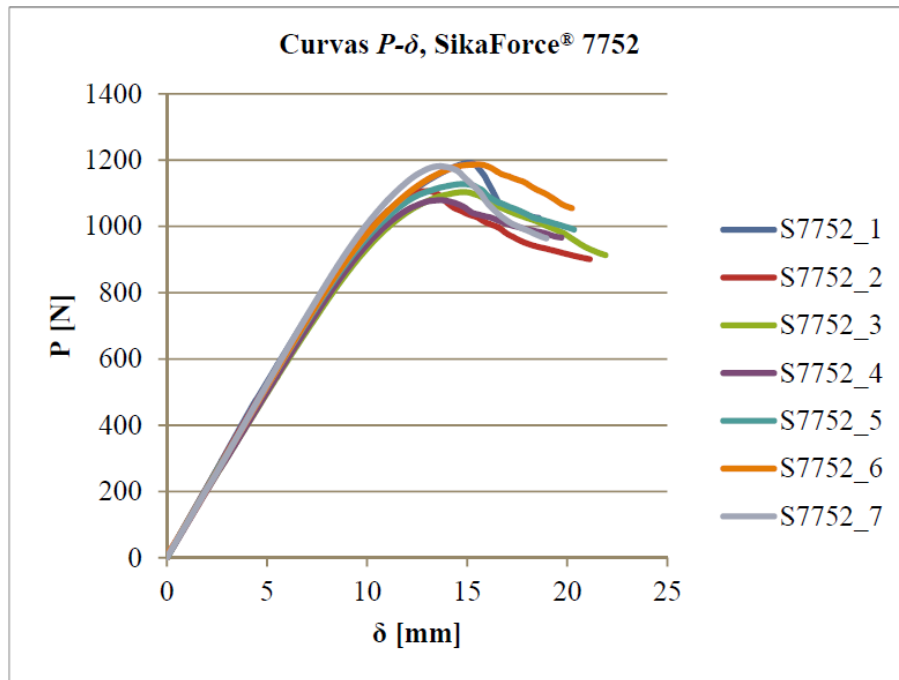


Figura 88 – Curvas P - δ experimentais do ensaio ENF para o adesivo SikaForce® 7752 [6].

Analisando a **Figura 88** observa-se um bom acordo entre curvas P - δ experimentais, principalmente no que concerne à rigidez elástica, $P_{máx}$ e $\delta_{Pmáx}$. Dada a concordância dos valores referidos, nenhum provete foi descartado para análise. Neste adesivo, à semelhança do Araldite® 2015, verificam-se 3 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, uma vez que a carga diminui com maior suavidade e progressividade.

3.4.2.2 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.

3.4.2.3 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. De facto, o método direto 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 da equação (28).

A **Figura 89** representa um exemplo de lei experimental $G_{II}-\delta_s$ obtida para o adesivo Araldite® AV138. As curvas polinomiais adotadas no conjunto dos ensaios com o referido adesivo variaram entre os graus 4 e 6 [7], de modo a se obter o melhor valor de R^2 .

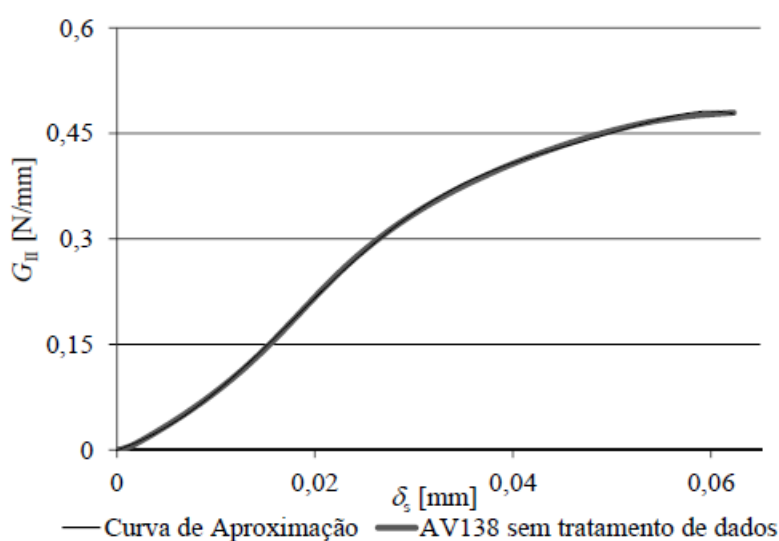


Figura 89 – Lei $G_{II}-\delta_s$ experimental obtida do ensaio de um dos provetes ENF com o adesivo Araldite® AV138 e ajuste polinomial [7].

Do ensaio do provete da **Figura 89**, 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. De referir ainda que a curva $G_{II}-\delta_s$ representada na **Figura 89** apresenta uma forma coerente com trabalhos anteriores [67].

Na **Tabela 12** estão representados os valores de G_{IIc} obtidos pelo Integral- J para o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 12 – Valores de G_{IIc} (N/mm) obtidos pelo Integral- J para o adesivo Araldite® AV138 [7].

Provete	Integral- J
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
Média	0,580
Desvio Padrão	0,090

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. Comparando este valor com o trabalho de Azevedo [6], que ensaiou igualmente provetes ENF com geometria semelhante à apresentada no **subcapítulo 3.2.1**, obteve-se um valor médio de $G_{IIc}=0,618\pm 0,069$ N/mm com o método CBBM, bastante próximo do valor apresentado na **Tabela 12**.

A **Figura 90** representa um exemplo de uma lei experimental $G_{II}-\delta_n$ obtida para adesivo Araldite® 2015. Denota-se que a forma da curva $G_{II}-\delta_s$ 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.

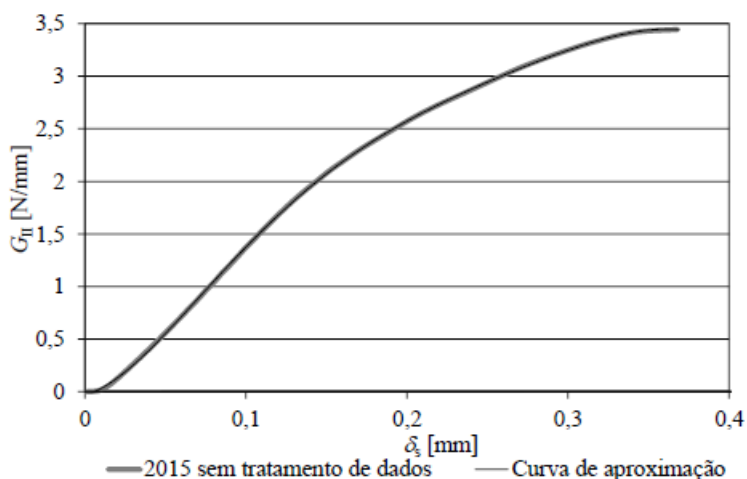


Figura 90 – Lei experimental $G_{II}-\delta_s$ experimental obtida do ensaio de um dos provetes ENF com o adesivo Araldite® 2015 e ajuste polinomial [7].

A **Tabela 13** resume os resultados obtidos de G_{IIc} para os provetes testados pelo método Integral- J .

Tabela 13 – Valores de G_{IIc} (N/mm) obtidos pelo Integral- J para o adesivo Araldite® 2015 [7].

Provete	Integral- J
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
Média	3,181
Desvio Padrão	0,249

Todos os provetes foram validados nesta análise, dada a coerência entre valores de G_{IIc} , conotada 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 ($\approx 448,4\%$).

Comparando o resultado com o obtido por outros autores, nomeadamente de Azevedo [6] e Campilho [78], nestes trabalhos obtiveram-se respetivamente valores médios de $G_{IIc}=2,967\pm 0,273$ N/mm e de $G_{IIc}=4,70\pm 0,34$ N/mm. Denota-se que o resultado de Azevedo [6] é próximo ao apresentado na **Tabela 13**, muito em virtude da geometria semelhante do provete. Já o resultado de Campilho [78] apresenta uma diferença mais assinalável, principalmente devido à diferença de geometria dos provetes, ao nível da espessura dos substratos, bem como à diferença do material dos mesmos, no caso um material compósito reforçado com fibras de carbono (SEAL[®] Texipreg HS 160 RM).

A **Figura 91** apresenta o exemplo de uma lei experimental $G_{II}-\delta_n$ obtida para adesivo SikaForce[®] 7752.

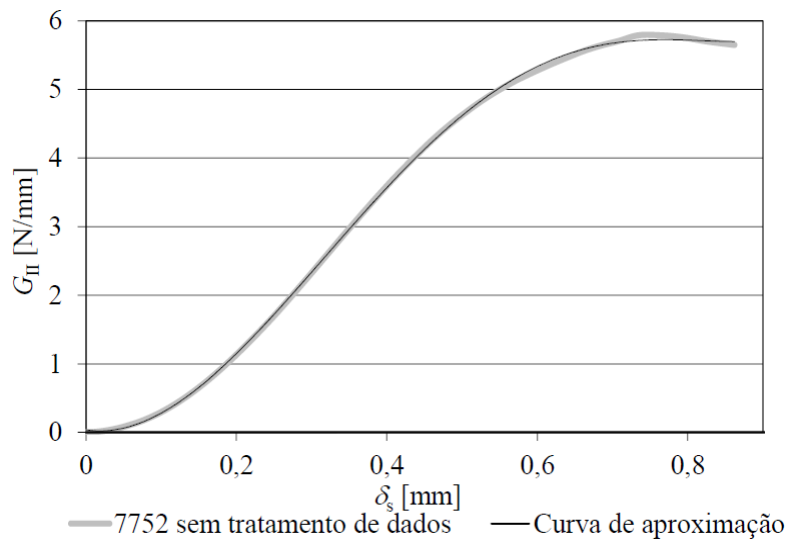


Figura 91 – Lei experimental $G_{II}-\delta_s$ experimental obtida do ensaio de um dos provetes ENF com o adesivo SikaForce[®] 7752 e ajuste polinomial [7].

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.

A **Tabela 14** apresenta os valores de G_{IIc} obtidos para os provetes ensaiados pelo método do Integral- J .

Tabela 14 – Valores de G_{IIc} (N/mm) obtidos pelo Integral- J para o adesivo SikaForce® 7752 [7].

Provete	Integral- J
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
Média	5,667
Desvio Padrão	0,459

A **Tabela 14** denota 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, o presente adesivo é superior ao adesivo Araldite® AV138, embora ligeiramente ao Araldite® 2015. 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 na **Tabela 14** 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% e de 877%, respetivamente. Comparando com trabalhos de outros autores, nomeadamente de Azevedo [6] e Faneco [88], obtiveram-se valores de $G_{IIc}=5,562\pm 0,356$ N/mm e de $G_{IIc}=5,41\pm 0,47$ N/mm, respetivamente. Estes valores encontram-se muito próximos dos apresentados na **Tabela 14**, o que de certa forma seria esperado uma vez que nos trabalhos dos referidos autores foi utilizada uma geometria dos provetes similar à apresentada no **subcapítulo 3.2.1** da presente tese, para além da utilização do mesmo material para os substratos.

3.4.2.4 Determinação da lei coesiva em corte

Conforme descrito no capítulo 2.4.1.3, 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.

Após a aplicação deste procedimento aos dados experimentais, apresenta-se na **Figura 92** uma lei coesiva experimental t_s - δ_s , obtida de um dos ensaios ENF com o adesivo Araldite® AV138, bem como as aproximações triangular, trapezoidal e exponencial obtidas.

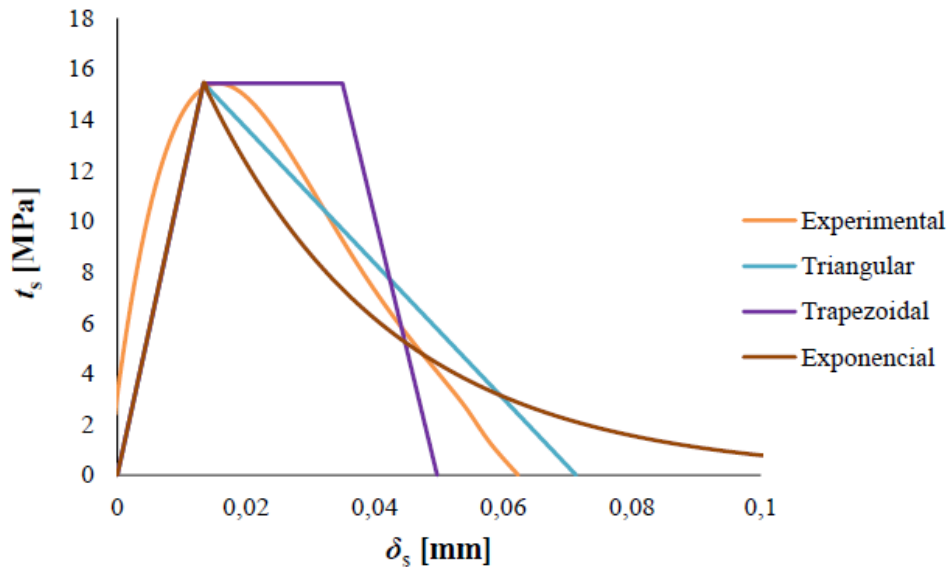


Figura 92 – Lei coesiva experimental t_s - δ_s e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial para um provete ENF ensaiado com o adesivo Araldite® AV138 [5].

A **Figura 92** mostra 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 t_s - δ_s , 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 t_s - δ_s . Para o provete representado ensaiado obtiveram-se os seguintes valores de parâmetros coesivos: $t_s^0=15,43$ MPa e $\delta_s^f=0,06228$ mm.

Na **Figura 93** é apresentada uma lei coesiva experimental t_s - δ_s obtida de um dos ensaios ENF com o adesivo Araldite® 2015, bem como as aproximações triangular, trapezoidal e exponencial obtidas. Denota-se maior proximidade das leis coesivas triangular e trapezoidal face à lei coesiva experimental t_s - δ_s , tal como observado no ensaio com o adesivo Araldite® AV138. Neste caso, a lei coesiva trapezoidal consegue reproduzir a fase de amaciamento de tensões após o valor de pico de t_s^0 , com melhor exatidão de que a triangular. No entanto, esta última, a partir de $\delta_s \approx 0,18$ mm, consegue-se sobrepor à trapezoidal em termos de proximidade. A aproximação exponencial demarca-se das restantes principalmente por um amaciamento de tensões pouco compatível com a

lei coesiva experimental. Para o provete representado na **Figura 93**, obteve-se $t_s^0=16,78$ MPa e $\delta_s^f=0,3682$ mm.

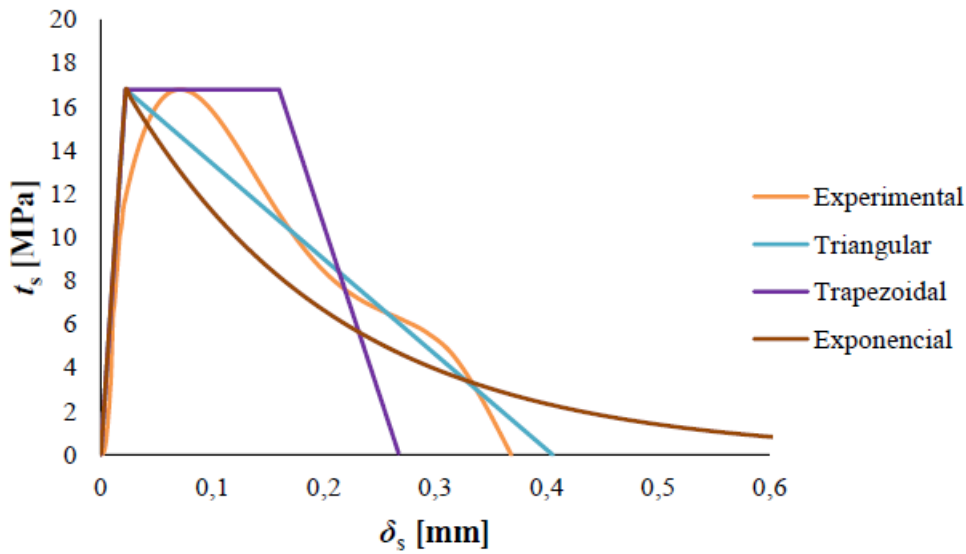


Figura 93 – Lei coesiva experimental t_s - δ_s e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial para um provete ENF ensaiado com o adesivo Araldite® 2015 [5].

Na **Figura 94** está representada uma lei coesiva experimental t_s - δ_s , obtida de um dos ensaios ENF com o adesivo SikaForce® 7752, bem como as aproximações triangular, trapezoidal e exponencial.

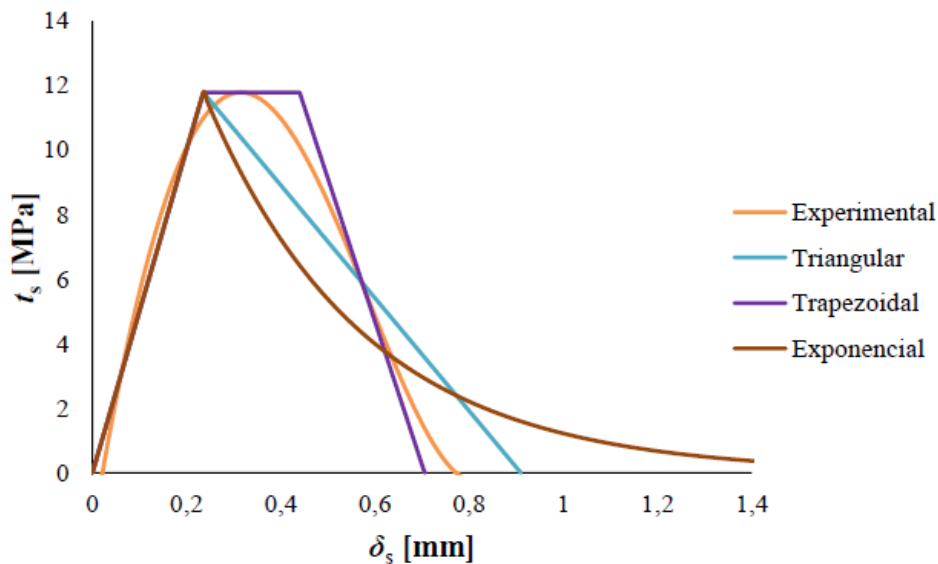


Figura 94 – Lei coesiva experimental t_s - δ_s e aproximações triangular, trapezoidal e exponencial para um provete ENF ensaiado com o adesivo SikaForce® 7752 [5].

A **Figura 94** mostra uma excelente aproximação da lei coesiva trapezoidal à lei coesiva experimental, sendo a melhor das 3 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. Para o provete mostrado na **Figura 94** obtiveram-se os seguintes valores dos parâmetros coesivos: $t_s^0=11,78$ MPa e $\delta_s^f=0,7681$ mm.

3.4.3 Juntas de sobreposição simples

3.4.3.1 Curvas P - δ experimentais

Na **Figura 95** estão representadas as curvas P - δ obtidas experimentalmente para as JSS com o adesivo Araldite® AV138, para os diferentes valores de L_O .

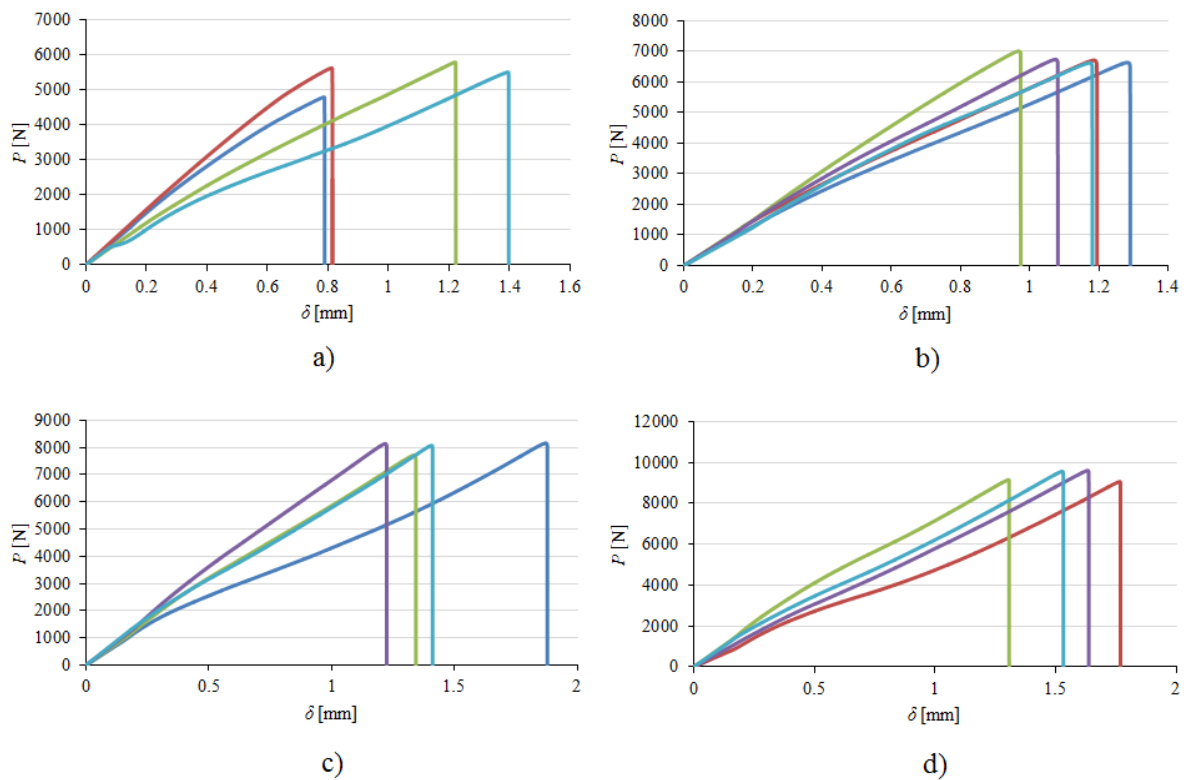


Figura 95 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente do ensaio de JSS com o adesivo Araldite® AV138, para valores de L_O de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [1].

Na **Figura 95** observa-se na generalidade uma repetibilidade de curvas razoável, com a exceção do caso da **Figura 95 a)** e **Figura 95 c)**. No primeiro caso, denota-se uma diferenciação entre dois pares de provetes ao nível dos $\delta_{Pmáx}$ atingidos. No caso da **Figura 95 c)** um dos provetes diferencia-

se dos restantes no valor de $\delta_{P_{\text{máx}}}$ atingido. Na generalidade observa-se um comportamento maioritariamente linear até à rotura de todos os provetes representados na **Figura 95**, apesar de se verificarem algumas oscilações na rigidez elástica dos provetes devido à flexibilidade e folgas da máquina, bem como escorregamento entre amarras e provetes.

A **Figura 96** representa as curvas P - δ obtidas experimentalmente a partir dos ensaios de JSS com o adesivo Araldite® 2015, para os quatro valores de L_0 .

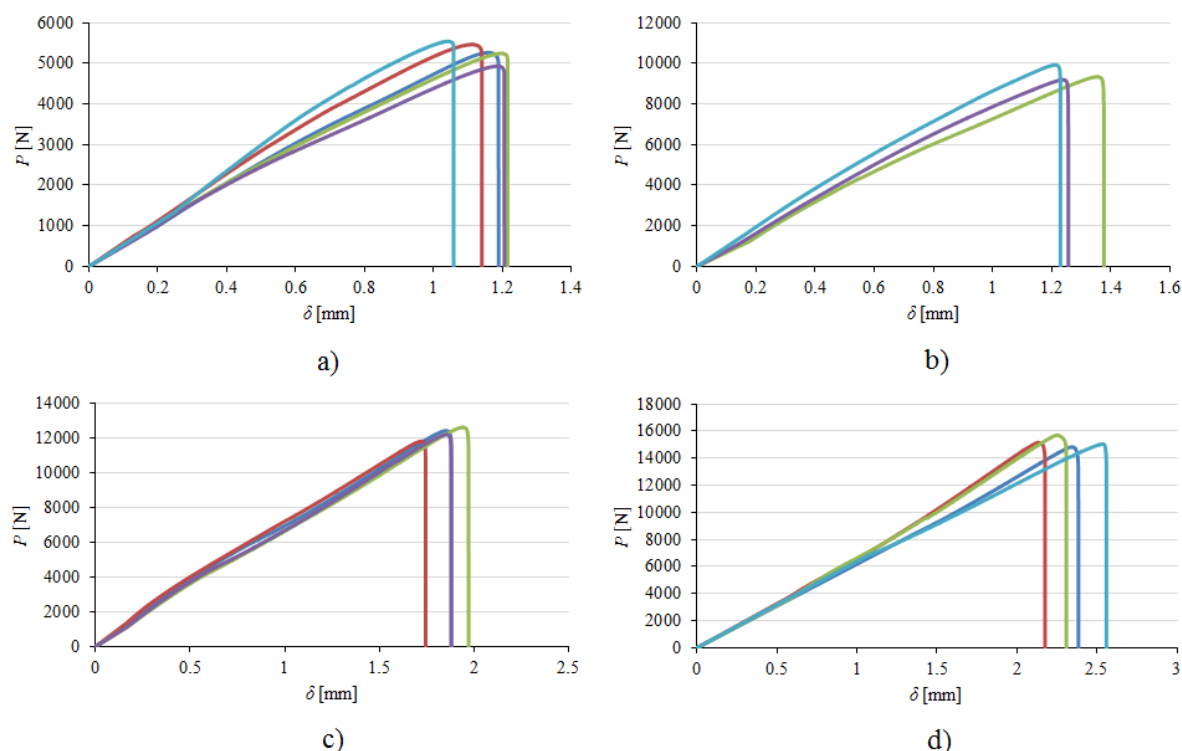


Figura 96 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente do ensaio de JSS com o adesivo Araldite® 2015, para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [1].

Na **Figura 96** observa-se na generalidade uma boa repetibilidade de curvas, melhor do que a da **Figura 95**, obtida com o adesivo Araldite® AV138, no que diz respeito à rigidez dos provetes, valores de $P_{\text{máx}}$ e $\delta_{P_{\text{máx}}}$. O comportamento das juntas é na globalidade linear até à rotura, apenas com alguns desvios devido ao escorregamento entre amarras e provetes e a alguma flexibilidade do equipamento.

A **Figura 97** demonstra as curvas P - δ referentes às JSS com o adesivo Sikaforce® 7752 para os diferentes valores de L_0 .

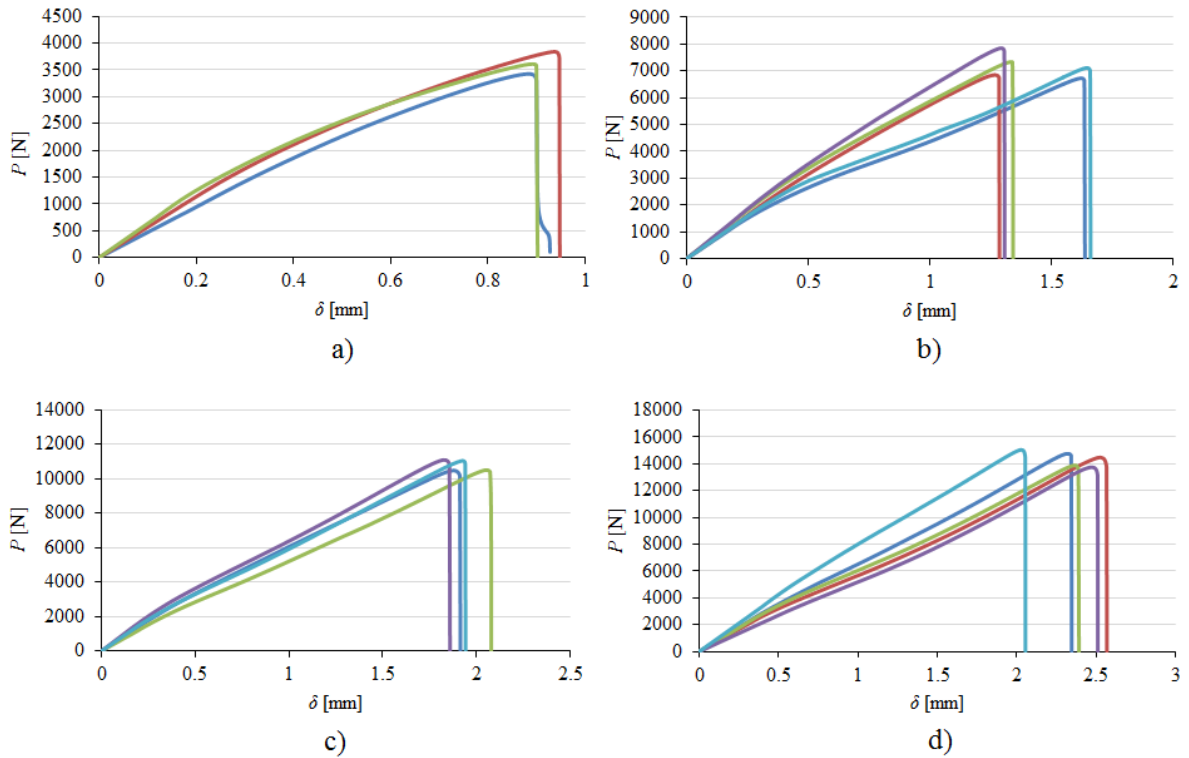


Figura 97 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente do ensaio de JSS com o adesivo Sikaforce[®] 7752, para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm.

Na **Figura 97** pode-se observar uma repetibilidade de curvas de nível intermédio entre todos os provetes de cada valor de L_0 , superior à obtida com o adesivo Araldite[®] AV138, mas inferior à obtida com o adesivo Araldite[®] 2015. Este adesivo apresenta uma peculiaridade em relação aos anteriores. Devido à sua menor resistência e maior ductilidade, verifica-se claramente a ocorrência da transição elasto-plástica do adesivo no domínio de forças atingidas nos ensaios. Após a plastificação do adesivo, as juntas comportam-se de forma praticamente linear até à rotura, salvo algumas exceções devido também a escorregamentos entre amarras e provetes, flexibilidade do equipamento e folgas do mesmo. Pela observação da **Figura 97** verifica-se também um aumento dos valores de $P_{\text{máx}}$ e $\delta_{P_{\text{máx}}}$ nas juntas à medida que se incrementa o valor de L_0 . De notar que alguns provetes não aparecem representados nas **Figura 95**, **Figura 96** e **Figura 97** porque foram considerados inválidos nesta análise devido a apresentarem comportamentos demasiado díspares dos restantes provetes.

3.4.3.2 Modos de rotura

A **Figura 98** representa exemplos de modos de rotura obtidos para as JSS ensaiadas com o adesivo Araldite[®] AV138 para os diversos valores de L_0 .

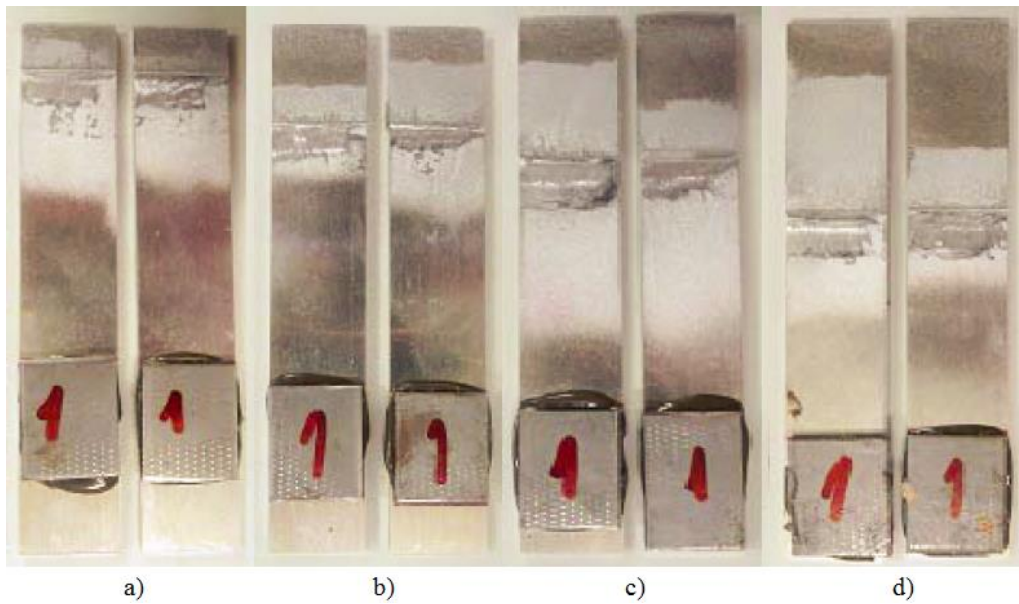


Figura 98 – Superfícies de rotura de JSS ensaiadas com o adesivo Araldite® AV138 para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [1].

Atendendo à **Figura 98**, representativa dos 20 provetes ensaiados, 1 por cada valor de L_0 , verifica-se que houve rotura coesiva em todos eles, com remanescência de adesivo em ambos os substratos. No entanto, uma vez que a rotura ocorreu muito próxima de uma das interfaces adesivo/substrato, a constatação visual de existência de rotura coesiva por vezes não é muito evidente. A **Figura 99** mostra exemplos, para cada valor de L_0 , dos modos de rotura das JSS ensaiadas com o adesivo Araldite® 2015.

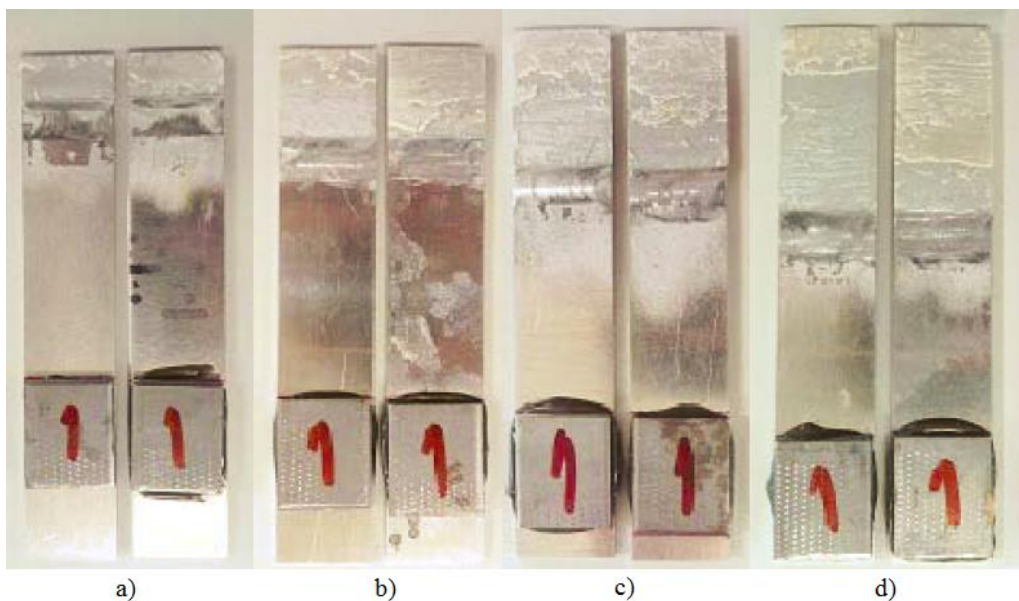


Figura 99 – Superfícies de rotura de JSS ensaiadas com o adesivo Araldite® 2015 para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [1].

A **Figura 99** demonstra, à semelhança do que se sucedeu com o adesivo anterior, a ocorrência de roturas coesivas em todos os provetes. Para os provetes representativos dos ensaios de JSS com valores de L_0 de 12,5 mm, 25 mm e 37,5 mm, denota-se uma distribuição aproximadamente equitativa de adesivo em cada uma das superfícies dos substratos. No entanto, no provete representativo do ensaio dos 5 provetes com JSS com $L_0=50$ mm regista-se uma distribuição de adesivo menos uniforme. Observa-se ainda assim existência de adesivo em todas as superfícies dos substratos de cada provete, o que assegura a existência de rotura coesiva bem como uma preparação de superfície adequada.

A **Figura 100** representa os modos de rotura obtidos para a totalidade das JSS ensaiadas com o adesivo SikaForce 7752[®], para cada valor de L_0 .

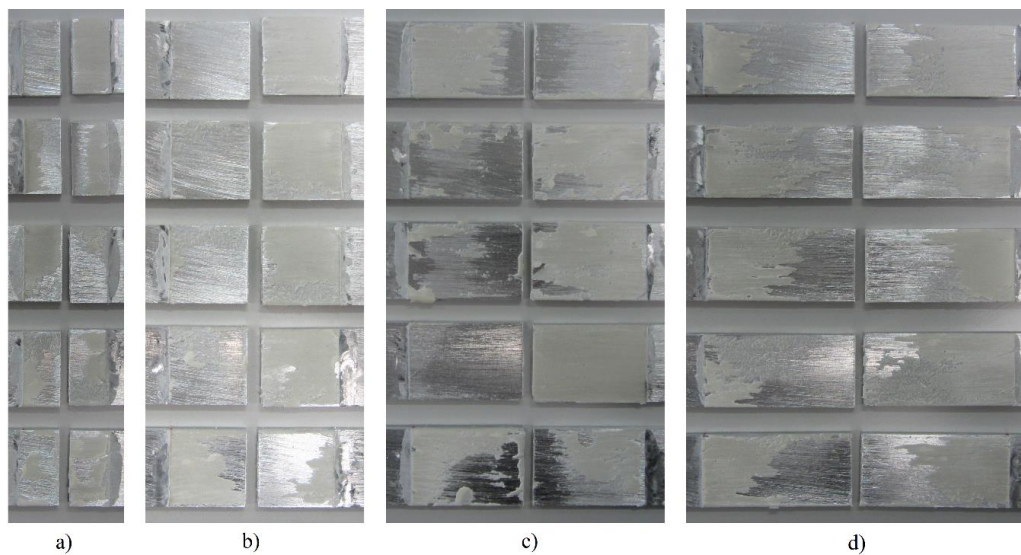


Figura 100 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo SikaForce[®] 7752 para valores de L_0 de:
a) 12,5 mm; b) 25 mm; c) 37,5 mm; d) 50 mm.

Analisando a **Figura 100** observa-se que os provetes sofreram roturas coesivas em todos os ensaios realizados, apesar de em alguns locais isto não ser perceptível, devido à aparente falta de adesivo num dos substratos. De facto, a distribuição de adesivo nos substratos de cada um dos provetes apresentados nem sempre foi equitativa. No entanto, a remanescência de uma película de adesivo em cada uma das superfícies dos substratos corrobora o facto de a rotura ser coesiva, o que denota a boa preparação das superfícies conducente a uma adesão adequada.

3.4.3.3 Resistência das JSS

A **Tabela 15** representa a influência de L_0 no aumento percentual da carga máxima média ($P_{\text{máx}}^{\text{méd}}$) para as JSS coladas com o adesivo Araldite[®] AV138. A **Tabela 15** mostra um aumento de $P_{\text{máx}}^{\text{méd}}$

à medida que o valor de L_O também aumenta. O aumento de $P_{\text{máx méd}} [\%]$ quantifica o aumento de resistência entre valores de L_O consecutivos. Deste modo, verifica-se que o maior aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ ocorre entre as juntas com $L_O=12,5$ mm (**Figura 95 a**) e as juntas com $L_O=25$ mm (**Figura 95 b**), sendo este de 24,3%. Entre as juntas com menor e maior valor de L_O ocorre um aumento percentual total de $P_{\text{máx méd}}$ de 72,3%. O maior desvio padrão entre $P_{\text{máx méd}}$ ocorre nas juntas com menor valor de L_O (12,5 mm), que no caso é de 439,4 N. De referir ainda que o aumento de $P_{\text{máx méd}}$ entre valores de L_O consecutivos é aproximadamente constante (≈ 1300 N).

Tabela 15 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_O de JSS com o adesivo Araldite® AV138 [1].

L_O	12,5	25	37,5	50
$P_{\text{máx méd}} [\text{N}]$	5421,7	6738,2	8016,3	9342,2
Desvio padrão [N]	439,4	155,4	206,3	278,5
Aumento de $P_{\text{máx méd}} [\%]$	-	24,3	19,0	16,5

Na **Tabela 16** observa-se a variação de $P_{\text{máx méd}}$ em função do valor de L_O para as JSS ensaiadas com o adesivo Araldite® 2015. Constata-se que $P_{\text{máx méd}}$, tal como no caso do adesivo Araldite® AV138, também aumenta com L_O . Verifica-se que o maior aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ ocorre entre as juntas com $L_O=12,5$ mm e as juntas com $L_O=25$ mm (79,3%). O aumento percentual total entre juntas com valores limite de L_O é de 187,1%. A maior dispersão de valores de $P_{\text{máx}}$ atingidos ocorre nas juntas com valor de $L_O=25$ mm, que no caso é de 386,6 N. Na **Tabela 16**, contrariamente à **Tabela 15**, denota-se que o aumento de $P_{\text{máx méd}}$ já não é aproximadamente constante, na medida em tende a diminuir com o aumento de L_O .

Tabela 16 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_O de JSS com o adesivo Araldite® 2015 [1].

L_O [mm]	12,5	25	37,5	50
$P_{\text{máx méd}} [\text{N}]$	5287,8	9480,7	12235,2	15182,2
Desvio padrão [N]	237,2	386,6	343,9	370,4
Aumento de $P_{\text{máx méd}} [\%]$	-	79,3	29,1	24,1

A **Tabela 17** representa a influência de L_O no aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para o adesivo Sikaforce® 7752. O maior aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ entre duas séries de juntas consecutivas ocorre entre a série com valor de $L_O=12,5$ mm e a série com $L_O=25$ mm, correspondendo a um aumento de 97,0%. Seguidamente esse aumento decresce até atingir um valor de aproximadamente 50% entre $L_O=37,5$ mm e $L_O=50$ mm. Constata-se que o aumento percentual total de $P_{\text{máx méd}}$ em

função L_0 com este adesivo é de 296,7%, o maior dos três adesivos testados, e que corresponde a um aumento quase linear entre $P_{\text{máx méd}}$ e L_0 (variação de ≈ 3600 N entre valores de L_0 consecutivos). A dispersão de $P_{\text{máx}}$ atingidos neste adesivo é mais acentuada nas juntas com $L_0=25$ mm, 37,5 mm e 50 mm, sendo também em média ligeiramente superior aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

Tabela 17 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_0 de JSS com o adesivo Sikaforce® 7752.

L_0	12,5	25	37,5	50
$P_{\text{máx méd}}$ [N]	3625,6	7175,5	10774,1	14383,7
Desvio padrão [N]	206,8	445,5	334,1	553,6
Aumento de $P_{\text{máx méd}}$ [%]	-	97,0	50,2	33,5

A **Figura 101** resume os aumentos de $P_{\text{máx méd}}$ em função de L_0 para os três adesivos ensaiados com os desvios padrão associados.

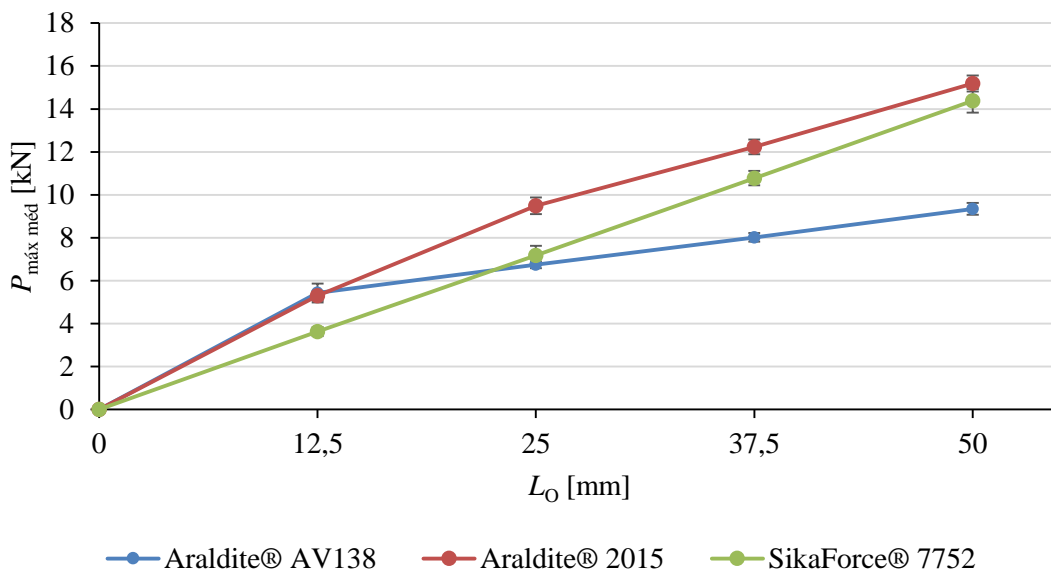


Figura 101 – $P_{\text{máx méd}}$ em função de L_0 para cada adesivo ensaiado em JSS.

Na **Figura 101** denota-se que o aumento de $P_{\text{máx méd}}$ em função de L_0 depende claramente do adesivo utilizado na junta. Deste modo, o adesivo Araldite® AV138 e o Araldite® 2015 são os que oferecem maior resistência para juntas com $L_0=12,5$ mm, seguidos do Sikaforce® 7752, que apresenta um decréscimo significativo em termos de resistência face aos dois referidos adesivos. Neste contexto, o adesivo Araldite® AV138 demarca-se ligeiramente do Araldite® 2015 com uma diferença percentual de 2,5% e do Sikaforce® 7752 com um desvio percentual de 49,5%. Para o

valor de L_0 subsequente, o Araldite® AV138 é ultrapassado em termos de resistência pelo Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015, estes últimos com um acréscimo percentual de 6,5% e de 40,7%, respectivamente, relativamente ao Araldite® AV138. Para o valor de L_0 de 37,5 mm, o Araldite® AV138 é o menos resistente ($P_{\text{máx méd}} \approx 8\text{kN}$), sendo claramente ultrapassado pelo Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 com respetivos desvios percentuais de 34,4% e de 52,6%. Esta diferença é ainda mais notória para $L_0=50$ mm, já que os adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 surgem com valores de $P_{\text{máx méd}}$ claramente superiores ao Araldite® AV138, situadas na ordem dos 14 kN e 15 kN, respetivamente, e que correspondem a desvios percentuais de 54,0% e de 62,5% relativamente ao Araldite® AV138.

Constata-se que o adesivo Sikaforce® 7752 é o que revela maior proporcionalidade no aumento de $P_{\text{máx méd}}$ em função de L_0 , seguido do Araldite® 2015 e finalmente do Araldite® AV138, que se revela o menos proporcional dos 3 adesivos devido à sua fragilidade [83]. Verifica-se também que o adesivo Araldite® AV138 é o adesivo que apresenta o menor aumento de $P_{\text{máx méd}}$ entre valores limite de L_0 . Tal acontece devido a sua reduzida capacidade de plastificação decorrente da sua fragilidade, implicando uma rotura da junta assim que são atingidas as tensões limite nas extremidades da mesma [83]. É também visível através da **Tabela 17** e **Figura 101** a maior dispersão de valores de $P_{\text{máx méd}}$ entre provetes ensaiados para o adesivo Sikaforce® 7752.

3.4.4 Juntas de sobreposição dupla

3.4.4.1 Curvas $P - \delta$ experimentais

Na **Figura 102** estão representadas as curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente nos ensaios JSD com o adesivo Araldite® AV138. As curvas estão representadas por ordem crescente do valor de L_0 . Observa-se uma semelhança razoável entre as curvas $P-\delta$ no que concerne à rigidez, $P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$. Foram desconsiderados alguns provetes nas juntas da **Figura 102 b), c) e d)** devido a estes apresentarem resultados significativamente diferentes do comportamento médio da respetiva configuração de junta. Os provetes apresentam na sua globalidade um comportamento linear até à rotura, apesar da ocorrência de algumas oscilações de rigidez entre provetes devido a questões de escorregamento, folgas e flexibilidade do equipamento, tal como sucedeu nas JSS.

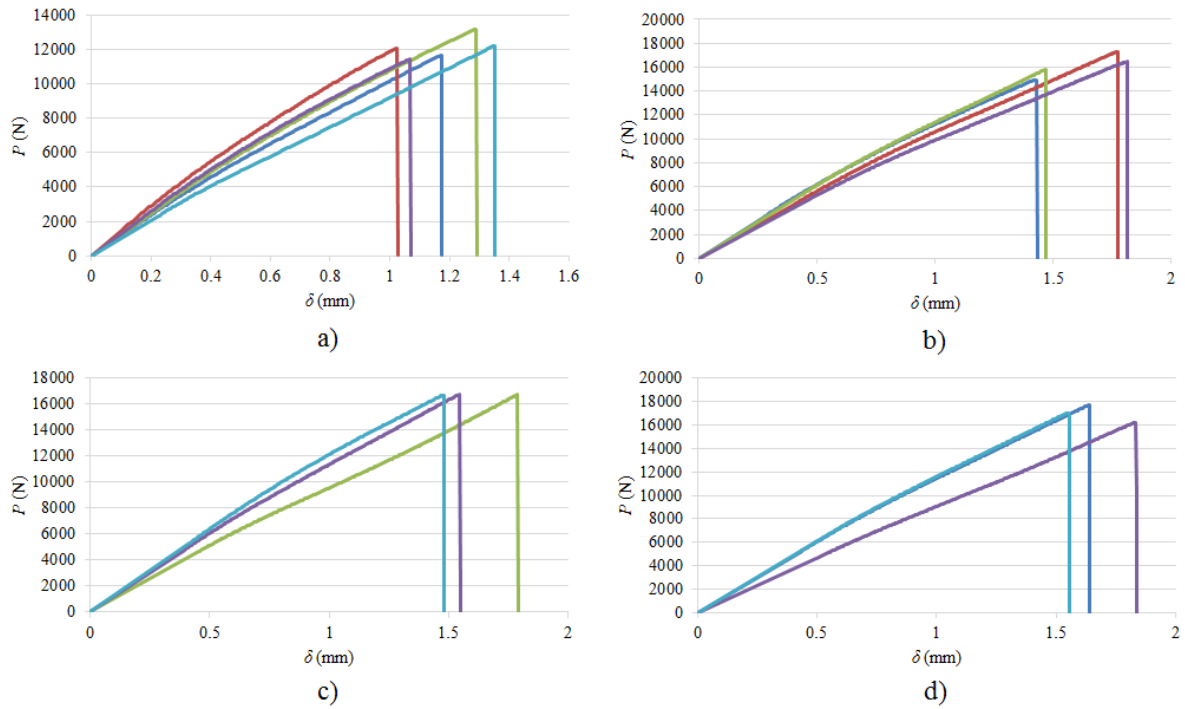


Figura 102 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente do ensaio de JSD com o adesivo Araldite[®] AV138, para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [2].

A **Figura 103** representa o conjunto de curvas P - δ obtidas experimentalmente para as JSD com o adesivo Araldite[®] 2015, agrupadas por valores de L_0 .

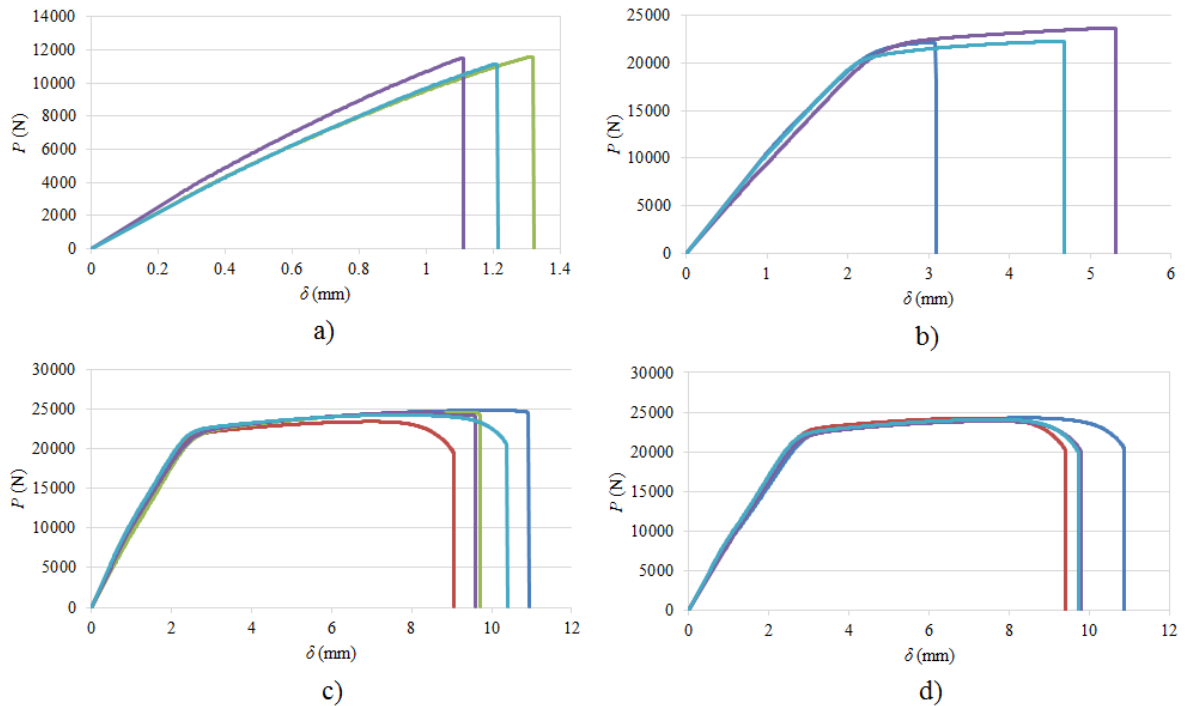


Figura 103 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente do ensaio de JSD com o adesivo Araldite[®] 2015, para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [2].

Na **Figura 103** verifica-se uma boa repetibilidade de curvas, melhor do que a obtida com o adesivo Araldite® AV138 para as JSD homólogas, no que diz respeito à rigidez, $P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$, com a exceção das juntas da **Figura 103 b)**, que se diferenciam por maior dispersão nos valores de $\delta_{\text{máx}}$ obtidos. Na **Figura 103 b), c) e d)** observa-se uma plastificação acentuada dos provetes, resultante da combinação da cedência do adesivo com a dos substratos. Considerando a secção resistente, a tensão de cedência e a sollicitação a que os substratos incorrem fundamentalmente durante o ensaio, que é de tração, a plastificação dos mesmos teoricamente inicia-se na ordem dos 20 kN. É notória também a maior ductilidade do adesivo Araldite® 2015 face ao Araldite® AV138, como se pode constatar pela superioridade dos valores de $\delta_{\text{máx}}$ obtidos nas curvas da **Figura 103** e **Figura 102**, respetivamente. Verifica-se em todos os gráficos da **Figura 103** um comportamento linear das juntas até ao início da plastificação dos substratos, excetuando o caso da **Figura 103 a)** onde só existe plastificação do adesivo.

A **Figura 104** evidencia as curvas P - δ obtidas experimentalmente dos ensaios de JSD com o adesivo SikaForce® 7752 para os diferentes valores de L_0 .

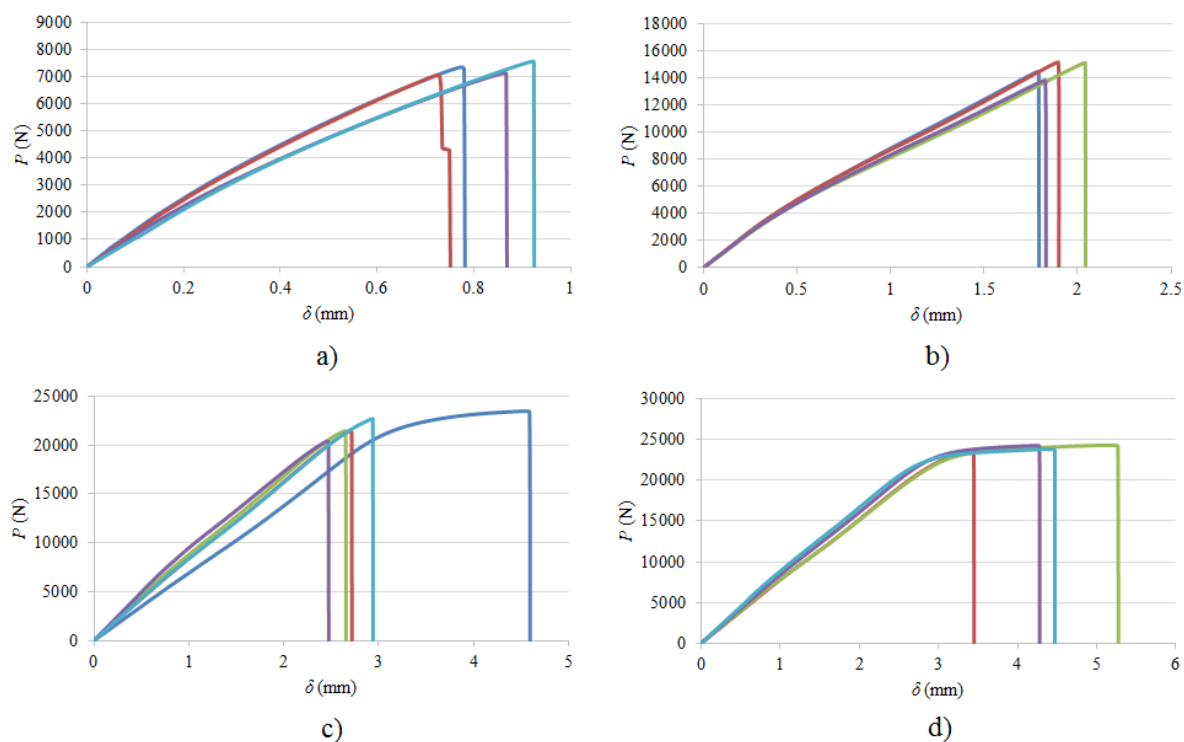


Figura 104 – Curvas P - δ experimentais obtidas do ensaio de JSD com o adesivo Sikaforce® 7752 para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm.

Na **Figura 104** observa-se uma boa repetibilidade de curvas, semelhante à obtida com o adesivo Araldite® 2015 e superior à do adesivo Araldite® AV138, no que respeita à rigidez elástica e $P_{\text{máx}}$. O mesmo não se aplica para $\delta_{\text{máx}}$, pois neste caso é o adesivo Araldite® AV138 que apresenta a melhor

repetibilidade de valores. Tal como sucede com o adesivo Araldite® 2015, com o Sikaforce® 7752 denota-se também uma plastificação dos substratos, mas neste caso apenas nas juntas com $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm. Tal apenas se observa para estes dois valores de L_0 porque o adesivo Sikaforce® 7752, comparativamente ao Araldite® 2015, apresenta propriedades de resistência mecânica inferiores, o que resulta em valores de $P_{máx}$ mais reduzidos. A grandeza dos valores de $\delta_{máx}$ com este adesivo é superior à obtida com o adesivo Araldite® AV138, mas claramente inferior à do adesivo Araldite® 2015. Isto sucede-se porque apesar do Sikaforce® 7752 ser o mais flexível dos 3 adesivos, este apresenta propriedades de resistência mecânicas inferiores, o que se traduz também em valores de deslocamento de rotura intermédios. Verificam-se algumas oscilações na rigidez elástica entre as juntas ensaiadas, devido aos típicos escorregamentos entre amarras e provetes, folgas e flexibilidade do equipamento.

3.4.4.2 Modos de Rotura

A **Figura 105** apresenta os modos de rotura obtidos para as JSD ensaiadas com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0 .

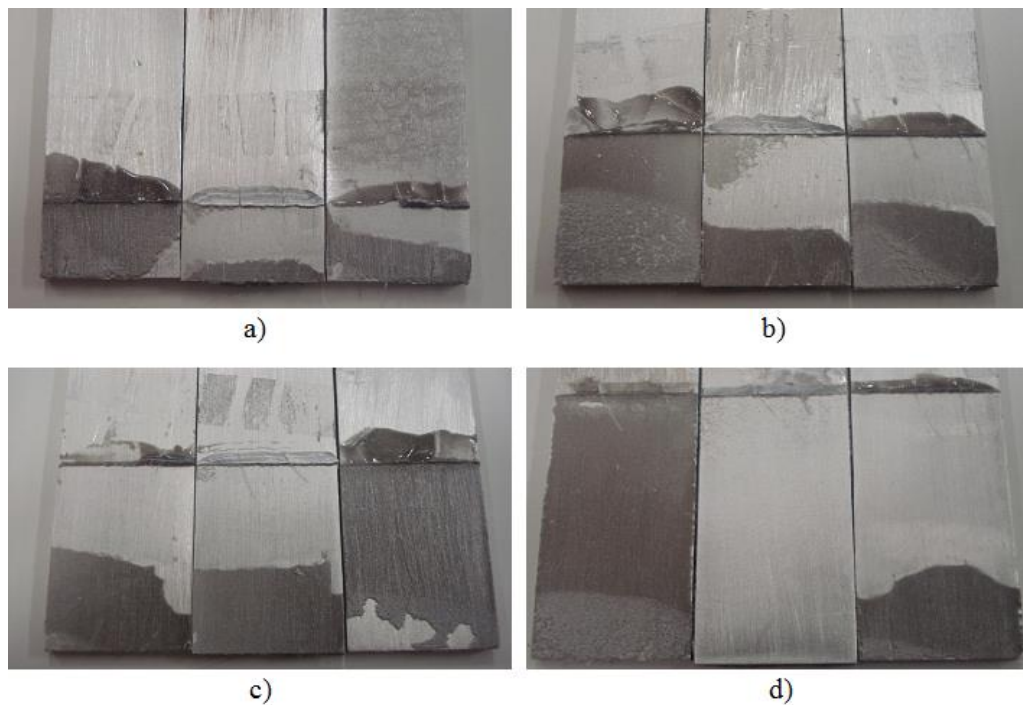


Figura 105 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo Araldite® AV138 para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [2].

Analisando a **Figura 105**, que apresenta as superfícies de rotura um provete representativo da cada valor de L_0 , observa-se que ocorreu uma rotura coesiva em todos, apesar da distribuição de adesivo não ser uniforme nas superfícies entre os substratos de cada provete, sendo essa assimetria de

distribuição de adesivo mais notória na junta com $L_0=50$ mm. Tal sucede-se porque a rotura ocorreu na proximidade da interface adesivo/substrato, deixando uma fina película de adesivo em algumas das superfícies da junta e uma camada mais espessa nas restantes.

A **Figura 106** mostra os modos de rotura obtidos para as JSD ensaiadas com o adesivo Araldite® 2015, para os quatro valores de L_0 .

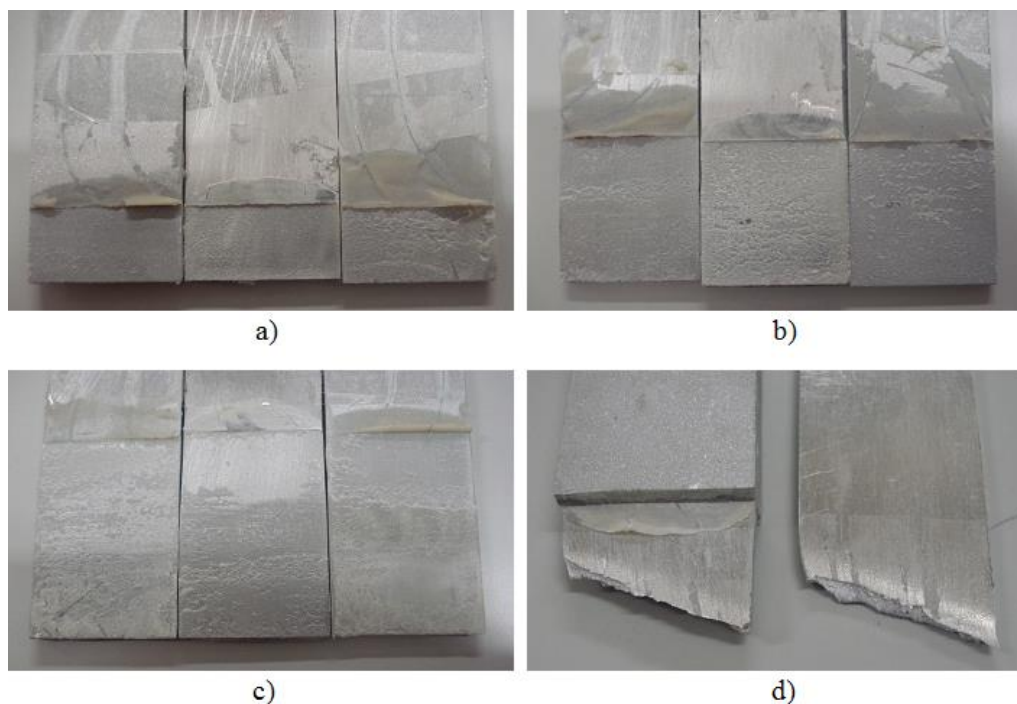


Figura 106 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo Araldite® 2015 para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [2].

Observando a **Figura 106**, que representa uma superfície de rotura representativa de cada valor de L_0 , registam-se, à semelhança do que aconteceu com as JSD ensaiadas com o Araldite® AV138, roturas coesivas sem plastificação dos substratos para os provetes com $L_0=12,5$ mm. No caso das juntas com $L_0=25$ mm e $L_0=37,5$ mm, registou-se rotura coesiva do adesivo, mas com plastificação extensa nos substratos. Por outro lado, nas juntas com $L_0=50$ mm, verificou-se rotura dos substratos (**Figura 106 d**). Tal aconteceu porque a resistência do adesivo foi de maior magnitude comparativamente à resistência do substrato [13].

As seguintes figuras representam as superfícies de rotura dos provetes JSD ensaiados com o adesivo SikaForce® 7752 para os diversos valores de L_0 .



Figura 107 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo SikaForce® 7752 para valores de $L_0=12,5$ mm.

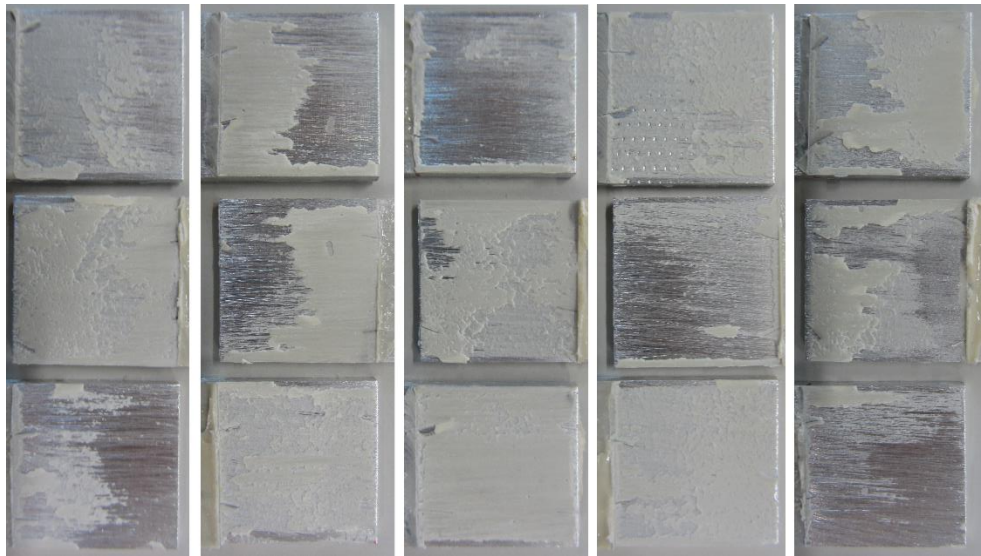


Figura 108 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo SikaForce® 7752 para valores de $L_0=25$ mm.

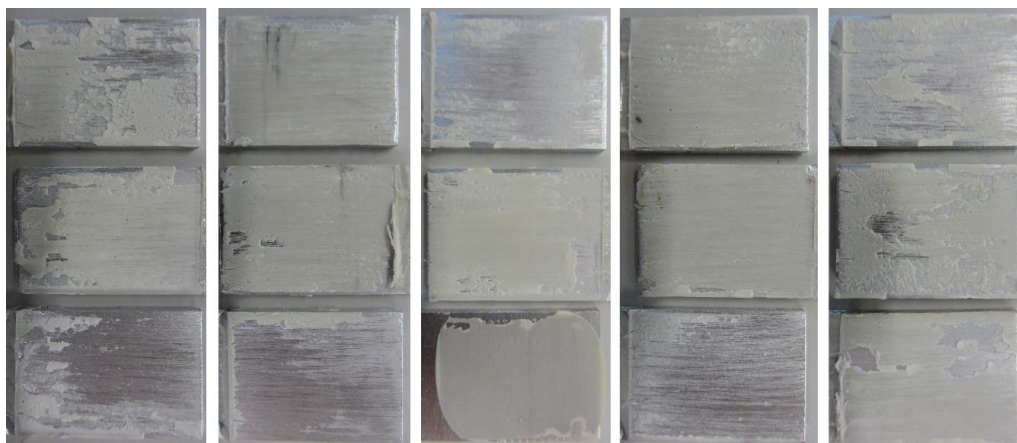


Figura 109 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo SikaForce® 7752 para valores de $L_0=37,5$ mm.

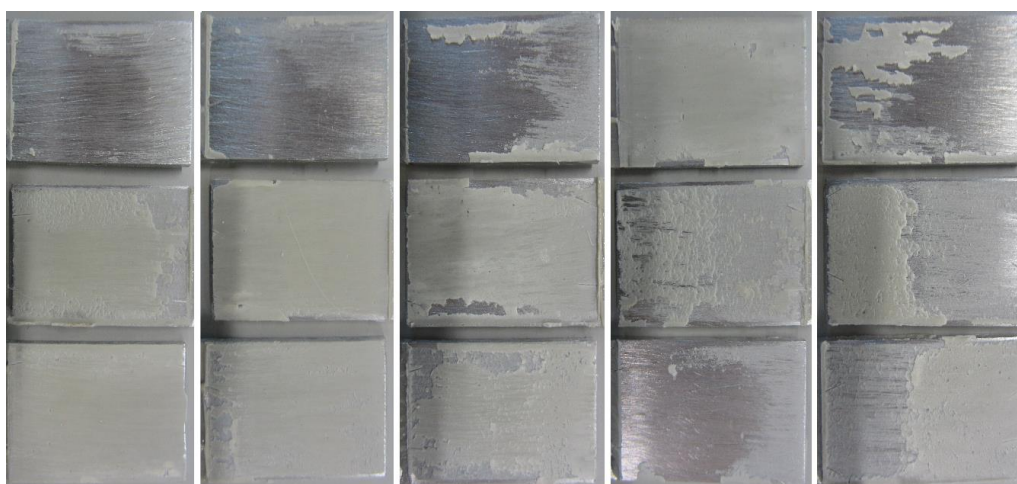


Figura 110 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo SikaForce® 7752 para valores de $L_0=50$ mm.

Fazendo uma análise da **Figura 107** à **Figura 110** observa-se que, à semelhança do que se sucedeu com as JSD ensaiadas com os dois adesivos anteriores, todos os provetes incorreram também em roturas coesivas. De facto, denota-se igualmente uma remanescência de adesivo aproximadamente equitativa entre as superfícies dos substratos de cada provete, à semelhança do que se verificou com as JSD testadas com o adesivo Araldite® 2015 para os valores de $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$ mm e $L_0=37,5$ mm. Ainda assim registaram-se alguns casos pontuais de provetes em que uma das superfícies dos substratos apresenta apenas uma fina película de adesivo, devido ao facto da rotura ocorrer na proximidade da interface adesivo/substrato. No entanto, a boa preparação das superfícies durante o fabrico das JSD conduziu a uma excelente adesão, o que permitiu roturas coesivas em todos os provetes.

3.4.4.3 Resistência das JSD

A **Tabela 18** apresenta a evolução de $P_{\text{máx méd}}$ das JSD com o adesivo Araldite® AV138 em função do valor de L_0 . Verifica-se que o maior aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ entre 2 juntas consecutivas ocorre para as juntas com $L_0=12,5$ mm e com $L_0=25$ mm, com um valor de 32,7%. De seguida, entre as juntas com $L_0=25$ mm e com $L_0=37,5$ mm ocorre um aumento de 3,4%, e um decréscimo deste para 1,9% entre as últimas 2 juntas com maiores valores de L_0 . A maior dispersão de valores de $P_{\text{máx méd}}$ ocorre nas juntas ensaiadas com $L_0=25$ mm, com um valor de 984,9 N. O aumento percentual total de $P_{\text{máx méd}}$ entre as juntas com maior e menor valor de L_0 é de 39,9%. Denota-se que $P_{\text{máx méd}}$ nunca evolui de forma linear com o incremento do valor de L_0 .

Tabela 18 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_0 de JSD com o adesivo Araldite® AV138 [2].

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
$P_{\text{máx méd}}$ [N]	12141,4	16116,5	16671,2	16980,8
Desvio Padrão [N]	664,1	984,9	23,1	724,8
Aumento de $P_{\text{máx méd}}$ [%]	-	32,7	3,4	1,9

Na **Tabela 19** observa-se a variação de $P_{\text{máx}}$ em função dos valores de L_0 para o adesivo Araldite® 2015. Denota-se um aumento acentuado de $P_{\text{máx méd}}$ entre as juntas com $L_0=12,5$ mm e $L_0=25$ mm (99,3%), decrescendo este para as juntas com $L_0=25$ mm e $L_0=37,5$ mm (7,1%), passando a negativo entre as juntas com valores de $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm (-1,0%). De notar que a maior dispersão de valores de $P_{\text{máx méd}}$ ocorre nas juntas ensaiadas com $L_0=25$ mm, assumindo esta um valor de 836,5 N. Neste caso em particular, o incremento de valores de L_0 não se traduziu sempre num aumento de valores de $P_{\text{máx méd}}$, verificando-se um decréscimo percentual de $P_{\text{máx méd}}$ de -1,0% entre as juntas com $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm. Isto deve-se apenas à variação estatística na rotura por tração dos substratos entre estas 2 configurações de junta. Com este adesivo verifica-se um aumento percentual total de $P_{\text{máx méd}}$ de 111,3%, entre os valores limite de L_0 . Neste caso a rotura dos provetes rege-se pela plastificação generalizada ou rotura dos substratos, com a exceção da série de provetes com $L_0=12,5$ mm, onde a rotura é coesiva no adesivo.

Tabela 19 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_O de JSD com o adesivo Araldite® 2015 [2].

L_O	12,5	25	37,5	50
$P_{\text{máx méd}}$ [N]	11405,4	22732,6	24349,2	24104,4
Desvio Padrão [N]	234,5	836,5	557,5	188,6
Aumento de $P_{\text{máx méd}}$ [%]	-	99,3	7,1	-1,0

A **Tabela 20** evidencia a evolução de $P_{\text{máx méd}}$ das JSD em função do valor de L_O para o adesivo Sikaforce® 7752. Observa-se um aumento percentual significativo de $P_{\text{máx méd}}$ de 101,0% entre as juntas com $L_O=12,5$ mm e com $L_O=25$ mm, o de maior intensidade, seguido por um aumento menor de 49,6% entre as juntas com valores de $L_O=25$ mm e $L_O=37,5$ mm, culminando no menor aumento de 9,6% entre as juntas com $L_O=37,5$ mm e $L_O=50$ mm. Verifica-se um aumento percentual total de $P_{\text{máx méd}}$ entre $L_O=50$ mm e $L_O=12,5$ mm de 229,5%, o maior dos três adesivos ensaiados, à semelhança do que também aconteceu com o mesmo adesivo nas JSS. Denota-se também neste adesivo que o valor de L_O tem maior influência no aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ do que com os restantes adesivos. Neste caso, para o conjunto de JSD ensaiadas com valores de $L_O=50$ mm, a rotura dos provetes rege-se pela cedência generalizada dos substratos, que induziu a rotura coesiva do adesivo. Este modo de rotura contrasta com rotura observada para as outras configurações de junta, que sofreram rotura tipicamente sem plastificação generalizada dos substratos.

Tabela 20 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_O de JSD com o adesivo Sikaforce® 7752.

L_O	12,5	25	37,5	50
$P_{\text{máx méd}}$ [N]	7276,4	14622,8	21872,6	23973,4
Desvio Padrão [N]	230,2	635,5	1210,1	387,8
Aumento de $P_{\text{máx méd}}$ [%]	-	101,0	49,6	9,6

A **Figura 111** resume o aumento de $P_{\text{máx méd}}$ em função de L_O para os três adesivos ensaiados com os desvios padrão associados.

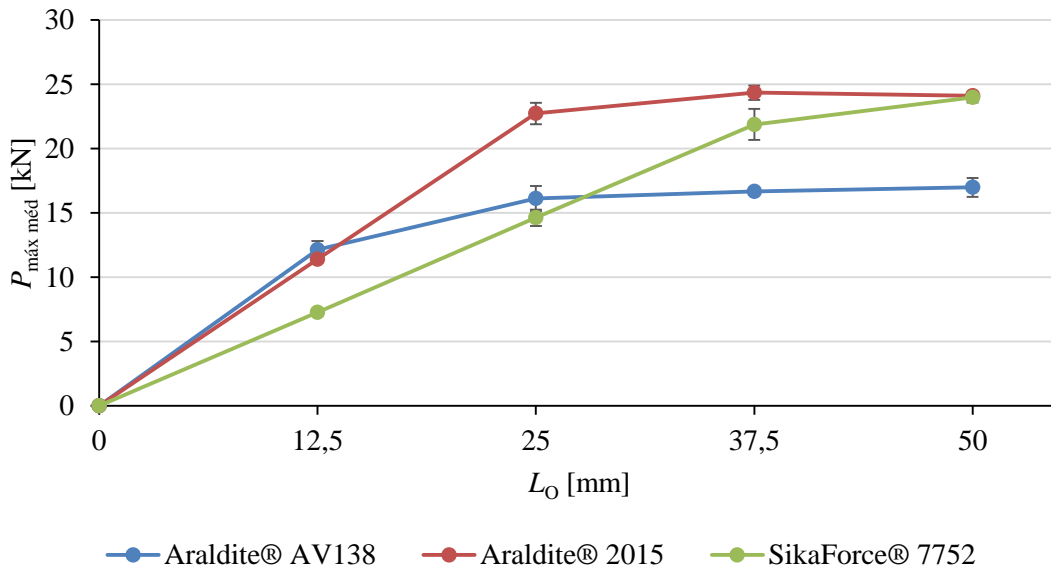


Figura 111 – $P_{\text{máx méd}}$ em função de L_0 para cada adesivo ensaiado em JSD.

Para $L_0=12,5$ mm, as JSD com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 revelam-se as mais resistentes, ambas com cargas de rotura na ordem dos 12 kN, ao passo que a junta com o SikaForce® 7752 é a que apresenta a menor resistência, na ordem dos 7,5 kN. Este último adesivo demarca-se negativamente dos primeiros dois adesivos com uma variação percentual de -66,9% e de -56,7%, respetivamente. Para o valor subsequente de L_0 (25 mm), a junta com o adesivo Araldite® 2015 destaca-se das restantes, com uma resistência de ≈ 22 kN, enquanto as juntas ensaiadas com o Araldite® AV138 e SikaForce® 7752 atingem valores de resistência próximos, entre os 14,5 kN e 16,5 kN, pela mesma ordem. Deste modo o adesivo Araldite® 2015 superioriza-se aos restantes adesivos com uma diferença percentual de 41,1% e de 55,5%, respetivamente. Para o valor L_0 de 25 mm e subsequentes denota-se que a evolução de $P_{\text{máx méd}}$ das juntas com o adesivo Araldite® AV138 é praticamente nula, permanecendo na casa dos 16 kN. No caso de $L_0=37,5$ mm ocorre uma aproximação de resistência entre o adesivo SikaForce® 7752 e Araldite® 2015, que registam valores de $P_{\text{máx méd}}=22$ kN e $P_{\text{máx méd}}=24$ kN, respetivamente, enquanto o Araldite® AV138 fica aquém dos restantes adesivos, com $P_{\text{máx méd}}\approx 16$ kN. Assim constata-se uma diferença percentual deste último adesivo relativamente ao SikaForce® 7752 e Araldite® 2015 de 31,2% e de 46,1%, respetivamente. Para o valor maior de L_0 considerado (50 mm), os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 equiparam-se em termos de resistência, ambos situados na ordem dos 24 kN, enquanto o Araldite® AV138 permanece praticamente sem alterações. Desta forma, verifica-se uma diferença percentual do Araldite® 2015 relativamente aos restantes de 0,5% (SikaForce® 7752) e de 42,0% (Araldite® AV138). De salientar que a resistência das JSD testadas com o adesivo Araldite® 2015 ($L_0=25$ mm, $L_0=37,5$ mm, $L_0=50$ mm) e SikaForce® 7752 ($L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm) é limitada pela resistência do material dos substratos.

No que respeita à proporcionalidade das curvas representadas na **Figura 111**, nenhum dos adesivos apresenta uma proporcionalidade total da resistência em função dos valores de L_0 , muito em virtude da plastificação dos substratos. O adesivo Araldite® AV138 não apresenta proporcionalidade de todo. O Araldite® 2015 apresenta proporcionalidade até $L_0=25$ mm, enquanto o SikaForce® 7752 regista proporcionalidade de valores até $L_0=37,5$ mm.

À semelhança das JSS, a maior variação de $P_{\text{máx méd}}$ entre valores limite de L_0 ocorre também nas juntas ensaiadas com o SikaForce® 7752, dada a sua elevada ductilidade, ao passo que a menor variação de $P_{\text{máx méd}}$ é novamente atribuída ao adesivo Araldite® AV138. Tal sucede-se devido à reduzida capacidade de plastificação do adesivo Araldite® AV138, decorrente da referida fragilidade, implicando uma rotura da junta assim que são atingidas as tensões limite nas extremidades da mesma [83]. A maior dispersão de valores de $P_{\text{máx méd}}$ ocorre para os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, com preponderância deste último adesivo.

4 Trabalho numérico

Neste capítulo descreve-se o trabalho numérico realizado. Referem-se os aspetos relevantes da modelação das JSS e JSD, 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 fronteira e de carregamento impostas nos modelos. Apresenta-se também o MDC utilizado no ABAQUS®, o processo de obtenção das leis coesivas em modo puro pelo método direto e as respetivas leis coesivas obtidas. De seguida, descreve-se o comportamento das juntas ao nível das tensões instaladas, é utilizada esta informação para explicar a resistência experimental das juntas e apresenta-se a resistência de cada geometria de junta em função de L_0 e adesivo para as 3 formas de leis coesivas e respetiva comparação com os valores experimentais. Por último, analisa-se de forma crítica os resultados obtidos.

4.1 Condições da análise numérica

A análise numérica foi realizada no ABAQUS®. Este *software* baseia-se no método de EF e foi escolhido pela possibilidade de utilização de um módulo integrado de MDC que permite simular o dano e prever a resistência das JSS e JSD.

Em primeiro lugar foram criadas as geometrias das JSS e JSD, representando as juntas em 2D e definindo as respetivas dimensões de acordo com o apresentado no **subcapítulo 3.2.1**. 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 112**). Os aderentes foram modelados como uma camada elasto-plástica contínua de elementos sólidos, enquanto para a camada de adesivo foram utilizados elementos coesivos (**Figura 113**). As juntas foram modeladas em 2D, com recurso a elementos sólidos de estado plano de deformação para a modelação dos aderentes (CPE4 do ABAQUS®). 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 [89]. No MDC utilizado foram consideradas não linearidades geométricas para efeitos de análise de rotura.

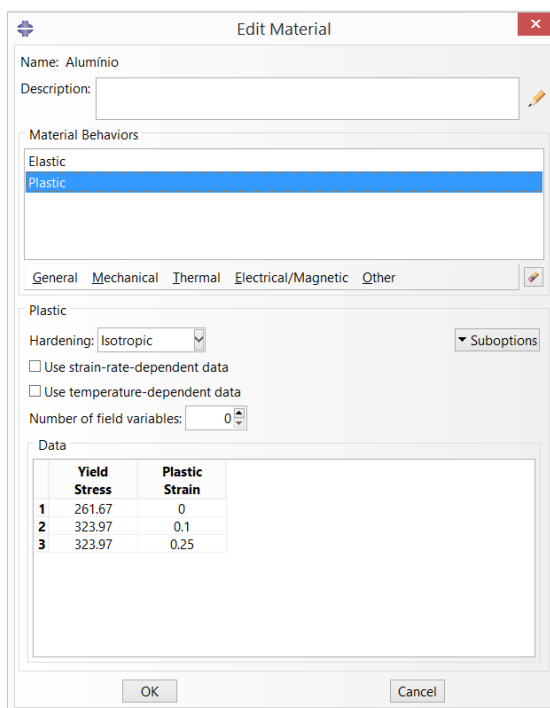


Figura 112 – Introdução de propriedades de plásticas para os aderentes de alumínio.

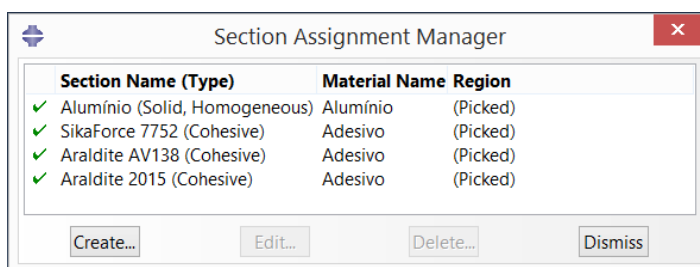


Figura 113 – Atribuição de secções sólidas e coesivas no ABAQUS® aos materiais constituintes das juntas.

Foram consideradas malhas distintas para as análises de rotura e tensões. As malhas para o estudo de tensões foram definidas com elementos na camada adesiva de dimensões de 0,02 mm por 0,02 mm. Por outro lado, a malha para análise de rotura por MDC é menos refinada, com elementos na zona do adesivo de dimensões de 0,2 mm por 0,2 mm. Optou-se por reduzir o número de elementos em zonas menos relevantes, agilizando o processo de simulação. Este procedimento permite reduzir o tempo de computação, sem comprometer os resultados obtidos, principalmente nas zonas com maiores gradientes de tensões. Em ambas as análises, de rotura e tensões, considerou-se a gradação das dimensões dos elementos de malha ao longo da junta, de modo a obter maior refinamento nos locais de maiores gradientes de tensões, como as extremidades de sobreposição. Deste modo, utilizou-se o *bias ratio* (rácio de refinamento crescente ao longo de uma aresta do modelo) para aumentar o refinamento nestas zonas. O refinamento foi efetuado em três conjuntos de arestas distintos para as JSS e JSD: comprimento livre dos substratos, zona de sobreposição e espessura

dos substratos, conforme mostrado entre a **Tabela 21** e a **Tabela 24**. Os valores dos parâmetros de variação de dimensões de elementos são os mesmos para as JSS e JSD, apenas diferindo na espessura do substrato interior das JSD, como evidenciado na **Tabela 24**, uma vez que foram consideradas condições de simetria, o que conduziu ao ajuste do número de elementos e *bias ratio* neste substrato. A **Tabela 21**, **Tabela 22**, **Tabela 23** e **Tabela 24**, demonstram os valores atribuídos aos parâmetros por conjunto de arestas e tipo de junta. A quantificação do número de elementos e *bias ratio* para a análise de rotura é apresentada nas referidas tabelas sem parêntesis, enquanto a quantificação dos mesmos parâmetros para a análise de tensões apresenta-se entre parêntesis.

Tabela 21 – Parametrização da malha em função de L_0 no comprimento livre dos substratos em JSS e JSD.

JSS e JSD				
L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Número de elementos	150 (875)	130 (800)	120 (750)	110 (700)
Bias ratio	6 (12)	6 (12)	6 (12)	6 (12)

Tabela 22 – Parametrização da malha em função de L_0 na zona de sobreposição em JSS e JSD.

JSS e JSD				
L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Número de elementos	40 (250)	80 (500)	120 (750)	160 (1000)
Bias ratio	2,5 (5)	2,5 (5)	2,5 (5)	2,5 (5)

Tabela 23 – Parametrização da malha em função de L_0 na espessura dos substratos em JSS.

JSS				
L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Número de elementos	6 (25)	6 (25)	6 (25)	6 (25)
Bias ratio	5 (20)	5 (20)	5 (20)	5 (20)




Tabela 24 – Parametrização da malha em função de L_0 na espessura do substrato interior em JSD.

JSD				
L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Número de elementos	4 (13)	4 (13)	4 (13)	4 (13)
Bias ratio	3 (20)	3 (20)	3 (20)	3 (20)



Na **Tabela 24** apresentam-se apenas os parâmetros da malha para o substrato interior, uma vez que para os substratos exteriores são utilizados os mesmos que nas JSS, ou seja, os apresentados na **Tabela 23**.

De modo a concretizar a operação de refinamento e a garantir o sentido de refinamento pretendido, foi dada uma orientação ao *bias ratio* para cada conjunto de arestas de refinamento. Desta forma, no comprimento livre dos substratos (que não estabelecem contacto com o adesivo), o refinamento foi atribuído no sentido da zona de ligação, como demonstrado na **Figura 114**.

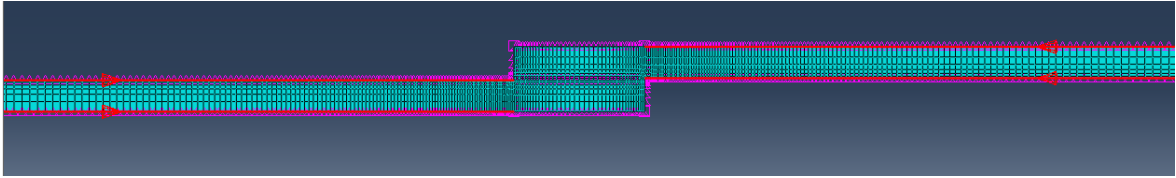


Figura 114 – Sentido de refinamento no comprimento livre dos substratos em JSS e JSD.

Na direção da espessura dos substratos das JSS e JSD foi considerado um refinamento crescente de malha através do *bias ratio* no sentido da camada de adesivo, como representado na **Figura 115** e **Figura 116**, respetivamente em cada tipo de junta.

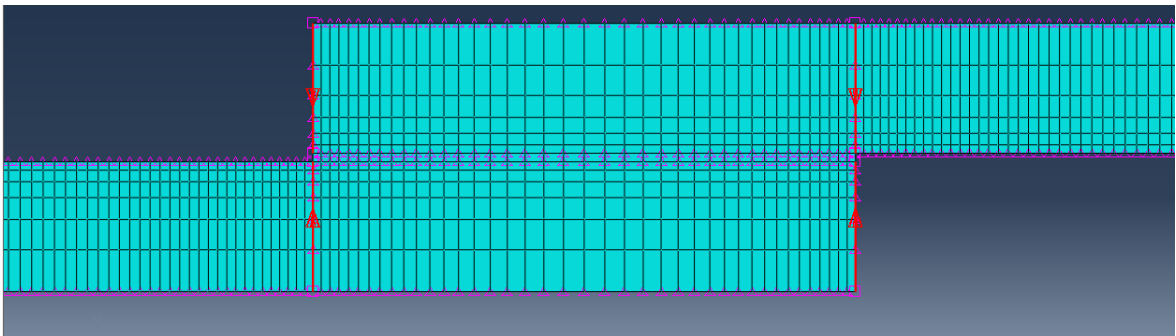


Figura 115 – Sentido de refinamento da malha na espessura dos substratos em JSS.

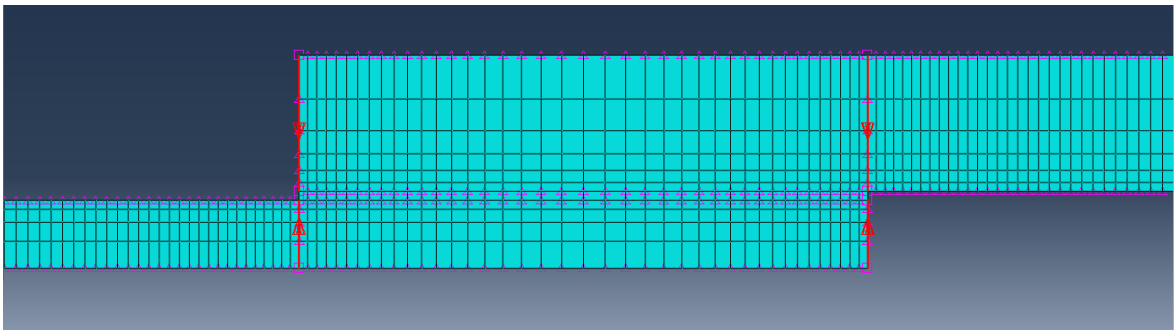


Figura 116 – Sentido de refinamento da malha na espessura dos substratos em JSD.

Por último, na região da sobreposição, o sentido crescente de refinamento de malha foi atribuído desde o centro da ligação adesiva até às extremidades da mesma, como representado na **Figura 117**.

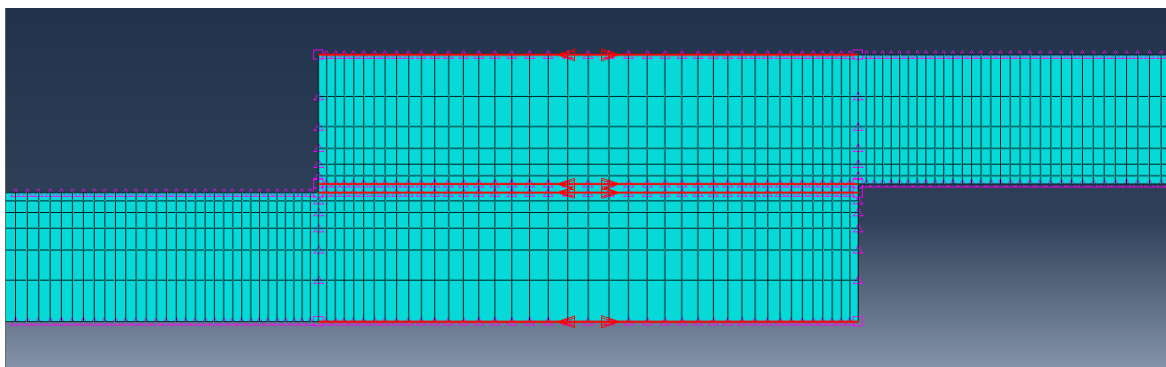


Figura 117 – Sentido de refinamento da malha na região da sobreposição dos substratos em JSS e JSD.

Dos refinamentos efetuados obtiveram-se os seguintes resultados no que concerne ao número de elementos totais das malhas, por tipo de junta e valor de L_0 (**Tabela 25**). A quantificação desses valores na análise de rotura é apresentada na referida tabela sem parêntesis, enquanto a quantificação para a análise de tensões apresenta-se entre parêntesis.

Tabela 25 – Totalidade de elementos por valor de L_0 e tipo de junta.

		L_0			
		12,5	25	37,5	50
Nº de elementos	JSS	2320 (58750)	2600 (70000)	3000 (82500)	3400 (95000)
	JSD	1940 (45250)	2280 (54400)	2620 (64500)	2860 (74600)

De modo a simular as condições reais dos ensaios experimentais, foram aplicadas as condições fronteira e de carregamento aos modelos de JSS e JSD representadas na **Figura 118** e **Figura 119**, respetivamente.

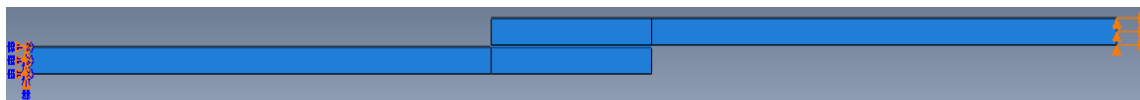


Figura 118 – Condições fronteira e de carregamento aplicadas às JSS no ABAQUS®.



Figura 119 – Condições fronteira e de carregamento aplicadas às JSD no ABAQUS®.

As JSS 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. Para as JSD, as condições fronteira e de carregamento impostas são idênticas às utilizadas nas JSS, com a adição de uma condição fronteira de simetria no substrato interior (a vermelho), de modo a permitir simular apenas metade da junta.

A **Tabela 26** mostra os deslocamentos impostos aos modelos das juntas no ABAQUS® de modo a que a carga de rotura dos adesivos ($P_{\text{máx}}$) fosse sempre atingida, permitindo a comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ numéricos com os obtidos experimentalmente.

Tabela 26 – Deslocamentos impostos nos modelos de JSS e JSD em função do adesivo utilizado e valor de L_0 .

		Deslocamento [mm]					
		JSS			JSD		
		Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
L_0 [mm]	12,5	0,3	0,5	0,6	0,3	0,4	0,6
	25	0,3	0,6	0,8	0,35	1,5	0,8
	37,5	0,3	0,8	1	0,4	7	1
	50	0,3	1	1	0,4	10	6

Na **Tabela 26** denota-se uma discrepância elevada entre os valores de deslocamento necessários impor às JSD ensaiadas com o Araldite® 2015 e os restantes adesivos, para o valor de $L_0=37,5$ mm. De facto, para a JSD em questão, impôs-se um deslocamento de 7 mm, contrastando com os restantes valores de deslocamento impostos às JSD com o Araldite® AV138 e SikaForce® 7752. Essa discrepância torna-se necessária devido à plastificação que os substratos de alumínio sofreram quando ensaiados com o adesivo Araldite® 2015.

4.2 Modelo de dano coesivo

Os MDC baseiam-se numa relação entre as tensões e deslocamentos relativos (tração ou corte) que ligam nós homólogos de elementos coesivos para assim simular o comportamento elástico até à resistência máxima (t_n^0 em tração ou t_s^0 em corte) e subsequentemente a degradação das

propriedades dos materiais até à rotura [95]. Em função do comportamento do material ou da interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [96].

4.2.1 Modelos de dano triangular, trapezoidal e linear-exponencial

Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos coesivos, dos quais se destacam o triangular [97], linear parabólico [98], exponencial [99], polinomial [100] e trapezoidal [71]. Pela sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada [54]. No entanto, para este trabalho consideraram-se leis triangulares, trapezoidais e lineares-exponenciais para reproduzir o comportamento à tração e ao corte da camada adesiva. Na **Figura 44** estão representadas esquematicamente estas três formas de leis coesivas, com respetiva nomenclatura para as leis de tração e corte.

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 44 a)**, a lei linear-exponencial é linear até t_n^0 ou t_s^0 e, a partir deste ponto, ocorre um amaciamento exponencial até à rotura total. Esta forma de lei coesiva é uma aproximação da lei exponencial completa [101]. 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 MDC em tração ou corte, respetivamente. Nas leis coesivas apresentadas, o comportamento linear elástico é definido por uma matriz que relaciona trações normais e de corte da seguinte forma

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}\boldsymbol{\varepsilon}, \quad (35)$$

onde ε_n e ε_s são a deformação normal e de corte, pela mesma ordem. A matriz \mathbf{K} , representada na equação (35), contém os parâmetros de rigidez (K_{nn} , K_{ns} e K_{ss}). Segundo Campilho et al. [102], 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 MDC são definidas pelo *software* Abaqus® pela 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 120** permite visualizar o significado de d_n para a lei

triangular, que pode ser extrapolado para o cálculo de d_s [103]. Por esta formulação t_n e t_s são definidos como

$$\begin{aligned} t_n &= (1-d_n)t_n^{\text{und}} \\ t_s &= (1-d_s)t_s^{\text{und}} \end{aligned} \quad (36)$$

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.

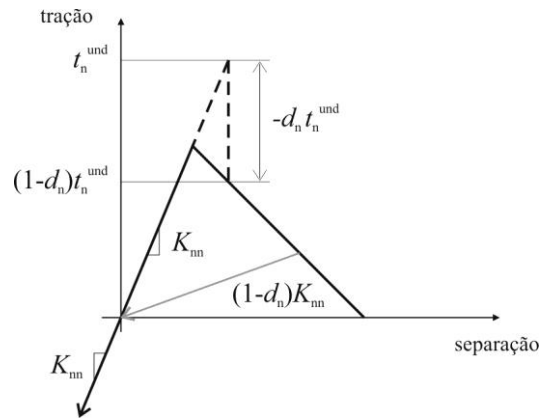


Figura 120 – Definição da variável de dano em tração, d_n , no Abaqus® (que pode ser extrapolada para d_s) [27].

Tendo como base estes pressupostos, a expressão genérica (em tração ou corte) de $d_{n,s}$ para a lei triangular assume a forma [103]

$$d_{n,s} = \frac{\delta_{n,s}^f (\delta_{n,s} - \delta_{n,s}^0)}{\delta_{n,s} (\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^0)} \quad (37)$$

Para a lei exponencial, a expressão de $d_{n,s}$ é [103]

$$d_{n,s} = 1 - \frac{\delta_{n,s}^0}{\delta_{n,s}} \left(1 - \frac{1 - e^{\left(-\alpha \left(\frac{\delta_{n,s} - \delta_{n,s}^0}{\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^0} \right) \right)}}{1 - e^{(-\alpha)}} \right) \quad (38)$$

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 ($\delta_{n,s}^0 < \delta \leq \delta_{n,s}^s$; **Figura 44**) e na região de amaciamento ($\delta_{n,s}^s < \delta \leq \delta_{n,s}^f$; **Figura 44**), como seguidamente se apresenta [103]

$$\left| \begin{array}{ll} d_{n,s} = 1 - \frac{\delta_{n,s}^0}{\delta_{n,s}} & \text{se } \delta_{n,s}^0 < \delta \leq \delta_{n,s}^s \\ d_{n,s} = 1 - \frac{m\delta_{n,s} + b}{K_{nn,ss} \delta_{n,s}} & \text{se } \delta_{n,s}^s < \delta \leq \delta_{n,s}^f \end{array} \right. \quad (39)$$

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 [103]

$$m = \frac{-t_{n,s}^0}{\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^s} \quad ; \quad b = t_{n,s}^0 - m\delta_{n,s}^s \quad (40)$$

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 $\delta_{n,s}^f$ [104], a utilização de dados experimentais de deformação de rotura [105], 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) [106]. Neste trabalho foi adotada a primeira abordagem, considerando $\delta_{n,s}^s/\delta_{n,s}^f=0,7$.

4.3 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 [105]. 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 [107, 108]. 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, conforme descrito no **subcapítulo 2.4.1.3**, consistiu na diferenciação de uma curva polinomial ajustada às leis experimentais $G_I-\delta_n$ e $G_{II}-\delta_s$, obtidas respetivamente da aplicação das equações (15) e (28). Deste modo, no **subcapítulo 4.3.1**

apresentam-se estas leis para cada modo de sollicitação. No **subcapítulo 4.3.2** apresentam-se as leis coesivas experimentais para as mesmas condições. As leis coesivas triangulares, trapezoidais e lineares-exponenciais serão alvo de estudo posteriormente no **subcapítulo 4.4.3**.

O método direto permitiu extrair os valores médios dos parâmetros coesivos referidos, usados para formular as leis coesivas triangulares, trapezoidais e lineares-exponenciais, com recurso a uma sub-rotina em Matlab® desenvolvida para o efeito num trabalho anterior [27]. A validação das leis coesivas obtidas consistiu na sua introdução nos modelos numéricos de JSS e JSD, de modo a prever a resistência destas juntas em modo misto. As leis foram validadas para as referidas juntas considerando os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, para $L_0=12,5, 25, 37,5$ e 50 mm.

4.3.1 Leis experimentais $G_I-\delta_n$ e $G_{II}-\delta_s$

A **Figura 121** e **Figura 122** 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.

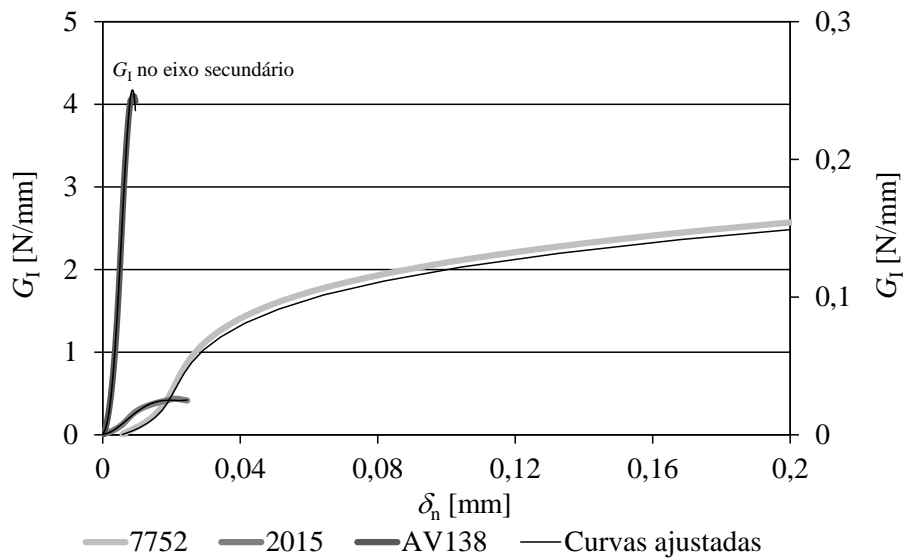


Figura 121 – Exemplos de leis experimentais $G_I-\delta_n$ para os adesivos testados, e respetivas curvas polinomiais ajustadas.

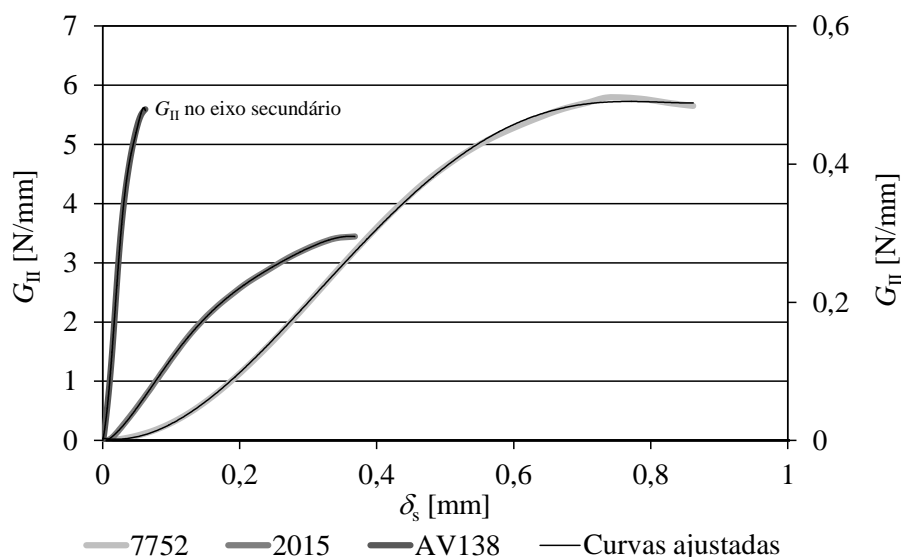


Figura 122 – Exemplos de leis experimentais G_{II} - δ_s para os adesivos testados, e respectivas curvas polinomiais ajustadas.

Na **Figura 121** e **Figura 122**, 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 121**, 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 2 adesivos.

Analisando ambas as figuras, denotam-se 3 fases distintas na evolução das curvas G_I - δ_n e G_{II} - δ_s . Numa primeira fase G_I/G_{II} aumenta 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 [67]. Na **Figura 121** e **Figura 122** 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 respetiva 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.

4.3.2 Leis coesivas $t_n-\delta_n$ e $t_s-\delta_s$

A **Figura 123** e **Figura 124** 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.

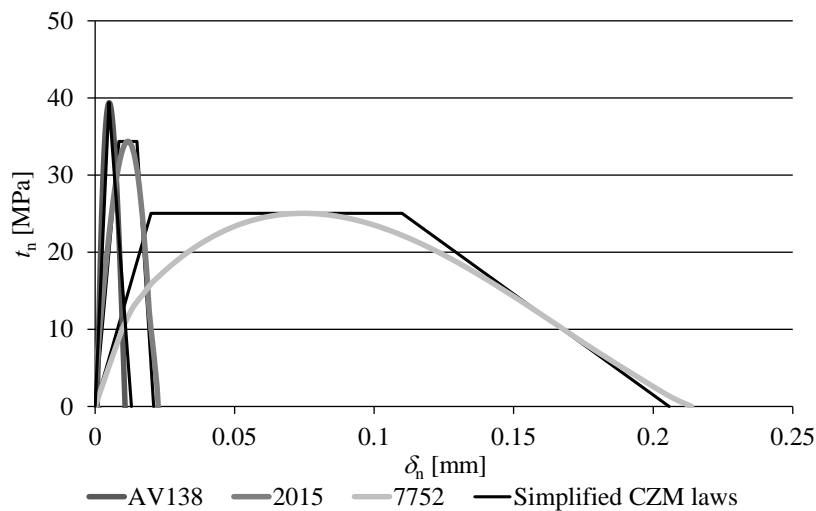


Figura 123 – Leis coesivas experimentais $t_n-\delta_n$ para os diversos adesivos, e aproximações triangular para o Araldite® AV138 e trapezoidais para os restantes.

Mediante o adesivo em questão, utilizam-se diferentes aproximações de modo a caracterizar de 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 3 adesivos ensaiados está de acordo com as propriedades dos mesmos apresentadas na **Tabela 2** a **Tabela 4**, 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.

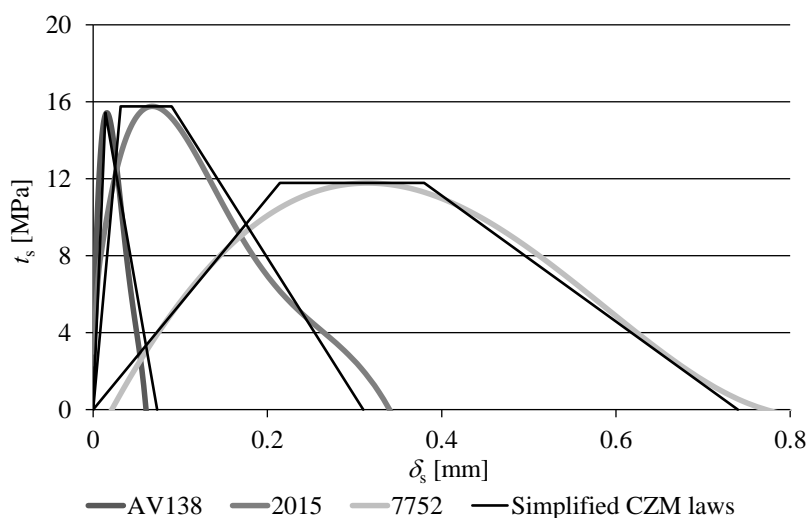


Figura 124 – Leis coesivas experimentais t_s - δ_s para os diversos adesivos, e aproximações triangular para o Araldite® AV138 e trapezoidais para os restantes.

4.4 Previsão do comportamento das juntas

Neste subcapítulo faz-se uma comparação entre as tensões σ_y e de τ_{xy} instaladas nas JSS e JSD, discutem-se os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente com base na análise das tensões e, por último, apresenta-se uma previsão de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

4.4.1 Análise de tensões nas juntas

Neste subcapítulo analisam-se as tensões instaladas em regime elástico nas JSS e JSD, comparando as tensões σ_y e τ_{xy} obtidas numericamente no ABAQUS®. A análise é realizada a meio da espessura de adesivo, para os diversos adesivos e valores de L_0 das juntas. Esta análise tem como objetivo compreender a influência de cada uma das configurações de junta na distribuição de tensões e resistência das juntas, auxiliando a fundamentar os resultados obtidos de $P_{m\acute{a}x}$. Os gráficos das tensões apresentados nos **subcapítulos 4.4.1.1** e **4.4.1.2** foram obtidos mediante um procedimento de normalização de tensões, que consistiu em dividir as tensões σ_y e τ_{xy} por $\tau_{m\acute{e}d}$ para cada valor de L_0 . O valor de L_0 também foi normalizado para x/L_0 (x representa a distância desde uma das extremidades de sobreposição), de tal forma que $0 \leq x/L_0 \leq 1$.

4.4.1.1 Tensões de arrancamento

A **Figura 125**, **Figura 126** e **Figura 127** apresentam as distribuições de tensões σ_y para as JSS, em função de L_0 . As tensões σ_y registam uma magnitude inferior a $\tau_{méd}$, com exceção das extremidades de ligação das juntas, em virtude de estas constituírem zonas de singularidade de tensão devido à rotação dos substratos [9, 109, 110]. Por causa desta rotação, nestas regiões geram-se tensões de tração, ao passo que nas zonas mais interiores se geram tensões de compressão. Isto verifica-se porque a deformação dos substratos durante a solitação provoca a deformação transversal da junta, o que resulta no tracionamento das extremidades da ligação adesiva e compressão na zona intermédia da mesma. A resistência destas juntas é significativamente afetada pelas tensões σ_y , dada a criticidade das mesmas para a ligação adesiva, pelo que estas podem conduzir à rotura precoce da junta [21, 111, 112].

O estudo paramétrico de L_0 demonstrou que os picos das tensões σ_y aumentaram com o incremento de L_0 . Na proximidade das singularidades observam-se picos compressivos de σ_y que também tendem a aumentar de intensidade com o aumento de L_0 , enquanto as tensões compressivas no sentido do interior da ligação tendem a diminuir. De referir que o aumento dos picos de tensão σ_y com o incremento de L_0 tende a diminuir a resistência média da junta na área de ligação, especialmente nas juntas com adesivos frágeis [113].

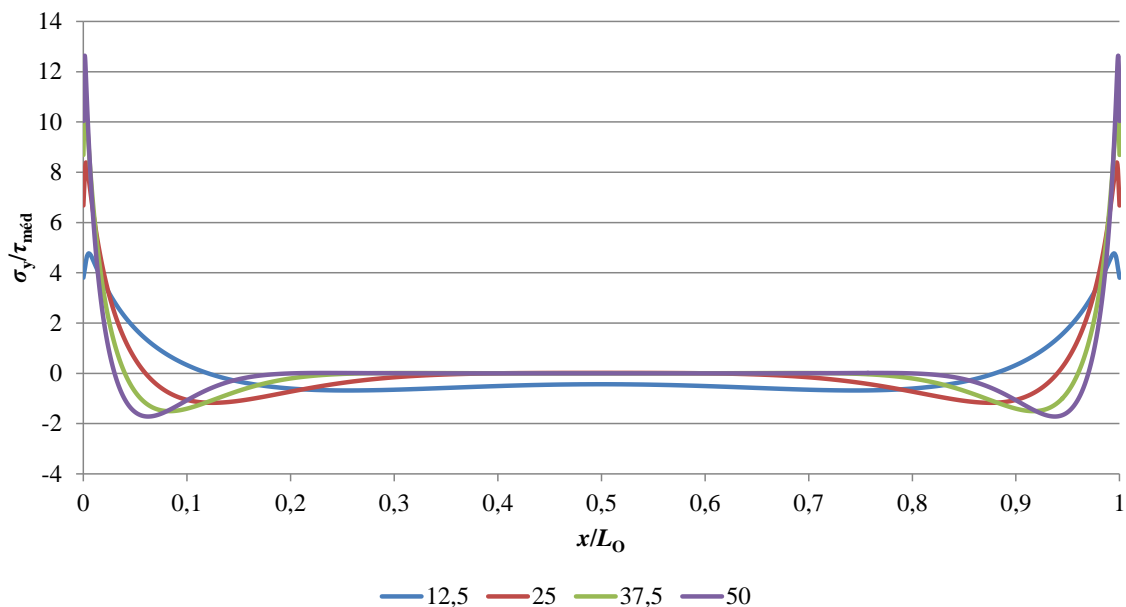


Figura 125 – Distribuição de tensões σ_y em JSS com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0 .

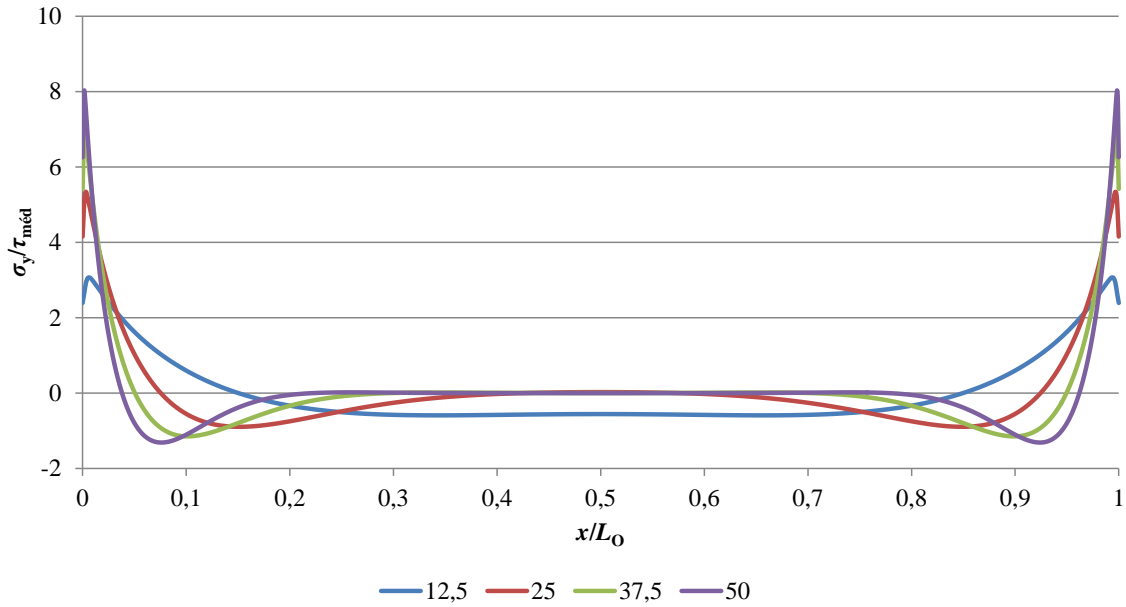


Figura 126 – Distribuição de tensões σ_y em JSS com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0 .

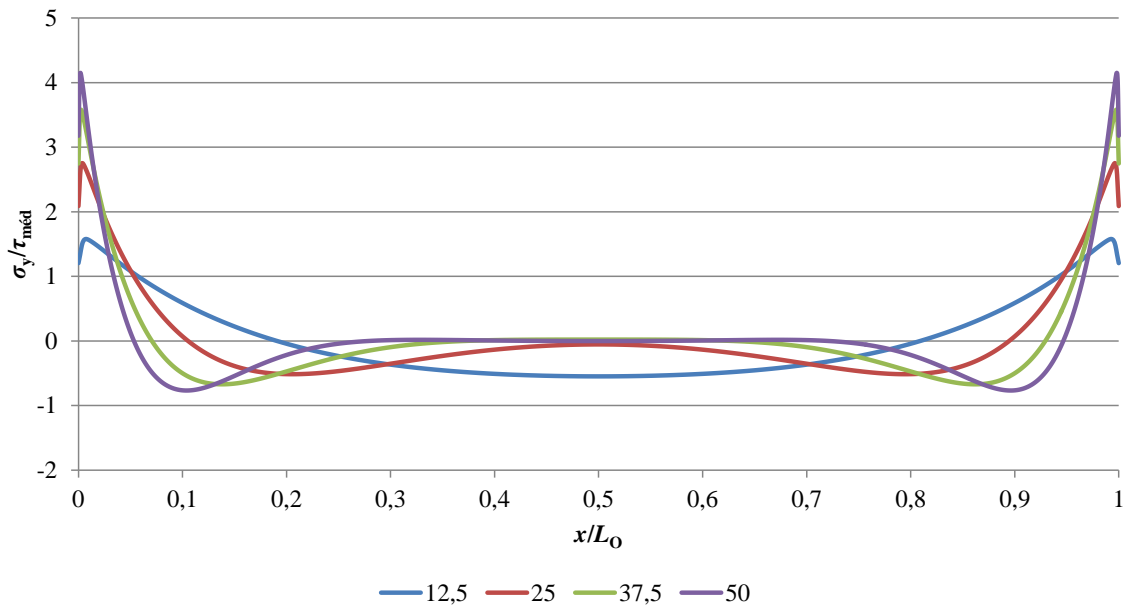


Figura 127 – Distribuição de tensões σ_y em JSS com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0 .

Observa-se que o adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta o maior gradiente de tensões σ_y para os diversos valores de L_0 . Isto justifica-se pela sua superior rigidez, que influencia a distribuição de tensões na camada adesiva, e que pode induzir à rotura prematura da mesma. Por outro lado, os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 revelam distribuições de tensões mais uniformes.

Terminando, no contexto da análise das tensões σ_y , para o valor de $L_0=50$ mm, os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 apresentam valores de pico de tensão σ_y normalizada em tração de 12,6, 8,0 e de 4,1, respetivamente, o que condiz com a ordem decrescente de rigidez dos mesmos.

A **Figura 131**, **Figura 132** e **Figura 133** representam a distribuição das tensões σ_y para as JSD, e diversos adesivos e valores de L_0 . À semelhança das JSS, nestas juntas σ_y também regista uma magnitude inferior às tensões τ_{xy} , com exceção das extremidades da ligação devido à singularidade de tensão [9, 109, 110]. No entanto, o perfil de tensões das JSD não é totalmente semelhante ao das JSS. Na extremidade esquerda das JSD, correspondente à extremidade exterior da sobreposição, verificam-se picos de tração [114], e picos de compressão na extremidade interior da sobreposição [115]. Estas diferenças nos perfis de tensões devem-se sobretudo ao facto das JSD não apresentarem deflexão transversal do substrato interior devido ao carregamento simétrico [22, 116]. Isto promove uma redução generalizada das tensões de pico σ_y nas JSD em todos os valores de L_0 [24, 117]. Já os valores das tensões σ_y na região central são aproximadamente nulos, com gradientes crescentes para as extremidades da ligação com o incremento de L_0 , à semelhança das JSS. Deste modo, as tensões compressivas na extremidade interna das JSD, combinadas com tensões de pico σ_y inferiores na extremidade externa face às JSS, deixam antever benefícios significativos no que respeita à resistência da junta para a mesma área de ligação [115].

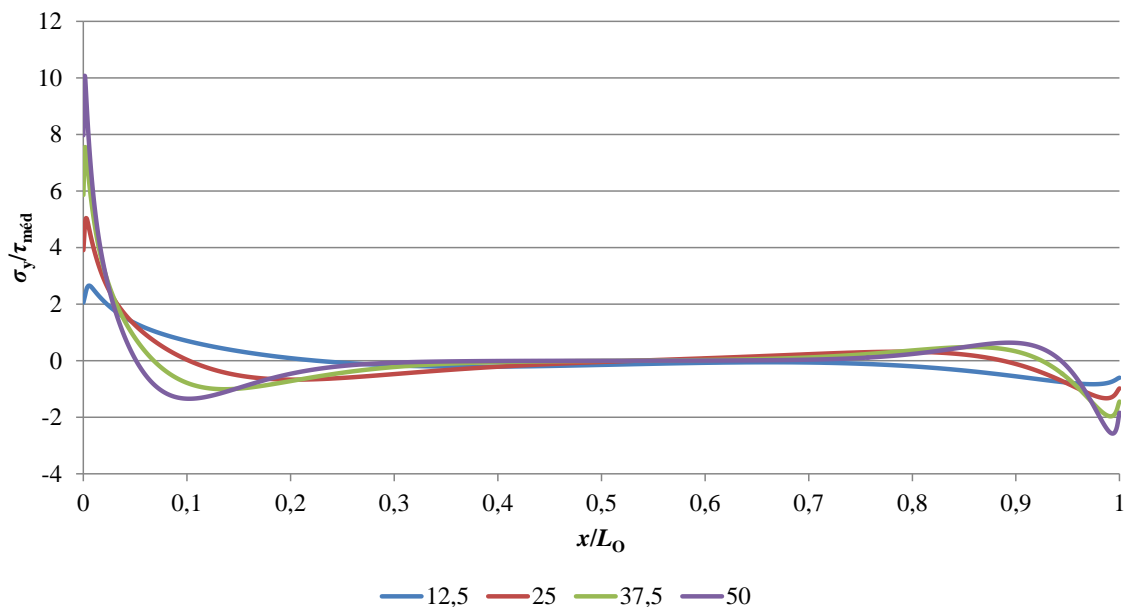


Figura 128 – Distribuição de tensões σ_y em JSD com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0 .

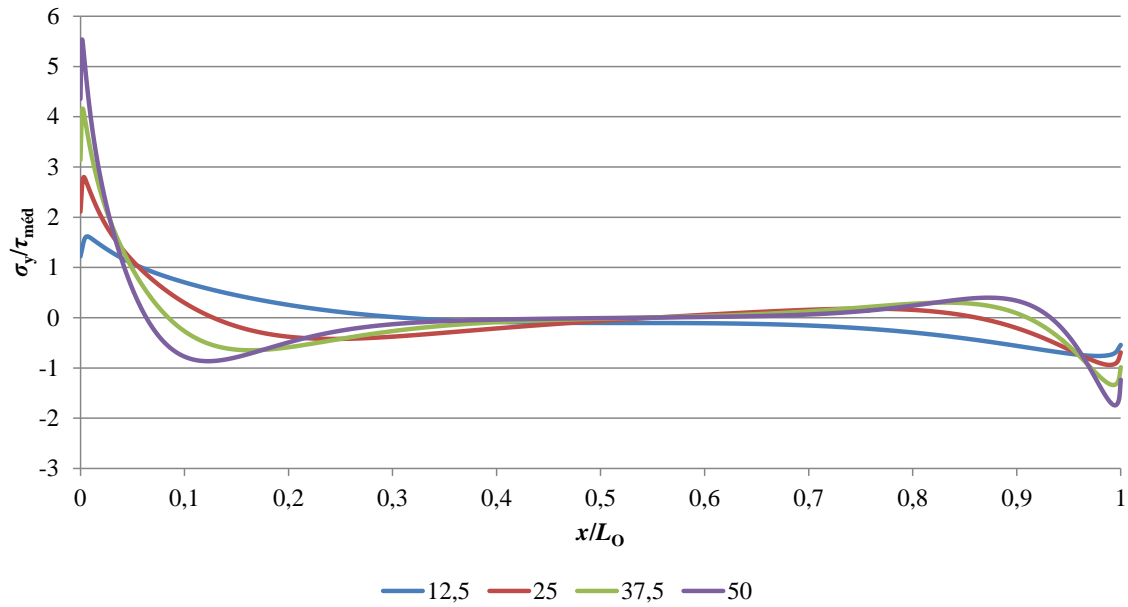


Figura 129 – Distribuição de tensões σ_y em JSD com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0 .

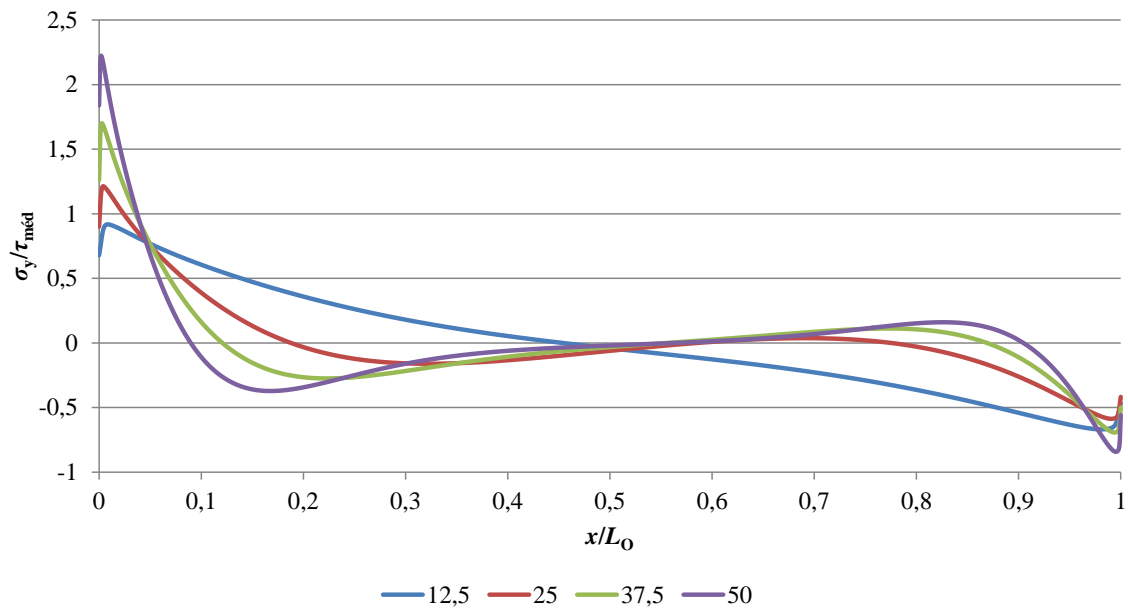


Figura 130 – Distribuição de tensões σ_y em JSD com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0 .

Fazendo uma analogia entre os três adesivos das JSD, denota-se que o adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta os valores de pico de tensão σ_y mais pronunciados na extremidade exterior. Isto verifica-se devido à elevada rigidez do adesivo, o que limita a uniformidade da distribuição de

tensões ao longo da sobreposição. Para além disso, como referido anteriormente para as JSS, uma elevada rigidez pode induzir à rotura prematura da junta.

Para o valor de $L_0=50$ mm, os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 apresentam respetivamente, valores de pico de tensão σ_y normalizados em tração de 10,0, 5,5 e de 2,2, o que condiz com a ordem decrescente de rigidez dos mesmos. Os valores de pico de tensão σ_y apresentados revelam um decréscimo, face aos homólogos das JSS, de aproximadamente 20,6%, 31,3% e de 46,3%, respetivamente.

4.4.1.2 Tensões de corte

Na **Figura 131**, **Figura 132** e **Figura 133** observam-se as distribuições de tensões τ_{xy} para os diversos adesivos e valores de L_0 (JSS). Na zona interior da sobreposição as tensões τ_{xy} possuem uma grandeza inferior a $\tau_{méd}$, excetuando nas extremidades da sobreposição, que constituem zonas de concentração de tensão [9, 109, 110]. Este comportamento ocorre devido à deformação diferencial longitudinal de cada um dos substratos ao longo da sobreposição, que é nula na extremidade livre dos mesmos e aumenta até à extremidade oposta [114, 118]. No entanto, na região central da sobreposição, o referido efeito é anulado, com o desenvolvimento de tensões τ_{xy} apenas devido ao esforço de tração aplicado na junta. Verifica-se ainda um aumento progressivo das tensões de pico τ_{xy} com o aumento de L_0 . Esta tendência deve-se ao gradiente crescente de deformações longitudinais dos substratos à medida que se aumenta o valor de L_0 , o que por sua vez é decorrente do aumento das áreas de ligação e cargas transmitidas [83]. À semelhança dos gradientes de tensões σ_y , verifica-se que os gradientes de tensão τ_{xy} são extremamente prejudiciais para a resistência das juntas, nomeadamente se forem utilizados adesivos frágeis, cuja fratura ocorre no momento em que é atingida τ_f e pela capacidade de plastificação quase nula destes adesivos [118]. Este efeito pode ser contornado pela utilização de adesivos dúcteis, uma vez que estes permitem a plastificação do adesivo e rotura da junta para valores mais elevados de $\tau_{méd}$ [92]. Tal verifica-se porque a capacidade de plastificação destes adesivos conduz a uma melhor redistribuição de tensões ao longo da sobreposição, enquanto a baixa rigidez contribui para um menor gradiente de tensões, o que se traduz num decréscimo de tensões τ_{xy} nas extremidades da sobreposição face aos adesivos frágeis, e simultaneamente num aumento das referidas tensões na região interna da sobreposição, o que culmina no aumento da resistência da junta [111, 119]. Deste modo, numa situação limite, toda a região da sobreposição estaria a ser solicitada no momento da rotura [92].

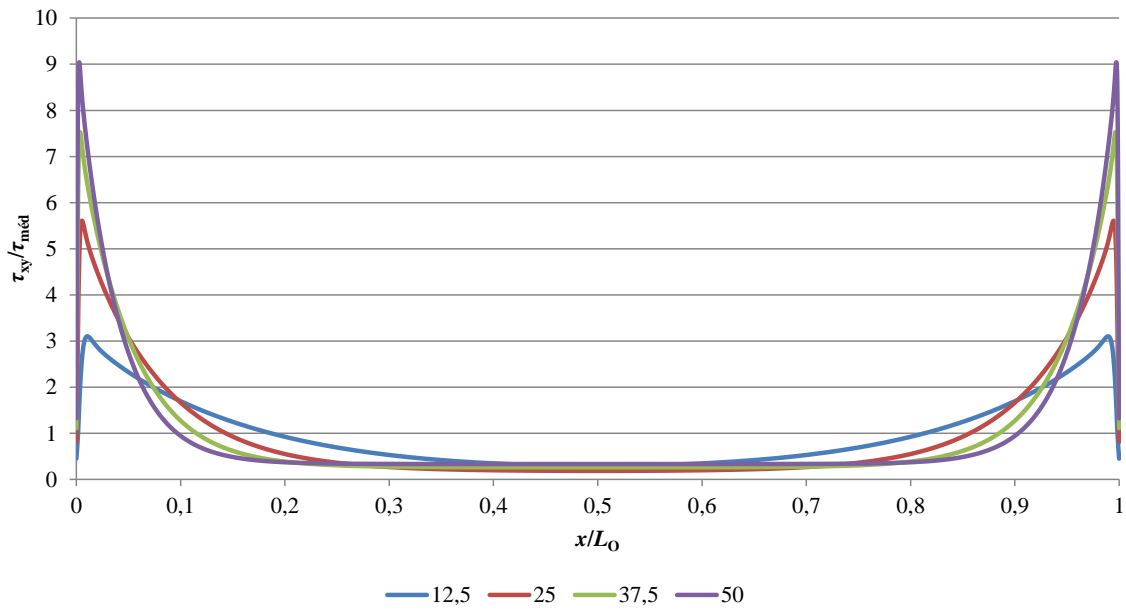


Figura 131 – Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0 .

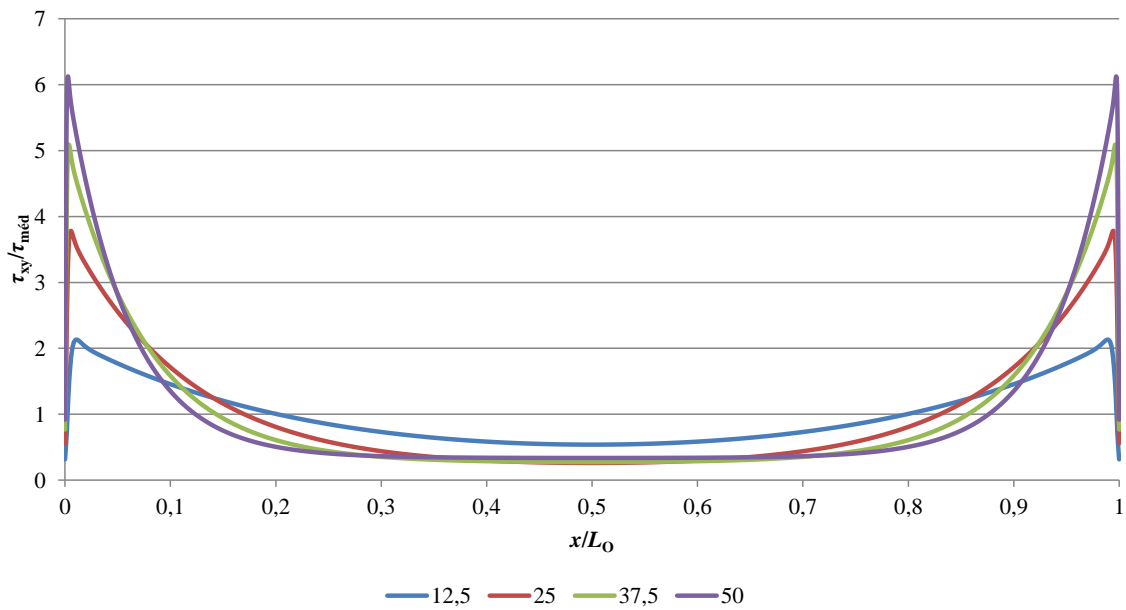


Figura 132 – Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0 .

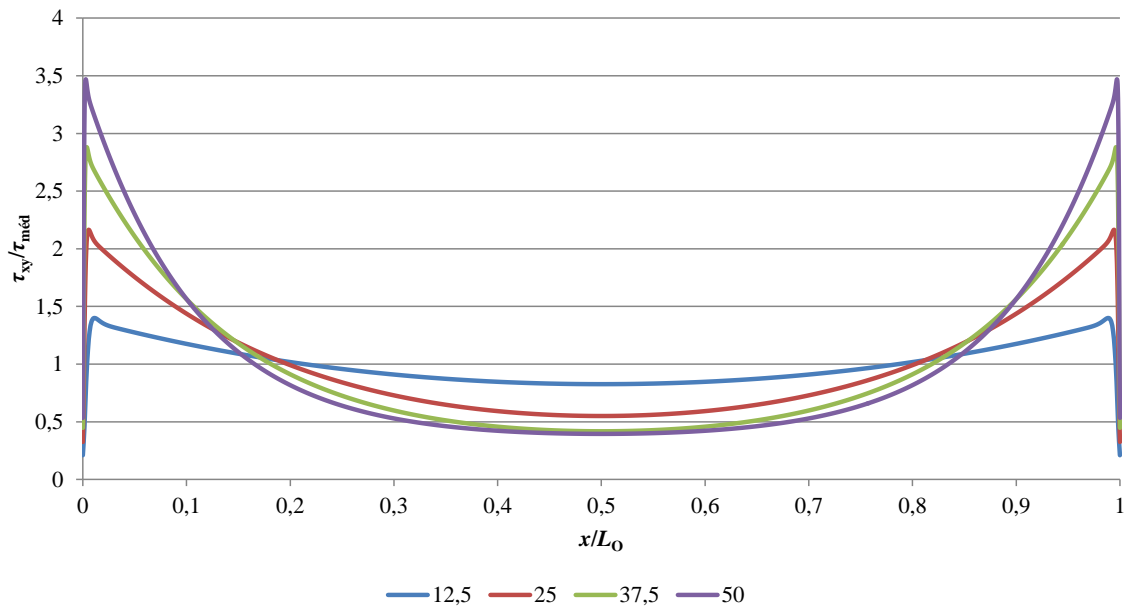


Figura 133 – Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0 .

Fazendo uma comparação entre as tensões τ_{xy} instaladas nos adesivos das JSS, denota-se que o adesivo mais frágil (Araldite® AV138) dos três adesivos é o que apresenta valores de pico superiores, o que corresponde a gradientes de tensões mais elevados ao longo da sobreposição. Estes factos devem-se sobretudo à elevada rigidez do adesivo em questão, que influencia a distribuição de tensões na camada adesiva. Para o valor de $L_0=50$ mm, os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 apresentam valores de pico de tensão τ_{xy} em tração de 9,04, 6,1 e de 3,5, respetivamente, o que condiz com a ordem decrescente de rigidez dos mesmos.

Na **Figura 134**, **Figura 135** e **Figura 136** estão representadas as distribuições de tensões τ_{xy} para as JSD, para os três adesivos e quatro valores de L_0 . Observa-se que a distribuição de tensões não é simétrica, contrariamente ao registado nas JSS. De facto, a extremidade exterior das JSD apresenta uma magnitude de tensões τ_{xy} bem superior à extremidade oposta, devido à solitação a que o substrato intermédio é sujeito, o que se traduz em cargas elevadas na proximidade de $x/L_0=0$. Comparando os picos das tensões τ_{xy} com os equivalentes nas JSS, denota-se que na extremidade interior de sobreposição ocorre um decréscimo significativo na magnitude dos mesmos. Já na extremidade exterior também se verifica uma diminuição do pico das tensões τ_{xy} , embora de forma menos significativa [120]. Esta diferença deve-se à menor variação das deformações longitudinais entre os dois substratos exteriores e o substrato interior, o que se traduz na redução do efeito da deformação diferencial dos mesmos [115]. As modificações no perfil de tensões τ_{xy} das JSD, devem-se refletir numa resistência da junta superior a 2 vezes a das JSS, correspondente à relação entre as áreas coladas de ambas as configurações de junta [119]. À semelhança do que se verificou

nas JSS, o aumento de $P_{\text{máx}}$ nas JSD também não deve ser proporcional ao aumento de L_0 , dado que os picos das tensões σ_y e τ_{xy} sofrem um acréscimo de intensidade com o aumento de L_0 . Isto será ainda mais evidente nas juntas com adesivos frágeis, uma vez que o adesivo não permitirá plastificação nas extremidades da sobreposição quando são atingidas as tensões limite [118].

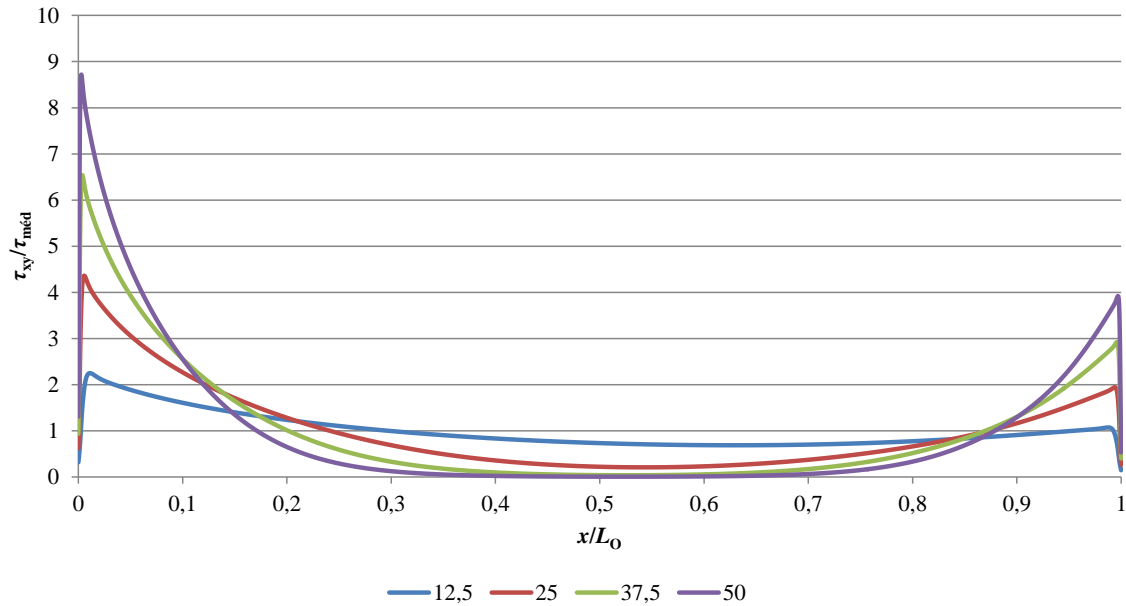


Figura 134 – Distribuição de tensões τ_{xy} em JSD com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0 .

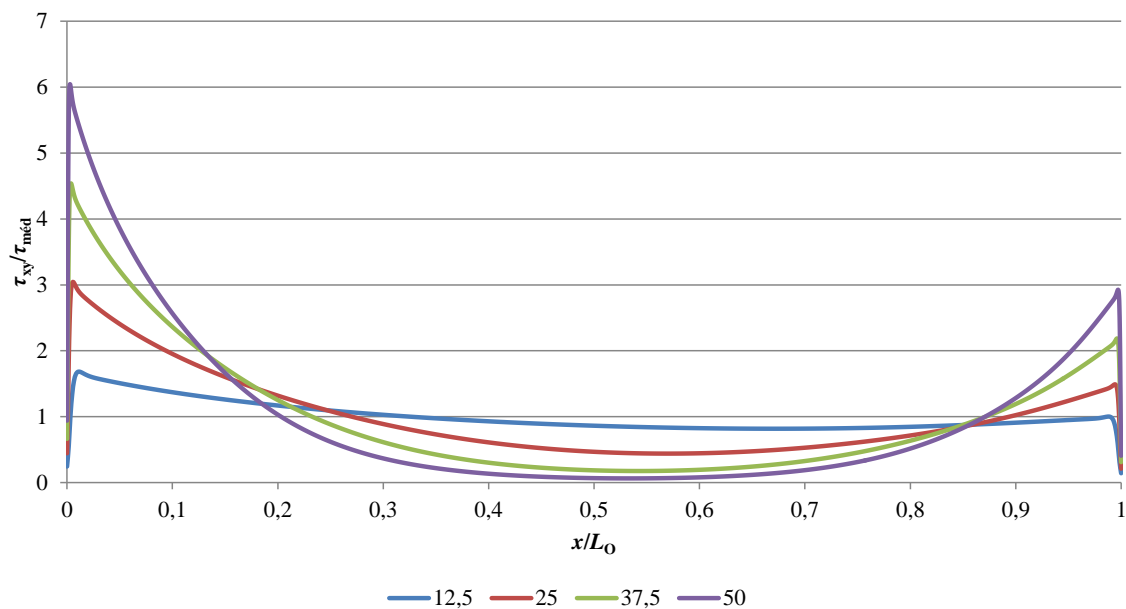


Figura 135 – Distribuição de tensões τ_{xy} em JSD com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0 .

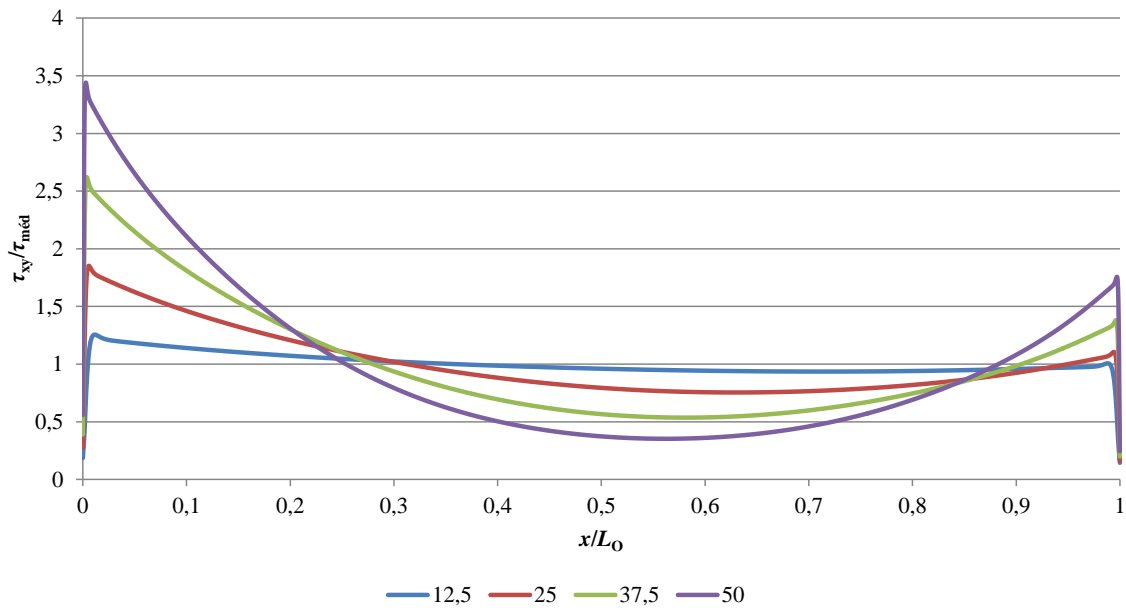


Figura 136 – Distribuição de tensões τ_{xy} em JSD com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0 .

Fazendo uma comparação entre os 3 adesivos ensaiados, denota-se que o adesivo Araldite® AV138, devido à sua fragilidade, é que apresenta o maior gradiente de tensões τ_{xy} , devido à sua rigidez. Para além disso, denota preponderância no que concerne às tensões de pico τ_{xy} nas extremidades da ligação.

Quantificando os pico de tensões τ_{xy} normalizada nas extremidades das JSD, para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, e $L_0=50$ mm, obtiveram-se valores de 8,72, 6,0 e 3,44, respetivamente. Esta variação está em concordância com a ordem de decrescente de rigidez dos adesivos, à semelhança do sucedido nas JSS. Comparando os valores de tensões τ_{xy} apresentados nas mesmas condições face às JSS, regista-se um decréscimo percentual nas referidas tensões de pico τ_{xy} de 3,7%, 2,17% e de 0,9%, respetivamente. Este decréscimo deve ser responsável por um aumento da resistência das JSD face às JSS com igual valor de L_0 superior a 2 vezes (relação de áreas coladas).

4.4.2 Explicação dos valores de $P_{máx}$ obtidos

Com base nos resultados da análise de tensões anteriormente apresentados, apresenta-se agora uma discussão mais detalhada da resistência das JSS e JSD em função de L_0 relativamente àquela apresentada nos **subcapítulos 3.4.3.3 e 3.4.4.3**, respetivamente.

Sendo assim, para as JSS observou-se que os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 conseguem uma resistência superior relativamente ao Araldite® AV138, nomeadamente para valores elevados de L_0 . Para o valor de $L_0=12,5$ mm o adesivo Araldite® AV138 apresenta uma resistência muito similar à do adesivo Araldite® 2015. Tal verifica-se porque, para valores de L_0 reduzidos, as distribuições de tensões no adesivo são mais constantes (**Figura 125** à **Figura 127** para σ_y e **Figura 131** à **Figura 133** para τ_{xy}), permitindo que um adesivo frágil apresente uma resistência similar à de um adesivo dúctil, apesar da sua capacidade limitada de plastificação. Para os valores subsequentes a $L_0=12,5$ mm, os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 superiorizam-se sempre ao Araldite® AV138 em termos de $P_{\text{máx}}$. Tal facto tem a ver com a fragilidade do último adesivo que limita a sua capacidade de plastificação, induzindo a uma rotura das juntas praticamente no momento em que as tensões nas extremidades atingem o valor limite [83]. Para além disso, apesar dos dois primeiros adesivos apresentarem propriedades mecânicas inferiores ao Araldite® AV138, estes têm uma maior ductilidade, o que lhes permite uma melhor capacidade na redistribuição de tensões. Deste modo observa-se um aumento significativo de $P_{\text{máx}}$ dos adesivos dúcteis para os valores de $L_0>12,5$ mm, apesar de o aumento de L_0 proporcionar um maior gradiente de tensões na junta (**Figura 125** à **Figura 127** para σ_y e **Figura 131** à **Figura 133** para τ_{xy}).

Para as JSD com $L_0=12,5$ mm, o adesivo Araldite® AV138 apresenta uma resistência muito similar à do adesivo Araldite® 2015, enquanto o Sikaforce® 7752 apresenta valores inferiores. Considerando $L_0=25$ mm, o Araldite® AV138 apresenta uma resistência muito próxima à do SikaForce® 7752, embora bastante inferior à do Araldite® 2015. De facto, para os valores de L_0 mencionados, o adesivo Araldite® AV138 consegue uma resistência similar à de pelo menos um dos adesivos dúcteis em cada valor de L_0 . Tal verifica-se porque, como referido anteriormente, para valores de L_0 reduzidos, no caso $L_0=12,5$ mm e 25 mm, as distribuições de tensões nas juntas são mais uniformes (**Figura 128** à **Figura 130** para σ_y e **Figura 134** à **Figura 136** para τ_{xy}). Para além disso, com valores baixos de L_0 , a resistência da junta é significativamente influenciada pela resistência do adesivo, aspecto em que o adesivo Araldite® AV138 se superioriza aos restantes. No entanto, para $L_0\geq 25$ mm, a resistência das JSD com o adesivo Araldite® AV138 mantém-se aproximadamente constante na casa de 16 kN. Tal sucede dado que a sua fragilidade impede que haja capacidade de suporte de esforços a partir do momento em que se atinge o valor limite nas extremidades da sobreposição [83]. Para $L_0>25$ mm, a resistência dos adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 supera sempre a do Araldite® AV138, sendo apenas limitada pela cedência ou rotura dos substratos. De facto, apesar destes adesivos apresentarem propriedades mecânicas inferiores ao Araldite® AV138, estes apresentam uma ductilidade superior, o que lhes permite uma melhor capacidade na redistribuição de tensões, apesar de o aumento de L_0 proporcionar um maior gradiente de tensões na junta (**Figura 128** à **Figura 130** para σ_y e **Figura 134** à **Figura 136** para

τ_{xy}). Dados os factos anteriormente mencionados, observou-se um aumento esperado da resistência das JSD face às JSS superior ao dobro. Tal pode ser constatado na análise de resultados obtidos nos **subcapítulos 3.4.4.3** e **subcapítulos 3.4.3.3**, respetivamente. No entanto, verificam-se alguns casos excepcionais. Na utilização do adesivo Araldite® AV138, para o valor mais elevado de L_0 , registou-se apenas um aumento percentual de $\approx 81,8\%$ da JSD relativamente à JSS, o que se atribui à plastificação localizada dos substratos, contrastando com os aumentos superiores a 100% para os menores valores de L_0 . Com o adesivo Araldite® 2015, para os valores de $L_0=37,5$ mm e de $L_0=50$ mm, registaram-se aumentos percentuais de 99% e de 58,8%, respetivamente, em virtude da plastificação dos substratos para o primeiro caso, e rotura dos mesmos para o segundo. Considerando o SikaForce® 7752, para $L_0=50$ mm, verifica-se um aumento percentual de apenas 66,7%, fundamentalmente em virtude da plastificação dos substratos. Para os restantes valores de L_0 dos dois adesivos dúcteis registam-se aumentos de $P_{\text{máx}}$ sempre superiores a 100%.

No que diz respeito à proporcionalidade entre valores de $P_{\text{máx méd}}$ e de L_0 , constata-se que quer para as JSS, quer para as JSD, nenhum dos adesivos em estudo revela uma proporcionalidade absoluta. Nas JSS, conforme demonstrado no **subcapítulos 3.4.3.3**, o adesivo SikaForce® 7752 revela uma relação quase linear entre $P_{\text{máx méd}}$ e L_0 , seguido do Araldite® 2015 e do Araldite® AV138. Já nas JSD, conforme demonstrado no **subcapítulo 3.4.4.3**, observa-se um comportamento semelhante no que respeita à proporcionalidade entre valores de $P_{\text{máx méd}}$ e de L_0 . No entanto, denota-se uma maior proporcionalidade nas JSS relativamente às JSD, devido à plastificação e cedência/rotura pelos substratos que ocorreu em muitas configurações de JSD.

4.4.3 Comparação entre as previsões numéricas e resultados experimentais

Neste subcapítulo faz-se uma comparação dos resultados experimentais e numéricos de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 para as JSS e JSD, estes últimos obtidos pelas diferentes formas das leis coesivas. A **Figura 137**, **Figura 138** e **Figura 139** representam, para as JSS, os valores experimentais de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 e as previsões numéricas pelas das 3 formas de leis coesivas, considerando os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente.

Quando se simulam juntas adesivas por MDC, a forma da lei coesiva adotada deve ser coerente com a distribuição de tensões à frente da fenda de modo a representar o mais corretamente possível o processo de dano [121]. No entanto, alguns trabalhos sobre delaminação em compósitos mostraram que leis coesivas pouco adequadas para modelar um determinado material ainda permitem obter uma aproximação grosseira do seu comportamento, desde que os valores de resistência coesiva (t_n^0 e t_s^0) e de tenacidade à fratura (G_{Ic} e G_{IIc}) tenham sido estimados corretamente [122]. Por outro lado, o estudo de Campilho et al. [27] demonstrou que, para juntas

adesivas com adesivos dúcteis simulados com leis coesivas triangulares, podem surgir previsões aquém do expectável, dada a depreciação imediata da tensão após atingida a resistência coesiva.

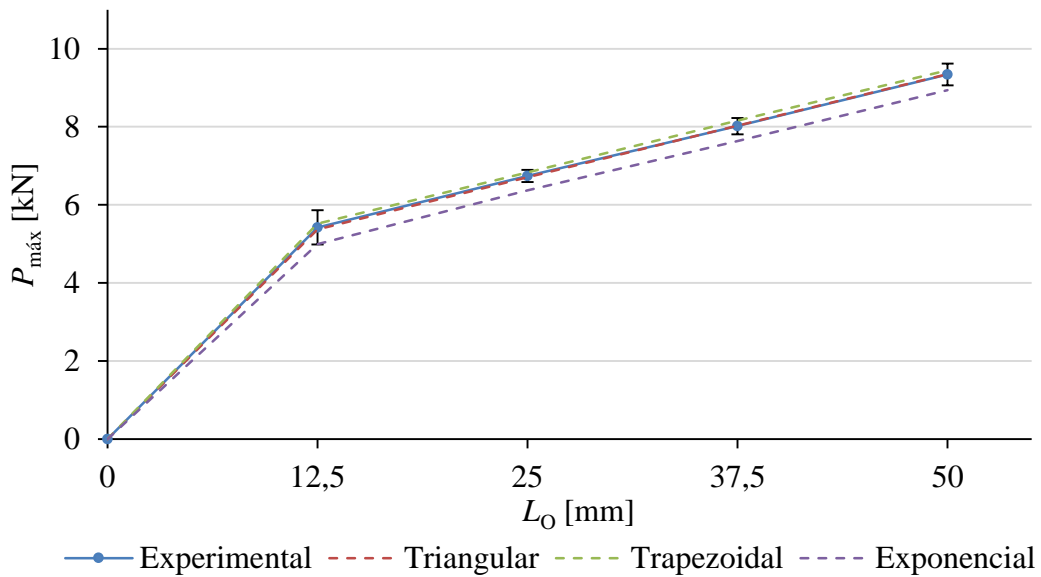


Figura 137 – Valores experimentais e numéricos de $P_{máx}$ em função de L_0 para as JSS com o adesivo Araldite® AV138.

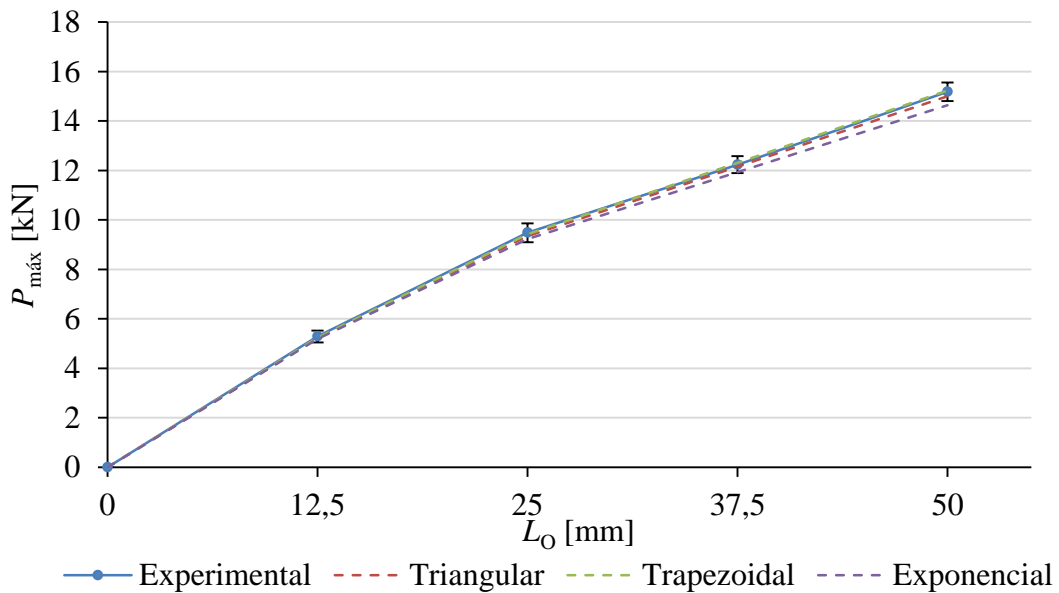


Figura 138 – Valores experimentais e numéricos de $P_{máx}$ em função de L_0 para as JSS com o adesivo Araldite® 2015.

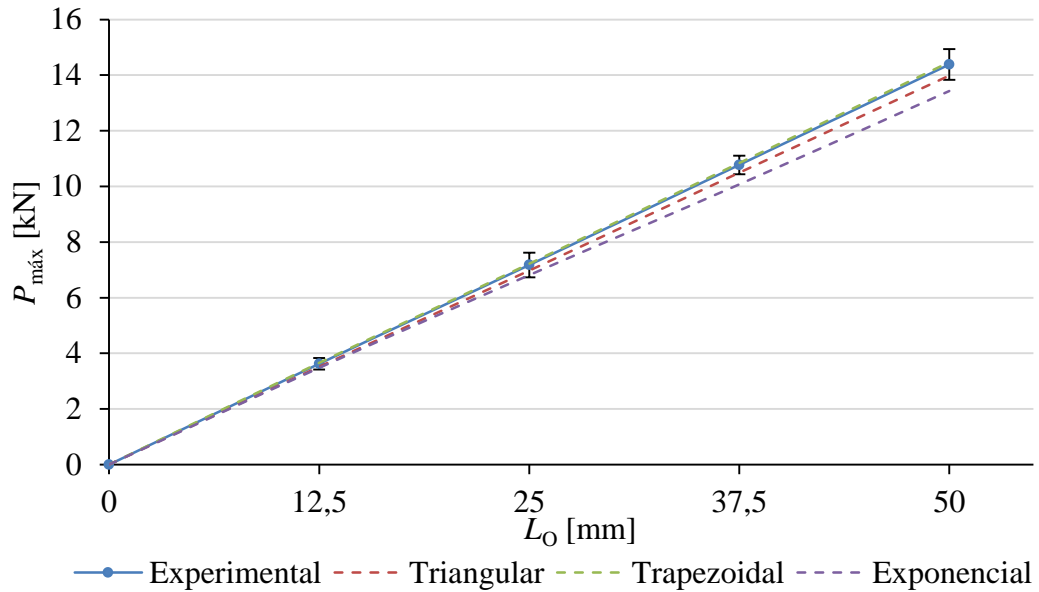


Figura 139 – Valores experimentais e numéricos de $P_{máx}$ em função de L_O para as JSS com o adesivo SikaForce® 7752.

As previsões da **Figura 137** demonstram que as JSS com o Araldite® AV138 são modeladas com maior precisão pela lei triangular, com um erro médio dos erros individuais de cada valor de L_O de 0,4% (erros por excesso ou defeito consoante do valor de L_O). Já a lei trapezoidal revelou menos precisão, com previsões de $P_{máx}$ acima do pretendido para todos os valores de L_O , conotadas por um desvio médio de 1,5%. Por último, a lei linear-exponencial revela-se a menos adequada, registrando valores de $P_{máx}$ significativamente abaixo dos reais, com uma diferença média de 5,6%. Os referidos resultados podem ser explicados através da fragilidade do adesivo Araldite® AV138, como pôde ser concluído através da análise das propriedades na **Tabela 2** e das respetivas leis coesivas representadas na **Figura 123** e **Figura 124**. Os erros mais significativos ocorreram para as juntas com valor de $L_O=12,5$ mm, ao passo que os menos significativos registaram-se para as juntas com maior valor de L_O , independentemente da lei coesiva em questão.

Considerando as juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 (**Figura 138**), as melhores previsões foram obtidas com a lei coesiva trapezoidal, principalmente devido à moderada ductilidade do adesivo. Neste caso obteve-se um erro médio de 0,6%, com os erros individuais de cada valor de L_O a oscilarem positiva e negativamente em relação às previsões numéricas. As restantes formas de leis coesivas conduziram a previsões aquém dos valores de $P_{máx}$ experimentais para todos os valores de L_O . Registou-se um erro médio de 1,1% para a lei triangular e de 2,6% para a lei linear-exponencial.

Como referido anteriormente, o adesivo SikaForce® 7752 é um adesivo de elevada ductilidade. Posto isto, também para as juntas ensaiadas com este adesivo (**Figura 139**) a lei trapezoidal revelou

a melhor aproximação aos dados experimentais, apresentando um erro médio absoluto de 0,6%, resultante de erros individuais de cada valor de L_O , todos eles por excesso. As restantes leis revelaram previsões abaixo dos dados experimentais e com desvios significativamente maiores: 2,8% para a triangular e 5,6% para a linear-exponencial. Com base nestes resultados, pode-se inferir que, para as condições geométricas das JSS e adesivos testados, o uso de uma lei coesiva inadequada não iria resultar em erros significativos de $P_{m\acute{a}x}$. No entanto, no trabalho de Campilho et al. [27], que testou a aplicação de leis coesivas triangulares e trapezoidais em JSS com $10 \leq L_O \leq 80$ mm, concluiu-se que para valores elevados de L_O , podem surgir diferenças acima de 10% relativamente aos valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$, caso a lei coesiva escolhida não seja a mais adequada.

A **Figura 140**, **Figura 141** e **Figura 142** mostram os valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ das JSD em função de L_O e as previsões numéricas resultantes das 3 formas de leis coesivas, considerando respetivamente os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

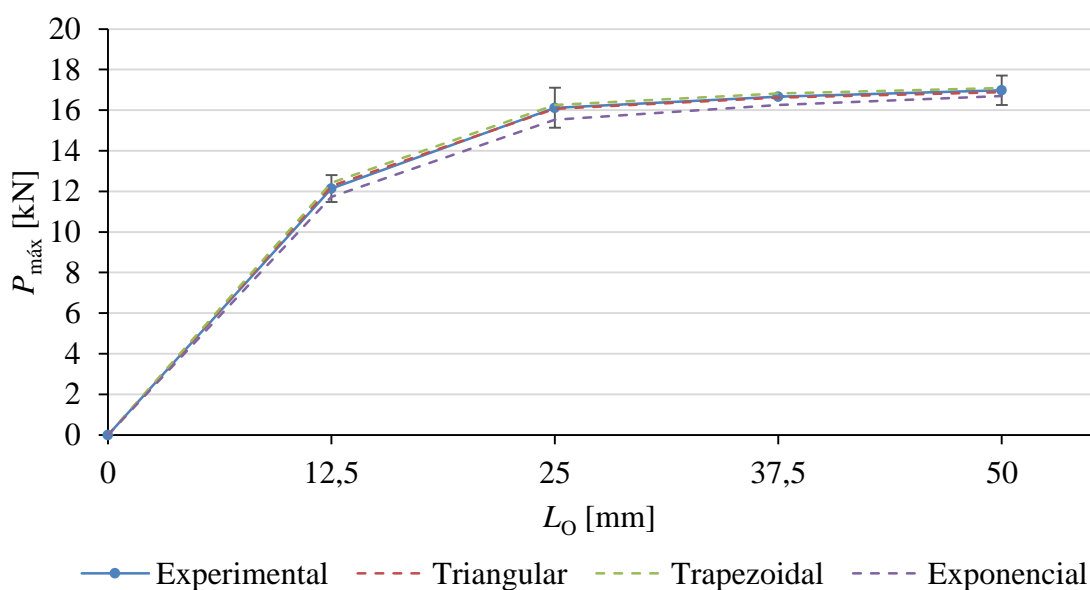


Figura 140 – Valores experimentais e numéricos de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_O para as JSD com o adesivo Araldite® AV138.

Para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 (**Figura 140**), os melhores resultados são obtidos com a lei coesiva triangular, seguida da trapezoidal, enquanto a linear-exponencial fornece previsões de $P_{m\acute{a}x}$ notoriamente subestimadas para todos os valores de L_O , à semelhança do que se verificou para as JSS. Estes resultados devem-se sobretudo à fragilidade do adesivo, que pode ser comprovada através da análise das propriedades do mesmo na **Tabela 2** e das leis coesivas à tração e corte representadas na **Figura 123** e **Figura 124**, respetivamente. Considerando os 4 valores de L_O , obteve-se um erro médio de 0,56% para a lei triangular, 1,17% para a lei trapezoidal e 2,79%

para a lei linear-exponencial. Na generalidade, a maior percentagem de erros individuais incidiu sobre as juntas com $L_0=12,5$ mm, independentemente da lei coesiva em questão.

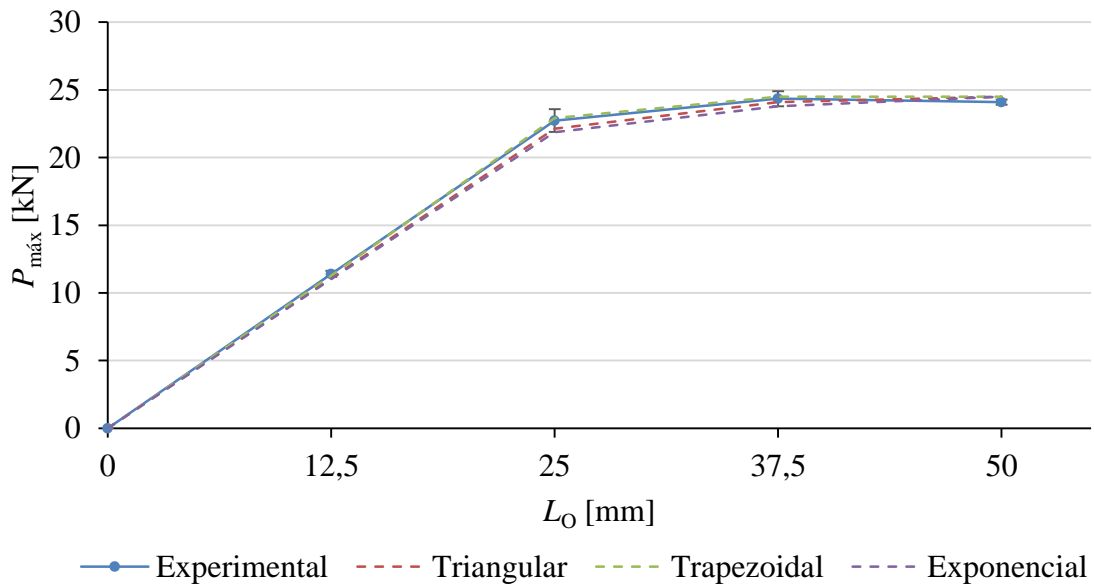


Figura 141 – Valores experimentais e numéricos de $P_{máx}$ em função de L_0 para as JSD com o adesivo Araldite® 2015.

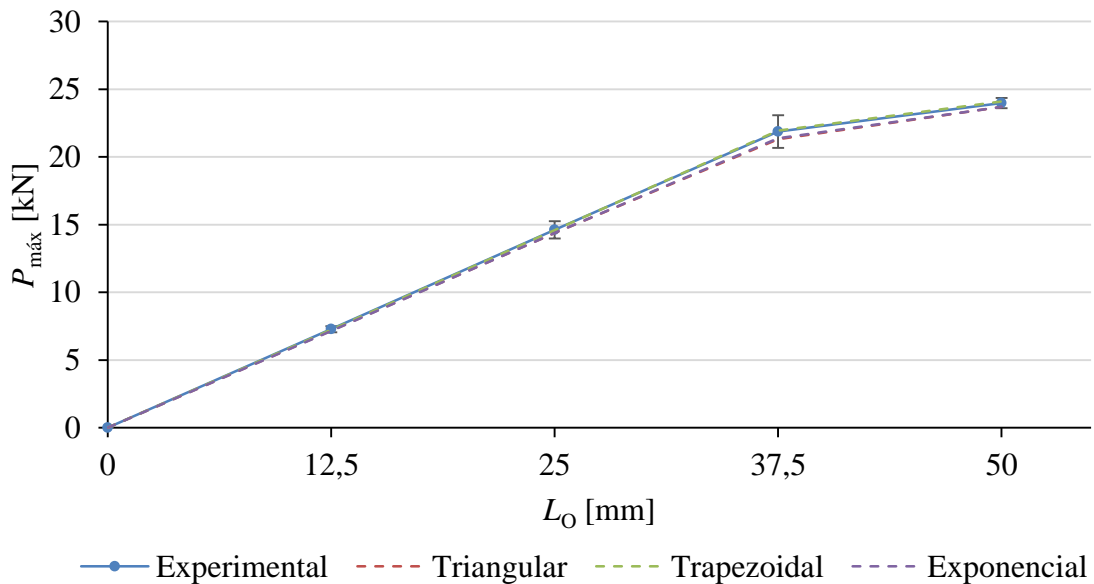


Figura 142 – Valores experimentais e numéricos de $P_{máx}$ em função de L_0 para as JSD com o adesivo SikaForce® 7752.

Relativamente ao adesivo Araldite® 2015, as melhores previsões numéricas foram registadas com a lei coesiva trapezoidal (**Figura 141**), o que é consistente com o grau de ductilidade moderada deste adesivo. As leis coesivas triangular e linear-exponencial revelaram previsões de $P_{máx}$ subestimadas,

com especial incidência da última. A média dos desvios absolutos, considerando todos os valores de L_0 , foi de: 2,00% (lei triangular), 1,03% (lei trapezoidal) e de 2,76% (lei linear-exponencial). Para $L_0=37,5$ mm e 50 mm, os valores de $P_{\text{máx}}$ registados são governados sobretudo pela cedência ou rotura dos substratos, ao invés do adesivo.

Dada a elevada ductilidade do adesivo SikaForce® 7752, o comportamento das juntas com este adesivo é representado de forma mais fidedigna pela lei coesiva trapezoidal, como se observa na **Figura 142**, uma vez que esta permite obter a melhor aproximação aos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais. As leis coesivas trapezoidal e linear-exponencial fornecem valores de $P_{\text{máx}}$ semelhantes entre si, mas significativamente subestimados. Os erros médios absolutos para cada um dos adesivos foram de 1,73% para a lei triangular, de 0,36% para a lei trapezoidal e de 1,73% para a lei linear-exponencial. Denota-se que o valor de $P_{\text{máx}}$ para $L_0=50$ mm é governado pela cedência dos substratos.

De um modo geral, observa-se que, para as atuais condições geométricas, não se verificam erros significativos das previsões numéricas face aos dados experimentais, resultantes da escolha de leis coesivas menos apropriadas, tal como se verificou nas JSS. Contudo, isto deve-se fundamentalmente a 2 fatores: em primeiro lugar a gama de valores de L_0 estudados neste trabalho é relativamente limitada; em segundo, para os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, a tensão de rotura dos substratos ou pelo menos a sua plastificação afetou de tal forma os valores de $P_{\text{máx}}$ que, para valores elevados destes, a rotura da junta deixou de ser condicionada pela rotura dos adesivos, mas sim pela cedência ou rotura dos substratos. De facto, como no trabalho de Campilho et al. [27], o que considera leis coesivas triangulares e trapezoidais na modelação de JSS em material compósito sem incorrerem em plastificação, com $10 \leq L_0 \leq 80$ mm, para valores elevados L_0 obtiveram-se diferenças na ordem dos 10% entre as previsões numéricas e dados experimentais, caso a forma da lei coesiva selecionada não seja a mais adequada ao comportamento do adesivo. Deste modo, dependendo da precisão de resultados pretendida, a escolha correta da lei coesiva pode ter alguma importância.

4.5 Análise crítica dos resultados obtidos

Neste subcapítulo faz-se uma análise crítica e detalhada ao conjunto de resultados obtidos, nomeadamente da distribuição de tensões e previsão de resistência de juntas.

No que concerne às tensões instaladas nas JSS, verifica-se que as tensões σ_y desempenham um papel preponderante na rotura, uma vez que as suas extremidades são fortemente tracionadas, devido à excentricidade das cargas aplicadas que provoca uma rotação significativa dos substratos na zona da sobreposição [9, 109, 110]. Verificaram-se picos de tensões σ_y nas extremidades, e picos

compressivos na zona interior da junta para $x/L_0 \approx 0,1$ e $0,9$. Relativamente ao perfil de tensões τ_{xy} , as JSS revelam picos devido à deformação diferencial dos substratos, que é nula na extremidade livre dos mesmos, e máxima na extremidade oposta [114, 118]. Este efeito anula-se na região central da ligação adesiva, o que se traduz em tensões τ_{xy} reduzidas nessa zona. Verifica-se um aumento dos picos de tensões σ_y e τ_{xy} com o aumento de L_0 , o que contribui para a diminuição da resistência da junta relativamente à área de ligação, nomeadamente na presença de um adesivo frágil.

Relativamente às JSD, o referido para as JSS aplica-se da mesma forma, mas apenas numa das extremidades, nomeadamente na extremidade exterior da ligação, pois o perfil de tensões (σ_y e τ_{xy}) destas juntas difere do das JSS na medida em que não é simétrico. No que concerne às tensões σ_y , na extremidade interior da ligação registam-se picos de compressão [115]. Isto deve-se sobretudo ao carregamento simétrico nas juntas, que evita a deflexão transversal do substrato interior [22, 116]. Com isto ocorre uma redução generalizada das tensões de pico σ_y para todos os valores de L_0 [24, 117]. Na região central os valores das tensões σ_y são aproximadamente nulos, com gradientes crescentes para as extremidades da sobreposição com o incremento de L_0 , à semelhança das JSS. No que respeita ao perfil de tensões τ_{xy} , verificam-se picos de tensões τ_{xy} de maior magnitude na extremidade exterior, ao passo que na extremidade oposta, os picos de tensões τ_{xy} são menos preponderantes. Isto é decorrente da solicitação a que o substrato intermédio é sujeito, que se traduz na indução de cargas elevadas na proximidade de $x/L_0=0$. Verifica-se que, face às JSS, ocorre um decréscimo generalizado das tensões de pico τ_{xy} , ligeiro na extremidade exterior e significativo na extremidade interior. A redução do gradiente de tensões τ_{xy} na extremidade interior deve-se à menor variação das deformações longitudinais entre os dois substratos exteriores e o substrato interior, o que se traduz na redução do efeito da deformação diferencial dos mesmos. Em suma, as modificações dos perfis de tensões σ_y e τ_{xy} das JSD face as JSS traduzem-se numa distribuição de tensões mais uniforme e em menores gradientes de tensões, apesar de estes aumentarem igualmente com L_0 .

Para além da geometria de junta e das respetivas distribuições de tensões, o adesivo selecionado também apresenta uma elevada influência na resistência das juntas. A **Figura 143** e **Figura 144** representam os valores de G_{Ic} e G_{IIc} , obtidos de ensaios DCB e ENF, respetivamente, pelo método do Integral- J , para os adesivos indicados. Na **Figura 144** o provete n°4 do adesivo Araldite® AV138 não foi considerado, dada a discrepância de G_{IIc} face aos restantes valores. A **Tabela 27** resume a média dos valores de G_{Ic} e G_{IIc} obtidos para cada um dos adesivos. Mediante estes resultados, o SikaForce® 7752 revela-se claramente o adesivo mais dúctil, com uma média de valores G_{Ic} e de G_{IIc} superior aos restantes, enquanto o Araldite® 2015 revela valores intermédios de G_{Ic} e G_{IIc} . Por último surge o Araldite® AV138, que se revela o mais frágil, com os menores

valores de G_{Ic} e G_{IIc} . É sabido que as propriedades dos adesivos têm uma elevada influência na resistência da junta. No entanto, um adesivo com uma elevada tensão de rotura como o Araldite® AV138 não proporciona garantidamente uma resistência de junta superior à de adesivos menos resistentes. De facto a sua rigidez e capacidade de plastificação também influenciam os valores de $P_{máx}$ das JSS e JSD.

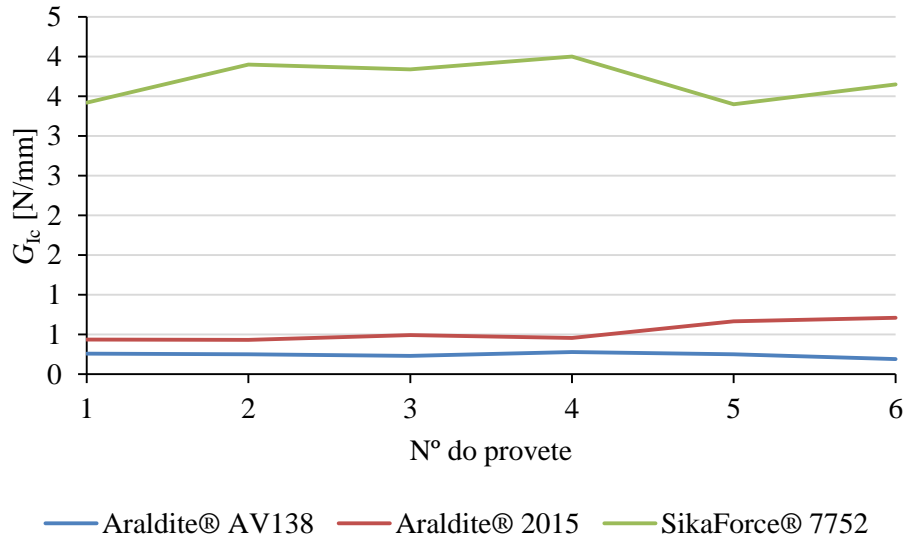


Figura 143 – Valores de G_{Ic} para os diversos adesivos, obtidos pela aplicação do Integral- J aos dados experimentais resultantes de ensaios em provetes DCB.

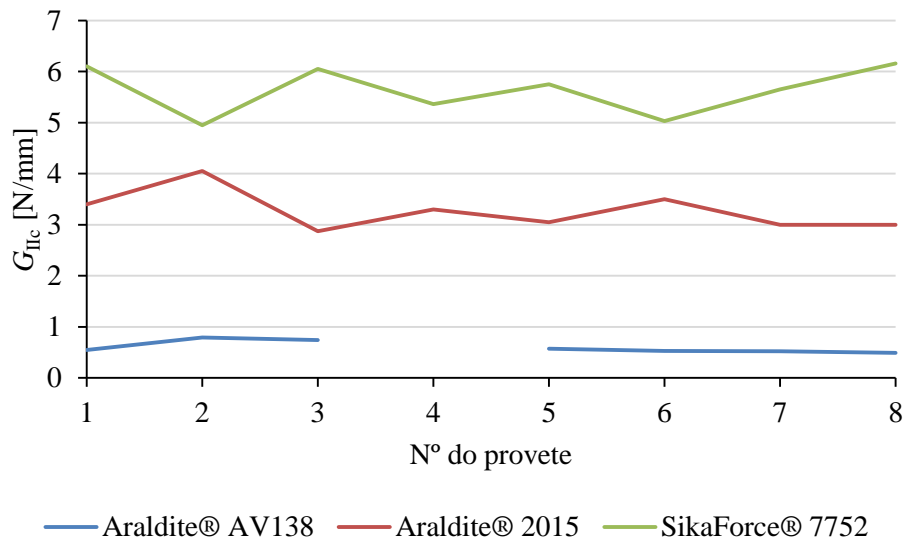


Figura 144 – Valores de G_{IIc} para os diversos adesivos, obtidos pela aplicação do Integral- J aos dados experimentais resultantes de ensaios em provetes ENF.

Tabela 27 – Resumo dos valores médios dos valores individuais de G_{Ic} e G_{IIc} obtidos pelo Integral- J , para os adesivos indicados.

	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
Média de G_{Ic} [N/mm]	0,244	0,533	3,702
Média de G_{IIc} [N/mm]	0,599	3,271	5,631

Deste modo as JSS e JSD com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm apresentam uma resistência muito similar à do adesivo Araldite® 2015. Isto deveu-se fundamentalmente ao valor de L_0 reduzido que permitiu uma distribuição de tensões mais uniforme o que fez com que a resistência do adesivo fosse preponderante para a resistência da junta. Por outro lado, para os valores subsequentes de L_0 , as JSS e JSD com Araldite® AV138 tornaram-se incapazes de aumentar o seu valor de $P_{máx}$ na mesma proporção que os restantes adesivos. Isto deveu-se fundamentalmente ao elevado E do adesivo, que propicia elevados gradientes de tensões na junta, e à sua fragilidade, que dificulta a redistribuição de tensões ao longo da ligação adesiva para valores elevados de L_0 . Como resultado observa-se uma tensão $\tau_{méd}$ muito reduzida na rotura. Por outro lado, os adesivos mais dúcteis e de baixo módulo apresentam, na maioria das vezes, uma resistência ao corte e tração inferiores aos adesivos mais frágeis. Apesar disso, o seu valor reduzido de E permite obter distribuições de tensões mais uniformes, e a sua ductilidade conferes-lhes a capacidade de plastificação, o que se traduz numa resistência da junta superior às que utilizam adesivos frágeis, nomeadamente para valores elevados de L_0 , onde os gradientes de tensões σ_y e τ_{xy} são mais pronunciados [123]. Neste contexto inserem-se os adesivos Araldite® 2015, que revela uma ductilidade moderada, e SikaForce® 7752, de elevada ductilidade.

5 Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo primordial a validação de diversos formatos de leis coesivas simplificadas, após obtenção pelo método direto das leis experimentais em tração e corte por ensaios DCB e ENF, respetivamente. Neste trabalho foram considerados adesivos com diversos graus de ductilidade (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752) para os quais foram testadas leis coesivas em modo puro de sollicitação (tração e corte), nos formatos triangular, trapezoidal e linear-exponencial. A validação foi realizada pela previsão da resistência e comportamento de juntas com geometria de sollicitação mista, nomeadamente JSS e JSD, com diversos valores de L_0 .

Após a aplicação do método direto aos resultados dos ensaios DCB e ENF e respetiva simplificação a formas triangulares, trapezoidais e lineares-exponenciais, observou-se que o comportamento ao corte e tração do adesivo Araldite® AV138 foi representado de forma mais aproximada pela lei coesiva triangular, devido à sua fragilidade. Por outro lado, os adesivos dúcteis Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 foram modelados de forma mais fidedigna pelas leis coesivas trapezoidais, uma vez que estas leis contemplam a fase de amaciamento de tensões característica de adesivos dúcteis.

Seguiu-se a análise detalhada da resistência das JSS complementada por uma análise das tensões instaladas na camada adesiva, de modo a compreender a influência destas na rotura das juntas. Neste contexto, o adesivo Araldite® AV138 demonstrou uma capacidade reduzida de melhoria de $P_{\text{máx}}$ com o incremento L_0 , em virtude do aumento dos picos das tensões instaladas na junta para valores elevados de L_0 , pela elevada rigidez do adesivo que propicia grandes gradientes de tensões e pela quase nula capacidade de plastificação. O adesivo Araldite® 2015, que apresenta ductilidade moderada, para o menor valor de L_0 regista um valor de $P_{\text{máx}}$ ligeiramente inferior ao do adesivo Araldite® AV138. No entanto, à medida que L_0 aumenta, o adesivo Araldite® 2015 revela alguma capacidade de plastificação nas extremidades da sobreposição, apesar dos crescentes gradientes de tensão, que se traduziu no aumento da resistência a uma taxa superior à do adesivo frágil. Para o adesivo SikaForce® 7752, de elevada ductilidade, a rotura ocorreu sob plastificação generalizada para todos os valores de L_0 . Deste modo, dada a sua inferior resistência mecânica, para $L_0=12,5$

mm, este adesivo registou um $P_{\text{máx}}$ significativamente abaixo dos restantes adesivos. Isto sucede-se porque, para valores de L_0 reduzidos a distribuição de tensões é mais uniforme nas juntas e, nestas condições, o comportamento da junta à fratura passa a ser governado pela resistência do adesivo. Contudo, para valores de L_0 superiores, este adesivo aproximou-se e praticamente igualou os valores de $P_{\text{máx}}$ do Araldite® 2015. De facto, para valores elevados de L_0 , verifica-se um aumento do gradiente de tensões σ_y e τ_{xy} , que torna a resistência da junta dependente da ductilidade do adesivo. Tal proporciona um aumento de $P_{\text{máx}}$ para os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 para valores elevados de L_0 , ao contrário do Araldite® AV138. As previsões por MDC mostraram que os erros induzidos por qualquer uma das leis coesivas estavam dentro de valores aceitáveis, uma vez que registaram-se erros máximos médios de 5,6% para os adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752 e de 2,6% para o Araldite® 2015, com as leis coesivas lineares-exponenciais, considerando todos os valores de L_0 . No entanto, as melhores aproximações foram obtidas pelas leis coesivas previamente mencionadas como sendo as mais adequadas para cada adesivo. Deste modo, pode-se concluir que, para a geometria de junta em questão (JSS), não se cometem erros demasiado gravosos com a aplicação de leis coesivas menos adequadas. No entanto, para valores de L_0 superiores aos estudados nesta tese, pode-se incorrer em erros de maior magnitude.

A resistência das JSD revelou elevada dependência relativamente ao adesivo utilizado. De facto, para o menor valor de L_0 , o adesivo Araldite® AV138 registou um valor de $P_{\text{máx}}$ similar ao alcançado pelo Araldite® 2015, mas revelou-se incapaz de aumentar este valor com o incremento de L_0 numa quantidade significativa, devido à sua elevada rigidez, que promove uma distribuição de tensões pouco uniforme, e também devido à sua fragilidade e consequente reduzida capacidade de plastificação, que promove uma rotura de forma mais precoce comparativamente à do Araldite® 2015. Para o menor valor de L_0 , o adesivo Araldite® 2015 regista um valor de $P_{\text{máx}}$ ligeiramente abaixo do adesivo anterior, dado que para valores reduzidos de L_0 , a boa uniformidade na distribuição de tensões na junta torna a resistência desta fundamentalmente dependente da resistência mecânica do adesivo. Para valores superiores de L_0 , o Araldite® 2015 denota uma taxa de crescimento de $P_{\text{máx}}$ bastante superior à do adesivo frágil, dado que a sua capacidade de plastificação permite uma superior redistribuição de tensões, conjugada com uma melhor uniformidade na distribuição das mesmas, dado o seu inferior valor de E . As juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752 registaram o menor valor de $P_{\text{máx}}$ para $L_0=12,5$ mm. No entanto, a sua ductilidade permitiu um incremento de $P_{\text{máx}}$ praticamente linear com L_0 , à semelhança do ocorrido nas JSS e pelos mesmos motivos. As curvas de $P_{\text{máx}} \text{ méd}-L_0$ foram afetadas pela plastificação ou rotura dos substratos para valores elevados de L_0 . Nestes casos, a resistência das juntas é governada pelas propriedades mecânicas dos substratos. No que respeita à comparação entre os dados experimentais e as previsões numéricas de resistência, registaram-se pequenos desvios em todas as leis coesivas obtidas, sendo que os mais significativos foram de 2,79% para o adesivo Araldite®

AV138 e de 2,76% para o Araldite® 2015, ambos com as leis coesivas lineares-exponenciais, e de 1,73% para o SikaForce® 7752 com as leis coesivas linear-exponencial e triangular. Por outro lado, as melhores aproximações foram obtidas com os formatos das leis coesivas anteriormente referidos como mais adequados. À semelhança das JSS, considerando esta geometria de juntas, também não se cometem erros significativos com uma lei coesiva menos apropriada aos resultados experimentais. No entanto, tanto para as JSS como para as JSD, é de notar que, dependendo da geometria individual de cada uma delas e do comportamento do material dos substratos, o erro cometido na aplicação de uma forma de lei coesiva pouco ajustada pode resultar em desvios não aceitáveis em relação ao comportamento real das juntas.

Como sugestões para trabalhos futuros, refere-se a utilização de materiais com propriedades mecânicas melhoradas, de modo a evitar o condicionamento na rotura das juntas, aferindo qual o erro cometido com as formas de leis coesivas consideradas com valores elevados de L_0 . Pode ainda ser feito um estudo considerando algumas modificações geométricas nas JSS e JSD, nomeadamente na espessura dos substratos, valor de L_0 e espessura de adesivo, de modo a averiguar qual a sua influência no erro cometido entre os resultados experimentais e as aproximações do MDC consideradas e resultantes da aplicação do método direto. Neste contexto, o estudo do efeito do chanframento das extremidades dos substratos das JSS e JSD também seria interessante, de modo a averiguar as modificações na resistência das juntas e o desvio cometido entre os dados experimentais e as aproximações do MDC obtidas pelo método direto. Realça-se também a previsão da resistência considerando critérios de modo misto para a iniciação e propagação do dano nos MDC, ao invés de utilizar modos independentes nos modelos numéricos.

Referências

- 1 T.A.B. Fernandes – Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.
- 2 S.L.S. Nunes – Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2015.
- 3 Carlos J. Constante – Utilização de métodos óticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fratura de adesivos estruturais. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Julho de 2014.
- 4 R.D.S.G. Campilho, D.C. Moura, M.D. Banea, L.F.M. da Silva – Adhesive thickness effects of a ductile adhesive by optical measurement techniques. International Journal of Adhesion & Adhesives. Vol. 57, 2015, p. 125-132.
- 5 R.L. Fernandes – Estudo numérico da adequação de diferentes tipos de leis coesivas na previsão da resistência de juntas adesivas por Modelos de Dano Coesivo. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2015.
- 6 J.C.S. Azevedo – Determinação da tenacidade à fratura em corte (G_{IIc}) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF). Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Outubro de 2014.
- 7 A.C.C. Leitão – Aplicação de um método de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fratura em corte de adesivos estruturais. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2015.
- 8 R. D. Adams – **Adhesive bonding Science, technology and applications**. 1ª Edição. Cambridge, Inglaterra: Woodhead Publishing Limited, 2005. ISBN 1-85573-741-8
- 9 E.M. Petrie – **Handbook of adhesives and sealants**. 1ª Edição. Estados Unidos da América: McGraw-Hill, 2000. ISBN 0-07-049888-1
- 10 L.F.M. da Silva, A.G. de Magalhães, M.F.S.F. de Moura – **Juntas Adesivas Estruturais**. 1ª Edição. Porto: Publindústria, 2007. ISBN 978-972-8953-21-8
- 11 S. Ebnesajjad – **Adhesives Technology Handbook**. 2ª Edição. Norwich, Nova Iorque, Estados Unidos da América: William Andrew Inc., 2008. ISBN 978-0-8155-1533-3
- 12 Plastics Decorating Magazine – **Bond Failure Modes**. Topeka, Kansas, Estados Unidos da América. Consultado em: 12 Mar. 2015. Disponível em: <http://www.plasticsdecorating.com/ENEWS/ENews.asp?item=adhesivebondfailure>

- 13 Adhesives, Glues and Sealants – **Types of fractures - Failure Modes of adhesive bonding**. Consultado em: 12 Mar. 2015. Disponível em: <http://www.adhesiveandglue.com/fracture-of-adhesive.html>
- 14 W. Brockmann, P.L. Geiß, J. Klingen, B. Schröder – **Adhesive Bonding: Materials, Applications and Technology**. 1ª Edição. Weinheim, Alemanha: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. ISBN 978-3-527-31898-8
- 15 U. Carvalho, J. Sousa e R. Pedro – Determinação do G_{Ic} do Adesivo SikaForce 7752 FRW L60, em provetes TDCB. Relatório da Unidade curricular de Processos de Ligação do Mestrado em Engenharia Mecânica, Materiais e Tecnologias de Fabrico. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.
- 16 R. J. C. Carbas – Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi. Relatório do Projecto Final do MIEM. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Julho de 2008.
- 17 Substech, Substances & Technologies – **Adhesive joints**. Consultado em 16 Mar. 2015. Disponível em: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=adhesive_joints
- 18 GlueOnline – **Joint Design**. Consultado em: 16 Mar. 2015. Disponível em: http://www.glueonline.co.uk/shop/Joint_Design.html
- 19 Mapeng – **Assembly considerations, Joint Design**. Consultado em 16 Mar. 2015. Disponível em: http://www.mapeng.net/templets/map/Plastic-Part-Design-Checklist/joint_design.html
- 20 R.D. Adams, W.C. Wake – **Structural Adhesive Joints in Engineering**. 1ª Edição. Essex, Inglaterra: Elsevier Applied Science Publishers, Ltd, 1984. ISBN 13 978-94-0 1 0-8977-7
- 21 A.J. Kinloch – **Adhesion and adhesives: science and technology**. 1ª edição. London: Chapman & Hall, 1987. ISBN 978-90-481-4003-9
- 22 B. Zhao, Z.-H. Lu, Y.-N. Lu. Two-dimensional analytical solution of elastic stresses for balanced single-lap joints – Variational method. International Journal of Adhesion & Adhesives. Vol. 49, 2014, p. 115-126.
- 23 R.D. Adams, R. G. H. Davies – Strength of joints involving composites. The Journal of Adhesion. Vol. 59, 1996, p. 171-182.
- 24 M. Shishesaz, N. Bavi – Shear stress distribution in adhesive layers of a double-lap joint with void or bond separation. Journal of Adhesion Science and Technology. Vol. 27, 2013, p. 1197-1225.
- 25 K.C. Shin, J. J. Lee – Bond Parameters to Improve Tensile Load Bearing Capacities of Co-Cured Single and Double Lap Joints with Steel and Carbon Fiber-epoxy Composite Adherends. Journal of Composite Materials. Vol. 37, 2003, p. 401-420.
- 26 T.A.B. Fernandes, R.D.S.G. Campilho, M.D. Banea, L.F.M. da Silva – Adhesive Selection for Single Lap Bonded Joints: Experimentation and Advanced Techniques for Strength Prediction. The Journal of Adhesion. Vol. 91, 2015, p. 841-862.

- 27 R.D.S.G. Campilho, M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, 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 & Adhesives. Vol. 44, 2013, p. 48-56.
- 28 Nondestructive Testing Resource Center – **Fracture Toughness**. Consultado em 24 Mar. 2015. Disponível em: <https://www.ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/FractureToughness.htm>
- 29 L.F.M. da Silva, A. Öchsner (Eds.) – **Modeling of Adhesively Bonded Joints**. 1ª Edição. Porto, Portugal: Lucas Filipe Martins da Silva, 2008. ISBN 978-3-540-79055-6.
- 30 E.J. Ripling, S. Mostovoy, R.L. Patrick – Application of fracture mechanics to adhesive joints. ASTM Special Technical Publication. Vol. 360, 1963, p. 5.
- 31 R.D.S.G. Campilho, M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, 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 & Adhesives. Vol. 44, 2013, p. 48-56.
- 32 Lucas F.M. da Silva, David A. Dillard, Bamber Blackman, Robert D. Adams – **Testing Adhesive Joints: best practices**. 1ª Edição. Weinheim, Alemanha: Wiley-VCH Verlag & Co, 2012. ISBN 978-3-527-32904-5
- 33 Melvin F. Kanninen, Carl H. Popelar – **Advanced Fracture Mechanics**. 1ª Edição. Nova Iorque: Oxford University Press, Inc, 1985. ISBN 13 978-0-19-503532-2
- 34 Y. Wang, J.G. Williams – Corrections for mode II fracture toughness specimens of composites materials. Composites Science and Technology. Vol. 43, 1992, p. 251-256.
- 35 M.F.S.F. de Moura, R.D.S.G. Campilho, J.P.M. Gonçalves – Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading. Composites Science and Technology. Vol. 68, 2008, p. 2224-2230.
- 36 J.R. Rice – A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. Journal of Applied Mechanics. Vol. 35, 1968, p. 379-386.
- 37 R.D.S.G. Campilho, D.C. Moura, D.J.S. Gonçalves, J.F.M.G. da Silva, M.D. Banea, L.F.M. da Silva – Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites. Composites Part B: Engineering. Vol. 508, 2013, p. 120-126.
- 38 M.F.S.F. de Moura, R.D.S.G. Campilho, J.P.M. Gonçalves – Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints. International Journal of Solids and Structures. Vol. 46, 2009, p. 1590-1595.
- 39 M.F.S.F. de Moura – Numerical simulation of the ENF test for the mode-II fracture characterization of bonded joints. Journal of Adhesion Science and Technology. Vol. 20, 2006, p. 37-52.
- 40 M.F.S.F. de Moura, A.B. de Morais – Equivalent crack based analyses of ENF and ELS tests. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 75, 2008, p. 2584-2596.

- 41 R.D.S.G. Campilho, L.F.M. da Silva – **Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints**. 1ª edição. 2012. ISBN 978-3-642-23608-2
- 42 K. Leffler, K.S. Alfredsson, U. Stigh – Shear behaviour of adhesive layers. International Journal of Solids and Structures. Vol. 44, 15 de Janeiro de 2007, p. 530-545.
- 43 Y. Zhu, K.M. Liechti, K. Ravi-Chandar – Direct extraction of rate-dependent traction - separation laws for polyurea/steel interfaces. International Journal of Solids and Structures. Vol. 46, 2009, p. 31-51.
- 44 S. Bennatia, M. Colleluoria, D. Coriglianoa, P. S. Valvo – An enhanced beam model of the Asymmetric Double Cantilever Beam (ADCB) test for composite laminates. 8th Seminar on Experimental Techniques and Design in Composite Materials. 3 – 6 de Outubro de 2007, Sardenha (Itália).
- 45 O. Volkersen – Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen mit konstanten loschonguerschnitten. Luftfahrtforschung. Vol. 15, 1938, p. 41-47.
- 46 R.D. Adams, N.A. Peppiatt – Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. Journal of Strain Analysis. Vol. 9, 1974, p. 185-196.
- 47 J.A. Harris, R.D. Adams – Strength prediction of bonded single-lap joints by non-linear finite element methods. International Journal of Adhesion & Adhesives. Vol. 4, 1984, p. 65-78.
- 48 J. L.C. Sosa, N. Karapurath – Delamination modeling of GLARE using the extended finite element method. Composites Science and Technology. Vol. 72, 2012, p. 788-791.
- 49 M. Goland, E. Reissner – The stresses in cemented joints. Journal of Applied Mechanics. Vol. 66, 1944, p. 17-27.
- 50 F. E. Penado – A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint. Journal of Thermoplastic Composite Materials. Vol. 11, 1998, p. 272-287.
- 51 M.L. Williams – The stresses around a fault or crack in dissimilar media. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 49, 1959, p. 199-204.
- 52 G. Fernlund, J.K. Spelt – Failure load prediction. International Journal of Adhesion & Adhesives. Vol. 11, 1991, p. 213-227.
- 53 K. Duan, X. Hu, Y.W. Mai – Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints. Journal of Adhesion Science and Technology. Vol. 18, 2004, p. 39-53.
- 54 C.D.M. Liljedahl, A.D. Crocombe, M.A. Wahab, I.A. Ashcroft – Damage modelling of adhesively bonded joints. International Journal of Fracture. Vol. 141, 2006, p. 147-161.
- 55 H. Khoramishad, A.D. Crocombe, K.B. Katnam, I.A. Ashcroft – Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model. International Journal of Fatigue. Vol. 32, 2010, p. 1146-1158.
- 56 L. Daudeville, P. Ladeveze – A damage mechanics tool for laminate delamination. Composite Structures. Vol. 25, 1993, p. 547-555.

- 57 G.Z. Voyiadjis, P.I. Kattan – **Damage Mechanics**. 1ª edição. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005. ISBN 10: 0-8247-2757-6.
- 58 S. Mohammadi – **Extended Finite Element Method: For Fracture Analysis of Structures**. 1ª edição. New Jersey: Blackwell Publishing, 2008. ISBN 978-1-4051-7060-4
- 59 T. Belytschko, T. Black – Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. International Journal of Fracture Mechanics. Vol. 45, 1999, p. 601-620.
- 60 N. Moës, J. Dolbow, T. Belytschko – A finite element method for crack growth without remeshing. International Journal for Numerical Methods in Engineering. Vol. 46, 1999, p. 131-150.
- 61 P. Feraren, H.M. Jensen – Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 71, 2004, p. 2125-2142.
- 62 Grigory I. Barenblatt – The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axially-symmetric cracks. Journal of Applied Mathematics and Mechanics. Vol. 23, 1959, p. 622-636.
- 63 Donald S. Dugdale – Yielding of steel sheets containing slits. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Vol. 8, 1960, 100-104.
- 64 T. Pardoën, T. Ferracin, C.M. Landis, F. Delannay – Constraint effects in adhesive joint fracture. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Vol. 53, 2005, p. 1951-1983.
- 65 Raul D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, J. J. M. S. Domingues – Modelling single and double lap repairs on composite materials. Composites Science and Technology. Vol. 65, 2005, p. 1948-1958.
- 66 C.D.M. Liljedahl, A.D. Crocombe, M.A. Wahab, I.A. Ashcroft – Damage modelling of adhesively bonded joints. International Journal of Fracture. Vol. 141, 2006, p. 147-161.
- 67 G. Ji, Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, S.-S. Pang. Effects of adhesive thickness on global and local Mode – I interfacial fracture of bonded joints. International Journal of Solids and Structures. Vol. 47, 2010, p. 2445-2458.
- 68 D. Xie, A.M. Waas – Discrete cohesive zone model for mixed-mode fracture using finite elemento analysis. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 73, 2006, p. 1783-1796.
- 69 R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, A.M.G. Pinto, J.J.L. Morais, J.J.M.S. Domingues – Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs. Composites Part B: Engineering. Vol. 40, 2009, p. 149-157.
- 70 T. Carlberger, U. Stigh – Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive – An Experimental Study. The Journal of Adhesion. Vol. 86, 2010, p. 816-835.
- 71 M.S. Kafkalidis, M.D. Thouless. – The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints. International Journal of Solids and Structures. Vol. 39, 2002, p. 4367-4383.

- 72 K.C. Pandya, J.G. Williams – Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene. Polymer Engineering & Science. Vol. 40, 2000, p. 1765-1776.
- 73 H. Chai – Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds. Experimental Mechanics. Vol. 32, 1992, p. 296-303.
- 74 Raul D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, 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. Vol. 45, 2008, p. 1497-1512.
- 75 T. Andersson, U. Stigh. – The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces. International Journal of Solids and Structures. Vol. 41, 2004, p. 413-434.
- 76 Raul D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, A.M.G. Pinto, D.A. Ramantani – Interlaminar fracture characterization of carbon epoxy composite in pure mode II. Materials Science Forum. Vol. 636-637, 2009, p. 1518-1524.
- 77 M.F.S.F. de Moura, Raul D.S.G. Campilho, A. M. Amaro, P.N.B. Reis – Interlaminar and intralaminar fracture characterization of composites under mode I loading. Composite Structures. Vol. 92, 2010, p. 144-149.
- 78 Raul D.S.G. Campilho – Repair of composite and wood structures. Tese de doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Março de 2009.
- 79 B.D. Flinn, C.S. Lo, F.W. Zok, A.G. Evans – Fracture Resistance Characteristics of a Metal-Toughened Ceramic. Journal of the American Ceramic Society. Vol. 76, 1993, p. 369-375.
- 80 A.W. Mello, K. M. Liechti – The Effect of Self-Assembled Monolayers on Interfacial Fracture. Journal of Applied Mechanics. Vol. 73, 2004, p. 860-870.
- 81 S. Li, M. D. Thouless, A.M. Waas, J. A. Schroeder, P. D. Zavattieri. – Use of a cohesive-zone model to analyze the fracture of a fiber-reinforced polymer-matrix composite. Composites Science and Technology. Vol. 65, 2005, p. 537-549.
- 82 U. Stigh, K. S. Alfredsson, T. Andersson, A. Biel, T. Carlberger, K. Salomonsson – Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers. International Journal of Fracture. Vol. 165, 2010, p. 149-162.
- 83 Raul D.S.G. Campilho, M.D. Banea, Arnaldo M.G. Pinto, L.F.M. da Silva, A.M.P. Jesus – Strength prediction of single and double-lap joints by standard and extended finite element modelling. International Journal of Adhesion & Adhesives. Vol. 31, 2011, p. 363-372.
- 84 Raul D.S.G. Campilho, M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, 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 & Adhesives. Vol. 88, 2013, p. 513-533.
- 85 R.D.S.G. Campilho, A.M.G. Pinto, M.D. Banea, R.F. Silva, L.F.M. da Silva – Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry. Journal of Adhesion Science and Technology. Vol. 25, 2011, p. 2351-2368.

- 86 J.A.B.P. Neto, Raul D.S.G. Campilho, L.F.M. da Silva – Parametric study of adhesive joints with composites. International Journal of Adhesion & Adhesives. Vol. 37, 2012, p. 96-101.
- 87 J.A.B.P. Neto – Estudo paramétrico de juntas Adesivas em Material Compósito. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.
- 88 T.M.S. Faneco – Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo de Materiais e Tecnologias de Fabrico. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.
- 89 T.A.B. Fernandes, R.D.S.G. Campilho, M.D. Banea, L.F.M. Silva – Adhesive selection for single lap bonded joints: experimentation and advanced techniques for strength prediction. The Journal of Adhesion. Vol. 91, 2015, p. 841-862.
- 90 D.B. Lee, T. Ikeda, N. Miyazaki, N.S. Choi – Effect of Bond Thickness on the Fracture Toughness of Adhesive Joints. Journal of Engineering Materials and Technology. Vol. 126, 2004, p. 14-18.
- 91 R.D.S.G. Campilho, D.C. Moura, M.D. Banea, 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. Vol. 53, 2014, p.15-22.
- 92 L.F.M. Silva, R.J.C. Carbas, G.W. Critchlow, M.A.V. Figueiredo, K. Brown. – Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints. Internacional Journal of Adhesion & Adhesives. Vol 29, 2009, p. 621-632.
- 93 R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, D.A. Ramantani, J.P.M. Gonçalves – Obtaining the Cohesive Laws of a Trapezoidal Mixed-Mode Damage Model Using an Iverse Method. Ciência e Tecnologia dos Materiais. Vol. 20, 2008, p. 81-86.
- 94 Ricardo M. Lopes – Comparação dos ensaios DCB e TDCB para determinação da tenacidade em tração de adesivos estruturais. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.
- 95 A. Turon, C.G. Dávila, P.P. Camanho, J. Costa – An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 74, 2007, p. 1665-1682.
- 96 A.M.G. Pinto, A.G. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, A.P.M. Baptista – Single lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive. The Journal of Adhesion. Vol. 85, 2009, p. 351-376.
- 97 G. Alfano, M.A. Crisfield – Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues. International Journal for Numerical Methods in Engineering. Vol. 50, 2001, p. 1701-1736.
- 98 O. Allix, A. Corigliano – Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens. International Journal of Fracture. Vol. 77, 1996, p. 111-140.

- 99 N. Chandra, H. Li, C. Shet, H. Ghonem – Some issues in the application of cohesive zone models for metal - ceramic interfaces. International Journal of Solids and Structures. Vol. 39, 2002, p. 2827-2855.
- 100 J. Chen – Predicting progressive delamination of stiffened fibre - composite panel and by decohesion models. Journal of Thermoplastic Composite Materials. Vol. 15, 2002, p. 429-441.
- 101 N. Chandra, H. Li, C. Shet, H. Ghonem – Some issues in the application of cohesive zone models for metalceramic interfaces. International Journal of Solids and Structures. Vol. 39, 2002, p. 2827-2855.
- 102 R.D.S.G. Campilho, M.D. Banea, F.J.P. Chaves, L.F.M. da Silva – eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I. Computational Materials Science. Vol. 50, 2011, p. 1543-1549.
- 103 Abaqus® Documentation. Dassault Systèmes. 2013, Vélizy-Villacoublay, France.
- 104 Q.D. Yang, M.D. Thouless, S.M. Ward – Numerical simulations of adhesively-bonded beams failing with extensive plastic deformation. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Vol. 47, 1999, p. 1337-1353.
- 105 R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, 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. Vol. 45, 2008, p. 1497-1512.
- 106 T. Carlberger, U. Stigh – An explicit FE-model of impact fracture in an adhesive joint. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 74, 2007, p. 2247-2262.
- 107 T. Andersson, U. Stigh – The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces. International Journal of Solids and Structures. Vol. 41, 2004, p. 413-434.
- 108 K. Leffler, K.S. Alfredsson, U. Stigh – Shear behaviour of adhesive layers. International Journal of Solids and Structures. Vol. 44, 2007, p. 530-545.
- 109 J. Radice, J. Vinson – On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structure: analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation. Composites Science and Technology. Vol. 66, 2006, p. 2528-2547.
- 110 A.A. Taib, R. Boukhili, S. Achiou, H. Boukehili – Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints. International Journal of Adhesion & Adhesives. Vol. 26, 2006, p. 237-248.
- 111 R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, J.J.M.S. Domingues – Modelling single and double-lap repairs on composite materials. Composites Science and Technology. Vol. 65, 2005, p. 1948-1958.
- 112 R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, J.J.M.S. Domingues – Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes. International Journal of Adhesion & Adhesives. Vol. 29, 2009, p. 195-205.

- 113 P. Reis, F. Antunes, J.A.M. Ferreira – Influence of superposition length on mechanical resistance of single lap adhesive joints. Composite Structures. Vol.67, 2005, p. 125-133.
- 114 W. Jiang, P. Qiao – An improved four-parameter model with consideration of Poisson's effect on stress analysis of adhesive joints. Engineering Structures. Vol. 88, 2015, p. 203-215.
- 115 R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, J.J.M.S. Domingues, J.J.L. Morais – Computational modelling of the residual strength of repaired composite laminates using a cohesive damage model. Journal of Adhesion Science and Technology. Vol. 22, 2008, p. 1565-1591.
- 116 J. de Castro, H. Keller – Ductile double-lap joints from brittle GFRP laminates and ductile adhesives, Part I: Experimental investigation. Composites Part B: Engineering. Vol. 39, 2008, p. 271-281.
- 117 M. Shishesaz, N.Bavi – Shear stress distribution in adhesive layers of a double-lap joint with void or bond separation. Journal of Adhesion Science and Technology. Vol.27, 2013, p. 1197-1225.
- 118 L.D.R. Grant, R.D. Adams, L.F.M. da Silva – Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry. International Journal of Adhesion & Adhesives. Vol.29, 2009, p. 405-413.
- 119 M. Davis, D. Bond – Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs. International Journal of Adhesion & Adhesives. Vol. 19, 1999, p. 91-105.
- 120 T. Vallée, J.R. Correia, T. Keller – Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles part I: Experimental and numerical investigations. Composites Science and Technology. Vol. 66, 2006, p. 1903-1914.
- 121 C. Shet, N. Chandra – Effect of the shape of T- δ cohesive zone curves on the fracture response. Mechanics of Advanced Materials and Structures. Vol. 11, 2004, p. 249-275.
- 122 Q. Yang, B. Cox – Cohesive models for damage evolution in laminated composites. International Journal of Fracture. Vol. 133, 2005, p. 107-37.
- 123 M.J. Troughton – **Handbook of plastics joining: a practical guide**. 2ª edição. United States of America: William Andrew Inc., 2008. ISBN 978-0-8155-1581-4.