

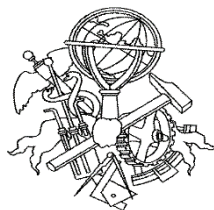
Estudo da resistência de juntas adesivas em L entre
alumínio e material compósito

Nuno Ricardo Esteves Domingues

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



30 de junho de 2015

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

Candidato: Nuno Ricardo Esteves Domingues, 1080863, 1080863@isep.ipp.pt

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

Co-orientação Científica: Ricardo João Camilo Carbas, rcarbas@fe.up.pt

Co-orientação Científica: Lucas Filipe Martins da Silva, lucas@fe.up.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



30 de junho de 2015

Para o meu Padrinho...

Agradecimentos

Só foi possível a elaboração e conclusão desta dissertação com o apoio e contributo de várias pessoas e instituições, às quais gostaria de apresentar o meu mais sincero agradecimento.

Ao Engenheiro Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, meu Orientador Científico, pela sua dedicação e disponibilidade apresentada durante todo o tempo necessário para a realização deste trabalho. Foi uma pessoa imprescindível, insubstituível e incansável a quem sempre serei grato. Ao meu Co-orientador Científico, o Engenheiro Ricardo João Camilo Carbas por toda a ajuda, dedicação e compreensão mostrada durante a realização do trabalho prático. Ao meu Co-orientador Científico, o Engenheiro Lucas Filipe Martins da Silva pela oportunidade de realização deste trabalho no Laboratório de Adesivos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Um agradecimento às duas instituições académicas que me acolheram e me deram oportunidade de realização deste trabalho, o Instituto Superior de Engenharia do Porto e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Não menos importante, à minha família, por toda a dedicação, esforço, sentido de sacrifício e incentivo demonstrado ao longo destes anos. Sem eles eu não teria alcançado os meus objectivos académicos. Um agradecimento especial ao meu padrinho, que infelizmente nunca teve oportunidade de ver o meu sucesso académico mas a quem serei eternamente grato por tudo o que foi na minha vida, por todos os valores inculcados e por todo o carinho e amor que recebi, e me ajudaram a tornar no homem que hoje sou.

À minha namorada por todo o apoio e compreensão demonstrado durante estes anos, que foi fundamental para o meu sucesso. À minha “maninha” Miriam Pereira pelo apoio demonstrado e pelos 5 anos fantásticos da sua companhia académica. Aos meus amigos mais antigos, Ricardo Cardoso, Manuela Costa, Cláudia Domingues, Virgínia Fernandes e Filipa Crespo por estarem sempre presentes na minha vida, apoio dado e serem os melhores amigos que poderia ter. Aos meus mais recentes amigos da Licenciatura e Mestrado Carlos Lima, Nuno Passos, Daniel Monteiro, Bruno Domingos, Míguas Fernandes, João Quadrado e Rui Leão, por toda a amizade, apoio demonstrado, ajuda facultada e anos na sua companhia.

Resumo

As ligações adesivas são frequentemente utilizadas na fabricação de estruturas complexas que não poderiam ou não seriam tão fáceis de ser fabricadas numa só peça, a fim de proporcionar uma união estrutural que, teoricamente, deve ser pelo menos tão resistente como o material de base. As juntas adesivas têm vindo a substituir métodos como a soldadura, e ligações parafusadas e rebitadas, devido à facilidade de fabricação, menor custo, facilidade em unir materiais diferentes, melhor resistência, entre outras características. Os materiais compósitos reforçados com fibra de carbono são amplamente utilizados em muitas indústrias, tais como de construção de barcos, automóvel e aeronáutica, sendo usados em estruturas que requerem elevada resistência e rigidez específicas, o que reduz o peso dos componentes, mantendo a resistência e rigidez necessárias para suportar as diversas cargas aplicadas. Embora estes métodos de fabricação reduzam ao máximo as ligações através de técnicas de fabrico avançadas, estas ainda são necessárias devido ao tamanho dos componentes, limitações de projecto tecnológicas e logísticas. Em muitas estruturas, a combinação de compósitos com metais tais como alumínio ou titânio traz vantagens de projecto.

Este trabalho tem como objectivo estudar, experimentalmente e por modelos de dano coesivo (MDC), juntas adesivas em L entre componentes de alumínio e compósito de carbono epóxico quando solicitados a forças de arrancamento, considerando diferentes configurações de junta e adesivos de ductilidade distinta. Os parâmetros geométricos abordados são a espessura do aderente de alumínio (t_{P2}) e comprimento de sobreposição (L_0). A análise numérica permitiu o estudo da distribuição das tensões, evolução do dano, resistência e modos de rotura. Os testes experimentais validam os resultados numéricos e fornecem mecanismos de projecto para juntas em L . Foi mostrado que a geometria do aderente em L (alumínio) e o tipo de adesivo têm uma influência directa na resistência de junta.

Palavras-chave: Método de Elementos Finitos, modelos de dano coesivo, adesivo estrutural, juntas adesivas, ensaios mecânicos.

Abstract

Adhesive bonding is frequently used to manufacture complex-shaped structures that couldn't or wouldn't be so easy to fabricate in a single component, to provide a structural bond that, theoretically, should be as resistant as the base material. Adhesive joints are gradually replacing traditional bonding methods such as welding and bolted or riveted joints, due to their easier manufacturing, lower cost, possibility to bond different materials, better strength, among other advantages. Fibre-reinforced composite materials are extensively used in many industries, such as boat building, automotive and aeronautic, being used in structures that require high specific strength and stiffness, which reduces the weight of components while maintaining the necessary strength and stiffness to withstand the applied loads. Although the manufacturing methods reduce to the maximum the connections through advanced manufacturing techniques, these are still necessary due to component size and design, technological and logistical limitations. In many structures, the combination of composites with metals such as aluminium or titanium brings design benefits.

This work aims to study, by experimentation and cohesive zone modelling (CZM), single- L adhesive joints between aluminium components and carbon-epoxy composites under a peel loading, considering different joint configurations and adhesives of distinct ductility. The addressed geometric parameters are the L -part thickness (t_{p2}) and overlap length (L_O). The numerical analysis enabled the study of stress distributions, damage variable evolution, strength and failure modes. The experimental tests validated the numerical results and provided design guidelines for single- L joints. It was shown that the L -part geometry and adhesive type highly influence the joints strength.

Keywords: Finite Element Method, cohesive zone models, structural adhesive, adhesive joints, mechanical tests.

Índice

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XXI
NOMENCLATURA	XXIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJECTIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 LIGAÇÕES ADESIVAS.....	5
2.1.1 <i>Caracterização das juntas adesivas</i>	6
2.1.2 <i>Aplicações comuns das juntas adesivas</i>	10
2.1.3 <i>Esforços típicos em juntas adesivas</i>	11
2.1.4 <i>Tipos de rotura</i>	13
2.1.5 <i>Configurações possíveis de junta</i>	14
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ADESIVOS	17
2.2.1 <i>Caracterização dos adesivos estruturais</i>	18
2.2.2 <i>Tipos de adesivos estruturais</i>	19
2.3 PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DAS JUNTAS	22
2.3.1 <i>Modelos analíticos</i>	22
2.3.2 <i>Métodos numéricos</i>	23
2.4 JUNTAS COM TENSÕES NORMAIS	26
2.4.1 <i>Ensaios para caracterização ao arrancamento</i>	26
2.4.2 <i>Juntas em T</i>	28
2.4.3 <i>Juntas em L</i>	30
3 TRABALHO EXPERIMENTAL	35
3.1 MATERIAIS	35
3.1.1 <i>Substratos</i>	35
3.1.2 <i>Adesivos</i>	38
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	41

3.2.1	<i>Geometria das juntas</i>	41
3.2.2	<i>Processo de fabrico</i>	42
3.2.3	<i>Ensaio das juntas</i>	49
3.2.4	<i>Resultados</i>	50
3.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	57
4	TRABALHO NUMÉRICO	59
4.1	CONDIÇÕES DA ANÁLISE NUMÉRICA.....	59
4.2	MODELO DE DANO COESIVO	63
4.2.1	<i>Modelo de dano triangular</i>	63
4.2.2	<i>Determinação das propriedades coesivas</i>	64
4.3	ANÁLISE DE TENSÕES NA JUNTA.....	66
4.3.1	<i>Estudo das distribuições de tensão em diferentes planos</i>	66
4.3.2	<i>Estudo do efeito de L_0</i>	70
4.3.3	<i>Estudo do efeito de t_{p2}</i>	78
4.4	ESTUDO DA VARIÁVEL DE DANO.....	83
4.4.1	<i>Juntas coladas com o Araldite® AV138</i>	83
4.4.2	<i>Juntas coladas com o Sikaforce® 7752</i>	89
4.5	MODOS DE ROTURA.....	96
4.6	PREVISÃO DE RESISTÊNCIA	96
4.6.1	<i>Juntas coladas com o Araldite® AV138</i>	97
4.6.2	<i>Juntas coladas com o Sikaforce® 7752</i>	100
4.7	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	103
5	CONCLUSÕES	105
	REFERÊNCIAS	109
	ANEXO A. FICHAS TÉCNICAS DOS ADESIVOS UTILIZADOS	115

Índice de Figuras

Figura 1 – Comportamento do adesivo sujeito a solitação normal e de corte [6].	6
Figura 2 – Deformação plástica dos substratos [6].	9
Figura 3 – Utilização de adesivos na construção de um avião [8].	10
Figura 4 – Utilização de juntas adesivas no Lamborghini Reventon Roadster e aplicações adesivas ao nível da vedação de cârter, estrutura, vidro e portas [9].	11
Figura 5 – Modos de carregamento em juntas adesivas: (a) tração, (b) compressão, (c) corte, (d) clivagem e (e) arrancamento [10].	12
Figura 6 – Modos de rotura que possíveis de ocorrer em juntas adesivas: (a) rotura coesiva, (b) rotura adesiva, (c) rotura do substrato e (d) rotura mista [6].	14
Figura 7 – Diferentes configurações de juntas adesivas [6].	15
Figura 8 – Resistência de juntas de sobreposição simples em função de L_0 .	17
Figura 9 – Classificação dos diversos tipos de adesivos segundo o seu desempenho [6].	18
Figura 10 – Modelo de dano coesivo 2D com lei triangular [14].	25
Figura 11 – Ensaio de arrancamento a 180° [6].	26
Figura 12 – Ensaio <i>floating roller test</i> [6].	27
Figura 13 – Ensaio <i>climbing drum test (peel)</i> em estrutura de <i>sandwich</i> [6].	27
Figura 14 – Ensaio de arrancamento nas juntas em T [6].	28
Figura 15 – Ensaio de arrancamento das juntas em T [32].	29
Figura 16 – Refinamento da malha da junta em T (3D) para análise em ABAQUS® [32].	29
Figura 17 – Configuração e dimensões da junta em L [33].	30
Figura 18 – Malha utilizada nos modelos MEF [33].	31
Figura 19 – Exemplo de junta em L após rotura [33].	31
Figura 20 – Posições dos extensómetros medição experimental das deformações e tensões [33].	32
Figura 21 – Distribuições de tensões de arrancamento na camada de adesivo [33].	32
Figura 22 – Curvas força – deslocamento das juntas em L [33].	33
Figura 23 – Tipos de carregamento em estudo [34].	33
Figura 24 – Tensões normais (MPa) para os três carregamentos: a) P_x , b) P_y e c) M [34].	34
Figura 25 – Curva tensão – deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082 – T651 e respectiva aproximação para análise através do MEF [11].	36
Figura 26 – Curvas σ - ϵ relativas ao adesivo Araldite® AV138 [37].	38
Figura 27 – Curva σ - ϵ relativa ao adesivo Sikaforce® 7752 [39].	40
Figura 28 – Geometria da junta em L .	41
Figura 29 – a) Marcação dos provetes para dobragem, b) utilização de chapas para auxílio da dobra, c) aspecto final do provete.	42
Figura 30 – a) Aquecimento de uma camada de compósito e b) processo de empilhamento.	43

Figura 31 – a) Aplicação do desmoldante, b) placa de compósito entre chapas de aço, c) placa de compósito na prensa a uma temperatura de 130°C.....	44
Figura 32 – Ciclo térmico de cura das placas de CFRP.	44
Figura 33 – a) máquina de corte utilizada e b) provetes cortados.	44
Figura 34 – Alinhamento dos provetes de compósito com auxílio de espaçadores de alumínio.....	45
Figura 35 – Alinhamento das fitas calibradas de 0,2 mm.	46
Figura 36 – a) pesagem da resina e b) endurecedor para a preparação do Araldite® AV138.....	46
Figura 37 – Misturadora.....	47
Figura 38 – Colocação do aderente de alumínio em <i>L</i> sobre as fitas calibradas de 0,2 mm e CFRP.	47
Figura 39 – Juntas coladas durante o processo de cura.	48
Figura 40 – Junta após remoção do excesso de adesivo.....	48
Figura 41 – Aspecto final das juntas.	49
Figura 42 – Base fabricada para ensaio dos provetes.....	49
Figura 43 – Ensaio de arrancamento de uma junta em <i>L</i>	50
Figura 44 – Rotura coesiva do adesivo para as juntas coladas com o Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm.	51
Figura 45 – Rotura coesiva do adesivo para as juntas coladas com o Araldite® AV138 e $t_{p2}=4$ mm.	51
Figura 46 – Curvas $P-\delta$ para as juntas coladas com o Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm.	52
Figura 47 – Curvas $P-\delta$ para as juntas coladas com o Araldite® AV138 e $t_{p2}=4$ mm.	52
Figura 48 – Valores de P_m das juntas coladas com o Araldite® AV138 em função de t_{p2}	53
Figura 49 – Junta sem plastificação de alumínio durante e após ensaio de arrancamento ($t_{p2}=1$ mm).	53
Figura 50 – Rotura coesiva do adesivo para as juntas das juntas coladas com o Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=2$ mm.	54
Figura 51 – Rotura coesiva do adesivo para as juntas das juntas coladas com o Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=3$ mm.	54
Figura 52 – Curvas $P-\delta$ para as juntas coladas com o Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=1$ mm.	55
Figura 53 – Curvas $P-\delta$ para as juntas coladas com o Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=4$ mm.	55
Figura 54 – Valores de P_m das juntas coladas com o Sikaforce® 7752 em função de t_{p2}	56
Figura 55 – Plastificação do aderente de alumínio durante e após ensaio de arrancamento ($t_{p2}=1$ mm).	56
Figura 56 – Modelo numérico com detalhe das partições para construção da malha de MEF.....	60
Figura 57 – Geometria do ensaio a) DCB e b) ENF.	61
Figura 58 – Detalhe da malha na extremidade do adesivo para uma análise de tensões e de resistência.	62
Figura 59 – Planos para estudo das tensões na junta em <i>L</i>	67
Figura 60 – Tensões de corte em vários planos da junta colada com o Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm.	67
Figura 61 – Tensões de arrancamento em vários planos da junta colada com o Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm.	68
Figura 62 – Tensões de corte em vários planos da junta colada com o Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=1$ mm.....	69
Figura 63 – Tensões de arrancamento em vários planos da junta colada com o Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=1$ mm.....	70
Figura 64 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm).....	71
Figura 65 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Araldite® AV138 e $t_{p2}=2$ mm).....	71
Figura 66 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Araldite® AV138 e $t_{p2}=3$ mm).....	71

Figura 67 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Araldite® AV138 e $t_{p2}=4$ mm).	72
Figura 68 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm).	72
Figura 69 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Araldite® AV138 e $t_{p2}=2$ mm).	73
Figura 70 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Araldite® AV138 e $t_{p2}=3$ mm).	73
Figura 71 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Araldite® AV138 e $t_{p2}=4$ mm).	73
Figura 72 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=1$ mm).	74
Figura 73 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=2$ mm).	75
Figura 74 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=3$ mm).	75
Figura 75 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=4$ mm).	75
Figura 76 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=1$ mm). ..	76
Figura 77 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=2$ mm). ..	77
Figura 78 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=3$ mm). ..	77
Figura 79 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=4$ mm). ..	77
Figura 80 – Efeito da variação de t_{p2} : tensões de corte no adesivo (Araldite® AV138 e $L_0=25$ mm).	78
Figura 81 – Efeito da variação de t_{p2} : tensões de corte no adesivo (Sikaforce® 7752 e $L_0=25$ mm).	79
Figura 82 – Efeito da variação de t_{p2} : tensões de corte no adesivo (Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm).	79
Figura 83 – Efeito da variação de t_{p2} : tensões de corte no adesivo (Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm).	80
Figura 84 – Efeito da variação de t_{p2} : tensões de arrancamento no adesivo (Araldite® AV138 e $L_0=25$ mm). ..	80
Figura 85 – Efeito da variação de t_{p2} : tensões de arrancamento no adesivo (Sikaforce® 7752 e $L_0=25$ mm). ..	81
Figura 86 – Efeito da variação de t_{p2} : tensões de arrancamento no adesivo (Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm). ..	82
Figura 87 – Efeito da variação de t_{p2} : tensões de arrancamento no adesivo (Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm). ..	82
Figura 88 – Evolução da variável de dano SDEG para a junta colada com o Araldite® AV138 e no instante de P_m , com $L_0=25$ mm e diferentes valores de t_{p2}	83
Figura 89 – Processo de rotura da junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=25$ mm e $t_{p2}=1$ mm.	84
Figura 90 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=25$ mm e $t_{p2}=1$ mm.	85
Figura 91 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=25$ mm e $t_{p2}=2$ mm.	85
Figura 92 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=25$ mm e $t_{p2}=3$ mm.	85
Figura 93 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=25$ mm e $t_{p2}=4$ mm.	86
Figura 94 – Evolução da variável de dano SDEG para a junta colada com Araldite® AV138 e no instante de P_m , $L_0=50$ mm e diferentes valores de t_{p2}	86
Figura 95 – Processo de rotura da junta colada com Araldite® AV138, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=1$ mm.	87
Figura 96 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=1$ mm.	87
Figura 97 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=2$ mm.	88

Figura 98 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=3$ mm.	88
Figura 99 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=4$ mm.	88
Figura 100 – Evolução da variável de dano SDEG para a junta colada com Sikaforce® 7752 e no instante de P_m , $L_0=25$ mm e diferentes valores de t_{p2}	89
Figura 101 – Processo de rotura da junta colada com o Sikaforce® 7752, $L_0=25$ mm e $t_{p2}=1$ mm.	90
Figura 102 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Sikaforce® 7752, $L_0=25$ mm e $t_{p2}=1$ mm.	91
Figura 103 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Sikaforce® 7752, $L_0=25$ mm e $t_{p2}=2$ mm.	91
Figura 104 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Sikaforce® 7752, $L_0=25$ mm e $t_{p2}=3$ mm.	91
Figura 105 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Sikaforce® 7752, $L_0=25$ mm e $t_{p2}=4$ mm.	92
Figura 106 – Evolução da variável de dano SDEG para a junta colada com Sikaforce® 7752 e no instante de P_m , $L_0=50$ mm e diferentes valores de t_{p2}	93
Figura 107 – Processo de rotura da junta colada com o Sikaforce® 7752, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=1$ mm.	94
Figura 108 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Sikaforce® 7752, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=1$ mm.	94
Figura 109 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Sikaforce® 7752, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=2$ mm.	94
Figura 110 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Sikaforce® 7752, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=3$ mm.	95
Figura 111 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Sikaforce® 7752, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=4$ mm.	95
Figura 112 – Evolução de rotura da junta colada com o Sikaforce® 7752, $t_{p2}=1$ mm e $L_0=25$ mm, a) análise numérica, b) análise experimental.	96
Figura 113 – Curvas P - δ numéricas e experimentais para as juntas coladas com o Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm.	97
Figura 114 – Curvas P - δ numéricas e experimentais para as juntas coladas com o Araldite® AV138 e $t_{p2}=4$ mm.	97
Figura 115 – Valores numéricos de P_m para as juntas coladas com o Araldite® AV138 em função de L_0	98
Figura 116 – Valores de P_m experimentais e respectiva previsão numérica para as juntas coladas com o Araldite® AV138 função de t_{p2}	99
Figura 117 – Curvas P - δ numéricas e experimentais para as juntas coladas com o Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=1$ mm.	100
Figura 118 – Curvas P - δ numéricas e experimentais para as juntas coladas com o Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=4$ mm.	100
Figura 119 – Valores numéricos de P_m para as juntas coladas com o Sikaforce® 7752 função de L_0	101

Figura 120 – Valores de P_m experimentais e respectiva previsão numérica para as juntas coladas com o Sikaforce® 7752 em função de t_{p2}	102
Figura 121 – Distribuição de tensão em esforços de a) clivagem e b) arrancamento [5].	103

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio [36].	37
Tabela 2 – Propriedades elásticas ortotrópicas do CFRP [13].	37
Tabela 3 – Propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo Araldite® AV138 [37 a 39].	39
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce® 7752 [37 a 39].	40
Tabela 5 – Dimensões das juntas [em mm].	42
Tabela 6 – Propriedades intralaminares do compósito [11].	61
Tabela 7 – Propriedades coesivas dos adesivos em estudo.	61
Tabela 8 – Definições de incrementação no <i>software</i> ABAQUS®.	63
Tabela 9 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com t_A =0,2 mm.	65
Tabela 10 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com t_A =0,2 mm.	66

Nomenclatura

Caracteres Romanos

E – Módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young

G – Módulo de elasticidade transversal

G_C – Tenacidade

G_{IC} – Tenacidade à tracção

G_{IIC} – Tenacidade ao corte

L_A – Altura do aderente de alumínio

L_O – Comprimento de sobreposição do alumínio/comprimento de adesivo

L_T – Comprimento do CFRP

M – Carregamento a meio vão do aderente em L

P – Força

P_1 a P_6 – Planos horizontais para extracção das tensões na junta adesiva

P_m – Força máxima

P_x – Carregamento na direcção x

P_y – Carregamento na direcção y

R – Raio de curvatura do alumínio em L

t_A – Espessura de adesivo

t_n^0 – Resistência coesiva à tracção

t_m^0 – Resistência coesiva em modo misto

t_{P1} – Espessura do aderente de CFRP

t_{P2} – Espessura do aderente de alumínio

t_s^0 – Resistência coesiva ao corte

x – Coordenada x ao longo da camada de adesivo, com início na extremidade esquerda

Caracteres Gregos

ν – Coeficiente de Poisson

γ_f – Deformação de rotura ao corte

δ – Deslocamento imposto

ε_f – Deformação de rotura

σ – Tensão de arrancamento

σ_f – Tensão de rotura

σ_y – Tensão de cedência

τ – Tensão de corte

τ_y – Tensão de cedência ao corte

Abreviaturas

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

Al – Alumínio

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CFRP – *Carbon fiber reinforced polymer*

CZM – *Cohesive Zone Model*

DCB – *Double cantilever beam*

ENF – *End-notched flexure*

FEUP – *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*

HV – *Dureza Vickers*

ISEP – *Instituto Superior de Engenharia do Porto*

MDC – *Modelo do dano coesivo*

MEF – *Método de elementos finitos*

SDEG – *Stiffness degradation*

TAST – *Thick adherend shear test*

1 Introdução

1.1 Contextualização

Nos dias de hoje e com o desenvolvimento da tecnologia a sociedade tornou-se cada vez mais dependente desta, dos seus bens tecnológicos, com clara evidência da utilização dos adesivos em diversos sectores da indústria.

A indústria aeronáutica tem sido a principal responsável pelo desenvolvimento e aperfeiçoamento da prática e utilização dos adesivos, pela utilização de adesivos estruturais. Devido aos excelentes resultados obtidos na ligação de diversos materiais, as ligações adesivas começaram também a ser utilizadas por outras indústrias, como é o caso do sector automóvel, aeronáutico, eólico, desportos, entre muitas outras.

Os adesivos permitem a junção de dois ou mais materiais, que podem ter características distintas entre si, não requerendo utilização de componentes mais pesados como caso de parafusos, rebites ou a própria soldadura, impossível nalguns materiais. Esta técnica oferece bastantes vantagens quando em comparação com estes métodos mais tradicionais, podendo deste modo reduzir significativamente o peso, concentrações de tensões e as vibrações [1]. A ligação adesiva é frequentemente utilizada para a fabricação de estruturas de forma complexa, que não poderiam ou não seriam tão fáceis de ser fabricadas numa só peça, a fim de proporcionar uma união estrutural que, teoricamente, deve ser pelo menos tão resistente como o material de base. A resistência de uma ligação adesiva depende de muitos factores, tais como o tipo de junta, parâmetros geométricos, materiais utilizados na ligação (aderentes) e características do próprio adesivo.

Em relação aos materiais compósitos reforçados com fibra de carbono, estes são cada vez mais populares e utilizados em muitas aplicações, sendo maioritariamente usados em estruturas que requerem elevada resistência e rigidez, o que reduz o peso dos componentes,

mantendo a resistência e rigidez necessárias para suportar as diversas cargas aplicadas. Com a crescente utilização de materiais compósitos na indústria aeroespacial e conhecimentos adquiridos em ferramentas de desenho e modelação foi possível expandir estes materiais para indústrias como a naval, automóvel e militar. Em muitas estruturas, a combinação de materiais compósitos com metais tais como alumínio ou titânio acarreta várias vantagens de projecto, peso, redução de esforços e optimização estrutural.

Existem actualmente uma variedade de configurações de junta com utilização de diversos e diferentes materiais colados entre si, porém com algumas limitações quando solicitadas a esforços de arrancamento. As juntas adesivas solicitadas ao arrancamento têm vindo a ser estudadas ao longo do tempo, por diversos autores, tais como Kaelble [2], Lin et al. [3], Zhang e Wang [4], entre outros. Sendo assim, é de extrema importância a existência de ferramentas de projecto para este tipo de juntas, bem como compreender como a sua resistência é afectada por diferentes condições materiais e geométricas.

1.2 Objectivos

A dissertação apresentada foi realizada durante o ano lectivo de 2014-2015 no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica do ramo de Construções Mecânicas, administrado no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). O trabalho consistiu na simulação numérica e ensaio de juntas híbridas em L entre aderentes de compósito de carbono-epóxico e liga de alumínio de alta resistência, unidas por dois tipos de adesivos, Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. A nível numérico recorreu-se ao *software* de elementos finitos ABAQUS® para a realização das simulações. As configurações de junta numéricas incluem 2 valores de L_0 (25 e 50 mm), 4 espessuras do aderente de alumínio diferentes (1, 2, 3 e 4 mm) e os 2 tipos de adesivos mencionados acima. Ao nível experimental apenas é testado o $L_0=25$ mm, com as devidas quatro espessuras de alumínio e os dois adesivos mencionados.

Esta dissertação tem como intuito de averiguar o comportamento dos 2 tipos de adesivos utilizados nas juntas e analisar a variação nos modos de rotura e resistência das diferentes configurações de junta apresentadas, para efeitos de optimização da junta. Pretende-se também realizar uma análise numérica detalhada no *software* ABAQUS® utilizando modelos de dano coesivo para previsão de resistência. Anteriormente, é realizado um estudo numérico de distribuições de tensões e variável de dano para melhor compreender as diferenças obtidas

entre configurações de juntas e adesivos. No final irá ser feita uma comparação entre a análise numérica e os valores experimentais para efeitos da avaliação dos modelos de dano de coesivo para efeitos de projecto de juntas entre aderentes distintos.

Após a obtenção dos resultados numéricos e experimentais das configurações de junta que terá por objectivo acrescentar valor aos resultados numéricos previamente efectuados, deverá ser possível seleccionar o adesivo ideal para aplicações em que os componentes estejam susceptíveis às solicitações de arrancamento.

1.3 Organização do relatório

Este trabalho foi organizado por 5 capítulos, onde no primeiro capítulo se descrevem os objectivos propostos e se efectua uma abordagem preliminar a este trabalho, após contextualização deste tema e referência breve a estudos anteriormente realizados sobre o mesmo assunto.

No segundo capítulo realiza-se a revisão bibliográfica, na qual se descrevem as bases necessárias sobre ligações adesivas relevantes para o trabalho em curso. São expostas vantagens e desvantagens deste tipo de ligações bem como os esforços a que as juntas ficam sujeitas, tipos de rotura, tipos de juntas adesivas mais utilizadas e algumas juntas mais comuns. São também descritos os diversos tipos de adesivos estruturais com especial ênfase para os epóxidos e poliuretanos, utilizados neste trabalho. Apresenta-se ainda neste capítulo os principais métodos analíticos e numéricos de previsão de resistência comumente utilizados em ligações adesivas.

No terceiro capítulo é apresentado e descrito o trabalho experimental realizado, onde são enunciados os materiais utilizados, as suas propriedades e dimensões geométricas das juntas. É feita uma descrição do método utilizado para a fabricação das juntas, bem como as condições nas quais as juntas foram testadas e posteriores resultados de resistência e curvas $P-\delta$ obtidas.

No quarto capítulo, reservado ao trabalho numérico, são expressas as condições da análise numérica, o método de dano coesivo utilizado, uma análise de tensões (2D) das juntas para as diferentes condições geométricas, uma análise da variável de dano durante o processo de rotura, a previsão do comportamento das juntas quanto à sua resistência, curvas $P-\delta$ e

possível validação da técnica numérica comparando estes resultados com os resultados experimentais.

Por fim, reserva-se o quinto e último capítulo a uma apresentação dos resultados e conclusões finais. São ainda apresentadas propostas de trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Ligações adesivas

Um adesivo pode ser definido como um material polimérico que, ao ser aplicado num determinado tipo de superfícies, poderá ligá-las e resistir devidamente à sua separação. A ligação adesiva não é uma prática recente de ligação de materiais, uma vez que os Egípcios, quinze séculos antes de Jesus Cristo, já os utilizavam, pois já aplicavam colas à base de gelatina, ovo e resinas de plantas em trabalhos feitos em madeira e pedra [5].

Devido à fraca durabilidade dos adesivos baseados em produtos naturais e necessidade de prolongar a sua vida útil, desenvolveram-se adesivos sintéticos poliméricos nos anos 40. No entanto, como se tratavam de adesivos sintéticos e não havia muito estudo nem técnicas de utilização muito precisas, os primeiros adesivos sintéticos criados eram muito frágeis e fragmentavam com facilidade. Porém, ainda durante essa década o químico Bruyne em conjunto com os seus colegas, adicionaram à mistura polímeros com uma boa tenacidade. Esta combinação representou um dos principais avanços tecnológicos dos adesivos que hoje se conhecem, permitindo a ligação de diversos materiais (madeiras, metálicos, entre outros) com elevado sucesso [6].

Diversos adesivos e configurações de junta podem ser utilizados para ligar diferentes materiais. Ao longo dos anos foi-se detalhando e aprofundando a tecnologia dos adesivos e a ciência da adesão. Foi necessário aprofundar conhecimentos em Resistência dos Materiais, Química e Físico – Química de macromoléculas e de superfícies, Mecânica da Fractura, entre outras, tornando-se a ligação por adesivo uma técnica que requer um conhecimento e domínio teórico e experimental numa série de matérias científicas [6].

A grande parte dos adesivos modernos e actuais são baseados em polímeros sintéticos tais como os fenólicos, os epóxidos, acrílicos e uretanos. A indústria aeronáutica foi uma das

principais responsáveis pelo desenvolvimento das ligações adesivas. No entanto, os adesivos são cada vez mais utilizados e comuns noutras indústrias, como na automóvel, construção civil, electrónica, medicina dentária, desporto e naval [6].

Durante a execução de uma junta adesiva é importante definir geometrias que evitem tensões localizadas e que garantam uma distribuição o mais uniforme possível das tensões. Por norma os adesivos possuem melhor comportamento ao corte do que ao arrancamento [7]. Assim as forças de arrancamento ou de clivagem são as mais críticas para qualquer tipo de adesivo e, como solução, o adesivo deve ser sujeito maioritariamente a tensões de corte. Este tipo de esforços é conseguido com carregamentos no plano da camada de adesão e garante uma distribuição de tensões mais favorável (Figura 1).

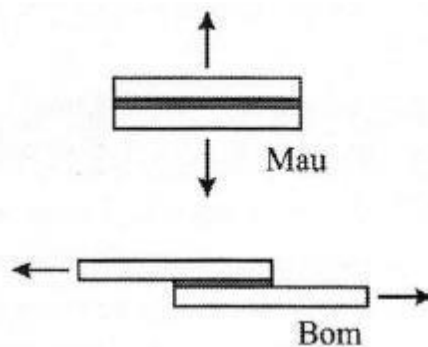


Figura 1 – Comportamento do adesivo sujeito a sollicitação normal e de corte [6].

Para o processo de fabrico de uma junta adesiva, o adesivo necessita inicialmente de se encontrar na forma líquida ou pasta, com o intuito de se espalhar mais facilmente na superfície de todo o substrato durante a aplicação do mesmo. Posteriormente, de forma à junta poder suportar as cargas que serão aplicadas em serviço, o adesivo, que até a este momento se encontra no estado líquido, deverá endurecer. No caso dos adesivos usados em aplicações de engenharia, o adesivo está inicialmente sob a forma de um monómero que polimeriza originando um adesivo polimérico de elevado peso molecular [5].

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

As juntas adesivas têm vindo a substituir os métodos tradicionais de ligação tais como ligações aparafusadas, rebetadas ou mesmo soldadas. Podem-se apresentar como principais vantagens das juntas adesivas relativamente aos métodos de ligação mecânica as seguintes [5, 6]:

1. Tensões mais uniformes ao longo da área ligada, permitindo desta forma maior rigidez e transmissão de carga elevada, possibilitando assim uma redução de peso, menor custo e melhor resistência à fadiga;
2. Amortecimento de vibrações, possibilitando que as tensões sejam parcialmente absorvidas, contribuindo deste modo para melhorar a resistência à fadiga;
3. Ligação de diferentes materiais quer em composição química, quer em diferentes propriedades físicas;
4. Ligação eficaz para chapas metálicas de espessura fina;
5. Facilidade de automatização do processo de ligação;
6. Contacto contínuo na junta entre as superfícies ligadas;
7. Maior flexibilidade no projecto de juntas, permitindo o uso de novos conceitos e materiais;
8. Possibilidade de fabrico de formas mais complicadas e obtenção de uma boa aparência estética das peças;
9. Depois da colagem e respectiva limpeza a área de ligação não é tao visível e revela uma aparência mais apelativa, ao contrário da soldadura;
10. Minimização dos problemas de corrosão, sobretudo em ligações com diferentes materiais;
11. Não se registam alterações estruturais, e temperaturas de processamento menores não afectam as propriedades dos materiais, comparando com o processo tradicional de soldadura.

Os principais inconvenientes das ligações adesivas são [5, 6]:

1. Necessidade de um projecto da junta que reduza ao máximo os esforços de arrancamento e clivagem;
2. Quando os dois materiais são rígidos, a ligação pode estar sujeita a forças de clivagem;
3. Resistência limitada a condições extremas de temperatura e humidade devido à natureza polimérica do adesivo;
4. A ligação manual não é normalmente realizada instantaneamente, o que obriga à utilização de gabaritos de fixação para manter as peças em posição durante a cura;
5. Para otimizar os resultados é necessária uma cuidada preparação das superfícies através de uma boa abrasão mecânica, desgorduramento com solvente, ataques químicos, entre outros. Em alguns adesivos é suficiente preparação por abrasão e

desengorduramento. Caso estes procedimentos não sejam bem executados, os resultados obtidos poderão revelar-se bastante medíocres;

6. A cura dos adesivos é realizada, por vezes, a elevadas temperaturas, implicando a existência de um forno ou prensa;
7. O controlo de qualidade e segurança são mais difíceis, embora tenham sido desenvolvidas recentemente técnicas não destrutivas adequadas;
8. Um dos grandes problemas da utilização mais frequente de adesivos estruturais resume-se ao facto de não existir um critério de dimensionamento universal que permita projectar qualquer estrutura. Existem muitos adesivos que só funcionam correctamente quando são aplicados em determinadas situações específicas.

O processo de ligação das juntas adesivas passa pelas seguintes etapas [5]:

- Selecção do adesivo;
- Projecto da junta;
- Preparação da superfície;
- Fabrico da junta;
- Controlo do processo.

A **selecção do adesivo** deve obedecer a um conjunto de critérios definidos pela aplicação em vista. Geralmente os parâmetros mais importantes são a resistência mecânica, ductilidade, a temperatura de serviço, o meio ambiente e o método de aplicação [5].

Ao **projectar uma junta adesiva**, parte-se do princípio que existe uma adesão perfeita entre o adesivo e o aderente. O conhecimento das propriedades do adesivo permite projectar a junta para garantir que as solicitações aplicadas não provoquem a plastificação nem rotura da junta. É necessário recorrer a métodos de dimensionamento que tenham em conta a resistência mecânica estática e, eventualmente, a resistência à fadiga e à fluência. Numa ligação ideal, o substrato deve ser o componente da junta mais fraco. Contudo, na maior parte das ligações coladas, nota-se que o adesivo é aquele que mais rapidamente atinge a rotura, visto que as forças de adesão são mais fortes do que as forças de coesão que actuam no seio do adesivo, tornando-o no elo mais fraco da junta adesiva. A cedência dos substratos também condiciona a rotura do adesivo, uma vez que a deformação plástica dos substratos provoca uma concentração de tensões na vizinhança das extremidades de L_0 , podendo originar rotura prematura do adesivo (Figura 2) [6].

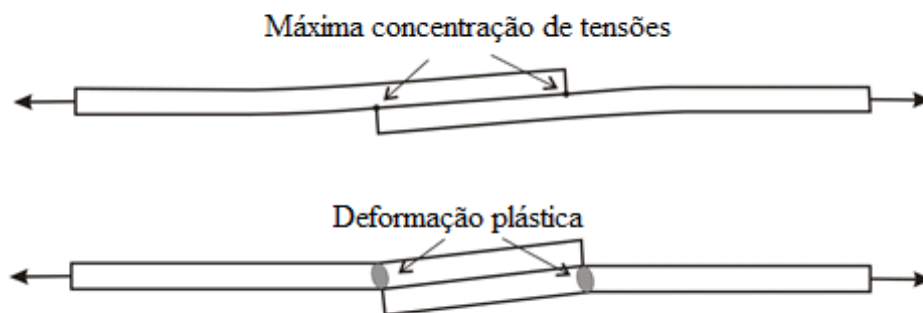


Figura 2 – Deformação plástica dos substratos [6].

Conhecendo o tipo de adesivo e substrato a ligar, convém **preparar a superfície** de modo a garantir uma boa adesão inicial e, posteriormente, em serviço. Os tratamentos de superfície são fulcrais para que a colagem dos substratos seja bem executada. A sua principal finalidade consiste na formação de superfícies resistentes, resultando numa junta estável, resistente e com um índice de molhabilidade bastante elevado. É uma tarefa que o operador nem sempre pratica da melhor maneira, pois torna-se necessário o uso de produtos de limpeza, lixagem e anticorrosivos adequados para o efeito. Nem sempre esta tarefa é bem executada, levando a uma deficiente preparação de superfícies [6]. A presença de óxidos, pó, óleos, humidade, entre outros, nas superfícies, vai condicionar negativamente a resistência final da junta adesiva, portanto deve-se evitar que estes elementos estejam presentes na mesma. O principal objectivo da preparação da superfície é garantir que a adesão seja tal que o ponto mais fraco da junta seja ou o adesivo ou o aderente. Com uma boa preparação da superfície, que consiste na criação de uma superfície mais rugosa e capilar, a rotura não deve ocorrer na interface. De um modo geral, todos os substratos devem ser tratados de igual forma antes da colagem. Tal facto pode-se traduzir numa combinação dos seguintes efeitos:

- Remoção de óleos, óxidos pouco resistentes, pó, contaminantes, entre outros;
- Modificação química da superfície;
- Alteração da topografia da superfície.

O **fabrico da junta** envolve a aplicação do adesivo sobre os substratos a colar e a cura do adesivo sob determinadas condições de temperatura e pressão. Uma vez que o adesivo é aplicado no estado líquido, é necessário garantir que os substratos a ligar estão bem fixos durante a cura [6].

Finalmente, para garantir que a junta fabricada tem uma resistência satisfatória a curto e longo prazo, as juntas devem ser sujeitas a um **processo de controle** através de ensaios não destrutivos [6].

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

As juntas adesivas têm vindo a ser cada vez mais utilizadas e estão em constante desenvolvimento e expansão. Apesar do seu vasto leque de utilização, estas têm grande utilização nas indústrias espacial e aeronáutica (Figura 3) dadas as condições adversas a que as estruturas estão sujeitas em funcionamento, aliado ao superior desempenho destas ligações, conforme ficou patente na elencagem de vantagens deste tipo de ligação apresentada no capítulo 2.1.1.

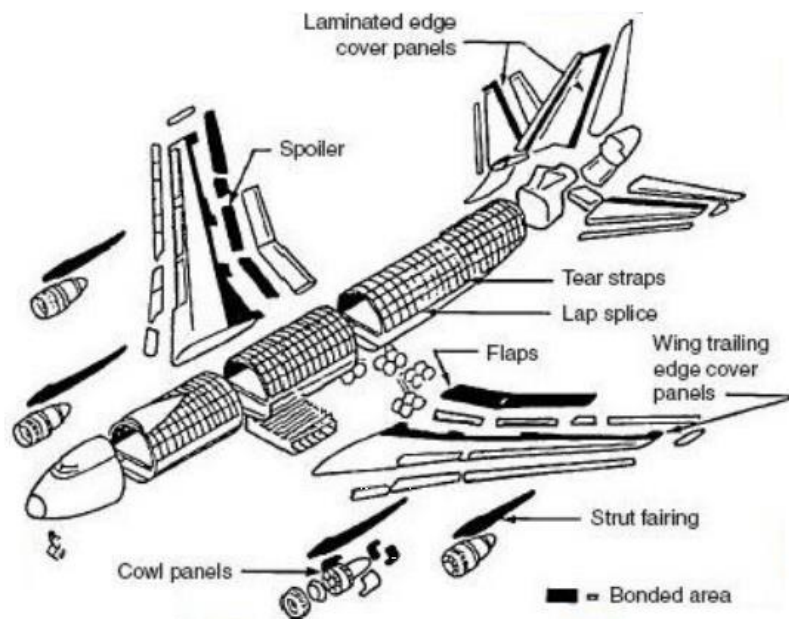


Figura 3 – Utilização de adesivos na construção de um avião [8].

Este tipo de ligação pode ainda ser encontrado em outras aplicações, e não menos importante do que a indústria aeroespacial encontra-se a indústria automóvel (Figura 4), onde cada vez mais as grandes marcas utilizam adesivos de modo a diminuir o peso, para assim reduzir o consumo de combustível e melhorar o desempenho dos veículos.

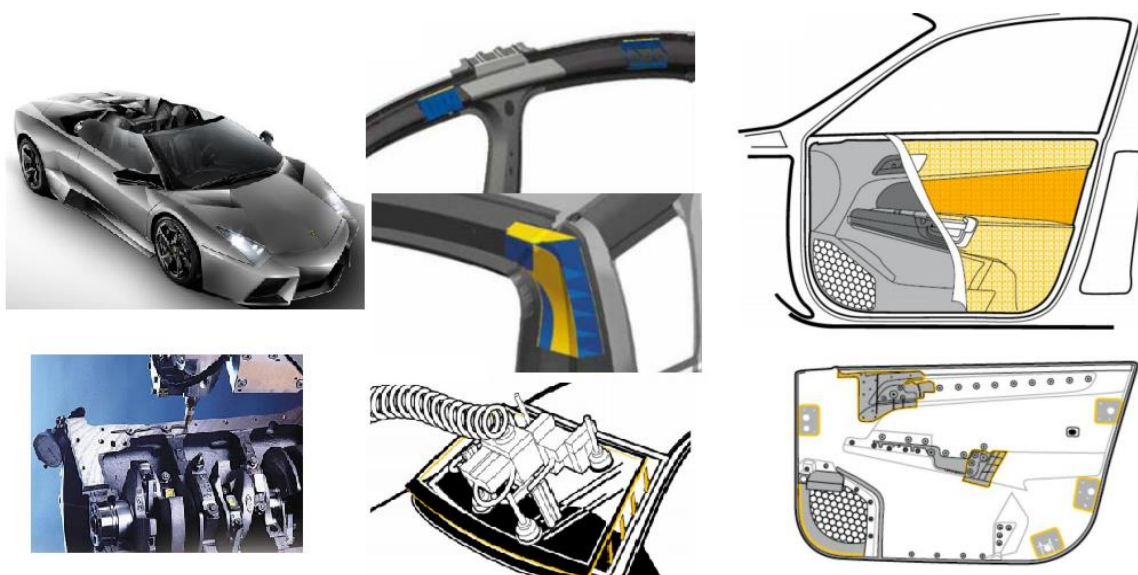


Figura 4 – Utilização de juntas adesivas no Lamborghini Reventon Roadster e aplicações adesivas ao nível da vedação de cárter, estrutura, vidro e portas [9].

Após se comprovar que os adesivos forneciam as características exigidas, como resistência à humidade, temperatura e boa durabilidade, tal como a indústria automóvel, a indústria naval teve ao longo dos anos diversas alterações no seu método de fabrico e viu nos adesivos a forma mais promissora e inovadora de evoluir e obter melhores resultados. As principais ligações adesivas utilizadas em construção naval são em painéis laterais, cascos e painéis de chão. Na construção civil são fortemente utilizadas ligações adesivas para madeiras, materiais de diferentes características e em locais susceptíveis de corrosão.

A nível de calçado também se usa bastante ligações adesivas, proporcionando uma alternativa nas colagens de solas, oferecendo maior flexibilidade e conforto. As ligações adesivas também são utilizadas, embora de forma não tao generalizada, na industria eólica, artigos electrónicos e alguns sectores de embalagens.

2.1.3 Esforços típicos em juntas adesivas

Para efeitos de projecto de uma junta adesiva é necessário conhecer e identificar os possíveis tipos de solicitação a que uma junta estará sujeita durante o tempo útil de vida. Sabendo que as distribuições de tensões ao longo da camada adesiva não são uniformes, as solicitações aplicadas produzem concentrações de tensão que por vezes determinam a resistência máxima

da junta. Existem principalmente 5 modos de carregamento em juntas adesivas (Figura 5) [10]:

- Tracção;
- Compressão;
- Corte;
- Clivagem;
- Arrancamento.

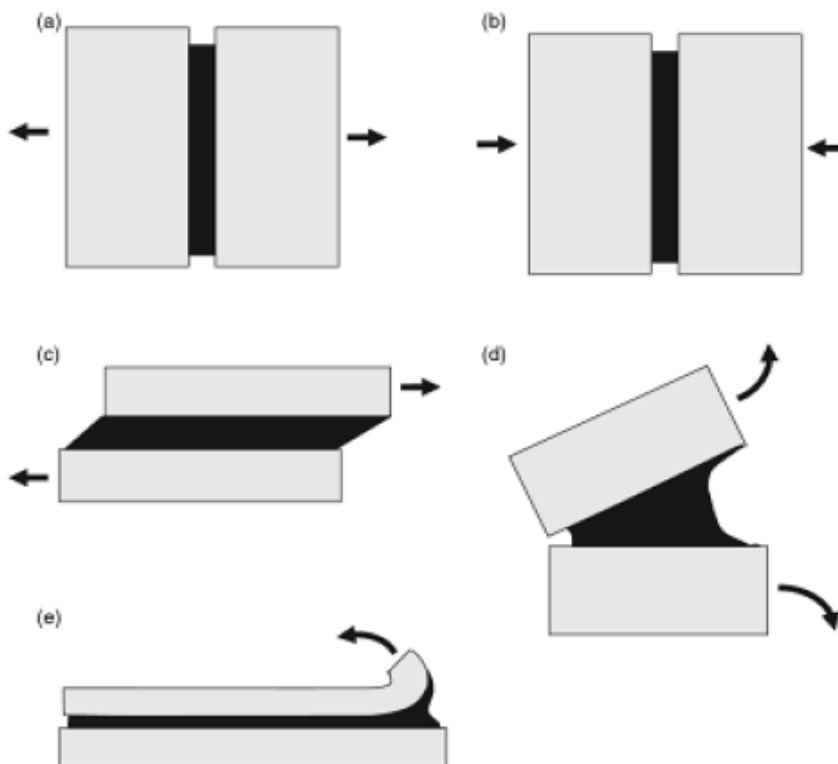


Figura 5 – Modos de carregamento em juntas adesivas: (a) tracção, (b) compressão, (c) corte, (d) clivagem e (e) arrancamento [10].

As tensões de tracção e compressão desenvolvem-se, como ilustrado na Figura 5 (a) e (b), quando forças actuam perpendicularmente ao plano da junta, e são distribuídas de forma uniforme ao longo da superfície colada. Na concepção das juntas sujeitas a solicitações de tracção e compressão deve-se ter alguns cuidados, nomeadamente na fase de projecto, com a utilização de guias para garantir um carregamento perfeitamente axial, bem como a aplicação de substratos rígidos para uma distribuição de tensões mais uniforme. As tensões de corte, Figura 5 (c), surgem quando actuam forças paralelas ao plano da junta adesiva, que

tendem a separar os substratos por deslizamento. As juntas adesivas são muito mais resistentes quando solicitadas a esforços de corte, uma vez que uma maior parte da área colada contribui para a resistência da junta. As solicitações de clivagem e arrancamento, Figura 5 (d) e (e) respectivamente, são altamente prejudiciais para a resistência das juntas adesivas. A clivagem ocorre quando forças na extremidade de uma junta rígida actuam de tal modo que tendem a separar os substratos. As tensões de arrancamento ocorrem de forma similar, mas em casos em que um ou ambos os substratos são flexíveis. O ângulo de arrancamento é na sua maioria maior no arrancamento do que na clivagem. Como a tensão nestes casos está concentrada numa área reduzida, a resistência deste tipo de junta é muito inferior quando comparada aos casos anteriores de corte, compressão e tracção.

Em junta adesiva, os adesivos flexíveis e dúcteis apresentam geralmente um desempenho superior aos rígidos e frágeis. A flexibilidade reduz os gradientes de tensões ao longo da camada de adesivo, enquanto a ductilidade permite a redistribuição de tensões nas regiões de concentração de tensões, ao invés de provocar rotura catastrófica (como ocorreria na presença de um adesivo frágil) [11].

2.1.4 Tipos de rotura

A principal função de uma ligação adesiva consiste na transmissão de carga entre os substratos ligados, mantendo-se estruturalmente estável quando sujeita ao mais variados tipos de solicitações. Existem essencialmente 4 modos de rotura numa ligação adesiva (Figura 6):

- Rotura coesiva;
- Rotura adesiva;
- Rotura do substrato;
- Rotura mista.

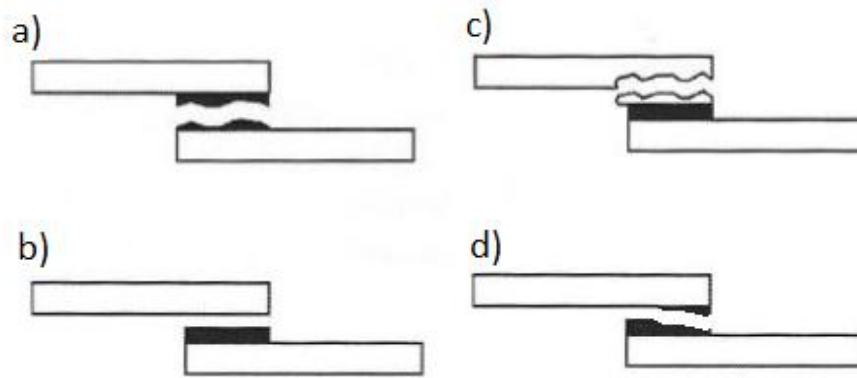


Figura 6 – Modos de ruptura que possíveis de ocorrer em juntas adesivas: (a) ruptura coesiva, (b) ruptura adesiva, (c) ruptura do substrato e (d) ruptura mista [6].

- A ruptura coesiva ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo, resultando daí uma ruptura em que ambas as superfícies dos substratos ficam cobertas de adesivo;
- A ruptura adesiva surge na interface entre o adesivo e um dos substratos, resultando numa ruptura em que a superfície de um dos substratos não apresenta quaisquer resíduos de adesivo. Este tipo de ruptura geralmente ocorre devido à má preparação das superfícies dos substratos, como por exemplo lixagem e limpeza inadequadas;
- A ruptura do substrato, tal como o nome indica, ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais resistente relativamente ao substrato, mantendo-se a junta adesiva intacta e ocorrendo a ruptura do substrato ou em parte;
- A ruptura mista consiste na ocorrência de ruptura com regiões coesivas e adesivas. Este tipo de ruptura pode ocorrer por exemplo quando há uma porção da zona de ligação cuja preparação foi ineficaz ou devido à má mistura de adesivo.

2.1.5 Configurações possíveis de junta

Sendo as juntas adesivas cada vez mais utilizadas, existem vários tipos de configuração de junta que podem ser executadas dependendo da aplicação. A Figura 7 ilustra os tipos de ligações adesivas mais comuns [6].

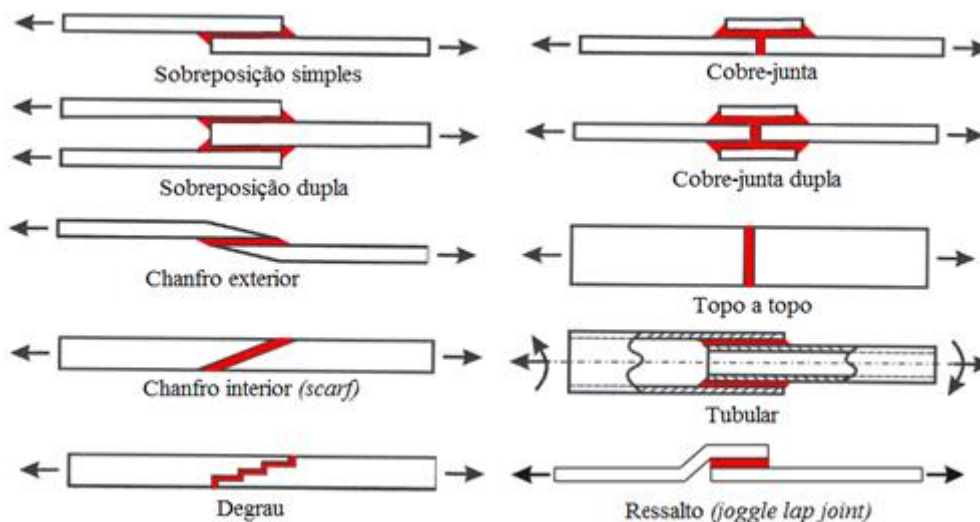


Figura 7 – Diferentes configurações de juntas adesivas [6].

As juntas de sobreposição simples são as mais comuns e estudadas, tanto a nível teórico e prático, por serem de fácil fabrico e pelo adesivo estar sujeito maioritariamente a solicitações de corte. Porém, as forças transmitidas não são colineares e induzem tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição. De modo a tentar diminuir esse efeito pode-se utilizar juntas com um substrato dobrado para alinhar as forças, denominada por junta de ressalto. Este tipo de junta apresenta dificuldades de fabricação acrescidas, nomeadamente em substratos frágeis ou de elevada resistência. Em certos casos também se utiliza uma junta em chanfro, que tem como grande vantagem distribuições de tensões mais uniformes ao longo da camada adesiva [7]. As juntas de sobreposição dupla são de fabrico mais complicado e moroso relativamente as juntas de sobreposição simples mas, em contrapartida, o efeito do momento flector é diminuído drasticamente dada a sua configuração. Como resultado, é possível obter uma resistência de junta superior ao dobro da junta de sobreposição simples com as mesmas dimensões [11].

As juntas topo a topo permitem a diminuição dos gradientes de tensões ao longo do adesivo, embora tenham uma resistência tipicamente reduzida devido à solicitação de tração e reduzida área de colagem. Por outro lado, facilmente se induz numa junta deste tipo flexão devido ao desalinhamento da solicitação e conseqüente clivagem no adesivo. O aparecimento de flexão é inconveniente e, para reduzir o seu efeito, utiliza-se juntas macho-fêmea, o que reduz significativamente esse efeito.

Nas juntas de chanfro exterior, a resistência dependerá sempre do ângulo do chanfro na zona da sobreposição, sendo que quanto maior for este ângulo, maior será a resistência. No entanto, esta resistência pode ser limitada pela própria resistência dos aderentes, que estão mais frágeis devido aos chanfros. O método de fabricação destas juntas acarreta custos superiores em relação às demais devido à dificuldade de maquinação das superfícies inclinadas por onde ocorre a ligação.

A junta tubular tem boa resistência a esforços de tracção e compressão, podendo gerar-se esforços de arrancamento caso não exista um alinhamento relativamente ao eixo de revolução. Para tentar anular este efeito, utilizam-se habitualmente chanfros, canais e ressaltos, facilitando assim a inserção de peças, aumentando a área de contacto e a resistência ao arrancamento por efeito mecânico [12]. A utilização de orifícios para a injeção do adesivo e a abertura de canais para facilitar a saída do ar são algumas das soluções para assegurar que o adesivo preenche toda a cavidade, uma vez que a inacessibilidade do seu interior impossibilita a sua inspecção.

Por fim, as ligações do tipo cobre-junta e cobre-junta dupla são habitualmente utilizadas na reparação de estruturas danificadas. O processo de reparação dá-se pela criação de caminhos alternativos de transferência de esforços, colocando um ou dois remendos colados na zona da descontinuidade [13].

Tendo em consideração todos os tipos de ligações possíveis, para o correcto projecto as juntas adesivas devem [6].

- Ser projectadas sempre que possível para a junta ser de fácil execução;
- Ser projectadas de modo a que a transferência de esforços seja por corte ou compressão;
- Minimizar as forças de clivagem e arrancamento;
- Ter o adesivo adequado quanto às solicitações aplicadas, sendo que adesivos rígidos são melhores ao corte e adesivos mais flexíveis ao arrancamento;
- Garantir uma espessura adequada de adesivo ao melhor desempenho da junta, sabendo que espessuras muito finas aumentam o risco de falhas da própria colagem e espessuras muito elevadas têm maior probabilidade de apresentar defeitos;
- Utilizar adesivos de elevada ductilidade sempre que existam solicitações de impacto ou os substratos apresentem uma rigidez muito distinta;

A Figura 8 compara a resistência de juntas de sobreposição simples com adesivos dúcteis e frágeis, em função de L_0 .

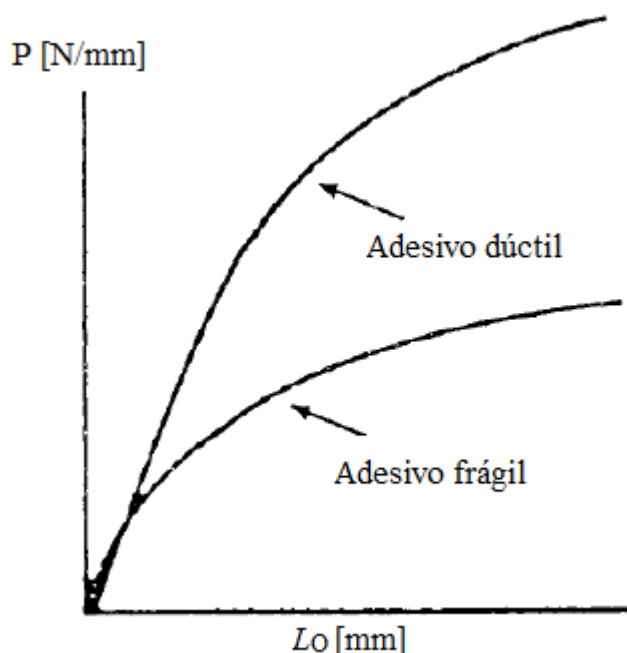


Figura 8 – Resistência de juntas de sobreposição simples em função de L_0 .

Como se pode verificar pela análise da Figura 8, as juntas coladas com adesivos dúcteis têm maior resistência quando directamente comparados a adesivos frágeis. Tal facto deve-se aos adesivos dúcteis sofrerem plastificação quando é atingida a cedência do adesivo, ao contrário dos adesivos frágeis. Isto permite às juntas continuarem a suportar carregamentos superiores à medida que a transmissão de esforços pela camada adesiva vai aumentando [11].

2.2 Classificação dos adesivos

Existe uma grande variedade de adesivos, bem como diversos critérios para os agrupar. Geralmente os adesivos podem ser classificados segundo a sua natureza, tipo de estrutura molecular, composição química, entre outros critérios. Os adesivos são caracterizados geralmente segundo o seu desempenho, dividindo-se em dois grupos distintos, os estruturais e não estruturais. Esta divisão dos adesivos segundo o seu desempenho é das mais utilizadas na actualidade, uma vez que se baseia única e exclusivamente no desempenho destes.

A Figura 9 representa a divisão dos principais tipos de adesivos segundo o seu desempenho [6].

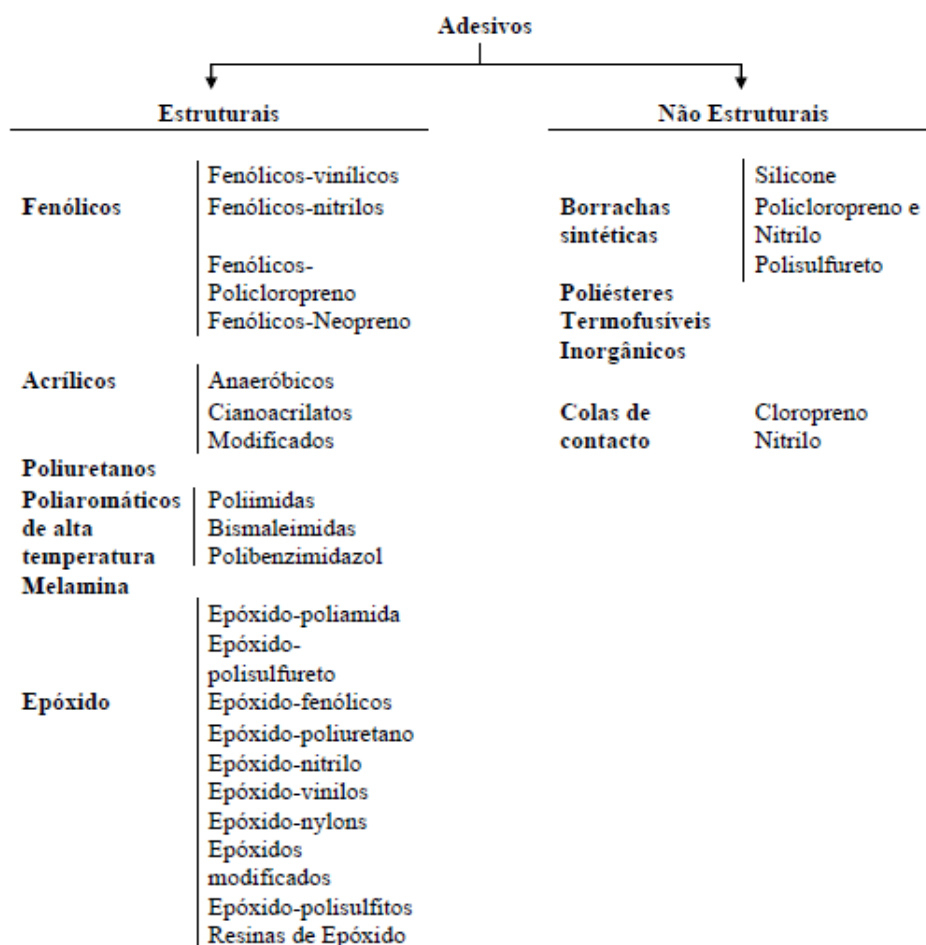


Figura 9 – Classificação dos diversos tipos de adesivos segundo o seu desempenho [6].

2.2.1 Caracterização dos adesivos estruturais

Os adesivos estruturais apresentam elevados valores de resistência mecânica e são normalmente utilizados em ligações de materiais de elevada resistência, tal como madeiras, compósitos e metais, permitindo uma resistência ao corte superior a 6,9 MPa à temperatura ambiente. São também conhecidos como um material que não sofre fluência sob acção de cargas bastante elevadas. Os adesivos estruturais são geralmente utilizados em ambientes com condições adversas e são sujeitos a solicitações significativas e em juntas que necessitem de elevada durabilidade [7].

2.2.2 Tipos de adesivos estruturais

No conjunto de adesivos estruturais [5, 6] existentes, são os **Epóxidos** que se destacam a nível de uso comercial devido às suas características mecânicas e químicas fisicamente superiores aos demais. São muito utilizados na indústria automóvel, aeronáutica de construção e madeiras. Caracterizam-se sobretudo pela baixa densidade, elevada resistência a arrancamento e sobretudo uma elevada resistência ao corte. Permitem diferentes formulações uma vez que estão disponíveis diversas resinas e endurecedores. São comercializados em diferentes formas, desde líquida de baixa viscosidade até sólida ou mesmo em filmes. O processo de cura de um adesivo só com um componente é geralmente a uma temperatura elevada de cerca de 120°C. Para adesivos com dois componentes a cura pode ser efectuada a partir dos 5°C sendo que, com o aumento da temperatura se observa a diminuição do tempo de cura. O tempo necessário para se processar a cura total poderá variar desde 10 a 15 min até vários dias. Geralmente a cura não necessita de aplicação de pressão, bastando apenas o seu posicionamento entre as peças a serem coladas. Importante ainda salientar que as propriedades dos epóxidos podem ser modificadas e melhoradas com a inclusão de outras resinas, sejam de poliamida, polisulfito, fenólicos, nitrilos, nylon, entre outras.

A poliamida tem a função de endurecedor e agente suavizante, formando os denominados adesivos de **Epóxido – Poliamida**. Apresentam uma resistência ao arrancamento maior em comparação aos adesivos epóxidos não modificados. Este tipo de adesivos cura à temperatura ambiente de forma mais lenta.

Os adesivos **Epóxido – Nylon** estão disponíveis sob a forma de filme, possuindo boas características a temperaturas negativas na ordem dos -70°C, boa resistência ao impacto e fadiga. São geralmente usados em laminados à base de vidro ou carbono. A sua principal limitação deve-se à baixa resistência à água e álcool.

Os adesivos **Epóxido – Polisulfito** apresentam boa resistência ao impacto, sendo os mais utilizados em aplicações sujeitas a vibrações de choques por impacto. Possuem ainda boa estabilidade química, daí serem utilizados na ligação de materiais com diferentes dilatações térmicas. É um adesivo muito utilizado na indústria automóvel na colagem e vedação de vidros.

Quando um adesivo epóxico é combinado a uma resina fenólica, forma os denominados adesivos **Epóxico – Fenólicos**. A resina fenólica melhora drasticamente a resistência a elevadas temperaturas, conferindo boa estabilidade e resistência a solicitações de corte (a temperaturas elevadas). Apresentam um custo elevado e curam sob pressão a temperaturas elevadas, da ordem dos 170°C. Porém, são limitados pela baixa resistência ao arrancamento e impacto. São também muito utilizados na indústria automóvel para colar as pastilhas dos travões de disco.

O epóxico, quando misturado a resinas vinílicas, produz um adesivo **Epóxico – Vinílico**. Este adesivo melhora significativamente a resistência ao impacto e ao arrancamento, sendo vulgarmente utilizado na colagem das nervuras de reforço de capôs em veículos. Os adesivos **Epóxico – Poliuretano** possuem uma resistência ao arrancamento elevada, próxima dos valores do epóxico – poliamida, boa resistência a impacto, vibrações e fadiga. Utilizam-se muito na ligação do pára-brisas à carroceria em veículos.

Por ultimo, os adesivos **Epóxico – Nitrilos** apresentam boa resistência ao arrancamento a temperaturas elevadas e baixas (-55 a 120°C). São vulgarmente utilizados na construção de aviões comerciais a jacto, bem como em embraiações de automóveis.

Os **adesivos estruturais Fenólicos** são muito utilizados pela indústria. São comercializados igualmente numa diversidade de formas, têm um custo relativamente baixo, possuem elevada resistência a altas temperaturas e agentes ambientais, elevada estabilidade dimensional e elevada durabilidade. O seu processo de cura deverá ser processado a elevadas temperaturas, e utilizados substratos algo porosos ou elevada pressão, de modo a evitar o aparecimento de vapor de água e respectivos defeitos de vazios na zona de colagem. A principal desvantagem é sobretudo a baixa resistência à corrosão bem como a baixa resistência ao impacto. Geralmente, para melhorar a sua resistência face aos problemas apresentados, estes adesivos são combinados a resinas vinílicas ou elastómeros (nitrilos ou policloropreno) e curados a quente sob pressão.

Quando combinados com uma resina vinílica, estes adesivos denominam-se de **Fenólicos – Vinílicos**, e possuem elevada resistência ao corte, arrancamento e à fadiga (devido às características plastificantes da fase vinílica). Este tipo de adesivo tem uma temperatura de utilização até cerca de 130°C. Os adesivos fenólicos combinados com nitrilo, **Fenólicos – Nitrilos**, possuem uma melhor estabilidade térmica e podem ser usados a temperaturas até

cerca de 160°C. Porém, as características mecânicas são inferiores aos adesivos Fenólicos – Vinílicos. Por último, os adesivos **Fenólicos – Cloropreno** têm temperaturas de utilização até -50°C, sendo em contrapartida com os anteriores muito mais sensíveis aos agentes químicos.

Também muito utilizados pela indústria mecânica, os adesivos **Acrílicos** são vulgarmente divididos em acrílicos anaeróbicos, cianoacrilatos e acrílicos modificados. Os **Acrílicos Anaeróbicos** apresentam uma resistência mecânica próxima de um epóxico, boa resistência a solventes e uma temperatura de utilização até 150°C. São curados a temperatura ambiente, sendo de fácil manuseamento e utilizados sobretudo na fixação de peças estriadas, roscadas, rolamentos, peças de geometria cilíndrica e na colagem de diversos materiais tais como poliolefinas, nylon, cloreto de vinilo, entre outros. Os **Acrílicos Cianoacrilatos** são denominados por adesivos instantâneos, supercola ou cola tudo, uma vez que permitem colagens muito rápidas. Apresentam elevadas características de resistência à tracção, embora sejam bastante frágeis e muito fracos ao arrancamento. O processo de cura depende de factores como humidade, acidez-basicidade (pH) e espessura da junta colada, sendo que a humidade é um dos principais responsáveis pelo processo de cura, pois quanto mais humidade mais rápida é a cura. Têm uma vasta gama de aplicações, embora sejam maioritariamente usados em bricolage. Por último, os **Acrílicos Modificados** são modificados de modo a possuírem boa resistência ao arrancamento e ao impacto, permitindo ligações resistentes mesmo com uma preparação menos cuidada das superfícies de ligação. São muito resistentes à humidade, permitindo variadíssimas aplicações, mas são menos resistentes quando sujeitos a temperaturas elevadas.

Os **adesivos Poliuretanos** resultam da reacção entre um polioliol ou poliéster-polioliol com isocianato. Possuem como características mais relevantes uma boa flexibilidade, elevada resistência ao arrancamento, abrasão, choques e vibrações. Apresentam ainda bom comportamento em condições ambientais mais severas e têm uma temperatura de serviço entre -200° a 80°C. Têm uma elevada resistência ao corte (na ordem dos 20 MPa), sendo por isso muitas vezes utilizados em blindagem automóvel na fixação de kevlar. O seu processo de cura é à temperatura ambiente ou a elevadas temperaturas. Devido à sua boa molhabilidade e flexibilidade, os poliuretanos aderem de forma eficaz a polímeros que geralmente são complicados de colar.

Os **adesivos de Poliimida** ou **adesivos Poliaromáticos de elevada temperatura**, tal como o nome indica, são os adesivos que melhores condições apresentam a elevadas temperaturas ($\geq 200^{\circ}\text{C}$). Estes adesivos são bastante caros e difíceis de trabalhar, estando disponíveis no mercado sob a forma de líquidos e filmes. São geralmente utilizados em aplicações de baixo peso com temperaturas mais elevadas, como chips, electroímãs e outros componentes electrónicos. A sua cura é naturalmente mais difícil e problemática pois requer períodos elevados com ciclos de pressão e temperaturas altas.

2.3 Previsão da resistência das juntas

No passado, as técnicas de previsão de resistência na maior parte das ligações adesivas eram sobretudo utilizadas em estruturas de maior responsabilidade. No caso geral, as juntas adesivas eram sobredimensionadas dada a falta de informação e modelos de previsão. Com o passar dos anos foram-se desenvolvendo técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência, o que permitiu a utilização cada vez mais generalizada destas ferramentas.

2.3.1 Modelos analíticos

Volkersen [14], Goland e Reissner [15] foram os primeiros exploradores de um vasto estudo de métodos analíticos teóricos que tinham a vantagem da simplicidade dos modelos, de modo obter as distribuições de tensões em estruturas coladas com adesivos. O primeiro modelo analítico data dos anos 30, denominado modelo de Volkersen, desenvolvido para juntas adesivas de sobreposição simples. Este modelo considera os materiais como sendo totalmente elásticos e que a deformação do adesivo ocorrerá sempre em corte. Os modelos analíticos tornaram-se complexos se o adesivo apresentar deformação plástica, nomeadamente na ligação de aderentes em material compósito ou ainda de diferentes materiais. As simplificações em termos de geometria, solicitações e condições fronteira, bem como a previsão da resistência da junta colada baseada em critérios de tensões ou deformações, fazem com que nos dias actuais estes estudos analíticos sejam substituídos por análises numéricas.

2.3.2 Métodos numéricos

Os métodos numéricos mais utilizados hoje em dia são: a **mecânica dos meios contínuos**, **mecânica da fractura** e **modelos de dano coesivo** (enquadráveis na **mecânica do dano**). Menos utilizados são os **modelos de dano alternativos aos modelos coesivos** [16 a 20] e o **método de elementos finitos estendido** [21 a 23]. Estes dois últimos, devido ao facto de serem muito pouco utilizados, não são descritos, embora se apresente referências relevantes para conhecimento dos métodos e trabalhos onde foram utilizados.

A **mecânica dos meios contínuos** consiste numa análise de MEF onde as tensões ou deformações obtidas são utilizadas num critério de rotura adequado que permita estimar a resistência da ligação adesiva. A principal vantagem desta análise em estruturas coladas é a rapidez de processamento com ou sem dano inicial e sob efeitos de cargas arbitrárias. É no entanto uma análise algo limitada quando é aplicada directamente a juntas adesivas, pois estas têm frequentemente concentrações de tensões nas extremidades da sobreposição resultantes das variações de geometria. Nestas zonas as tensões aumentam com o refinamento da malha e não se consegue obter a estabilização dos valores de tensão ou deformação obtidos, estando assim a previsão dependente do grau de refinamento de malha. É possível melhorar a previsão através da definição de critérios de rotura mais refinados em função dos materiais em causa e mecanismos de fractura, ou ainda pela combinação destes critérios com modelos de plasticidade dos materiais mais realistas. Ainda assim subsiste a dependência da malha destes métodos.

Na abordagem pela mecânica dos meios contínuos é assumido que a estrutura e todos os seus materiais são contínuos. Este método introduz uma desvantagem à partida, pois a existência de defeitos ou ligação de dois ou mais materiais com cantos reentrantes não são obviamente enquadráveis nesta análise. A **mecânica da fractura** foi desenvolvida para estruturas com defeitos tais como fendas, que são os mais comuns em estruturas. Por esta técnica, considera-se que as tensões são singulares e tendem para infinito no início/ponta da fenda (ângulo de fenda inferior a 180°), o que não é contabilizado usando a mecânica dos meios contínuos [24]. A maior parte destes estudos para juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia de deformação (G) com o respectivo valor de resistência crítica à fractura (G_C [25]), ao invés de se utilizarem factores de intensidade de tensão, uma vez que estes não se conseguem determinar facilmente sempre que a fenda esteja a crescer numa interface ou na sua proximidade. As juntas adesivas por norma rompem em modo misto, dada a

complexidade do estado de tensão e efeito dos substratos. Como tal, foram desenvolvidos critérios de rotura em modo misto de uma forma semelhante aos critérios de rotura clássica com a introdução do conceito da superfície de fractura.

A **mecânica do dano** usa práticas de modelação avançadas, que são muito utilizadas actualmente e garantem uma representação mais fiel do processo de rotura, permitindo superar as limitações que os métodos descritos anteriormente apresentam. A mecânica dos meios contínuos considera que os constituintes da modelação são elementos sólidos contínuos e pressupõe de forma errada que os elementos sofrem plasticidade generalizada sem evolução do dano, ao contrário dos modelos da mecânica do dano que podem incurrir dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Assim sendo, é possível a simulação gradual do dano e da fractura de uma fenda com uma trajectória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [26]. Os modelos da mecânica do dano podem ser divididos em **modelos de dano coesivo** e **modelos alternativos aos modelos de dano coesivo**.

A modelação por modelos de dano coesivo pode ser de 2 tipos: local ou contínua. Na modelação local o dano ocorre numa linha ou superfície (análise 2D ou 3D, respectivamente), simulando-se uma rotura interfacial entre dois materiais (por exemplo a ligação entre adesivo e aderente, a fractura interlaminar de um laminado compósito ou a interface entre as fases sólidas de materiais). Na modelação contínua, o dano estende-se ao longo de uma área ou volume (análise 2D ou 3D, respectivamente), de modo a simular uma rotura num material em bruto ou para modelar uma rotura coesiva do adesivo. Este último tipo tem um grande campo de aplicações [11], porém a camada única de elementos coesivos usada para modelar a camada adesiva não torna possível a diferenciação dos efeitos ao longo da espessura ou mesmo do efeito das concentrações de tensões na direcção da interface, permitindo apenas obter um comportamento equivalente da camada adesiva. Os modelos de dano coesivos foram introduzidos por Barenblatt [27] no final da década de 50 para introduzir o dano na zona do processo da fractura na frente da fenda sob efeito de cargas estáticas. Estes métodos foram largamente ensaiados desde então de modo a simular o início e propagação de dano em circunstâncias de rotura coesiva, interfacial ou delaminações em compósitos. Estes modelos podem ser baseados em elementos de mola ou coesivos [28], e podem ser facilmente integrados em análises convencionais por MEF para modelar a fractura em vários materiais, incluindo juntas adesivas [29].

Este método baseia-se no pressuposto de que uma ou mais regiões da junta ou mesmo interfaces de fractura podem ser introduzidas artificialmente em estruturas. É assim permitido o crescimento do dano através da introdução de uma descontinuidade no campo de deslocamentos, estabelecendo-se leis de tracção-separação (leis coesivas) para modelar interfaces ou regiões finitas. Estas leis coesivas são representadas por relações lineares em cada um das etapas de carregamento, como a região elástica, plástica ou de amaciamento. Cada uma das etapas poder ser definida de uma forma distinta, de maneira a facilitar uma representação mais fiável do comportamento dos materiais [30]. Os modelos de dano coesivo oferecem uma propagação macroscópica do dano que existe ao longo de um dado trajecto, porém desprezando os fenómenos microscópicos existentes na zona de processo [31].

Esta técnica está implementada em *software*, em 2D ou 3D, como é o caso do ABAQUS®. No caso do modelo triangular 2D, este foi basicamente implementado para análise com cargas estáticas, enquanto o modelo 3D, embora muito semelhante a este, já inclui uma componente adicional de corte. O modelo triangular 2D está representado na Figura 10 – Modelo de dano coesivo 2D com lei triangular [14].

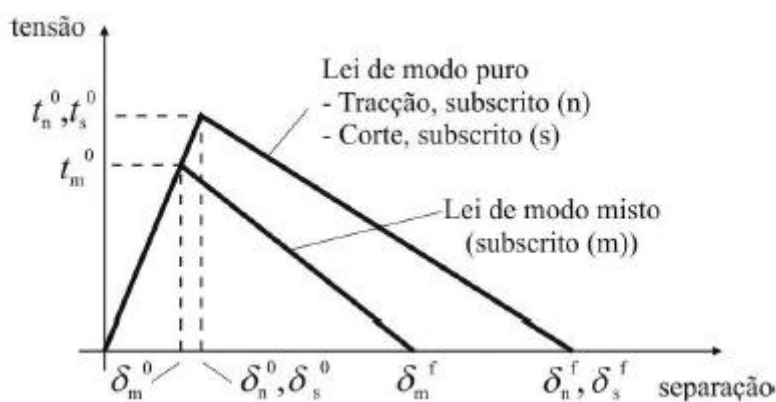


Figura 10 – Modelo de dano coesivo 2D com lei triangular [14].

Como se pode averiguar pela Figura 10, a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, enquanto a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto. O uso dos modelos de dano coesivo tem a vantagem de simular o comportamento de estruturas até à sua rotura face a solicitações externas e possibilita incluir nos modelos numéricos várias possibilidades de rotura, com diferentes regiões ou entre as interfaces de materiais.

2.4 Juntas com tensões normais

As juntas adesivas são invariavelmente sujeitas a tensões normais. Estas tensões normais podem ter mais ou menos preponderância na rotura conforme a geometria e tipo de sollicitação. As juntas em *T* e em *L* são muito semelhantes entre elas, e os carregamentos aplicados costumam resultar em sollicitações maioritariamente de arrancamento. Este tipo de juntas é caracterizado pela orientação perpendicular dos substratos (90°) ou até mesmo numa orientação diferente de 90° . O seu carregamento poderá ser efectuado segundo a direcção normal ou transversa.

2.4.1 Ensaios para caracterização ao arrancamento

Os ensaios de arrancamento são vulgarmente utilizados para medir as propriedades dos adesivos frágeis ou dúcteis, existindo uma variedade de métodos para esse efeito. Os mais comuns são os ensaios de arrancamento a 180° , *floating roller test* e *climbing drum test (peel)* [1, 5, 6].

O ensaio de arrancamento a 180° é um ensaio normalizado através da norma ASTM D 903 – 49 e consiste na dobragem de um dos substratos com características mais flexíveis perfazendo um angulo de 180° . É geralmente utilizado em adesivos não estruturais como o caso de vedantes. A Figura 11 ilustra este método de ensaio bem como as respectivas dimensões [1, 6].

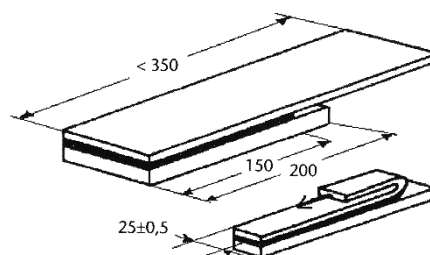


Figura 11 – Ensaio de arrancamento a 180° [6].

O ensaio *floating Roller Test*, ou ensaio de rolete flutuante, serve para determinar a resistência ao arrancamento numa ligação com dois substratos distintos, um flexível e outro rígido, através da obtenção da carga média durante o tempo a que o provete está sujeito a sollicitação. Trata-se de um ensaio normalizado pela norma ASTM D 3167 e consiste na

utilização de um mecanismo mecânico de roletes com carregamento no substrato flexível, formando um ângulo constante durante o arrancamento. Este ângulo é facilmente regulável antes do ensaio. A Figura 12 ilustra um ensaio de rolete flutuante [1, 6].

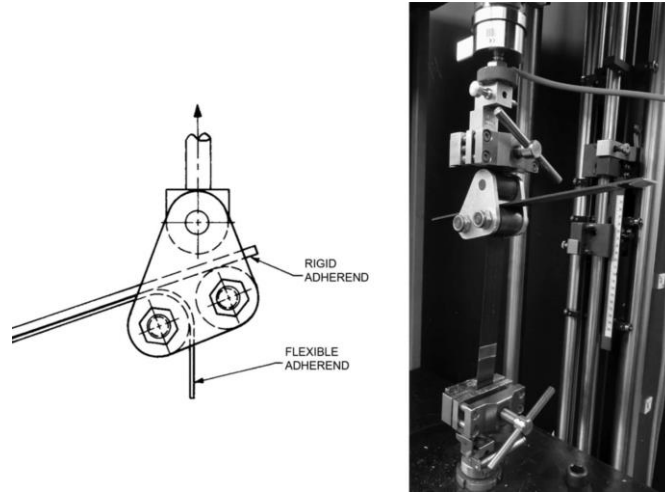


Figura 12 – Ensaio *floating roller test* [6].

O ensaio *climbing drum test (peel)* (norma ASTM D 1781) serve para caracterizar a resistência ao arrancamento de ligações entre substratos flexíveis e rígidos, tal como no ensaio anterior. É o processo mais usado em estruturas *sandwich*, e permite determinar após o ensaio a resistência de separação entre as peles e o núcleo, bem como controlar a qualidade da ligação adesiva. A Figura 13 ilustra um ensaio deste género [1, 6].

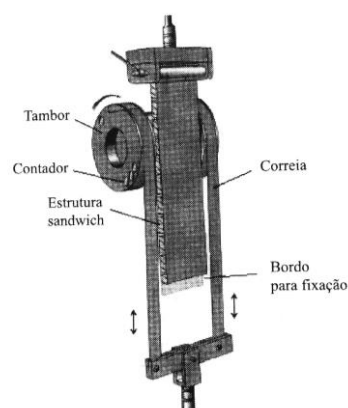


Figura 13 – Ensaio *climbing drum test (peel)* em estrutura de *sandwich* [6].

2.4.2 Juntas em T

O ensaio de arrancamento de juntas em T é dos métodos mais utilizados e divulgados para determinar a resistência ao arrancamento, encontrando-se abrangido pela norma ASTM D 1876. É utilizado para substratos flexíveis mas só deverá ser utilizado se a deformação dos aderentes não for demasiado elevada. É um ensaio utilizado para caracterização de diferentes preparações superficiais das superfícies a ligar. A espessura de adesivo (t_A) geralmente utilizada é de 0,25 mm. A Figura 14 ilustra um exemplo de junta em T pronta a sofrer arrancamento. É geralmente feito o ensaio numa máquina de tracção a uma velocidade constante e segundo a norma devem-se ensaiar no mínimo 10 provetes com dimensões representadas na figura [6].

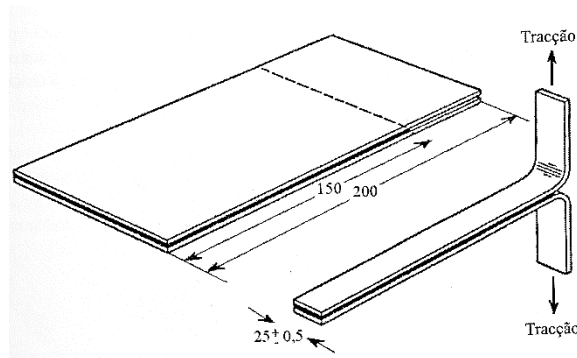


Figura 14 – Ensaio de arrancamento nas juntas em T [6].

Hu et al. [32] realizaram um trabalho experimental com juntas adesivas em T de alumínio, aço e mistas, para estudo das distribuições de tensão e resistência da ligação adesiva. Foram ensaiadas juntas com vários valores de L_0 entre substratos iguais (alumínio – alumínio e aço – aço), com diferentes substratos (alumínio A – alumínio B e alumínio – aço) e com diferentes raios de curvatura dos aderentes. O valor de t_A utilizado foi de 0,1 mm. A Figura 15 mostra a disposição do ensaio.

Numericamente foi considerada uma análise de modelos de dano coesivo no *software* ABAQUS®, os aderentes modelados como materiais isotrópicos e o adesivo com elementos coesivos. Os aderentes de alumínio A apresentam as seguintes propriedades: módulo de Young (E)=71 GPa, coeficiente de Poisson (ν)=0,32 e resistência à tracção (σ_T)=276 MPa; enquanto o alumínio B apresenta E =71 GPa, ν =0,32 e σ_T =195 MPa. O aço apresenta E =210 GPa, ν =0,3 e σ_T =325 MPa. O adesivo apresenta E =4,45 GPa e módulo de elasticidade

transversal (G)=30 MPa. Foi utilizada uma malha constituída por elementos hexaédricos com maior refinamento na zona da curva, tal como mostra a Figura 16.



Figura 15 – Ensaio de arrancamento das juntas em T [32].

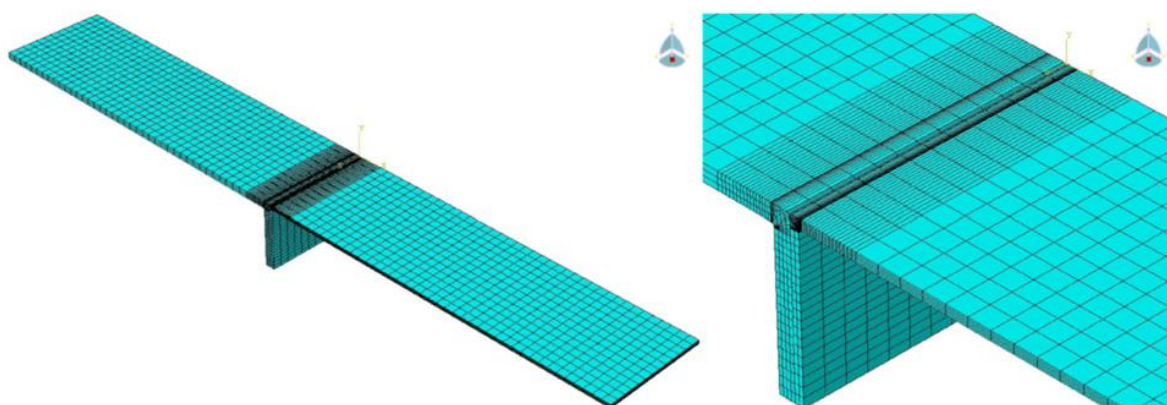


Figura 16 – Refinamento da malha da junta em T (3D) para análise em ABAQUS® [32]

Concluiu-se com este estudo, que a resistência de ligação é mais elevada em juntas que tinham como aderentes iguais de aço – aço e aderentes diferentes de alumínio – aço, devido a condições mais próximas de clivagem ao invés de arrancamento. Com o aumento de L_0 , não se registou grande melhoria da resistência de ligação adesiva. No entanto, observou-se um aumento da resistência com o aumento do raio de curvatura. A análise de tensões de arrancamento mostrou que estas são superiores na extremidade próxima da zona de solicitação e, entre diferentes combinações de substratos, nas juntas alumínio – aço. De uma forma geral, comparando os resultados de resistência numérica e experimental, concluiu-se

que o modelo de dano coesivo utilizado era apropriado para a análise de juntas em T . Por exemplo, para um $L_0=20$ mm numa junta de alumínio A – alumínio B, o valor de resistência numérica foi de 931 N, comparado com uma valor experimental de 946 N.

2.4.3 Juntas em L

As juntas em L apresentam uma configuração algo semelhante às juntas em T . No entanto, considera-se apenas um componente dobrado colado ao substrato plano. Um exemplo de estudo deste tipo de juntas encontra-se no trabalho de nome [33]. Os autores simularam ensaios de arrancamento em juntas em L , utilizando alumínio dobrado a 90° colado a aderentes rectilíneos de compósito. O alumínio apresenta as seguintes propriedades: $E=68$ GPa, $G=26$ GPa e $\sigma_f=325$ MPa. O material compósito apresenta $E_1=130$ GPa, $E_2=10$ GPa, $\nu=0,28$ e $G_{12}=5$ GPa. O adesivo apresenta $E=3,2155$ GPa e $G=1,218$ GPa. A Figura 17 mostra a configuração do provete utilizado bem como as suas dimensões.

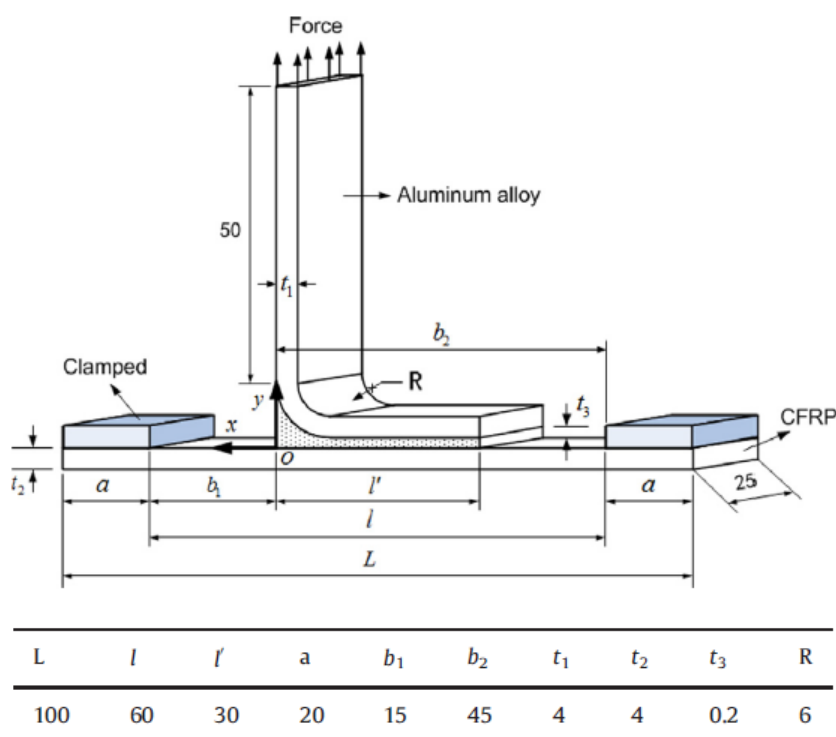


Figura 17 – Configuração e dimensões da junta em L [33].

As simulações numéricas foram realizadas no *software* ABAQUS® com a finalidade de avaliar a influência das dimensões do substrato em L na distribuição de tensões no adesivo

e resistência da junta. Na simulação definiu-se o alumínio e adesivo como sólidos com propriedades isotrópicas, e o compósito utilizando a funcionalidade de laminados de compósito do *software* ABAQUS® (que permite a obtenção de propriedades isotrópicas equivalentes para laminados em função de sequência de empilhamento). Em relação à malha utilizada, esta foi uma malha fina em toda a extensão do provete e mais fina ainda na camada adesiva, com elementos de dimensão de cerca de $0,5 \times 0,5 \times 0,05 \text{ mm}^3$ (Figura 18).

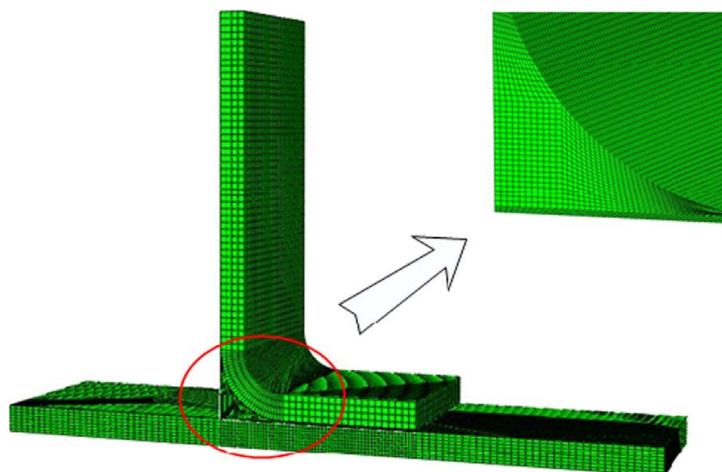


Figura 18 – Malha utilizada nos modelos MEF [33].

Experimentalmente, a preparação dos provetes para colagem implicou o tratamento superficial das superfícies de colagem dos aderentes de alumínio e compósito, mistura de adesivo, colagem e respectiva cura. O alumínio foi sujeito a um tratamento superficial de granalhagem e o compósito foi lixado com uma lixa fina e limpo utilizando acetato de etilo. A cura do adesivo epóxico procedeu-se durante 2h a uma temperatura entre os 60 e 80°C. A Figura 19 mostra uma junta já ensaiada.

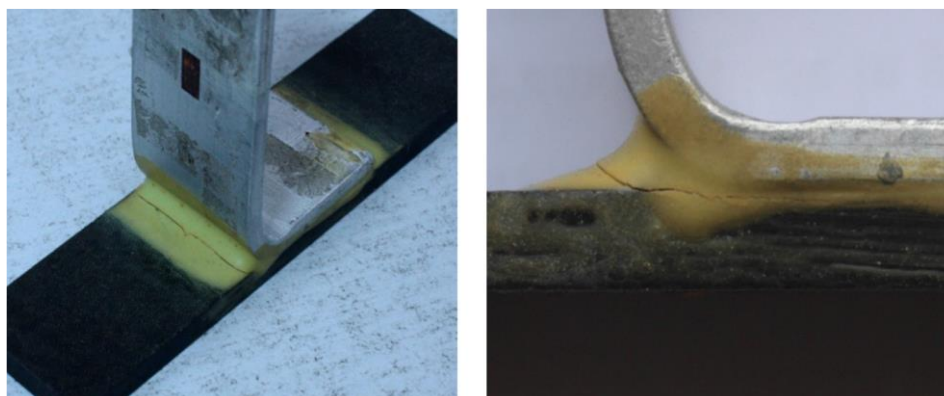


Figura 19 – Exemplo de junta em L após rotura [33].

Para efeitos de comparação e validação com a análise numérica, foram colocados 6 extensómetros, conforme mostra a Figura 20, de modo a averiguar a evolução das deformações e respectivos valores durante os ensaios.

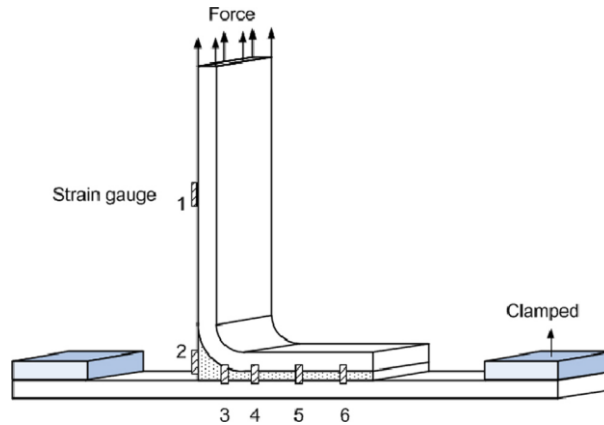


Figura 20 – Posições dos extensómetros medição experimental das deformações e tensões [33].

Os resultados experimentais de distribuição de tensões de arrancamento ao longo do comprimento de adesivo serão apresentados na Figura 21.

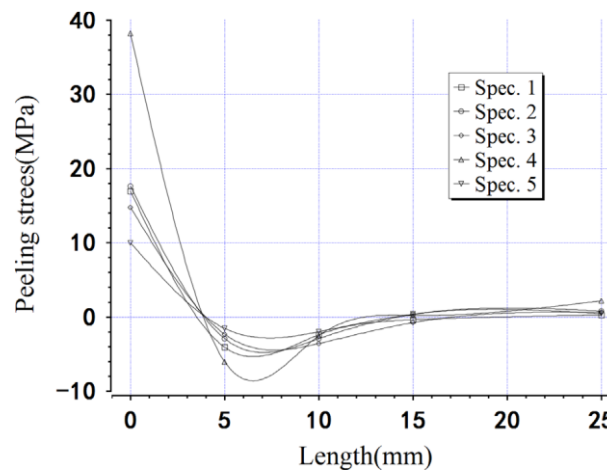


Figura 21 – Distribuições de tensões de arrancamento na camada de adesivo [33].

Como se pode verificar, a nível experimental, obteve-se um máximo de tensão de arrancamento no extensómetro 4, próximo dos 40 MPa, na extremidade solicitada do adesivo. Em relação aos valores de resistência (Figura 22), o valor de pico mais elevado foi obtido para o provete 3, com aproximadamente 1,9 kN.

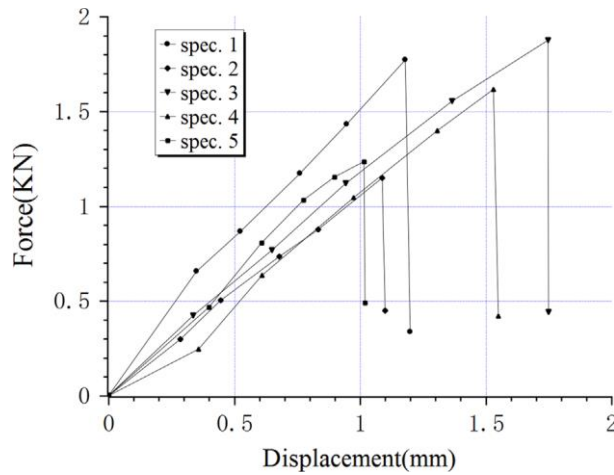


Figura 22 – Curvas força – deslocamento das juntas em L [33].

Comparando os resultados experimentais e numéricos, chegou-se à conclusão que seria inadequado modelar os aderentes como um corpo rígido e assumir que não irá influenciar a distribuição de tensões. Concluiu-se que o provete irá sofrer maiores tensões no início do arrancamento e cujo pico inicial depende das propriedades mecânicas e geométricas do adesivo. As previsões numéricas não diferem muito dos valores experimentais e fornecem uma maneira eficaz de modelação e previsão da resistência de juntas em L entre compósito e alumínio para aplicações de engenharia.

Li et al. [34] estudaram as distribuições de tensões no adesivo entre a ligação de um substrato dobrado a 90° em L a uma superfície rígida, através do MEF. A junta foi analisada segundo três carregamentos diferentes, dois de flexão e um de arrancamento, conforme apresentado na Figura 23.

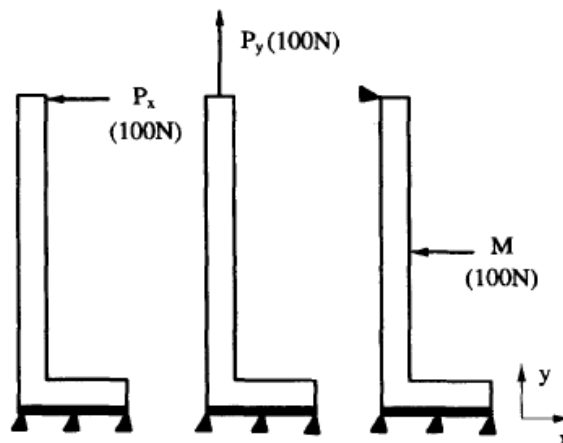


Figura 23 – Tipos de carregamento em estudo [34].

A Figura 24 mostra a distribuição de tensões normais para os três carregamentos e permite concluir que o carregamento P_x é o mais prejudicial, evidenciando tensões muito superiores comparadas aos demais, particularmente na curva interior do substrato em L e na extremidade mais próxima da camada adesiva, onde se evidencia elevados gradientes de tensão normal. Este carregamento apresenta ainda valores elevados de tensões de corte, enquanto nos restantes os valores de tensão de corte são residuais. No caso de carregamento P_y o valor máximo de tensão normal ocorre na extremidade livre esquerda da camada adesiva, sendo o aderente submetido também a elevadas tensões. Em relação à carga de flexão M , esta apresenta distribuições de tensão semelhantes às do carregamento P_x , embora com magnitude de tensões inferior.

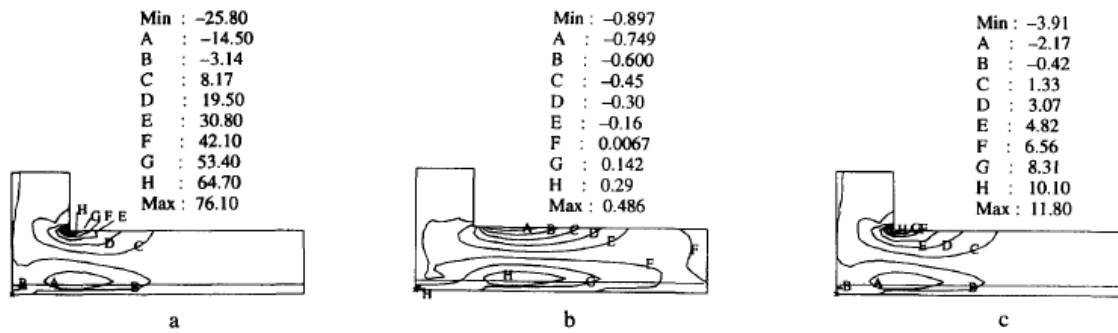


Figura 24 – Tensões normais (MPa) para os três carregamentos: a) P_x , b) P_y e c) M [34].

Foram também consideradas diferentes espessuras de camada adesiva e aderente em L , e valores de L_0 . Concluiu-se que, para um carregamento P_x , as tensões normais máximas aumentam com a diminuição de t_A . Para um carregamento P_y , os valores de tensões normais são significativamente mais pequenos do que com P_x . Por fim, para M , conclui-se que os valores de tensões normais são claramente inferiores aos evidenciados para P_x , porém com distribuição de tensões semelhante segundo o seu comprimento.

Segundo o estudo utilizando diferentes espessuras de aderente em L e valores de L_0 , os autores chegaram a conclusões idênticas às do primeiro estudo onde utilizam espessuras de adesivo diferentes. Registaram-se valores superiores de tensão, para ambos os estudos, com o carregamento P_x , bem como valores superiores de tensão com a diminuição da espessura de aderente e L_0 . Obteve-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

3 Trabalho Experimental

Como em qualquer trabalho de análise ou investigação, os resultados de uma análise experimental são da máxima relevância para validar as técnicas teóricas ou práticas utilizadas. Nesta dissertação, uma vez que as juntas em L são um tema pouco abordado, era fundamental a comparação do trabalho numérico com resultados experimentais. Para a realização do trabalho prático utilizaram-se aderentes de alumínio dobrado em forma de L com quatro valores de t_{p2} (1 a 4 mm) e compósito reforçado a fibra de carbono, ou *Carbon fiber reinforced polymers* (CFRP), com uma espessura de 3 mm e dois tipos de adesivos, o Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. O L_0 foi fixo em 25 mm. Posteriormente realizaram-se testes de tracção aos provetes a fim de obter a força de rotura das respectivas juntas para as diferentes espessuras de alumínio (t_{p2}).

3.1 Materiais

3.1.1 Substratos

Os aderentes utilizados neste trabalho são uma liga de alumínio e CFRP. O alumínio é bastante utilizado em aplicações da indústria automóvel, aeronáutica, entre outras, e tem vindo cada vez mais a ser utilizado face às suas características de leveza, boa condutividade eléctrica, resistência à corrosão, durabilidade e facilidade de conformação. Em relação ao CFRP, este é cada vez mais popular e utilizado em muitas aplicações e diversas áreas de engenharia (na fabricação de peças de asas na indústria aeronáutica, na construção de quadros, guiadores, transmissões e travões de disco na industria automóvel, bicicletas, entre outras), sendo maioritariamente usado em estruturas que requerem elevada resistência, rigidez e leveza.

3.1.1.1 Alumínio

Foi utilizada a liga de alumínio AW6082 – T651, geralmente aplicada em estruturas pesadas, como chassis de caminhões, navios e em pontes. Como principais propriedades, destacam-se a sua alta resistência à corrosão, boa condutividade térmica e baixo peso, como em todas as ligas de alumínio. As curvas de tensão – deformação desta liga de alumínio AW6082 – T651 foram obtidas em conformidade com a norma ASTM – E8M – 04 e são apresentadas na Figura 25. Como se pode verificar este material apresenta uma elevada resistência à tracção, de cerca de 340 MPa, obtida através do envelhecimento artificial, a uma temperatura de aproximadamente 180°C. Para uma futura análise numérica de MEF, será utilizado um comportamento elástico – perfeitamente plástico (Figura 25) [11, 35].

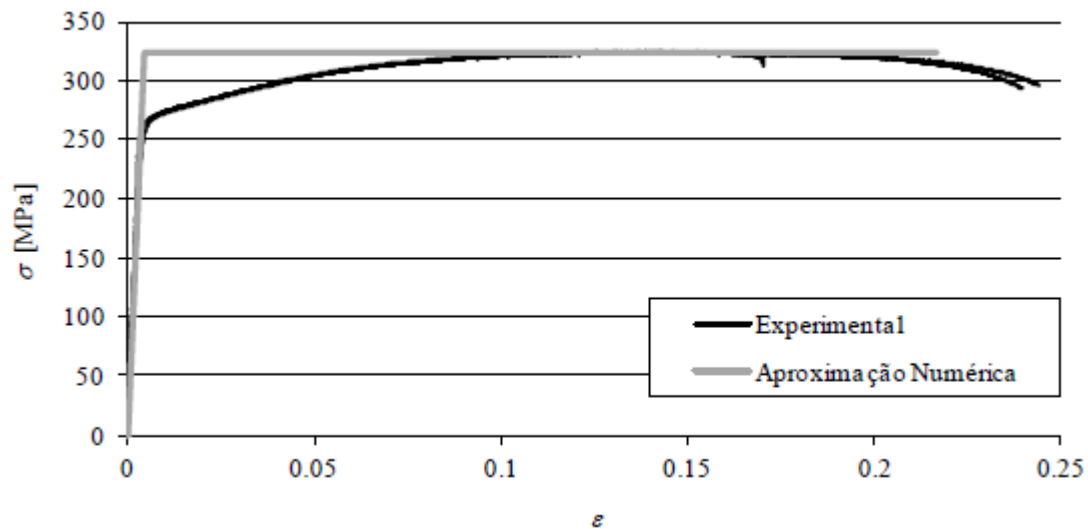


Figura 25 – Curva tensão – deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082 – T651 e respectiva aproximação para análise através do MEF [11].

Esta liga de alumínio apresenta as propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio [36].

Liga Al	AW6082 – T651
Tensão de rotura [MPa]	324±0,16
Coefficiente de Poisson	0,3
Deformação de rotura [%]	21,70±4,24
Tensão de cedência [MPa]	261,67±7,65
Dureza Vickers [HV]	100
Módulo de Young [GPa]	70,07±0,83

3.1.1.2 Compósito

O compósito utilizado tem reforço de fibra de carbono unidireccional, que lhe confere resistência e rigidez elevadas numa matriz de resina epóxida. O CFRP usado foi obtido a partir de pré – impregnado da SEAL[®] Texipreg HS 160 RM, considerado um material de excelência em diversas aplicações de alto desempenho como a indústria aeronáutica, onde o factor mais determinante é a resistência e rigidez específica. As propriedades elásticas ortotrópicas do CFRP foram obtidas em estudos anteriores [13] e estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades elásticas ortotrópicas do CFRP [13]

Propriedades	CFRP
E_1 [GPa]	109
E_2 [MPa]	8819
E_3 [MPa]	8819
G_{12}, G_{13} [N/mm ²]	4315
G_{23} [N/mm ²]	3200
ν_{12}, ν_{13}	0,342
ν_{23}	0,38

3.1.2 Adesivos

Os adesivos utilizados foram o epóxico Araldite[®] AV138 (adesivo frágil de elevada resistência mecânica) e o poliuretano Sikaforce[®] 7752 (adesivo dúctil com resistência inferior).

3.1.2.1 Adesivo Araldite[®] AV138

O Araldite[®]AV138 com o endurecedor HV 998 é um adesivo bi-componente que, quando combinado na proporção correcta (100g:40g), apresenta-se como uma pasta que cura à temperatura ambiente, com alta rigidez e resistência mecânica. As juntas coladas com este adesivo suportam altas temperaturas de trabalho e ambientes agressivos. A baixa emissão de gases torna este adesivo indicado para uso em telecomunicações, electrónica e indústria aeroespacial. As principais vantagens do Araldite[®] AV138 são as seguintes:

- Baixa emissão de gases e perda de voláteis;
- Excelente resistência química;
- Resistente a temperaturas de até 120°C;
- Cura a temperaturas acima de 5°C;
- Óptimo preenchimento e baixo escorrimento.

Pelas curvas de tensão – deformação apresentadas na Figura 26, obtidas em trabalhos anteriores [37] por ensaio de tracção em provetes maciços, verifica-se que este adesivo apresenta um comportamento frágil.

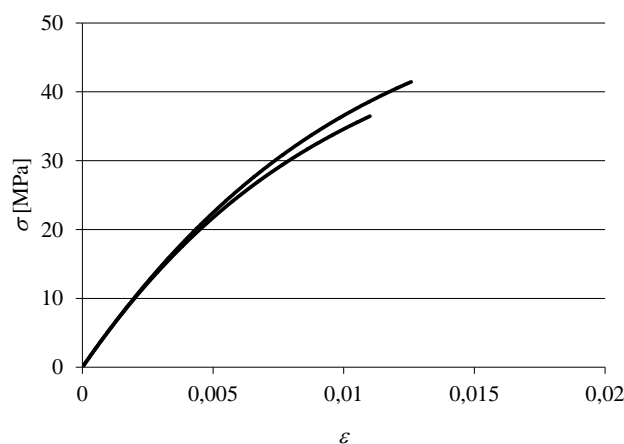


Figura 26 – Curvas σ - ϵ relativas ao adesivo Araldite[®] AV138 [37].

As propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo Araldite® AV138 são apresentadas na Tabela 3 [37 a 39].

Tabela 3 – Propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo Araldite® AV138 [37 a 39].

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

^a – Dados do fabricante

^b – Estimado na referencia [37]

3.1.2.2 Adesivo Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 pertence ao grupo dos poliuretanos constituídos por 2 componentes: resina e endurecedor. Trata-se de um adesivo com uma estrutura bastante estável e flexível, possui uma boa resistência térmica e elevada resistência ao corte e ao arrancamento. As principais vantagens do Sikaforce® 7752 são as seguintes:

- Funciona como retardador de chamas;
- Cura à temperatura ambiente;
- Resistente ao envelhecimento;
- Boa resistência ao impacto;
- Excelente flexibilidade a baixa temperatura.

O Sikaforce® 7752 é um adesivo de poliuretano com um comportamento dúctil, como se verifica na curva σ - ε apresentada na Figura 27 e representativa de um conjunto de curvas obtidas num trabalho anterior [39].

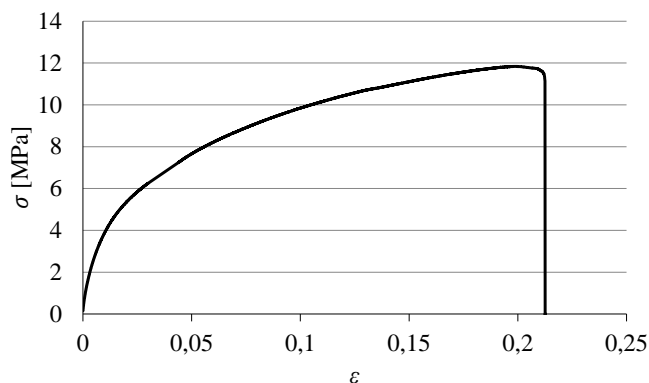


Figura 27 – Curva σ - ε relativa ao adesivo Sikaforce® 7752 [39].

As propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce® 7752 são apresentadas na Tabela 4 [37 a 39].

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce® 7752 [37 a 39].

Propriedades	Sikaforce® 7752
Módulo de Young, E [MPa]	493,81±89,60
Coefficiente de Poisson, ν	0,32
Tensão de cedência, σ_y [MPa]	5,16±1,14
Tensão de rotura, σ_f [MPa]	11,49±0,25
Deformação de rotura, ε_f [%]	13,92±9,14
Módulo de corte, G [GPa]	187,75±16,35
Tensão de cedência de corte, τ_y [MPa]	5,16±1,14
Tensão de rotura de corte, τ_f [MPa]	10,17±0,64
Deformação de rotura de corte, γ_f [%]	54,82±6,39
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	2,36±0,17
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	5,41±0,47

3.2 Procedimento experimental

O trabalho experimental consiste no fabrico e teste de 8 configurações de junta, englobando diferentes valores de t_{P2} de 1 a 4 mm e dois tipos de adesivos, o Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7752. Foram considerados 5 provetes para cada configuração de junta, perfazendo um total de 40 provetes.

3.2.1 Geometria das juntas

A geometria de junta adesiva utilizada nesta dissertação é a junta em L (Figura 28), em que um dos aderentes (no presente caso o aderente de CFRP) é rectilíneo e é ligado a um aderente em forma de L (o aderente de alumínio). A solicitação aplicada é de arrancamento. A Tabela 5 apresenta as dimensões de cada configuração de junta.

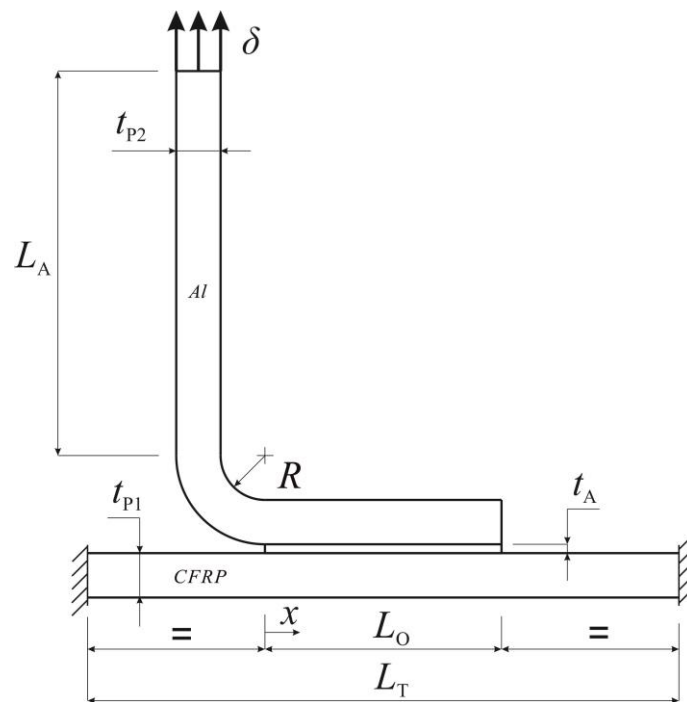


Figura 28 – Geometria da junta em L .

A nomenclatura utilizada é a seguinte:

L_T – Comprimento entre apoios do aderente de CFRP;

L_O – Comprimento de sobreposição;

t_A – Espessura de adesivo;

R – Raio de curvatura do aderente de alumínio;

t_{P1} – Espessura do aderente de CFRP;

t_{P2} – Espessuras do aderente de alumínio;

L_A – Altura do aderente de alumínio;

δ – Deslocamento imposto;

x – Eixo x para efeitos de estudo numérico de tensão.

Tabela 5 – Dimensões das juntas [em mm].

L_T	L_O	t_A	R	t_{P1}	t_{P2}	L_A
80	25	0.2	5	3	1, 2, 3 e 4	60

3.2.2 Processo de fabrico

3.2.2.1 Dobragem do alumínio

Os provetes de alumínio foram dobrados de modo a formar a forma L necessária para as condições experimentais. Recorreu-se a uma máquina de dobragem manual existente nas oficinas mecânicas do ISEP. Procedeu-se à marcação do valor de L_O nos provetes (Figura 29 a), com o auxílio de um paquímetro, de modo a garantir $L_O=25$ mm após dobragem. Devido à tendência para a rotura dos aderentes antes da dobra a 90° ser concluída, foi necessária a utilização de chapas de apoio, para promover um aumento de R e evitar a rotura dos aderentes. Este processo foi efectuado com bastante cuidado e por etapas lentas (Figura 29 b). O aspecto final dos provetes de alumínio é mostrado na Figura 29 c).

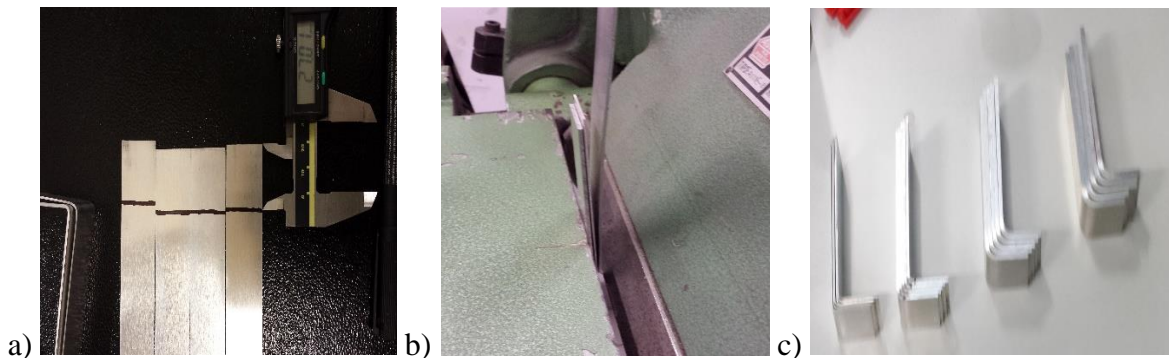


Figura 29 – a) Marcação dos provetes para dobragem, b) utilização de chapas para auxílio da dobra, c) aspecto final do provete.

3.2.2.2 Placas de CFRP

Procedeu-se ao fabrico das placas de compósito de CFRP nas instalações da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), no laboratório de adesivos. Inicialmente, foi retirado o pré-impregnado de fibra de carbono de uma camara frigorifica a baixa temperatura, aproximadamente -18°C , deixando-o estabilizar durante alguns minutos à temperatura ambiente. Posteriormente cortaram-se 20 camadas de CFRP ($300 \times 300 \text{ mm}^2$), cada uma com uma espessura $0,15 \text{ mm}$, para assim perfazer os 3 mm finais pretendidos em cada placa de CFRP. Seguiu-se o empilhamento manual das 20 camadas. Para isto retirou-se a protecção plástica de um dos lados, e com a utilização de uma pistola de ar quente aqueceu-se a folha em toda a sua área para que a resina que esta contém possibilite uma melhor aderência entre camadas. Posteriormente é efectuado o mesmo passo para uma nova folha e procedeu-se à sua sobreposição/empilhamento na anterior a um angulo de 0° com as faces aquecidas viradas uma para a outra com bastante cuidado para não as sobrepor indevidamente (Figura 30). É efectuado o mesmo processo para as restantes camadas de compósito, obtendo assim no final uma placa com a espessura pretendida (3 mm).

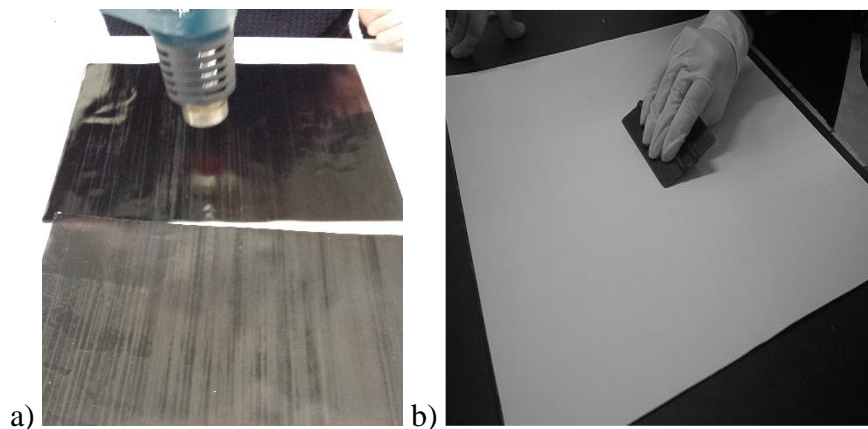


Figura 30 – a) Aquecimento de uma camada de compósito e b) processo de empilhamento.

Após empilhamento, a placa é colocada na prensa para curar. Para este efeito recorreu-se ao uso de placas de aço previamente revestidas com desmoldante para garantir a remoção da placa após a cura. É então colocada a placa entre as chapas de aço e posteriormente na prensa (Figura 31).

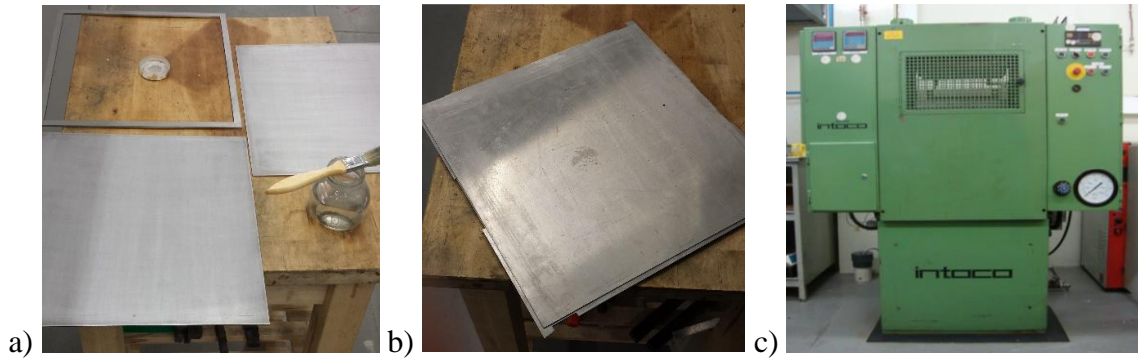


Figura 31 – a) Aplicação do desmoldante, b) placa de CFRP entre chapas de aço, c) placa de CFRP na prensa a uma temperatura de 130°C.

As placas de CFRP são curadas a uma pressão e temperatura de 4 bar e 130°C, respectivamente, durante uma hora. A Figura 30 ilustra o ciclo térmico para cura das placas, com uma rampa de aquecimento de 4°C/min até uma temperatura de 130°C. A placa fica durante uma hora a 130°C e uma pressão de 4 bar. Após este estágio, a placa é deixada na prensa e inicia-se a rampa de arrefecimento até que a placa chegue à temperatura ambiente.

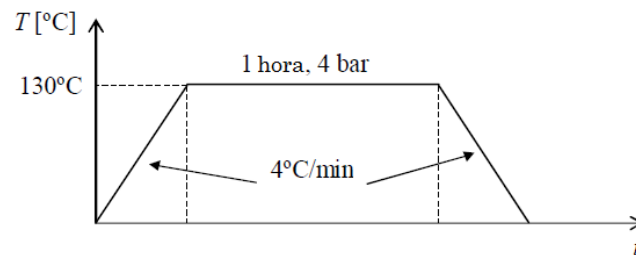


Figura 32 – Ciclo térmico de cura das placas de CFRP.

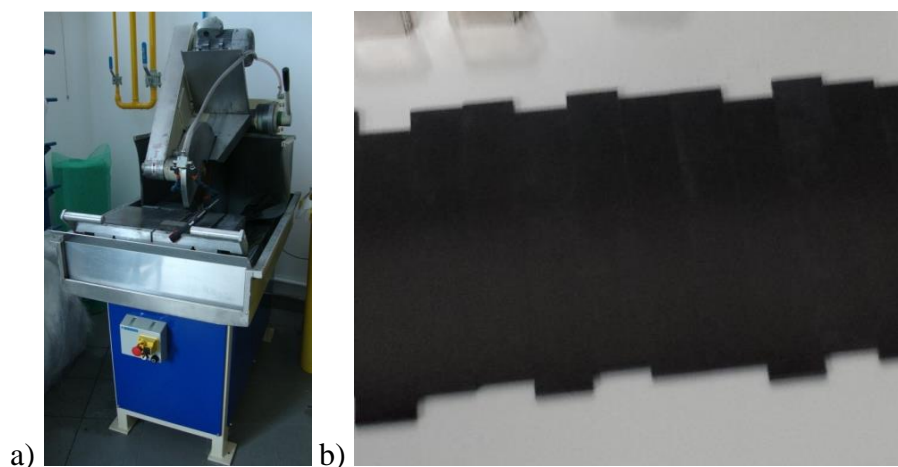


Figura 33 – a) máquina de corte utilizada e b) provetes cortados.

Quando se atinge a temperatura ambiente a placa é retirada da prensa. As placas foram cortadas no Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP. O corte foi efectuado utilizando uma mesa de corte guiada com disco diamantado (Figura 33), utilizando um sistema de guias e réguas para posicionamento das placas na mesa de corte.

3.2.2.3 Fabrico das juntas

Para a preparação das superfícies do CFRP recorreu-se a uma lixagem na zona em contacto com o adesivo. Com esta técnica alterou-se a rugosidade de superfície, promovendo assim uma boa molhagem do adesivo ao substrato e consequentemente uma melhor adesão. Foi utilizada uma lixa superfina com um índice de 220 para não provocar dano nas fibras, nem diminuição da espessura das placas. No caso do alumínio, contrariamente ao CFRP, não foi utilizada lixagem mas sim granalhagem da face em contacto com o adesivo. Esta granalhagem não altera as características mecânicas do alumínio, apenas confere melhores propriedades de adesão, através de introdução de um acabamento rugoso na área a colar.

Posteriormente, e com auxílio de um paquímetro, marcou-se no alumínio e CFRP o valor de L_0 correspondente e respectiva posição para colagem. O alinhamento dos provetes de CFRP foi assegurado com espaçadores de alumínio (Figura 34).

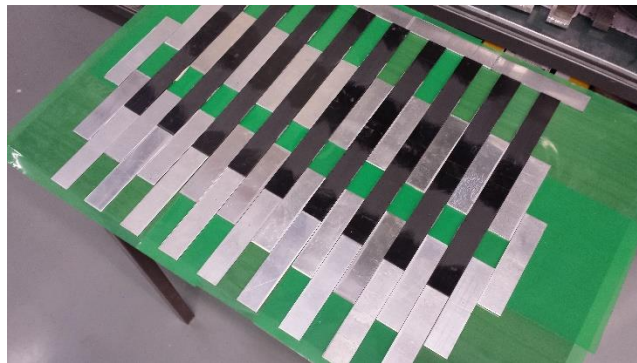


Figura 34 – Alinhamento dos provetes de CFRP com auxílio de espaçadores de alumínio.

De modo a garantir um valor de t_A o mais uniforme possível (0,2 mm), utilizaram-se fitas calibradas com a mesma espessura para delimitar a área a colar e garantir o valor de t_A . Estas foram devidamente revestidas com desmoldante para facilitar a sua posterior remoção após cura do adesivo. As fitas foram coladas numa tira de alumínio recorrendo a um adesivo cianoacrilato de modo a garantir as dimensões pretendidas para a área colada, tal como se pode observar na Figura 35.

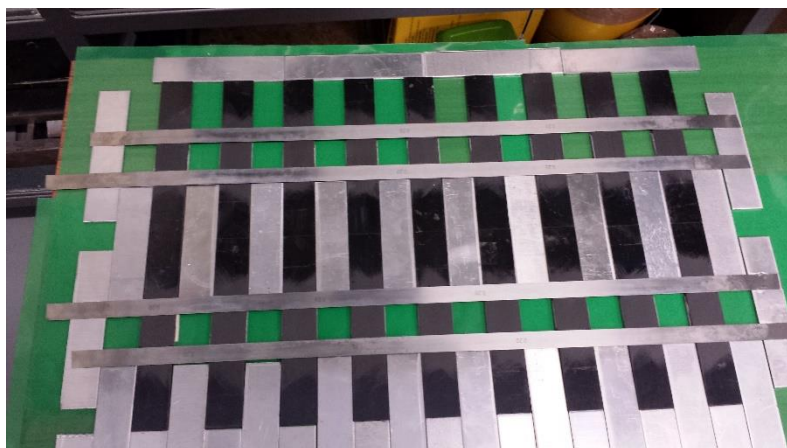


Figura 35 – Alinhamento das fitas calibradas de 0,2 mm.

A colagem dos provetes foi efectuada com o adesivo Araldite® AV138 ou Sikaforce® 7752, sendo os dois adesivos fornecidos em duas embalagens, uma contendo a resina sendo o outro o acelerador de cura (endurecedor). No primeiro caso a preparação consiste na mistura dos dois componentes na razão de 100g:40g (50 g de resina para 20 g de endurecedor), enquanto no segundo caso a razão é de 100g:20g (50 g de resina para 10 g de endurecedor). A pesagem foi realizada usando uma balança de precisão. A Figura 36 mostra como exemplo a pesagem dos componentes para o Araldite® AV138.

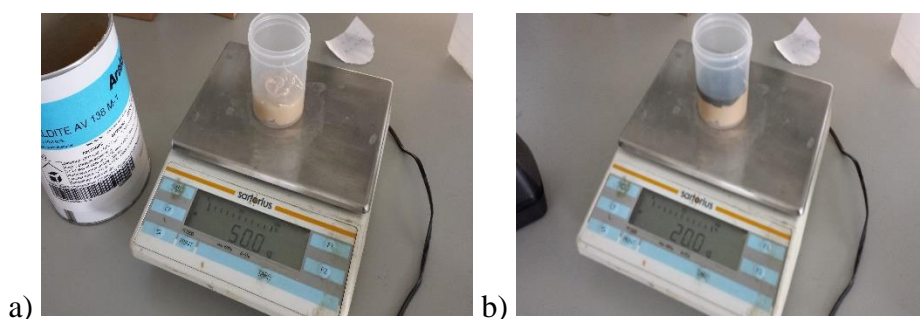


Figura 36 – a) pesagem da resina e b) endurecedor para a preparação do Araldite® AV138.

Após pesados os 2 componentes, estes foram colocados numa misturadora para homogeneizar a mistura (Figura 37). Este equipamento garante a mistura homogénea por centrifugação.

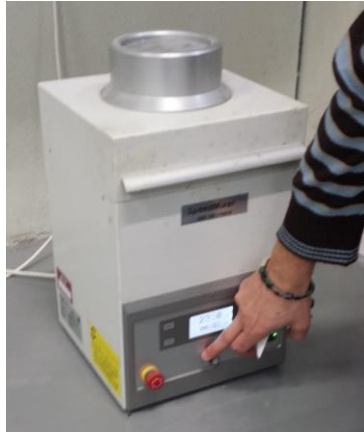


Figura 37 – Misturadora.

Após mistura, fez-se um compasso de espera antes da colagem para aumentar a viscosidade, já que após a mistura o adesivo apresenta uma baixa viscosidade, dificultando o posicionamento nos provetes. Decorridos alguns minutos procedeu-se à aplicação do adesivo utilizando uma espátula fina e aplicando adesivo nas duas superfícies (alumínio e CFRP). O posicionamento relativo entre o provete de alumínio e do CFRP foi efectuado o mais rigorosamente possível, usando sempre basculamento, por forma a evitar o aprisionamento de ar no interior da junta. O alumínio ficou posicionado com 1 ou 2 mm de cada lado em cima de cada fita, garantindo a espessura de 0,2 mm bem como $L_0 = 25$ mm, conforme mostrado na Figura 38.



Figura 38 – Colocação do aderente de alumínio em L sobre as fitas calibradas de 0,2 mm e CFRP.

Procedeu-se da mesma forma para todos os provetes e no final colocaram-se pesos para garantir a espessura de 0,2 mm ao longo de toda a área colada. A Figura 39 ilustra os provetes durante o processo de cura.

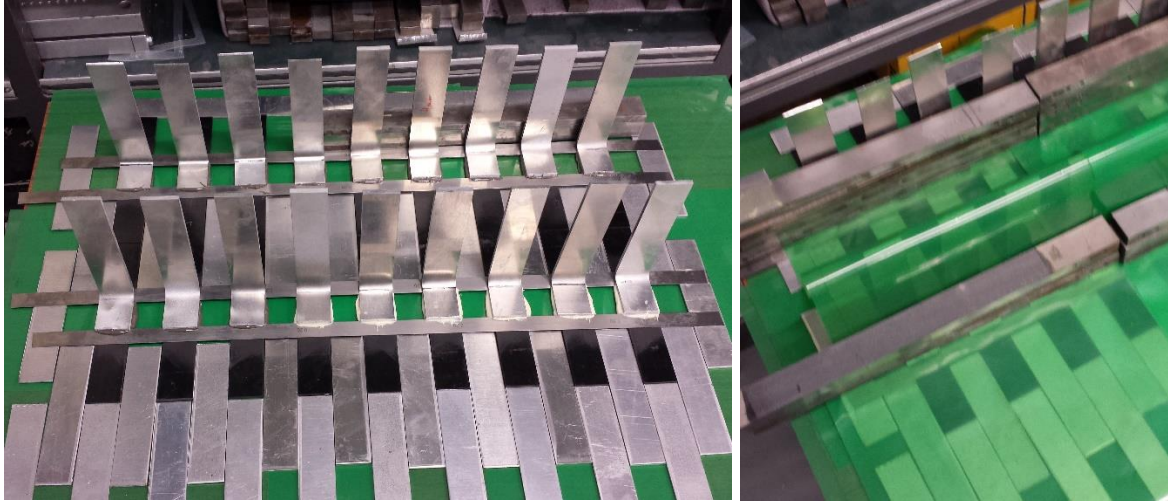


Figura 39 – Juntas coladas durante o processo de cura.

As juntas foram curadas durante uma semana, para assim garantir a cura completa do adesivo. A remoção do excesso de adesivo proveniente da pressão exercida enquanto se processava a cura foi realizada nas Oficinas Mecânicas do ISEP recorrendo ao uso de uma mó numa máquina de furar. A remoção foi a mais cuidada possível de modo a não provocar alteração da geometria no CFRP ou alumínio conforme mostrado na Figura 40.

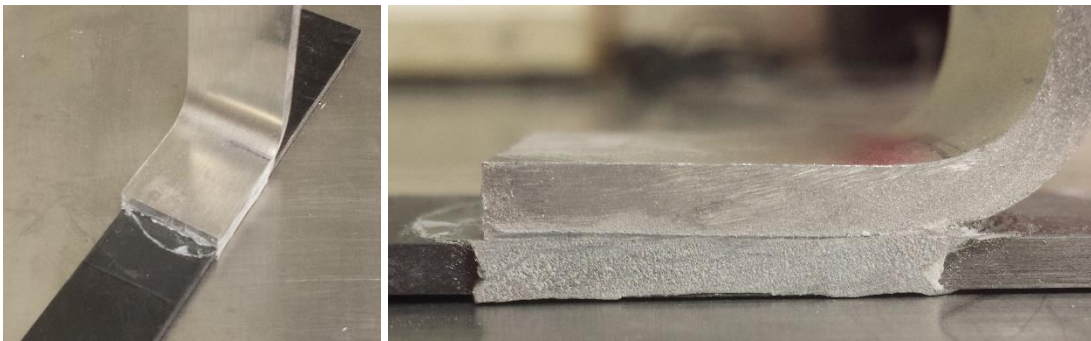


Figura 40 – Junta após remoção do excesso de adesivo.

O aspecto final das juntas é apresentado na Figura 41.

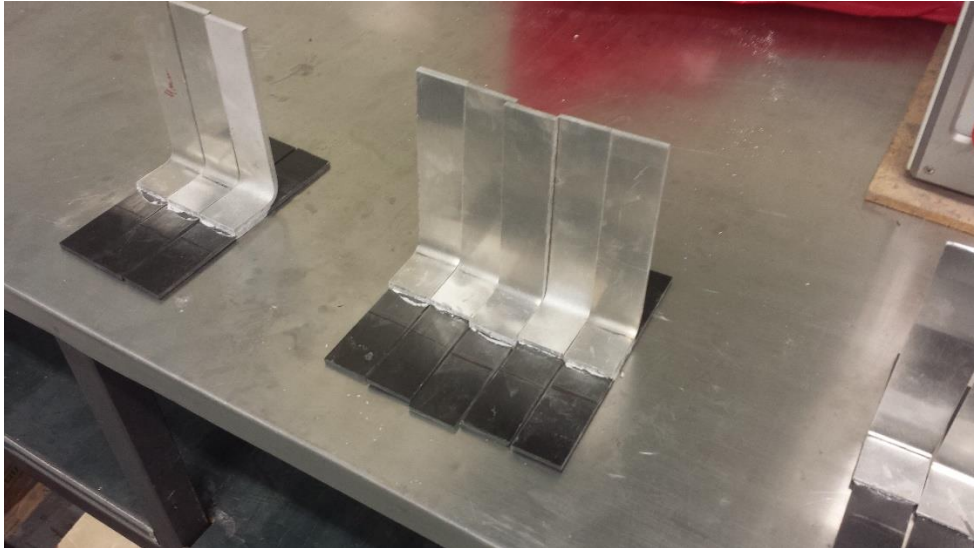


Figura 41 – Aspecto final das juntas.

3.2.3 Ensaio das juntas

Os ensaios de arrancamento foram realizados numa máquina *Instron* modelo 3367, equipada com uma célula de carga de 30 kN, situada no Laboratório de Adesivos da FEUP.

Antes dos ensaios e, uma vez que o Laboratório de Adesivos da FEUP não tinha nenhuma base para assentar os provetes, foi necessário o fabrico de uma base, composta por furos deslizantes para abranger um maior número de comprimentos e ter um ajuste mais versátil, possibilitando assim o uso desta ferramenta em outro tipo de dimensões. A base foi fabricada em liga de alumínio AW6082 T651. A Figura 42 ilustra essa base, sendo ela composta por 4 parafusos M10 sextavado, 2 blocos para prender o CFRP, 4 anilhas e 4 roscas.

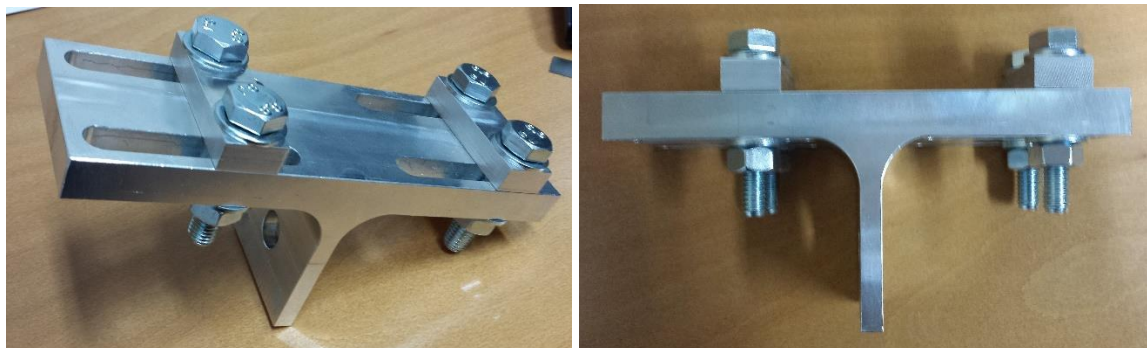


Figura 42 – Base fabricada para ensaio dos provetes.

No ensaio de arrancamento, os provetes são fixos na máquina de tracção, de modo manual. A base da junta (material CFRP) é fixa à base da ferramenta através de dois blocos fixos por parafusos. O alumínio é preso à amarra superior da máquina *Instron*, apertado a uma distância do CFRP de 60 mm. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente em controlo de deslocamentos, a uma velocidade constante de 1 mm/min. Na Figura 43 observa-se um provete devidamente posicionado para ensaio.



Figura 43 – Ensaio de arrancamento de uma junta em *L*.

De seguida é dada ordem no computador para que o ensaio inicie, registando-se os valores de deslocamento, força e tempo, sendo estes posteriormente exportados para Excel.

3.2.4 Resultados

3.2.4.1 Juntas coladas com o Araldite® AV138

No final de cada ensaio, de modo a averiguar o tipo de rotura, registaram-se as superfícies de rotura em fotografia. A Figura 44 e Figura 45 ilustram as roturas dos provetes com adesivo Araldite® AV138 para $t_{P2}=1$ e 4 mm, respectivamente.

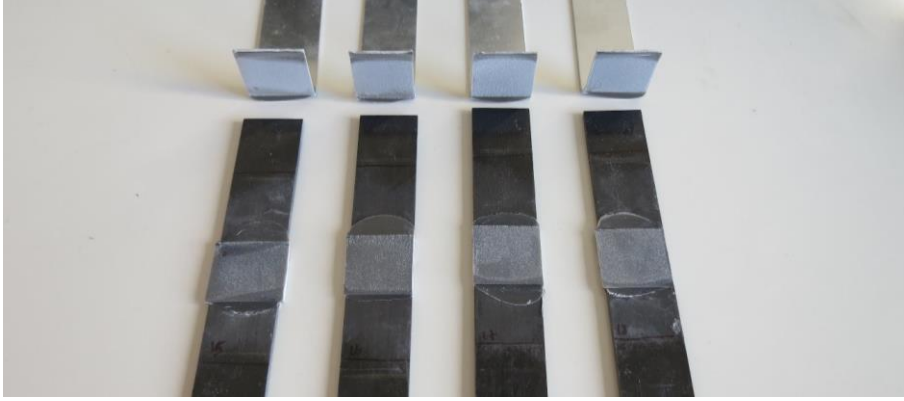


Figura 44 – Rotura coesiva do adesivo para as juntas coladas com o Araldite® AV138 e $t_{P2}=1$ mm.

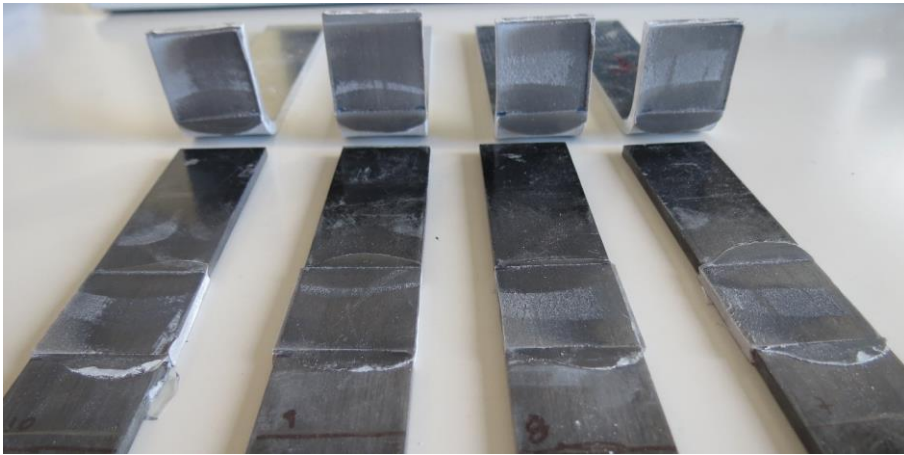


Figura 45 – Rotura coesiva do adesivo para as juntas coladas com o Araldite® AV138 e $t_{P2}=4$ mm.

Como se pode observar na Figura 44 e Figura 45 as roturas são coesivas na camada adesiva, o que mostra que a ligação entre o adesivo e os aderentes é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo, resultando numa rotura em que ambas as superfícies dos substrato apresentam adesivo. Este tipo de rotura é ainda consequente de uma boa preparação superficial antes de se efectuar a colagem. Os restantes valores de t_{P2} registaram também rotura coesiva em todos os provetes ensaiados.

A Figura 46 e Figura 47 mostram as curvas $P-\delta$ para as juntas coladas com o Araldite® AV138 e $t_{P2}=1$ e 4 mm, respectivamente.

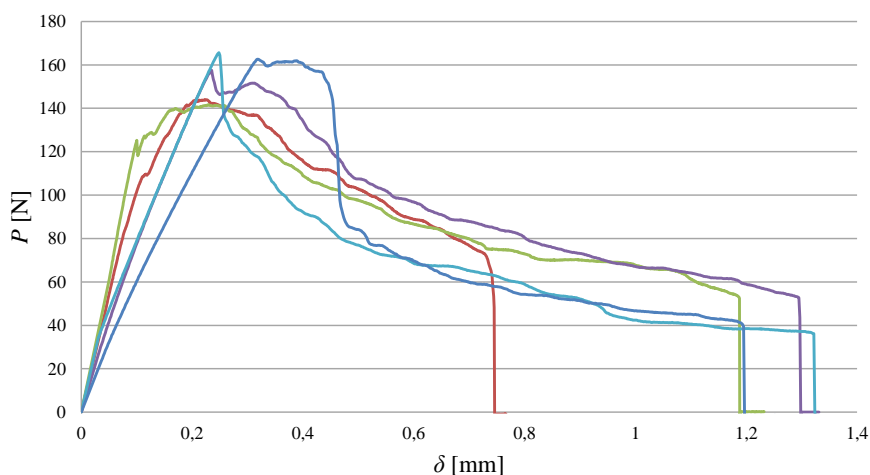


Figura 46 – Curvas P - δ para as juntas coladas com o Araldite® AV138 e $t_{P2}=1$ mm.

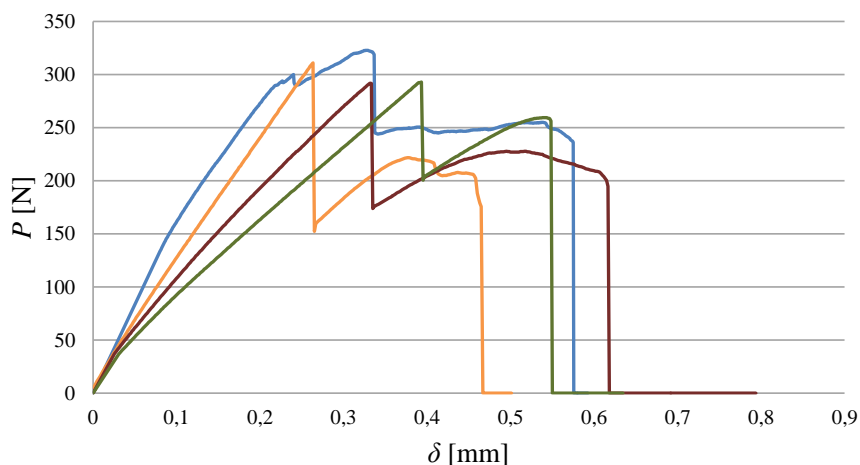


Figura 47 – Curvas P - δ para as juntas coladas com o Araldite® AV138 e $t_{P2}=4$ mm.

Como se pode verificar pela Figura 46 e Figura 47, as curvas P - δ dos vários provetes apresentam uma correlação aceitável no que concerne à resistência máxima e respectivo deslocamento, e ainda deslocamento de rotura, verificando-se apenas pequenas oscilações de variação da rigidez inicial dos provetes. Regista-se como exceção, na Figura 46, uma das juntas ensaiadas em que só se obteve um deslocamento de cerca de 0,75 mm, valor abaixo das restantes. Suspeita-se que este deslocamento mais baixo seja devido à má preparação da junta. Devido à fragilidade do adesivo, que não permite plastificação do aderente de alumínio, os deslocamentos de rotura que se evidenciaram foram baixos, sendo os maiores valores obtidos para $t_{P2}=1$ mm. Com o aumento de t_{P2} a resistência da junta aumenta, porém os deslocamentos para a resistência máxima diminuem.

A Figura 48 diz respeito à média e desvio padrão para a carga máxima (P_m) das juntas coladas com Araldite® AV138 em função de t_{p2} .

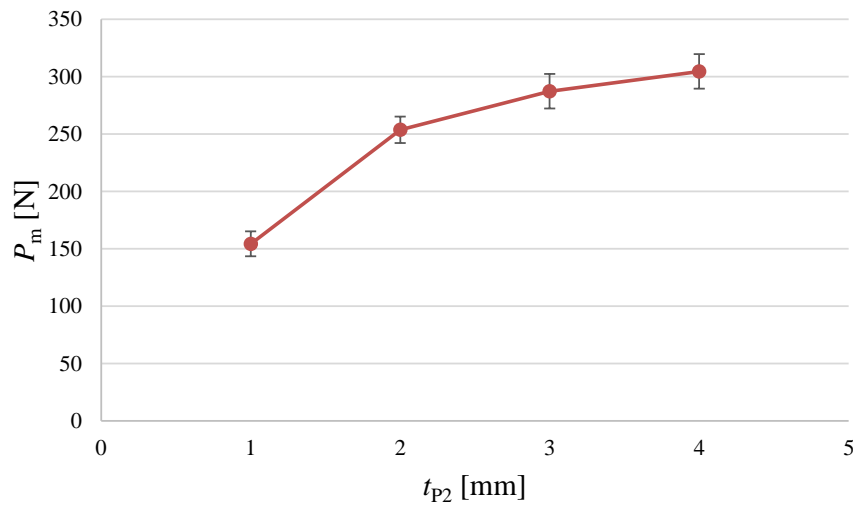


Figura 48 – Valores de P_m das juntas coladas com o Araldite® AV138 em função de t_{p2} .

Como se pode observar, regista-se um aumento progressivo da resistência da junta à medida que se aumenta t_{p2} . No entanto, os resultados obtidos mostram um aumento de P_m a taxa decrescente e com tendência a atingir um valor constante. Importante ainda referir que nenhuma das juntas ensaiadas apresentou qualquer tipo de plastificação de alumínio, tal como é possível observar através do exemplo mostrado na Figura 49.

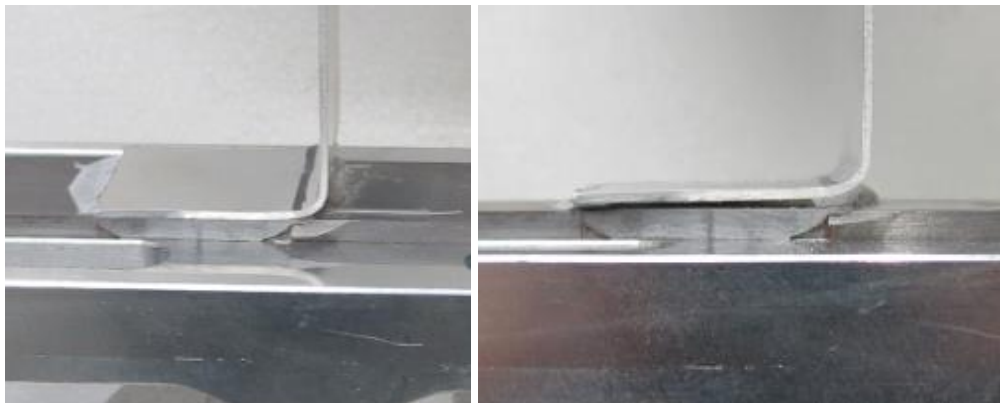


Figura 49 – Junta sem plastificação de alumínio durante e após ensaio de arrancamento ($t_{p2}=1$ mm).

3.2.4.2 Juntas coladas com o Sikaforce® 7752

A Figura 50 e Figura 51 ilustram as roturas dos provetes com o adesivo Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=2$ e 3 mm, respectivamente.

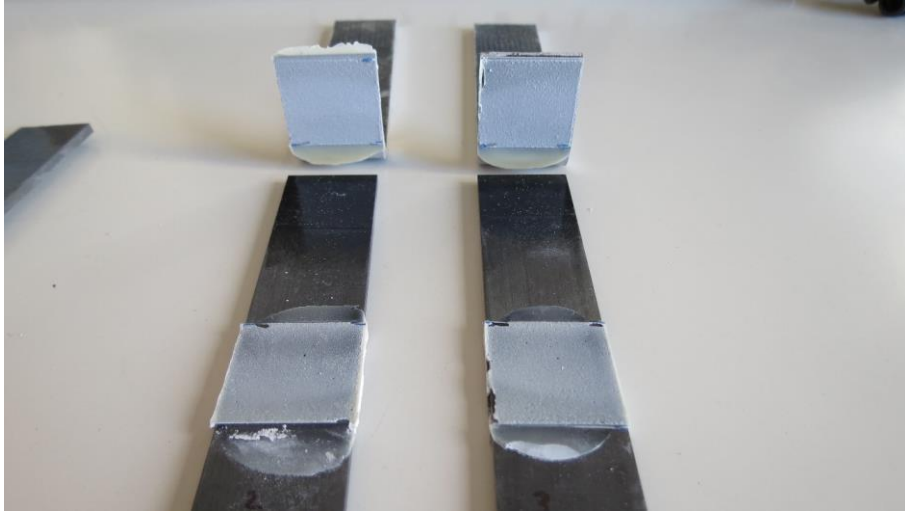


Figura 50 – Rotura coesiva do adesivo para as juntas das juntas coladas com o Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=2$ mm.

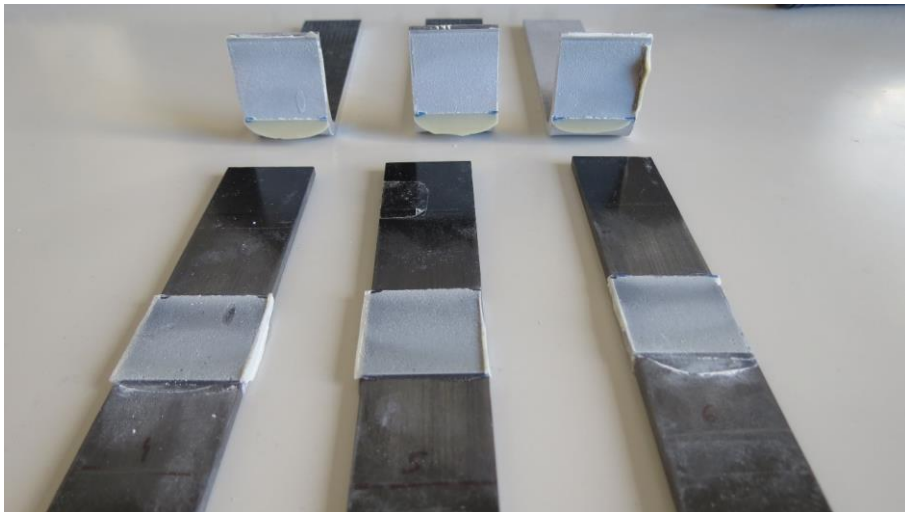


Figura 51 – Rotura coesiva do adesivo para as juntas das juntas coladas com o Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=3$ mm.

Tal como foi observado para as juntas coladas com o Araldite® AV138, as roturas são igualmente coesivas na camada adesiva e, após a rotura, é visível uma camada de adesivo em ambas as superfícies dos substratos. Na Figura 51 é possível ainda observar no provete

da esquerda uma cratera sem adesivo no CFRP, estando o material praticamente todo no substrato de alumínio. Esta discrepância e aparecimento de rotura mista deve-se a uma preparação inadequada quer de limpeza quer de lixagem antes da colagem. Os restantes valores de t_{P2} registaram também rotura coesiva em todos os substratos ensaiados. As figuras que se seguem (Figura 52 e Figura 53) dizem respeito às curvas $P-\delta$ para um $t_{P2}=1$ e 4 mm, respectivamente.

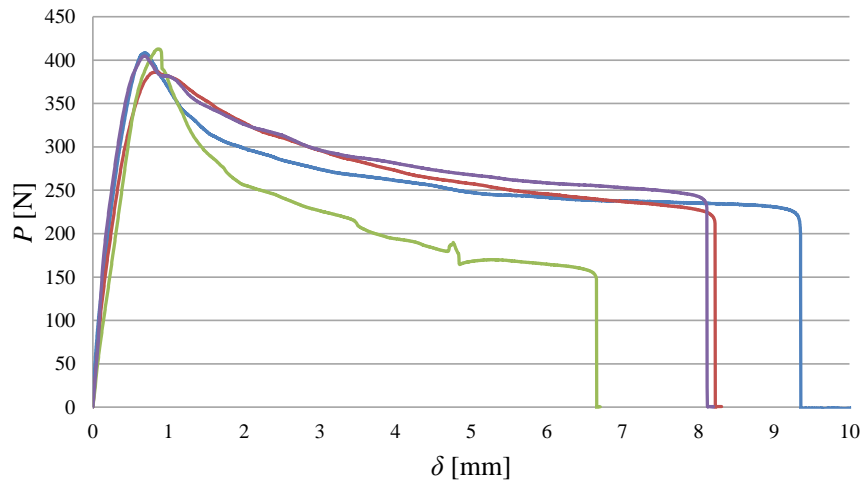


Figura 52 – Curvas $P-\delta$ para as juntas coladas com o Sikaforce® 7752 e $t_{P2}=1$ mm.

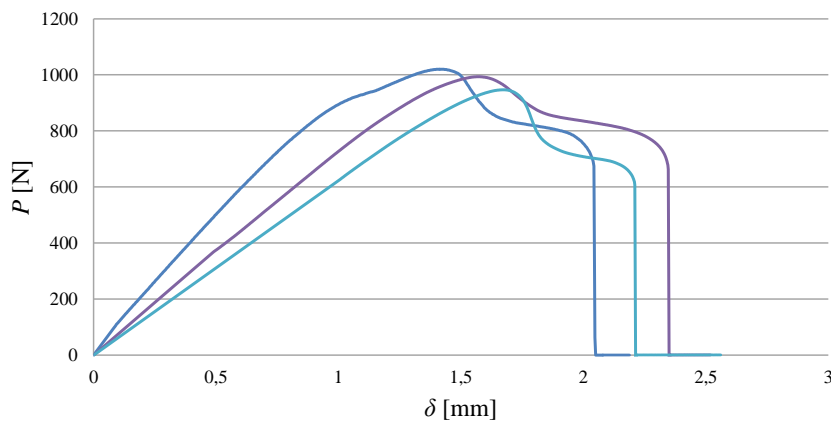


Figura 53 – Curvas $P-\delta$ para as juntas coladas com o Sikaforce® 7752 e $t_{P2}=4$ mm.

Como se pode verificar pela Figura 52 e Figura 53, as curvas $P-\delta$ estão de acordo entre elas relativamente aos valores de resistência, deslocamentos de carga máxima e de rotura. Devido à elevada ductilidade do Sikaforce® 7752, que induz a plastificação do aderente de alumínio para $t_{P2}=1$ mm, a resistência e deslocamento de rotura da junta adesiva apresentam valores

superiores aos evidenciados para o adesivo Araldite® AV138. Como seria de esperar, com o aumento de t_{P2} , o valor da resistência aumenta e deslocamento de rotura diminui. A Figura 54 diz respeito à média e desvio padrão de P_m das juntas coladas com o Sikaforce® 7752 em função de t_{P2} .

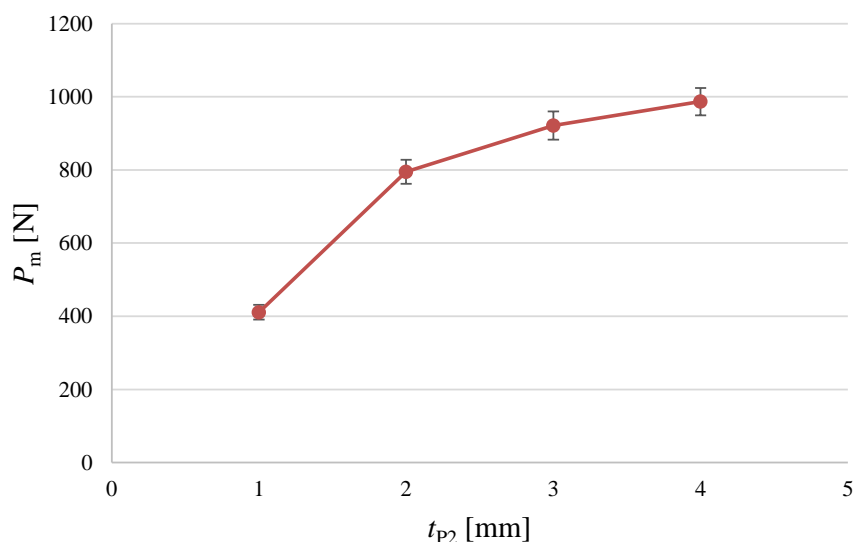


Figura 54 – Valores de P_m das juntas coladas com o Sikaforce® 7752 em função de t_{P2} .

Como se pode averiguar por análise da Figura 54, os valores de P_m aumentam com o respectivo aumento de t_{P2} . É mais notório o aumento de P_m entre 1 e 2 mm. Para valores de t_{P2} superiores, os valores de P_m tendem a estabilizar, não se registando um aumento tão significativo entre 3 e 4 mm.

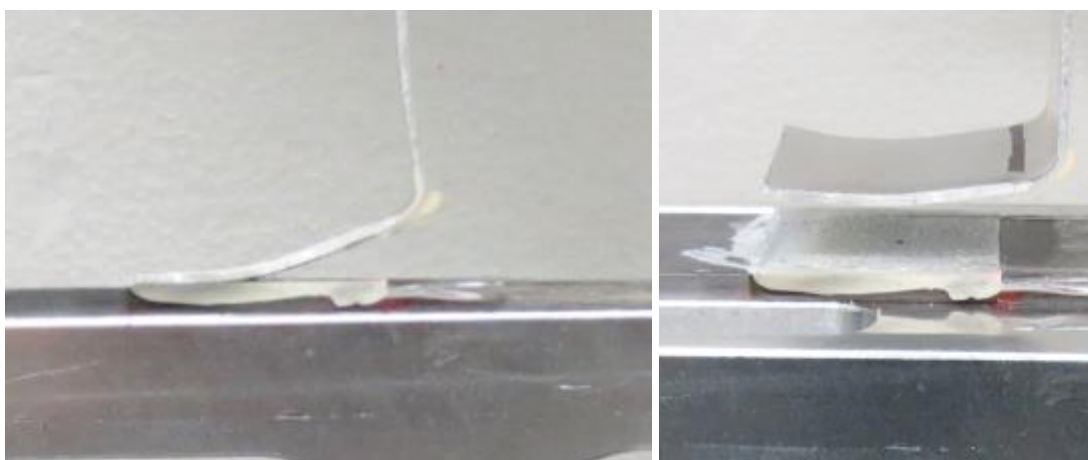


Figura 55 – Plastificação do aderente de alumínio durante e após ensaio de arrancamento ($t_{P2}=1$ mm).

Para a configuração de junta com $t_{p2}=1$ mm, o aderente de alumínio sofreu plastificação devido à elevada ductilidade do adesivo, o que se traduziu em valores de P_m mais elevados comparativamente às juntas com o Araldite® AV138. A Figura 55 mostra a plastificação do aderente de alumínio para a junta com $t_{p2}=1$ mm.

3.3 Discussão dos resultados obtidos

Comparando o comportamento das juntas com o aumento de t_{p2} , a evolução foi similar para ambos os adesivos. Em ambos os casos observou-se um aumento brusco da resistência entre 1 e 2 mm. No entanto, este acréscimo de resistência diminuiu gradualmente com o aumento de t_{p2} . Como se pode observar na Figura 54, os resultados de resistência para as juntas coladas com o Sikaforce® 7752 mostram valores de P_m muito mais elevados do que aqueles obtidos utilizando Araldite® AV138 (Figura 48). De facto, dependendo do valor t_{p2} , a resistência pode ser três vezes superior à obtida com o Araldite® AV138, embora este último adesivo tenha um valor superior de resistência à tracção.

Tendo como referência o valor de P_m para $t_{p2}=1$ mm nas juntas coladas com Sikaforce® 7752, o aumento percentual para $t_{p2}=2$ mm foi de 93,5%, para $t_{p2}=3$ mm de 124,3% e por último para $t_{p2}=4$ mm o aumento foi de 140,1%, correspondendo a valores superiores aos encontrados para o Araldite® AV138. Nas juntas coladas com Araldite® AV138, o aumento percentual relativamente à junta com $t_{p2}=1$ mm foi de 64,5% ($t_{p2}=2$ mm), 86,6% ($t_{p2}=3$ mm) e 97,5 ($t_{p2}=4$ mm). Tal como já referido, o adesivo Sikaforce® 7752 atingiu uma resistência muito superior à registada para o Araldite® AV138. Em termos percentuais, o adesivo Sikaforce® 7752 atingiu valores de resistência superiores em 266,3%, 313,4%, 320,7% e 323,9%, respectivamente, para valores de t_{p2} entre 1 a 4 mm.

Atendendo às características de cada adesivo, o adesivo Sikaforce®7752, resiste mais aos efeitos de arrancamento devido a ser um adesivo dúctil e flexível. De facto, apresenta um valor de E que é aproximadamente 10 vezes inferior ao do Araldite® AV138. Este último é mais frágil e, como tal, mais sensível a esforços de arrancamento.

4 Trabalho numérico

A simulação numérica com recurso a computador é uma ferramenta bastante utilizada na concepção de projectos de engenharia. O desenvolvimento das técnicas de simulação, observado até aos tempos actuais, permite que os valores obtidos nos resultados numéricos sejam cada vez mais concretos e fiáveis. Estas simulações numéricas permitem compreender em detalhe o comportamento de juntas adesivas sujeitas a vários tipos de solicitações. Deste modo, as experiências em laboratório e as simulações numéricas em *software* são as principais técnicas para conhecer e estudar o comportamento de juntas adesivas.

4.1 Condições da análise numérica

Neste estudo, recorreu-se ao *software* ABAQUS[®], um dos principais *softwares* utilizados para estudo de juntas adesivas e estruturas complexas [13], de modo a estudar as distribuições de tensões, a variável de dano nas zonas possíveis de rotura, os modos de rotura e efectuar a previsão de resistência.

Foram considerados modelos bidimensionais (2D), uma vez que a largura das juntas é constante, ou seja, 25 mm. A geometria dos aderentes foi dividida em partições para facilitar a construção da malha de elementos finitos (Figura 56). Consideram-se zonas de propagação de dano modeladas por elementos coesivos, nomeadamente a camada de adesivo e uma zona intralaminar da primeira camada do aderente de CFRP. Esta última foi colocada a uma distância de 0,05 mm da superfície do CFRP, com uma espessura de 0,02 mm a todo o comprimento do substrato de CFRP. A distância que foi dada à camada coesiva no CFRP foi considerada devido à ocorrência frequente de roturas intralaminares em juntas adesivas [40], devido às tensões superiores relativamente à transição entre camadas de CFRP, uma vez que a espessura de cada camada é de aproximadamente 0,15 mm. Os aderentes de alumínio e CFRP foram considerados como sólidos homogéneos.

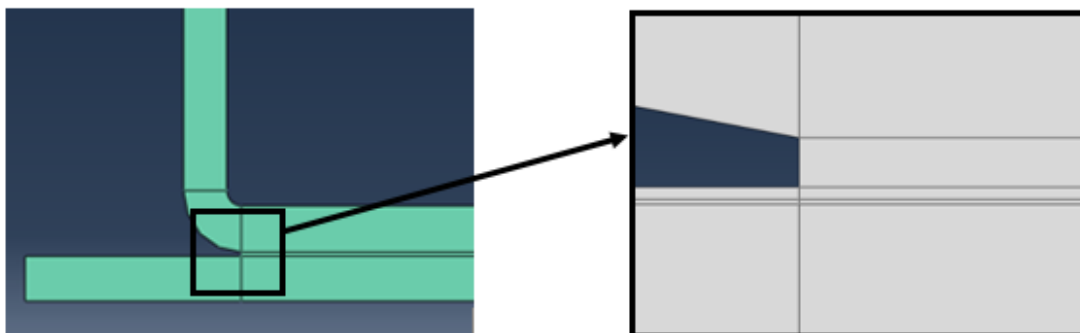


Figura 56 – Modelo numérico com detalhe das partições para construção da malha de MEF.

As propriedades dos adesivos foram obtidas por ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF). Tratam-se de ensaios de fractura para caracterizar a tenacidade à tracção (G_{IC}) e ao corte (G_{IIC}), respectivamente. No caso do ensaio DCB, os provetes são compostos por dois aderentes de comprimento, espessura e largura idênticos. O adesivo é colocado entre os substratos e possui uma determinada espessura, sendo considerado o comprimento de fenda inicial desde a zona onde é aplicada a sollicitação até à extremidade da pré – fenda. O ensaio consiste em sollicitar (abertura) os braços do provete a uma velocidade constante. Durante o ensaio é registada a carga e o deslocamento, sendo também medido o comprimento da fenda em intervalos de tempo pré-estabelecidos [14, 41]. No caso do ensaio ENF, este é frequentemente utilizado para caracterização da fractura da madeira, e é fortemente utilizado e apresentado como o mais adequado para caracterizar a fractura de juntas adesivas sollicitadas ao corte, devido à sua simplicidade. No que diz respeito ao ensaio, o provete com espessura constante é simplesmente apoiado nas suas extremidades e submetido a uma carga aplicada a meio vão a velocidade constante, causando a propagação da fenda em deslizamento. Durante o ensaio é registada a carga e o comprimento da fenda em intervalos de tempo constantes. Este ensaio pode-se deparar com propagação instável da fenda [14, 42].

A Figura 57 representa esquematicamente os dois ensaios descritos, DCB e ENF, respectivamente.

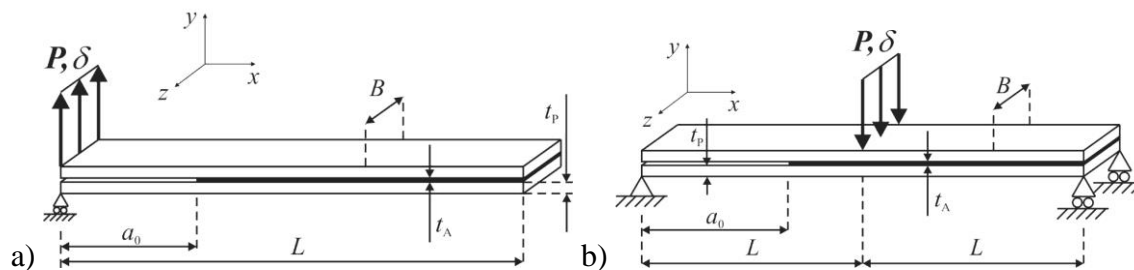


Figura 57 – Geometria do ensaio a) DCB e b) ENF.

As propriedades intralaminares do CFRP (Tabela 6) foram obtidas previamente [11, 14, 41].

Tabela 6 – Propriedades intralaminares do CFRP [11].

Propriedades	CFRP
t_n^0 [MPa]	25
t_s^0 [MPa]	13,5
E [MPa]	10000
G [MPa]	10000
G_{IC} [N/mm]	0,33
G_{IIC} [N/mm]	0,84

A Tabela 7 mostra as propriedades coesivas dos dois tipos de adesivos utilizados, obtidas pelos dados da Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 7 – Propriedades coesivas dos adesivos em estudo.

Propriedades	Adesivo Araldite® AV138	Adesivo Sikaforce® 7752
t_n^0 [MPa]	39,45	11,49
t_s^0 [MPa]	30,2	10,17
E [MPa]	4890	494
G [MPa]	1560	188
G_{IC} [N/mm]	0,20	2,36
G_{IIC} [N/mm]	0,38	5,41

Foram consideradas malhas distintas para a análise de tensões e previsão de resistência pelos modelos de dano coesivo. Para a análise das distribuições de tensões, considerou-se uma malha bastante mais refinada para conseguir capturar os grandes gradientes de tensões ao longo do adesivo. Também foi necessário considerar todos os elementos como sólidos homogêneos, considerando-se as propriedades elásticas do alumínio, do CFRP e do adesivo. Para a malha de previsão de resistência, utilizou-se uma malha menos refinada que a utilizada para a análise de tensões, mas sem comprometer a validade dos resultados obtidos. As malhas foram construídas através da definição individual do espaçamento dos nós em cada aresta do modelo, com maior refinamento nas zonas mais críticas, ou seja, nas faces dos aderentes mais próximas do adesivo, na zona da curvatura do alumínio e nas extremidades de L_0 . Nos modelos utilizou-se gradação do tamanho dos elementos através da função “bias” do *software*. A gradação simples significa que há um aumento do refinamento apenas num sentido (usada na espessura dos aderentes). No caso da gradação dupla, esta foi utilizada quando se exigia maior refinamento em ambas as extremidades de uma aresta, como foi o caso da camada de adesivo. O tamanho dos elementos coesivos para esta análise de resistência foi de $0,2 \times 0,2 \text{ mm}^2$ para todos os valores de L_0 , variando apenas no número de elementos utilizados na sobreposição. O comportamento da camada adesiva foi modelado por uma camada de elementos coesivos, considerando um modelo de dano coesivo triangular. A Figura 58 mostra em detalhe as principais diferenças de malha para uma análise de tensões e de resistência.

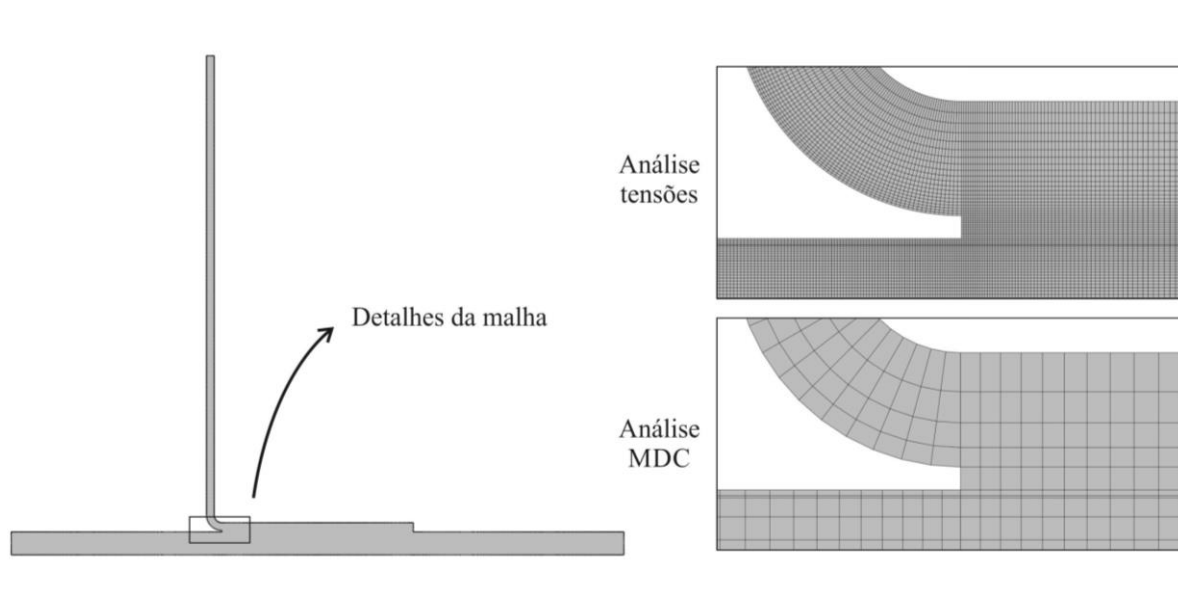


Figura 58 – Detalhe da malha na extremidade do adesivo para uma análise de tensões e de resistência.

Um aspecto de particular importância na construção do modelo numérico é a definição da incrementação. De facto, é necessário definir um tamanho de incremento mínimo suficientemente reduzido para que o *software* não tenha problemas de convergência na zona de propagação do dano. Por outro lado, o limite superior de incrementos que a análise pode conter deve ser suficientemente elevado para que a análise não termine devido a exceder o número de incrementos permitido. Os valores utilizados na incrementação foram os referidos na Tabela 8.

Tabela 8 – Definições de incrementação no *software* ABAQUS®.

Nº de incrementos	10000
Tamanho inicial do incremento	0,005
Tamanho mínimo do incremento	10^{-20}
Tamanho máximo do incremento	0,005

As condições fronteira aplicadas a todos as juntas analisadas consistem na fixação das extremidades do aderente de CFRP, e na restrição horizontal e aplicação de um deslocamento de tracção na extremidade superior do aderente de alumínio.

4.2 Modelo de dano coesivo

Como anteriormente referido, os MDC baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos que ligam nós homólogos dos elementos coesivos, de forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima e subsequentemente degradação das propriedades dos materiais até à rotura [43].

4.2.1 Modelo de dano triangular

A lei de dano triangular, ver Figura 10, assume inicialmente um comportamento linear elástico, seguido de degradação linear. O comportamento elástico é definido por uma matriz constitutiva (**K**) que contém os parâmetros de rigidez, e relaciona as tensões e deformações em tracção e corte ao longo dos elementos coesivos (subscritos n e s, respectivamente).

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

Para camadas finas de adesivo, uma aproximação viável é dada por $K_{nn}=E$, $K_{ss}=G$ e $K_{ns}=0$. A iniciação do dano pode ser especificada por diferentes critérios. Neste trabalho, foi considerado o critério quadrático de tensões que se segue para a iniciação do dano, por já ter sido provada a sua fiabilidade [44], sendo dado por

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

$\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_m^0 na Figura 10), através da equação anterior, a rigidez do material é degradada. A separação completa é prevista por um critério linear energético da forma

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (3)$$

4.2.2 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tracção e corte, é necessário conhecer t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} (Figura 10). No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios em adesivo maciço [7, 44, 45]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias, e propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [46 a 48]. Assim sendo, é necessária a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

Para a determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite[®] AV138 foi utilizado o método descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [37]. Foram utilizados os valores de resistência à tracção e corte através de ensaios em adesivo maciço e ensaio de corte *Thick Adherend Shear Test* (TAST) para a definição de t_n^0 e t_s^0 , respectivamente. Estes valores

foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis. As leis obtidas para tracção e corte foram utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a junta de sobreposição simples com $L_0=20$ mm), e as leis do adesivo foram estimadas de utilizando um método inverso de ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais por variação de G_{IC} e G_{IIC} . Os valores obtidos foram subseqüentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST). Noutro trabalho [11] concluiu-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades dos adesivos. A Tabela 9 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 9 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com $t_A=0,2$ mm.

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

O processo de obtenção de propriedades coesivas para o adesivo Sikaforce® 7752 seguiu um processo distinto. Para a determinação da lei coesiva ao corte, seguiu-se um método inverso, correspondente à determinação do valor de G_{IIC} por ensaio de fractura ENF, seguido de ajuste iterativo manual para a estimativa de t_s^0 [49]. Os valores utilizados neste trabalho são os valores médios de t_s^0 e G_{IIC} obtidos na referência [49], cujo desvio entre provetes foi bastante reduzido, traduzindo a repetibilidade dos ensaios efectuados. Por outro lado, para a lei coesiva em tracção, devido à inexistência, até à data, de procedimento inverso, foi seguido um processo distinto. O valor de G_{IIC} foi obtido por ensaios de fractura DCB [50], nomeadamente o valor médio de uma série de ensaios. O valor de t_n^0 foi aproximado ao valor médio de resistência à tracção de provetes maciços ensaiados no mesmo trabalho [51]. Como foi definido em trabalhos anteriores que, no caso particular da sollicitação à tracção, o valor de t_n^0 não tem influência digna de registo para variações de t_n^0 até 25% do valor obtido por método inverso (variação para os 2 sentidos) [51], não foi considerado relevante neste trabalho a realização do dito procedimento. Os valores de E e G foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST) [39]. A Tabela

10 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada de adesivo Sikaforce® 7752 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 10 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com $t_A = 0,2$ mm.

E [MPa]	493,81	G [MPa]	187,75
t_n^0 [MPa]	11,49	t_s^0 [MPa]	10,17
G_{IC} [N/mm]	2,36	G_{IIC} [N/mm]	5,41

4.3 Análise de tensões na junta

Com a finalidade de obter a distribuição das tensões em diversos planos da junta (em particular na camada de adesivo) e poder-se efectuar uma comparação entre os valores obtidos para as várias configurações de junta, considerou-se o *software* ABAQUS® para extracção das tensões de arrancamento e corte, considerando o mesmo deslocamento aplicado no domínio elástico das juntas. Tal como referido anteriormente, os modelos para a obtenção das distribuições de tensões foram alterados, substituindo os elementos coesivos do adesivo por elementos sólidos, e foi necessário um maior refinamento da malha comparando com os modelos para previsão de dano, para uma maior precisão nos resultados.

Nesta análise é considerado o comprimento normalizado x/L_0 , obtido dividindo a posição da camada de adesivo pelo comprimento total. Assim, $x/L_0=0$ corresponde à extremidade de adesivo próxima do ponto de aplicação da carga e $x/L_0=1$ corresponde à extremidade mais distante.

4.3.1 Estudo das distribuições de tensão em diferentes planos

Neste capítulo apresentam-se as tensões de arrancamento e de corte em 6 planos diferentes da junta adesiva. Os planos considerados são os seguintes (Figura 59): P1 – no CFRP a 0,07 mm da interface adesiva, P2 – no CFRP a 0,05 mm da interface adesiva, P3 – na interface CFRP/adesivo, P4 – no adesivo a metade da espessura, P5 – na interface adesivo/alumínio e P6 - no alumínio a 0,05 mm da interface adesiva.

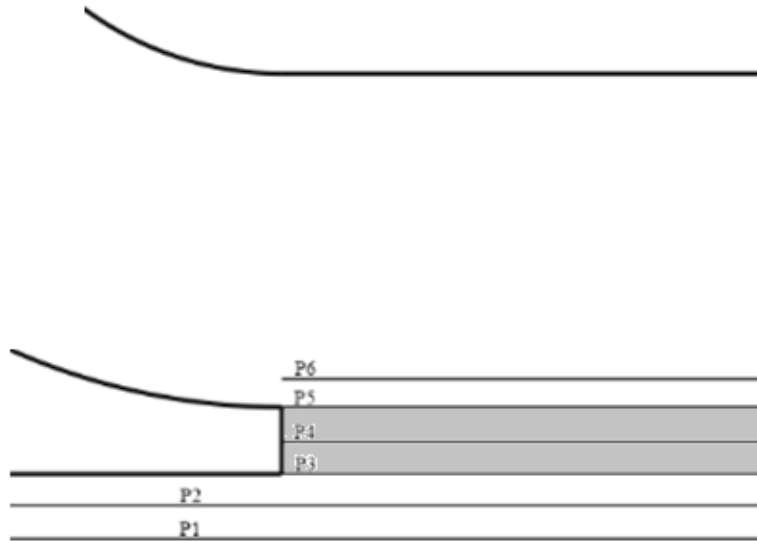


Figura 59 – Planos para estudo das tensões na junta em L .

As figuras seguintes dizem respeito às distribuições de tensões para os diversos planos referidos, considerando apenas a zona entre $-0,1 \leq x/L_0 \leq 0,2$, uma vez que esta é a região de interesse, ou seja, para tensões menores e maiores os valores são insignificantes.

A Figura 60 ilustra as tensões de corte nos locais de estudo para a junta colada com Araldite® AV138, $L_0 = 25$ mm e $t_{P2} = 1$ mm.

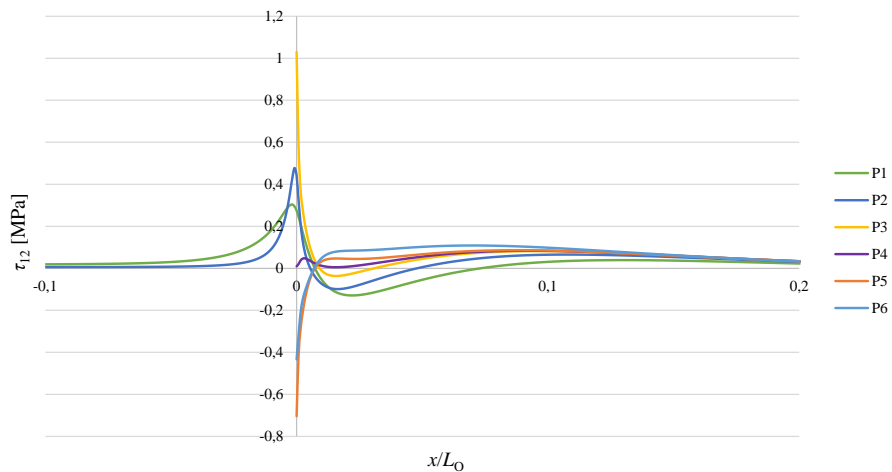


Figura 60 – Tensões de corte em vários planos da junta colada com o Araldite® AV138 e $t_{P2} = 1$ mm.

As tensões de corte são residuais, pois esta é uma geometria tipicamente em arrancamento, e a existência de valores não nulos deve-se a aspectos como pequeno deslizamento em corte provocado pelas condições fronteira e deformação dos aderentes. Como se pode observar, os maiores valores de tensão de corte, ainda que residuais, registam-se na interface entre o adesivo e CFRP. As tensões variam de um valor negativo de cerca de 0,7 MPa até um positivo de cerca de 1,05 MPa. As tensões de corte são ligeiramente menores nos planos P1 e P2. Regra geral, as tensões de corte registam valores não nulos em cerca de 20% de L_0 .

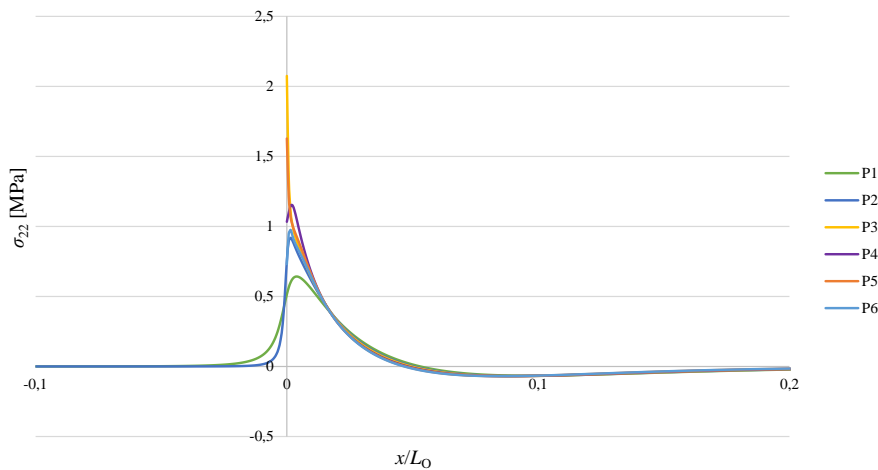


Figura 61 – Tensões de arrancamento em vários planos da junta colada com o Araldite® AV138 e $t_{P2}=1$ mm.

As tensões de arrancamento, apresentadas na Figura 61, mostram um nível de tensões superior no plano P3 referente à interface entre o adesivo e CFRP, devido à singularidade de tensão, seguida do plano P4 (meio do adesivo), enquanto nos outros planos o pico de tensões regista uma magnitude inferior. Como se pode ainda observar, nos planos P1 e P2 (CFRP), estas tensões tornam-se rapidamente nulas fora da região de sobreposição. Por outro lado, as tensões de arrancamento, tal como observado para as tensões de corte (Figura 60), também desaparecem rapidamente no interior de sobreposição, sendo apenas significativas até aproximadamente 15% da sobreposição. Este comportamento decorre do tipo de solicitação, que concentra as tensões de arrancamento numa região muito reduzida na extremidade da camada de adesivo. Esta é uma característica comum das solicitações de arrancamento [33] e ocorre por causa do valor reduzido de t_{P2} . Em termos gerais este é um cenário comum para juntas adesivas [13], que leva à rotura coesiva da camada adesiva, desde que as interfaces entre os aderentes e o adesivo sejam mais resistentes que a resistência coesiva do adesivo, e

desde que a resistência interlaminar e intralaminar do CFRP não seja menor do que a do adesivo.

A análise apresentada foi efectuada para todos os valores de t_{P2} em estudo, tendo-se chegado sempre a conclusões idênticas no que concerne aos planos críticos, embora com valores de pico superiores para valores de t_{P2} mais elevados. Assim sendo, como esperado, e analisando em conjunto a Figura 60 e Figura 61, conclui-se que se trata de uma junta predominantemente de arrancamento, fazendo com que a resistência à tracção e ductilidade dos adesivos sejam os principais factores para a resistência das juntas adesivas [13].

É de seguida efectuada uma análise semelhante para juntas coladas com o Sikaforce® 7752, $L_0=25$ mm e $t_{P2}=1$ mm. A Figura 62 representa as tensões de corte nos planos P1 a P6.

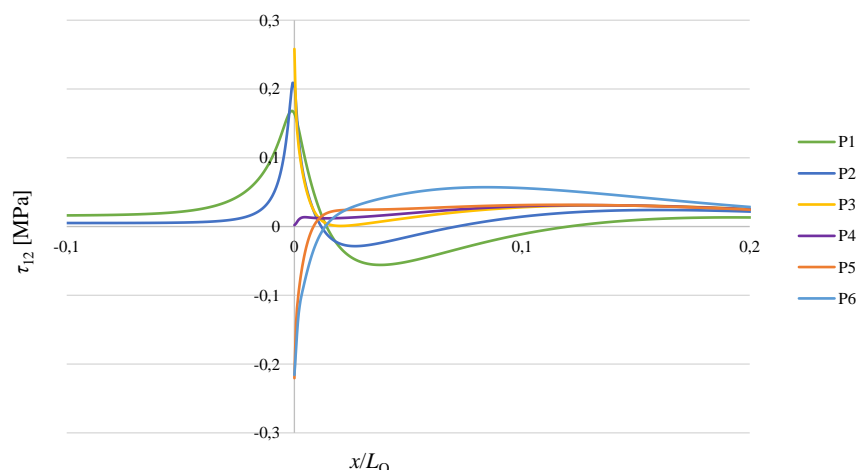


Figura 62 – Tensões de corte em vários planos da junta colada com o Sikaforce® 7752 e $t_{P2}=1$ mm.

Conforme se pode constatar, o pico de tensão de corte mais elevado dá-se no plano P3 (interface entre adesivo e CFRP), seguindo-se os planos P2, P5 e P6, pela ordem mencionada. As tensões de corte são apenas significativas até aproximadamente 20% da sobreposição, sendo meramente residuais relativamente às tensões de arrancamento.

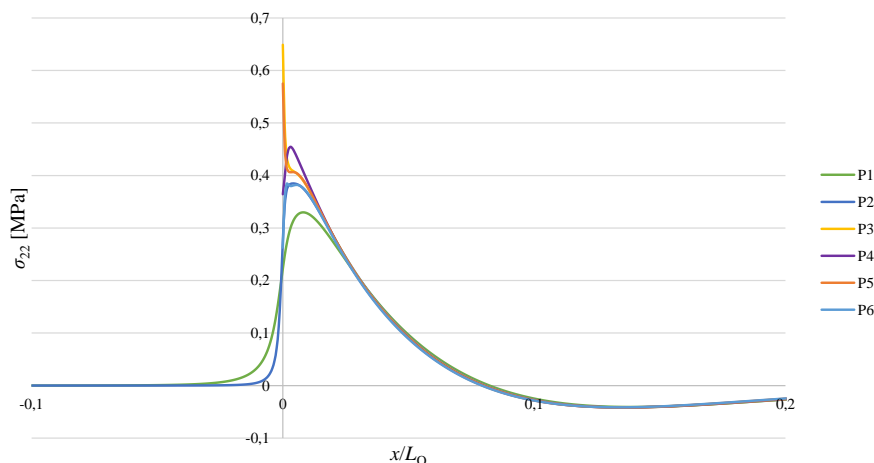


Figura 63 – Tensões de arrancamento em vários planos da junta colada com o Sikaforce® 7752 e $t_{P2}=1$ mm.

Por análise da Figura 63, que apresenta as tensões de arrancamento, concluiu-se que as tensões de arrancamento superiores encontram-se no plano P3 e de seguida no plano P5, enquanto nos outros planos o pico de tensões apresenta magnitude inferior. A partir de aproximadamente 20% da sobreposição todos os valores de tensão são praticamente nulos. Porém, no adesivo Sikaforce® 7752, dado que se trata de um adesivo mais flexível, o pico de tensões estende-se por um comprimento superior em comparação com o Araldite® AV138 (Figura 61). Verifica-se que o adesivo Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7752 possuem tensões de arrancamento e de corte com valores bastante diferentes entre eles, observando-se os valores maiores (tensões de corte e arrancamento) no Araldite® AV138, dada a sua maior rigidez. A queda muito mais gradual das tensões de arrancamento desde $x/L_0=0$ até à zona interior da sobreposição confere em teoria ao Sikaforce® 7752 uma maior resistência comparada à esperada para o Araldite® AV138, que não permite plastificação antes da rotura.

De forma análoga ao Araldite® AV138, esta análise foi efectuada para todos os valores de t_{P2} e os dois respectivos L_0 em estudo, tendo os resultados sido semelhantes, ou seja, mantendo a coerência dos locais onde surgem tensões superiores, apenas com valores de pico maiores com o respectivo aumento de t_{P2} .

4.3.2 Estudo do efeito de L_0

Da Figura 64 à Figura 67 apresenta-se as distribuições de tensões de corte nas juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 com valores de t_{P2} de 1, 2, 3 e 4 mm, respectivamente.

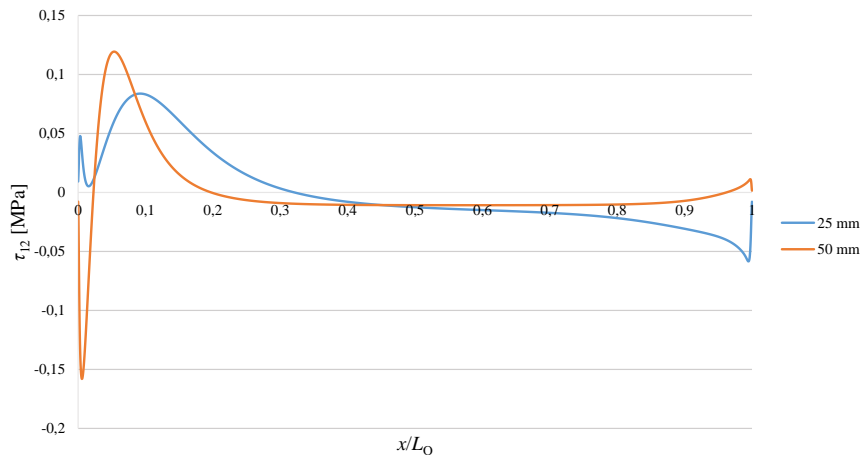


Figura 64 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm).

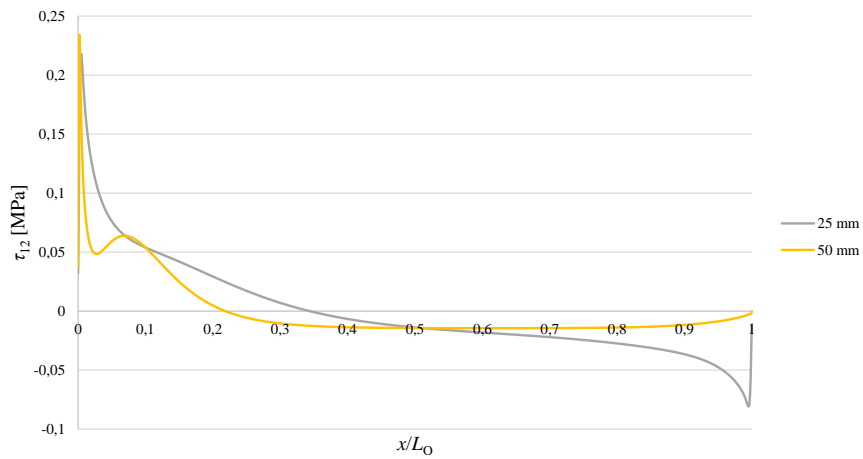


Figura 65 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Araldite® AV138 e $t_{p2}=2$ mm).

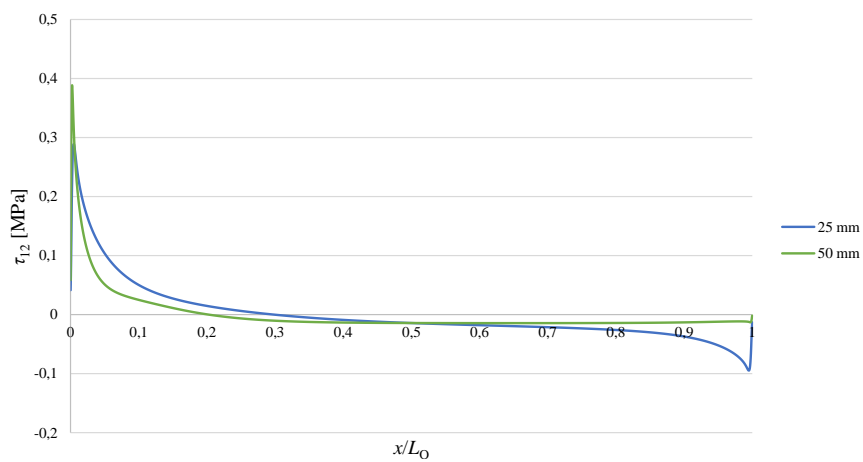


Figura 66 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Araldite® AV138 e $t_{p2}=3$ mm).

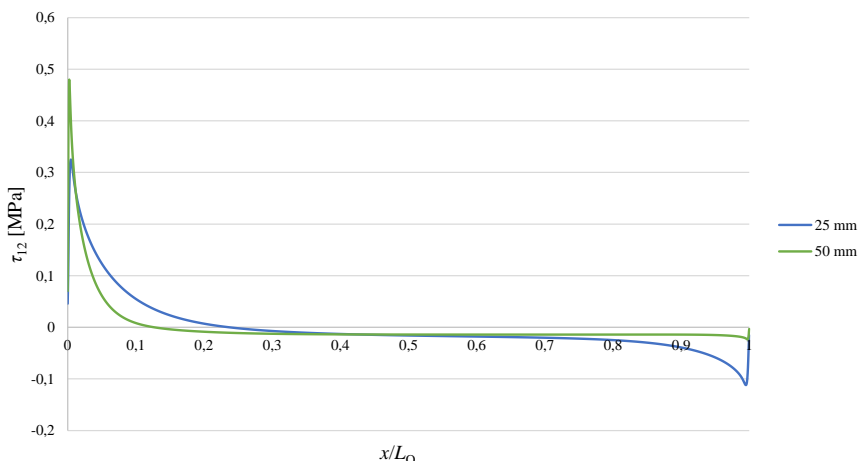


Figura 67 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Araldite® AV138 e $t_{P2}=4$ mm).

Pela análise da Figura 64 à Figura 67, constata-se que as tensões de corte estão concentradas na extremidade do adesivo próxima da zona de solitação ($x/L_0=0$), e que os picos de tensão de corte são superiores para $L_0=50$ mm em comparação com $L_0=25$ mm. Com o aumento de t_{P2} verifica-se ainda que as tensões de corte obtidas para $L_0=25$ e 50 mm tendem a aumentar. Este aumento é superior entre $t_{P2}=2$ e 3 mm, enquanto nos restantes valores de t_{P2} o aumento foi mais reduzido. Para todos os casos em estudo neste subcapítulo, as solitações de corte tendem a atenuar para valores próximos de zero entre $0,1 \leq x/L_0 \leq 0,2$, sendo mais significativos em 20% da sobreposição.

Da Figura 68 à Figura 71 apresentam-se as tensões de arrancamento nas juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 com valores de t_{P2} de 1, 2, 3 e 4 mm, respectivamente.

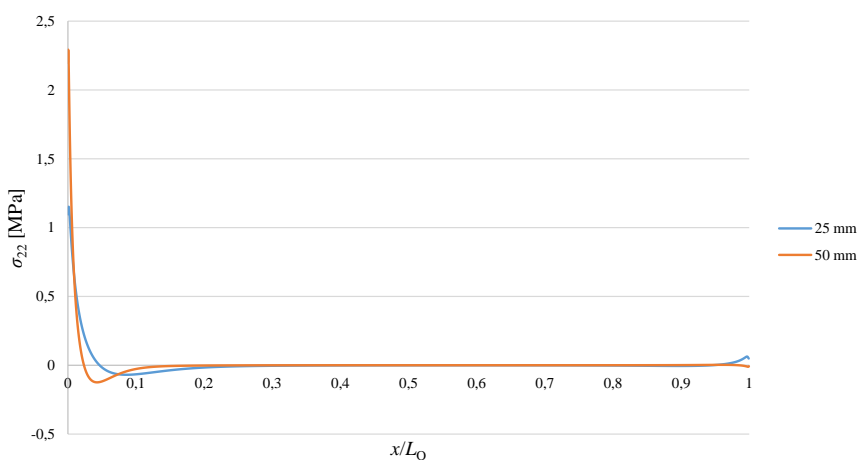


Figura 68 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Araldite® AV138 e $t_{P2}=1$ mm).

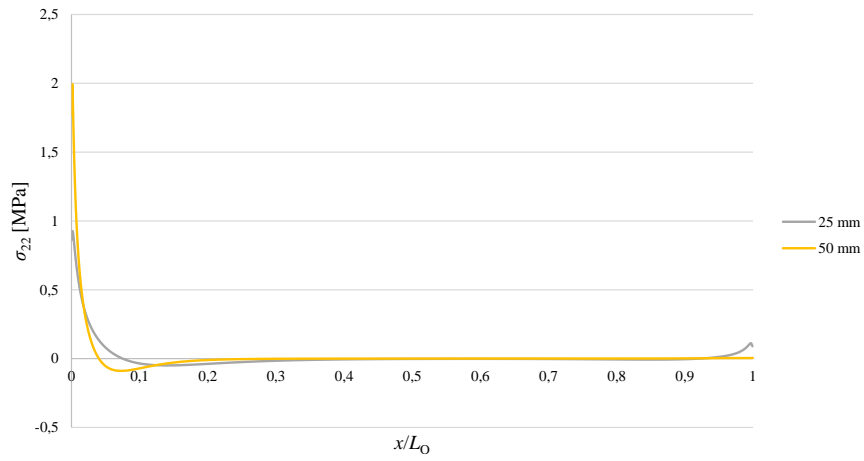


Figura 69 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Araldite[®] AV138 e $t_{p2}=2$ mm).

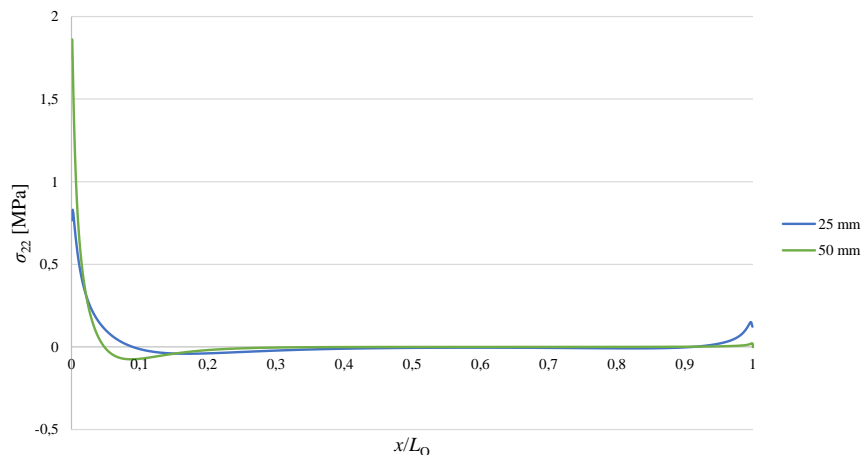


Figura 70 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Araldite[®] AV138 e $t_{p2}=3$ mm).

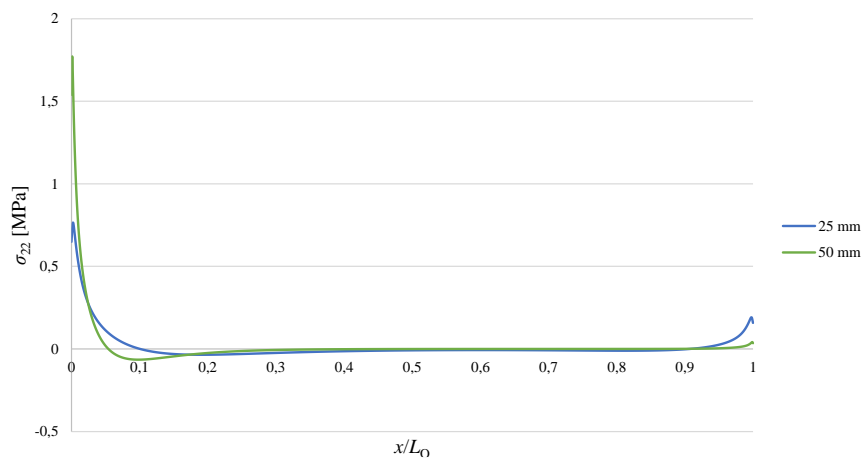


Figura 71 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Araldite[®] AV138 e $t_{p2}=4$ mm).

Por observação da Figura 68 à Figura 71, é possível concluir que, com o aumento de t_{p2} ou mesmo de L_0 , os valores de tensão de arrancamento tendem a diminuir, valores esses apenas significativos até cerca de 10% da sobreposição. Registam-se valores superiores de tensão de arrancamento para $L_0 = 50$ mm relativamente a $L_0 = 25$ mm, sendo os primeiros praticamente o dobro. Apesar das tensões de arrancamento serem superiores para $L_0 = 50$ mm, é provável que a resistência seja maior para esta configuração de junta devido à maior área de sobreposição. Com o aumento de t_{p2} , os valores máximos de tensão de arrancamento diminuem significativamente para ambos os valores de L_0 considerados, sendo sempre maiores para $L_0 = 50$ mm. Globalmente, os resultados obtidos mostram que o aumento de t_{p2} de 3 para 4 mm de espessura não afectou significativamente os valores de tensão de arrancamento tanto como nos restantes t_{p2} , embora seja perceptível que os valores para $t_{p2} = 4$ mm são ligeiramente mais baixos. A diminuição mais significativa deu-se no aumento de t_{p2} de 1 para 2 mm. Na extremidade livre da camada de adesivo ($x/L_0 = 1$), observa-se um pequeno pico trativo de tensões de arrancamento, que é sempre maior para valores de t_{p2} mais baixos e para $L_0 = 25$ mm.

Da Figura 72 à Figura 75 apresentam-se as distribuições de tensões de corte nas juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 com valores de t_{p2} de 1, 2, 3 e 4 mm, respectivamente.

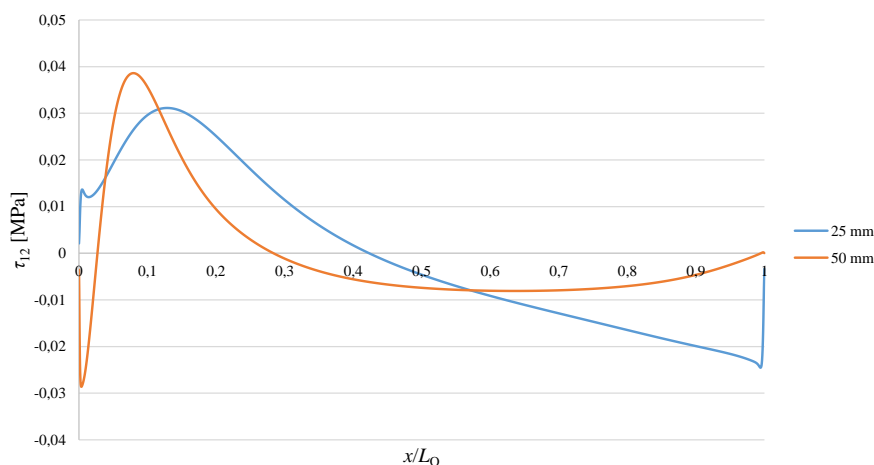


Figura 72 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Sikaforce® 7752 e $t_{p2} = 1$ mm).

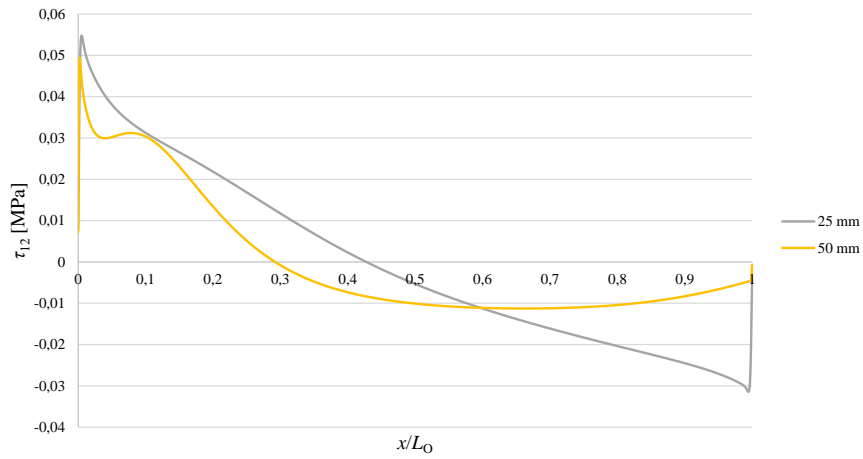


Figura 73 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Sikaforce[®] 7752 e $t_{p2}=2$ mm).

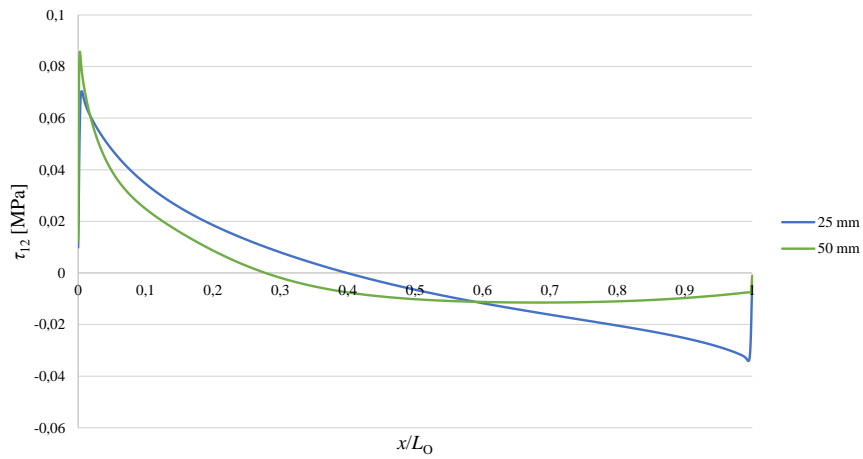


Figura 74 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Sikaforce[®] 7752 e $t_{p2}=3$ mm).

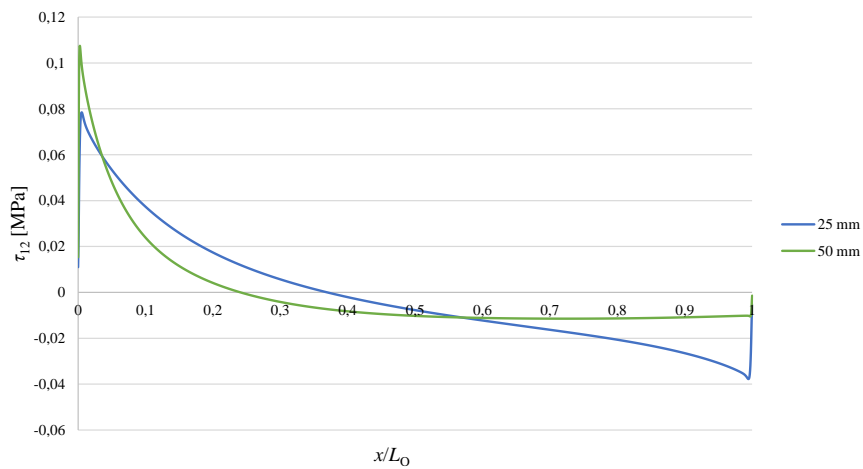


Figura 75 – Efeito da variação de L_0 : tensões de corte no adesivo (Sikaforce[®] 7752 e $t_{p2}=4$ mm).

Pela análise da Figura 72 à Figura 75 constata-se que as tensões de corte estão concentradas na extremidade do adesivo próxima da zona de sollicitação, tal como no adesivo Araldite® AV138, e que os picos de tensão de corte são superiores para $L_0=50$ mm, salvo para a junta com $t_{p2}=2$ mm. Na Figura 73, referente a $t_{p2}=2$ mm, observam-se valores de pico de tensão de corte ligeiramente superiores na junta com $L_0=25$ mm, podendo este facto estar relacionado com o facto de ser uma componente de tensão residual. À excepção da proximidade de $x/L_0=0$, regra geral as juntas com $L_0=25$ mm apresentam um valor mais elevado de tensão de corte. Com o aumento de t_{p2} , verifica-se ainda que as tensões de corte obtidas para $L_0=25$ e 50 mm tendem a aumentar, registando-se o maior aumento entre $t_{p2}=2$ e 3 mm para $L_0=50$ mm, e de $t_{p2}=1$ para 2 mm para $L_0=25$ mm, enquanto nos restantes valores de t_{p2} o aumento foi mais reduzido. Para todos os valores de t_{p2} em estudo, as tensões de corte tendem a ser desprezáveis para $x/L_0 \geq 0,4$ dependendo do valor de L_0 .

Da Figura 76 à Figura 79 apresentam-se as distribuições de tensões de arrancamento nas juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 com valores de t_{p2} de 1, 2, 3 e 4 mm, respectivamente.

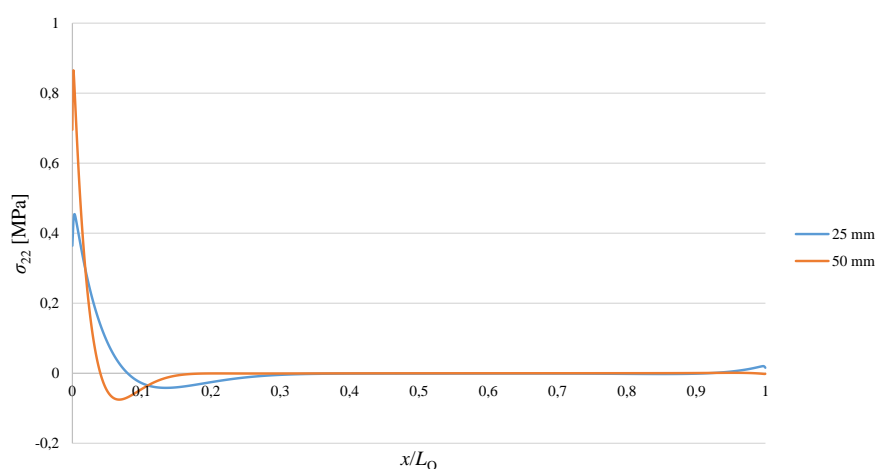


Figura 76 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=1$ mm).

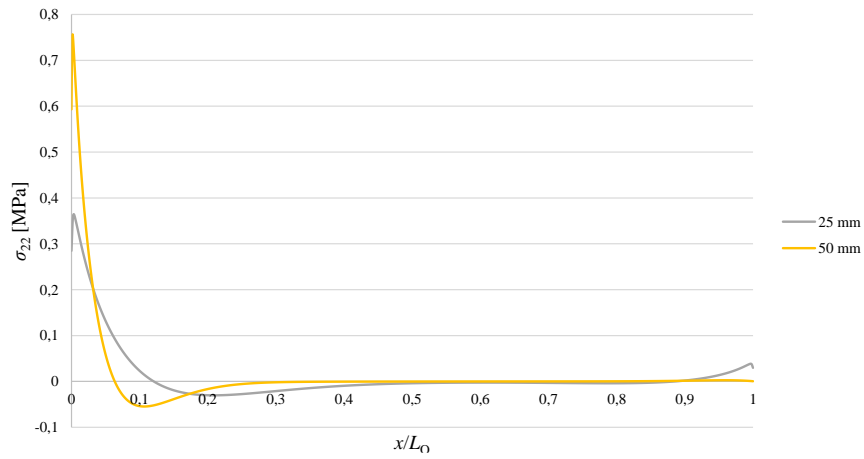


Figura 77 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Sikaforce[®] 7752 e $t_{p2}=2$ mm).

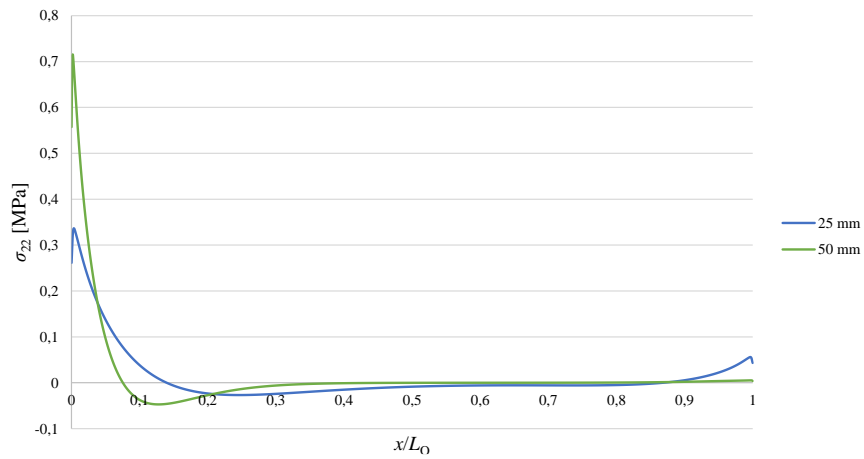


Figura 78 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Sikaforce[®] 7752 e $t_{p2}=3$ mm).

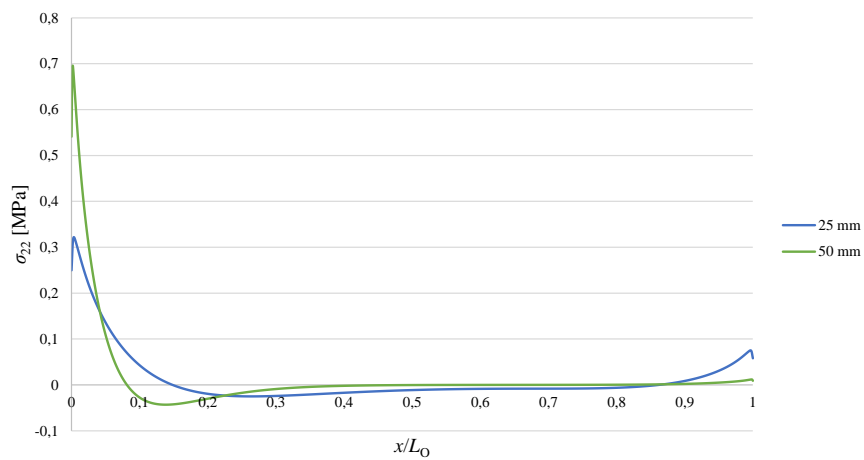


Figura 79 – Efeito da variação de L_0 : tensões de arrancamento no adesivo (Sikaforce[®] 7752 e $t_{p2}=4$ mm).

Como se pode observar desde a Figura 76 à Figura 79, os picos de tensões de arrancamento são superiores para $L_0=50$ mm comparativamente a $L_0=25$ mm. De facto, este valor é praticamente o dobro do valor registado para $L_0=25$ mm. Como já referido anteriormente, as tensões de arrancamento apresentam picos significativos próximos de $x/L_0=0$, ou seja, na extremidade adjacente à solitação aplicada, valores esses apenas significativos até cerca de 20% da sobreposição. Tanto para $L_0=25$ e 50 mm dá-se uma queda mais gradual das tensões de arrancamento desde $x/L_0=0$ até à zona interior da sobreposição, em comparação com o Araldite® AV138. Esta diferença é benéfica para a resistência da junta. Com o aumento de t_{P2} , os valores máximos de tensão de arrancamento diminuem significativamente para ambos os valores de L_0 , apresentando sempre valores maiores para $L_0=50$ mm. Os resultados obtidos mostram que, com o aumento de t_{P2} , os valores de pico de tensão diminuem de forma gradual, registando-se a maior redução entre 1 e 2 mm. Esta diminuição deve ser responsável pelo aumento de P_m com t_{P2} . Na extremidade livre da camada de adesivo ($x/L_0=1$) e $L_0=25$ mm, observa-se um pequeno pico trativo de tensões de arrancamento, sempre maior para valores de t_{P2} mais baixos.

4.3.3 Estudo do efeito de t_{P2}

A Figura 80 e Figura 81 mostram as distribuições de tensões de corte para as juntas coladas com o Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 com $L_0=25$ mm e valores de t_{P2} entre 1 e 4 mm.

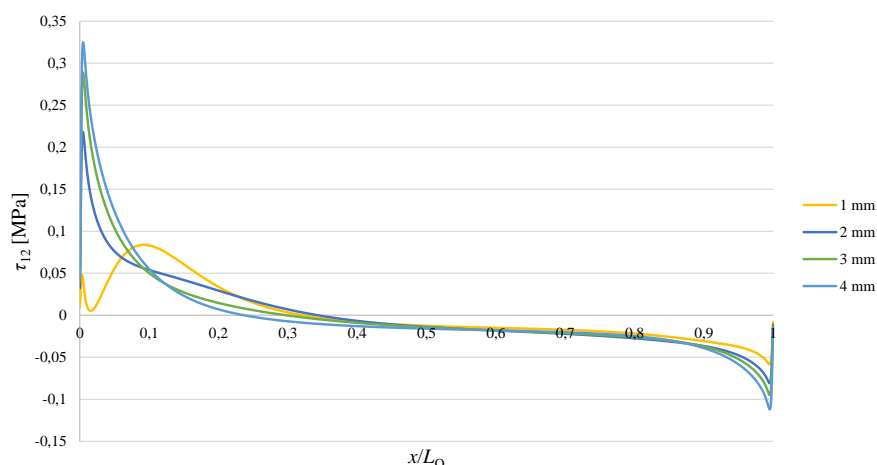


Figura 80 – Efeito da variação de t_{P2} : tensões de corte no adesivo (Araldite® AV138 e $L_0=25$ mm).

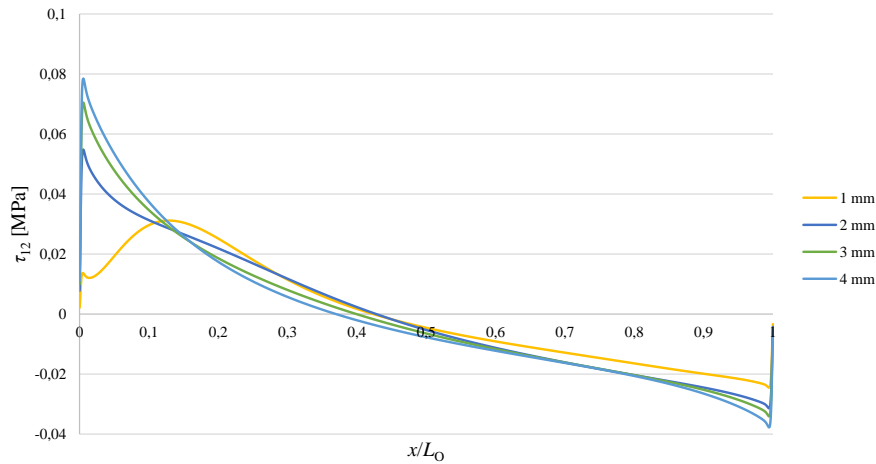


Figura 81 – Efeito da variação de t_{p2} : tensões de corte no adesivo (Sikaforce[®] 7752 e $L_0=25$ mm).

Observando a Figura 80 e Figura 81 pode-se constatar que o adesivo Araldite[®] AV138 apresenta valores de tensão de corte mais elevados para $x/L_0=0$ (extremidade solicitada) comparativamente ao adesivo Sikaforce[®] 7752. É possível concluir em ambos os casos que o aumento de t_{p2} aumenta as tensões de corte. A variação das tensões de corte é mais gradual para o adesivo Sikaforce[®] 7752, desde $x/L_0=0$ até uma zona mais interior da sobreposição ($x/L_0 \approx 0,45$). As tensões de corte, tal como já referido anteriormente, são residuais. Porém, registam-se maiores valores destas nas juntas coladas com o adesivo Araldite[®] AV138 dada a sua rigidez mais elevada. A Figura 81 e Figura 82 correspondem a uma análise semelhante à anterior, embora considerando $L_0=50$ mm.

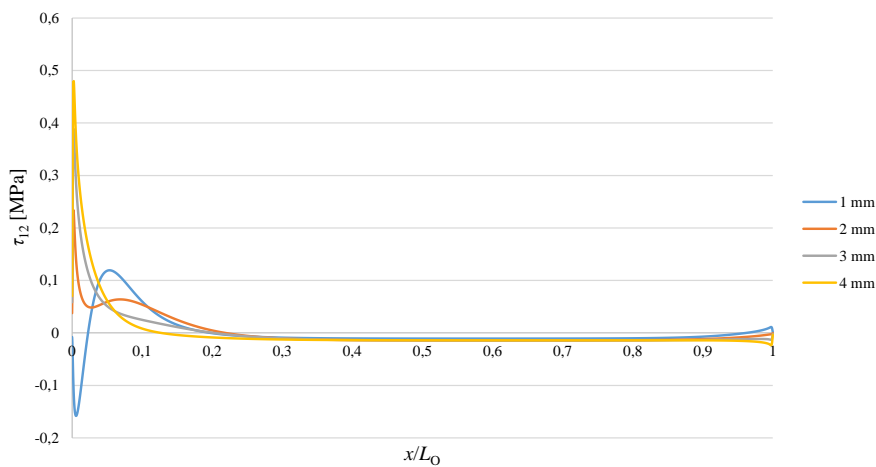


Figura 82 – Efeito da variação de t_{p2} : tensões de corte no adesivo (Araldite[®] AV138 e $L_0=50$ mm).

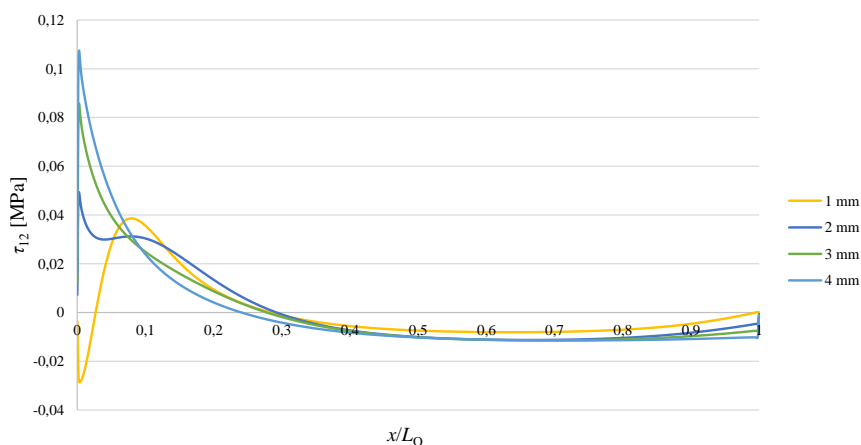


Figura 83 – Efeito da variação de t_{p2} : tensões de corte no adesivo (Sikaforce[®] 7752 e $L_0=50$ mm).

O adesivo Araldite[®] AV138 possui um pico de tensão de corte superior para todos os valores de t_{p2} , comparativamente ao Sikaforce[®] 7752. Tal como para $L_0=25$ mm, para $L_0=50$ mm também se regista uma queda mais gradual das tensões de corte para o Sikaforce[®] 7752 em comparação com o Araldite[®] AV138, desde $x/L_0=0$ até $x/L_0=0,3$. Conclui-se assim que o Sikaforce[®] 7752 apresenta um melhor comportamento face às tensões de corte. Este facto deve-se ao valor de E ser 10 vezes inferior ao do Araldite[®] AV138. Também se verifica que o aumento do L_0 implica um incremento significativo nas tensões de corte. Em ambos os casos regista-se um aumento de tensões de corte com o aumento de t_{p2} .

De seguida apresenta-se o estudo das distribuições de tensão de arrancamento, considerando diferentes valores de t_{p2} (1, 2, 3 e 4 mm) e L_0 (25 e 50 mm).

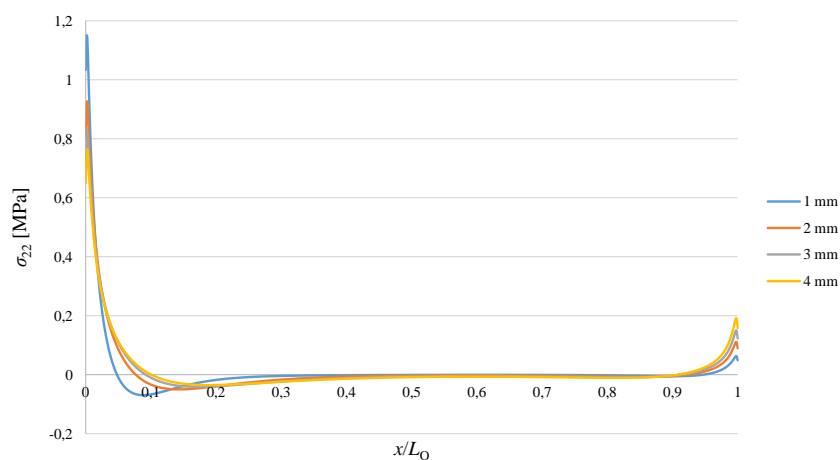


Figura 84 – Efeito da variação de t_{p2} : tensões de arrancamento no adesivo (Araldite[®] AV138 e $L_0=25$ mm).

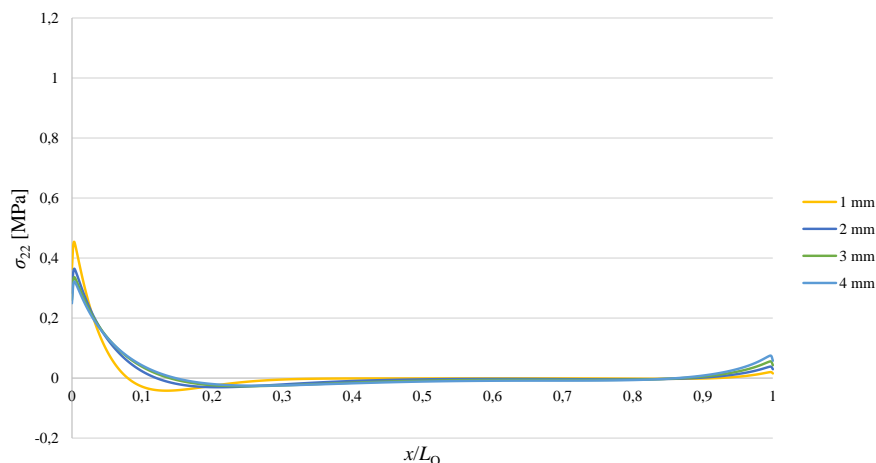


Figura 85 – Efeito da variação de t_{p2} : tensões de arrancamento no adesivo (Sikaforce[®] 7752 e $L_0=25$ mm).

Observando a Figura 84 e Figura 85, pode-se constatar que o adesivo Araldite[®] AV138 e o Sikaforce[®] 7752 possuem tensões de arrancamento com valores muito distintos, sendo superiores no Araldite[®] AV138 dada a maior rigidez deste adesivo. Para o Sikaforce[®] 7752, dá-se uma queda muito mais gradual das tensões de arrancamento desde $x/L_0=0$ até à zona interior da sobreposição, o que é altamente benéfico para a resistência da junta. Por causa da maior ductilidade do Sikaforce[®] 7752, o Araldite[®] AV138 deve ter uma resistência muito menor neste tipo de configuração de junta. Com um aumento de t_{p2} , as tensões de pico diminuem gradualmente devido a uma maior rigidez do aderente de alumínio correspondente à mudança no tipo de carga, com tendência para se aproximar da clivagem. Devido a esta mudança, os gradientes de tensão ao longo da camada de adesivo diminuem e, com o aumento de t_{p2} , estas diferenças são mais visíveis para o adesivo frágil do que para o adesivo dúctil. Estas variações devem estar relacionadas com uma melhoria de resistência das juntas com o aumento de t_{p2} . A Figura 86 e Figura 87 ilustram um estudo semelhante ao anteriormente apresentado, agora considerando $L_0=50$ mm.

Pela análise da Figura 86 e Figura 87, é observável que os resultados obtidos vão de encontro aos obtidos para $L_0=25$ mm (Figura 84 e Figura 85). De facto, com um aumento de t_{p2} , as tensões de pico diminuem gradualmente, onde a maior descida em ambos os adesivos ocorre entre $t_{p2}=1$ e 2 mm. Também para $L_0=50$ mm foram obtidas tensões de arrancamento superiores no adesivo Araldite[®] AV138. Comparando com $L_0=25$ mm, as tensões de arrancamento aumentam aproximadamente para o dobro para todos os valores de t_{p2} com o respectivo aumento de L_0 nos dois adesivos.

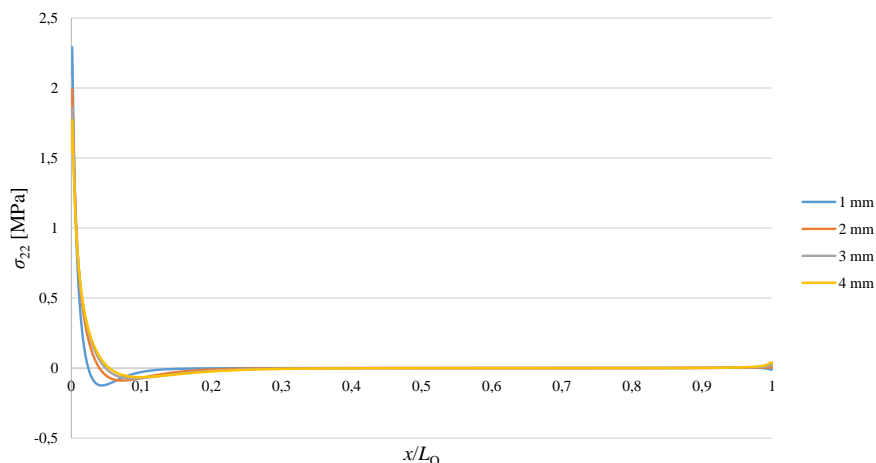


Figura 86 – Efeito da variação de t_{P2} : tensões de arrancamento no adesivo (Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm).

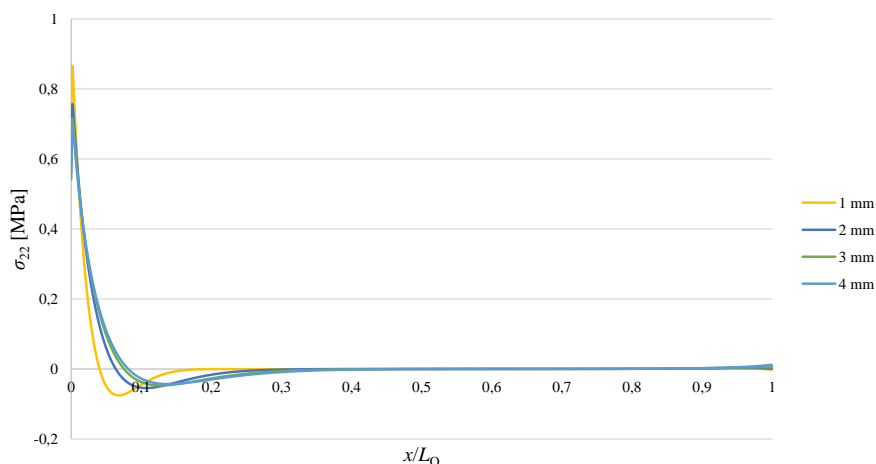


Figura 87 – Efeito da variação de t_{P2} : tensões de arrancamento no adesivo (Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm).

Para o Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm (Figura 87), comparativamente a $L_0=25$ mm (Figura 84), as tensões de arrancamento estão mais concentradas no início da sobreposição ($x/L_0=0$) e são mais significativas até 10% dessa sobreposição. Ainda assim, a variação de tensões de arrancamento (Figura 86 e Figura 87) é ligeiramente mais gradual desde $x/L_0=0$ até à zona interior da sobreposição relativamente à observada para o Araldite® AV138, o que é mais benéfico para a resistência da junta. Espera-se assim uma resistência de junta maior para o Sikaforce® 7752 do que para o Araldite® AV138, uma vez que este último é mais frágil e não permite plastificação antes da rotura.

4.4 Estudo da variável de dano

O presente subcapítulo é relativo à variável de dano dos elementos coesivos (SDEG) nos planos de propagação de dano considerados (adesivo e CFRP). O estudo apresentado tem por objectivo descrever a evolução do dano nos caminhos de rotura em diferentes fases do processo de rotura da junta, para uma melhor compreensão do comportamento das juntas e do efeito da geometria e tipo de adesivo no processo de dano. Um valor de SDEG=0 indica que o elemento coesivo ainda não sofreu degradação e SDEG=1 indica que o elemento coesivo se encontra em degradação máxima, ou seja, após rotura.

4.4.1 Juntas coladas com o Araldite® AV138

A Figura 88 mostra a variável SDEG na camada de adesivo no instante em que P_m é atingido e diferentes valores de t_{P2} , em função de x/L_0 .

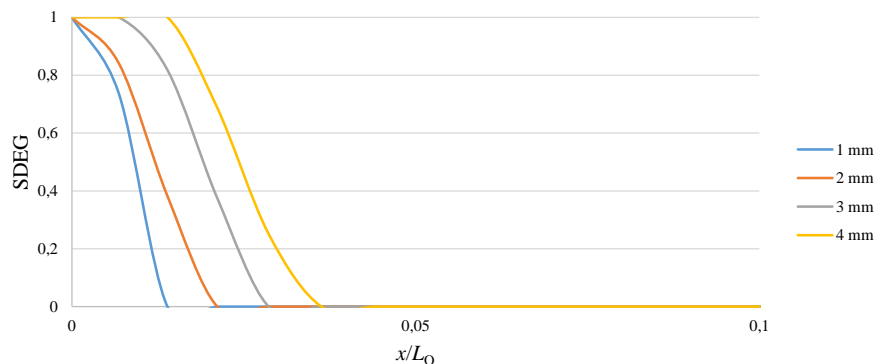


Figura 88 – Evolução da variável de dano SDEG para a junta colada com o Araldite® AV138 e no instante de P_m , com $L_0=25$ mm e diferentes valores de t_{P2} .

Através da Figura 88 pode-se observar que, com o aumento de t_{P2} , a curva de dano correspondente à carga máxima P_m apresenta um comprimento normalizado crescente. No instante de P_m para todos os t_{P2} (1, 2, 3 e 4 mm), a proporção de adesivo danificado é de 1,4; 2,1; 2,8 e 3,6%, respectivamente. O aumento desta quantidade com t_{P2} está relacionado com a respectiva maior rigidez do aderente de alumínio, o que aumenta a área de adesivo em plastificação na altura da rotura. Este é um comportamento coerente com a análise de tensões da Figura 84 e teoricamente deverá ajudar ao aumento da resistência da junta.

A Figura 89 e Figura 90 dizem respeito à junta com $L_0=25$ mm e $t_{p2}=1$ mm. Por visualização da Figura 89 observa-se a rotura numérica será na camada adesiva, o que também se pode extrapolar para os restantes valores de t_{p2} . A Figura 90 representa a distribuição da variável de dano em função do valor de $\delta/\delta_{P_{máx}} \times 100$ [%], em que δ corresponde ao deslocamento actual e $\delta_{P_{máx}}$ o deslocamento correspondente a P_m .

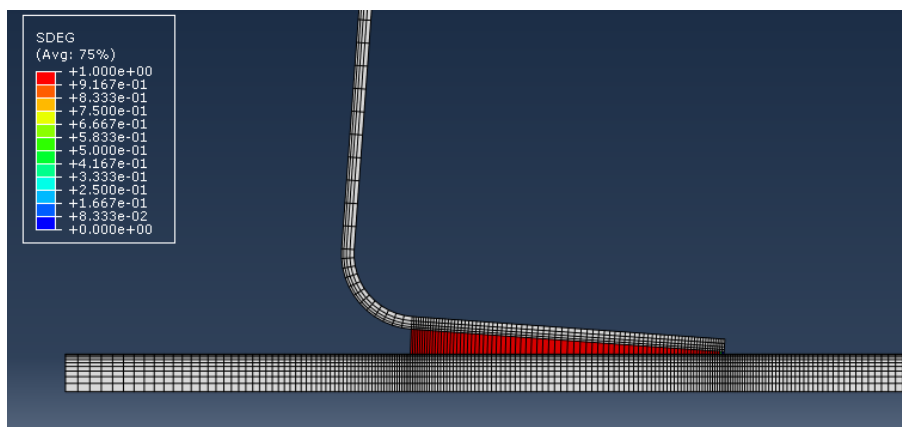


Figura 89 – Processo de rotura da junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=25$ mm e $t_{p2}=1$ mm.

Como se pode verificar por análise da Figura 90, sendo a rotura no adesivo, o dano propaga-se de forma gradual com o carregamento aplicado. A transição de SDEG=0 (ausência de dano) para SDEG=1 (dano total) ocorre numa extensão bastante reduzida para todos os valores de t_{p2} , dando assim lugar a uma zona de dano muito localizada. Este aspecto deve-se ao facto do adesivo Araldite® AV138 ser bastante rígido e frágil, o que resulta numa pequena zona de plastificação do adesivo na extremidade da fenda. Dadas as características frágeis do adesivo em causa, a variável de dano progride de forma rápida e progressiva com o carregamento aplicado, com a devida rotura total a ocorrer após se atingir cerca de 10 vezes o deslocamento necessário para P_m . Como excepção, refere-se a junta com $t_{p2}=4$ mm, em que a rotura ocorre aproximadamente 7 vezes após o deslocamento necessário para atingir P_m . Esta diferença está relacionada com o maior valor de t_{p2} , que reduz a deflexão do aderente de alumínio.

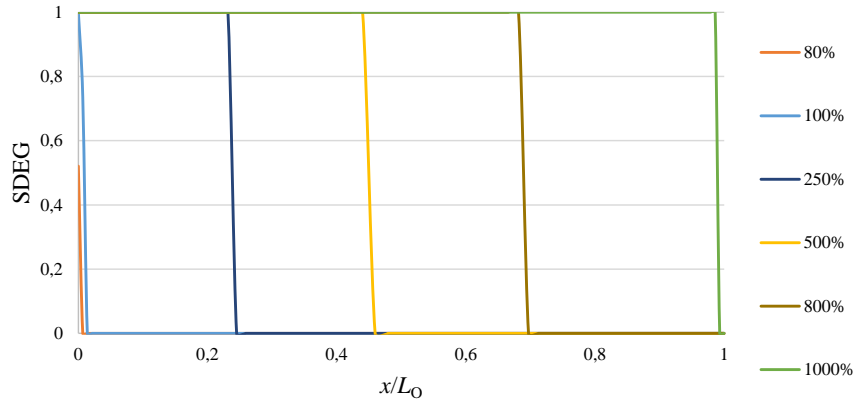


Figura 90 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=25$ mm e $t_{p2}=1$ mm.

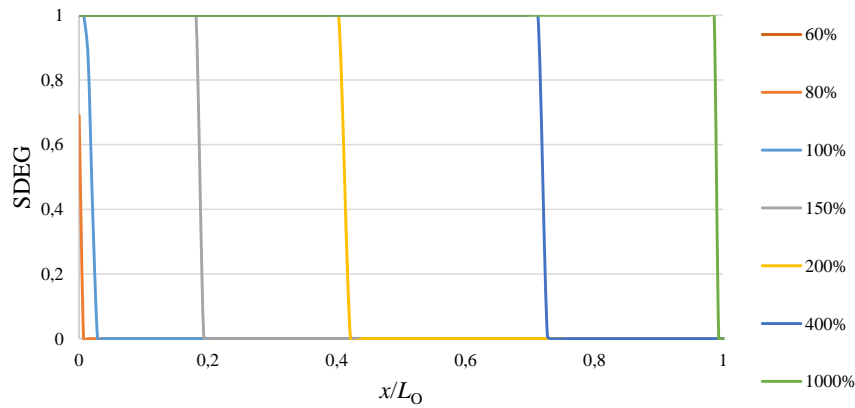


Figura 91 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=25$ mm e $t_{p2}=2$ mm.

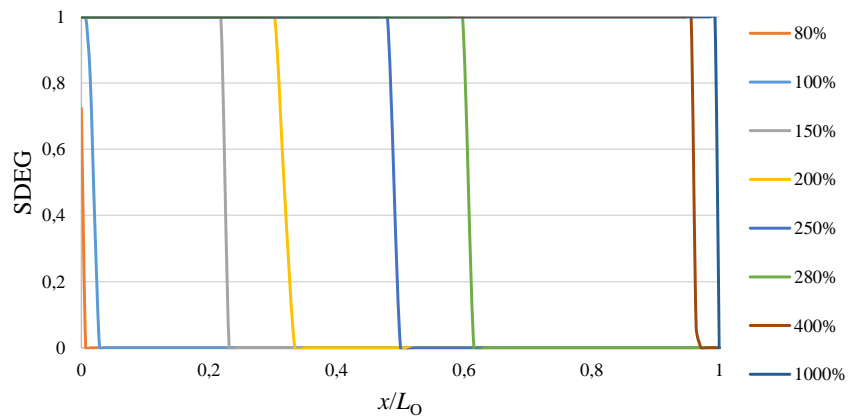


Figura 92 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=25$ mm e $t_{p2}=3$ mm.

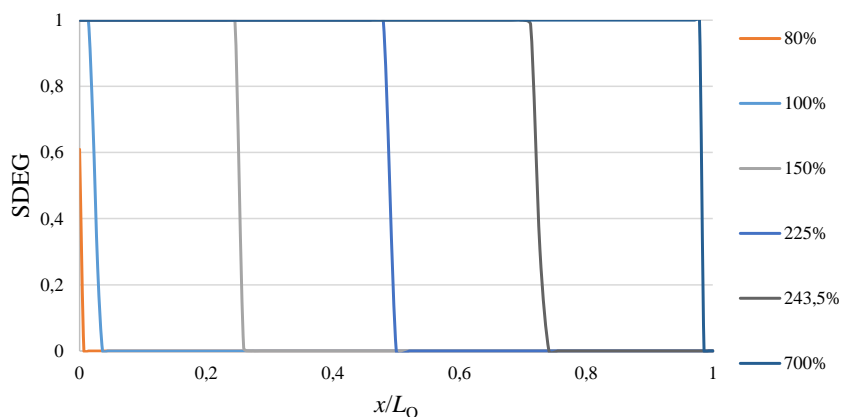


Figura 93 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=25$ mm e $t_{P2}=4$ mm.

Comparando o ocorrido para os 4 valores de t_{P2} (1, 2, 3 e 4 mm), ver Figura 90 a Figura 93, verifica-se que o deslocamento referente a P_m vai aumentando consoante o aumento de t_{P2} , e regista-se um decréscimo de deslocamento necessário para que ocorra a rotura total da camada coesiva. Estes factores evidenciam claramente se tratar de um adesivo frágil e são sustentados pela análise de tensões efectuada na Figura 84, onde se observa que o adesivo Araldite® AV138 possui gradientes de tensões de arrancamento mais elevados que o Sikaforce® 7752. Nas figuras seguintes apresenta-se uma análise semelhante, embora com $L_0=50$ mm.

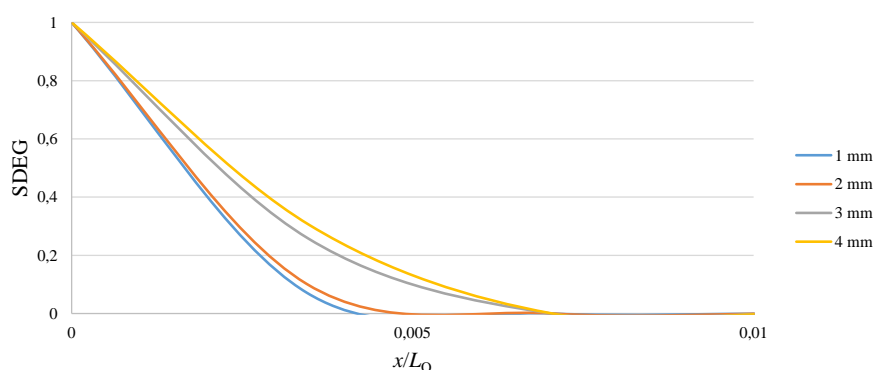


Figura 94 – Evolução da variável de dano SDEG para a junta colada com Araldite® AV138 e no instante de P_m , $L_0=50$ mm e diferentes valores de t_{P2} .

A Figura 94 apresenta a evolução da variável de dano SDEG para a junta colada com o Araldite® AV138 para P_m , $L_0=50$ mm e diferentes valores de t_{P2} . Pode-se observar que, com o aumento de t_{P2} , a porção de dano correspondente à carga máxima P_m aumenta muito

ligeiramente. De facto, no instante de P_m , a proporção de adesivo danificado é de 0,4%, 0,5%, 0,7% e 0,72% para valores crescentes de t_{p2} entre 1 e 4 mm. Este aumento da zona danificada é resultado da maior rigidez do aderente de alumínio, que aumenta a área de adesivo em plastificação na altura da rotura. Por comparação com as curvas anteriormente apresentadas para $L_0=25$ mm, denota-se uma clara diminuição desta zona danificada.

Por visualização da Figura 95 ($t_{p2}=1$ mm) facilmente se conclui que a rotura é coesiva no adesivo, tal como o ocorrido para $L_0=25$ mm. Esta análise foi efectuada para todos valores de t_{p2} e a rotura na camada adesiva não se alterou nem ocorreu plastificação do aderente de alumínio para nenhuma das juntas.

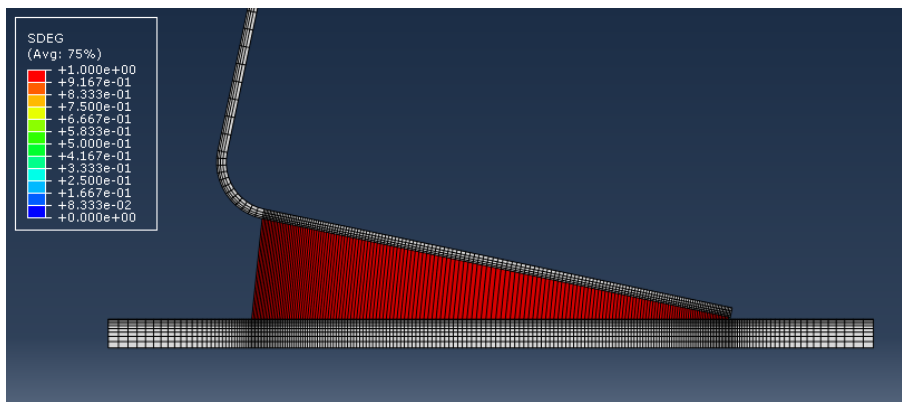


Figura 95 – Processo de rotura da junta colada com Araldite® AV138, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=1$ mm.

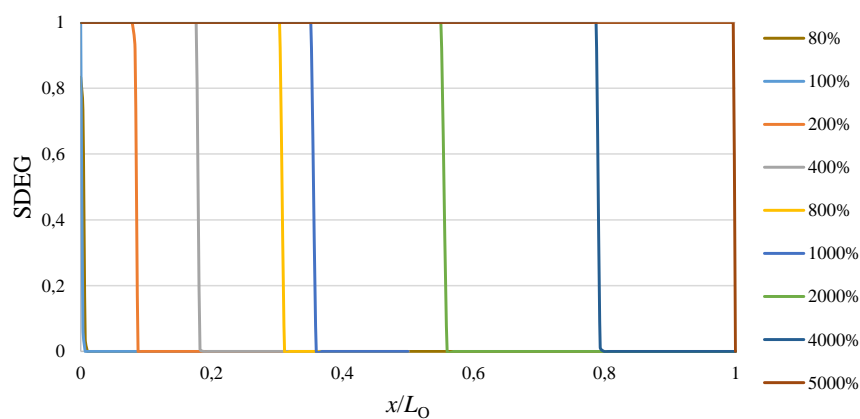


Figura 96 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=1$ mm.

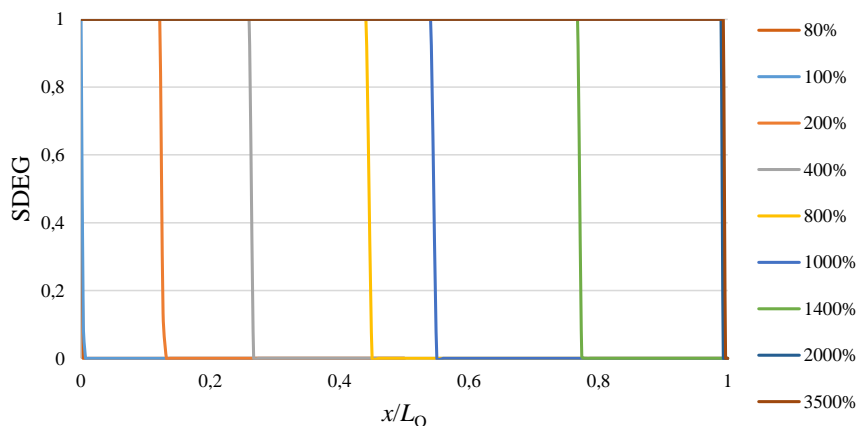


Figura 97 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=2$ mm.

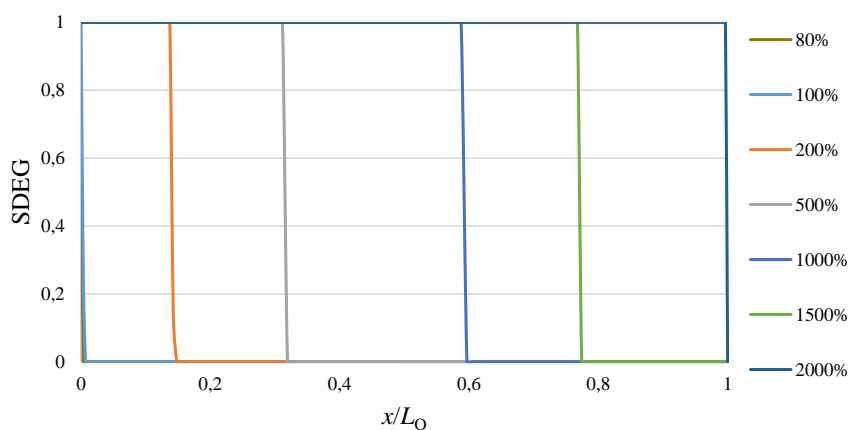


Figura 98 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=3$ mm.

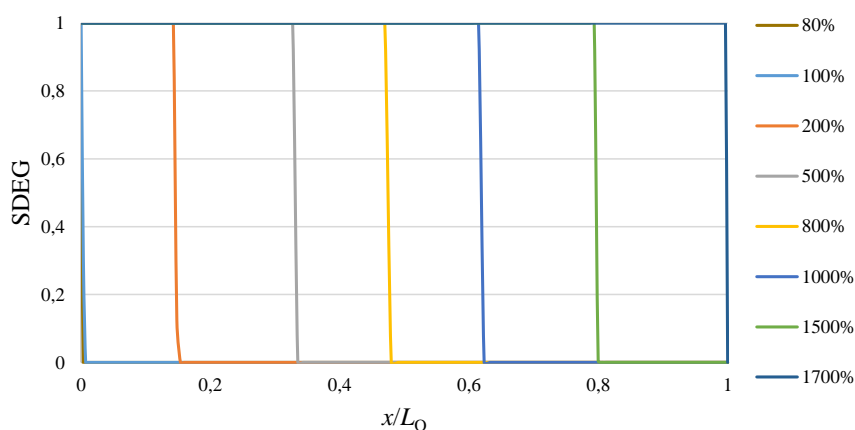


Figura 99 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Araldite® AV138, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=4$ mm.

O processo de análise foi idêntico ao efectuado para o $L_0=25$ mm, e como se pode verificar por análise da Figura 96 à Figura 99, o dano propaga-se de forma gradual à medida que se aplica o carregamento. A transição de uma zona sem dano (SDEG=0) para uma zona que já sofreu rotura (SDEG=1) ocorre numa extensão bastante reduzida para todos os valores de t_{P2} , que, em termos de comprimento normalizado, é ainda inferior à observada para $L_0=25$ mm. Este comportamento é típico de adesivos frágeis e rígidos. Com o aumento de t_{P2} , observa-se que a rotura total ocorre após se atingir 50, 35, 20 e 17 vezes, respectivamente, o deslocamento necessário para P_m . Este comportamento é indicativo de uma alteração do modo de carregamento no sentido deste se aproximar da clivagem. Por estes factores, e pelos motivos também enunciados na análise para $L_0=25$ mm, comprova-se mais uma vez tratar-se de um adesivo frágil.

4.4.2 Juntas coladas com o Sikaforce® 7752

A Figura 100 mostra a evolução da variável de dano das juntas adesivas com o Sikaforce® 7752 para o instante P_m e diferentes valores de t_{P2} , em função de x/L_0 .

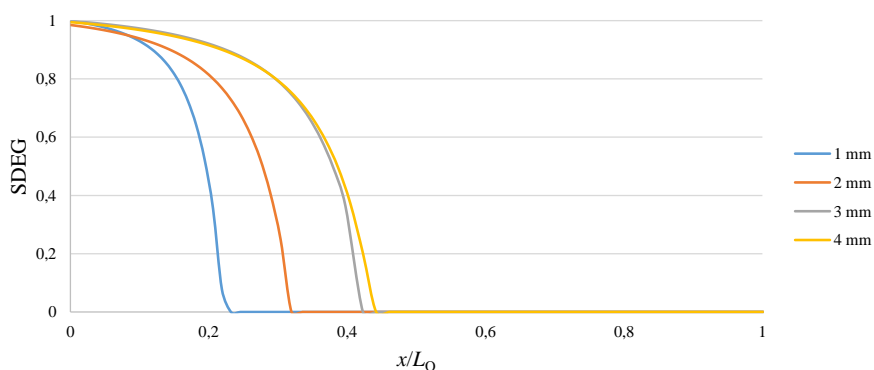


Figura 100 – Evolução da variável de dano SDEG para a junta colada com Sikaforce® 7752 e no instante de P_m , $L_0=25$ mm e diferentes valores de t_{P2} .

Através da Figura 100, relativamente às juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752, é notória desde logo uma diferença significativa em relação ao adesivo Araldite® AV138 na zona de dano (medido entre SDEG=0 e SDEG=1), na medida em que a zona danificada apresenta uma extensão significativamente superior. Este facto deve-se ao adesivo ser mais flexível e aumento de G_{IC} , o que permite a plastificação da camada adesiva antes da rotura, embora a resistência do adesivo à tracção seja menor em comparação com o Araldite®

AV138. Como já foi descrito anteriormente, este tipo de comportamento é mais favorável para o tipo de sollicitação em causa, uma vez que a sollicitação de arrancamento concentra tipicamente as tensões numa porção reduzida da sobreposição. A resistência máxima das juntas é atingida para uma porção maior da camada adesiva, relativamente às juntas coladas com o Araldite® AV138. Esta porção é de cerca de 23,2%, 32,1%, 42,2% e 44,2 % para valores crescentes de t_{P2} entre 1 e 4 mm, não se evidenciando grande diferença no último aumento de t_{P2} . Este tipo de comportamento é indicativo de uma área maior que resiste à sollicitação de arrancamento, o que antecipa uma maior resistência de junta.

Apresenta-se de seguida uma análise semelhante à do capítulo anterior, agora para as juntas coladas com o Sikaforce® 7752, $L_0=25$ mm e os diversos valores de t_{P2} .

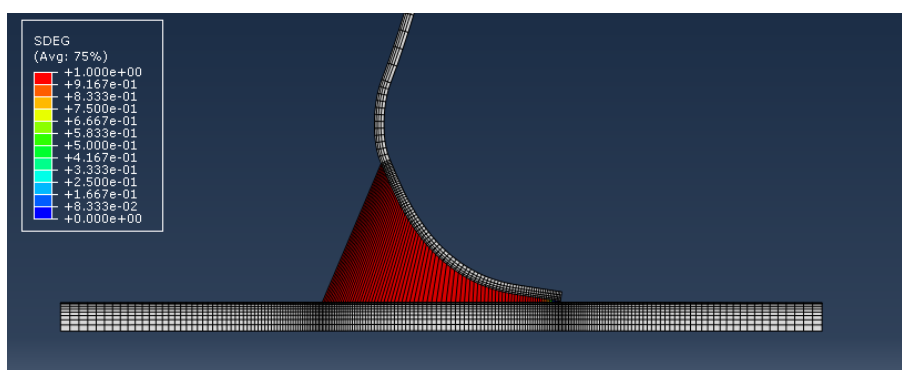


Figura 101 – Processo de rotura da junta colada com o Sikaforce® 7752, $L_0=25$ mm e $t_{P2}=1$ mm.

Por análise da Figura 101 facilmente se conclui que, com a mudança de adesivo a rotura, se mantém na camada adesivo, com a única diferença a residir na plastificação do substrato de alumínio. Procedeu-se à mesma análise para todos os valores de t_{P2} em estudo e observou-se que o processo de rotura foi igual para todos os casos, com exceção da existência ou não de plastificação, assunto este abordado mais à frente.

De seguida apresenta-se a evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pmáx}$ para as juntas coladas com o Sikaforce® 7752 em função de t_{P2} (Figura 102 a Figura 105).

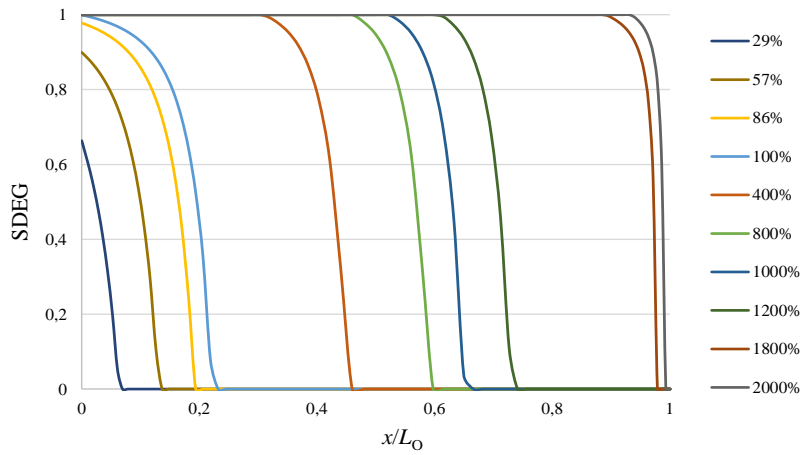


Figura 102 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pmáx}$ para a junta colada com o Sikaforce[®] 7752, $L_0=25$ mm e $t_{P2}=1$ mm.

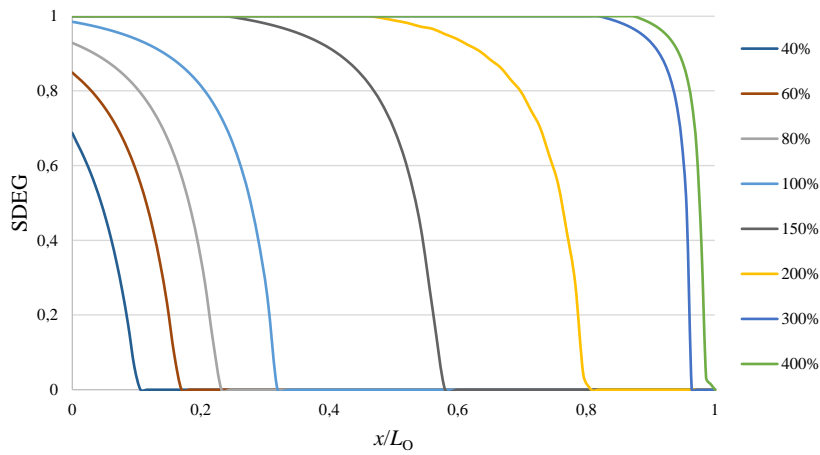


Figura 103 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pmáx}$ para a junta colada com o Sikaforce[®] 7752, $L_0=25$ mm e $t_{P2}=2$ mm.

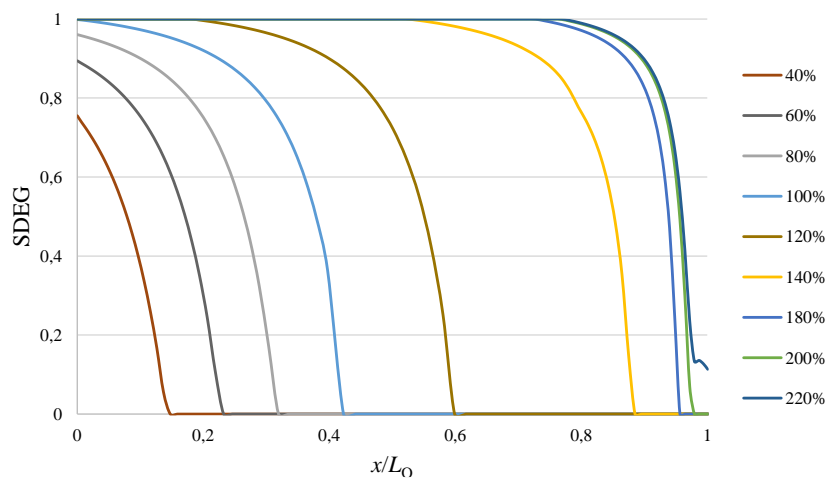


Figura 104 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pmáx}$ para a junta colada com o Sikaforce[®] 7752, $L_0=25$ mm e $t_{P2}=3$ mm.

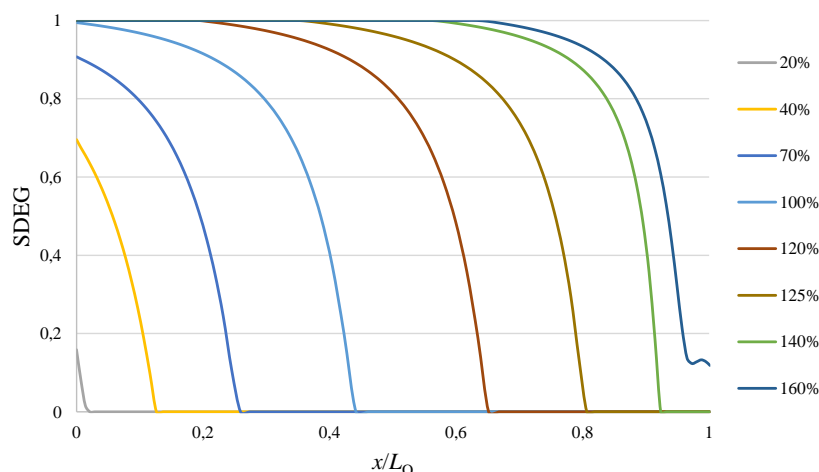


Figura 105 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Sikaforce[®] 7752, $L_0=25$ mm e $t_{P2}=4$ mm.

As curvas de dano ($\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$) mostram uma evolução progressiva de dano, embora com zonas de dano progressivamente mais pequenas à medida que a rotura avança (comprimento da zona de plastificação cada vez mais reduzido com o aumento de $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$), devido ao aumento da deformação permanente da junta. Este efeito diminui com o aumento de t_{P2} e, inclusivamente, para $t_{P2}=4$ mm já não foi observado. Para $t_{P2}=4$ mm, a rotura completa ocorre para um valor de $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ substancialmente inferior do que para as restantes configurações de juntas. Para que ocorra rotura completa da junta, é necessário um deslocamento desde 1,6 vezes superior a $\delta_{Pm\acute{a}x}$ ($t_{P2}=4$ mm) até 20 vezes superior ($t_{P2}=1$ mm). Este comportamento está relacionado com o aumento da capacidade de deformação para valores de t_{P2} superiores, o que faz com que $\delta_{Pm\acute{a}x}$ nestes casos seja superior. Estes resultados indicam claramente tratar-se de um adesivo mais dúctil que permite plastificação dos aderentes antes da rotura. Para além disso, o Sikaforce[®] 7752 apresenta gradientes de tensões de arrancamento mais reduzidos que o Araldite[®] AV138. Para o Sikaforce[®] 7752, tal como já visto, as curvas de tensão de arrancamento são mais graduais desde $x/L_0=0$ até à zona interior da sobreposição, o que é benéfico para a resistência da junta. Por causa da sua maior ductilidade, o Sikaforce[®] 7752 deverá apresentar uma resistência bastante superior ao Araldite[®] AV138 neste tipo de configuração de junta.

A análise que se segue diz respeito ao mesmo adesivo e respectivos valores de t_{P2} em estudo, considerando $L_0 = 50$ mm.

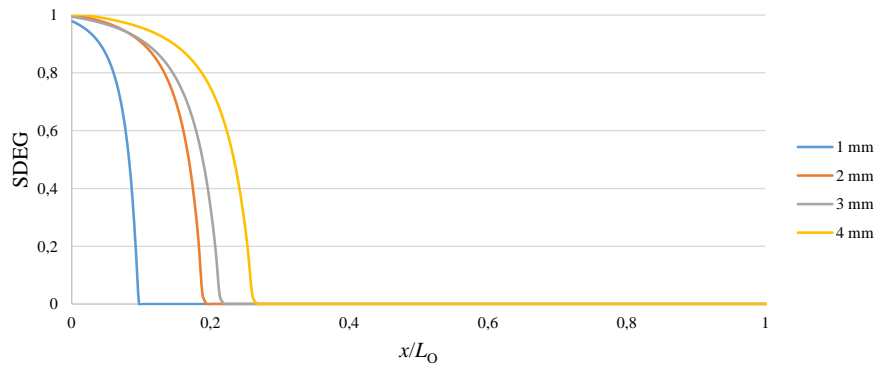


Figura 106 – Evolução da variável de dano SDEG para a junta colada com Sikaforce® 7752 e no instante de P_m , $L_0=50$ mm e diferentes valores de t_{p2} .

Analisando o comportamento das juntas coladas com o adesivo dúctil e $L_0=50$ mm, verifica-se desde logo um comportamento semelhante ao observado para $L_0=25$ mm, ou seja, uma zona de dano que apresenta uma extensão significativamente superior à verificada com as juntas coladas com o Araldite® AV138. Este tipo de comportamento indica que uma área maior resiste à solicitação de arrancamento, antecipando uma consequente maior resistência de junta com este adesivo. Como já foi discutido para as juntas com $L_0=25$ mm, este tipo de comportamento é mais favorável para este tipo de solicitação de arrancamento, uma vez que esta solicitação tipicamente centraliza as tensões numa porção reduzida da sobreposição. Para $L_0=50$ mm também se observa uma zona de dano considerável, embora de forma não tão marcada como para $L_0=25$ mm, o que antecipa um aumento de P_m com L_0 menos significativo. A resistência máxima das juntas é atingida para uma porção da camada adesiva danificada de cerca de 9,7%, 19,4%, 21,9% e 26,5 % para valores crescentes de t_{p2} entre 1 e 4 mm, não se evidenciando grande diferença entre $t_{p2}=2$ e 3 mm.

Para $t_{p2}=1$ mm (Figura 107) e restantes, ocorre uma situação idêntica ao registado para $L_0=25$ mm, com respectiva rotura coesiva da camada do adesivo. Para a junta com $t_{p2}=1$ mm observa-se plastificação de alumínio.

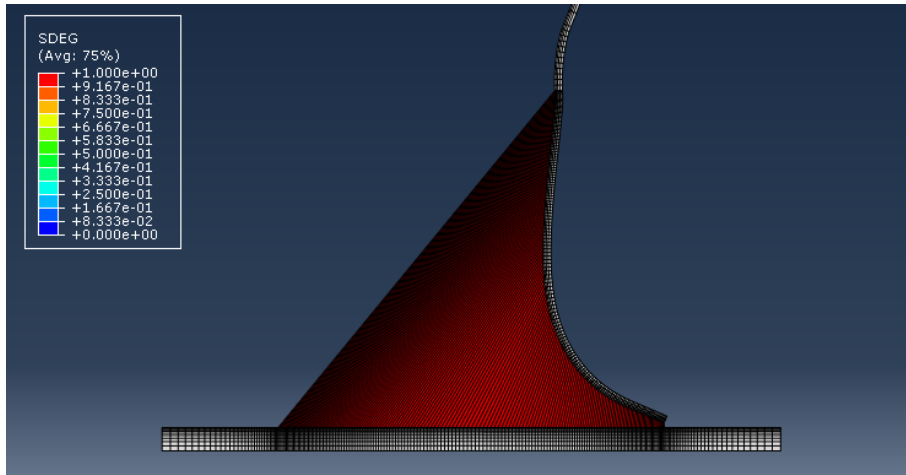


Figura 107 – Processo de rotura da junta colada com o Sikaforce® 7752, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=1$ mm.

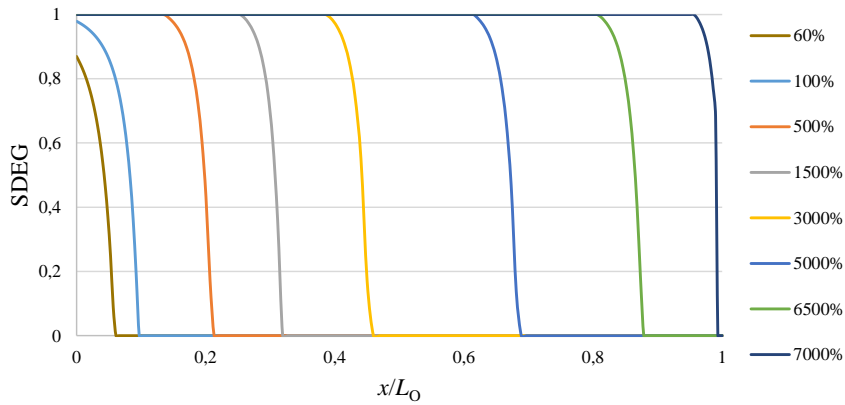


Figura 108 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Sikaforce® 7752, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=1$ mm.

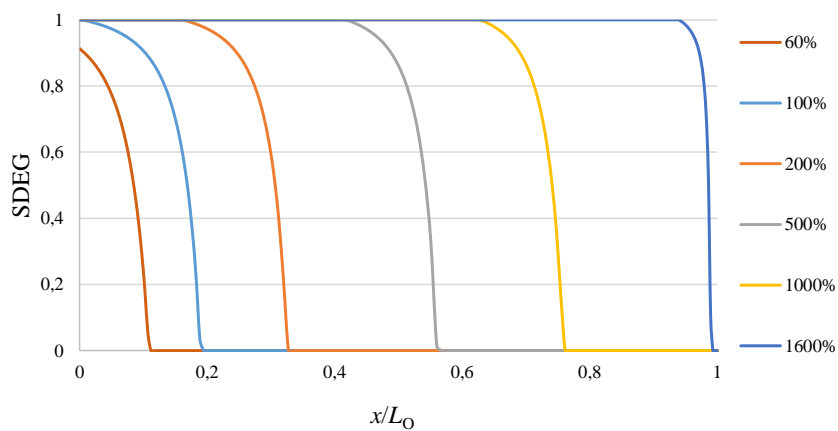


Figura 109 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Sikaforce® 7752, $L_0=50$ mm e $t_{p2}=2$ mm.

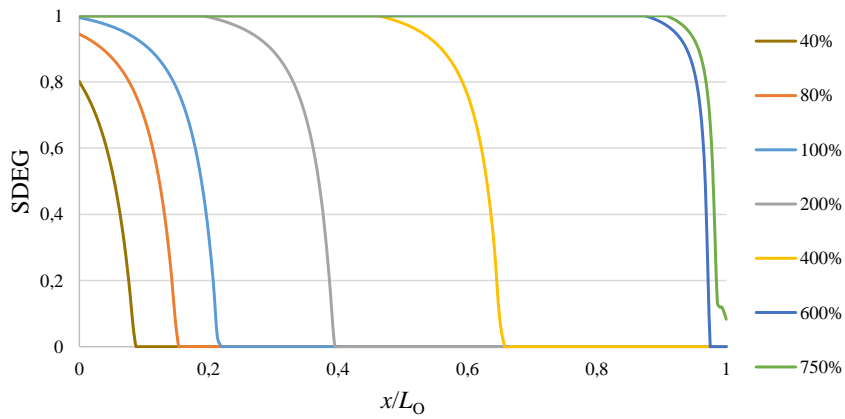


Figura 110 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Sikaforce[®] 7752, $L_0=50$ mm e $t_{P2}=3$ mm.

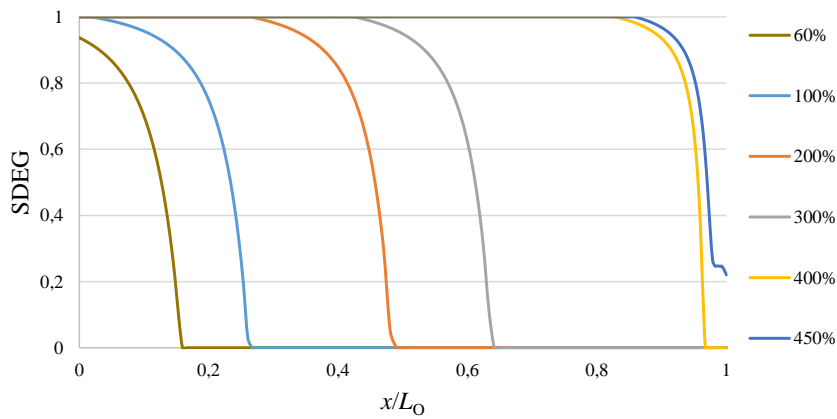


Figura 111 – Evolução da variável de dano SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para a junta colada com o Sikaforce[®] 7752, $L_0=50$ mm e $t_{P2}=4$ mm.

As curvas de dano (Figura 108 a Figura 111) mostram uma evolução progressiva do dano, embora com um comprimento da zona de plastificação cada vez mais reduzido com o aumento de $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$, devido ao aumento da deformação do aderente de alumínio (para todos os valores de t_{P2}). O deslocamento correspondente à rotura total aumenta com L_0 , desde um valor de deslocamento de 70 vezes superior a $\delta_{Pm\acute{a}x}$ ($t_{P2}=1$ mm) até um valor apenas 4,5 vezes superior ($t_{P2}=4$ mm). Em termos gerais, com o aumento de t_{P2} , regista-se um decréscimo de deslocamento necessário para que ocorra a rotura total da camada coesiva e um aumento de L_0 apresenta precisamente o comportamento contrário. Tal como para $L_0=25$ mm, todos estes factores descritos indicam claramente tratar-se de um adesivo dúctil que permite plastificação dos aderentes antes da rotura.

4.5 Modos de rotura

De todas as juntas ensaiadas no *software* ABAQUS®, apenas as configurações de junta coladas com o Sikaforce® 7752, com $t_{P2}=1$ mm e para ambos os valores de L_O estudados (25 e 50 mm) mostraram sinais de plastificação de alumínio. A Figura 112 compara a deformação da junta com $L_O=25$ mm e $t_{P2}=1$ mm durante o ensaio, entre um ensaio experimental e simulação numérica. É unicamente referida esta configuração de junta para exemplificar a plastificação do aderente de alumínio, que pode ser extrapolada também para a configuração de junta com $L_O=50$ mm.

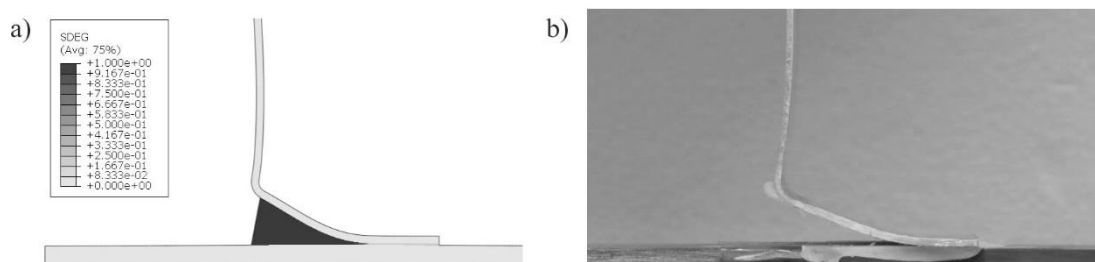


Figura 112 – Evolução de rotura da junta colada com o Sikaforce® 7752, $t_{P2}=1$ mm e $L_O=25$ mm, a) análise numérica, b) análise experimental.

Em relação às roturas numéricas, estas foram coesivas na camada adesiva para todas as configurações de junta e para os dois adesivos em estudo. Esta análise foi comparada com os resultados obtidos nos capítulos 3.2.4.1 e 3.2.4.2 a nível experimental onde, por visualização da Figura 44 e Figura 45 referente ao adesivo Araldite® AV138 e Figura 50 e Figura 51 para o Sikaforce® 7752, se pode observar que não houve discrepância entre os dois tipos de análise.

4.6 Previsão de resistência

O estudo que se segue tem como objectivo avaliar a capacidade dos modelos de dano coesivo em prever a resistência das juntas adesivas estudadas neste trabalho, bem como explicar de forma detalhada os resultados obtidos para os diversos tipos de junta. Neste capítulo apresentam-se inicialmente as curvas $P-\delta$ e resistência numérica das juntas, e comparam-se as diferentes configurações de junta e adesivos de modo a avaliar o seu desempenho numa aplicação prática. Para tal foram consideradas todas as configurações de junta com, t_{P2} (1, 2,

3 e 4 mm) e L_0 (25 e 50 mm), e os dois adesivos em estudo. De seguida é apresentada uma comparação entre o trabalho experimental e o estudo numérico de forma a possibilitar a validação dos modelos numéricos expostos ao longo da presente dissertação.

4.6.1 Juntas coladas com o Araldite® AV138

A Figura 113 e Figura 114 dizem respeito às curvas P - δ numéricas e experimentais para $t_{p2}=1$ e 4 mm, respectivamente.

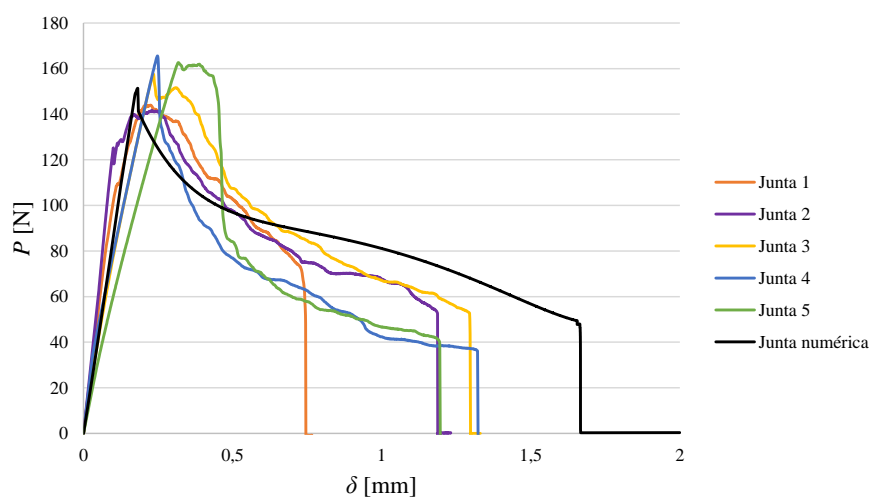


Figura 113 – Curvas P - δ numéricas e experimentais para as juntas coladas com o Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm.

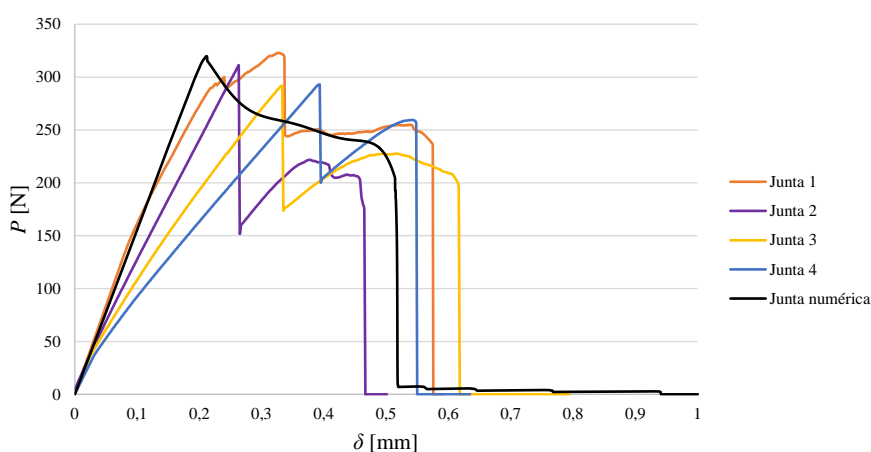


Figura 114 – Curvas P - δ numéricas e experimentais para as juntas coladas com o Araldite® AV138 e $t_{p2}=4$ mm.

Como se pode verificar pela Figura 113, as curvas $P-\delta$ das várias juntas experimentais apresentam uma correlação aceitável com a curva $P-\delta$ numérica no que concerne à resistência máxima e respectivo deslocamento. Em relação ao deslocamento de rotura, este foi ligeiramente superior para a curva numérica. Em relação à Figura 114, relativa às juntas com $t_{p2}=4$ mm, denotam-se mais discrepâncias entre as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas no que respeita à diminuição de P após ser atingido P_m . De facto, após P_m , nas curvas experimentais dá-se uma queda abrupta de P , enquanto na curva numérica essa queda até à rotura é mais gradual. A fragilidade do adesivo é a principal causa para tal acontecimento. As curvas $P-\delta$ apresentam ainda uma correlação aceitável no que toca à resistência máxima e deslocamento de rotura.

A Figura 115 mostra os valores numéricos de P_m para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, em função de t_{p2} , para $L_0=25$ e 50 mm.

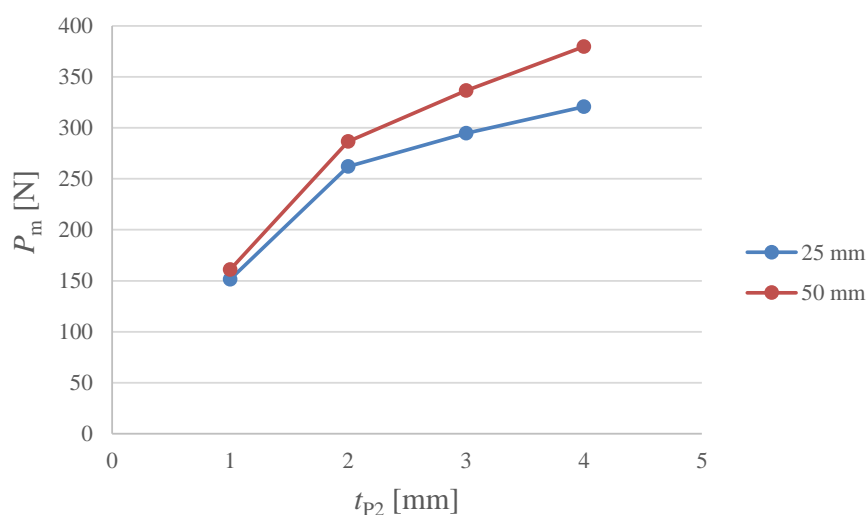


Figura 115 – Valores numéricos de P_m para as juntas coladas com o Araldite® AV138 em função de L_0 .

Como se pode observar pela análise da Figura 115, comparando os valores de P_m das diferentes configurações de junta em L , visualiza-se que, com o incremento de t_{p2} de 1 mm até 4 mm, P_m aumenta consideravelmente. No entanto, este aumento de P_m reduz gradualmente à medida que se aumenta t_{p2} . Será de esperar que, para valores de t_{p2} superiores a 4 mm, se atinja um valor constante de P_m . Em função de L_0 , observa-se também um aumento de P_m . Contudo, este incremento de P_m não é tão significativo como o observado com t_{p2} , pois trata-se de um adesivo frágil que leva à rotura das juntas praticamente sem

plastificação do mesmo, o que faz com que P_m seja fortemente dependente dos picos de tensão de arrancamento. Pela análise de tensões para $L_0=25$ e 50 mm (Figura 68 à Figura 71) pode-se verificar que que entre estas duas configurações de junta as distribuições de tensões de arrancamento para os diversos t_{p2} não sofreram grande variação, o que justifica as pequenas variações de P_m com L_0 . Por outro lado, a variação de P_m com t_{p2} é bastante significativa. Este comportamento é facilmente explicado pelas distribuições de tensões de arrancamento (Figura 84 e Figura 86), que se vão estendendo gradualmente por uma área maior com o incremento de t_{p2} e reduzindo o valor de pico de tensão, o que proporciona um aumento de resistência da junta. Pela análise de dano da Figura 90 ($L_0=25$ mm) e Figura 96 ($L_0=50$ mm), correspondente a $t_{p2}=1$ mm, observa-se que o dano ocorre em ambos os casos numa extensão bastante reduzida. Ainda pela análise de dano (capítulo 4.4.1) para $L_0= 25$ e 50 mm, no momento que se atinge P_m , constata-se a fragilidade do adesivo Araldite® AV138 e a correspondente pouca capacidade de plastificação. Apesar disso, devido à maior rigidez da junta, com o aumento de t_{p2} entre 1 e 4 mm, a porção danificada da camada de adesivo é progressivamente maior, embora reduzida considerando a extensão total de sobreposição, o que reforça assim o comportamento observado. Por outro lado, a rotura total da junta ocorre até 10 vezes o valor de $\delta_{P_{max}}$, embora ainda com valores muito pequenos de δ .

A Figura 116 mostra a comparação entre os valores de P_m obtidos experimentalmente e respectivas previsões numéricas pelo modelo de dano coesivo, considerando $L_0=25$ mm.

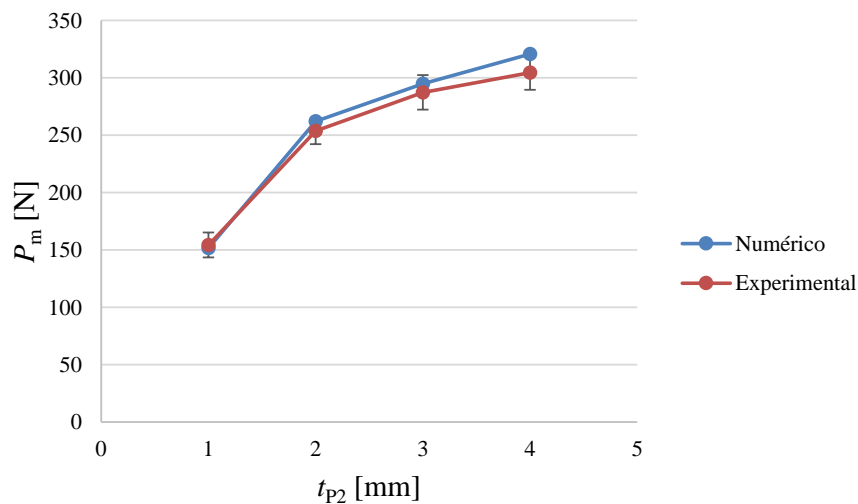


Figura 116 – Valores de P_m experimentais e respectiva previsão numérica para as juntas coladas com o Araldite® AV138 função de t_{p2} .

Os valores de P_m numéricos são ligeiramente superiores aos obtidos experimentalmente, excepto para $t_{P2}=1$ mm, que regista um valor experimental mais elevado em 1,8%. Entre os restantes valores de t_{P2} (2, 3 e 4 mm) os valores de resistência experimentais foram inferiores aos valores numéricos em 3,3%, 2,6% e 5,3%, respectivamente. Em função do reduzido desvio obtido em que a máxima diferença é 5,3%, pode-se confirmar que o método numérico é fiável para previsão de resistência destas juntas.

4.6.2 Juntas coladas com o Sikaforce® 7752

A Figura 117 e Figura 118 dizem respeito às curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais para $t_{P2}=1$ e 4 mm, respectivamente.

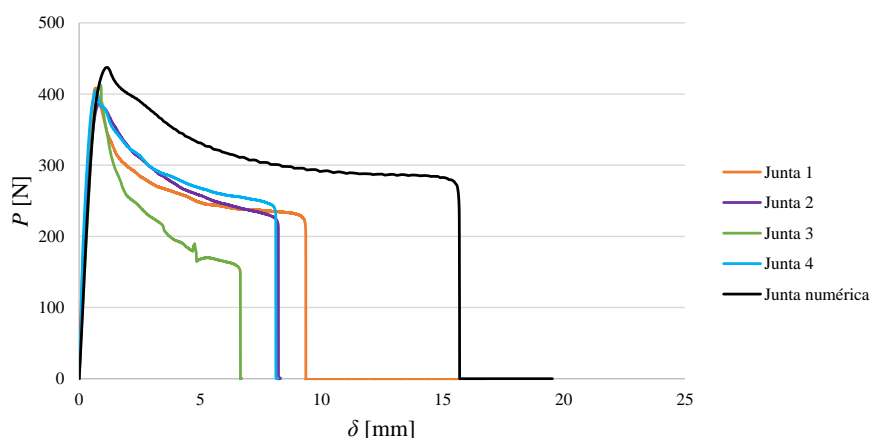


Figura 117 – Curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais para as juntas coladas com o Sikaforce® 7752 e $t_{P2}=1$ mm.

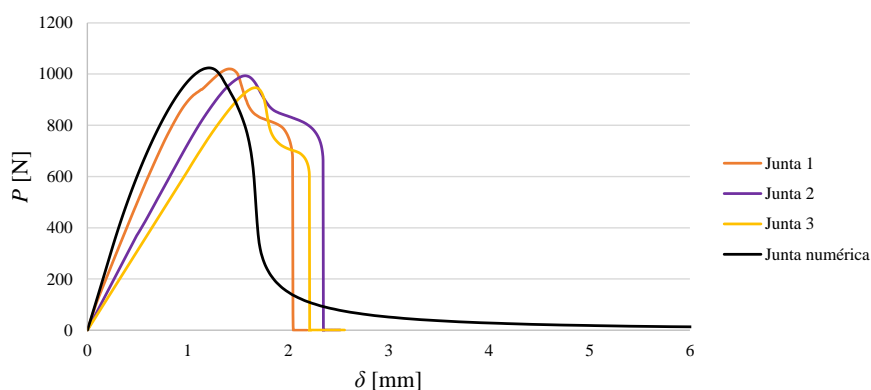


Figura 118 – Curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais para as juntas coladas com o Sikaforce® 7752 e $t_{P2}=4$ mm.

Como se pode verificar pela Figura 117, as curvas P - δ numéricas e experimentais para $t_{p2}=1$ mm apresentam uma boa correlação entre elas relativamente aos valores de P_m . Em relação aos valores de deslocamentos de carga máxima e de rotura, observam-se algumas diferenças nalguns casos significativas. As curvas experimentais apresentam um valor inferior de deslocamento de rotura. Como seria de esperar, com o aumento de t_{p2} , o valor de P_m aumenta e o deslocamento de rotura diminui (Figura 118). Tal é visível para as ambas as curvas P - δ numéricas e experimentais.

Considerando as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752, os valores de P_m obtidos em função t_{p2} e $L_0=25$ e 50 mm estão expressos na Figura 119.

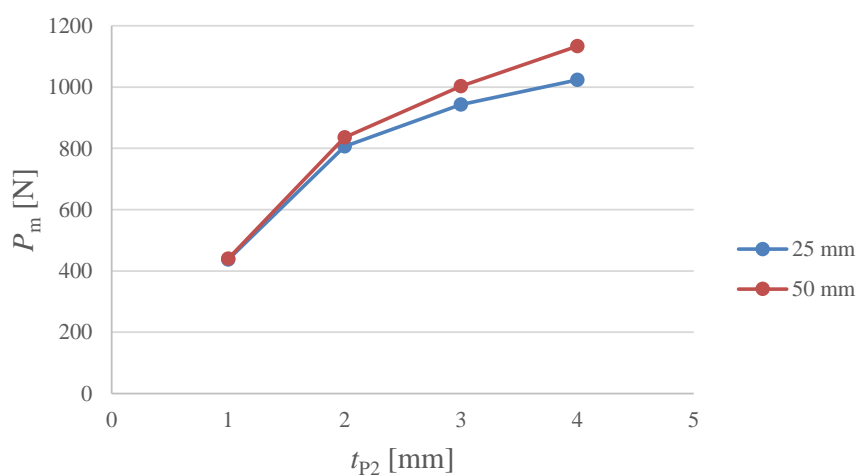


Figura 119 – Valores numéricos de P_m para as juntas coladas com o Sikaforce® 7752 função de L_0 .

Analisando a Figura 119 conclui-se desde já que as juntas coladas com o Sikaforce® 7752 apresentam valores de P_m muito mais elevados do que aqueles registados para o Araldite® AV138 (valores superiores em cerca de três vezes). Averigua-se ainda que os valores de P_m não sofrem grandes alterações com o aumento de L_0 . Isto acontece porque, igualmente às juntas coladas com Araldite® AV138, as tensões de arrancamento se concentram num comprimento muito reduzido de camada de adesivo (Figura 76 a Figura 79). Com o aumento de t_{p2} , dá-se um aumento considerável de P_m , sendo este aumento superior entre $t_{p2}=1$ e 2 mm, e reduzindo gradualmente para valores superiores de t_{p2} . Igualmente ao observado para o Araldite® AV138, a evolução observada de P_m com t_{p2} está relacionada com a redução dos gradientes de tensões de arrancamento, que também é mais significativa entre $t_{p2}=1$ e 2 mm (Figura 85 e Figura 87).

Pela análise de dano (capítulo 4.4.2) e para $L_0=25$ e 50 mm, observa-se a capacidade de plastificação deste adesivo, o que permite que as juntas respectivas apresentem valores de P_m mais elevados. Nas juntas coladas com o Sikaforce[®] 7752, o efeito do aumento de t_{p2} é mais visível. Inclusivamente, para $t_{p2}=4$ mm, quase metade da camada de adesivo está no processo de plastificação quando P_m é atingido. Da Figura 102 à Figura 105 mostra-se a evolução do dano nas juntas coladas com Sikaforce[®] 7752, em que se observa que o valor de $\delta/\delta_{P_{máx}}$ diminui gradualmente com o aumento de t_{p2} , o que está relacionado com o respectivo aumento de rigidez do aderente de alumínio.

A Figura 120 mostra a comparação entre os valores de P_m obtidos numericamente e experimentalmente para as juntas coladas com o Sikaforce[®] 7752 e $L_0=25$ mm.

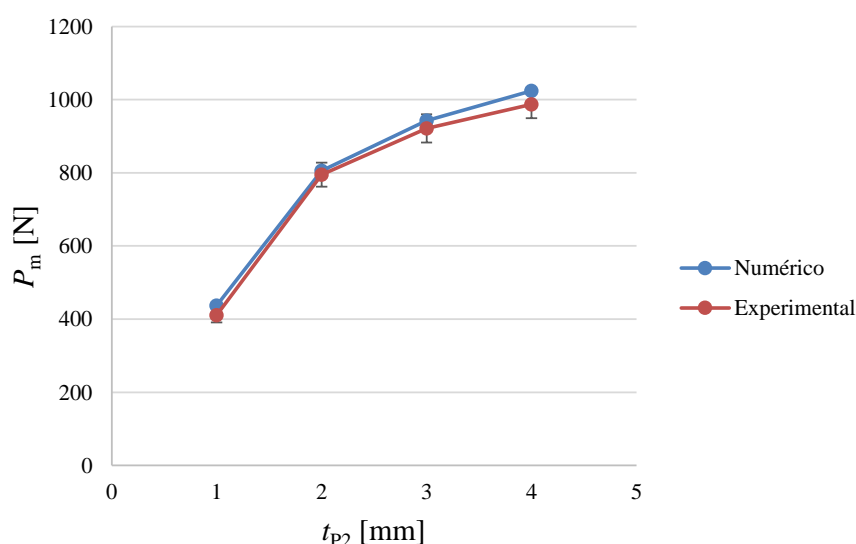


Figura 120 – Valores de P_m experimentais e respectiva previsão numérica para as juntas coladas com o Sikaforce[®] 7752 em função de t_{p2} .

Como se pode verificar pela Figura 120, todos os valores numéricos de P_m são ligeiramente superiores aos experimentais. Para os diferentes valores de t_{p2} (1 a 4 mm), a resistência experimental das juntas é inferior em 6,3%, 1,3%, 2,3% e 3,8% em comparação aos com os resultados numéricos. Mais uma vez se pode constatar que os valores de resistência numérica se encontra dentro dos campos de desvio padrão dos resultados experimentais, remetendo para a correcta previsão do modelo numérico.

4.7 Discussão dos resultados obtidos

Através dos estudos apresentados nos capítulos anteriores de tensão, análise de dano, curvas $P-\delta$ e análise de resistência (numérica e experimental), pode-se concluir que os dois adesivos apresentam uma ductilidade muito distinta. De facto, o Sikaforce[®] 7752 apresenta uma ductilidade muito superior ao Araldite[®] AV138, que é um adesivo bastante frágil.

É sabido que as propriedades dos adesivos têm uma influência directa na resistência da junta, porém um adesivo mais dúctil não significa necessariamente ter uma resistência de junta superior. Nas juntas em L , o adesivo mais frágil e resistente (Araldite[®] AV138) atinge na extremidade solicitada da junta adesiva ($x/L_0=0$) uma tensão elevada para uma solicitação relativamente reduzida, e não possibilita a distribuição do esforço para o interior da sobreposição (tensão elevada numa área muito pequena da sobreposição). Como consequência, não se obtiveram valores elevados de resistência.

Por outro lado, os adesivos com elevada ductilidade e flexibilidade (como o Sikaforce[®] 7752) têm geralmente uma resistência mais reduzida. No entanto, no caso particular de juntas em L , estes adesivos são capazes de distribuir as tensões de forma mais uniforme e por uma área maior de sobreposição ao longo da junta. Isto ocorre devido à deformação plástica e torna assim as juntas muito mais resistentes do que com os adesivos mais resistentes e frágeis.

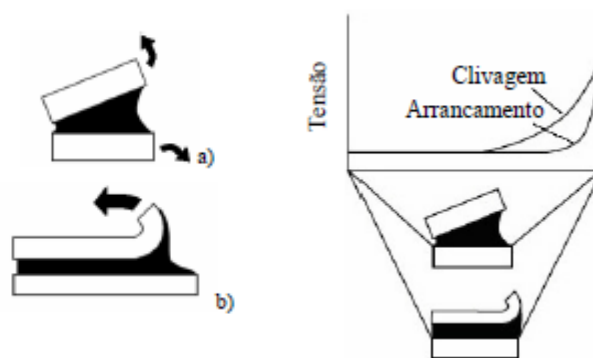


Figura 121 – Distribuição de tensão em esforços de a) clivagem e b) arrancamento [5].

A Figura 121 [5] mostra dois cenários possíveis de ocorrer em juntas em L , clivagem e arrancamento, dependendo da espessura dos aderentes, bem com a distribuição de tensões que ambos geralmente apresentam. Com o aumento de t_{P2} , observou-se que as juntas

apresentam um comportamento mais próximo de clivagem, na medida em que as tensões apresentam uma expansão maior para o interior da junta. O aumento de t_{P2} revelou-se desta forma uma modificação altamente benéfica para a resistência das juntas coladas com os dois tipos de adesivos testados, embora ligeiramente melhor para o adesivo dúctil.

Os adesivos frágeis (Araldite[®] AV138) são muito mais sensíveis à propagação da fenda até à rotura, enquanto os dúcteis (Sikaforce[®] 7752) resistem mais à sua propagação, o que se reflecte numa maior resistência [52]. A resistência à fadiga de juntas coladas com adesivos rígidos e frágeis é também tipicamente menor relativamente a juntas coladas com adesivos dúcteis e flexíveis, uma vez que apresentam uma distribuição de tensões menos uniforme. Assim sendo, conclui-se que os adesivos frágeis são muito susceptíveis ao aparecimento de defeitos, tais como microfissuras e espaços vazios [53], enquanto os adesivos dúcteis têm uma maior capacidade para sustentar esforços de clivagem e de arrancamento, e por essa razão são por exemplo muito utilizados na união de chapas finas [54].

Segundo o artigo de da Silva et al. [6], os adesivos rígidos têm uma resistência ao arrancamento próxima de 0,35 N/mm, enquanto os adesivos mais dúcteis podem chegar aos 4-8 N/mm, o que ilustra as principais diferenças de comportamento e resistência anteriormente referidas e obtidas na realização da presente dissertação.

5 Conclusões

O presente trabalho teve como objectivo estudar, por análise numérica (MDC) e experimental, o comportamento de ligações adesivas em L , entre aderentes de alumínio e de placas de CFRP, considerando diferentes condições geométricas (valores de t_{P2} e L_O) e adesivos de ductilidade distinta. Numericamente, foi efectuada uma análise de tensões, análise de dano e resistência na camada adesiva, através do *software* ABAQUS®, de modo a avaliar a influência de t_{P2} e L_O face aos dois tipos de adesivo em estudo. Os resultados numéricos foram comparados com uma análise experimental para validação da técnica numérica.

A geometria de junta estudada trata-se de uma configuração de junta tipicamente de arrancamento. No entanto, esta análise revelou o aparecimento de tensões de corte sofridas em ambos os adesivos, embora de magnitude residual relativamente às tensões de arrancamento. Conclui-se que picos de tensões de arrancamento ocorrem para todas as configurações de junta em $x/L_O=0$, na extremidade solicitada, atingindo os maiores valores de pico para as juntas coladas com a Araldite® AV138, dada a rigidez superior do adesivo. Este adesivo provoca uma tensão de arrancamento elevada numa área muito pequena da sobreposição, o que é típico de adesivos frágeis. Os valores de pico das tensões de arrancamento são inferiores no Sikaforce® 7752, devido à menor rigidez, que faz com que este adesivo seja capaz de distribuir as tensões de forma mais gradual por uma área maior de sobreposição. Por outro lado, devido ao Sikaforce® 7752 ser bastante dúctil, as resistências obtidas foram mais elevadas, o que levou à plastificação do aderente de alumínio para $t_{P2}=1$ mm. A ductilidade do adesivo Sikaforce® 7752 é altamente benéfica para a resistência de junta, tal como foi demonstrado pelos resultados numéricos e experimentais.

A análise de tensões permitiu ainda concluir que, para os dois adesivos em causa, quanto maior for o valor de L_O , maior serão os picos de arrancamento no adesivo. No entanto, este parâmetro não é o que tem maior influência nos valores de tensão, mas sim t_{P2} . Com o

aumento de t_{P2} , o tipo de solicitação que a junta está sujeita altera, na medida em que se aproxima mais da clivagem, e as distribuições de tensões de arrancamento tornam-se mais graduais ao longo da camada adesiva. Este efeito é mais notório em adesivos dúcteis.

De seguida comparou-se a evolução da variável de dano para os dois adesivos. Para o adesivo Araldite® AV138, com o aumento de t_{P2} , registou-se um aumento na porção da junta danificada quando é atingido P_m . O aumento desta quantidade com t_{P2} está relacionado com a maior rigidez do aderente de alumínio, que aumenta a área de adesivo em plastificação na altura da rotura. Este é um comportamento que teoricamente deverá ajudar ao aumento da resistência da junta. A propagação do dano ocorre de forma gradual com o carregamento aplicado até à rotura. Em relação ao adesivo Sikaforce® 7752, sendo este um adesivo dúctil, observou-se que a porção danificada é bastante superior ao Araldite® AV138 na altura da rotura. Com o aumento de t_{P2} , a porção danificada referente a P_m também aumenta. A maior ductilidade do Sikaforce® 7752 permite à junta acomodar de forma mais gradual o carregamento imposto por uma área maior de sobreposição, o que em termos de resistência se verificou bastante positivo.

A nível de resistência das juntas, foi com a utilização do adesivo mais dúctil que se registaram os maiores valores de P_m , com significativa melhoria entre $t_{P2}=1$ e 2 mm. Com o aumento de t_{P2} registaram-se valores de resistência maiores que com o aumento de L_0 . Com o respectivo aumento de t_{P2} , o aumento percentual de $t_{P2}=1$ mm para os restantes foi de 93,5% ($t_{P2}=2$ mm), 124,3% ($t_{P2}=3$ mm) e 140,1% ($t_{P2}=4$ mm). Nas juntas coladas com Araldite® AV138, o aumento percentual relativamente à junta com $t_{P2}=1$ mm foi de 64,5% ($t_{P2}=2$ mm), 86,6% ($t_{P2}=3$ mm) e 97,5% ($t_{P2}=4$ mm). O adesivo Sikaforce® 7752, comparativamente ao Araldite® AV138, atingiu valores de P_m superiores em 266,3%, 313,4%, 320,7% e 323,9%, respectivamente, para valores de t_{P2} entre 1 a 4 mm.

Os testes experimentais permitiram validar os resultados numéricos para ambos os adesivos e a máxima variação entre os resultados numéricos e experimentais foi, no caso do Araldite® AV138, de 5,3% ($t_{P2}=4$ mm) e, no caso do Sikaforce® 7752, de 6,3% ($t_{P2}=1$ mm). Considerando todas as configurações de junta ensaiadas, estas variações são de forma geral inferiores a 4%. Estes resultados mostram que a técnica de MDC para a previsão de resistência neste tipo de juntas em L é uma ferramenta bastante precisa e pode ser utilizada para efeitos de projecto deste tipo de juntas.

Como conclusão final, o adesivo Sikaforce[®] 7752 (dúctil) é o mais recomendado para o tipo de solicitação e geometria de junta em causa, uma vez que este distribui a carga sobre uma região mais alargada da camada de adesivo, o que resulta em valores mais elevados de P_m . A geometria do aderente em L (nomeadamente o valor de t_{p2}) e o tipo de adesivo utilizado são os parâmetros mais relevantes para a resistência da junta.

Como sugestões de trabalhos futuros, referem-se os seguintes:

- O aumento de t_{p2} , uma vez que se obtiveram melhores resultados de resistência;
- Averiguar o comportamento da junta com espessuras diferentes de adesivo;
- Adesivos com características diferentes;
- Utilização de filetes de adesivo na extremidade solicitada da camada de adesivo para redução dos picos de tensão;
- Estudo do efeito da variação do raio de curvatura do aderente em L e
- Estudo do comportamento das juntas à fadiga.

Referências

1. da Silva LFM, Öchsner A, Adams RD (eds.). Handbook of Adhesion Technology, Springer, Heidelberg 2011.
2. Kaelble DH. Theory and analysis of peel adhesion: mechanisms and mechanics. Journal of Rheology 1959; 3:161–180.
3. Lin YY, Hui CY, Wang YC. Modeling the failure of an adhesive layer in a peel test. Journal of Polymer Science: Polymer Physics 2002; 40:2277–2291.
4. Zhang L, Wang J. A generalized cohesive zone model of the peel test for pressure-sensitive adhesives. International Journal of Adhesion & Adhesives 2009;29:217–224.
5. Pinto, AMG. Ligações Adesivas Entre Materiais Poliméricos com e sem Alteração Superficial dos Substratos, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
6. da Silva, LFM e Magalhães, AG, de Moura MFSF. Juntas Adesivas Estruturais. Publindústria, 2007.
7. Pocius AV. Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction, 2nd Edition. Hanser 2002;83:311–319.
8. Louro A, Vicente I, Santos D, Máximo L, Amorim J, Carvalho R. Projecto FEUP: Adesivos Estruturais na construção de aviões, 2011.
9. Neto C, Sottomayor J, Moreira J, da Silva M, Afonso R, Veiga V. Projecto FEUP: Adesivos estruturais em automóveis, 2010.
10. Troughton M J. Handbook of Plastics Joining A Practical Guide, 2nd ed, New York:William Andrew Inc, 2008.

11. Campilho RDSG, Banea MD, Pinto AMG, Silva LFM, de Jesus AMP. Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modeling. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2011;31:363–372.
12. Montes JR, Lucas CM, Romero JCR. *Procesos industriales para materiales no metálicos*. 2ª Edición, Madrid España, Edutirial Vision Net, 2009.
13. Campilho RDSG, de Moura MFSF, Domingues JJMS. Modeling single and double lap repairs on composite materials. *Composites Science and Technology* 2005;65:1948–1958.
14. Volkersen O. Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten. *Luftfahrtforschung* 1938;15:41–47.
15. Goland M, Reissner E. The stresses in cemented joints. *Journal of Applied Mechanics* 1944;66:17–27.
16. Neto JABP, Campilho RDSG, da Silva LFM. Parametric study of adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2012;37:96–101.
17. Khoramishad H, Crocombe AD, Katnam KB, Ashcroft IA. Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model. *International Journal of Fatigue* 2010;32:1146–1158.
18. Daudeville L, Ladeveze P. A damage mechanics tool for laminate delamination. *Composite Structures* 1993; 25:547–555.
19. Voyiadjis GZ, Kattan PI. *Damage Mechanics*. Marcell Dekker, New York, 2005.
20. Shenoy V, Ashcroft IA, Critchlow GW, Crocombe AD. Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue. *Engineering Fracture Mechanic* 2010;77:1073–1090.
21. Mohammadi S. *Extended finite element method for fracture analysis of structures*. Blackwell Publishing, New Jersey, 2008.

22. Belytschko T, Black T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *International Journal of Fracture Mechanics* 1999;45:601–620.
23. Moës N, Dolbow J, Belytschko T. A finite element method for crack growth without remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 1999;46:131–150.
24. Williams ML. The stress around a fault or crack in dissimilar media. *Bulletin of the Seismological Society of America* 1959;49:199–204.
25. Fernlund G, Spelt JK. Failure load prediction. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 1991;11:213–227.
26. Duan K, Hu X, Mai YW. Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints. *Journal of Adhesion Science and Technology* 2004;18:39–53.
27. Barenblatt GI. The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 1959;71:622–636.
28. Feraren P, Jensen HM. Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints. *Engineering Fracture Mechanics* 2004;71:2125–2142.
29. Grant LDR, Adams RD, da Silva LFM. Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2009;29:405–413.
30. Yang QD, Thouless MD. Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints. *International Journal of Fracture* 2001;100:175–187.
31. Zhao X, Adams RD, da Silva LFM, Single lap joints with rounded adherend corners: experimental results and strength prediction. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2011;25:837–856.
32. Hu P, Shao Q, Li W, Han X. Experimental and numerical analysis on load capacity and failure process of T-joint: Effect produced by the bond-line length. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2012;38:17–24.

33. Zhang K, Li L, Duan Y, Li Y. Experimental and theoretical stress analysis for an interface stress model of single-L adhesive joints between CFRP and aluminium components. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2014;50:37–44.
34. Li W, Blunt L, Stout KJ. Analysis and design of adhesive-bonded tee joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 1997;17:303–311.
35. Moreira RDF. Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
36. Ribeiro NFQR. Efeito das alterações geométricas na resistência das juntas de sobreposição., Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2012.
37. Campilho RDSG, Pinto AMG, Banea MD, Silva RF, Da Silva LFM. Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry. *Journal of Adhesion Science and Technology* 2011;25:2351–2368.
38. Campilho RDSG, Banea MD, Neto JABP, da Silva LFM. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2013;44:48–56.
39. Faneco TMS. Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
40. Campilho RDSG, de Moura MFSF, Domingues JJMS. Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs. *International Journal of Solids and Structures* 2008;45:1497–1512.
41. Tong L, Steven GP. Analysis and design of structural bonded joints. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 1999.
42. Esteves VHC. Determinação da tenacidade de um adesivo em solicitações de modo misto (I+II), Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

43. da Silva LFM, Campilho RDSG. *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. Springer, 2012.
44. Gonçalves JPM, Moura MFSS, Magalhães AG, Castro PMST. Application of interface finite elements to three-dimensional progressive failure analysis of adhesive joints. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 2003;26:479–86.
45. Campilho RDSG. *Modelação da Execução de Reparações em Materiais Compósitos*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2005.
46. Andersson T, Stigh U. The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces. *International Journal of Solids and Structures* 2004;41:413–434.
47. Hogberg JL, Stigh U. Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer. *Engineering Fracture Mechanics* 2006;73:2541–2556.
48. Leffler K, Alfredsson KS, Stigh U. Shear behaviour of adhesive layers. *International Journal of Solids and Structures* 2007;44:530–545.
49. Azevedo JCS. *Determinação da tenacidade à fractura em tracção (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
50. Darwish SMH, Ghanya A. Critical assessment of weld-bonded technologies. *Journal of Materials Processing Technology* 2000;105:221–229.
51. de Moura MFSS, Campilho RDSG, Gonçalves JPM. Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading. *Composites Science and Technology* 2008;68:2224–2230.
52. Corporation, Henkel. *Design Guide for Bonding Plastics*, Henkel Corporation - *Engineering Adhesives* 2011; Vol 6.
53. da Silva LFM, Rodrigues TNSS, Figueiredo MAV, de Moura MFSS, Chousal JAG. Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength. *The Journal of Adhesion* 2006;82:1091–1115.

54. Standardization, ECSS - European Cooperation For Space. Space engineering – Adhesive bonding handbook. Noordwijk, The Netherlands: ECSS Secretariat 2011; ECSS-E-HB-32- 21A.

Anexo A. Fichas técnicas dos adesivos utilizados

Araldite® AV 138 Endurecedor HV 998

Adesivo epóxi bi-componente com altas resistências mecânicas sob ação de calor.

Principais propriedades

- Baixa emissão de gases e perda de voláteis
- Excelente resistência química
- Resistente a temperaturas de até 120°C
- Cura a baixas temperaturas acima de 5°C
- Pasta tixotrópica, ótimo preenchimento e baixo escoamento

Descrição

O Araldite AV 138 com o Endurecedor HV 998 é um sistema bi-componente que, quando combinados na proporção correta, apresenta-se como uma pasta que cura à temperatura ambiente proporcionando um resultado de material com alta rigidez e resistências mecânicas excelentes mesmo quando as uniões coladas com esse sistema forem submetidas a altas temperaturas de trabalho e em ambientes agressivos. A baixa emissão de gases torna esse sistema indicado para uso em aplicações em telecomunicações, eletrônica e aeroespacial.

Propriedades Típicas

Propriedade	AV 138	HV 998	Mistura
Cor (visual)	Bege	Cinza	Cinza
Densidade (g/cm ³)	1,7	1,7	1,7
Viscosidade a 25°C	Tixotrópica	Tixotrópica	Tixotrópica
Tempo de uso (100g/25°C)	-	-	35 minutos

Processamento

Pré-tratamento: A resistência e durabilidade de uma junta colada são dependentes do apropriado tratamento das superfícies a serem coladas.

Como recomendação básica, as superfícies a serem coladas devem ser limpas com agentes desengraxantes tais como: acetona; tricloroetileno ou outro material semelhante oferecido no mercado para esse fim para remover todos os traços de óleo, graxa e sujeira.

Alcool, gasolina ou diluidores/solventes para pintura nunca devem ser utilizados.

As mais fortes e duráveis colagens são obtidas quando, após a limpeza, são usadas ações mecânicas de abrasão, jateamento ou lixamento ou uso de produtos apropriados para ataque químico. A ação mecânica de escarificação deve ser seguida de uma segunda operação de limpeza.

Proporção da mistura (peso ou volume): 100 Araldite AV138 para 40 Endurecedor HV998

Mistura: Pesar cada um deles de forma precisa (± 5%) em recipientes limpos. Colocar a resina e o endurecedor juntos e mexer durante, no mínimo, 3 minutos, para que o resultado seja homogêneo. Não se esquecer de raspar as laterais, o fundo do recipiente e a própria espátula/pá misturadora várias vezes para assegurar a uniformidade da mistura.

Aplicação do adesivo: A mistura, de resina e endurecedor, é aplicada com espátula sobre as superfícies, pré tratadas, a serem unidas.

Uma camada de 0,05 a 0,1mm proporcionará os melhores resultados de resistência ao cisalhamento trativo da união colada.

As partes devem unidas com o adesivo, posicionadas e presas tão logo o adesivo tenha sido aplicado. Comprimir a área de contato vai assegurar melhores resultados de cura.

Processamento automático:

Algumas empresas especialistas desenvolveram equipamentos de dosagem, mistura e aplicação que possibilita o processamento de grandes volumes de adesivo. A Huntsman poderá indicar alguns fornecedores de equipamento de acordo com a necessidade do cliente.

Manutenção dos equipamentos e ferramentas:

Todas as ferramentas utilizadas devem ser limpas de resíduos de adesivo com água quente e sabão antes do material endurecer. A operação de remoção de resíduos curados é difícil e consome muita mão de obra e tempo.

Se forem utilizados solventes, tais como acetona, para limpeza, os operadores devem seguir as recomendações de precauções, usar EPI's e evitar qualquer contato com a pele ou olhos.

Propriedades Típicas do Produto Curado

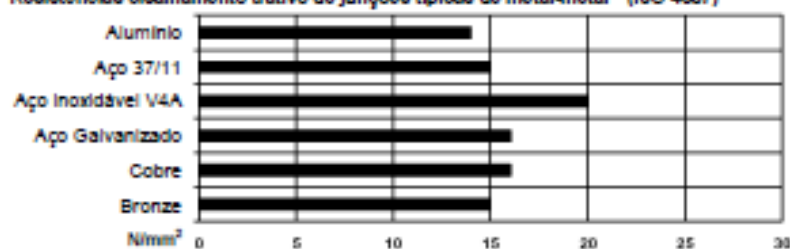
Propriedade	Método de Ensaio	Valores de Teste ⁽¹⁾
Peso específico a 23°C (g/cm ³)	PM 49/70	1,7
Dureza, Shore D a 23°C	PM 119-0/82	84-86
Descascamento a 23°C (Roller peel) (kg/mm)	ISO 4578	1,8
Resistência à tração a 23°C (N/mm ²)	DIN 53455	40-45
Módulo na tração a 23°C (N/mm ²)	DIN 53455	4.700
Alongamento até ruptura, na tração a 23°C	DIN 53455	1,2%
Corrosão eletrolítica (testado 4 dias a 40°C com 92% um. rel. ar conforme DIN 50015)	DIN 53489	graduado AN1
Coefficiente de expansão térmica (18-93°C)	VSM 77110	67 x 10 ⁻⁶ mm/mm°C
Resistividade volumétrica a 22°C (a 50Hz)	VSDI 0303	1.8x10 ¹⁷ ohm cm
Resistência elétrica a 22°C (valor instantâneo)	VSM 7710	45.8kV
Teste de fadiga em junções simples (90-130Hz)	DIN 532852	
25% do carregamento estático até a falha		>10 ⁷ ciclos
30% do carregamento estático até a falha		10 ⁵ -10 ⁶ ciclos

A não ser que outras condições sejam especificadas, os valores apresentados abaixo foram determinados por testes com amostras padrões com tiras de liga de alumínio de 170x25x1,5mm. A área de sobreposição/união foi de 12,5x25mm em cada caso.

Os valores apresentados foram determinados utilizando amostras de material de produção normal usando os métodos padronizados. Esses resultados são apresentados apenas como informação técnica de referência e não constitui uma especificação do produto.

Ciclos de cura x resistência ao cisalhamento trativo (RCT)

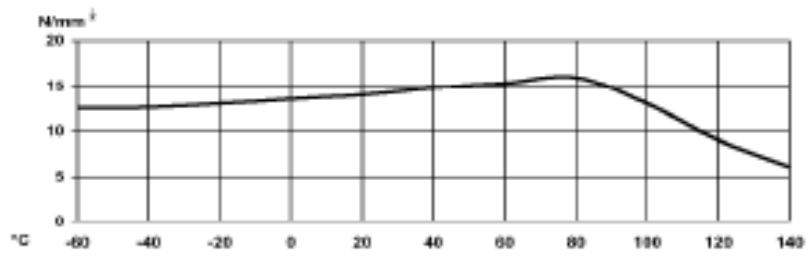
Temperatura	°C	10	15	23	40	60	80	100
Tempo de cura	Horas	48	36	24	16	1	-	-
	Minutos	-	-	-	-	-	15	10
RCT a 23°C	N/mm ²	10	11	13	14	15	16	18

Resistências ao cisalhamento trativo de junções típicas de metal-metal⁽¹⁾ (ISO 4587)

Módulo de elasticidade⁽¹⁾

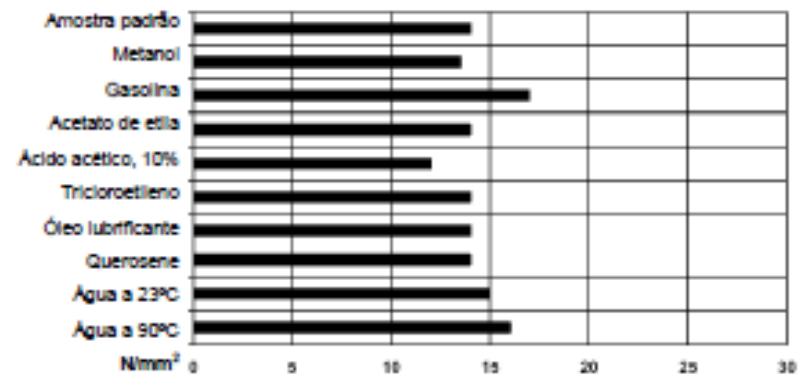
25°C -	3.000N/mm ²
50°C -	2.000N/mm ²
75°C -	400N/mm ²
100°C -	100N/mm ²
125°C -	3N/mm ²
150°C -	2N/mm ²

Resistência ao cisalhamento trativo⁽¹⁾ x temperatura (ISO 4587) (valores médios)

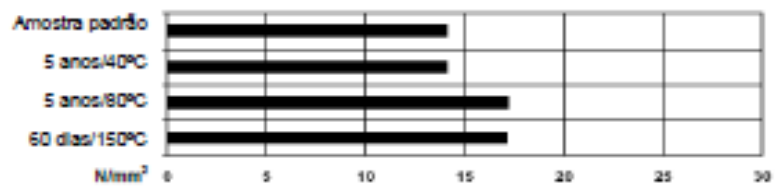


Resistência ao cisalhamento trativo⁽¹⁾ x imersão em líquidos (valores médios)

■ 90 dias

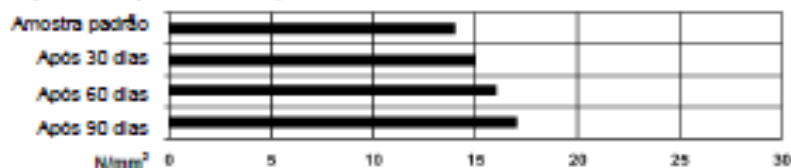


Resistência ao cisalhamento trativo⁽¹⁾ x envelhecimento sob calor



Resistência ao cisalhamento frativo⁽¹⁾ x clima tropical

(40/92, DIN 50015; valores médios) - Testes a 23°C

⁽¹⁾ Ciclo de Cura: 18 horas à 40°C (ou outro ciclo quando mencionado)**Nota:****Propriedades Típicas**

As propriedades físicas apresentadas neste folheto correspondem aos valores de ensaio típicos obtidos por nossos laboratórios. Se for necessário auxílio para estabelecer as especificações do produto, favor consultar o nosso Departamento de Atendimento ao Cliente.

Armazenamento

Conforme orientações do folheto de segurança, estes materiais devem ser estocados em sua embalagem original sob temperaturas variando entre 18 e 25°C. Nessas condições o Araldite AV 138 e o Endurecedor HV 998 terão condições de uso de até 6 anos e 3 anos respectivamente. Verificar as datas de validade nos rótulos das embalagens dos produtos.

Precauções de Segurança

Não utilizar ou manipular o produto antes que o Folheto de Segurança (FISPQ) seja lido e compreendido. Usar EPI's recomendadas.

Não deixar atingir os olhos, a pele e as roupas. Evitar a inalação de vapor ou névoa. Manter o recipiente fechado. Utilizar o produto somente sob ventilação adequada e lavar as mãos com bastante água após o uso.

Podem ocorrer a formação de pó nas operações em que o material curado for lixado e ou serrado. Providenciar as EPI's necessárias.

Informações Gerais Sobre Higiene e Segurança no Trabalho

Os procedimentos de higiene industrial obrigatória e recomendada devem ser observados sempre que os nossos produtos forem manipulados e processados. Informações adicionais podem ser encontradas nos Folhetos de Dados de Segurança (FISPQ) correspondentes e no folheto "Precauções de Higiene Durante a Manipulação dos Produtos Plásticos da Huntsman" (publicação nº 24264).

Notas Adicionais de Precaução

Os sistemas termofixos geram calor durante a cura. A quantidade de calor e o tempo enquanto o calor é liberado varia significativamente entre os sistemas. Além disso, a temperatura do ambiente ou produto, a quantidade de material e a forma do recipiente de mistura, a espessura do adesivo aplicado e os materiais em contato também são fatores que influenciam o perfil da temperatura de um sistema de mistura.

Em alguns casos, a reação exotérmica pode ser vigorosa, gerando calor o suficiente para provocar a decomposição do sistema com subsequente liberação de grandes volumes de fumaça acre.

Uma boa regra geral é nunca misturar material além do que pode ser aplicado durante o tempo de uso ou o tempo de gel. Tomar cuidado ao utilizar materiais em outras aplicações além das mencionadas no folheto de dados do produto, como por exemplo, um sistema adesivo rápido utilizado para preenchimento de grandes volumes.

Por favor entre em contato com nosso Departamento de Atendimento ao Cliente ou ligue para o representante local da Huntsman Advanced Materials Química Brasil Ltda. solicitando todas as informações necessárias antes de iniciar seu trabalho.

Produktdatenblatt
Version 1 (05 / 2013)

SikaForce®-7752 FRW L60

Der schwerentflammbare standfeste strukturelle Klebstoff

Technische Eigenschaften

	Komponente A (Harz) SikaForce®-7752 FRW L60	Komponente B (Härter) SikaForce®-7752 B
Chemische Basis	Polyole, gefüllt	Isocyanatderivate, ungefüllt
Farbe	Weiss	Braun, transparent
Mischfarbe	Beige	
Härtungsmechanismus	Polyaddition	
Dichte (25 °C)	ca. 1,5 kg / l	ca. 1,2 kg / l
Festkörpergehalt	100%	100%
Mischungsverhältnis	Volumen Gewicht	27 20
Viskosität (20 °C), PIP 30 mm, 0,2 mm Spalt	ca. 200.000 mPas (standfest)	ca. 200 mPas
Mischviskosität (20 °C), PIP 30 mm, 0,2 mm Spalt	ca. 70.000 mPas (standfest)	
Verarbeitungstemperatur	15 – 30 °C	
Topfzeit 20 °C ¹⁾	ca. 60 min	
Shore-D-Härte ²⁾ (DIN 53505)	ca. 60	
Zugfestigkeit ³⁾ (ISO 527)	ca. 10 MPa	
Bruchdehnung ³⁾ (ISO 527)	ca. 25 %	
Zugscherfestigkeit ³⁾ (DIN EN 1465)	ca. 10 MPa (abhängig vom Untergrund)	
Anfangsfestigkeit (0,5 MPa)	ca. 5h 23 °C / 110 min 40 °C / 35 min 60 °C	
Winkelschälfestigkeit ³⁾ (DIN 53282)	ca. 120 N/3 cm	
Haltbarkeit in ungeöffnetem Gebinde	6 Monate	12 Monate

¹⁾ Viskositätsanstieg bis 150.000 mPas im Rheolab MC 10

²⁾ Proben Temperatur: 23 °C, 50 % relative Luftfeuchtigkeit; Aushärtung: 48 Std. RT + 3 Std. 105 °C + 24 Std. RT

³⁾ Substrat: AlCuMg₂-plattiert; Klebstoffschichtdicke: 1,5 mm ⁴⁾ Schichtdicke der Zugprüfkörper: 4 mm

Beschreibung

SikaForce®-7752 FRW L60 ist ein nach IMO FTPC Teil 5 schwerentflammbares 2K-Klebstoff-System, welches aus einem gefüllten polyolbasierenden Harz und einem Isocyanatbasierenden Härter besteht. Die zwei Komponenten werden mit geeigneten Pumpanlagen dosiert, gemischt und aufgetragen.

SikaForce®-7752 FRW L60 wird nach dem Qualitätssicherungssystem ISO 9001 / 14001 und dem Responsible Care Programm hergestellt.

Produktvorteile

- Schwerentflammbar
- Raumtemperaturhärtend
- Alterungsbeständig
- Standfest
- PVC- und Lösungsmittelfrei
- Gute Schlagzähigkeit
- Hervorragende Kälteflexibilität

Anwendungsbereich

SikaForce®-7752 FRW L60 ist ein standfester zweikomponentiger Polyurethanklebstoff mit breitem Haftspektrum für strukturelle Verklebungen. Dieses Produkt ist nur für erfahrene Anwender geeignet. Um Haftung und Materialverträglichkeit gewährleisten zu können, müssen Vorversuche mit Originalmaterialien unter den jeweiligen Bedingungen durchgeführt werden.

Industry



SikaForce®-7752 FRW L60 1 / 2

Härtungsmechanismus

Die Aushärtung von SikaForce®-7752 FRW L60 erfolgt durch Reaktion der beiden Komponenten. Hohe Temperaturen beschleunigen, niedrige Temperaturen verlangsamen die Aushärtung.

Chemische Beständigkeit

SikaForce®-7752 FRW L60 ist hydrolysebeständig. Die Beständigkeit gegen Chemikalien ist immer von der Beschaffenheit des Untergrundes, Konzentration, Temperatur und Einwirkungsdauer abhängig. Das gleiche gilt auch bezüglich Temperaturen. Ohne Chemikalieneinwirkung ist der Klebstoff dauerhaft beständig bis 120 °C, kurzfristig kann der Klebstoff auch höheren Temperaturen ausgesetzt werden.

Bei vorhersehbarer chemischer oder thermischer Belastung ist eine objektbezogene Prüfung notwendig.

Verarbeitungshinweise**Untergrundvorbereitung**

Die Untergründe müssen sauber, trocken und frei von Verunreinigungen (Fette, Öle, staubförmige Ablagerungen) sein. Aufgrund der Vielzahl der möglichen Untergründe und der mechanischen Anforderungen an den Klebstoff werden Vorversuche und eine objektbezogene Beratung empfohlen.

Verarbeitung

Die Dosierung des Klebstoffes erfolgt mittels geeigneter Dosiermaschinen mit dynamischen oder statischen Mischköpfen im Raupen- oder Sprühauftrag.

Die Verarbeitungstemperatur sollte oberhalb 15 °C liegen.

Für weitere Informationen zur Auswahl geeigneter Verarbeitungsgeräte setzen Sie sich bitte mit der Abteilung System Engineering der Sika Industry in Verbindung.

Reinigung

Nicht ausgehärtetes SikaForce®-7752 FRW L60 kann von Geräten und Werkzeugen mit Sika® Remover-208 entfernt werden. Ausgehärtetes Material kann nur noch mechanisch entfernt werden.

Hände/Haut sollten sofort mit Sika® Handclean oder einer geeigneten Handwaschpaste und Wasser gereinigt werden. Keine Lösemittel verwenden!

Lagerung

Trocken und zwischen 10 °C und 30 °C. Vor direktem Sonnenlicht und Frost schützen. Nach Produktentnahme müssen die Gebinde umgehend wieder luftdicht verschlossen werden, um das Material vor Luftfeuchtigkeit zu schützen.

Zu Transportzwecken dürfen die Komponenten kurzfristig Temperaturen bis -10 °C während maximal 3 Tagen ausgesetzt werden. Kristallisierte oder nicht homogene Komponenten dürfen nicht verwendet werden.

Weitere Informationen

Folgende Dokumente sind auf Anfrage erhältlich:

- Sicherheitsdatenblatt

Gebinde

SikaForce®-7752 FRW L60

Komponente A	Eimer	7,5 kg
--------------	-------	--------

SikaForce®-7752 B

Komponente B	Dose	1,5 kg
	Kanister	2 kg
	Hobbock	25 kg
	Fass	250 kg

Hinweis Messwerte

Alle technischen Daten, Maße und Angaben in diesem Datenblatt beruhen auf Labortests. Tatsächlich gemessene Daten können in der Praxis aufgrund von Umständen außerhalb unseres Einflussbereiches abweichen.

Arbeitsschutzbestimmungen

Für den Umgang mit unseren Produkten sind die wesentlichen physikalischen, sicherheitstechnischen, toxikologischen und ökologischen Daten den stoffspezifischen Sicherheitsdatenblättern zu entnehmen. Die einschlägigen Vorschriften, wie z.B. die Gefahrstoffverordnung, sind zu beachten. Auf Wunsch stellen wir Ihnen unser System-Merkblatt TM 7510 "Allgemeine Hinweise zum Arbeitsschutz" beim Umgang mit Produkten der Sika Deutschland GmbH zur Verfügung.

Hinweis

Die vorstehenden Angaben, insbesondere die Vorschläge für Verarbeitung und Verwendung unserer Produkte, beruhen auf unseren Kenntnissen und Erfahrungen

im Normalfall, vorausgesetzt die Produkte wurden sachgerecht gelagert und angewandt. Wegen unterschiedlichen Materialien und Untergründen sowie abweichenden Arbeitsbedingungen kann eine Gewährleistung eines Arbeitsergebnisses oder eine Haftung, aus welchem Rechtsverhältnis auch immer, weder aus diesen Hinweisen noch aus einer mündlichen Beratung begründet werden, es sei denn, dass uns insoweit Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt. Hierbei hat der Anwender nachzuweisen, dass schriftlich alle Kenntnisse, die zur sachgemäßen und erfolgversprechenden Beurteilung durch Sika erforderlich sind, Sika rechtzeitig und vollständig übermittelt wurden. Der Anwender hat die Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Anwendungszweck zu prüfen. Änderungen der Produktspezifikationen bleiben vorbehalten. Schutzrechte Dritter sind zu beachten. Im Übrigen gelten unsere jeweiligen aktuellen Verkaufs-, Liefer- und Zahlungsbedingungen. Es gilt das jeweils neueste lokale Produktdatenblatt, das von uns angefordert werden sollte oder im Internet unter www.sika.de heruntergeladen werden kann.

Weitere Informationen:
www.sika.de, E-Mail: industry@de.sika.com
www.sika.com

Sika Deutschland GmbH
Stuttgarter Str. 139
72574 Bad Urach
Deutschland
Tel. +49 7125 940 761
Fax +49 7125 940 763



SikaForce®-7752 FRW L60 2 / 2

