



Resistência à tração de juntas compósitas em degrau: Análise experimental e numérica por modelos de dano coesivo

RUI FILIPE NOGUEIRA DE BRITO

novembro de 2019

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE JUNTAS COMPÓSITAS EM DEGRAU: ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA POR MODELOS DE DANO COESIVO

Rui Filipe Nogueira Brito

1141215

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE JUNTAS COMPÓSITAS EM DEGRAU: ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA POR MODELOS DE DANO COESIVO

Rui Filipe Nogueira Brito

1141215

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Mestre Raul Domingos Ferreira Moreira e do Doutor Isidro de Jesús Sánchez Arce.

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Luís Norberto Miranda Torres

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientadores

Mestre Raul Domingos Ferreira Moreira

Investigador, INEGI

Doutor Isidro de Jesús Sánchez Arce

Investigador, INEGI

Arguente

Doutor Eduardo André de Sousa Marques

Investigador, INEGI

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado uma realidade e aos quais estarei eternamente grato.

Em primeiro lugar quero agradecer ao Prof. Dr. Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, do Instituto Superior de Engenharia do Porto, por me ter deixado fazer parte do seu grupo de trabalho e, ter acreditado em mim e nas minhas capacidades. Agradeço ainda o trato simples, correto e científico, com que sempre abordou as nossas reuniões de trabalho. Agradeço pelo total apoio e disponibilidade, pelo saber que transmitiu, pelas opiniões e críticas e pela total colaboração no solucionar de dúvidas e problemas que foram surgindo ao longo da realização deste trabalho.

Ao Raul Moreira e ao Isidro Arce, agradeço de igual forma pela amizade demonstrada e, pela ajuda preciosa dada ao longo do desenvolvimento do meu trabalho experimental. O meu muito obrigado.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, e em especial a todos os Docentes do Departamento de Engenharia Mecânica, com quem durante estes cinco anos de formação tive o privilégio de trabalhar.

Aos meus pais e ao meu irmão o meu muito obrigada por todo o carinho, todos os esforços que fizeram para me permitir chegar até aqui, por toda a força e coragem que me deram durante todo o meu percurso académico. Sem vocês nada disto teria sido possível.

À minha Namorada Cristina por todo o apoio, encorajamento e persistência nesta longa caminhada, que me ajudou sempre a manter a cabeça levantada, e nunca me deixou desistir, um obrigado muito especial.

Por último, mas não menos importante, gostaria também de agradecer a todos os meus amigos e colegas, em especial ao Nuno Martins e Tiago Carvalho que me acompanharam ao longo destes dois anos de mestrado, pela vossa amizade, companheirismo e força em alguns momentos difíceis.

PALAVRAS CHAVE

Método de Elementos Finitos, Modelos de Dano Coesivo, Mecânica da Fratura, Adesivo Estrutural, Juntas Adesivas, Juntas em Degrau, Ensaios Mecânicos.

RESUMO

O uso de ligações adesivas tem aumentado significativamente nos últimos anos e é nos dias de hoje uma técnica de ligação predominante na indústria aeronáutica e automóvel. Este tipo de ligação visa substituir os métodos tradicionais de fixação mecânicos na união de estruturas. A melhoria ao longo dos anos dos vários modelos de previsão de dano, nomeadamente através do Método de Elementos Finitos (MEF), tem contribuído para o desenvolvimento desta técnica de ligação. Os Modelos de Dano Coesivo (MDC), usados juntamente com o MEF, são uma ferramenta viável para a previsão de resistência de juntas adesivas. Os MDC conciliam critérios da resistência dos materiais para a iniciação do dano e conceitos da mecânica da fratura para a propagação da fenda. Deste modo, existem vários fatores que condicionam o comportamento de uma junta adesiva, bem como a necessidade de avaliar alguns desses principais fatores, tais como o tipo de adesivo (frágil, dúctil ou uma combinação entre as duas propriedades) e geometria da junta, mediante o comprimento de sobreposição (L_0).

O trabalho realizado tem como principal objetivo avaliar de forma numérica e experimental o desempenho mecânico de juntas adesivas em degrau submetidas a esforços de tração, em função do comprimento de sobreposição (L_0). Foram analisadas juntas ligadas com três tipos de adesivos, o adesivo frágil Araldite® AV138, o adesivo com características intermédias Araldite® 2015 e o adesivo dúctil Sikaforce® 7752. Para concretizar estes objetivos, é efetuada uma análise experimental, na qual são testadas diferentes configurações para os vários adesivos, sendo realizada a respetiva análise dos resultados obtidos. Estes resultados experimentais são depois comparados com resultados numéricos obtidos utilizando o software ABAQUS®, recorrendo a um módulo integrado de MDC. Dos resultados numéricos obtidos é realizado um estudo das tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) na camada adesiva. No estudo por MDC, é também avaliada a variável de dano SDEG (*stiffness degradation*) em função de L_0 , que permite observar a degradação da camada adesiva desde o início de aplicação da carga até à rotura completa, apresentando-se depois comentários dos resultados obtidos. Com o estudo em questão, percebe-se que o tipo de adesivo usado tem grande influência na resistência das juntas, uma vez que o adesivo frágil apresenta melhor desempenho para L_0 menores, enquanto para adesivos dúcteis são obtidas maiores capacidades de carga para L_0 maiores, já que os adesivos dúcteis tem um maior capacidade de distribuição das tensões que se desenvolvem ao longo do adesivo. De salientar que os MDC foram uma ferramenta precisa na determinação do comportamento das diferentes juntas.

KEYWORDS

Finite Element Method, Cohesive Zone Models, fracture mechanics, structural adhesive, adhesive joints, stepped-lap joint, mechanical tests.

ABSTRACT

The use of adhesive bonds has increased significantly in recent years and is now a predominant bonding technique in the aeronautical and automotive industry. This type of bonding aims to replace the traditional mechanical joining methods in the union of structures. The improvement over the years of the various damage prediction models, namely through the Finite Element Method (FEM), has contributed to the development of this joining technique. Cohesive Zone Models (CZM), used together with the FEM, are a viable tool to predict the strength of adhesive joints. The CZM combines strength criteria for damage initiation and fracture mechanics concepts for crack propagation. Thus, there are several factors that condition the behavior of an adhesive joint, as well as the need to evaluate some of these main factors, such as the type of adhesive (brittle, ductile or a combination of the two properties) and joint geometry, through the overlap length (L_0).

The main objective of this study is to numerically and experimentally evaluate the mechanical performance of stepped-lap bonded joints submitted to tensile loads, as a function of L_0 . Bonded joints were analyzed with three types of adhesives, the brittle adhesive Araldite® AV138, the adhesive with intermediate characteristics Araldite® 2015 and the ductile adhesive Sikaforce® 7752. To achieve these goals, an experimental analysis is performed, in which the different configurations for the various adhesives are tested, and the respective analysis of the obtained results is performed. These experimental results are then compared with numerical results obtained using ABAQUS® software using an integrated CZM module. From the obtained numerical results, a study of peel (σ_y) and shear (τ_{xy}) stresses in the adhesive layer is performed. In the CZM study, the damage variable SDEG (stiffness degradation) as a function of L_0 is also evaluated, which allows to observe the degradation of the adhesive layer from the beginning of the application of the load until the complete rupture, and the comments of the obtained results are then presented. With the study in question, it is clear that the type of adhesive used has a major influence on the strength of the joints, since the brittle adhesive has better performance for smaller L_0 , while for ductile adhesives higher loading capacities for larger L_0 are obtained since ductile adhesives have a higher ability to distribute the stresses that develop along the adhesive. To be noted that the CZM were an accurate tool in determining the behavior of different joints.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2	Duas dimensões
3D	Três dimensões
Al	Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Cr	Crómio
CTCM	Critério de tensão de corte máxima
CTNM	Critério da tensão normal máxima
Cu	Cobre
CZM	<i>Cohesive zone model</i>
DCB	<i>Double-cantilever beam</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EF	Elementos finitos
EN	Euro Norm
ENF	<i>End-notched flexure</i>
Fe	Ferro
FE	<i>Finite element</i>
JSD	Junta sobreposição dupla
JSS	Junta sobreposição simples
MDC	Modelos de dano coesivo

MFLE	Mecânica da fratura linear elástica
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
pH	Potencial hidrogeniônico
PRFC	Plástico reforçado com fibras de carbono
PRFV	Plástico reforçado com fibra de vidro
PTFE	Politetrafluoretileno
PVC	Policloreto de vinila
Si	Silício
TAST	<i>Thick-adherend shear test</i>
TFFV	Técnica do fecho da fenda virtual
Ti	Titânio
Zn	Zinco

Lista de Símbolos

E (Pa)	Módulo de Young
G (Pa)	Módulo de elasticidade transversal
G_{IC} (N/mm)	Tenacidade à tração
G_{IIC} (N/mm)	Tenacidade ao corte
L_O (mm)	Comprimento de sobreposição
L_T (mm)	Comprimento total provete
N	Número de degraus

P (N)	Força resistente da junta
$P_{m\acute{a}x}$ (N)	Carga máxima admitida
S (mm)	Parâmetro de cota de maquinagem
t_A (mm)	Espessura de adesivo da porão longitudinal ao carregamento
t_{A1} (mm)	Espessura de adesivo da porão transversal ao carregamento
t_n^0 (Pa)	Resistência coesiva  traço
t_p (mm)	Espessura do substrato
t_s^0 (Pa)	Resistência coesiva ao corte
x (mm)	Distância desde a extremidade esquerda do adesivo
x/L_0	Distância normalizada ao longo do comprimento de sobreposio do adesivo
γ_f (%)	Deformao de rotura ao corte
δ (mm)	Deslocamento associado  solicio de traço da junta
$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	Deslocamento associado  força máxima resistente da junta
δ_n^0 (mm)	Deslocamento correspondente  resistência coesiva  traço
δ_s^0 (mm)	Deslocamento correspondente  resistência coesiva ao corte
ϵ_f (%)	Deformao da rotura  traço
ν	Coefficiente de Poisson
σ_e (Pa)	Tensão de cedência  traço
σ_f (Pa)	Tensão de rotura  traço
σ_y (Pa)	Tensão normal segundo a espessura ou de arrancamento
$\sigma_y/\tau_{méd}$ (Pa)	Tensão de arrancamento normalizada para as juntas em degrau
τ_f (Pa)	Tensão de rotura ao corte

τ_{xy} (Pa)	Tensão de corte
$\tau_{xy}/\tau_{méd}$ (Pa)	Tensão de corte normalizada para as juntas em degrau
τ_y (Pa)	Tensão de cedência ao corte

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Alguns dos formatos de adesivos disponíveis [3]	9
Figura 2 - Representação de uma junta adesiva [1]	12
Figura 3 – Representação dos conceitos de adesão e coesão [10]	12
Figura 4 - Classificação dos adesivos em função do seu desempenho [11]	16
Figura 5 – Representação da utilização de adesivos na construção de um avião [13, 14]	17
Figura 6 - Representação de algumas aplicações de adesivo na construção de automóveis [14, 15]	18
Figura 7- Placa circuito integrado [17]	18
Figura 8 - Esquema de um microchip produzido com recurso a adesivos [16]	18
Figura 9 – Representação de duas das aplicações na indústria naval [18]	19
Figura 10 – Exemplo de colagem de madeira usando adesivo [19]	19
Figura 11 - Evolução da receita em dólares do mercado de adesivos de construção por tipo de resina nos EUA [20]	20
Figura 12 – Representação dos vários esforços de uma ligação adesiva [2]	20
Figura 13 - Distribuição da tensão normal (σ_n) numa junta topo a topo sob carregamento axial e não axial [8]	21
Figura 14 – Esquema de carregamento e distribuição de tensões em esforços de compressão [8]	21
Figura 15 - Distribuição da tensão (τ_{xy}) numa JSS solicitada à tração [8]	22
Figura 16 - Resistência ao corte vs. comprimento e largura de sobreposição [21]	23
Figura 17 - Ângulo de separação entre substratos sob esforço: a) de clivagem b) arrancamento [24]	23
Figura 18 - Distribuição de tensão numa junta carregada em clivagem (à esquerda) e arrancamento (à direita) [21]	24
Figura 19 - Junta submetida a esforços de arrancamento: a) com adesivo frágil; b) com adesivo flexível [8]	24
Figura 20 - Modos de rotura em ligações adesivas [26]	25
Figura 21 - Representação da rotura do aderente [27]	25
Figura 22 - Representação da rotura adesiva [27]	26
Figura 23 – Representação da rotura coesiva [27]	27
Figura 24 – Representação da rotura mista [27]	27

Figura 25 - Diferentes configurações de juntas adesivas [11]	28
Figura 26 - Picos de tensão de corte nas extremidades das JSS [32]	28
Figura 27 – Representação de um junta de sobreposição dupla [1]	29
Figura 28 -Representação de uma junta topo a topo [1]	29
Figura 29 – Representação de uma junta de chanfro interior (à esquerda) e de grau (à direita) [1]	29
Figura 30 - Distribuição da tensão de corte nas JSS e na junta de chanfro exterior [35]	30
Figura 31 – Representação das juntas cobre-junta e cobre-junta dupla [27]	30
Figura 32 - Uniões em tubos para cargas axiais e torsionais [36].....	31
Figura 33 – Representação de uma junta com ressalto [27]	31
Figura 34 - Representação de uma junta de chanfro interior [1].....	32
Figura 35 - Efeito da altura do chanfro na distribuição das tensões na junta (a) tensões σ_y (b) tensão de von Mises equivalente [37].....	32
Figura 36 -Representação do chanfro interior na extremidade do aderente [37]	33
Figura 37 Tensões τ_{xy} obtidas experimentalmente com a variação do ângulo do chanfro [37].....	33
Figura 38 - Efeito do módulo de elasticidade em juntas adesivas com chanfro [37]	33
Figura 39 – Tensões τ_{xy} obtidas experimentalmente com a variação do módulo de elasticidade [37].....	34
Figura 40 - Representação da geometria do chanfro e as suas dimensões [38]	34
Figura 41 - Distribuição a) das tensões σ_{zz} e b) das tensões τ_{yz} numa junta com chanfros exteriores	35
Figura 42 – Efeito do parâmetro ch na resistência de juntas com chanfros exteriores [38]	35
Figura 43 – Representação de uma JSS com filete de adesivo [11].....	36
Figura 44 – Representação da distribuição de tensões locais junto das extremidades de sobreposição na presença de filete de adesivo [40]	36
Figura 45 – Representação do modelo utilizado para os cálculos de EF de uma junta em degrau [41]	37
Figura 46 - Distribuição de cada componente de tensão: interface adesiva transversal ao carregamento [41].....	39
Figura 47 - Distribuição de cada componente de tensão: interface adesiva de longitudinal ao carregamento [41].....	39
Figura 48- Distribuição da tensão σ_1/σ_0 para a interface superior, inferior e plano da camada média [41]	40
Figura 49 – Efeito da espessura de adesivo t_1 na máxima tensão principal normalizada σ_1/σ_0 : na interface adesiva transversal ao carregamento superior [41]	40

Figura 50 - Efeito da espessura de adesivo t_1 na máxima tensão principal normalizada σ_1/σ_0 : perto da face ($x/w=0$) [41]	41
Figura 51 - Efeito do número de degraus N na máxima tensão principal normalizada σ_1/σ_0 : na interface de adesivo transversal ao carregamento.....	42
Figura 52 - Efeito do número de degraus N na máxima tensão principal normalizada σ_1/σ_0 : na interface de adesivo transversal ao carregamento.....	42
Figura 53 - Distribuição da máxima tensão principal junto da extremidade da interface transversal ao carregamento [41]	43
Figura 54- Comparação das deformações experimentais vs. numéricas obtidas por EF [41]	43
Figura 55 - Parâmetros geométricos das juntas adesivas: (a) JSS (<i>Type-I</i>), (b) junta de 1 degrau (<i>Type-II</i>), (c) junta de 3 degraus (<i>Type-III</i>)	44
Figura 56 - Média das forças máximas de rotura das juntas obtidas experimentalmente [42]	45
Figura 57 - Gráfico força vs deslocamento:(a) para provetes colados com adesivo SBT9244, (b) para provetes colados com adesivo DP460	46
Figura 58 - Comparação de resultados numéricos e experimentais das cargas de rotura das junta [42]..	47
Figura 59 - Comparação da distribuição de tensões na camada adesiva ao longo da linha EF para juntas coladas com adesivo SBT9244: (a) tensão de arrancamento (σ_y), (b) tensão de corte (τ_{xy}) [42]	48
Figura 60 - Comparação da distribuição de tensões na camada adesiva ao longo da linha EF para juntas coladas com adesivo DP460: (a) tensão de arrancamento (σ_y), (b) tensão de corte (τ_{xy}) [42]	48
Figura 61 – Estratégias e outras técnicas de configuração geométrica de junta para evitar esforço: (a) arrancamento e (b) clivagem [43].....	49
Figura 62 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [65])	54
Figura 63 - Modelo coesivo triangular [77, 78]	55
Figura 64 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [95]	57
Figura 65 – Exemplo de uma rotura interlaminar de uma junta colada com o adesivo AV138 com um L_0 de 10 mm [98].....	58
Figura 66 - Geometria e dimensões das juntas de L_0 de 25 mm [99].....	59
Figura 67 - Geometria e dimensões das juntas de L_0 de 50 mm [99].....	59
Figura 68 - Localização e dimensões do defeito utilizado na junta de L_0 de 25 mm (à esquerda) e de 50 mm (à direita) [99]	59
Figura 69 - Método de fixação do Teflon® nos provetes [99]	60

Figura 70 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite® AV138 para $L_0=25$ mm (à esquerda) e para $L_0=50$ (à direita) para as JSS em que a) sem defeito, b) com 25% de defeito, c) 50% de defeito e d) 75% de defeito [99]	60
Figura 71 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Sikaforce® 7752 para $L_0=25$ mm (à esquerda) e para $L_0=50$ (à direita) para as JSS em que a) sem defeito, b) com 25% de defeito, c) 50% de defeito e d) 75% de defeito [99]	60
Figura 72 - Distribuição de tensões τ_{xy} para JSS coladas com Araldite® AV138 (à esquerda) e Sikaforce® 7752 (à direita) para $L_0=50$ mm [99].....	61
Figura 73 - Distribuição de tensões σ_y para JSS coladas com Araldite® AV138 (à esquerda) e para o Sikaforce® 7752 (à direita) para $L_0=50$ mm [99].....	61
Figura 74 - Pico de tensões normalizadas τ_{xy} e σ_y nas arestas de sobreposição em função da área defeituosa (%), para juntas coladas com o adesivo Araldite® e Sikaforce® 7752 com $L_0=25$ mm e $L_0=50$ mm [99]	62
Figura 75 – Variável de dano quando é atingida a $P_{m\acute{a}x}$ no adesivo Araldite® AV138 (à esquerda) e Sikaforce® 7752 (à direita) na junta com $L_0=25$ mm [99]	62
Figura 76 - Evolução da variável de dano com $\delta / \delta P_m$ (%) para JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138 com $L_0=25$ mm a) sem defeito e b) 75% defeito [99]	62
Figura 77 - Evolução da variável de dano com $\delta / \delta P_m$ (%) para JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 com $L_0=25$ mm a) sem defeito e b) 75% defeito [99]	63
Figura 78 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente e experimentalmente para as JSS coladas sem defeito com Araldite® AV138 com $L_0=25$ mm a) e para as JSS com 75% de defeito coladas com Sikaforce® 7752 b) [99].....	63
Figura 79 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos em função da percentagem de defeito para as JSS coladas com Araldite® AV138 a) e Sikaforce® 7752 b) [99]	63
Figura 80 - Forças máximas registadas experimentalmente em JSS para o Araldite® AV138 e Sikaforce® 7888 [98].....	64
Figura 81 - Resultados experimentais vs. previsões analíticas para o Araldite® AV138 [98]	65
Figura 82 - Resultados experimentais vs previsões numéricas para o Sikaforce® 7888 [98]	65
Figura 83 - Zona de sobreposição de uma junta adesiva com camada interlaminar [79]	66
Figura 84 - Curvas $\sigma-\epsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [103]	70
Figura 85 - Adesivo Araldite® AV138 [102].....	71
Figura 86 - Formato comercial do adesivo Araldite® 2015 de 50 ml [102]	72
Figura 87 - Curvas $\sigma-\epsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [103]	72
Figura 88 - Adesivo Sikaforce® 7752 [102]	74

Figura 89 - Curvas σ - ϵ relativas ao adesivo Sikaforce® 7752 [104]	74
Figura 90 - Esquema representativo da geometria de junta em degrau e respetivas condições fronteira	75
Figura 91 - Fresadora Gambin SA modelo 1m	78
Figura 92 - Pormenor do <i>setup</i> de maquinagem, onde se observa o posicionamento de calços na parte inferior substrato	79
Figura 93 - Maquinagem dos degraus na Fresadora Gambin SA modelo 1m	79
Figura 94 - Esquema de cotagem para efeito de maquinagem	80
Figura 95 - Aspeto da superfície dos substratos após tratamento superficial de 4 das juntas	81
Figura 96 - Pormenor de aplicação adesivo Araldite® 2015	82
Figura 97 - Aspeto da junta após a sua montagem	83
Figura 98 - Acabamento final dos provetes com mó abrasiva	83
Figura 99 - Aspeto de 4 provete prontos a ensaiar	84
Figura 100 - Máquina Shimadzu – Autograph AG-X	84
Figura 101 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm	85
Figura 102 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=25$ mm	85
Figura 103 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=37,5$ mm	86
Figura 104 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm	86
Figura 105 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=12,5$ mm	87
Figura 106 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=25$ mm	87
Figura 107 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm	87
Figura 108 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=50$ mm	88
Figura 109 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm	88
Figura 110 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=25$ mm	89

Figura 111 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=37,5$ mm	89
Figura 112 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm	89
Figura 113 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm	90
Figura 114 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=25$ mm	90
Figura 115 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=37,5$ mm	91
Figura 116 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm	91
Figura 117 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=12,5$ mm	92
Figura 118 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=25$ mm	92
Figura 119 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm	92
Figura 120 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=50$ mm	93
Figura 121 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm	93
Figura 122 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=25$ mm	94
Figura 123 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=37,5$ mm	94
Figura 124 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm	95
Figura 125 - Valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 em função do valor de L_0	95
Figura 126 – Representação do <i>software</i> ABAQUS® e respetiva geometria da junta no modulo “Part” ..	98
Figura 127 – Representação do <i>software</i> ABAQUS® e respetiva cotagem da zona de sobreposição da junta adesiva	98
Figura 128 - Propriedades elásticas inseridas no ABAQUS® referentes aos aderentes	99
Figura 129- Propriedades mecânicas inseridas no ABAQUS® referentes ao adesivo (1)	99
Figura 130 - Propriedades mecânicas inseridas no ABAQUS® referentes ao adesivo (2)	100
Figura 131 - Propriedades mecânicas inseridas no ABAQUS® referentes às camadas interlaminares (1)	100
Figura 132 - Propriedades mecânicas inseridas no ABAQUS® referentes às camadas interlaminares (2)	101
Figura 133- Representação do <i>software</i> ABAQUS® e respetiva atribuição dos aderentes	101
Figura 134- Representação do <i>software</i> ABAQUS® e respetiva atribuição do adesivo.....	102
Figura 135 - Representação do <i>software</i> ABAQUS® e respetiva atribuição das camadas interlaminares	102

Figura 136 - Valores de incrementação utilizados no <i>software</i> ABAQUS® no caso de estudo	103
Figura 137 - Representação do <i>software</i> ABAQUS® e respetiva condição de encastramento da junta ..	103
Figura 138 - Representação do <i>software</i> ABAQUS® e respetiva restrição transversal da junta	104
Figura 139 - Representação do <i>software</i> ABAQUS® e definição do elemento de malha dos aderentes .	104
Figura 140 - Representação do <i>software</i> ABAQUS® e definição dos controlos de malha do adesivo e das camadas interlaminares.....	105
Figura 141 - Representação do refinamento da malha e respetivos parâmetros <i>bias ratio</i> inseridos <i>software</i> ABAQUS®	105
Figura 142 - Ilustração do pormenor da malha usada no estudo do modelo numérico	106
Figura 143 – Módulo “ <i>Job</i> ” e respetivo acompanhamento dos incrementos realizados no ensaio numérico	106
Figura 144 – Representação da distribuição da tensão de von Mises para o incremento 197.....	107
Figura 145 - Lei triangular do MDC implementado no <i>software</i> ABAQUS® [110].....	108
Figura 146 – Esquema referente à identificação e localização das regiões de rotura	112
Figura 147 - Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que é atingido o $P_{máx}$	113
Figura 148 - Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que ocorre a rotura em juntas adesivas ligadas com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm.....	113
Figura 149 - Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que se atinge o $P_{máx}$ das juntas adesivas ligadas com o Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm.....	114
Figura 150 - Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que as juntas adesivas ligadas com o Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm atingem o $P_{máx}$	114
Figura 151 - Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que ocorre a rotura das juntas adesivas ligadas com o Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm	115
Figura 152 - Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que ocorre a rotura das juntas adesivas ligadas com o Sikaforce® 2015 e $L_0=25$ mm	116
Figura 153 - Esquema representativo da normalização de L_0 da junta em degrau	116
Figura 154 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo Araldite® AV138 em função de L_0	117
Figura 155 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de L_0	117
Figura 156 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo Sikaforce® 7752 em função de L_0	118

Figura 157 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo Araldite® AV138 em função de L_0	119
Figura 158 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de L_0	119
Figura 159 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo Sikaforce® 7752 em função de L_0	120
Figura 160 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com $L_0=12,5$ e 25 mm	122
Figura 161 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com $L_0=12,5$ e 25 mm	122
Figura 162 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com $L_0=37,5$ e 50 mm	123
Figura 163 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com $L_0=37,5$ e 50 mm	123
Figura 164 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 em função do L_0	124
Figura 165 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 em função do L_0	125
Figura 166 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 em função do L_0	125
Figura 167 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=50$	126
Figura 168 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm.....	127
Figura 169 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=25$ mm.....	127
Figura 170 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=37,5$ mm.....	128
Figura 171 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm.....	128
Figura 172 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=12,5$ mm.....	129
Figura 173 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=25$ mm.....	129

Figura 174 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm.....	130
Figura 175 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=50$ mm.....	130
Figura 176 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm.....	131
Figura 177 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=25$ mm.....	131
Figura 178 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=37,5$ mm.....	132
Figura 179 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm.....	132
Figura 180 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 em função do valor de L_0	133
Figura 181 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para juntas coladas com adesivo Araldite® 2015 em função do valor de L_0	134
Figura 182 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 em função do valor de L_0	134
Figura 183 – $P_{m\acute{a}x} / b$ em função de L_0 para juntas em degrau ligadas com o Araldite® AV138.....	136
Figura 184 - Comparação das tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ em juntas em degrau ligadas com o Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm.....	136
Figura 185 - $P_{m\acute{a}x} /$ Largura em função de L_0 para juntas em degrau ligadas com o Araldite® 2015	137
Figura 186 - $P_{m\acute{a}x} / b$ em função de L_0 para juntas em degrau ligadas com o Sikaforce® 7752	138
Figura 187 – $P_{m\acute{a}x}/b$ em função de L_0 para juntas em degrau ligadas com o Araldite® AV138	139
Figura 188 - $P_{m\acute{a}x}/b$ em função de L_0 para juntas em degrau ligadas com o Araldite® 2015	140
Figura 189 – $P_{m\acute{a}x} / b$ em função de L_0 para juntas em degrau ligadas com o Sikaforce® 7752.....	140

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das formas típicas de ligação de materiais [6].....	10
Tabela 2 - Parâmetros utilizados e respetivas dimensões utilizadas no estudo de Ichikawa et al. [41]	38
Tabela 3 - Variáveis usadas para definir a plasticidade de um metal e de um material compósito atendendo que “1” representa a direção das fibras, “2” representa a direção transversa e “3” representa a direção fora do plano.....	65
Tabela 4 - Propriedades elásticas ortotrópicas do CFRP, com as fibras alinhadas unidireccionalmente na direção x enquanto y e z representam as direções transversas [101].....	69
Tabela 5 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [98, 103]	71
Tabela 6 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [103].....	73
Tabela 7 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752	75
Tabela 8 - Parâmetros usados na geometria de junta.....	76
Tabela 9 - Parâmetros de maquinagem (operação fresagem)	79
Tabela 10 - Parâmetro de cota de maquinagem dos degraus.....	80
Tabela 11 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura (t_A) de 0,2 mm [118].....	110
Tabela 12 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com uma espessura (t_A) de 0,2 mm [118].....	110
Tabela 13- Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com uma espessura (t_A) de 0,2 mm [118].....	111
Tabela 14 – Exibição dos modos de rotura numéricos.....	112

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Organização da dissertação	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Ligações adesivas	9
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	11
2.1.2	Adesivos estruturais	14
2.1.3	Aplicações comuns das juntas adesivas	17
2.1.4	Esforços tipo em juntas adesivas	20
2.1.5	Modos de rotura	25
2.1.6	Configurações possíveis de junta	27
2.1.7	Alterações geométricas mais comuns em juntas adesivas.....	31
2.1.7.1	Chanfros dos aderentes	31
2.1.7.2	Filetes de adesivo.....	35
2.1.7.3	Utilização de degraus.....	36
2.1.7.4	Outras alterações.....	49
2.2	Técnicas de previsão de resistência para juntas adesivas	50
2.2.1	Métodos analíticos	51
2.2.2	Métodos numéricos	51
2.2.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	52
2.2.2.2	Mecânica da fratura.....	52
2.2.2.3	Modelos de dano coesivo	53
2.2.2.4	Mecânica do dano.....	55

2.2.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido.....	56
2.3	Juntas em materiais compósitos.....	58
2.3.1	Particularidades das juntas em materiais compósitos	58
2.3.2	Trabalhos experimentais em juntas em materiais compósitos.....	58
2.3.3	Modelação numérica de juntas em materiais compósitos	65
3	DESENVOLVIMENTO	69
3.1	Trabalho experimental.....	69
3.1.1	Materiais	69
3.1.1.1	Aderentes.....	69
3.1.1.2	Adesivos.....	70
3.1.1.2.1	Araldite® AV138	70
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	72
3.1.1.2.3	Sikaforce® 7752.....	73
3.1.2	Geometria e dimensões das juntas	75
3.1.3	Fabrico e ensaio das juntas	76
3.1.4	Resultados experimentais	84
3.1.4.1	Modos de rotura	90
3.1.4.2	Resistência das juntas	95
3.2	Trabalho numérico	97
3.2.1	Preparação dos modelos numéricos	97
3.2.2	Modelo de dano coesivo	107
3.2.2.1	Modelo de dano triangular	107
3.2.2.2	Estimativa dos parâmetros coesivos.....	109
3.2.2.2.1	Araldite® AV138	109
3.2.2.2.2	Araldite® 2015.....	110
3.2.2.2.3	Sikaforce® 7752.....	111
3.2.3	Resultados numéricos	111
3.2.3.1	Modos de rotura.....	112

3.2.3.1.1	Araldite® AV138	112
3.2.3.1.2	Araldite® 2015.....	114
3.2.3.1.3	Sikaforce® 7752.....	115
3.2.3.2	Análise de tensões	116
3.2.3.2.1	Tensões de arrancamento.....	117
3.2.3.2.2	Tensões de corte	118
3.2.3.3	Estudo da variável de dano	121
3.2.3.4	Previsão da resistência.....	126
3.2.3.5	Comparação com juntas em degrau com aderentes de alumínio	135
3.2.3.6	Comparação com juntas de sobreposição simples e dupla	138
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	143
5	REFERÊNCIAS.....	149

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A crescente utilização de adesivos como forma de unir materiais tem vindo a ser incrementada nos últimos anos, devido à necessidade constante de combinar resistência com leveza e ainda garantir um elevado tempo de vida das estruturas, contribuindo para isso a elevada resistência à fadiga inerente a esta tecnologia. Esta técnica ainda não está tão desenvolvida como outras técnicas de ligação como a soldadura, a rebitagem ou as ligações aparafusadas, mas, no entanto, a ligação por adesivos tornou-se numa solução quando se pretende unir diferentes materiais, mesmo aqueles mais suscetíveis de desenvolver corrosão galvânica.

O comportamento de uma ligação adesiva é condicionado por diferentes variáveis, tais como o tipo de adesivo, o tipo de substrato e aspetos dimensionais, como por exemplo comprimento de sobreposição (L_0), a espessura dos substratos e a espessura da camada de adesivo. No que diz respeito aos adesivos, estes variam de frágeis a rígidos, como por exemplo o epóxido Araldite® AV138, até dúcteis e flexíveis, como é o caso do poliuretano Sikaforce® 7752. Para além destes, existem outros adesivos que combinam uma elevada resistência e ductilidade. A resistência e ductilidade do adesivo são dois dos principais fatores que influenciam a resistência de uma junta adesiva, em conjunto com a geometria da junta.

No entanto, em muitas aplicações estruturais, a região de iniciação de dano não é óbvia. Por outro lado, os métodos baseados em tensões limites comportam-se bem na previsão de iniciação de dano, enquanto a Mecânica da Fratura se comporta bem na modelação da propagação do dano. A fim de superar as desvantagens de cada método e explorar a utilidade das vantagens descritas, podem ser usados Modelos de Dano Coesivo (MDC). Esta técnica combina aspetos de análise de tensões para modelar a iniciação de dano e conceitos da Mecânica da Fratura para lidar com a propagação de dano. Assim, não é necessária a existência de um defeito inicial, ao mesmo tempo que se evitam os problemas de dependência da malha característicos dos métodos baseados em tensões. Porém, como qualquer método, existem desvantagens, isto é, para se aplicar corretamente os MDC é necessária uma medição exata dos parâmetros coesivos, tais como a tenacidade à tração (G_{Ic}) e a resistência à tração (t_{no}) para a lei coesiva à tração, e a tenacidade ao corte (G_{IIc}) e a resistência coesiva ao corte (t_{so}) para a lei coesiva ao corte.

1.2 Objetivos

A presente dissertação consiste na realização do estudo numérico e experimental de juntas adesivas em degrau (*stepped-lap joint*) fabricadas com aderentes em polímero reforçado a fibra de carbono (PRFC), solicitadas à tração, com o objetivo de analisar o seu desempenho e fazer uma análise comparativa entre os valores obtidos experimentalmente e numericamente por MDC. Para isso, foram estudados vários comprimentos de sobreposição (L_0) para três tipos de adesivos: Araldite® AV138, Araldite®2015 e Sikaforce® 7752.

O trabalho experimental realizado considerou diferentes condições geométricas, ou seja, o estudo consistiu na avaliação do desempenho da geometria em degrau considerando os seguintes parâmetros geométricos, número de degraus (N) constante, espessura substrato (t_p) constante, espessura de adesivo (t_A e t_{A1}) constante e comprimento de sobreposição (L_0) variável.

O trabalho numérico realizado consistiu na análise por EF recorrendo ao software ABAQUS® das juntas adesivas experimentalmente testadas. O estudo numérico consistiu na determinação da distribuição de tensões de arrancamento (*peel*) (σ_y) e de corte (*shear*) (τ_{xy}) na camada adesiva. Igualmente com recurso aos MDC foi determinada a variável de dano SDEG (*stiffness degradation*), que expressa o fenómeno da degradação do adesivo desde o início da aplicação da carga até à sua rotura completa. Igualmente é realizada a discussão dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos, em função das análises de tensão e de dano. É também realizada a comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ numéricos e experimentais, onde se pretende validar a capacidade dos MDC na previsão da resistência das juntas em degrau. Finalmente, é realizada a comparação em termos de resistência de juntas em degrau com aderentes em PRFC com juntas em degrau com aderentes de alumínio e com juntas de sobreposição simples (JSS) e sobreposição dupla (JSD).

1.3 Organização da dissertação

Para uma melhor interpretação e análise do trabalho desenvolvido, esta dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos, que se passam a apresentar:

No 1º capítulo é contextualizado o tema abordado, definidos os objetivos propostos no presente trabalho e descrita de forma sucinta a organização da dissertação.

O 2º capítulo baseia-se na revisão bibliográfica do tema abordado, ou seja, consiste num preambulo às ligações adesivas. Neste capítulo, que se encontra dividido em vários subcapítulos de modo a simplificar a sua interpretação, é efetuada a caracterização das juntas adesivas nomeadamente as suas propriedades, e são também expostos alguns exemplos práticos de aplicação desta técnica. São ainda expostos os possíveis esforços

e modos de rotura que podem existir nas ligações adesivas, bem como as possíveis configurações geométricas de junta. Também neste capítulo são enumerados e caracterizados os vários exemplos de adesivos estruturais conhecidos, e expostas as técnicas mais relevantes atualmente disponíveis na previsão da resistência das juntas adesivas, a destacar modelos analíticos e modelos numéricos. No final do capítulo são referidos estudos anteriormente realizados no âmbito das juntas em material compósito.

O 3º capítulo corresponde ao desenvolvimento, ou seja, é dedicado ao trabalho experimental e numérico realizado. No que diz respeito ao trabalho experimental realizado, são referidos os materiais constituintes das juntas e é feita uma descrição pormenorizada de todas as suas propriedades, nomeadamente do processo de fabrico, geometria e das condições e especificações dos testes realizados com as juntas, terminando com a respetiva análise dos resultados obtidos. Após a descrição do trabalho experimental, são apresentadas e analisadas as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) e os resultados de resistência, seguidos de uma análise pormenorizada para cada caso de junta em estudo.

A segunda parte deste trabalho consiste no trabalho numérico, no qual é apresentado o procedimento realizado no software ABAQUS®, onde estão incluídas as considerações e condições de análise numérica, os MDC utilizados, e expostas as condições da análise de tensões σ_y e τ_{xy} das juntas para as distintas condições geométricas. De seguida, é apresentado o estudo da variável de dano SDEG durante o processo de rotura do adesivo, sendo efetuada a previsão do comportamento das juntas quanto à sua resistência para cada tipo de geometria, ou seja, para cada comprimento de sobreposição (L_o). No terminar do capítulo é feita uma comparação entre os valores de resistência obtidos experimentalmente de juntas em degrau com aderentes em PRFV com os valores registados experimentalmente para juntas em degrau com aderentes de alumínio, e também com JSS e JSD igualmente com aderentes de alumínio.

No 4º capítulo são expostas as conclusões retiradas a partir do trabalho desenvolvido assim como são propostos possíveis trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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 [1].

Durante a segunda guerra mundial, devido às exigências tecnológicas, foram desenvolvidos adesivos sintéticos constituídos por resinas de ureia-formaldeído e resinas fenólicas. Mais tarde, devido à fragilidade exibida por estes adesivos, a química dos adesivos foi modificada e melhorada através da combinação com polímeros com boa tenacidade. Estes permitiram a ligação de materiais metálicos e de madeira com muito sucesso. Atualmente, todos os adesivos são baseados em polímeros sintéticos, tais como os fenólicos, epóxidos, acrílicos e uretanos [2]. Na Figura 1 estão representados alguns dos formatos possíveis.



Figura 1 – Alguns dos formatos de adesivos disponíveis [3]

Com a introdução de adesivos à base de polímeros sintéticos, houve uma evolução significativa deste método de ligação. Desta forma, é importante classificar os adesivos em estruturais ou não estruturais, tendo em conta a sua resistência. Considera-se um adesivo estrutural, aquele que resiste a forças de separação substanciais (6,9 MPa ao

corde) conferindo rigidez e resistência à estrutura [4]. Por outro lado, um adesivo não estrutural não cumpre este requisito e é utilizado em aplicações de menor responsabilidade. Este tipo de adesivo pode ser encontrado sob várias formas, como por exemplo colas de contacto, fitas adesivas e borrachas sintéticas.

Nos tempos atuais a tecnologia de ligação por adesivos estruturais é uma técnica emergente nos métodos de produção devido ao seu potencial, de onde se destaca a grande flexibilidade de projeto e a facilidade de implementação em sequências industriais de baixa cadência (filosofia de peça única) ou produção em massa. Também as ligações adesivas estruturais assumem-se como alternativa às técnicas produtivas convencionais, sendo empregues em sectores high-tech como na indústria aeroespacial ou em sectores mais tradicionais como na indústria do calçado [5].

Tabela 1 - Comparação das formas típicas de ligação de materiais [6]

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

O desenvolvimento da tecnologia de adesivos tornou possível a utilização das ligações adesivas em muitos campos de engenharia. Atualmente, nas indústrias, desenvolvem-se componentes que eventualmente terão de ser unidos e, para este fim, projetistas e engenheiros podem optar por vários tipos de união de materiais: soldadura,

aparafusamento, rebiteagem ou ligações adesivas. Em muitos casos, o binómio custo-benefício poderá ser o elemento diferenciador. Na Tabela 1 é feita uma comparação com algumas características das formas de união típicas de materiais.

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Várias questões se colocam às técnicas tradicionais de união de materiais. Entre elas, a durabilidade dos materiais que provoca alterações nas boas práticas de dimensionamento de estruturas e até mesmo a regulamentação de cada indústria. As exigências das indústrias estão em constante evolução, levando a que surjam novos materiais estruturais, mais leves, menos sujeitos a degradação e que exijam menos manutenção [7].

A resistência de uma junta adesiva é determinada principalmente pelas propriedades mecânicas dos materiais que constituem a ligação, pelo comprimento da ligação, e pelas tensões residuais no seio da junta [8]. As juntas adesivas são projetadas tendo em consideração os requisitos de serviço para a mesma, incluindo as tensões a que esta será submetida e as condições ambientais a que será sujeita. Por vezes aplicam-se adesivos em juntas que foram projetadas para outros tipos de ligação, e isso conduzirá a resultados desfavoráveis. Quando as juntas são projetadas para adesivos, são pensadas de modo obterem o melhor rendimento das propriedades do adesivo em questão.

Uma junta adesiva consiste na união de dois corpos, geralmente conhecidos por substratos ou aderentes, através de um adesivo. Os substratos ou aderentes são os materiais, corpos ou componentes a ser ligados através do adesivo. Sucintamente, uma junta adesiva corresponde à zona na qual dois aderentes estão ligados entre si através de um adesivo. É constituída por [1]:

- Aderente – Material, corpo ou componente a ser ligado através de um adesivo. Depois da ligação, o substrato é frequentemente designado por aderente.
- Adesivo – De acordo com a norma DIN EN 923 [9], um adesivo é uma substância não metálica capaz de unir materiais por fixação à sua superfície (i.e. processo de adesão), em que o vínculo estabelecido entre os elementos supõe existência de resistência interna (i.e. coesão).
- Adesão – Atracção entre moléculas/átomos de diferentes substâncias (adesivo/substrato) resultante das forças intermoleculares que se estabelecem entre elas.

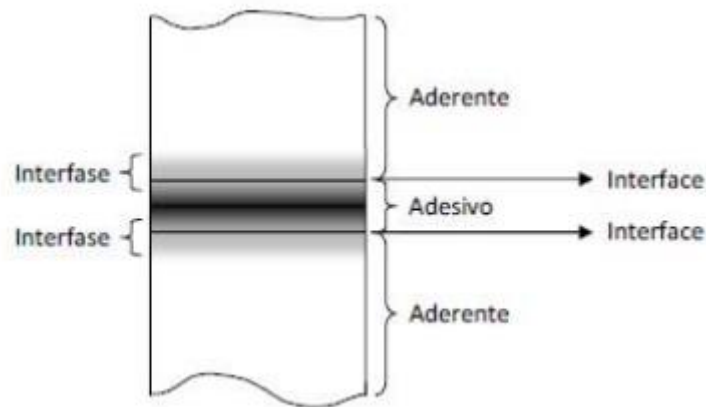


Figura 2 - Representação de uma junta adesiva [1]

- Interfase – É uma fina região na zona de contacto adesivo-aderente. É a região entre o adesivo e o aderente que se estende desde um ponto no aderente onde as propriedades locais (físicas, químicas, mecânicas e morfológicas) começam a alterar-se desde as propriedades do aderente até um ponto no adesivo onde as propriedades locais igualam as propriedades do adesivo. A interface está contida na interfase.
- Interface – Também designada por camada limite, corresponde ao plano de contacto entre duas superfícies de dois materiais como, por exemplo, entre o adesivo e o aderente. Está contida na interfase.

Para a caracterização de juntas adesivas é necessário fazer a distinção entre os conceitos de adesão e coesão., Figura 3 A adesão é a atração entre duas substâncias resultantes das forças intermoleculares que se estabelece entre elas. Por outras palavras, é a responsável por manter dois materiais juntos nas suas superfícies. A coesão está associada às forças intermoleculares que se verificam dentro de uma substância [8].



Figura 3 – Representação dos conceitos de adesão e coesão [10]

As juntas adesivas têm vindo a substituir os métodos tradicionais de ligação tais como ligações aparafusadas, rebitadas ou mesmo soldadas. Podem-se apresentar como principais vantagens das juntas adesivas relativamente aos métodos de ligação mecânica as seguintes [1, 11]:

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 projeto 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 respetiva 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 afetam as propriedades dos materiais, comparando com o processo tradicional de soldadura.

Os principais inconvenientes das ligações adesivas são [1, 11]:

1. Necessidade de um projeto 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 desgorduramento. 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 e ao facto de não existir um critério de dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura. Existem muitos adesivos que só funcionam corretamente quando são aplicados em determinadas situações específicas.

2.1.2 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais distinguem-se entre si quanto à sua natureza, rigidez, resistência mecânica, fragilidade, resistência à ação dos agentes químicos, composição química, modo de endurecimento, custo e desempenho.

Existem vários tipos de adesivos estruturais, e os principais são [11]:

- Adesivos Epóxicos;
- Adesivos Fenólicos;
- Adesivos Acrílicos;
- Adesivos de Poliuretano;
- Adesivos Poliaromáticos.
 - Adesivos epóxicos

Os adesivos epóxicos têm uma vasta aplicação no mercado aeronáutico e automóvel. São adesivos termoendurecíveis bastante versáteis, devido ao facto de terem boa adesão a muitos substratos e poderem ser modificados com facilidade, de forma a atingir um maior leque de propriedades. Têm uma excelente resistência às tensões de tração, ao corte e à fluência, mas são suscetíveis às tensões de arrancamento. São também bastante resistentes ao óleo, humidade e variados solventes. Os epóxicos com cura a altas temperaturas vêm aumentada a sua resistência ao corte e ao meio ambiente mas, em contrapartida, ficam menos tenazes e acentuam ainda mais a sua já fraca resistência ao arrancamento. Estes adesivos são muitas vezes modificados, quando é preciso enaltecere algumas propriedades necessárias para alguma aplicação específica, como por exemplo, o uso de elastómeros para melhorar a resistência ao impacto e ductilidade [11].

- Adesivos Fenólicos

Os adesivos fenólicos são aplicados principalmente na colagem de madeira mas, devido ao seu preço reduzido, boa resistência ao calor e boa estabilidade dimensional, têm também sido usados em calços de travão, discos abrasivos, lixas e moldes de fundição.

São também utilizados para ligar metal a madeira, no entanto, a ligação é frágil e é suscetível de estilhaçar sob impacto ou vibração. Estes adesivos são geralmente aplicados como uma solução em água, álcool ou acetona. Quando aplicados em madeira, dão origem a uma junta geralmente superior a este substrato. Apresentam boa durabilidade, boa resistência a fungos e a água a altas temperaturas. O facto de as baixas temperaturas terem pouco impacto nas suas propriedades, torna este adesivo uma ótima escolha para aplicações exteriores, mesmo em climas frios [3].

Existem ainda os Fenólicos híbridos e, dentro desta categoria, os vinilo-fenólicos que são os adesivos estruturais para metal usados com mais sucesso, isto devido à sua excelente resistência ao corte e arrancamento, sendo possível atingir resistências ao corte de 35 MPa à temperatura ambiente. No entanto, têm uma temperatura de serviço baixa, de apenas 95° C [11].

- Adesivos Acrílicos

Os adesivos acrílicos estão divididos em três grupos [11]: adesivos anaeróbicos, cianoacrilatos e acrílicos modificados.

Os adesivos anaeróbicos são essencialmente líquidos, que polimerizam para formar uma ligação tenaz, quando usados para ligar metais. Estes adesivos podem ligar todos os metais, vidro, cerâmicos e plásticos termoendurecíveis. Os anaeróbicos são apropriados para aplicações estruturais (elevada resistência ao corte em juntas planas) e de maquinaria (elevada resistência em conjuntos roscados e outras juntas). A sua temperatura máxima é de 150°C, podendo alguns resistir a temperaturas de 230°C. Têm boa resistência à humidade e solventes [11].

Os adesivos cianoacrilatos são líquidos de um só constituinte de cura rápida, excelente resistência ao corte e boa *shelf life*. No que diz respeito à cura, são semelhantes aos anaeróbicos, mas têm rigidez mais elevada, embora sejam menos resistentes à humidade. Os cianoacrilatos aderem bem a variados substratos, têm baixa resistência ao calor, assim como ao arrancamento e impacto. A nível estrutural, só são aplicados em locais onde o meio ambiente não é demasiado severo, e que seja precisa uma ligação de execução rápida. Além disso, também são bastante caros [11].

Os acrílicos modificados são geralmente utilizados em operações automatizadas, devido à sua rápida cura e alta resistência (20-35 MPa). Têm também boa resistência ao arrancamento e ao impacto entre os -100 e 120°C, e boa resistência à alta humidade.

- Adesivos de poliuretano

Os adesivos de poliuretano são flexíveis e formam ligações com boa tenacidade. Têm uma elevada resistência ao corte e arrancamento, boa resistência a baixas temperaturas e também boa resistência química. A sua resistência a altas temperaturas (uma vez que a sua temperatura máxima é de 150°C) e quando expostos a altos níveis de humidade, alguns destes adesivos ficam bastante degradados. Os adesivos de poliuretano, devido

à sua boa molhabilidade e flexibilidade, aderem bem a muitos substratos (muito bom em substratos de madeira), e são usados para ligar filmes, folhas metálicas e elastómeros, e são também muito utilizados na indústria automóvel, na adesão de painéis moldados por estampagem.

- Adesivos poliaromáticos

Os adesivos poliaromáticos são usados essencialmente na indústria aeroespacial, devido à sua elevadíssima resistência a altas temperaturas. O seu uso está limitado, devido ao elevado custo e dificuldade de processamento. Nestes adesivos, destacam-se as poliimididas e as bismaleimididas. As poliimididas foram desenvolvidas principalmente pela NASA, e são as que possuem a mais elevada resistência a altas temperaturas, mas também são as que possuem o processamento mais difícil. As bismaleimididas são usadas no fabrico de painéis de circuitos electrónicos, e em aplicações que precisam de uma boa resistência a temperaturas elevadas, mas não tanto como as poliimididas. Devido à sua elevada rigidez, possui uma fraca resistência ao arrancamento. No entanto, são mais fáceis de processar do que as poliimididas [11].

Adesivos			
Estruturais		Não Estruturais	
Fenólicos	Fenólicos - vinilo Fenólicos - nitrilo Fenólicos - policloropreno Fenólicos - neopreno	Borrachas sintéticas	Silicone Policloropreno Nitrilo Polisulfureto
Acrílicos	Anaeróbicos Cianoacrilatos Modificados	Poliésteres Termofusíveis Inorgânicos	
Poliuretanos		Colas de contacto	
Poliaromáticos de alta temperatura	Poliimididas Bismaleimididas Polibenzimidazol		
Melaminas			
Epóxidos	Epóxidos - poliamida Epóxidos - polisulfureto Epóxidos - fenólicos Epóxidos - poliuretano Epóxidos - nitrilo Epóxidos - nylons Epóxidos modificados Epóxidos - polisulfitos Resinas de epóxido		

Figura 4 - Classificação dos adesivos em função do seu desempenho [11]

2.1.3 Aplicações comuns das juntas adesivas

As aplicações relacionadas com as ligações adesivas são, hoje em dia, bastante diversas, e podem ser encontradas em todos os tipos de indústria. A indústria aeronáutica foi uma das precursoras desta tecnologia, tendo sido a principal responsável pelo desenvolvimento de juntas adesivas estruturais.

- Indústria Aeronáutica

A indústria aeroespacial e os adesivos possuem uma relação longa e interessante, isto porque mesmo com a evolução dos diversos tipos de transporte aéreo, as ligações adesivas têm sido fundamentais para o desenvolvimento de cada novo tipo de veículo aéreo. As características das juntas adesivas são favoráveis ao desenvolvimento da indústria aeroespacial. Propriedades como reduzido peso, boa resistência à fadiga, amortecimento de vibração sónica e facilidade em conseguir obter superfícies aerodinâmicas auxiliam o desenvolvimento de veículos aéreos [12]. Na Figura 5 é possível visualizar algumas destas aplicações.

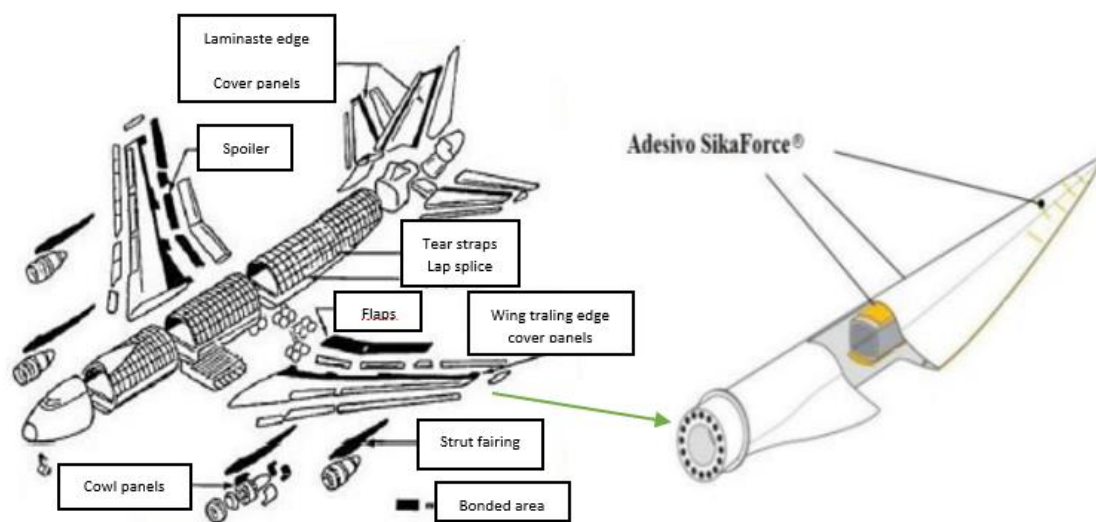


Figura 5 – Representação da utilização de adesivos na construção de um avião [13, 14]

- Indústria automóvel

Na indústria automóvel, a preocupação em reduzir o peso do automóvel para diminuir consumos e aumentar velocidades originou o recurso a materiais leves, como o alumínio ou plásticos reforçados com fibras. Esses materiais são difíceis de ligar pelos métodos tradicionais de fixação, levando os adesivos a constituir-se como o método viável a utilizar (Figura 6).



Figura 6 - Representação de algumas aplicações de adesivo na construção de automóveis [14, 15]

- Indústria eletrônica

Na indústria eletrônica, a aplicação de adesivos torna-se cada vez mais utilizada na produção de circuitos integrados (Figura 7), uma vez que as fixações convencionais de microcircuitos em plástico e cerâmica têm sido substituídas por adesivos condutores anisotrópicos [12].

Atualmente, as estruturas híbridas dos módulos *multichip* são produzidas por meio de adesivos isolantes e resistentes ao calor, utilizados para ligar a estrutura do chip ao substrato de silício (Figura 8) [16].

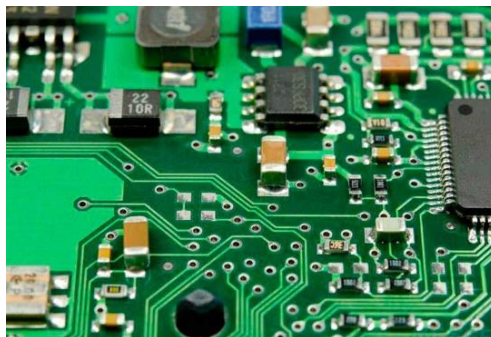


Figura 7- Placa circuito integrado [17]

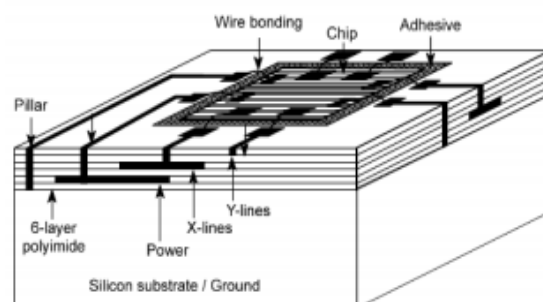


Figura 8 - Esquema de um microchip produzido com recurso a adesivos [16]

- Indústria Naval

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 (Figura 9) [12].



Figura 9 – Representação de duas das aplicações na indústria naval [18]

- Indústria da Construção

A indústria tem testemunhado inúmeros avanços tecnológicos e proliferação de projetos arquitetónicos únicos que promovem o uso de adesivos de construção em edifícios industriais e residenciais. Na indústria da construção existem variadas aplicações, como por exemplo: caixilharia, colagem de madeiras (Figura 10) e selantes (bucha química). Na Figura 11 é apresentada a evolução da receita em dólares do mercado de adesivos de construção por tipo de resina nos EUA. O mercado de adesivos nos EUA foi avaliado em 1,67 biliões de dólares em 2016 e a previsão é de que cresça aproximadamente 5,1% de 2017 a 2025. As resinas acrílicas são as que mais têm crescido uma vez que são flexíveis, não-tóxicas, favoráveis ao meio ambiente e proporcionam excelente aderência. A substituição de juntas soldadas em coberturas e vidraças são o fator principal que alimenta a procura de adesivo acrílico nos EUA.



Figura 10 – Exemplo de colagem de madeira usando adesivo [19]

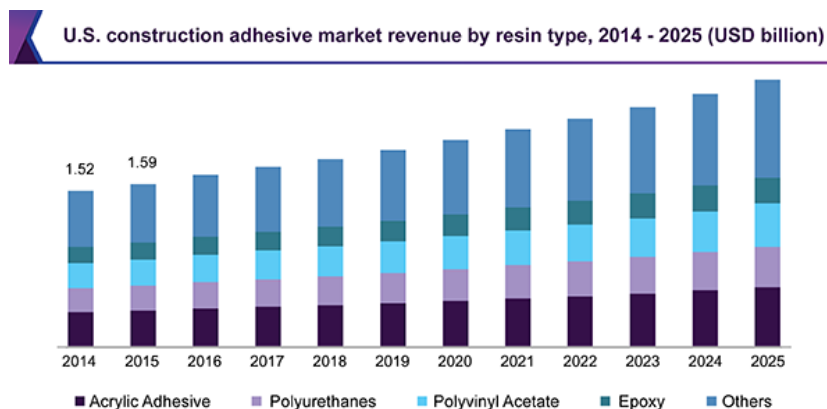


Figura 11 - Evolução da receita em dólares do mercado de adesivos de construção por tipo de resina nos EUA [20]

2.1.4 Esforços tipo em juntas adesivas

Uma ligação adesiva estrutural pode estar sujeita a vários tipos de esforços, tais como (Figura 12) [2]:

- Tração;
- Compressão;
- Corte;
- Clivagem (*cleavage*);
- Arrancamento (*peel*).

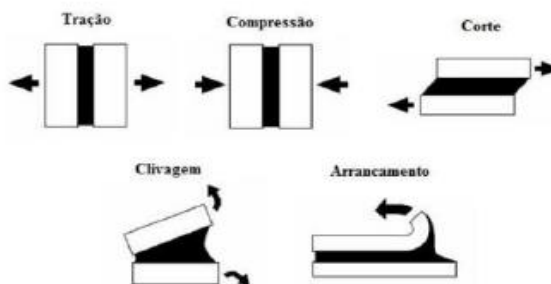


Figura 12 – Representação dos vários esforços de uma ligação adesiva [2]

- Esforços de tração

Os esforços de tração surgem quando forças atuam em sentidos opostos e perpendicularmente ao plano da junta, o que resulta em tensões normais distribuídas uniformemente ao longo da área colada. Na tração, o adesivo sofre picos de tensão nas suas extremidades (Figura 13), sendo portanto essas as zonas críticas da junta, e as zonas mais sujeitas ao início de dano. A mais pequena fenda que possa surgir nessas bordas da área colada irá propagar-se até ao colapso total da ligação. Se a junta for bem projetada, demonstrará boa resistência à tração devido à melhor distribuição de carga, paralelismo de substratos, e cargas alinhadas axialmente [8]. No entanto, nas aplicações práticas, a tolerância da espessura do adesivo é difícil de controlar, o que pode impedir a total axialidade de cargas, levando ao aparecimento indesejável de esforços de clivagem ou de arrancamento. Os substratos também devem possuir a rigidez necessária, para que a tensão seja distribuída somente sobre a área colada, interferindo assim o menos possível na transferência de tensões [8, 21].

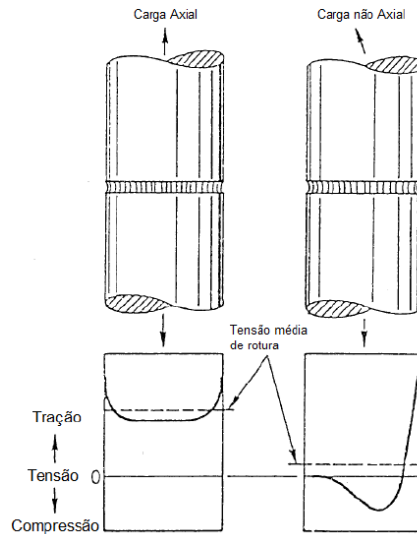


Figura 13 - Distribuição da tensão normal (σ_n) numa junta topo a topo sob carregamento axial e não axial [8]

- Esforços de Compressão

Neste tipo de esforços, a força é aplicada em sentido oposto à força de tração. Tal como acontece na tração, neste tipo de esforços também é necessário manter as cargas alinhadas, de modo a ocorrerem na junta esforços puramente compressivos. Um adesivo sob compressão dificilmente rompe, a não ser em alguns pontos fracos devido à distribuição desigual de tensões. Na verdade, uma junta em compressão pura praticamente não necessita de adesivo [8]. Se a força de compressão for suficientemente elevada, e não houver movimento relativo entre substratos (na direção perpendicular à da aplicação das forças), estes irão assim permanecer durante a solitação, não ser que o adesivo falhe atingindo a ruptura [8, 22]. A distribuição das tensões é constante em toda a junta (Figura 14), e esta só rompe se a distribuição das tensões não for uniforme.

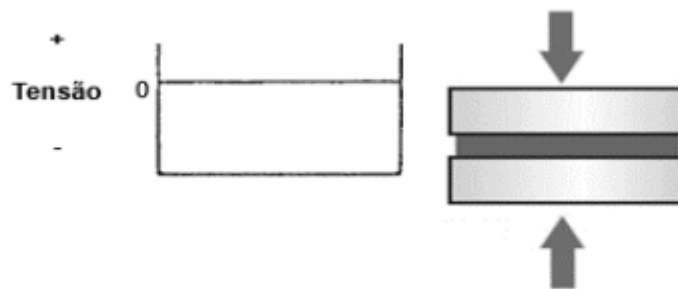


Figura 14 – Esquema de carregamento e distribuição de tensões em esforços de compressão [8]

- Esforços de corte

Os esforços de corte resultam de forças que atuam no plano do adesivo que tentam separar os substratos. As juntas fabricadas para operarem em condições de

carregamento de corte são relativamente fáceis de produzir e são também das mais utilizadas [8]. Verifica-se também que os adesivos são geralmente mais resistentes quando solicitados a esforços de corte, devido a toda a área colada contribuir para a resistência da junta [8]. Para além disso, os substratos mantêm-se facilmente alinhados. A Figura 15 representa uma JSS, a mais utilizada para solicitação ao corte.

Como se verifica na Figura 15, a tensão mais elevada ocorre nas extremidades da sobreposição, enquanto no centro a tensão tem o seu valor mais baixo. Portanto, a zona central do adesivo contribui menos para a resistência da junta. Na realidade, dependendo da geometria da junta e das propriedades físicas do adesivo, duas tiras de adesivo colocadas em cada extremidade da sobreposição poderiam proporcionar a mesma resistência de junta do que a aplicação de adesivo ao longo da totalidade de L_0 .

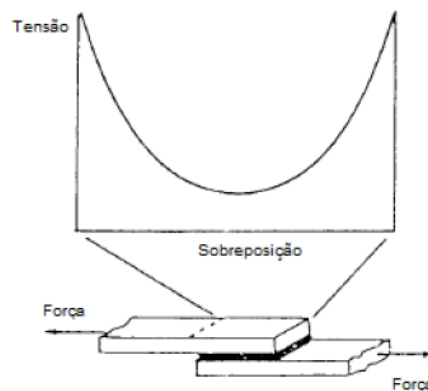


Figura 15 - Distribuição da tensão (τ_{xy}) numa JSS solicitada à tração [8]

Esta distribuição é característica das tensões τ_{xy} e deve-se a fenómenos relacionados com a variação da deformação axial dos aderentes ao longo de L_0 . Assim, dois aderentes em sobreposição, com comportamentos opostos no que respeita à deformação, originam picos de tensões τ_{xy} em ambas as extremidades de sobreposição [23].

O aumento da largura de sobreposição tem uma maior importância na resistência da junta que o seu comprimento, visto que proporciona um acréscimo da área de colagem nas extremidades onde as concentrações de tensões são maiores. Na verdade, também o L_0 contribui para um aumento da resistência da junta, mas a uma taxa decrescente, devido ao efeito mais acentuado da deformação diferencial dos aderentes com o aumento deste parâmetro (Figura 16) [21].

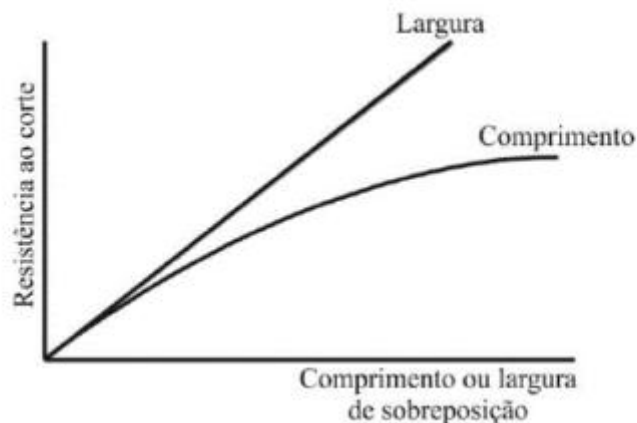


Figura 16 - Resistência ao corte vs. comprimento e largura de sobreposição [21]

- Esforços de clivagem e arrancamento

A clivagem e o arrancamento são esforços indesejáveis em juntas adesivas. A clivagem define-se como o tipo de esforço que surge quando forças aplicadas numa das extremidades da junta atuam de modo a separar os substratos um do outro [8]. Este tipo de esforço ocorre em substratos rígidos. No arrancamento, as tensões σ_y são semelhantes às de clivagem, mas ocorrem em juntas onde um ou ambos os substratos são flexíveis [21]. Subsequentemente, o ângulo de separação entre substratos (Figura 17) tende a ser muito superior no carregamento por arrancamento do que no carregamento por clivagem.

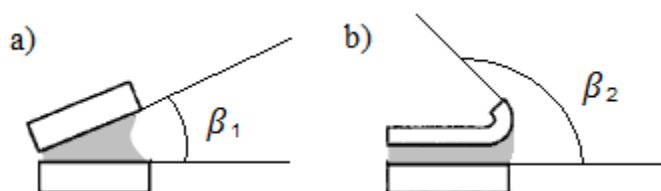


Figura 17 - Ângulo de separação entre substratos sob esforço: a) de clivagem b) arrancamento [24]

As juntas carregadas sob clivagem ou arrancamento oferecem muito menor resistência do que as juntas carregadas em corte, porque apenas uma pequena área da junta está a ser solicitada [8]. A distribuição de tensões numa junta sob esforço de clivagem encontra-se representada na Figura 18 à esquerda.

Uma grande parte da tensão está localizada na extremidade direita da junta, que corresponde à região que está a suportar a carga. A outra extremidade encontra-se também sob alguma tensão, mas muito inferior à tensão limite de resistência da junta. Também em esforços de arrancamento (Figura 18 à direita) se verifica a mesma situação, embora a tensão se encontre ainda mais concentrada no final na extremidade solicitada [8, 11, 21].

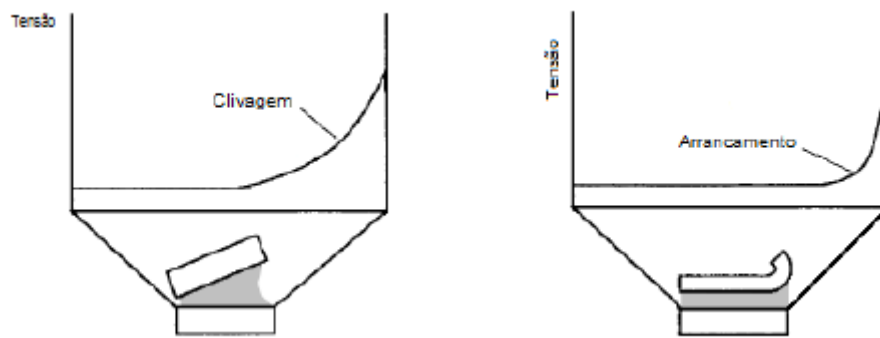


Figura 18 - Distribuição de tensão numa junta carregada em clivagem (à esquerda) e arrancamento (à direita) [21]

Os adesivos frágeis apresentam pouca resistência ao arrancamento porque a tensão fica localizada praticamente numa linha ou numa área muito restrita da extremidade da sobreposição [11]. A falta de flexibilidade do adesivo rígido não permite uma distribuição de tensões ao longo da área de sobreposição, à medida que a junta é solicitada, concentrando as tensões numa área equivalente ao valor da espessura do adesivo utilizado [8]. Por outro lado, os adesivos flexíveis permitem distribuir as tensões σ_y por uma área de ligação mais extensa, garantindo assim maior resistência às forças de arrancamento [8].

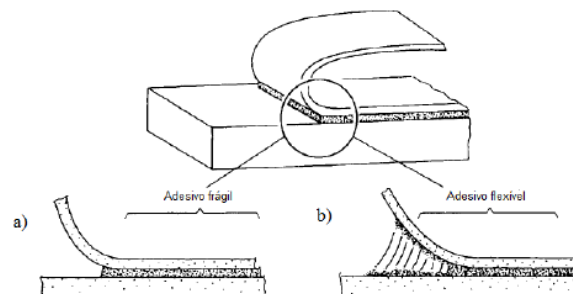


Figura 19 - Junta submetida a esforços de arrancamento: a) com adesivo frágil; b) com adesivo flexível [8]

Conforme obtido por Petrie [8], os adesivos frágeis de epóxido conseguem garantir resistência a tensões τ_{xy} superior a 18 MPa, mas quando solicitados ao arrancamento, o comportamento é diferente, conseguindo apenas suportar tensões máximas na ordem dos 0,35 N/mm (Figura 19). Comparativamente, os adesivos flexíveis (Figura 19), pela sua maior tenacidade, são os indicados para esforços de arrancamento, conseguindo resistências entre 4,38 N/mm e 8,76 N/mm.

2.1.5 Modos de rotura

As ligações adesivas têm como intuito a transmissão de carga entre os dois componentes ligados, mantendo a integridade da estrutura, quando sob solicitação estática e/ou dinâmica e condições ambientais adversas, como humidade e temperatura. Como forma de aferir o comportamento e sucesso no fabrico deste tipo de ligações, é fundamental a correta avaliação dos modos de rotura induzidos nas juntas coladas. De um modo geral, e seguindo a norma ASTM D 5573 – 99 [25], podem distinguir-se quatro modos de rotura diferentes em juntas adesivas (Figura 20):

- Rotura do substrato, ocorre num dos aderentes devido a esforços de tração;
- Rotura adesiva, na interface entre o aderente e o adesivo;
- Rotura coesiva, no interior do adesivo;
- Rotura mista, existência de zonas de rotura coesiva e outras de rotura adesiva na zona de ligação.

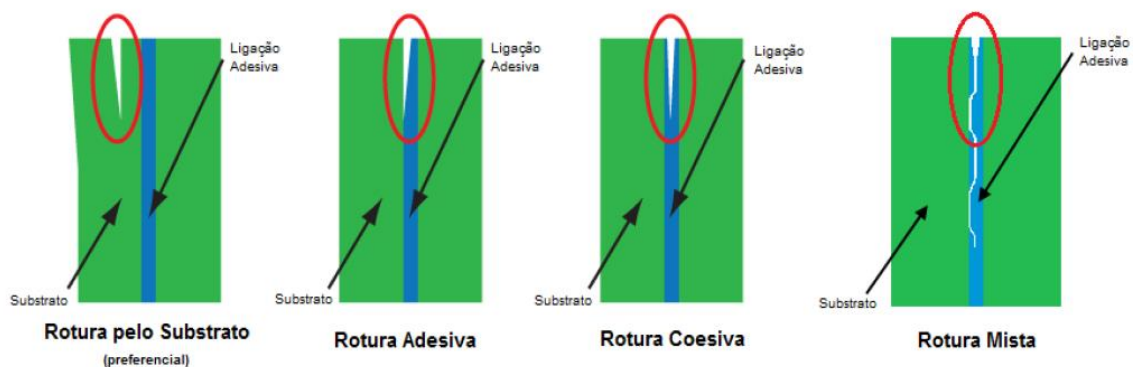


Figura 20 - Modos de rotura em ligações adesivas [26]

- Rotura do substrato:

Este modo de rotura dá-se quando a resistência do adesivo é superior à resistência dos aderentes, o que resulta na rotura destes, enquanto o adesivo se mantém intacto, (Figura 21) [27].



Figura 21 - Representação da rotura do aderente [27]

Normalmente a rotura ocorre somente num dos substratos. Apesar de ser o caso preferível, é o que menos se verifica. Dentro das possíveis causas podem estar [28]:

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

É caracterizada pela ocorrência de rotura na interface entre o adesivo e um dos aderentes, e também é conhecida por falha interfacial (Figura 22). Após a rotura, a superfície de um dos aderentes não apresenta indícios de adesivo. Por outro lado, a superfície de rotura do outro aderente apresenta-se coberta de adesivo. Segundo Adams [25], este será provavelmente um dos tipos de rotura mais críticos. As condições ambientais poderão ser propícias à degradação da zona de interface da junta, conduzindo a este tipo de rotura, pelo que é sempre aconselhado um pré-tratamento superficial. As preparações de superfície podem consistir em [11, 29]:

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



Figura 22 - Representação da rotura adesiva [27]

A preparação de superfície deve ser sempre efetuada com grande rigor, uma vez que esta fase de tratamento superficial está diretamente ligada à resistência final da junta adesiva. Este tipo de rotura pode acontecer devido à má preparação superficial, má seleção do adesivo ou mesmo até a um processo de cura que não o adequado [11].

- Rotura coesiva

Este tipo de rotura caracteriza-se pela fratura no interior do adesivo. A ligação entre o adesivo e o substrato é notoriamente mais forte quando comparada com a resistência interna do próprio adesivo. Neste tipo de rotura as superfícies de rotura estão ambas cobertas por adesivo [1].

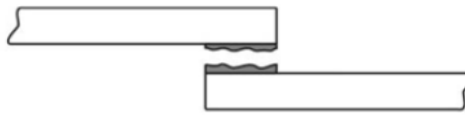


Figura 23 – Representação da rotura coesiva [27]

É o tipo de rotura que ocorre no próprio adesivo e caracteriza-se pela remanescência de adesivo em ambas as superfícies do substrato (Figura 23). Algumas possíveis causas [28]:

- A ligação adesiva foi submetida a tensões de trabalho superiores às quais foi projetada;
- O utilizador não respeitou o tempo de cura, principalmente em adesivos de um só componente (existentes no estado sólido, pré-misturados, mas não ativados) [30];
- Defeitos na cura do adesivo;
- Defeitos do adesivo (bolhas, porosidades, entre outros);
- Fenómenos de envelhecimento na ligação adesiva.

- Rotura mista

A rotura mista consiste na combinação de rotura coesiva e adesiva da camada de adesivo. Ocorre na zona de ligação entre o adesivo e o substrato e no interior do próprio adesivo. Vários fatores podem ser apontados para ocorrer rotura mista, destacando-se uma limpeza ineficaz da superfície a ligar em zonas específicas da ligação, deficiência na mistura do adesivo, processo de cura não adequado e concentrações de tensões em determinadas zonas [1, 29].



Figura 24 – Representação da rotura mista [27]

2.1.6 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 25 ilustra os tipos de ligações adesivas mais comuns [11].

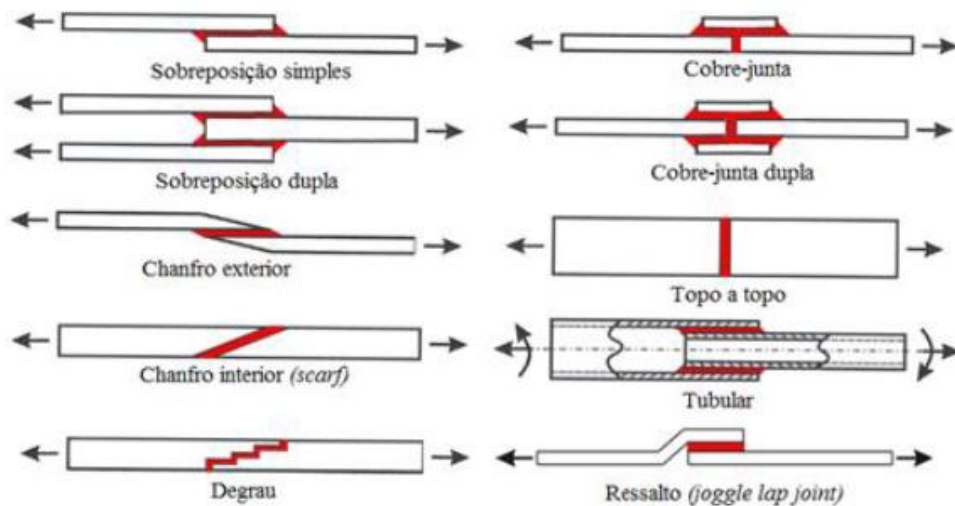


Figura 25 - Diferentes configurações de juntas adesivas [11]

- Juntas de sobreposição simples (JSS)

As JSS são as mais utilizadas na indústria, pois são simples de fabricar e o adesivo é solicitado maioritariamente ao corte. No entanto, registam-se efeitos de flexão, que originam o aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo (arrancamento). Nas extremidades ocorre um efeito de entalhe causado pela mudança brusca da geometria. Os dois efeitos combinados (flexão e mudança brusca da secção) ocorrem na zona mais crítica, provocando concentração de tensões (Figura 26), e uma redução na resistência da junta. Para minimizar este problema pode recorrer-se a JSD, em que os efeitos da flexão são consideravelmente inferiores [31, 32].

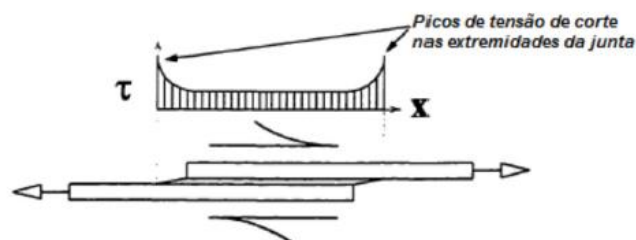


Figura 26 - Picos de tensão de corte nas extremidades das JSS [32]

- Juntas de sobreposição dupla (JSD)

De modo a minimizar os efeitos da flexão, podem ser consideradas JSD (Figura 27). Todavia, o seu processo de fabrico é mais demorado e nem sempre é possível utilizar esta configuração de junta [32]. As JSD apresentam uma configuração simétrica que se supõe isenta de flexão. No entanto, na linha de adesão podem desenvolver-se tensões de tração e compressão, desde que os substratos exteriores sofram flexão [32].



Figura 27 – Representação de uma junta de sobreposição dupla [1]

- Juntas topo a topo.

Das configurações apresentadas, as juntas topo-a-topo são as mais simples de fabricar, embora não sejam as que apresentam melhores resultados (Figura 28). Estas juntas apresentam elevadas concentrações de tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da ligação, e não resistem a esforços de flexão, porque o adesivo fica sujeito a clivagem.

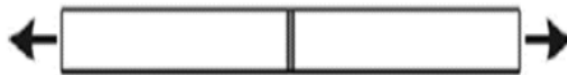


Figura 28 -Representação de uma junta topo a topo [1]

- Juntas de chanfro interior (*scarf*) e degrau

A junta de chanfro interior, assim como a junta em degrau (Figura 29), produz a diminuição da variação de tensões ao longo do adesivo, aumentando a sua resistência. A significativa diminuição da excentricidade dos esforços também contribui para este facto [31]. A dificuldade de maquinar os degraus ou as rampas encarece o seu processo de fabrico [33]. Com substratos em compósito, torna-se mais económico e comum realizar os degraus durante o empilhamento antes da cura, eliminando assim as operações de maquinagem [34]. De salientar que serão as juntas em degrau que irão ser estudadas em detalhe.



Figura 29 – Representação de uma junta de chanfro interior (à esquerda) e de grau (à direita) [1]

- Juntas de chanfro exterior

As juntas com chanfros exteriores foram desenvolvidas para reduzir os picos de tensão que ocorrem nas extremidades das JSS [1, 11]. Com esta modificação há uma diminuição da concentração de tensões e uma distribuição mais uniforme das mesmas (Figura 30) [35].

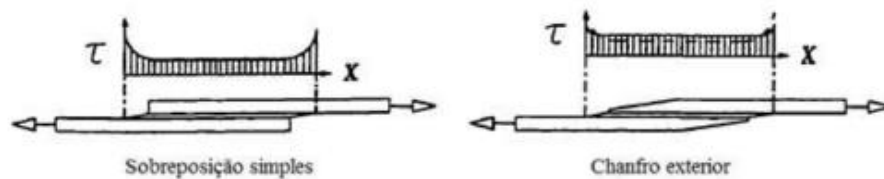


Figura 30 - Distribuição da tensão de corte nas JSS e na junta de chanfro exterior [35]

- Juntas cobre-junta e cobre-junta dupla

Tal como nas JSS, as juntas com reforço simples (Figura 31) também estão sujeitas a esforços de arrancamento, embora apresentem uma resistência superior às JSS. Nas juntas com reforço duplo (Figura 31) o momento-fletor é menor, o que torna preferível esta geometria. Esta configuração de junta é usada em reparações da fuselagem de aeronaves com remendos de alumínio ou compósitos [1, 11].



Figura 31 – Representação das juntas cobre-junta e cobre-junta dupla [27]

- Juntas tubulares

A junta tubular possibilita a união de tubos que podem ter a extremidade plana ou em chanfro. Esta geometria de junta resulta numa boa resistência a esforços de tração e de compressão. Contudo, caso não haja um perfeito alinhamento relativamente ao eixo de revolução, podem-se gerar esforços de arrancamento. De forma a tentar eliminar esses esforços, normalmente utilizam-se chanfros, canais e ressaltos, facilitando a montagem dos componentes, aumentando a área de contacto e a resistência ao arrancamento por efeito mecânico (Figura 32). A inacessibilidade ao seu interior impossibilita a sua inspeção. Algumas das soluções para assegurar que o adesivo preenche toda a cavidade são a utilização de orifícios para a injeção do adesivo e a abertura de canais para facilitar a saída do ar [35, 36].

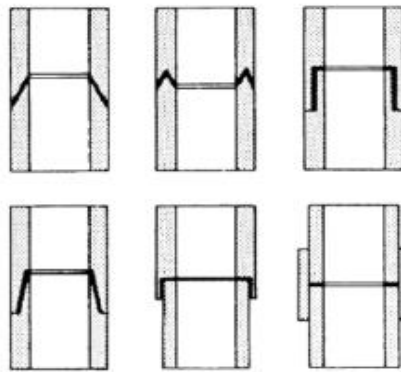


Figura 32 - Uniões em tubos para cargas axiais e torsionais [36]

- Juntas com ressalto

A dificuldade de centrar a aplicação da carga em JSS conduziu ao fabrico de juntas de ressalto, uma solução simples e eficaz para garantir o alinhamento das forças. O fabrico deste tipo de juntas torna-se um processo agreste caso sejam usados materiais frágeis ou de alta resistência (Figura 33) [8].



Figura 33 – Representação de uma junta com ressalto [27]

2.1.7 Alterações geométricas mais comuns em juntas adesivas

Para que uma junta adesiva apresente a máxima rentabilidade, a solicitação do adesivo deverá sempre ocorrer na direção de maior resistência à rotura. Porém nem todas as geometrias permitem obter esta condição. Desta forma, neste capítulo serão apresentadas algumas alterações e estratégias utilizadas na produção deste tipo de ligações que otimizam o seu desempenho e rendimento.

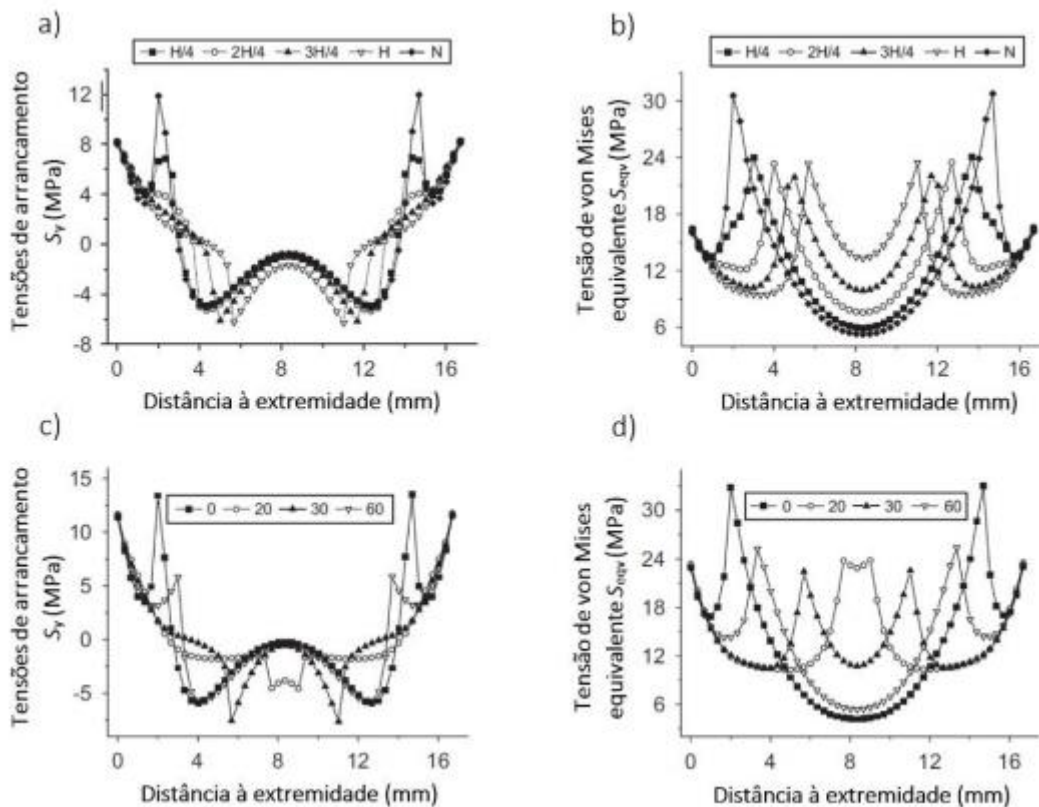
2.1.7.1 Chanfros dos aderentes

Os chanfros interiores (Figura 34) permitem a diminuição da variação de tensões ao longo do adesivo. Min You et al. [37] estudaram a influência da altura e do ângulo e a distribuição das tensões em JSS utilizando vários adesivos com diferentes módulos de elasticidade. Este estudo teve como base uma análise numérica, com recurso ao método dos elementos finitos com elementos elasto-plásticos, e validação com ensaios experimentais.



Figura 34 - Representação de uma junta de chanfro interior [1]

Observando-se os gráficos da Figura 35, verifica-se que os picos das tensões na secção intermédia da sobreposição diminuem consideravelmente com a variação da altura e ângulo do chanfro, resultado da existência do chanfro.

Figura 35 - Efeito da altura do chanfro na distribuição das tensões na junta (a) tensões σ_y (b) tensão de von Mises equivalente [37]

Analisando os picos mais próximos da extremidade dos aderentes verifica-se que estes não apresentam uma diferença muito significativa, nem com o aumento da altura do chanfro nem com o aumento do ângulo, contudo é de notar que as tensões σ_y diminuem gradualmente enquanto as tensões de von Mises equivalente aumentam depois de uma descida inicial.

De forma analisar a influência do módulo de elasticidade, foram analisadas juntas sob as mesmas condições, ou seja, com $h=H$ e $\Theta=30^\circ$ (Figura 36).

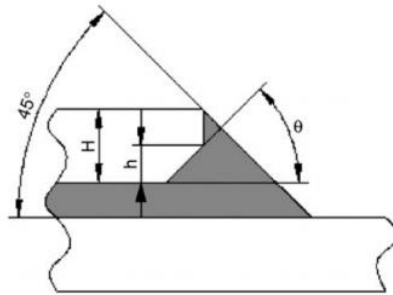


Figura 36 -Representação do chanfro interno na extremidade do aderente [37]

Com ensaios experimentais comprovou-se que o ângulo que permite obterem os valores mínimos das tensões de pico foram obtidos sob as condições de $h=H$ e 30° , onde as maiores tensões τ_{xy} foram registadas nessas mesmas condições (Figura 37).

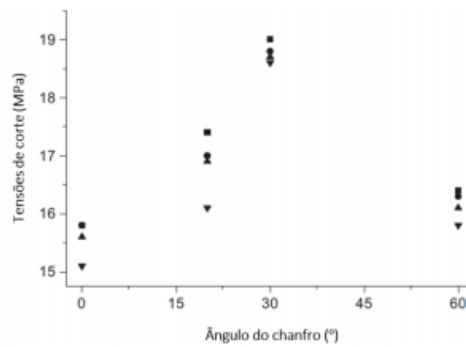


Figura 37 Tensões τ_{xy} obtidas experimentalmente com a variação do ângulo do chanfro [37]

Deste modo, conclui-se que o uso de um adesivo de baixo módulo de elasticidade resulta numa redução dos picos de tensões perto das extremidades dos filetes (Figura 38). Para além disso, também o pico da tensão σ_y registada foi menor na parte central da sobreposição. Contudo, o pico das tensões de von Mises equivalente aumentou significativamente.

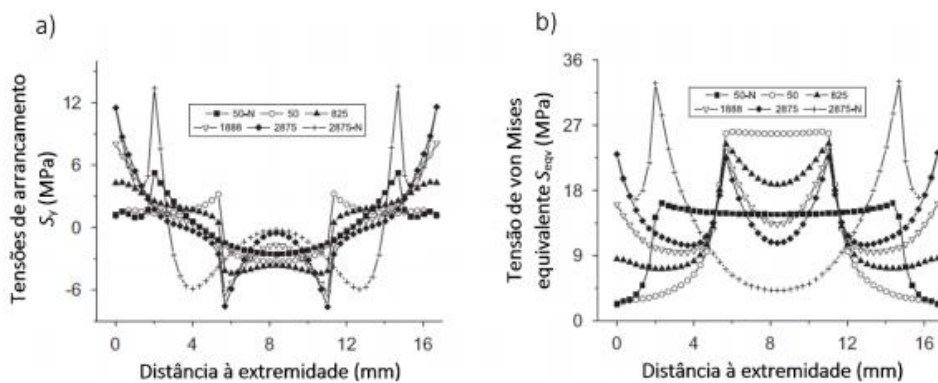


Figura 38 - Efeito do módulo de elasticidade em juntas adesivas com chanfro [37]

No caso da utilização de um adesivo com elevado módulo de elasticidade, a presença de um chanfro permite a diminuição dos picos de tensão, como se verifica na figura anterior, pois estas tensões são transferidas para a zona de sobreposição.

Também neste caso os resultados da simulação numérica estavam de acordo com os resultados experimentais (Figura 39).

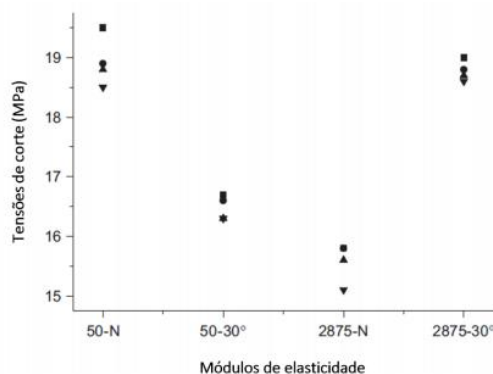


Figura 39 – Tensões τ_{xy} obtidas experimentalmente com a variação do módulo de elasticidade [37]

Na situação de utilização de chanfros exteriores, Golewski e Sadowski [38] realizaram um estudo numérico no qual relacionaram a resistência e as tensões desenvolvidas numa JSS com o dimensão do chanfro. Para concretização deste estudo foi formulado um modelo de EF 3D e submetido a uma deformação uniaxial quase estática, ou seja, uma análise não linear com recurso ao Abaqus®.

Para avaliar a influência dos chanfros foram analisados os resultados obtidos através da variação do parâmetro C representado na Figura 40.

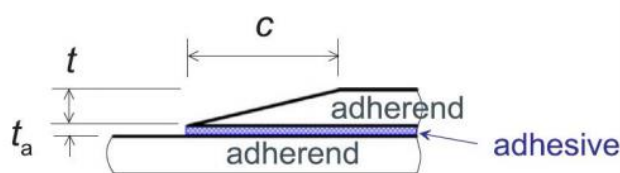


Figura 40 - Representação da geometria do chanfro e as suas dimensões [38]

No estudo em causa, o valor de C variou desde 1 mm até 10 mm, onde em cada modelo o incremento era de 1 mm. Os resultados do estudo são apresentados em relação a uma variável adimensional ($ch=c/t$).

Como é possível observar-se na Figura 41 a), o uso de chanfro reduz significativamente a tensão normal (σ_{zz}) instalada na junta, em quase 3 vezes. Caso idêntico acontece com

as tensões τ_{yz} , em que o aumento do parâmetro ch contribui para uma diminuição de aproximadamente 39% (Figura 41 b).

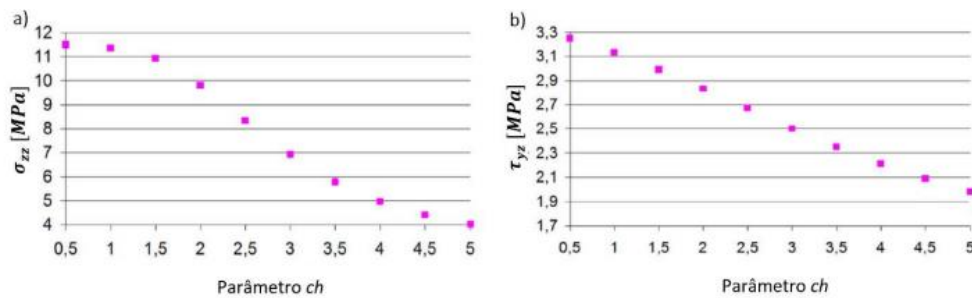


Figura 41 - Distribuição a) das tensões σ_{zz} e b) das tensões τ_{yz} numa junta com chanfros exteriores

Relativamente à resistência da junta, a Figura 42 indica que para valores de ch inferiores a 2, o uso de chanfros exteriores não tem qualquer impacto na sua capacidade de carga. Contudo, para $ch > 2$, a presença de chanfros nos aderentes resulta num aumento significativo da resistência da junta. Isto poderá resultar do facto de as tensões σ_{zz} na camada de adesivo terem sofrido uma redução considerável.

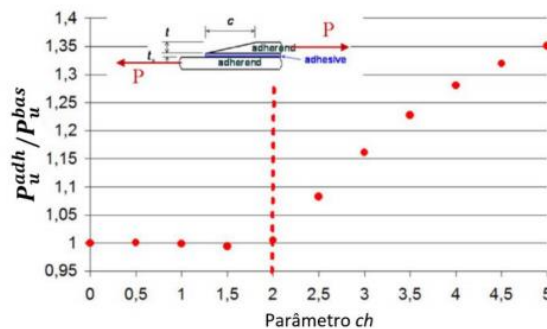


Figura 42 – Efeito do parâmetro ch na resistência de juntas com chanfros exteriores [38]

2.1.7.2 Filetes de adesivo

De acordo com Harris e Adams [39], a existência de um filete de adesivo (Figura 43) otimiza o comportamento da junta, já que se consegue uma diminuição dos picos de tensão verificados nas extremidades da sobreposição. Este tipo de geometria causa a diminuição local das tensões instaladas no adesivo e também no substrato, particularmente as tensões de arrancamento.

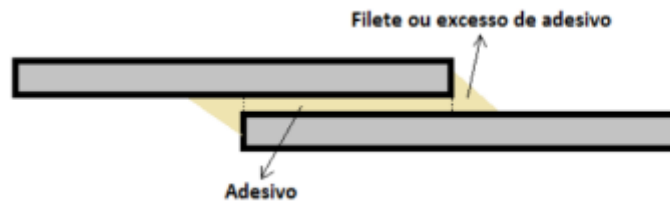


Figura 43 – Representação de uma JSS com filete de adesivo [11]

A presença de um filete adesivo permite reduções dos picos de tensão em cerca de 50% (Figura 44) uma vez que permite uma transferência de tensão mais suave. Desta forma esta geometria permite um aumento da resistência da junta, em particular em adesivos frágeis.

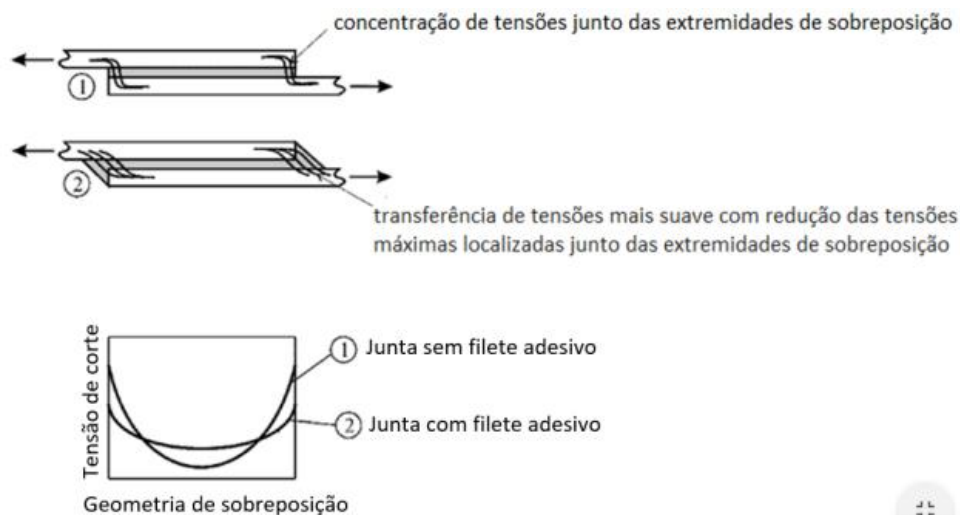


Figura 44 – Representação da distribuição de tensões locais junto das extremidades de sobreposição na presença de filete de adesivo [40]

2.1.7.3 Utilização de degraus

Uma outra possibilidade para aumentar a resistência de uma junta adesiva é utilização de degraus na zona de sobreposição, sendo estas denominadas por juntas em degrau (*stepped-lap joint*). Este tipo de geometria encontra-se em fase de estudo para determinação das suas possíveis aplicações. De seguida serão apresentados alguns dos trabalhos desenvolvidos com maior relevância no âmbito deste tipo de junta.

Um dos estudos mais conhecidos foi desenvolvido por Ichikawa et al. [41], um trabalho numérico onde se pretendia analisar a distribuição de tensões e realizar a previsão da resistência deste tipo de junta quando sujeita à tração.

No trabalho numérico realizado através do método EF tridimensional, foi estudada a influência dos seguintes parâmetros na distribuição de tensões e resistência da ligação:

- Espessura do adesivo;
- Número de degraus.

A análise EF foi realizada recorrendo ao software ANSYS®, considerando o regime elasto-plástico de deformação do adesivo, e consistiu no estudo da distribuição de tensões nas interfaces e da previsão de resistência da junta. Para aprovação dos resultados numéricos obtidos e avaliação da capacidade do método EF aplicado na previsão da resistência, foram ainda efetuados ensaios experimentais onde se registaram os valores das deformações e respetivos valores de carga de rotura da ligação, para comparação e debate de resultados.

Na Figura 45 está apresentado o modelo tridimensional, seguido por Ichikawa et al. para o cálculo da distribuição de tensões e para a previsão da resistência de juntas adesivas em degrau através do método EF, quando sujeitas à tração.

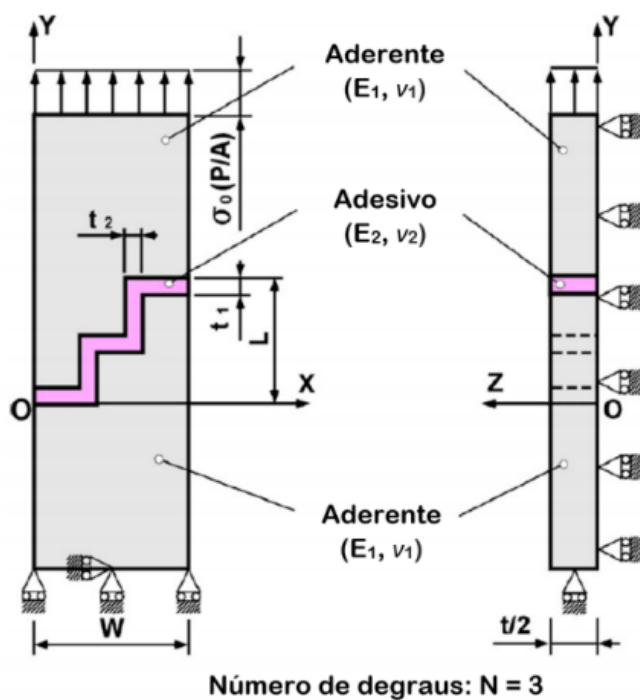


Figura 45 – Representação do modelo utilizado para os cálculos de EF de uma junta em degrau [41]

Todas as variáveis e outros parâmetros observados na Figura 45, encontram-se definidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados e respectivas dimensões utilizadas no estudo de Ichikawa et al. [41]

Parâmetro	Dimensão
E_1	Módulo de Young do aderente
ν_1	Coefficiente de Poisson do aderente
E_2	Módulo de Young do adesivo
ν_2	Coefficiente de Poisson do adesivo
t_1	Espessura do adesivo na direção segundo eixo y (camada adesiva transversal ao carregamento)
t_2	Espessura do adesivo na direção segundo eixo x (camada adesiva longitudinal ao carregamento)
N	Número de degraus
W	Largura do provete
t	Espessura do provete

Para determinação da resistência da junta quando sujeita a tensões de tração, os cálculos desenvolvidos no método EF foram efetuados no intervalo elasto-plástico do adesivo. A resistência da junta foi prevista pelo critério da tensão principal máxima, ou seja, quando o valor da tensão principal máxima (σ_1) na extremidade da interface do adesivo atinge a tensão de rotura do adesivo (σ_c) sujeito à tensão tração (σ_0), este valor da tensão de tração (σ_0) é definido como sendo o valor da resistência da junta. Para verificação dos resultados obtidos pelo método EF, foram realizados ensaios experimentais de forma a comparar os valores de deformação e resistência.

Na Figura 46 está representado o gráfico relativo à distribuição de cada componente de tensão na interface do adesivo transversal ao carregamento. A abcissa é normalizada pela distância x/W da junta e a ordenada representa o valor de cada componente de tensão σ_x ; σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} e τ_{zx} .

Na Figura 47 representa-se o gráfico obtido pelo método EF relativo à distribuição de cada componente de tensão na interface do adesivo longitudinal ao carregamento. A abcissa é normalizada pela distância y/L da junta e a ordenada representa o valor das componentes de tensão σ_x ; σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} e τ_{zx} .

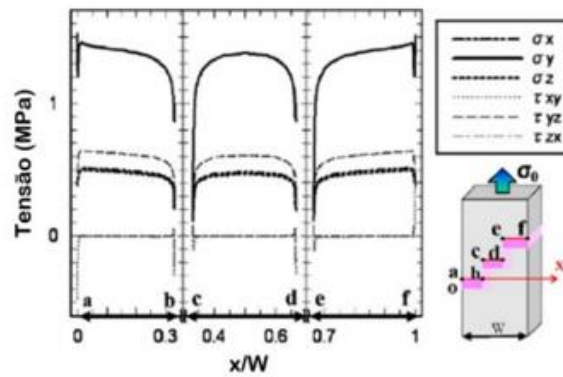


Figura 46 - Distribuição de cada componente de tensão: interface adesiva transversal ao carregamento [41]

Na Figura 47 representa-se o gráfico obtido pelo método EF relativo à distribuição de cada componente de tensão na interface do adesivo longitudinal ao carregamento. A abcissa é normalizada pela distância y/L da junta e a ordenada representa o valor das componentes de tensão σ_x ; σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} e τ_{zx} .

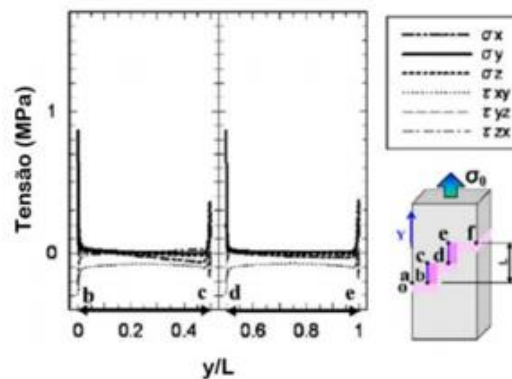


Figura 47 - Distribuição de cada componente de tensão: interface adesiva longitudinal ao carregamento [41]

Pela análise dos dois gráficos anteriores pode notar-se que a componente de tensão σ_y é maior nas interfaces do adesivo transversais ao carregamento, uma vez que a direção da componente de tensão σ_y é a mesma que a da direção da carga (σ_0). Por outro lado, verifica-se que a componente de tensão σ_y na interface longitudinal ao carregamento do adesivo é aproximadamente nula ao longo do comprimento de sobreposição, com exceção das suas extremidades em que se verificam picos de tensão. Desta forma, e uma vez que o valor de componente de tensão na interface do adesivo transversal ao carregamento é maior que o verificado na interface longitudinal, conclui-se que o processo de rotura da junta se inicia nas arestas exteriores da interface do adesivo transversal ao carregamento.

Na Figura 48 está representado o gráfico obtido pelo método EF relativo à normalização da distribuição da tensão principal máxima σ_1/σ_0 , na interface superior (*upper*) e inferior (*lower*) e respetivo plano médio (*middle*) da camada adesiva transversal ao carregamento. A abcissa é normalizada pela distância x/W na direção segundo o eixo x e a ordenada representa o valor normalizado da máxima tensão principal σ_1/σ_0 .

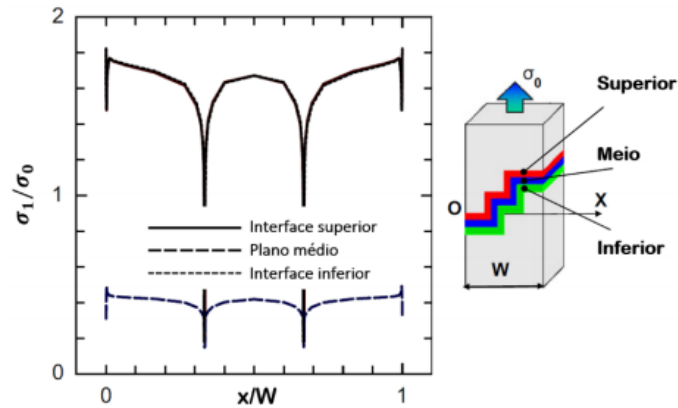


Figura 48- Distribuição da tensão σ_1/σ_0 para a interface superior, inferior e plano da camada média [41]

Pela análise gráfica é verificado que a máxima tensão principal normalizada σ_1/σ_0 atinge o seu valor máximo nas extremidades da interface do adesivo superior. No que diz respeito às tensões instaladas no plano médio e interface inferior da camada adesiva, estas assumem valores relativamente baixos comparativamente com interface adesiva superior. De referir que a diferença entre a distribuição de tensões entre a interface transversal ao carregamento superior é menos de 1%.

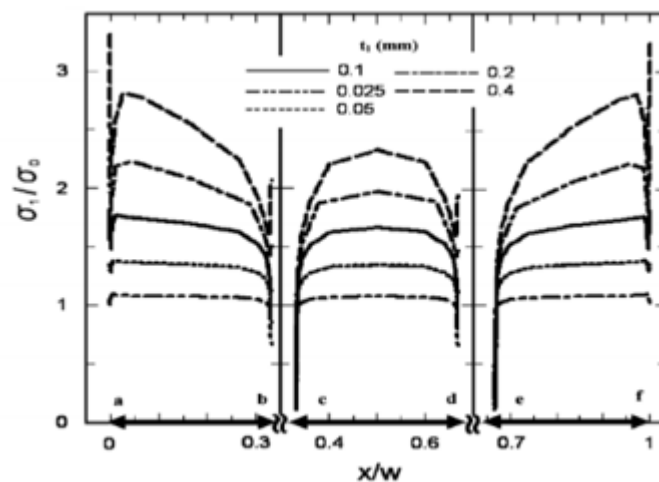


Figura 49 – Efeito da espessura de adesivo t_1 na máxima tensão principal normalizada σ_1/σ_0 : na interface adesiva transversal ao carregamento superior [41]

O gráfico da Figura 49 representa a sequência do efeito da variação da espessura t_1 de adesivo na distribuição da tensão principal máxima normalizada σ_1/σ_0 nas interfaces transversais ao carregamento do adesivo. A espessura t_1 foi feita variar entre 0,05; 0,1; 0,2 e 0,4 mm nos modelos processado pelo método EF. Como se pode observar pela Figura 49 os picos de tensão localizam-se no ponto “a” ($x/W=0$) e no ponto “f” ($x/W=1$).

A Figura 50 representa a evolução gráfica do efeito da variação da espessura de adesivo t_1 na distribuição de tensões normalizadas σ_1/σ_0 perto da aresta da interface do adesivo transversal ao carregamento. A tensão máxima normalizada σ_1/σ_0 decresce à medida que o valor de t_1 decresce, pelo que se pode concluir que, em termos de resistência da junta, esta pode ser aumentada pela diminuição da espessura t_1 do adesivo.

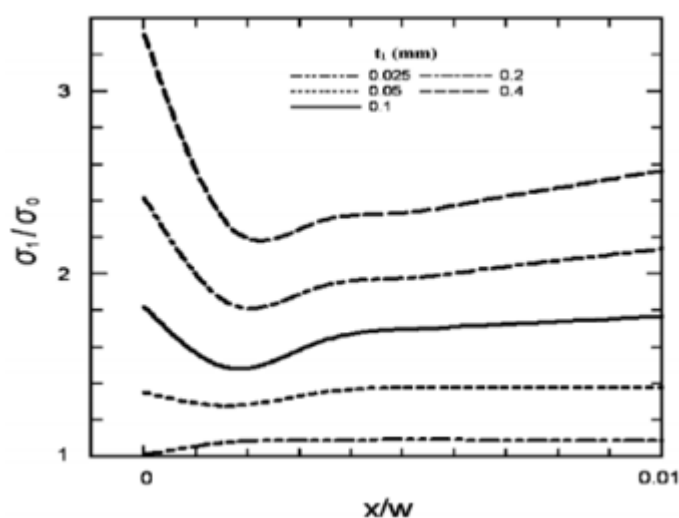


Figura 50 - Efeito da espessura de adesivo t_1 na máxima tensão principal normalizada σ_1/σ_0 : perto da face ($x/w=0$) [41]

Foi ainda estudado o efeito da variação do número de degraus (N) da junta. Na Figura 51 está representado o efeito da variação do número de degraus na distribuição da tensão principal máxima σ_1/σ_0 nas interfaces transversais ao carregamento do adesivo. O número de degraus foi variado entre 1, 2, 3 e 5 no estudo numérico. Como se verifica, os picos de tensão encontram-se no ponto $x/W=0$ e no ponto $x/W=1$.

A Figura 52 representa a evolução da distribuição de tensões normalizadas σ_1/σ_0 perto da aresta da interface transversal ao carregamento do adesivo em função da variação de número de degraus da junta. Como se pode verificar, o valor de σ_1/σ_0 perto da aresta decresce à medida que o número de degraus aumenta, o que leva a concluir que a resistência da junta sujeita a tensões de tração pode ser aumentada com aumento do número de degraus, de notar que este aumento de resistência pode resultar não só de uma maior número de degraus mas também, do aumento do comprimento de cada patamar de degrau e sua respetiva largura.

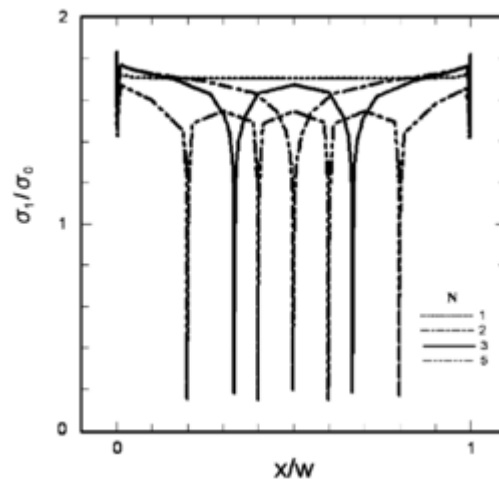


Figura 51 - Efeito do número de degraus N na máxima tensão principal normalizada σ_1/σ_0 : na interface de adesivo transversal ao carregamento

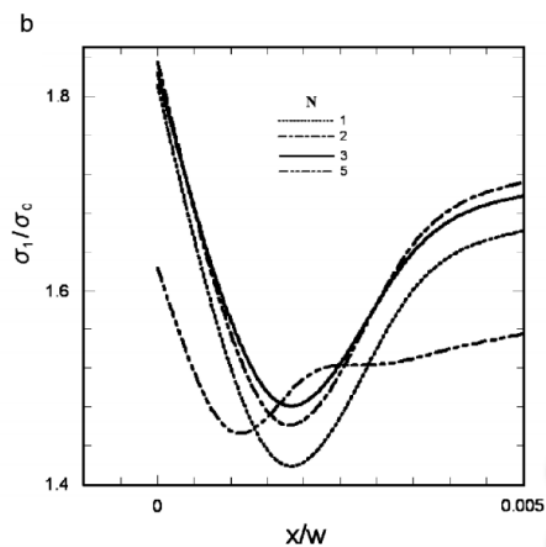


Figura 52 - Efeito do número de degraus N na máxima tensão principal normalizada σ_1/σ_0 : na interface de adesivo transversal ao carregamento

A resistência das juntas em degrau foi prevista usando o critério tensão principal máxima. A Figura 53 representa a distribuição da tensão principal máxima σ_1 na interface transversal ao carregamento do adesivo junto da aresta ($x/W=0$). Quando a junta é sujeita a uma tensão estática de $\sigma_0=28$ MPa, a máxima tensão principal na aresta da interface do adesivo atinge a sua tensão de rotura $\sigma_c=50,96$ MPa. Em resultado do estudo numérico, a resistência de uma junta em degrau foi estimada em 28 MPa.

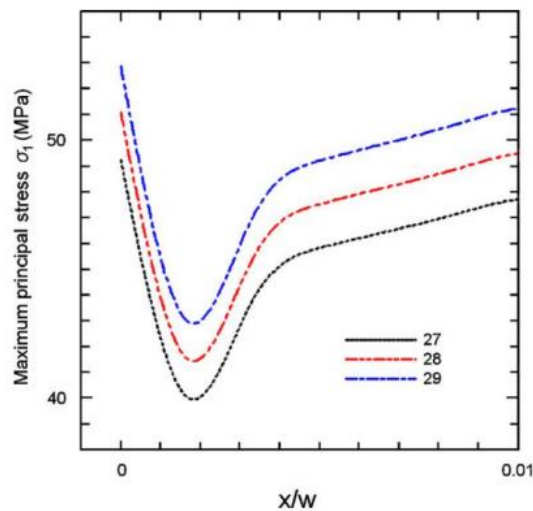


Figura 53 - Distribuição da máxima tensão principal junto da extremidade da interface transversal ao carregamento [41]

No que diz respeito às deformações sofridas, a Figura 54 representa o gráfico comparativo das deformações numéricas e experimentais registadas com recurso a extensómetros colados ao longo da camada adesiva da junta. A ordenada no gráfico representa a deformação ε_y na direção segundo y e a abcissa representa o valor da largura normalizada da junta x/W .

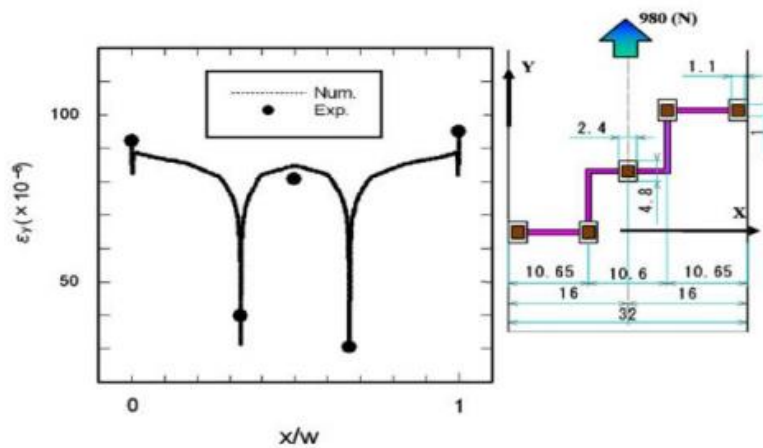


Figura 54- Comparação das deformações experimentais vs. numéricas obtidas por EF [41]

Pela análise gráfica, considera-se que foi obtida uma boa concordância entre deformações previstas numericamente e registadas experimentalmente nos pontos de medição dos extensómetros, o que valida desta forma a capacidade do método EF na previsão da deformação.

O valor conseguido no estudo numérico pelo método EF relativo à resistência da junta foi de 28 MPa, enquanto a resistência apurada experimentalmente foi de aproximadamente 29 MPa, o que reforça inequivocamente a capacidade da técnica EF na previsão das propriedades das juntas adesivas.

Outro estudo trabalho realizado por Akpinar [42], que tinha como objetivo também estudar as juntas adesivas em degrau consistiu em analisar e comparar o desempenho de três configurações de juntas diferentes pelo método EF, em que a área de colagem é equivalente em todos os casos. De forma a validar a análise numérica realizada pelo método EF, efetuaram-se testes experimentais para a comparação dos resultados obtidos. As configurações e dimensões geométricas das juntas usadas no estudo estão apresentadas na Figura 55 e são:

- Junta de sobreposição simples (Tipo-I);
- Junta com um degrau (Tipo-II);
- Junta com três degraus (Tipo-III).

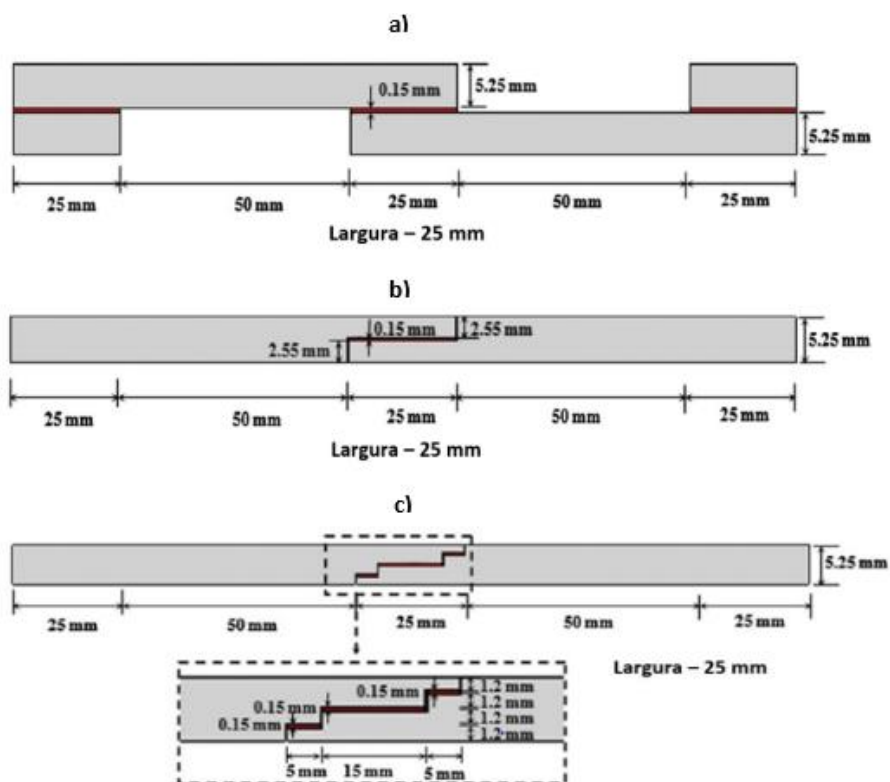


Figura 55 - Parâmetros geométricos das juntas adesivas: (a) JSS (Tipo-I), (b) junta de 1 degrau (Tipo-II), (c) junta de 3 degraus (Tipo-III)

Pretende-se também avaliar a influência do tipo de adesivo na resistência da junta. Deste modo, foram testados dois tipos de adesivos: um adesivo dúctil e um adesivo rígido frágil. O adesivo de caráter rígido escolhido foi o bi-componente DP460 produzido

pela 3M®, já o adesivo dúctil selecionado foi o adesivo do tipo filme SBT9244 da 3M®. Relativamente ao material dos aderentes, foi selecionada a liga de alumínio AA2024-T3.

Para a validação dos resultados numéricos obtidos pela técnica EF, foram efetuados testes experimentais para comparação e discussão de resultados. As configurações geométricas e parâmetros experimentais das juntas em análise são apresentadas na Figura 55 apresentada anteriormente. De evidenciar que, apesar de serem analisadas três configurações distintas, o presente estudo contempla a utilização de provetes com aderentes da mesma espessura, comprimento e largura.

No que diz respeito ao procedimento experimental, as juntas foram solicitadas à tração com uma velocidade de 1 mm/min. De ressaltar que, para cada geometria, as condições fronteira (*setup* de montagem) e carga aplicada foram sempre as mesmas.

Para modelação das geometrias em análise pela técnica EF, o *software* escolhido foi o ANSYS®. A análise de tensões nas juntas foi efetuada usando um modelo não linear tridimensional, no qual se considera a não-linearidade do comportamento dos materiais e não-linearidades geométricas. A parametrização 3D contempla igualmente o emprego de malha refinada nas zonas críticas da junta (região de colagem). O modelo material implementado no estudo pelo método EF foi o de endurecimento isotrópico multi-linear de von Mises. Relativamente ao cálculo da tensão equivalente σ_{eq} e da deformação equivalente ε_{eq} da camada adesiva e dos aderentes, o modelo recorre ao critério de cedência de von Mises na sua determinação.

As tensões de rotura experimentais das diferentes geometrias em função do adesivo empregue estão representadas na Figura 56. Já na Figura 57 mostram-se os gráficos da força deslocamento obtidos para cada condição geométrica e de colagem.

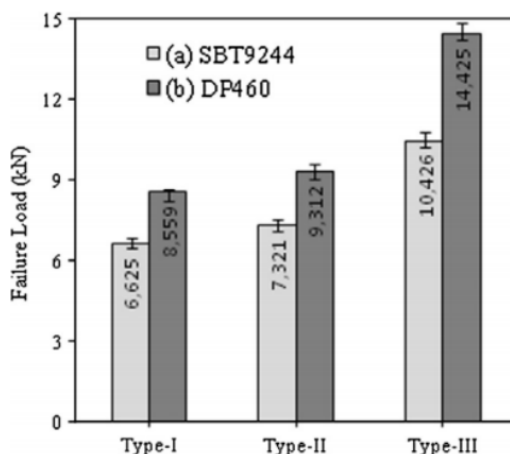


Figura 56 - Média das forças máximas de rotura das juntas obtidas experimentalmente [42]

Numa breve análise das forças máximas obtidas é possível verificar que as juntas em degrau apresentam maior resistência do que as JSS, independentemente da utilização de um adesivo rígido ou dúctil.

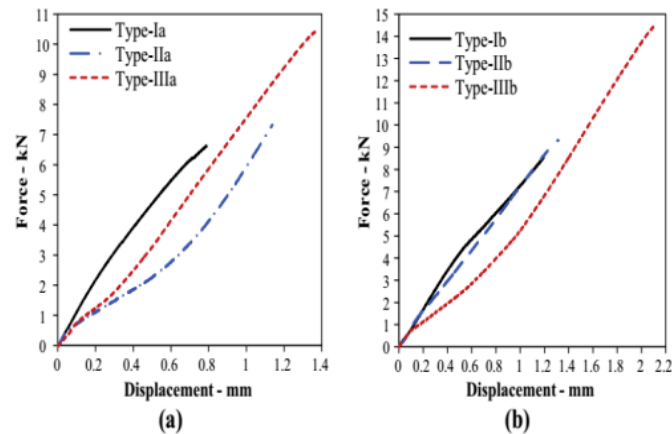


Figura 57 - Gráfico força vs deslocamento:(a) para provetes colados com adesivo SBT9244, (b) para provetes colados com adesivo DP460

Atendendo ao gráfico da Figura 56 e comparando a JSS (Tipo I) e a junta em degrau (Tipo II) colada com adesivo dúctil SBT9244, verifica-se que o minimizar do efeito do momento fletor, que se desenvolve na JSS (Tipo I) devido à excentricidade da carga, origina um substancial aumento quantitativo de resistência, aproximadamente de 11%. Embora o incremento de resistência verificado não seja de grandeza consideravelmente grande, isto pode-se justificar pelo pela redução da rigidez devido à diminuição da espessura do aderente na zona de sobreposição da junta em degrau

Fazendo agora a comparação da JSS (Tipo I) com a junta de três degraus (Tipo III), verifica-se que a utilização dos três degraus resulta num aumento significativo (60%) da capacidade de carga.

No que diz respeito às tensões de arrancamento σ_y , nas JSS (Tipo I) e nas juntas com um degrau (Tipo II), geram-se nas extremidades de sobreposição, o que origina o aparecimento de fendas que se propagam rapidamente para o centro da área de sobreposição, provocando a rotura da ligação. No caso das juntas com três degraus (Tipo III), as maiores tensões σ_y ocorrem junto à aresta de sobreposição (acerca de 3 mm das bordas dos degraus laterais), formando uma fenda que cresce de forma repentina até ao fim desses degraus. Como consequência, surgem novamente tensões σ_y , desta vez na extremidade do degrau central, o que forma uma nova fenda e um repentino crescimento para o centro causando a rotura da junta. Este caminho de dano faseado permite que a resistência da junta seja incrementada significativamente, uma vez que a rotura é retardada pela descontinuidade de planos da junta em degrau no desenvolvimento e propagação do mecanismo de dano.

Relativamente aos resultados obtidos nas juntas com adesivo frágil DP460, em termos de resistência, verifica-se que a junta em degrau (*Tipo II*) e a junta em degrau (*Tipo III*) veem aumentadas a sua resistência em cerca de 8,8% e 68%, respetivamente, quando comparadas com a JSS (*Tipo I*).

As curvas força-deslocamento ilustradas na Figura 57 demonstram que a minimização do efeito do momento fletor, originado pela excentricidade da carga na JSS (*Tipo I*), traduz-se num aumento da capacidade de carga e deformação das juntas em degrau. Verifica-se ainda um alongamento da deformação da junta com degraus. No caso das juntas ligadas com o adesivo flexível (SBT9244) registou-se um maior alongamento, sob a mesma carga, na junta com um degrau (*Tipo I*). Por outro lado, nas juntas onde foi empregue o adesivo rígido (DP460), verificou-se maior capacidade de deformação nas juntas com três degraus (*Tipo III*).

No que se trata de resultados numéricos resultantes do estudo desenvolvido por Akpınar [42], a tensão σ_{eqv} foi calculada usando o critério de von Mises, considerando-se que a rotura da junta ocorre quando a tensão equivalente de von Mises (σ_{eqv}) calculada em qualquer ponto da camada adesiva atinge a tensão de rotura do adesivo.

Analisando os resultados da análise efetuada pela técnica EF, verifica-se uma boa relação entre os valores numéricos e experimentais, como se representa na Figura 58.

Joint types	Experimental failure load, F_{EXP} (N)	FEA failure load, F_{FEA} (N)	F_{FEA}/F_{EXP}
Type I a	6625	6890	1.04
Type I b	8559	8120	0.95
Type II a	7321	7680	1.05
Type II b	9312	9140	0.98
Type III a	10,426	10,730	1.03
Type III b	14,425	14,050	0.97

Figura 58 - Comparação de resultados numéricos e experimentais das cargas de rotura das junta [42]

Na Figura 59 e Figura 60 mostram-se os resultados obtidos na análise numérica efetuada pela técnica EF relativos às tensões de arrancamento σ_y e de corte τ_{xy} , em função do adesivo utilizado na colagem.

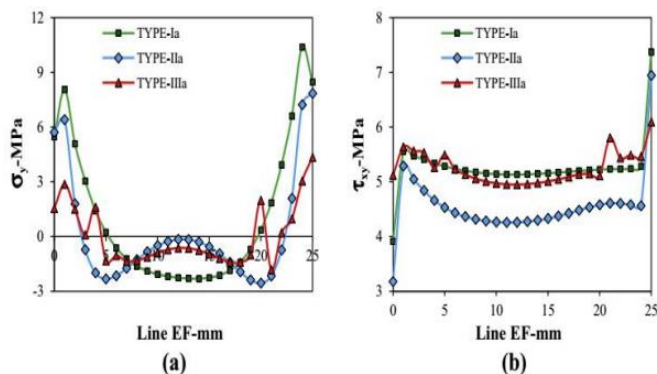


Figura 59 - Comparação da distribuição de tensões na camada adesiva ao longo da linha EF para juntas coladas com adesivo SBT9244: (a) tensão de arrancamento (σ_y), (b) tensão de corte (τ_{xy}) [42]

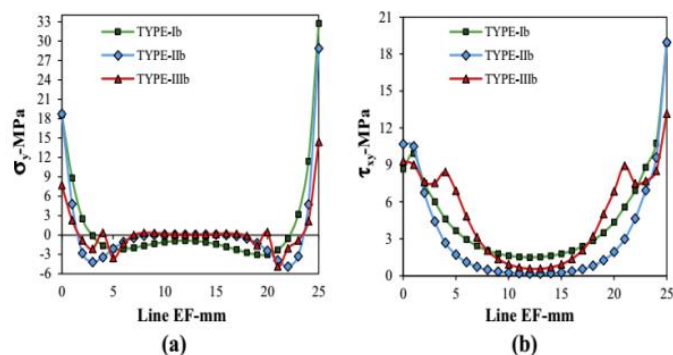


Figura 60 - Comparação da distribuição de tensões na camada adesiva ao longo da linha EF para juntas coladas com adesivo DP460: (a) tensão de arrancamento (σ_y), (b) tensão de corte (τ_{xy}) [42]

Numa primeira análise dos gráficos apresentados anteriormente (Figura 59 e Figura 60), pode ser observado que os locais críticos onde a concentração de tensões ocorre e atinge o seu valor máximo situam-se nas extremidades de sobreposição da junta.

No que diz respeito à distribuição de tensões de arrancamento nas juntas coladas com adesivo SBT9244, a Figura 59 (a) revela que estas assumem o seu valor máximo nas suas extremidades, e decrescem à medida que se progride para região central da zona de colagem, onde assumem valores negativos (compressivos) sendo este comportamento bem visível na JSS (Tipo I). Nas juntas em degrau na região central de colagem o efeito de compressão é minimizado, uma vez que o momento fletor originado pela excentricidade da carga se encontra atenuado.

De salientar que a presença de degraus, contribui para uma diminuição da tensão de arrancamento nas zonas localizadas nas extremidades de sobreposição, o que é bastante benéfico para a junta, já que as tensões de arrancamento são um fator influente no início do dano da junta adesiva.

Relativamente à tensão de corte (τ_{xy}) que se desenvolve ao longo do comprimento de sobreposição, esta atinge o seu máximo no ponto F e o seu mínimo no ponto E.

Relacionando-se a JSS (Tipo I) com a junta em degrau (Tipo II), verifica-se uma diminuição ligeira do pico de tensão máximo e mínimo da tensão de corte. Já na junta em degrau verifica-se uma diminuição drástica do pico de tensões de corte nas extremidades, comparativamente com as restantes configurações. Além disso, a junta em degrau (Tipo III) apresenta uma distribuição mais homogênea da tensão τ_{xy} ao longo da junta.

Na Figura 60 (a) e (b) são exibidos os gráficos de distribuição de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}), respetivamente, para juntas coladas com adesivo DP460. Tal como se verifica no adesivo dúctil (SBT942), verifica-se que o pico das tensões de arrancamento localiza-se no ponto F, em todas as juntas. sendo que estas diminuem à medida que se avança para região central da área de colagem de sobreposição, assumindo mesmo valores nulos nessa região em algumas situações. Pode-se notar que, à medida que se aumenta o número de degraus, verifica-se uma diminuição das tensões de arrancamento de pico.

No caso das tensões de corte, estas não apresentam distribuição homogênea ao longo do comprimento de sobreposição. A tensão de corte assume o seu valor máximo no ponto F e o seu valor mínimo surge na região central da zona de colagem. Outro aspeto de referenciar é o deslocar dos picos de tensão de corte das extremidades para as zonas mais internas da zona de colagem no caso da junta com três degraus (Tipo III).

Analisando os resultados numéricos do estudo, denota-se o aumento da resistência das juntas em degrau comparativamente com a junta de sobreposição, uma vez que para a mesma solicitação de tração, os valores de pico das tensões σ_y e τ_{xy} diminuem.

2.1.7.4 Outras alterações

De forma a evitar os esforços de arrancamento e clivagem, que são prejudiciais à resistência da junta, existem algumas técnicas e estratégias a nível de configuração geométrica que permitem obter uma redução destes esforços como demonstrado na Figura 61 [43].

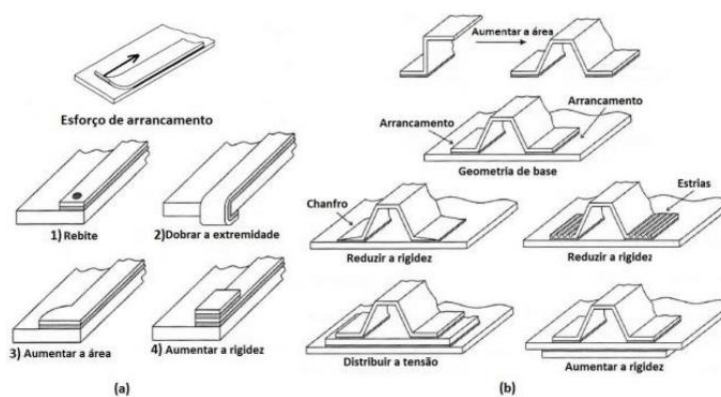


Figura 61 – Estratégias e outras técnicas de configuração geométrica de junta para evitar esforço: (a) arrancamento e (b) clivagem [43]

Na Figura 61 (a) estão representadas algumas técnicas utilizadas para minimizar esforços de arrancamento, bem como a prática mais comum para se conseguir aumento da rigidez, em aderentes finos, através da colagem de reforços sobre a superfície destes.

Na Figura 61(b) mostram-se algumas soluções que se podem aplicar na concepção das juntas reforçadas para diminuir os efeitos de clivagem. Deste modo consegue-se melhorar a resistência às forças de flexão pelo aumento da área de colagem.

2.2 Técnicas de previsão de resistência para juntas adesivas

O processo evolutivo das juntas adesivas está intimamente relacionado com o desenvolvimento de metodologias de previsão fiáveis que permitam aumentar a eficiência na sua utilização, possibilitando assim ultrapassar o paradigma das juntas adesivas sobredimensionadas que resultavam em estruturas mais dispendiosas e mais pesadas, tudo isto relacionado com a falta de modelos materiais precisos e de critérios de rotura adequados que se faziam notar há algumas décadas. As duas metodologias que podem ser aplicadas para a análise de juntas adesivas são as análises de forma fechada (métodos analíticos) e os métodos numéricos.

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [44] que parte do princípio de que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade do adesivo se deformar plasticamente, da utilização de substratos de compósito ou de materiais diferentes. O MEF [45] é então a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [46], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Recorreu-se então à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas coladas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [47]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

Mais recentemente, começou-se a usar outra técnica para modelar o crescimento de fendas com uma tensão, o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento contínuo.

2.2.1 Métodos analíticos

No início da análise estrutural de ligações adesivas, os métodos preditivos consistiam em formulações analíticas. Os estudos realizados por Volkersen [44] e Goland e Reissner [48] foram precursores de vários estudos teóricos que tinham como vantagem a simplicidade em determinar os campos de tensão nas estruturas ligadas por adesivos devido ao uso de hipóteses simplificadoras no que diz respeito à de geometria das estruturas, carregamento e condições fronteira, dando soluções eficientes de forma fechada. Desta maneira, as estruturas ligadas por adesivos estruturais podem ser analisadas rapidamente, embora com muitas suposições integradas [49]. Através destes modelos, as tensões e deformações podem ser facilmente calculadas, juntamente com a distribuição do momento fletor atuante na estrutura. A resistência era caracteristicamente prevista por critérios baseados em tensões ou deformações. Nos dias correntes estes estudo tem sido substituídos por análises numéricas, apesar dos estudos analíticos também estarem a ser alvo de melhorias em termos de capacidades de modelação, considerando nas análises a não-linearidade material empregue na camada adesiva ou análises geométricas não-lineares [50, 51].

2.2.2 Métodos numéricos

Nos dias de hoje encontram-se disponíveis técnicas avançadas de modelação que garantem previsões de rotura precisas, que superam as limitações dos métodos analíticos. De uma forma geral, os danos estruturais podem ocorrer por microfissuras ao longo de um volume finito ou região interfacial, que se traduz na redução da capacidade de transferência de carga. Simulações pelo método EF com base na modelação da mecânica dos meios contínuos adotam erradamente que ocorre plastificação generalizada nos elementos sem evolução do dano, enquanto um modelo de mecânica do dano pode simular o dano nos elementos por redução das cargas transferidas. Como resultado, torna-se possível a simulação do dano e fratura passo-a-passo para um caminho pré-definido ou arbitrariamente dentro de uma região finita [52]. Apesar deste facto, este é ainda um campo inovador sob intenso desenvolvimento, no que se trata a técnicas de modelação mais precisas, métodos de estimativa de parâmetros de materiais mais fiáveis e simples, aumento da robustez e eliminação de problemas de convergência [53]. As técnicas de modelação de dano podem ser locais ou contínuas. No que toca à modelação local de dano, esta ocorre numa linha ou superfície por exemplo numa análise 2D ou 3D, respetivamente, que simula rotura interfacial entre materiais, por exemplo, entre a ligação adesiva e o aderente, a fratura interlaminar de compósitos laminados ou a interface entre as fases sólidas de materiais. Pela modelação

contínua, o dano estende-se por uma área ou volume finito (análise 2D ou 3D, respetivamente), para simular a rotura ou modelar fratura coesiva do adesivo.

2.2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [54], que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [55] usaram o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [56]. No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [46], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

2.2.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180° . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, este

se mantém com dimensões inferiores às críticas, embora se possa propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fissuras pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [57]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [58] através do estudo de fraturas em fibras de vidro, que lhe permitiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [59]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [60] e por Rice [61] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, G_I ou G_{II} , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [62], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na solitação.

2.2.2.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com estudos de Barenblatt [63] e Dugdale [64], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [52].

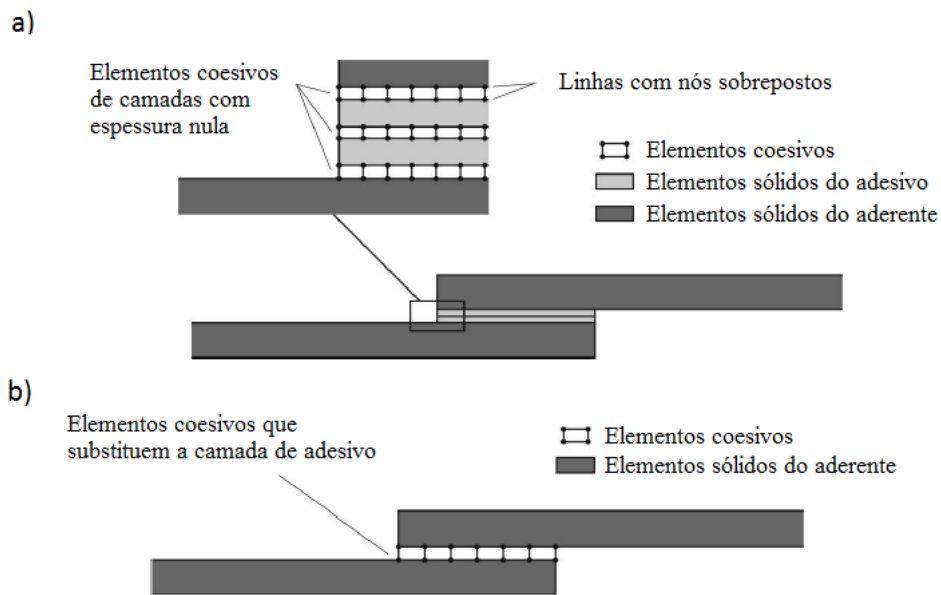


Figura 62 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [65])

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [66]. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 62), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [67], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [68].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [69]. Este modelo está implementado em *softwares*, como o caso do Abaqus®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D apresenta uma componente adicional de corte [70].

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [71], triangular [72], exponencial [73], polinomial [74] e trapezoidal [68]. Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [75].

A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [76]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [77] de seis nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do Abaqus®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 63).

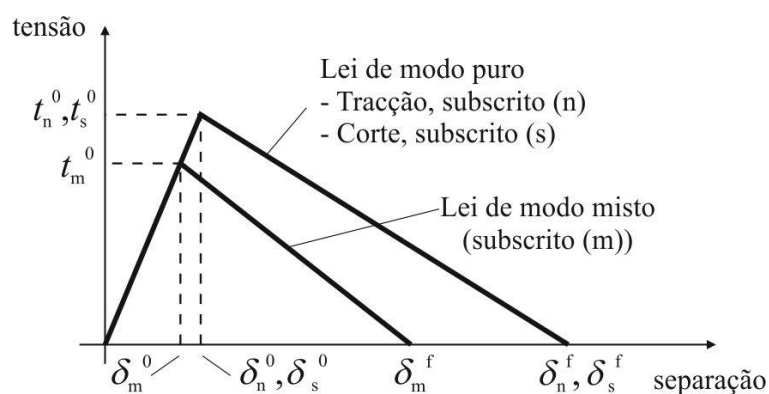


Figura 63 - Modelo coesivo triangular [77, 78]

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte [79]. Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [80] e modo II [81].

2.2.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [82] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. [83] para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro

de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [52].

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [84]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [85] ou do número de ciclos para análises de fadiga [86, 87]. Comparativamente aos MDC e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [88].

Hua et al. [89] propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que permitiu obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. [90] usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de E e do coeficiente de Poisson (ν) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

2.2.2.5 Método de Elementos Finitos Extendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tração e corte correspondentes a $P_{m\acute{a}x}$, respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho

pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das discontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [91]. Belytschko e Black [92], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [93]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [94].

Campilho et al. [95] utilizou o MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, coladas com um adesivo dúctil, onde se comparou resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 64). Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

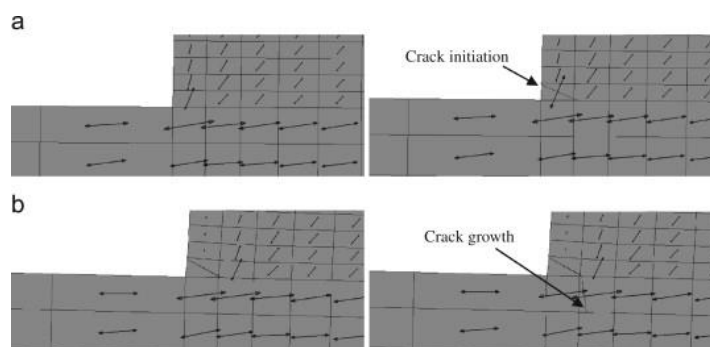


Figura 64 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [95]

2.3 Juntas em materiais compósitos

Em virtude da necessidade do estudo do comportamento das juntas em materiais compósitos, torna-se essencial conhecer as suas principais características. Desta forma são apresentados neste subcapítulo algumas especificidades e trabalhos divulgados na área.

2.3.1 Particularidades das juntas em materiais compósitos

A resistência de um laminado em material compósito resulta da sequência de empilhamento, ou seja, as fibras podem ser empilhadas com ângulos diferentes em cada camada para conferir as propriedades pretendidas à junta em qualquer uma das direções. Desta forma, as propriedades mecânicas de um laminado dependem da direção em que se está a solicitar (i.e., propriedades ortotrópicas) ao contrário dos metais que apresentam propriedades mecânicas iguais para todas as direções de sollicitação (i.e., propriedades isotrópicas) [96].

Quando uma junta adesiva é ensaiada experimentalmente com aderentes em material compósito à tração, pode também ocorrer uma rotura interlaminar, para além das roturas já mencionadas no subcapítulo referente aos modos de rotura. Isto ocorre quando a resistência coesiva do adesivo é superior a resistência entre camadas, dando origem à delaminação e, conseqüentemente, à rotura da junta (Figura 65) [97].



Figura 65 – Exemplo de uma rotura interlaminar de uma junta colada com o adesivo AV138 com um L_0 de 10 mm [98]

2.3.2 Trabalhos experimentais em juntas em materiais compósitos

Neste subcapítulo serão apresentados alguns dos trabalhos experimentais de carácter científico desenvolvidos a nível de mestrado, referentes a juntas em material compósito.

O artigo científico de Ribeiro et al. [99] apresentam um estudo experimental e numérico de juntas de sobreposição simples (JSS) em material compósito de matriz polimérica de resina epóxida reforçada com fibra de carbono (*Carbon-fiber reinforced plastic* ou CFRP), pré-impregnada e unidirecional (SEAL® Texipreg HS 160 RM). com a inclusão de defeitos centrados na camada de adesivo para comprimentos de sobreposição (L_0) diferentes. Os adesivos utilizados foram o Araldite® AV138, apresentado como sendo frágil, e o adesivo Sikaforce® 7752, intitulado como adesivo dúctil.

Para este trabalho foram feitas oitenta JSS, em que quarenta foram coladas com o adesivo Araldite® AV138 e as restantes quarenta com o adesivo Sikaforce® 7752. Para cada adesivo, vinte juntas têm o L_0 de 25 mm (ver Figura 66) e outras vinte, o L_0 de 50 mm (ver Figura 67). Para cada L_0 , cinco juntas não têm qualquer defeito, as restantes quinze juntas têm 25%, 50% e 75% de defeito (ver Figura 68).

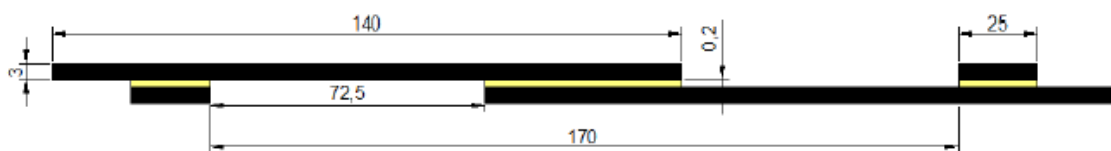


Figura 66 - Geometria e dimensões das juntas de L_0 de 25 mm [99]

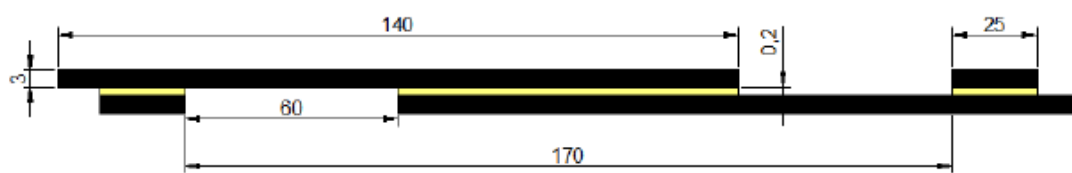


Figura 67 - Geometria e dimensões das juntas de L_0 de 50 mm [99]

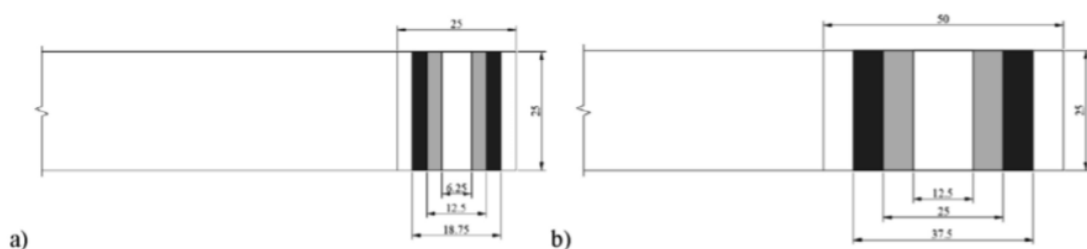


Figura 68 - Localização e dimensões do defeito utilizado na junta de L_0 de 25 mm (à esquerda) e de 50 mm (à direita) [99]

Para as juntas com defeitos, foi necessária a colocação de uma tira de Teflon na junta para simular um defeito (Figura 69).

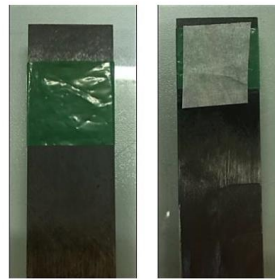


Figura 69 - Método de fixação do Teflon® nos provetes [99]

A parte experimental consistiu no ensaio à tração das diferentes JSS permitindo a obtenção das curvas força-deslocamento ($P-\delta$). Começando pelo adesivo Araldite® AV138, na Figura 70 estão apresentados os gráficos das curvas para as quatro condições existentes para o $L_0=25$ mm e $L_0=50$ mm, respetivamente. Já na Figura 71 estão representados os gráficos para o Sikaforce® 7752.

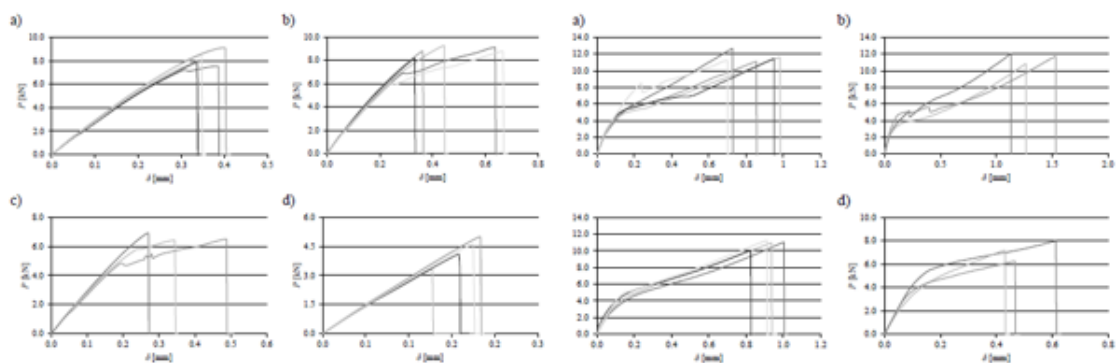


Figura 70 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite® AV138 para $L_0=25$ mm (à esquerda) e para $L_0=50$ (à direita) para as JSS em que a) sem defeito, b) com 25% de defeito, c) 50% de defeito e d) 75% de defeito [99]

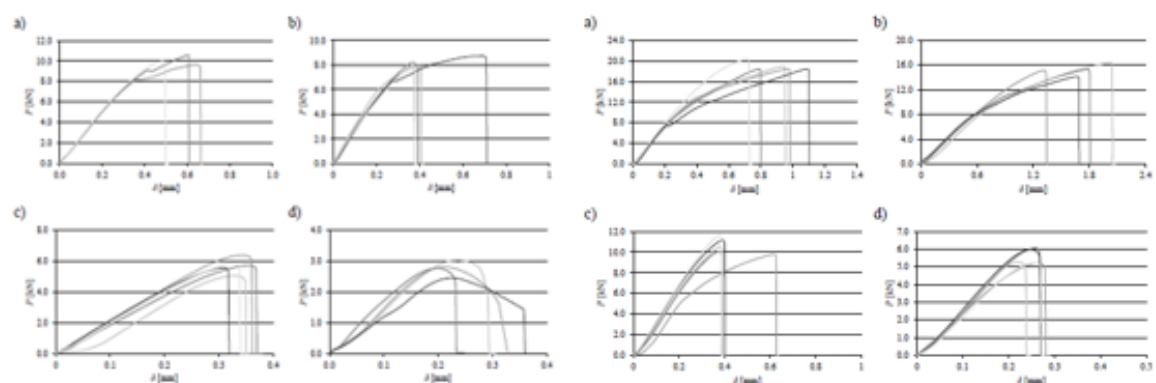


Figura 71 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Sikaforce® 7752 para $L_0=25$ mm (à esquerda) e para $L_0=50$ (à direita) para as JSS em que a) sem defeito, b) com 25% de defeito, c) 50% de defeito e d) 75% de defeito [99]

A análise numérica por modelos de dano coesivo (MDC) foi realizada para analisar as tensões de arrancamento (σ_y) e as tensões de corte (τ_{xy}) na camada adesiva, para estudar a variável de dano do MDC durante o processo de rotura e para avaliar a capacidade dos MDC na previsão da resistência da junta.

A Figura 72 mostra a distribuição de τ_{xy} normalizadas para o valor de $L_0=50$ mm estudadas em juntas com adesivo frágil Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7752 com e sem defeitos. Nos dois gráficos é possível observar valores de tensão mais reduzidos na região interior do adesivo, atingindo o máximo nas extremidades da sobreposição [100].

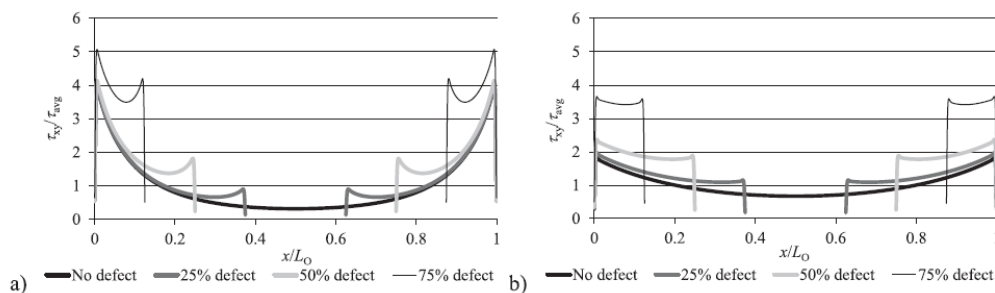


Figura 72 - Distribuição de tensões τ_{xy} para JSS coladas com Araldite® AV138 (à esquerda) e Sikaforce® 7752 (à direita) para $L_0=50$ mm [99]

A Figura 71 e a Figura 72 mostram a distribuição de σ_y normalizadas para o valor de $L_0=50$ mm em juntas com o adesivo frágil Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7752, com e sem defeitos.

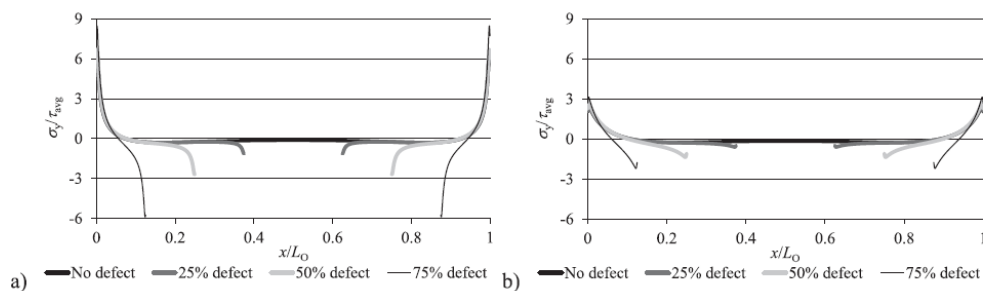


Figura 73 - Distribuição de tensões σ_y para JSS coladas com Araldite® AV138 (à esquerda) e para o Sikaforce® 7752 (à direita) para $L_0=50$ mm [99]

O gráfico da Figura 74 resume o pico de tensão normalizada τ_{xy} e σ_y nas arestas de sobreposição em função da área defeituosa (%), considerando tanto os adesivos testados como os valores de L_0 .

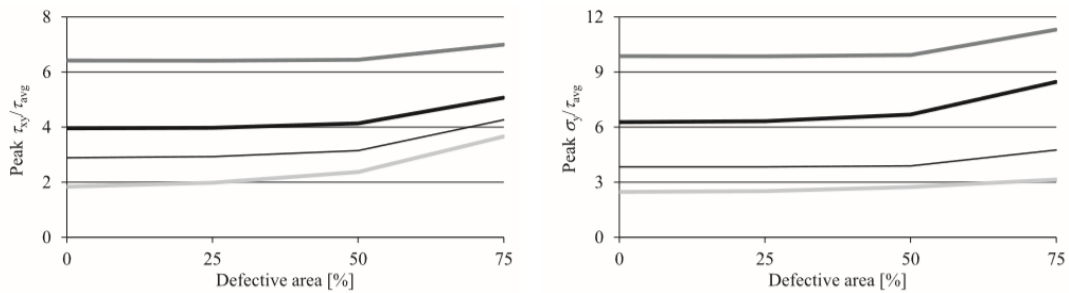


Figura 74 - Pico de tensões normalizadas τ_{xy} e σ_y nas arestas de sobreposição em função da área defeituosa (%), para juntas coladas com o adesivo Araldite® e Sikaforce® 7752 com $L_0=25$ mm e $L_0=50$ mm [99]

A Figura 75 analisa a degradação da rigidez ao longo do L_0 quando é aplicada a $P_{m\acute{a}x}$ para os quatro tipos de juntas com o adesivo Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. Tendo em conta a variação do parâmetro de dano SDEG com a percentagem de defeito, observa-se que com o seu aumento a porção danificada da camada de adesivo diminui.

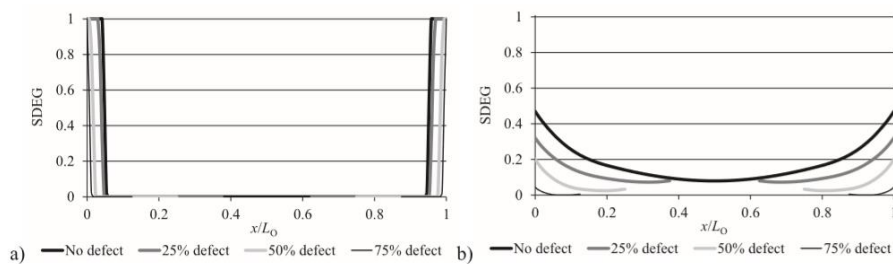


Figura 75 – Variável de dano quando é atingida a $P_{m\acute{a}x}$ no adesivo Araldite® AV138 (à esquerda) e Sikaforce® 7752 (à direita) na junta com $L_0=25$ mm [99]

Na Figura 76 e Figura 77 é mostrada a evolução do parâmetro de dano SDEG para valores crescentes de $\delta/\delta P_{m\acute{a}x} \times 100$ [%], para as juntas coladas com Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 para $L_0=25$ mm, aumentando a percentagem de defeito. $\delta P_{m\acute{a}x}$ é o deslocamento para a $P_{m\acute{a}x}$ (como resultado, um valor de $\delta/\delta P_{m\acute{a}x}$ de 100% corresponde a $P_{m\acute{a}x}$).

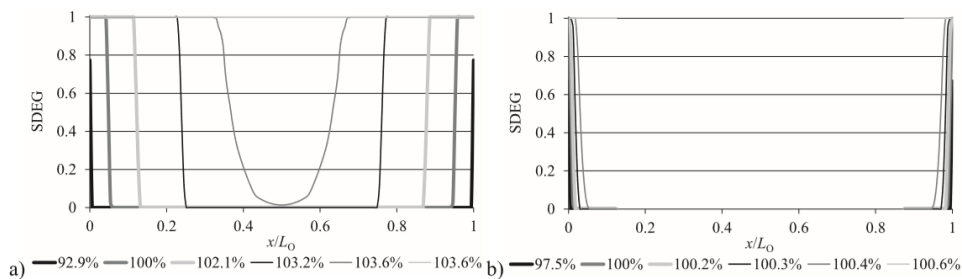


Figura 76 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta P_m$ (%) para JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138 com $L_0=25$ mm a) sem defeito e b) 75% defeito [99]

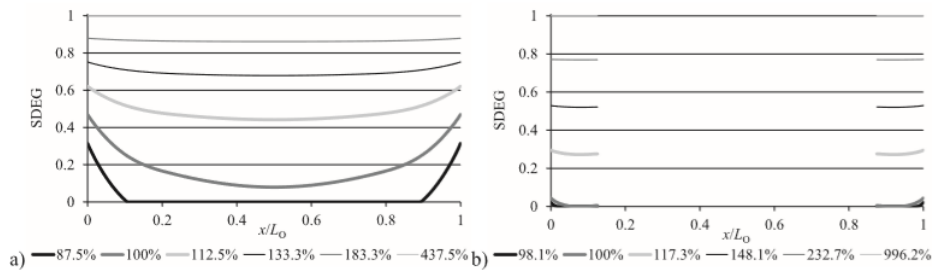


Figura 77 - Evolução da variável de dano com $\delta / \delta P_m$ (%) para JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 com $L_0=25$ mm a) sem defeito e b) 75% defeito [99]

Na Figura 78 apresentam-se alguns exemplos de curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente pelos MDC do *software* ABAQUS® nomeadamente para as JSS coladas sem defeito com Araldite® AV138 com $L_0=25$ mm à esquerda e para as JSS com 75% de defeito coladas com Sikaforce® 7752 à direita.

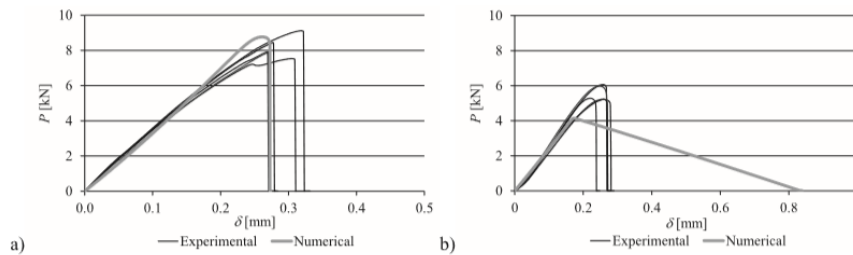


Figura 78 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente e experimentalmente para as JSS coladas sem defeito com Araldite® AV138 com $L_0=25$ mm a) e para as JSS com 75% de defeito coladas com Sikaforce® 7752 b) [99]

A Figura 79 representa a comparação entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos para as juntas sem defeito com defeito para os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752.

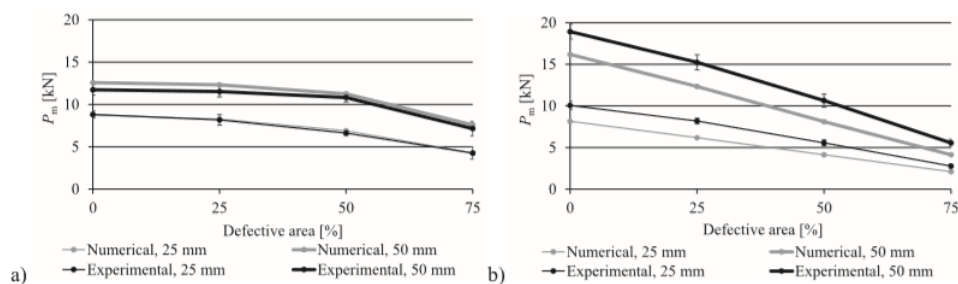


Figura 79 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos em função da percentagem de defeito para as JSS coladas com Araldite® AV138 a) e Sikaforce® 7752 b) [99]

Deste estudo constatou-se um efeito significativo dos defeitos de diferentes dimensões na resistência das juntas, que também dependem do tipo de adesivo utilizado e do valor

de L_0 . Desta forma os modelos numéricos permitiram a descrição detalhada do comportamento das juntas e previsão de resistência, embora para o adesivo dúctil a utilização de uma lei coesiva triangular tenha provocado alguma discrepância relativamente aos resultados experimentais.

O estudo realizado por Neto et al. [98] pretende caracterizar o modo de falha e a resistência de JSS em material compósito com diferentes adesivos e L_0 , assim como validar diferentes métodos de previsão.

A Figura 80 mostra os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente para cada um dos adesivos, em função do L_0 . Conforme se observa, para ambos os casos, à medida que se aumenta a sobreposição, aumenta também o valor da força a que se dá a rotura da junta. Com este ensaio foi possível concluir que no adesivo dúctil (Sikaforce 7888) ocorreu uma rotura coesiva no adesivo em todos os L_0 contrariamente ao adesivo frágil (AV138), para o qual a partir da sobreposição de 30 mm se registou rotura interlaminar do aderente.

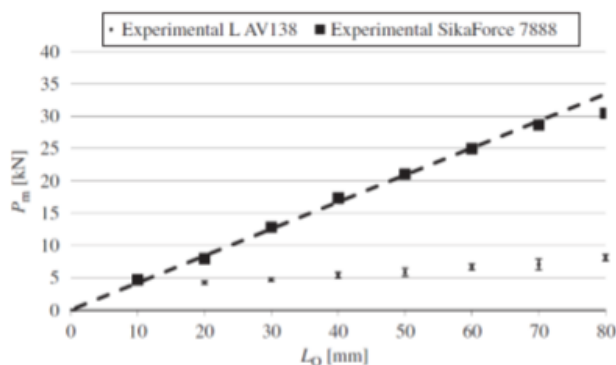


Figura 80 - Forças máximas registadas experimentalmente em JSS para o Araldite® AV138 e Sikaforce® 7888 [98]

Para cada adesivo foram usados métodos analíticos e numéricos para prever a resistência que estes conferem às juntas. No caso do adesivo frágil o modelo analítico de Hart-Smith [73] conseguiu prever a força de rotura do adesivo através das tensões σ_y (Figura 81). O método numérico utilizado (modelo de dano coesivo) obteve valores satisfatórios para este adesivo, contrariamente ao que se observou no adesivo dúctil, onde não se registou a mesma precisão (Figura 82). Provavelmente, isto aconteceu porque foi usado um modelo de dano triangular e o adesivo dúctil apresenta um comportamento com a forma de um trapézio. Contudo, os modelos numéricos utilizados são capazes de simular a falha inicial assim com a sua propagação observada nos ensaios experimentais.

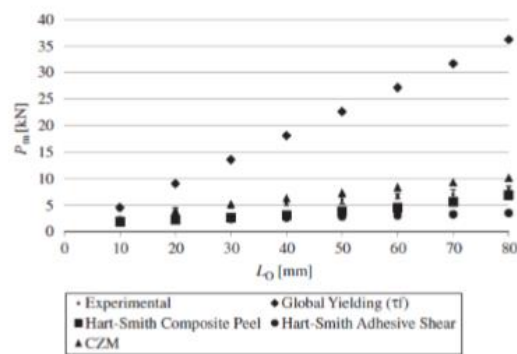


Figura 81 - Resultados experimentais vs. previsões analíticas para o Araldite® AV138 [98]

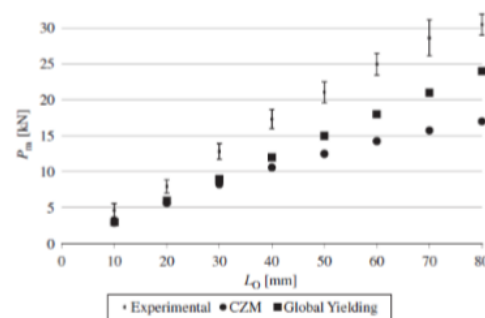


Figura 82 - Resultados experimentais vs previsões numéricas para o Sikaforce® 7888 [98]

2.3.3 Modelação numérica de juntas em materiais compósitos

No que diz respeito à modelação numérica de juntas em material compósito, é necessário ter um especial cuidado no que toca às diferenças das propriedades dos metais e dos materiais compósitos. Uma vez que um laminado apresenta diferentes valores de resistência mecânica para cada direção, é essencial caracterizar cada um deles nas direções principais. As variáveis elásticas necessárias para definir a plasticidade de um metal e de um material compósito estão representadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Variáveis usadas para definir a plasticidade de um metal e de um material compósito atendendo que “1” representa a direção das fibras, “2” representa a direção transversa e “3” representa a direção fora do plano

Tipo de Material					
Metal	E	Compósito	E_1	E_2	E_3
	ν		ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
			G_{12}	G_{13}	G_{23}

Para a exatidão do método numérico na previsão da resistência e modo de rotura da junta, é fundamental ter em consideração a possibilidade de ocorrer uma rotura interlaminar do modelo em análise. Uma das hipóteses para este efeito consiste na utilização de MDC. Como representado na Figura 83 é colocada uma camada coesiva próxima da interface entre o aderente e o adesivo com propriedades coesivas que simulam a resistência entre camadas do laminado [79], o que permite a previsão de uma eventual delaminação.

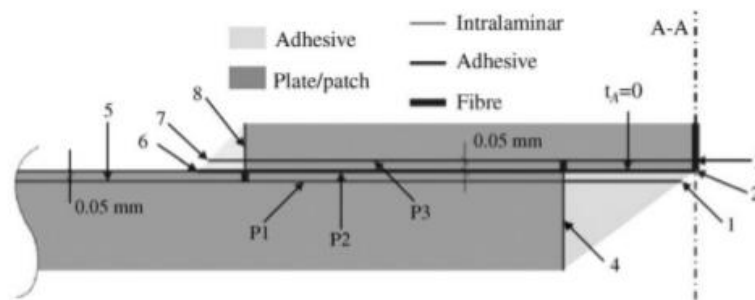


Figura 83 - Zona de sobreposição de uma junta adesiva com camada interlaminar [79]

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

Neste subcapítulo aborda-se o trabalho experimental realizado no âmbito da presente dissertação. Numa primeira fase será realizada uma apresentação detalhada dos materiais utilizados na execução das juntas, onde se referem as suas principais características mecânicas. Na etapa seguinte, especificam-se as dimensões geométricas das juntas em análise, e são descritas com detalhe as diferentes etapas do processo de fabrico dos provetes. De salientar que no presente trabalho foram realizados 4 provetes por cada geometria em estudo, de forma a garantir uma amostragem que confira um grau de confiança satisfatório ao estudo. Por fim, são definidas as condições de ensaio e apresentados os resultados obtidos no que concerne aos modos de rotura, curvas $P-\delta$, resistência das juntas e respetiva análise e comentário de resultados.

3.1.1 Materiais

Nesta secção é realizada uma apresentação detalhada dos materiais utilizados no trabalho experimental, no que se refere ao material dos substratos e adesivos.

3.1.1.1 Aderentes

Os provetes produzidos são em material compósito pré-impregnado e unidirecional (SEAL® Texipreg HS 160 RM) de matriz polimérica de resina epóxida reforçada com fibra de carbono (*Carbon-fiber reinforced plastic* ou CFRP). Os plásticos reforçados a fibras de carbono são os materiais de excelência em aplicações de alto desempenho como no desporto de competição ou na indústria aeronáutica, onde o fator mais decisivo é a resistência, rigidez específica e estruturas leves. Na Tabela 4 estão expostas as propriedades elásticas ortotrópicas do CFRP.

Tabela 4 - Propriedades elásticas ortotrópicas do CFRP, com as fibras alinhadas unidireccionalmente na direção x enquanto y e z representam as direções transversas [101]

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

3.1.1.2 Adesivos

Todos os adesivos utilizados nos ensaios são de bi-componente (resina + endurecedor), dois de base epóxico e um de base de poliuretano. Os três adesivos apresentam uma viscosidade baixa, o que facilita a sua deposição nas superfícies a ligar, permitindo variar facilmente a espessura de adesivo e colmatar alguma falta de planeza dos substratos [102].

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo estrutural Araldite® AV138 (Figura 85), fabricado pela empresa suíça Huntsman Advanced Materials, caracteriza-se pelo seu comportamento frágil mas de elevada resistência (Figura 84 e Tabela 5), e é adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [103].

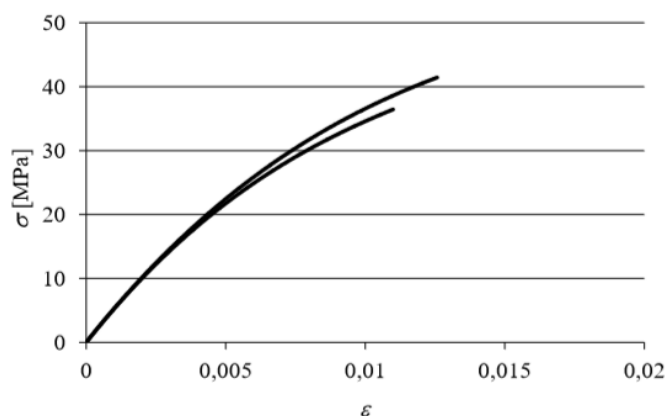


Figura 84 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [103]

Este adesivo de base epóxico, termoendurecível, é composto por dois componentes, resina AV138 e endurecedor HV998 (Figura 85). Este adesivo é fornecido em duas embalagens e, como tal, é necessário proceder à pesagem dos dois componentes, utilizando uma balança digital. A relação de mistura utilizada neste adesivo é de 100 g de resina para 40 g de endurecedor, com uma precisão de $\pm 5\%$. Este adesivo apresenta-se na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa emissão de gases e perdas voláteis [102].



Figura 85 - Adesivo Araldite® AV138 [102]

Tabela 5 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [98, 103]

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

^a Valores estimados na referência [98]

^b Valores do fabricante

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo estrutural Araldite® 2015, igualmente fabricado pela empresa suíça Huntsman Advanced Materials, caracteriza-se pela baixa contração, comportamento moderadamente dúctil e alta resistência ao corte e à clivagem. É um adesivo de base epóxido, termoendurecível, composto por dois componentes e fornecido em cartucho (Figura 86). Este adesivo é composto por resina e endurecedor, e aplica-se com uma pistola manual, o que permite de forma simples e fácil aplicar o adesivo com recurso a um bico que mistura os dois componentes em quantidades iguais. Apresenta-se como uma pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente.



Figura 86 - Formato comercial do adesivo Araldite® 2015 de 50 ml [102]

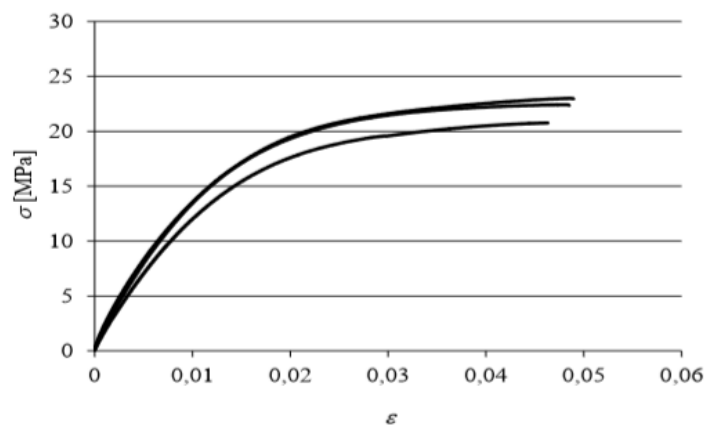


Figura 87 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [103]

A resistência e durabilidade das ligações efetuadas por este adesivo são dependentes de um tratamento adequado das superfícies. No mínimo, as superfícies a ligar devem ser limpas com um bom agente desengordurante tal como acetona ou isopropanol (para plásticos), a fim de remover todos os vestígios de contaminações e sujidade. As curvas σ - ϵ de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 87 [103].

O adesivo Araldite® 2015, quando comparado com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração de tensão. A Tabela 6 indica as propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo [103].

Tabela 6 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [103]

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

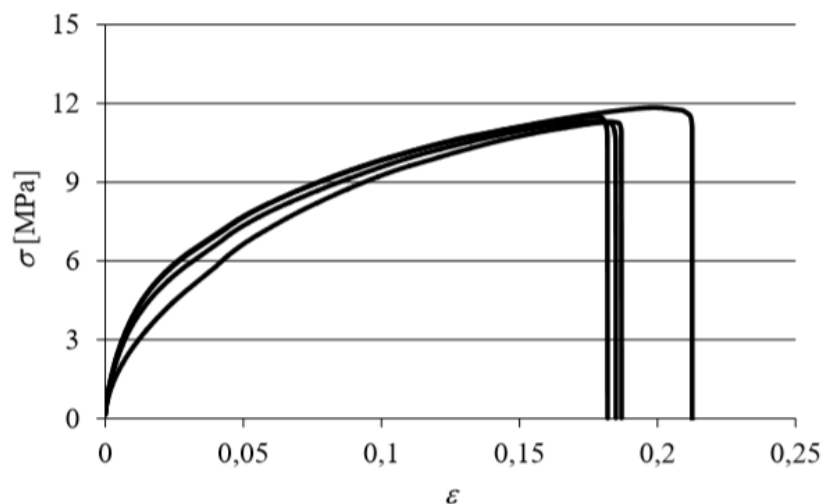
^a Valores do fabricante

3.1.1.2.3 Sikaforce® 7752

O adesivo estrutural Sikaforce® 7752 é fornecido pela empresa Sika® em dois componentes separados, e caracteriza-se pela sua base de poliuretano estrutural tixotrópico (Figura 88). A sua resina polioliol com cargas e endurecedor de base isocianato possui uma baixa emissão de gases e perdas voláteis, e oferece uma boa resistência a altas temperaturas [102].



Figura 88 - Adesivo Sikaforce® 7752 [102]

Figura 89 - Curvas σ - ϵ relativas ao adesivo Sikaforce® 7752 [104]

O Sikaforce® 7752 é um adesivo que cura à temperatura ambiente, com boa resistência ao envelhecimento e à exposição química, com grande resistência ao impacto e bastante flexível a baixas temperaturas. Este adesivo encontra aplicação na ligação de metais, cerâmicos, madeira e seus derivados. As curvas σ - ϵ dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 89 [104]. Na Tabela 7 são indicados os principais valores das propriedades mecânicas e de fratura do adesivo.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752

Propriedades	Sikaforce® 7752
Módulo de Young, E [GPa]	$0,49 \pm 0,09$
Coefficiente de Poisson, ν^a	0,30
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	$3,24 \pm 0,48$
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	$11,48 \pm 0,25$
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	$19,18 \pm 1,40$
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	$0,19 \pm 0,01$
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	$5,16 \pm 1,14$
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	$10,17 \pm 0,64$
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	$54,82 \pm 6,38$
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	$2,36 \pm 0,17$
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	$5,41 \pm 0,47$

^a Valores do fabricante

3.1.2 Geometria e dimensões das juntas

A junta adesiva em estudo com geometria em degrau encontra-se representada esquematicamente na Figura 90.

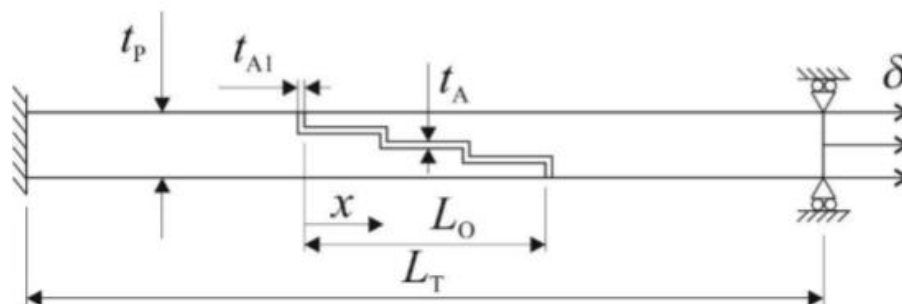


Figura 90 - Esquema representativo da geometria de junta em degrau e respetivas condições fronteira

Na Tabela 9 definem-se os parâmetros de cota presentes na Figura 56 para as 4 configurações de junta contempladas no presente estudo.

Tabela 8 - Parâmetros usados na geometria de junta.

Parâmetro	Valor
Número de degraus (N)	3
Espessura do substrato (t_p)	3 mm
Espessura de adesivo longitudinal ao carregamento (t_A)	0,2 mm
Espessura de adesivo transversal ao carregamento (t_{A1})	0,2 mm
Comprimento de sobreposição (L_o)	12,5; 25; 37,5 e 50 mm
Comprimento total do provete (L_T)	180 mm
Largura do provete (b)	15 mm

3.1.3 Fabrico e ensaio das juntas

Nesta secção descreve-se com detalhe o processo de fabrico das juntas em degrau estudadas nesta dissertação, contemplando as seguintes etapas:

- Fabrico das placas de compósito;
 - Corte dos substratos;
 - Maquinagem dos degraus;
 - Preparação superficial dos substratos (após maquinagem);
 - Preparação dos adesivos (mistura dos componentes);
 - Colagem das juntas e cura dos adesivos;
 - Acabamento pós-cura das juntas.
-
- Fabrico das placas de compósito

Foram produzidas placas de compósito de carbono-epóxico com 3 mm de espessura, para posteriormente se cortar os substratos necessários. Foi utilizado pré-impregnado unidirecional da *SEAL® Texipreg HS160 RM* para o fabrico das placas com uma sequência de empilhamento de 0°. O fabrico das placas segue os seguintes passos:

- Retirar o rolo de compósito de carbono-epóxico da arca congeladora, deixando estabilizar à temperatura ambiente por alguns minutos;
 - Com o auxílio de uma chapa metálica 300×300 mm², posicionar-se corretamente a régua para se proceder ao corte;
 - Após se terem 10 folhas (300×610 mm) cortam-se estas a meio de modo a se obter 20 folhas (300×305 mm);
 - De seguida efetua-se o empilhamento, tendo em atenção que no presente caso a sequência de empilhamento de todas as camadas é 0°. Inicialmente, coloca-se as duas folhas de carbono-epóxico a colar, em cima da mesa de trabalho, e com uma pistola de calor passar 2 vezes por cada folha;
 - Depois, com cuidado, sobrepor uma sobre a outra, e com a mão comprimi-las;
 - Para evitar a formação de vazios entre camadas, comprimir com uma peça metálica as folhas em questão;
 - Com um x-ato, no canto da folha de carbono-epóxico, retirar a folha de revestimento num ângulo de 45°, garantido que sai toda de uma vez;
 - Depois da placa estar pronta, é preciso preparar o molde. Primeiro, com uma espátula remover qualquer vestígio de resina agarrado às placas, moldura ou tiras metálicas, que tenha restado de utilizações anteriores;
 - Depois, aplicar desmoldante às duas placas, à moldura de 3 mm e às quatro tiras metálicas de 0,3 mm. Repetir este processo 3 vezes de cada lado;
 - Por fim, posicionar a placa de carbono-epóxico no molde e colocar na prensa de pratos quentes INTOCO;
 - As placas foram colocadas na prensa de pratos quentes INTOCO serem submetidas a um ciclo térmico, tendo como parâmetros de controlo a pressão e a temperatura. As placas foram submetidas a um ciclo térmico recomendado pelo fabricante, a uma pressão de 30 bar. O ciclo começa com 1 h a 148°C, seguida de 1 h a 140°C, deixando depois arrefecer a placa até à temperatura ambiente (20°C). Por vezes foi necessário, abrir a água para aumentar a velocidade de arrefecimento. A partir dos 50°C, retirou-se a placa da prensa, deixando-a a arrefecer ao ar livre até à temperatura ambiente.
-
- Corte dos substratos

As placas de compósito foram cortadas com as dimensões finais necessárias para os provetes. Para este efeito utiliza-se a máquina de corte BATISTI MECCANICA s.r.l DV25. Esta máquina é constituída por um disco de corte com revestimento de diamante refrigerada a água e uma mesa deslizante. Começa-se por retirar as folhas de revestimento das placas de carbono. Depois, dá-se um corte vertical e um horizontal nos bordos da placa, para se obter duas arestas a 90°. Por fim, procedeu-se ao corte dos provetes no comprimento pretendido.

- Maquinagem dos degraus

Depois dos substratos já se encontrarem no comprimento e largura desejado definidos na Tabela 8, procedeu-se à maquinagem dos degraus (Figura 93) numa das extremidades dos substratos previamente cortados. Esta operação foi realizada na oficina mecânica do ISEP, na fresadora universal GambinSA modelo 1m (Figura 91), cujos parâmetros de trabalho se encontram definidos na Tabela 9. De referir que existiram algumas dificuldades na maquinagem dos degraus dos substratos, nomeadamente relacionados com abrasividade do material compósito, aos quais acrescem problemas de delaminação interlaminar.



Figura 91 - Fresadora Gambin SA modelo 1m

No setup criado, foram considerados calços posicionados na parte inferior dos substratos (Figura 92), prevenindo que estes sofram empenos na zona de maquinagem devido à entrada da fresa na peça.

Para a maquinagem dos degraus foi utilizada uma fresa com revestimento com carboneto de tungsténio do fabricante de ferramentas Garant.



Figura 92 - Pormenor do *setup* de maquinagem, onde se observa o posicionamento de calços na parte inferior substrato



Figura 93 - Maquinagem dos degraus na Fresadora Gambin SA modelo 1m

Tabela 9 - Parâmetros de maquinagem (operação fresagem)

Parâmetro	Valor
Avanço	100 mm/min
Velocidade rotação	1120 rot/min

Na Figura 94 apresenta-se um esquema de cotagem genérico para maquinagem dos degraus nos substratos em função de L_0 .

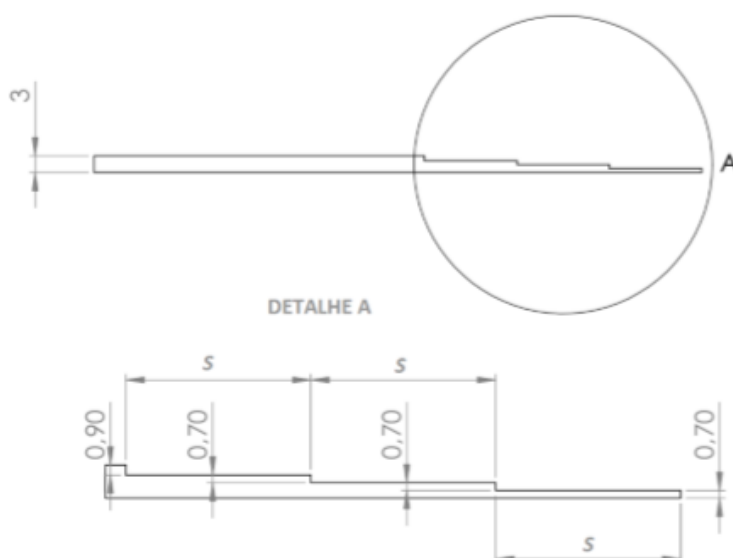


Figura 94 - Esquema de cotação para efeito de maquinagem

Na Tabela 10 está definido o parâmetro de cota S representado na Figura 62 em função do valor de L_0 das geometrias em análise.

Tabela 10 - Parâmetro de cota de maquinagem dos degraus

Comprimento de sobreposição – L_0 [mm]	S [mm]
12,5	4,23
25	8,4
37,5	12,57
50	16,73

- Preparação superficial dos substratos

A quarta etapa do procedimento de fabrico das juntas consiste na preparação superficial dos substratos. Inicialmente nesta fase submete-se a região de colagem dos substratos a uma limpeza superficial cuidada pelo processo passivo mecânico de lixagem. Este método de preparação tem com o propósito a remoção das *weak boundary layers* (i.e., óxidos e revestimentos), que apresentam fraca coesão ou que não aderem ao substrato ou ao adesivo com resistência suficiente, e que comprometem a resistência da junta. No final do processo, pretende-se a remoção das *weak layers* bem como alteração da topografia da superfície dos substratos, conferindo uma rugosidade uniforme. Esta etapa contribui para uma melhor ancoragem do mesmo.

Posteriormente ao tratamento dos substratos por processo de lixagem, estes são sujeitos a uma limpeza manual com acetona, que tem como objetivo remover partículas sólidas deixadas pelo processo de preparação superficial precedente, bem como eliminar vestígios oleosos das superfícies que vão receber adesivo.

Na Figura 95 apresenta-se um conjunto de substratos após conclusão do processo de tratamento superficial.



Figura 95 - Aspeto da superfície dos substratos após tratamento superficial de 4 das juntas

- Preparação dos adesivos

De uma forma geral, no processo de produção das juntas a divergência de procedimento deve-se ao modo de preparação, aplicação e cura dos adesivos em estudo: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

De facto, para cada adesivo são seguidas técnicas de preparação diferentes devido às suas características, as quais se passam a definir para cada adesivo.

Para o Araldite® AV138, a preparação da mistura consiste numa proporção de resina/endurecedor de 10 g/4 g. Esta mistura é mexida manualmente até à homogeneização do adesivo. Após a mistura do adesivo, este é aplicado manualmente com recurso a uma espátula sobre a região de colagem.

Por outro lado, a aplicação do adesivo Araldite® 2015, fornecido em bisnagas 50 ml + 50 ml, é realizada através do uso de uma pistola manual de pressão onde a mistura dos componentes é assegurada pelo bico de mistura da própria embalagem. A aplicação na zona de colagem é feita seguindo padrão de zig-zag (Figura 96).



Figura 96 - Pormenor de aplicação adesivo Araldite® 2015

O Sikaforce® 7752 L60 é um adesivo constituído por dois componentes, fornecido em duas embalagens separadas, uma de resina e outra de endurecedor (Figura 54). A mistura de resina/endurecedor é feita na razão de peso de 5 g/1 g, respetivamente. Após a pesagem e colocação dos componentes num recipiente para a mistura, deve-se proceder à mesma manualmente, durante tempo suficiente para se obter uma mistura homogénea do adesivo. A sua aplicação é realizada através da utilização de uma espátula, que permite espalhar o adesivo sobre a região de colagem.

De ressaltar que, para a execução das juntas, assegurou-se que quantidade de adesivo preparado é superior à quantidade necessária, de forma a evitar problemas relacionados com a ocorrência de vazios na região de colagem.

- Colagem das juntas e cura dos adesivos

Seguidamente ao trabalho preparatório dos substratos e dos adesivos, procedeu-se à colagem das juntas. Inicialmente começou-se por dispor os substratos sobre réguas de madeira com aplicação entre estes de uma folha de politetrafluoretileno (PTFE), que evita a colagem entre ambos.

Os adesivos são aplicados na região de colagem de um dos substratos, conforme se ilustra na Figura 97, e seguidamente procede-se à apresentação do substrato que se sobrepõe para fecho da junta. Esta operação é realizada com especial cuidado de forma a garantir o correto posicionamento e o alinhamento longitudinal entre substratos. De modo a garantir pressão constante durante processo de cura do adesivo foram aplicados grampos na zona adjacente de colagem (Figura 97).



Figura 97 - Aspetto da junta após a sua montagem

Pela observação da Figura 97 é constatado que, no ato de colagem da junta, o excesso de adesivo aplicado na região de colagem é expulso para os bordos dos provetes, que é necessário remover. Inicialmente retira-se a maior parte do excesso com auxílio de um alicate. Finalizado todo este processo, os provetes ficam em processo de cura atendendo às especificações particulares de cada adesivo, isto é, cura à temperatura ambiente durante uma semana.

- Acabamento pós-cura das juntas

Como referido anteriormente, após cura total é necessário executar o acabamento final dos provetes, eliminando por completo os excessos de adesivo depositados nas arestas exteriores, que influenciam a resistência da junta em análise, que se pretende aferir com rigor.

Inicialmente, com recurso a um alicate executa-se a remoção dos excessos de maior dimensão.

Seguidamente, é procedido ao acabamento por mó abrasiva, como se ilustra na Figura 98.



Figura 98 - Acabamento final dos provetes com mó abrasiva

Na Figura 99 mostra-se aspeto final de 4 provetes prontos para ensaio com os diferentes comprimentos de sobreposição.



Figura 99 - Aspeto de 4 provete prontos a ensaiar

3.1.4 Resultados experimentais

O ensaio das juntas realizou-se no laboratório de ensaios tecnológicos do ISEP na máquina de ensaios de tração Shimadzu AG-X 100 (Figura 100), onde as juntas foram solicitadas à tração. A célula de carga utilizada tem capacidade de 100 kN.



Figura 100 - Máquina Shimadzu – Autograph AG-X

Depois da realização dos testes experimentais é necessário que os resultados obtidos estejam organizados de forma a permitir a sua análise. Para cada adesivo e valor de L_0 obtiveram-se vários gráficos representativos do comportamento dos diversos provetes ensaiados. Neste subcapítulo são analisadas as curvas $P-\delta$, os modos de rotura de todos os provetes ensaiados, a resistência das juntas em função de L_0 e é feita a análise dos resultados.

Nesta secção são apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas separadamente por tipo de adesivo e valor de L_0 . Da Figura 101 à Figura 104 apresentam-se as curvas $P-\delta$ registadas nos ensaios dos provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, para cada um dos valores de L_0 definidos.

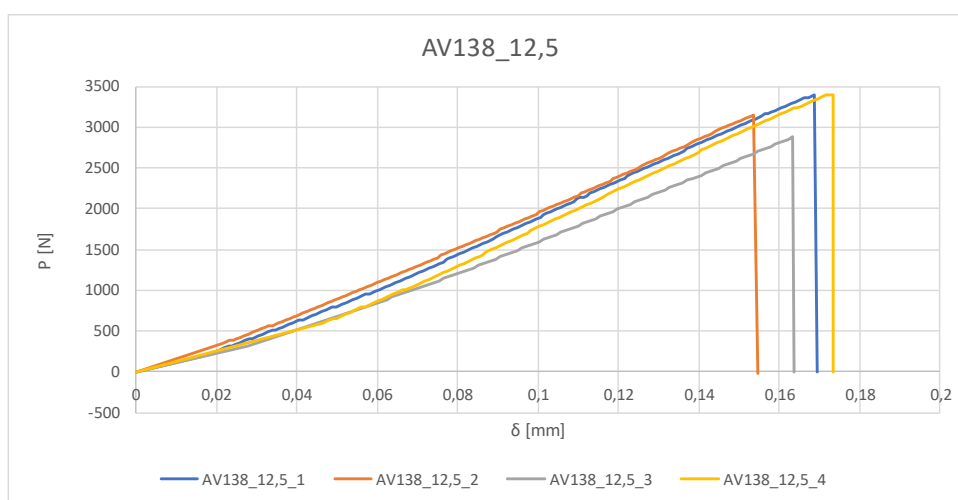


Figura 101 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm

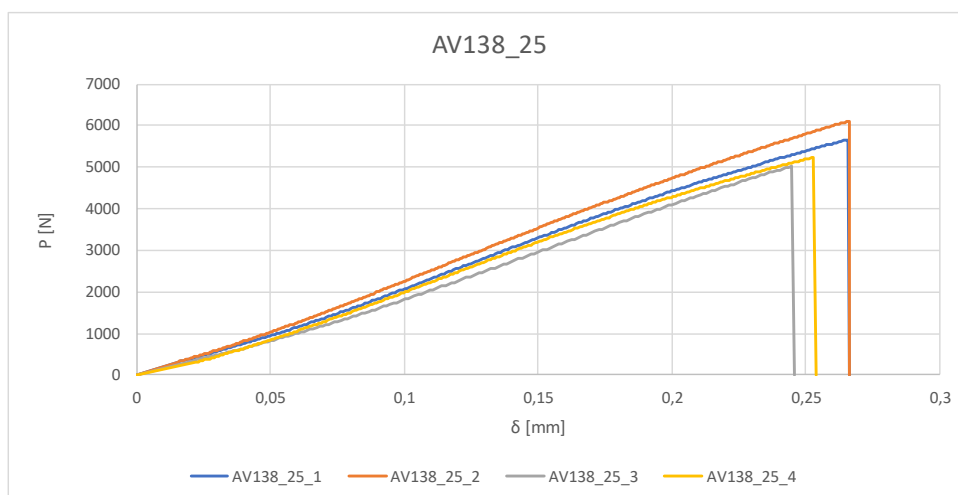


Figura 102 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=25$ mm

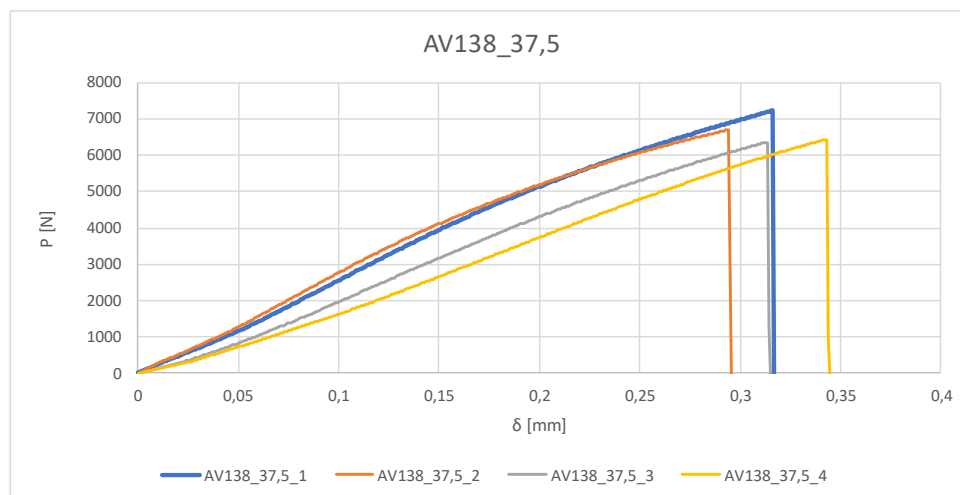


Figura 103 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=37,5$ mm

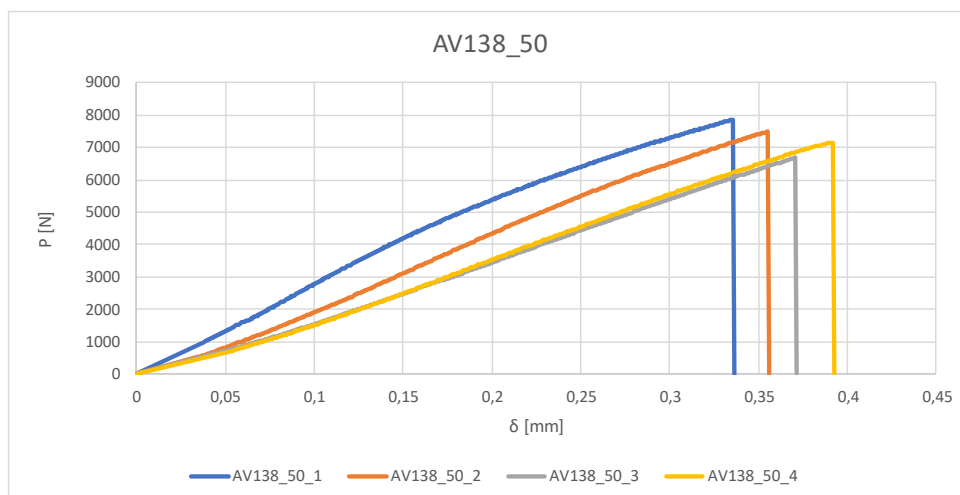


Figura 104 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm

A partir da análise das curvas P - δ das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 verifica-se que existe um bom acordo entre elas, no que diz respeito ao valor de $P_{máx}$. Como se pode verificar da Figura 101 à Figura 104, as curvas P - δ dos vários provetes ensaiados apresentam uma variação substancial no que concerne aos deslocamentos. Suspeita-se que problemas de amarração e escorregamento na máquina de ensaio possam ter influenciado negativamente os valores de deslocamento. No entanto, verifica-se que os deslocamentos de rotura foram baixos, o que demonstra o carácter frágil do adesivo Araldite® AV138, que não permite plastificação. Em conclusão, com o aumento do L_0 , verifica-se o aumento dos valores de resistência das juntas, acompanhados com aumento do valor de deslocamento.

Da Figura 105 à Figura 108 apresentam-se as curvas $P-\delta$ dos ensaios dos provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015, para cada um dos valores de L_0 definidos.

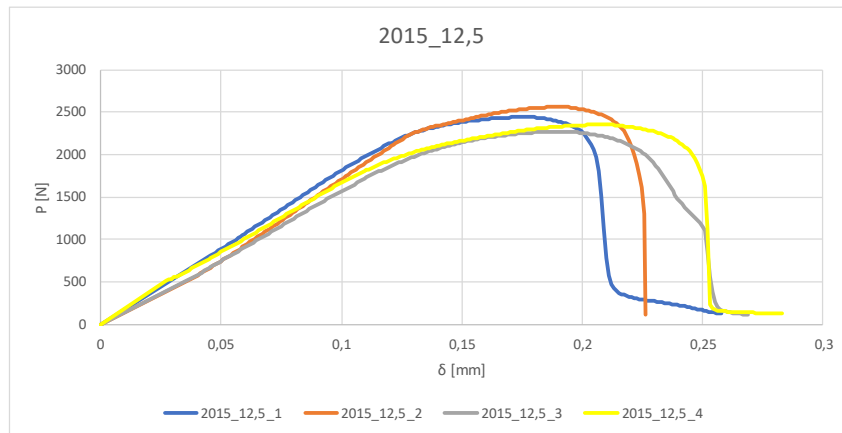


Figura 105 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=12,5$ mm

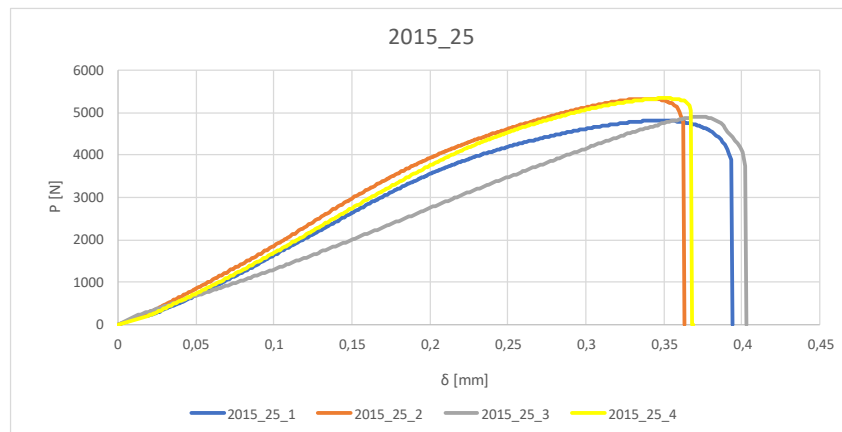


Figura 106 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=25$ mm

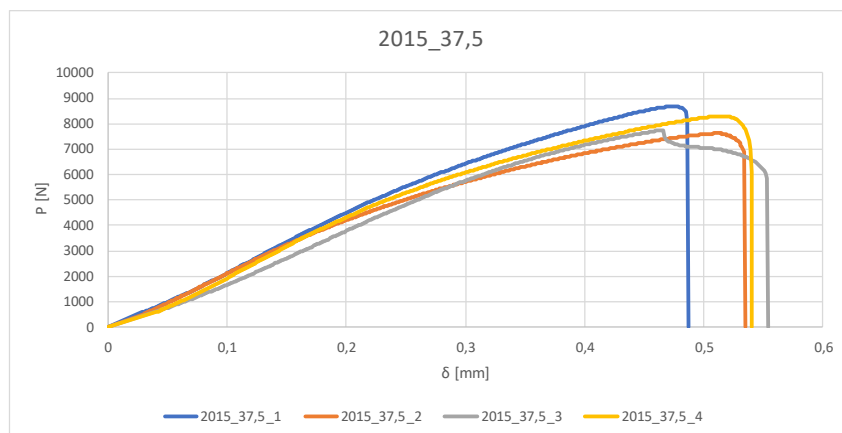


Figura 107 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm

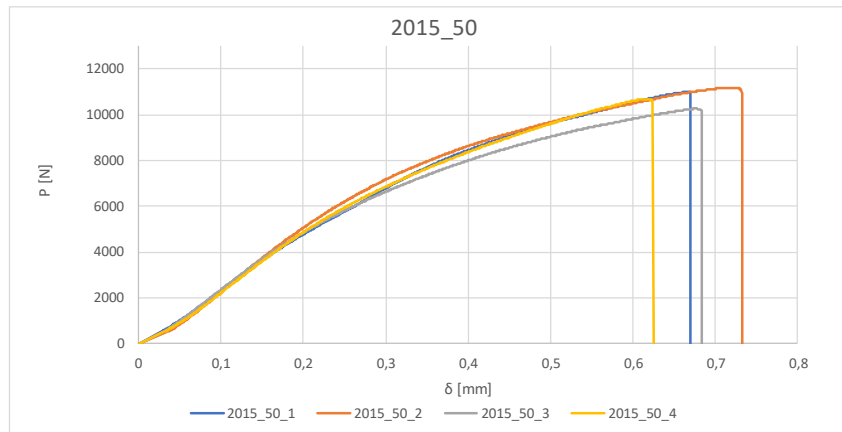


Figura 108 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=50$ mm

Através da análise da Figura 105 à Figura 108 verifica-se que os conjuntos de curvas P - δ de cada valor de L_0 estão de acordo entre eles relativamente aos valores de resistência, deslocamentos de carga máxima e de rotura. O adesivo Araldite® 2015 é mais dúctil que o adesivo Araldite® AV138, o que induziu valores de plastificação superiores dos aderentes. Para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 verifica-se que a resistência e o deslocamento de rotura da junta adesiva apresentam valores superiores aos evidenciados para o adesivo Araldite® AV138. Como seria de esperar, com o aumento de L_0 , os valores da resistência e do deslocamento de rotura aumentaram.

Da Figura 109 à Figura 112 representam-se as curvas P - δ dos ensaios de provetes das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752, para os quatro valores de L_0 .

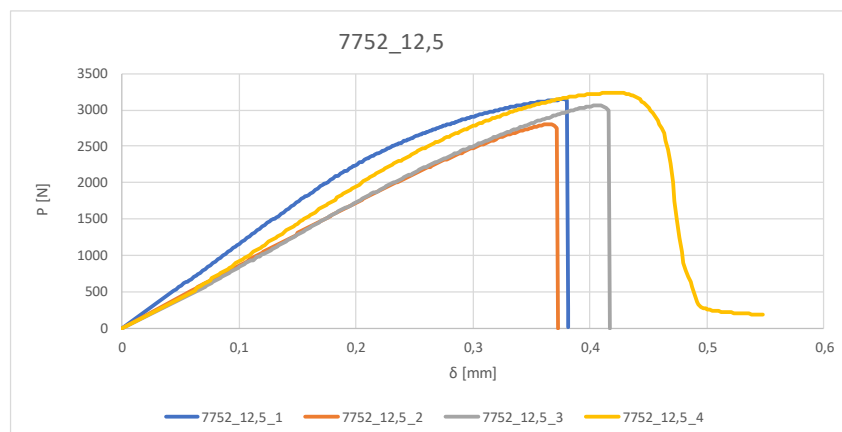


Figura 109 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm

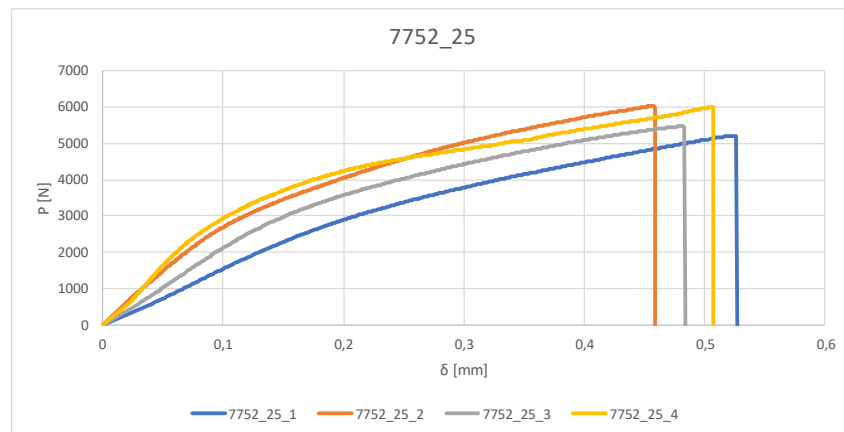


Figura 110 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=25$ mm

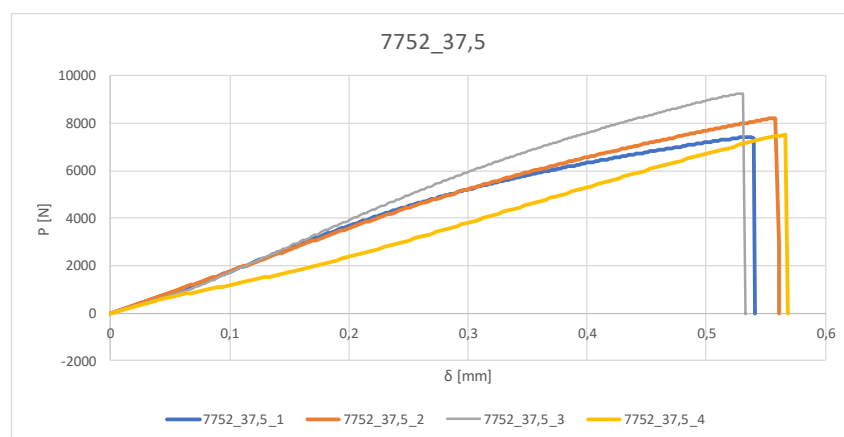


Figura 111 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=37,5$ mm

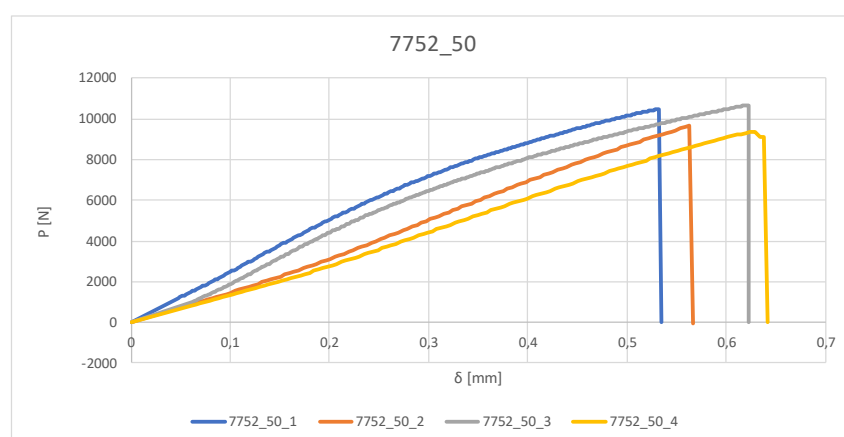


Figura 112 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm

Pela análise da Figura 109 à Figura 112 pode-se observar uma boa repetibilidade das curvas P - δ . Relativamente aos resultados obtidos verifica-se que se obteve valores superiores no que concerne a $P_{m\acute{a}x}$ e $\delta_{m\acute{a}x}$ do que os do adesivo Araldite® AV138, mas inferiores aos do adesivo Araldite® 2015. Devido à menor resistência e maior ductilidade do adesivo Sikaforce® 7752, verifica-se claramente a ocorrência da transição elasto-plástica do adesivo no domínio de forças atingidas nos ensaios. Após a plastificação do adesivo, as juntas comportam-se de forma praticamente linear até à rotura. Em suma, pela análise das Figura 109 à Figura 112 pode-se constatar um aumento dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ e $\delta_{m\acute{a}x}$ nas juntas à medida que se incrementa o L_0 .

3.1.4.1 Modos de rotura

Nesta secção são apresentados os modos de rotura obtidos para a juntas em degrau, para os três tipos de adesivos utilizados, separadamente por L_0 . Da Figura 113 à Figura 116 representam-se os modos de rotura dos provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, para cada um dos valores de L_0 .



Figura 113 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm



Figura 114 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=25$ mm

Pela observação da Figura 113 à Figura 116 é possível concluir que os modos de rotura para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 foram semelhantes para todos os valores de L_0 . A presença de adesivo em ambos os aderentes é representativa de rotura coesiva, o que mostra que a ligação entre o adesivo e os aderentes é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo. Este modo de rotura resulta de uma boa preparação das superfícies dos aderentes. Contudo, é de notar que certas juntas possuem zonas nas quais existiu rotura interlaminar nomeadamente para algumas juntas de $L_0=25$, 37,5 e 50 mm.



Figura 115 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=37,5$ mm

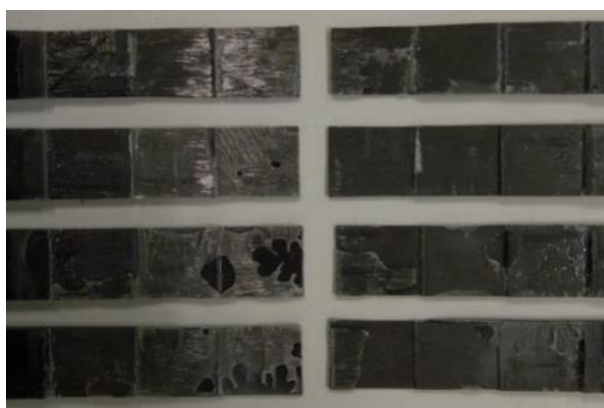


Figura 116 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm

Da Figura 117 à Figura 120 representam-se os modos de rotura dos provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015, para cada um dos valores de L_0 .

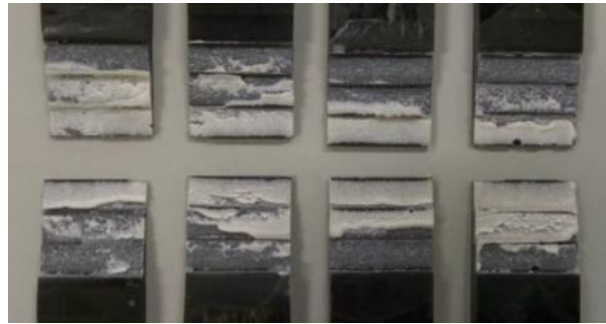


Figura 117 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=12,5$ mm

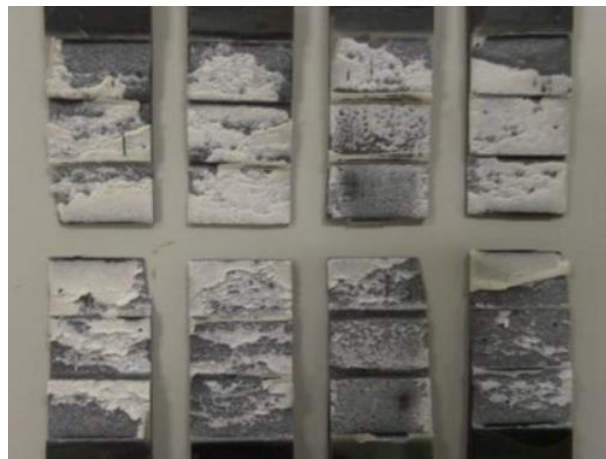


Figura 118 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=25$ mm



Figura 119 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm



Figura 120 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=50$ mm

Através da análise da Figura 117 à Figura 120 é possível verificar que ocorreram roturas coesivas do adesivo. Nestes provetes, as porções de adesivo nas superfícies de ambos os aderentes foram semelhantes, o que é indicativo de uma rotura perfeitamente coesiva, nomeadamente para $L_0=12,5$ e 25 mm. De salientar que para $L_0=37,5$ e 50 mm apesar de a rotura também ser coesiva, verifica-se que algumas juntas possuem zonas em que é visível a rotura interlaminar.

Da Figura 121 à Figura 124 representam-se os modos de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752, para cada um dos valores de L_0 .



Figura 121 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm

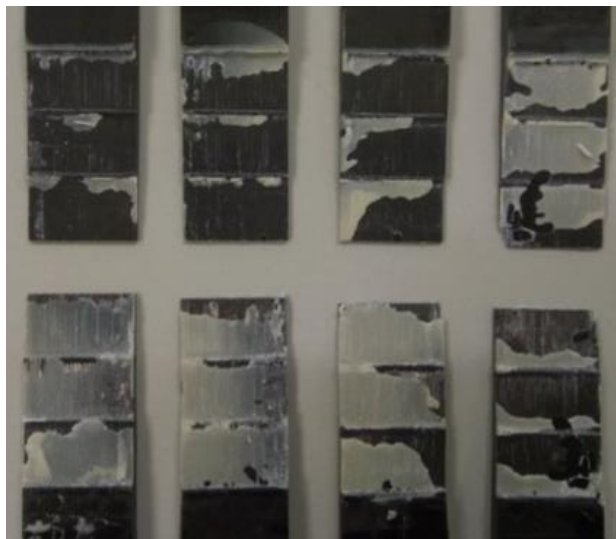


Figura 122 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=25$ mm

Pela análise da Figura 121 à Figura 124 é possível verificar que as superfícies de rotura obtidas para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 se tratam de roturas coesivas. Neste caso, tal como nos modos de rotura verificados nas juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015, constata-se que as porções de adesivo nas superfícies de ambos os aderentes foram semelhantes, o que é indicativo de uma rotura perfeitamente coesiva. Contudo, apesar de se tratar do adesivo mais dúctil é de notar algumas zonas onde existe parcialmente rotura interlaminar para certos provetes de $L_0=25$, 37,5 e 50 mm.



Figura 123 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=37,5$ mm

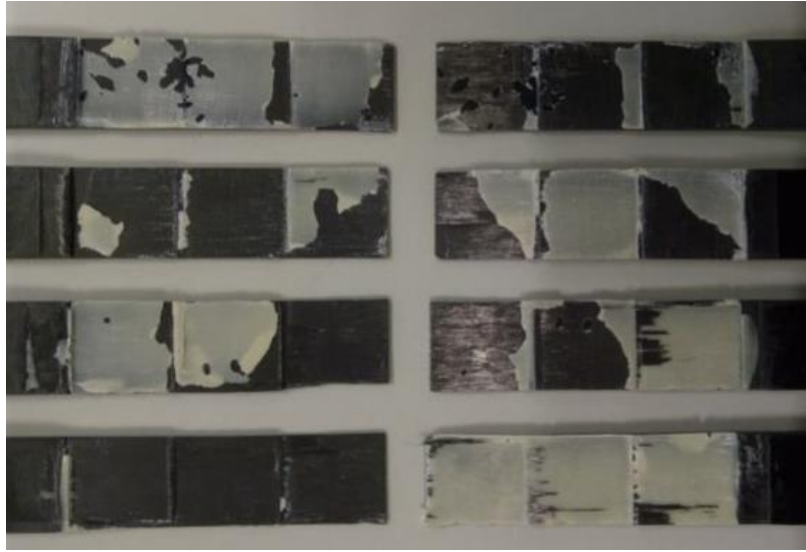


Figura 124 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm

3.1.4.2 Resistência das juntas

Neste subcapítulo são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente. Foram sempre considerados os 4 provetes ensaiados experimentalmente para calcular as médias e o desvio padrão de cada configuração de junta.

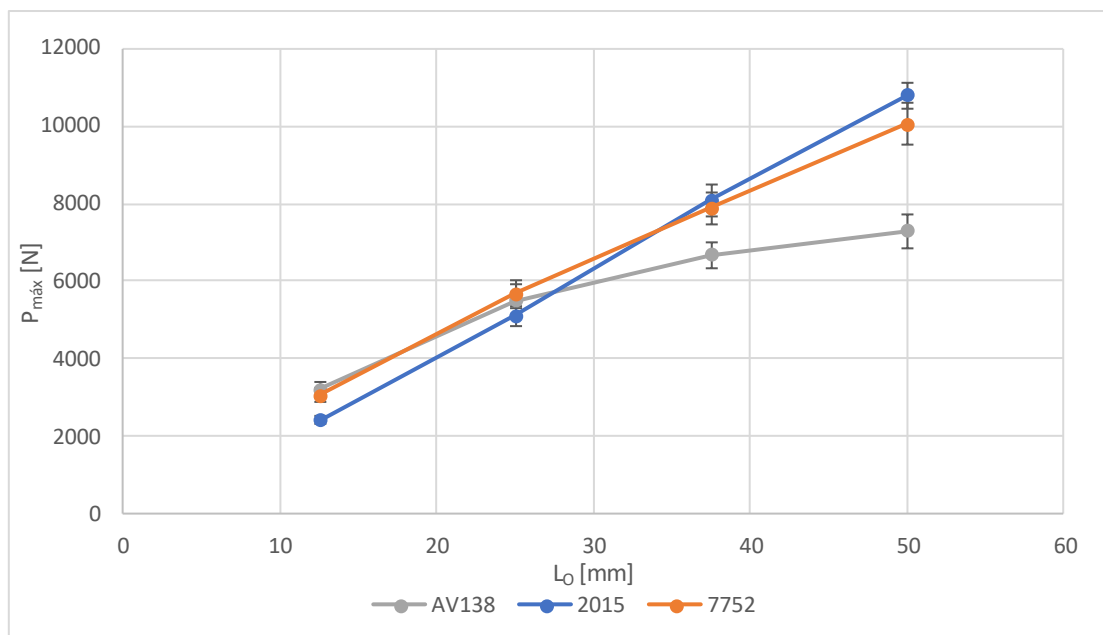


Figura 125 - Valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 em função do valor de L_0

A Figura 125 representa o valor médio e respetivo desvio padrão dos valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 das juntas coladas com o adesivo Araldite®

AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. A partir da análise gráfica da Figura 125 é possível concluir que, independentemente do adesivo, $P_{m\acute{a}x}$ aumenta com o aumento de L_0 . Naturalmente, pode ser inferido que o tipo de adesivo e L_0 têm efeito preponderante nos valores de $P_{m\acute{a}x}$, conforme é demonstrado pelos resultados obtidos nos ensaios experimentais. Igualmente, é possível constatar que a evolução da resistência em função de L_0 é aproximadamente linear para o Araldite® AV138, Araldite® 2015. Analisando o desempenho das juntas coladas com Araldite® AV138, verifica-se que $P_{m\acute{a}x}$ aumenta com o aumento do L_0 , embora o incremento de resistência não seja tão evidente em comparação com os resultados demonstrados com os restantes adesivos.

Em relação ao adesivo Araldite® AV138, o seu comportamento frágil é demonstrado pela inexistência de plastificação e redistribuição de tensões após se atingir o valor de $P_{m\acute{a}x}$, sendo que a rotura de ligação ocorre instantaneamente. Quando se procede à comparação dos resultados experimentais de resistência por adesivo para $L_0=12,5$ mm, verifica-se uma aproximação muito significativa da capacidade de carga máxima, notando uma ligeira superioridade para o AV138, sendo o que apresenta menor eficiência o Araldite® 2015. Com o aumento de L_0 , os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 progressivamente aumentam o seu desempenho, apresentando melhor comportamento em relação ao adesivo Araldite® AV138. Tal facto pode-se explicar pela ocorrência de plastificação do adesivo antes de rotura da ligação, que permite a redistribuição de tensões na camada adesiva, que contribui para o aumento da resistência das juntas.

Para $L_0=25$ mm continua a existir uma proximidade de eficiência no que respeita à capacidade de resistência máxima dos 3 adesivos, contudo o Sikaforce® 7752 apresenta uma insignificante superioridade.

Para $L_0=37,5$ mm o adesivo Araldite® 2015 passa a demonstrar melhor desempenho que os restantes adesivos, com valor apurado de $P_{m\acute{a}x}=8081$. No entanto o Sikaforce® 7752 mantém uma boa aproximação com $P_{m\acute{a}x}=7885$ N. O Araldite® AV138 passa a ter a eficiência mais baixa com $P_{m\acute{a}x}=6677$ N.

Como seria de esperar, para $L_0=50$ mm, o adesivo Araldite® 2015 exhibe melhor resultado em termos de $P_{m\acute{a}x}$ (10779 N), ultrapassando muito ligeiramente o Sikaforce® 7752 (10046 N) e significativamente acima do Araldite® AV138 (7290N).

É de salientar a evolução perfeitamente linear dos valores de resistência em função L_0 dos adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Apesar de Sikaforce® 7752 apresenta uma ductilidade mais elevada do que Araldite® 2015, que permite a plastificação completa da camada de adesivo e, conseqüentemente, um valor de $P_{m\acute{a}x}$ praticamente proporcional a L_0 , foi o Araldite® 2015 que apresenta o maior aumento de resistência com o aumento de L_0 dentro dos três adesivos em análise.

Em suma, e de acordo com resultados obtidos, é possível concluir que os melhores desempenhos são obtidos com a utilização de adesivos dúcteis para L_0 maiores.

3.2 Trabalho numérico

Neste capítulo são abordadas as condições de análise numérica utilizadas na análise das diferentes configurações de junta, sendo apresentado ainda o MDC triangular utilizado. Ao nível de resultados, será exposto numa primeira fase o estudo das tensões σ_y e τ_{xy} ao longo da camada adesiva, além disto será ainda realizado um estudo da variável de dano dos elementos coesivos do adesivo com o fim de se entender o processo de rotura das juntas. No que se refere ao estudo da resistência das juntas, serão exibidos os valores numéricos e a respetiva análise dos mesmos. Irá fazer-se ainda uma comparação entre os valores numéricos e experimentais apresentados anteriormente. Por fim, será realizada uma comparação com os resultados obtidos experimentalmente de juntas em degrau com aderentes de alumínio, JSS e JSD, retirado do trabalho de Silva [105].

3.2.1 Preparação dos modelos numéricos

Para o desenvolvimento da análise numérica foi escolhido o *software* Abaqus® versão 2017. O facto de este *software* se basear no método de EF e a existência de um módulo integrado de MDC que permite a simulação do dano e a previsão da resistência das juntas adesivas, influenciaram a sua seleção.

Para a concretização dos testes numéricos através deste *software* é necessário a criação de um modelo correspondente às juntas em estudo. De seguida é apresentado detalhadamente a metodologia efetuada em cada módulo do programa para a elaboração do modelo pretendido.

- Módulo “Part”

Esta primeira fase, passa pelo dimensionamento dos limites exteriores, posteriormente é efetuado a divisão nas devidas partições, de forma a que o modelo teórico se aproxime o mais possível do modelo real, como é sugerido na Figura 126. Estas partições servem para a criação dos degraus, das camadas de adesivo e ainda das camadas interlaminares. Foi necessário ainda a remoção das parcelas de adesivo localizados entre os segmentos horizontais e verticais da camada adesiva. Para isso utilizou-se a função *remove faces*, devido às imposições de posicionamento dos elementos coesivos.

É neste módulo ainda que se realizam todas as alterações da geometria dos aderentes, de forma a obter os diferentes L_0 (Figura 127). Estes diferentes comprimentos de sobreposição resultam da alteração do comprimento “S”.

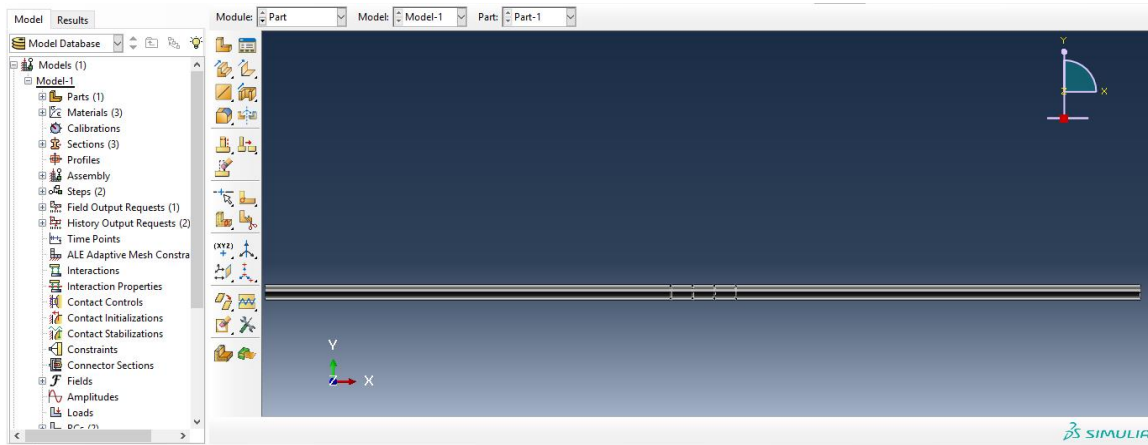


Figura 126 – Representação do software ABAQUS® e respetiva geometria da junta no módulo “Part”

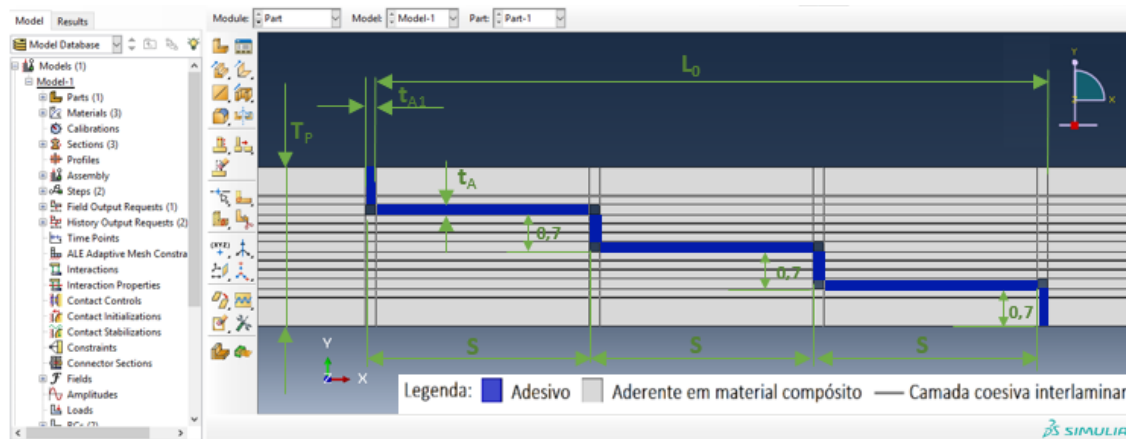


Figura 127 – Representação do software ABAQUS® e respetiva cotagem da zona de sobreposição da junta adesiva

- Módulo “Property”

Consiste na atribuição das diferentes propriedades a cada uma das partições criadas anteriormente. Na Figura 128 são apresentadas as propriedades mecânicas referentes à elasticidade dos aderentes e respetivos parâmetros.

O segundo passo dentro deste módulo passou por definir as propriedades mecânicas do adesivo, nomeadamente as suas propriedades elásticas, o mecanismo de dano e sua evolução, como é apresentado na Figura 129 e Figura 130.

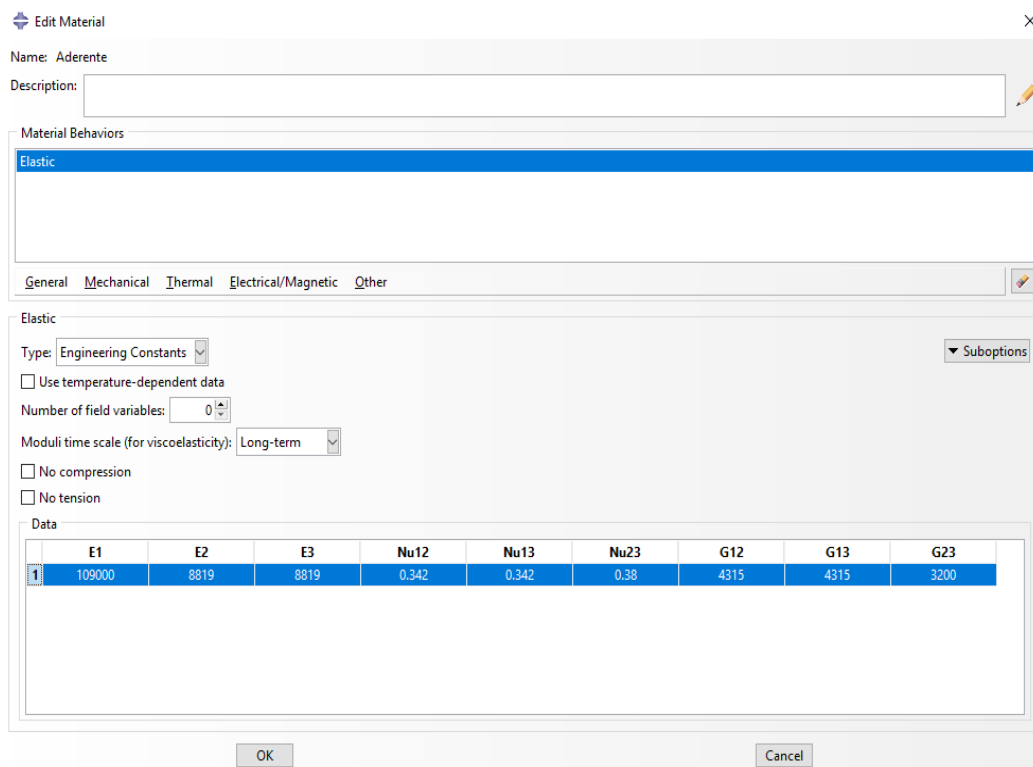


Figura 128 - Propriedades elásticas inseridas no ABAQUS® referentes aos aderentes

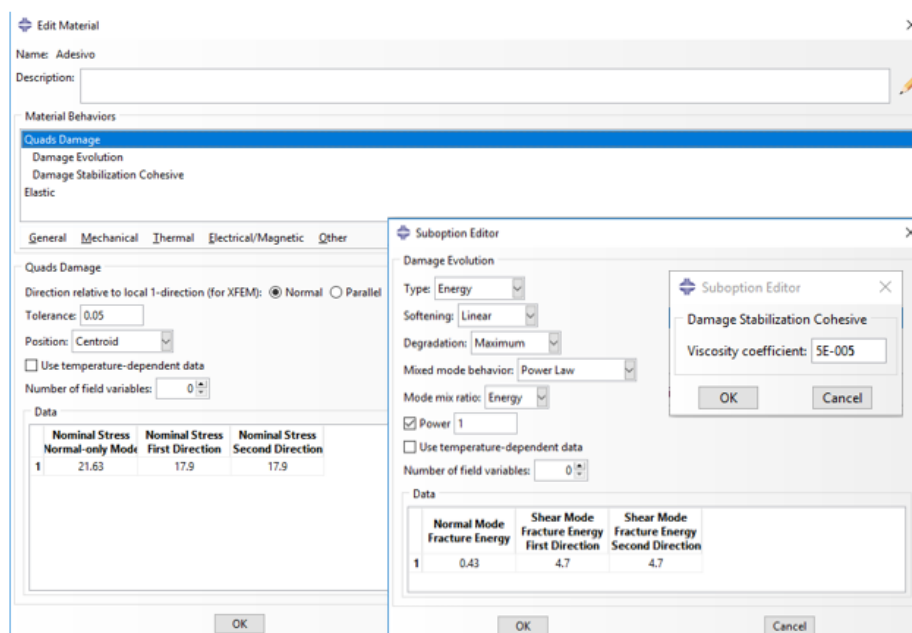


Figura 129- Propriedades mecânicas inseridas no ABAQUS® referentes ao adesivo (1)

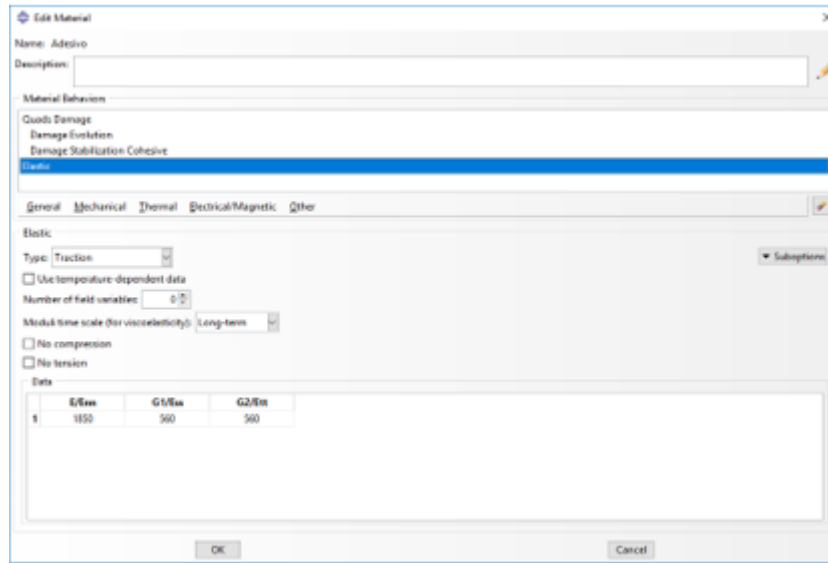


Figura 130 - Propriedades mecânicas inseridas no ABAQUS® referentes ao adesivo (2)

As últimas propriedades mecânicas atribuir são as das camadas interlaminares. Uma vez que estas têm caráter coesivo, foram inseridas as mesmas componentes de comportamento do adesivo, definindo-se de seguida os valores das suas propriedades, como mostra a Figura 131 e Figura 132.

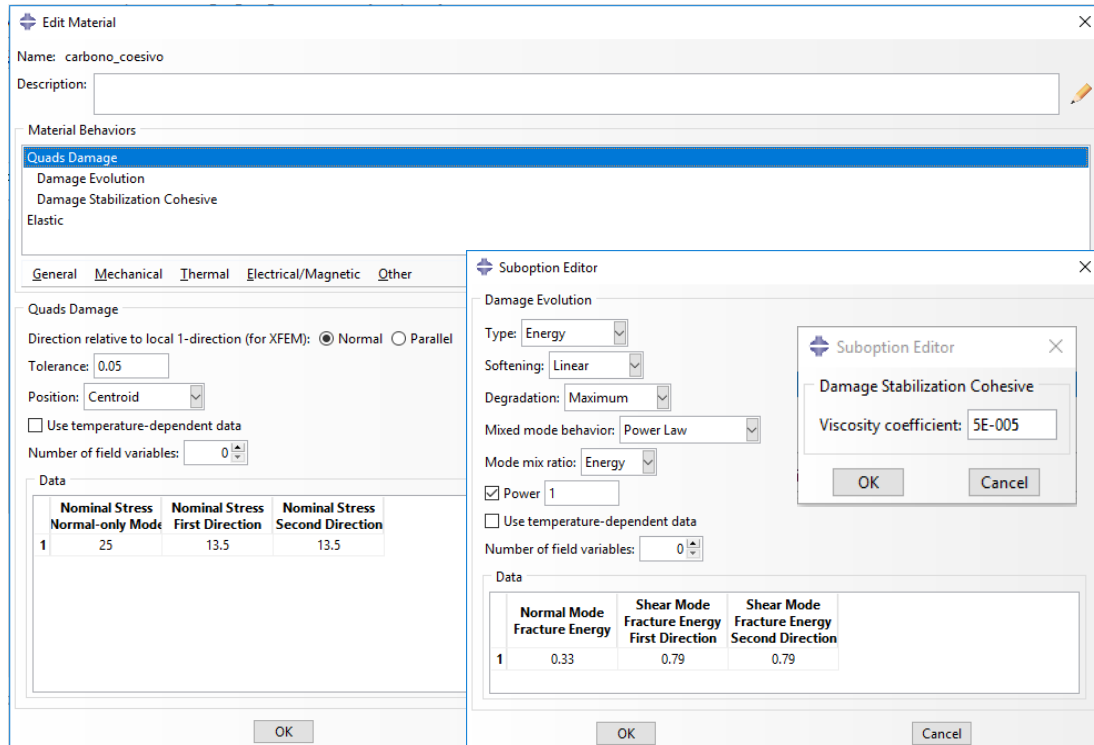


Figura 131 - Propriedades mecânicas inseridas no ABAQUS® referentes às camadas interlaminares (1)

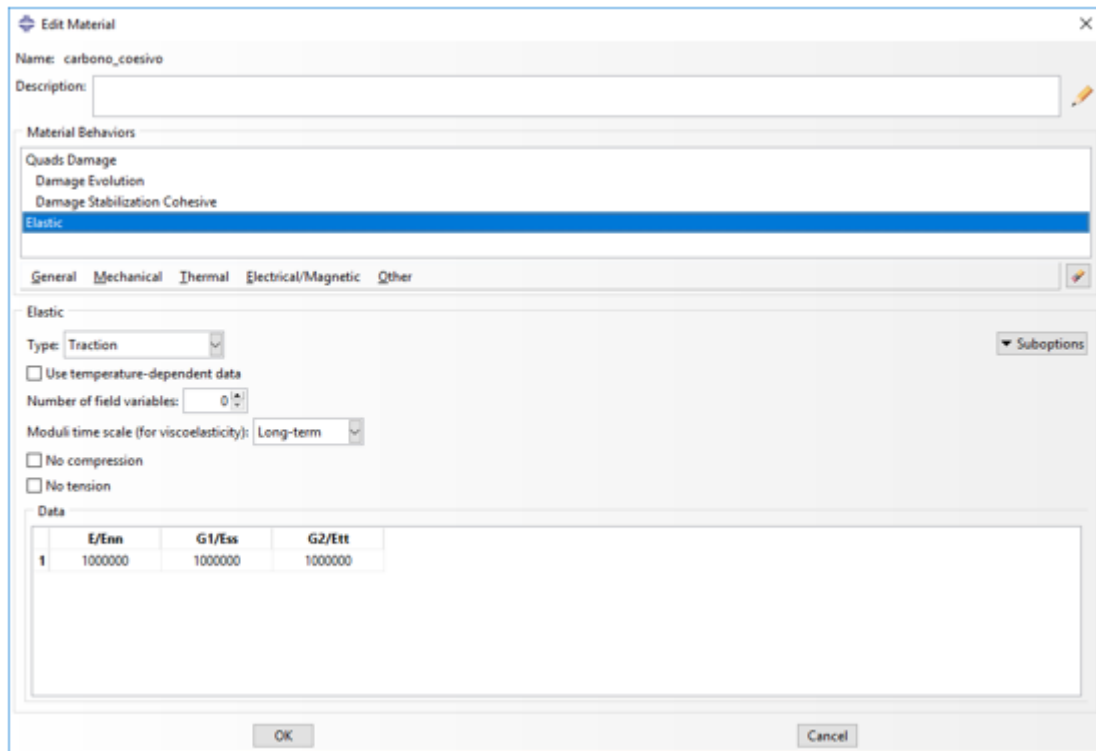


Figura 132 - Propriedades mecânicas inseridas no ABAQUS® referentes às camadas interlaminares (2)

A rigidez extremamente elevada definida na Figura 132 para as camadas interlaminares deve-se ao facto de tentar de aproximar a rigidez destas à da resina usada na produção do material compósito.

Após definição de todas as propriedades dos materiais é necessário fazer a sua atribuição às partições da junta. Deste modo, os aderentes são definidos como uma secção do tipo solida homogénea (Figura 133), enquanto as camadas de adesivo e interlaminares são definidas como secções do tipo coesiva (Figura 134 e Figura 135).

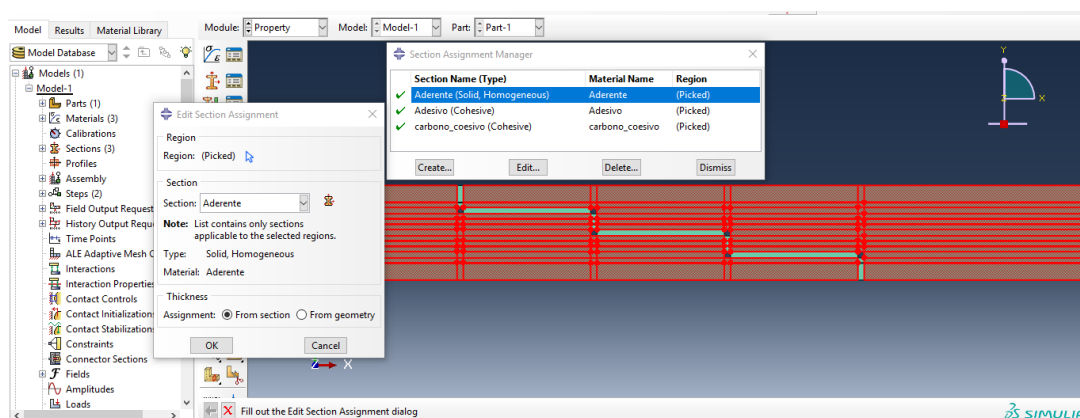


Figura 133- Representação do software ABAQUS® e respetiva atribuição dos aderentes

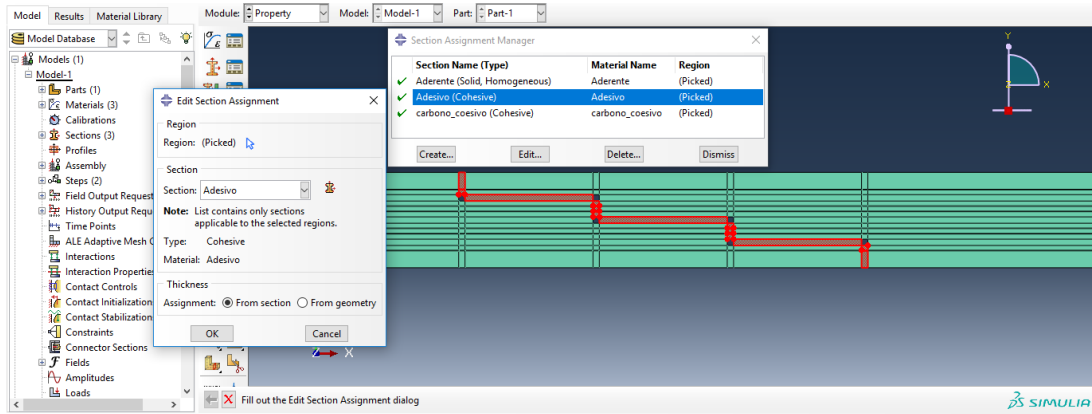


Figura 134- Representação do *software* ABAQUS® e respetiva atribuição do adesivo

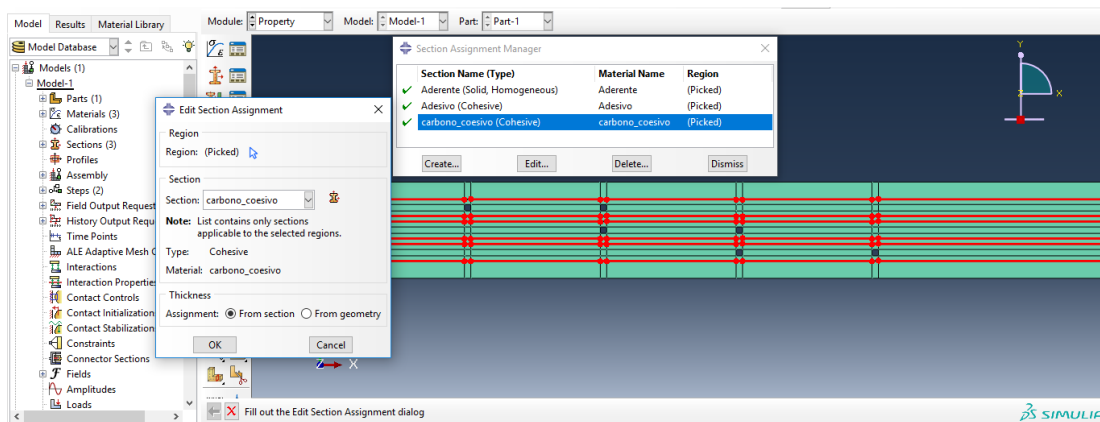


Figura 135 - Representação do *software* ABAQUS® e respetiva atribuição das camadas interlaminares

- Módulo “Step”

O *software* em estudo, realiza testes com base em incrementos. Deste modo, neste módulo é necessário introduzir o número máximo de incrementos que o ensaio pode conter, tal como os respetivos limites, limite máximo e mínimo. Ao definir-se a incrementação tem de se ter em conta que é necessário um tamanho de incremento mínimo, suficientemente reduzido para que o *software* não apresente problemas de convergência na zona de propagação do dano. O limite máximo de incrementos deve ainda ser extramente elevado para que a análise não termine prematuramente devido ao facto de atingir o número de incrementos permitidos. Na Figura 136 são referidos os valores utilizados na incrementação do presente estudo, que foram reajustados no “*step manager*”.

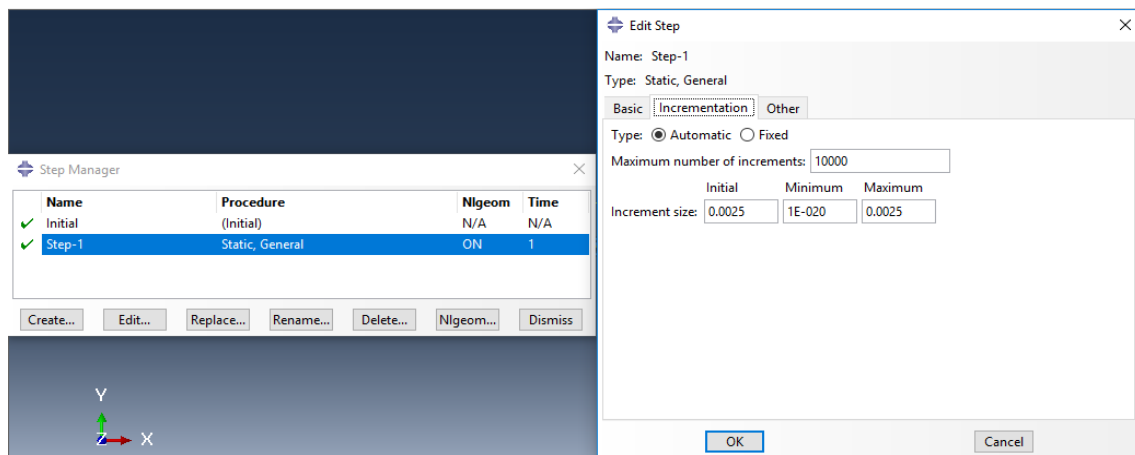


Figura 136 - Valores de incrementação utilizados no *software* ABAQUS® no caso de estudo

- Módulo “Load”

Neste módulo são introduzidas as condições fronteira. As duas condições impostas consistiram no encastramento de um dos aderentes (Figura 137) e aplicação de deslocamento ao segundo aderente, representado na Figura 138.

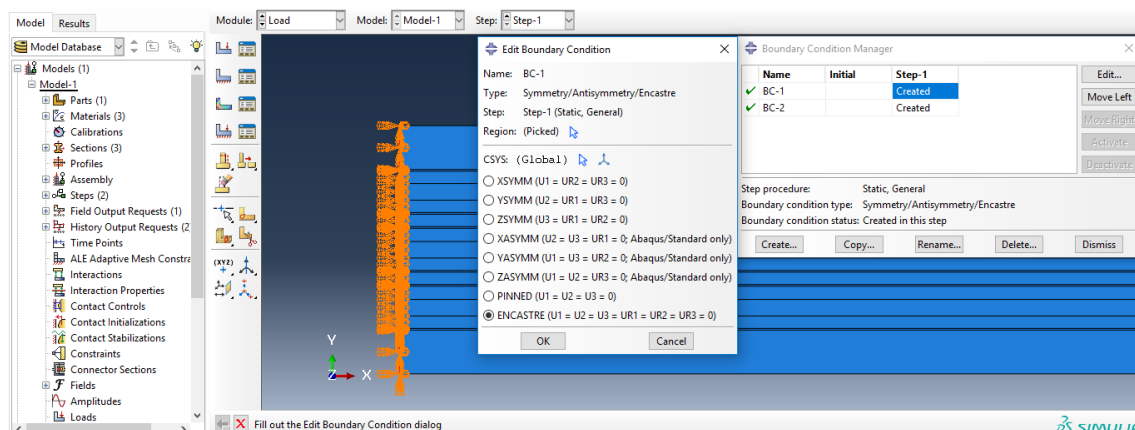


Figura 137 - Representação do *software* ABAQUS® e respetiva condição de encastramento da junta

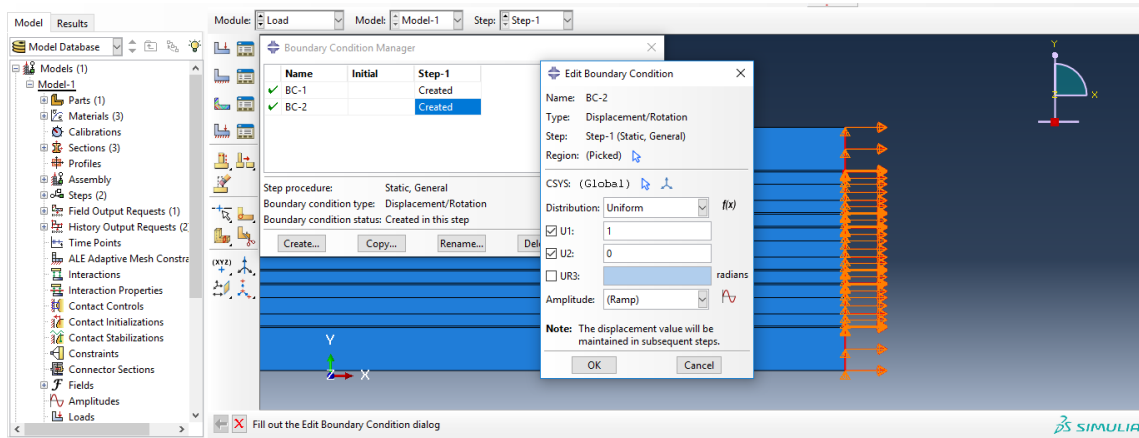


Figura 138 - Representação do *software* ABAQUS® e respetiva restrição transversal da junta

- Módulo “Mesh”

Neste modulo é definido o tipo de malha a utilizar. Antes de ser estabelecido tamanho da malha nos diferentes locais da junta, procede-se à definição do tipo de elemento de malha para cada componente. Nas camadas interlaminares e adesivas foi utilizado o elemento COH2D4, e para o aderente foi usado o elemento CPE4R. Na Figura 139 é representado o modo de definir o tipo de elemento da malha dos aderentes.

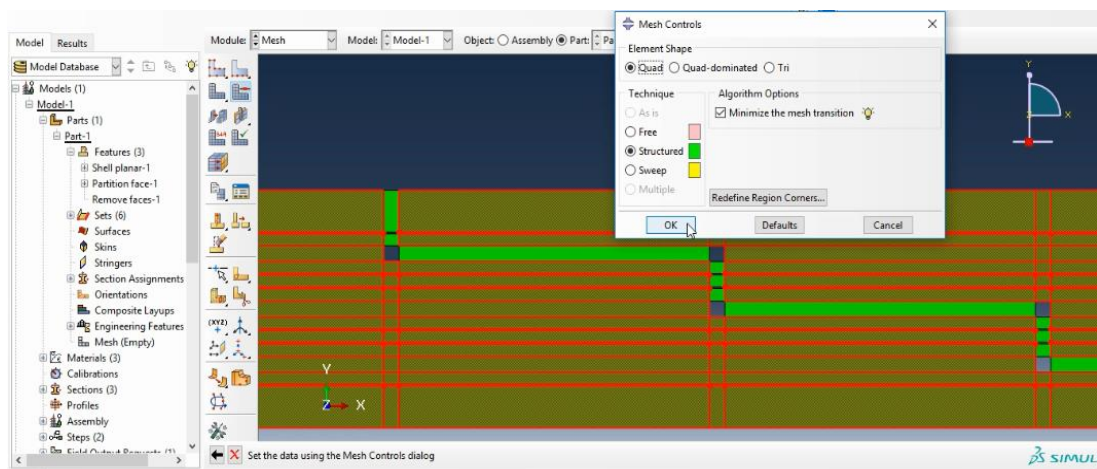


Figura 139 - Representação do *software* ABAQUS® e definição do elemento de malha dos aderentes

Na Figura 140 procede-se da mesma forma à atribuição do tipo de elemento da malha à camada adesiva e às camadas interlaminares.

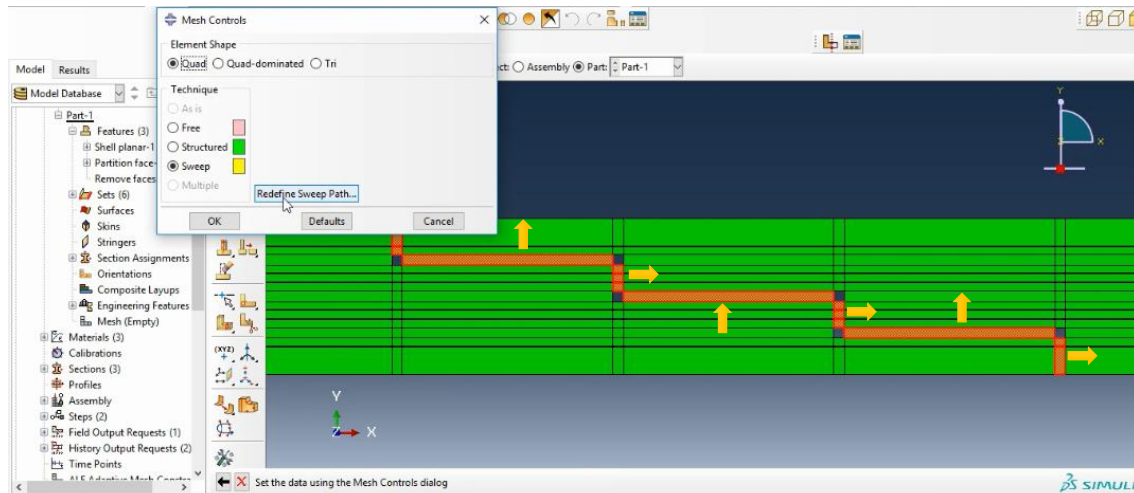


Figura 140 - Representação do *software* ABAQUS® e definição dos controlos de malha do adesivo e das camadas interlaminares

Para o estudo em questão foram considerados dois tamanhos de malhas diferentes. Para os modelos de propagação de dano por MDC considerou-se um tamanho de elementos na zona do adesivo de $0,2 \times 0,2 \text{ mm}^2$, enquanto que para análise de tensões utilizou-se uma malha bastante mais refinada para conseguir capturar os grandes gradientes de tensões ao longo da região da colagem da junta. Neste caso considerou-se uma malha de $0,02 \times 0,02 \text{ mm}^2$. Nestas duas situações, através da opção *bias ratio* foi possível obter um refinamento crescente desde o início aderente até ao início da sobreposição dos aderentes (Figura 141). Desta forma, foi possível que a extremidade livre de cada substrato apresente uma malha pouco refinada, uma vez que esta zona não apresenta qualquer interesse para o estudo.

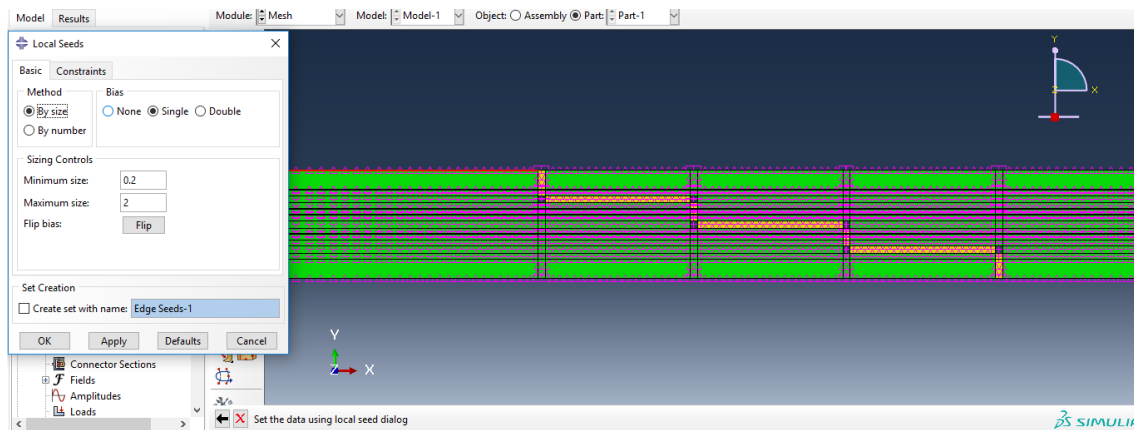


Figura 141 - Representação do refinamento da malha e respetivos parâmetros *bias ratio* inseridos *software* ABAQUS®

Na Figura 142 é mostrado o aspeto final da junta com a malha implementada no estudo, onde se verifica que a malha é bastante mais densa na zona de sobreposição quando comparada com as extremidades vizinhas.

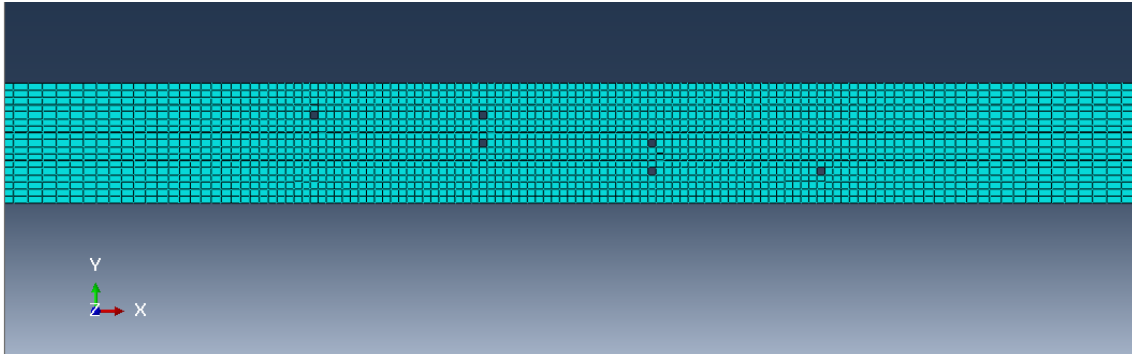


Figura 142 - Ilustração do pormenor da malha usada no estudo do modelo numérico

- Módulo “Job”

É neste modulo que são realizados os testes dos modelos em estudo. Nos modelos de propagação de dano por MDC, nos quais se analisa a sua resistência, os testes decorrem até ao fim do deslocamento inicialmente imposto, de forma a que ocorra rotura total da junta (Figura 143). Já no modelo de análise de tensões apenas é necessário um incremento, pois pretende-se extrair as tensões no domínio elástico do carregamento.

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	261	2	0	5	5	0.105639	0.105639	4.18883e-05
1	262	1	0	12	12	0.105701	0.105701	4.18883e-05
1	263	1	0	7	7	0.105732	0.105732	3.14162e-05
1	264	1	0	6	6	0.105764	0.105764	3.14162e-05
1	265	1	0	1	1	0.105795	0.105795	3.14162e-05
1	266	1	0	1	1	0.105826	0.105826	3.14162e-05
1	267	1	0	8	8	0.105873	0.105873	4.71243e-05

Figura 143 – Módulo “Job” e respetivo acompanhamento dos incrementos realizados no ensaio numérico

- Módulo “Visualization”

Este último módulo permite acompanhar o comportamento da junta ao longo do deslocamento imposto, possibilitando assim retirar os valores das forças e deslocamentos bem como as tensões (Figura 144).

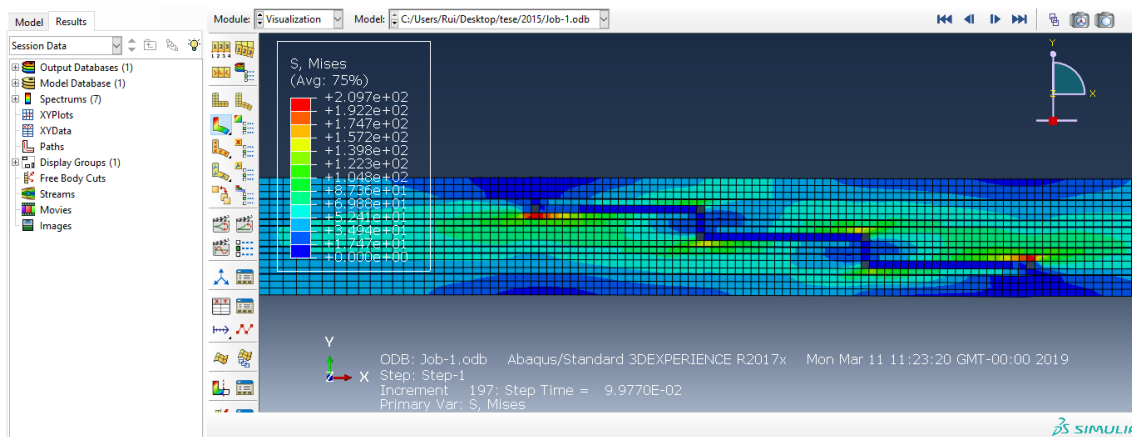


Figura 144 – Representação da distribuição da tensão de von Mises para o incremento 197

3.2.2 Modelo de dano coesivo

Como anteriormente estudado, 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 [106].

3.2.2.1 Modelo de dano triangular

Com o passar dos anos foram desenvolvidos vários modelos coesivos, nos quais se destacam o triangular [72], linear parabólico [107], exponencial [73], polinomial [74] e trapezoidal [108]. Pela sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada [53].

O modelo triangular 2D implementado no *software* ABAQUS® está apresentado na Figura 145, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

O modo puro caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo forem anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar os esforços de tensão e corte [109]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente normal de deformação e de uma deformação de corte que são

determinadas recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas entre substratos rígidos as tensões de membrana são desprezadas.

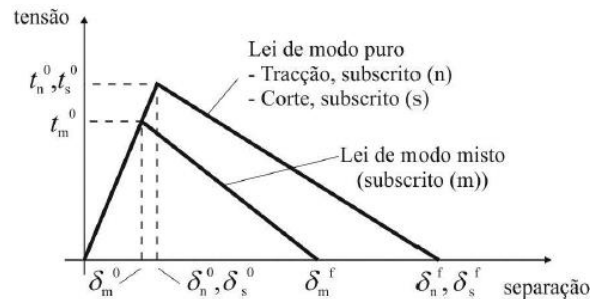


Figura 145 - Lei triangular do MDC implementado no *software* ABAQUS® [110]

Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz \mathbf{K}_{COH} , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida como:

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

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja uma formulação local, usada para simular fraturas de espessura nula, os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [111]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

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

onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Considerando estes parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [109]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério quadrático de tensões, expresso pela seguinte expressão:

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

$\langle \ \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [112]. Quando t_m^0 é atingido, pela igualdade da equação (3), a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos, δ_m^f na Figura 145, é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC} :

$$\frac{G_n}{G_n^c} + \frac{G_s}{G_s^c} = 1 \quad (4)$$

3.2.2.2 Estimativa dos parâmetros coesivos

De forma a caracterizar as leis coesivas em tração e corte é preciso conhecer os valores de t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} (Figura 145). No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação adotavam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios de tração [101, 113]. Contudo, devido à restrição das deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias e propagação de fenda tipicamente em modo misto, observa-se uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [114, 115]. Deste modo, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

3.2.2.2.1 Araldite® AV138

Para a obtenção das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi utilizado um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [116]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente ao mais indicado, e foi utilizado para o adesivo Araldite® 2015, como será explicado de seguida. Desta forma, foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios em adesivo maciço e ensaio de corte TAST (*Thick adherend shear test*) para a definição de t_n^0 e t_s^0 , respetivamente. 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 tração e corte foram então utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (JSS com $L_0=20$ mm), e as leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais, até obter valores de G_{IC} e G_{IIC} que reproduzam os resultados experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST). Noutro trabalho [117], conclui-se que os parâmetros obtidos reproduzem de

forma fiel as propriedades dos adesivos. A Tabela 11 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138, numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 11 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura (t_A) de 0,2 mm [118]

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

3.2.2.2.2 Araldite® 2015

Tal como no caso anterior, as leis coesivas da camada de adesivo Araldite® 2015 foram determinadas em trabalhos anteriores [116, 119] por um método inverso para a determinação de t_n^0 e t_s^0 . Estes trabalhos apresentam uma descrição mais detalhada desta metodologia, que basicamente consiste na determinação de G_{IC} e G_{IIC} através de ensaios *Double-cantilever beam* (DCB) e *End-notched flexure* (ENF), respetivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de G_{IIC} ou G_{IC} é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de t_n^0 e t_s^0 , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de t_n^0 e t_s^0 é então definido pela utilização de um procedimento de ajuste entre as curvas P - δ numéricas e experimentais do teste respetivo de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. A Tabela 12 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva em modo misto. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com base em ensaios de adesivo maciço [120] e ensaios TAST, respetivamente [121].

Tabela 12 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com uma espessura (t_A) de 0,2 mm [118]

E [MPa]	1850	G [MPa]	650
t_n^0 [MPa]	23,0	t_s^0 [MPa]	22,8
G_{IC} [N/mm]	0,42	G_{IIC} [N/mm]	4,7

3.2.2.2.3 Sikaforce® 7752

Para obtenção de propriedades coesivas do adesivo Sikaforce® 7752 utilizou-se um processo em certa medida idêntico ao utilizado para o Araldite® 2015 dado que, para a determinação da lei coesiva ao corte, seguiu-se um método inverso idêntico, correspondente à determinação do valor de G_{IIC} por ensaio de fratura ENF, seguido de ajuste iterativo manual para a estimativa de t_s^0 [102]. Os valores usados neste trabalho são os valores médios t_s^0 e G_{IIC} retirados da dissertação já referida anteriormente, uma vez que o desvio entre provetes foi bastante reduzido, traduzindo a repetibilidade dos ensaios efetuados. Já para a lei coesiva em tração, foi seguido um processo díspar. O valor de G_{IC} foi obtido por ensaios de fratura DCB [122], nomeadamente o valor médio de uma série de ensaios. O valor de t_n^0 foi aproximado ao valor médio de resistência à tração de provetes maciços ensaiados no mesmo trabalho [119]. Como foi determinado em trabalhos anteriores que, no caso particular da solitação à tração, 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) [119], 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 ensaios de corte (TAST) [104]. A Tabela 15 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada de adesivo Sikaforce® 7752 numa lei coesiva em modo misto. A Tabela 13 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada de adesivo Sikaforce® 7752 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 13- Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com uma espessura (t_A) de 0,2 mm [118]

E [MPa]	493,81	G [MPa]	37,49
t_n^0 [MPa]	12,25	t_s^0 [MPa]	10,50
G_{IC} [N/mm]	2,36	G_{IIC} [N/mm]	5,56

3.2.3 Resultados numéricos

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados obtidos do estudo numérico realizado. Numa primeira fase serão expostos os modos de rotura numéricos obtidos. Numa segunda fase será feito o estudo das tensões σ_y e τ_{xy} ao longo da camada adesiva. Além disto será realizado um estudo da variável de dano dos elementos coesivos do adesivo. No que se refere ao estudo da resistência das juntas, serão exibidos os valores numéricos e a respetiva análise dos mesmos, fazendo uma comparação com os resultados experimentais, ainda serão exibidos resultados comparativos das juntas em estudo com aderentes de alumínio e com juntas de sobreposição simples e dupla.

3.2.3.1 Modos de rotura

Da análise numérica da evolução do dano em função do valor de L_0 e do tipo de adesivo usado, é possível determinar a sequência de rotura da junta. Na Figura 146 estão indicados e nomeados os locais preferenciais da ocorrência de dano na camada adesiva e as regiões prováveis de rotura.



Figura 146 – Esquema referente à identificação e localização das regiões de rotura

Depois de um estudo da distribuição da variável de dano SDEG em todas as configurações para cada tipo de adesivo, foram registados na Tabela 14 os caminhos da rotura das várias juntas adesivas testadas (com base na identificação definida na Figura 146). Os locais de rotura separados com hífen correspondem a uma sequência e os entre parenteses retos a falhas em simultâneo.

Tabela 14 – Exibição dos modos de rotura numéricos

	12,5	25	37,5	50
AV 138	2-1-5- [3 e 4]	1-2-5-[3 e 4]	[1 e 2] -5- [3 e 4]	[1 e 2] -5- [3 e 4]
2015	1-2-5-[3 e 4]	1-2-5-[3 e 4]	1-2-5-[3 e 4]	1-2-5-[3 e 4]
7752	[1 e 2]-[3 e 4]	[1 e 2]-[3 e 4]	[1 e 2]-[3 e 4]	[1 e 2]-[3 e 4]

3.2.3.1.1 Araldite® AV138

Para o Araldite® AV138, independentemente de L_0 , o caminho de rotura é sempre igual, exceto no modelo com $L_0=12,5$. Para este comprimento de sobreposição a rotura inicia-

se nas transições dos degraus (2) e imediatamente a seguir nas extremidades de sobreposição (1), uma vez que os adesivos frágeis em juntas em degraus apresentam o maior pico de tensões nas transições de degraus (2). Nos restantes casos a rotura iniciava-se nas transições externas (1), seguindo-se as transições internas (2), o que está de acordo com a análise de tensões e da evolução da variável de dano que serão analisadas posteriormente, uma vez que como já foi referido nestes locais desenvolvem-se elevados picos de tensão que são preponderantes no processo de rotura. Numa terceira fase a evolução do dano ocorre nas camadas interlaminares, e por fim desenvolve-se nas regiões externas de sobreposição (3) e na região interna (4). Como é possível observar na Figura 147, o valor da variável de dano atingiu o valor máximo nos degraus de transição enquanto nas camadas interiores esta variável encontra-se em fase crescente de evolução. A Figura 148 representa o instante em que a junta se encontra em fase de descarregamento com a falha do adesivo ao longo dos degraus (3 e 4).

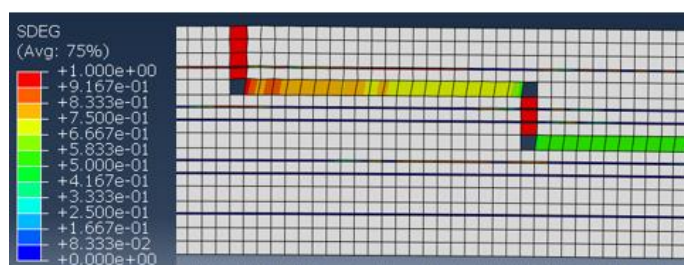


Figura 147 - Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que é atingido o $P_{máx}$

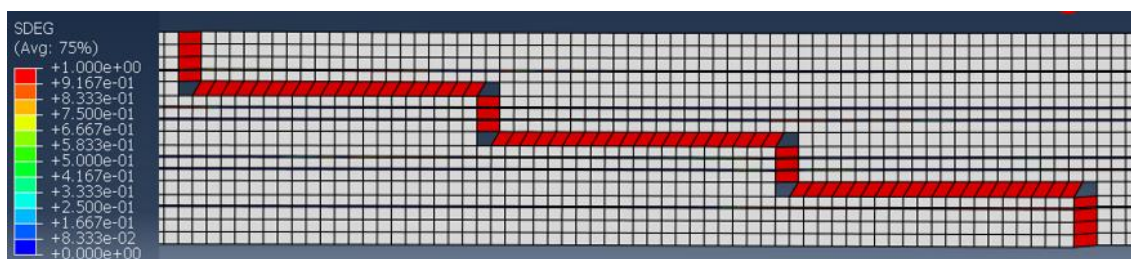


Figura 148 - Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que ocorre a rotura em juntas adesivas ligadas com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm

Com a observação da Figura 149 pode-se verificar que, para o incremento em que é atingido o $P_{máx}$ da junta, metade da camada adesiva localizada no degrau da extremidade encontra-se em fase de rotura, enquanto a restante metade não se encontra submetida a nenhum dano. No local, onde o adesivo regista valores de dano, verifica-se ainda a rotura da camada interlaminar. Perante estes factos, pode-se afirmar que houve uma rotura interlaminar em simultâneo com uma rotura coesiva. Este estudo numérico confirma os resultados experimentais, uma vez que no trabalho experimental para $L_0=25$, $37,5$ e 50 mm existiram certas juntas que possuem zonas nas quais existiu rotura interlaminar além da rotura coesiva, excetuando para $L_0=12,5$ mm.

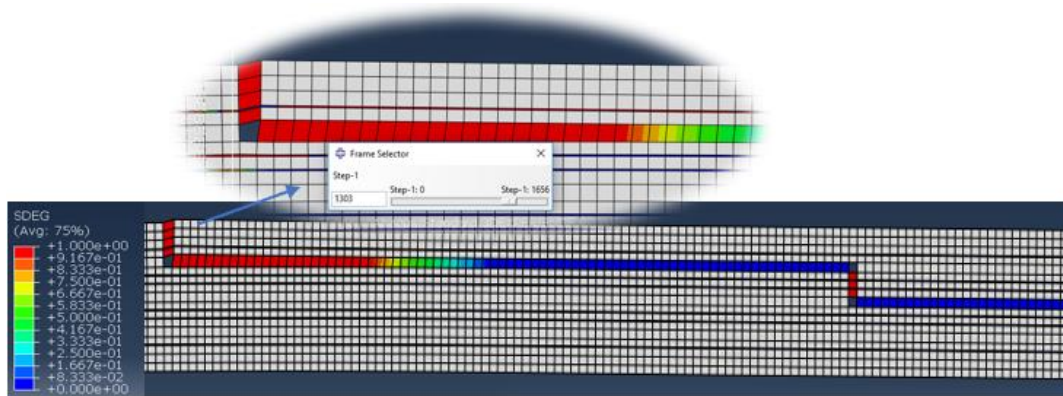


Figura 149 - Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que se atinge o $P_{m\acute{a}x}$ das juntas adesivas ligadas com o Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm

3.2.3.1.2 Araldite® 2015

Em relação ao adesivo Araldite® 2015, o processo de rotura verificado é semelhante ao que se registou no AV138. A propagação do dano inicia-se na região (1), e de seguida propaga-se para a região (2). A Figura 150 mostra que, para o instante em que é atingido $P_{m\acute{a}x}$, a camada adesiva apenas regista 60% do dano verificado na camada interlaminar, o que confirma a existência de uma falha na camada interlaminar.



Figura 150 - Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que as juntas adesivas ligadas com o Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm atingem o $P_{m\acute{a}x}$

A Figura 151 mostra o descarregamento da junta após atingir o pico de $P_{m\acute{a}x}$, e também o instante em que se dá a rotura da camada adesiva nos degraus (3 e 4). Contudo, dado que o pico de $P_{m\acute{a}x}$ foi definido pela ocorrência de falha na camada interlaminar, foram consideradas roturas interlaminares para todos os modelos de juntas analisados simultaneamente à rotura coesiva. No que respeita aos resultados experimentais,

apenas para $L_0=37,5$ e 50 mm se registaram algumas juntas com rotura interlaminar, contudo a rotura predominante continuou a ser coesiva do adesivo em todos os restantes casos.

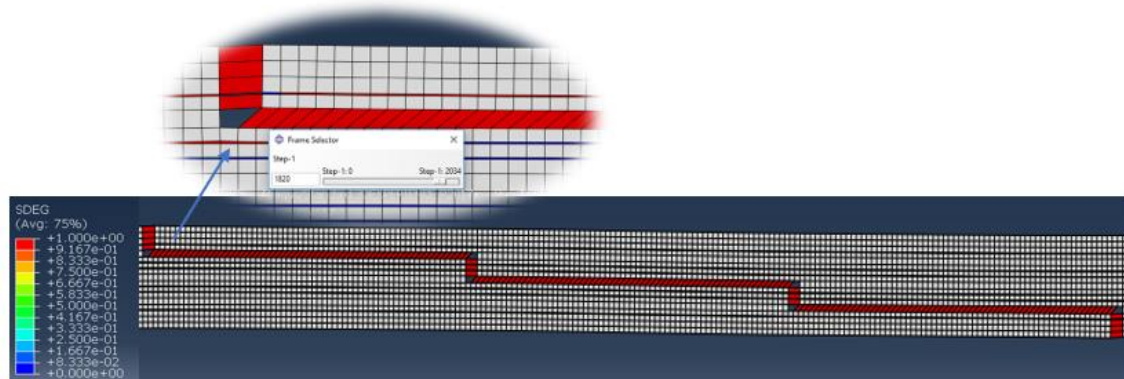


Figura 151 - Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que ocorre a rotura das juntas adesivas ligadas com o Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm

3.2.3.1.3 Sikaforce® 7752

Nas juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 o processo de rotura é idêntico em todos os L_0 , já que a fratura da junta tem início nas regiões (1) e (2) em simultâneo. Contrariamente aos adesivos analisados anteriormente, as juntas ligadas com o Sikaforce® 7752 não registam dano nas suas camadas interlaminares, independentemente do valor de L_0 . De referir que isto acontece já que este adesivo tem propriedades mecânicas/rigidez significativamente inferiores aos restantes adesivos. A falha da junta decorre nas regiões (3) e (4) de um modo simultâneo, em que se obtém uma rotura adesiva como se pode verificar através da Figura 152. Este adesivo apresenta também uma maior deformação da camada adesiva em comparação com o Araldite® AV138 e o Araldite® 2015 dada a sua elevada ductilidade. Deste modo pode-se referir que ocorreu apenas rotura coesiva. Contrariamente aos resultados obtidos numericamente, é de notar que no trabalho experimental existem algumas zonas onde existe parcialmente rotura interlaminar em simultâneo com a rotura coesiva do adesivo para certos provetes de $L_0=25, 37,5$ e 50 mm. Desta forma, a rotura do compósito foi muito residual.

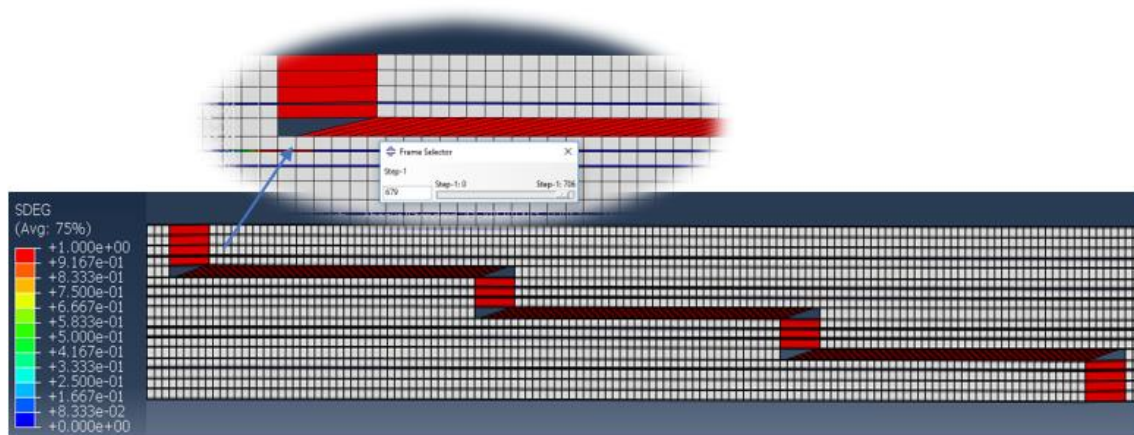


Figura 152 - Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que ocorre a rotura das juntas adesivas ligadas com o Sikaforce® 2015 e $L_0=25$ mm

3.2.3.2 Análise de tensões

Neste capítulo são apresentadas as tensões σ_y e τ_{xy} ao longo do adesivo. Os gráficos apresentados de seguida possuem os valores das abcissas normalizados (x/L_0), e por isso assumem valores entre $0 \leq x/L_0 \leq 1$. No eixo das ordenadas estão representadas as tensões ao longo do plano médio do adesivo. Foram estudadas tensões σ_y e τ_{xy} normalizadas ($\sigma_y/\tau_{méd}$ e $\tau_{xy}/\tau_{méd}$, respetivamente), onde $\tau_{méd}$ representa a média de τ_{xy} ao longo da camada do adesivo para cada valor de L_0 .

Na Figura 153 é apresentado o esquema da junta, com a exibição da posição normalizada ao longo de L_0 .

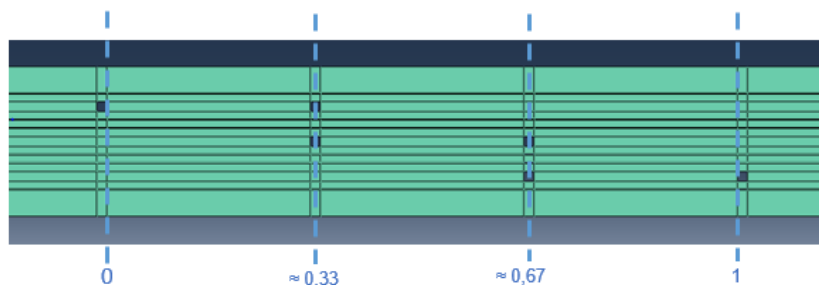


Figura 153 - Esquema representativo da normalização de L_0 da junta em degrau

A distribuição de tensões σ_y e τ_{xy} que se desenvolvem no plano médio da espessura do adesivo são alvo de um estudo pormenorizado que tem como objetivo a obtenção de elementos para análise posterior dos resultados de $P_{máx}$, já que o estado de tensão que se verifica na camada adesiva desempenha um papel predominante no processo de fratura. De ressaltar que o estudo das tensões é realizado no estágio inicial de carregamento, ou seja, correspondente ao domínio elástico dos aderentes e do adesivo.

3.2.3.2.1 Tensões de arrancamento

O estudo das tensões σ_y para os 3 adesivos consiste no estudo de $\sigma_y/\tau_{méd}$ ao longo de x/L_0 , em função dos valores de L_0 testados. Da Figura 154 à Figura 156 são apresentados gráficos referentes às tensões σ_y obtidas através do estudo numérico, para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente.

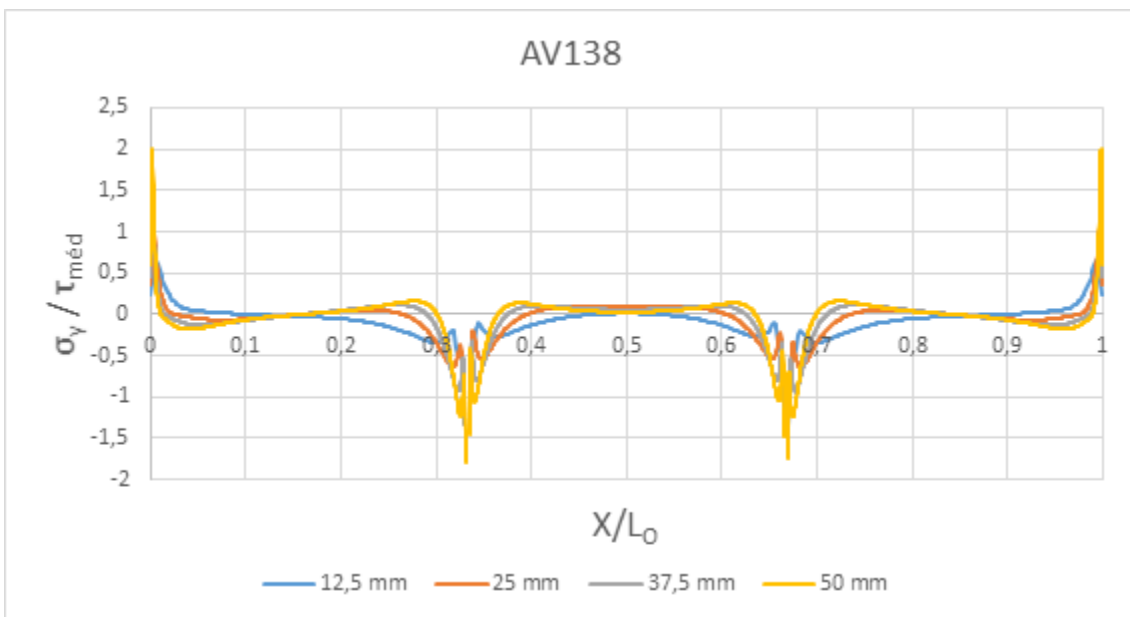


Figura 154 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo Araldite® AV138 em função de L_0

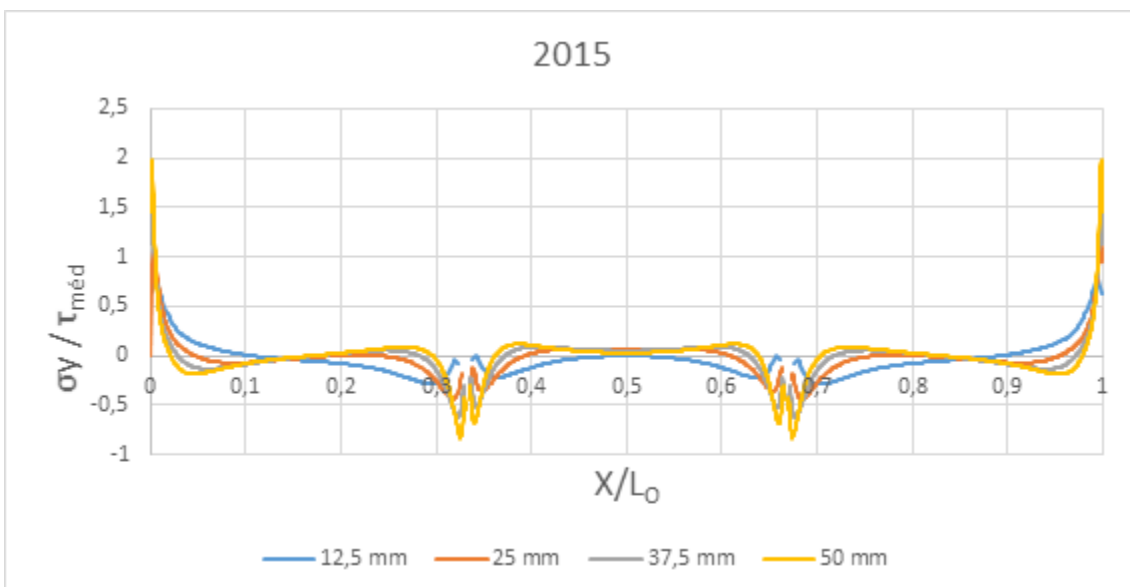


Figura 155 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de L_0

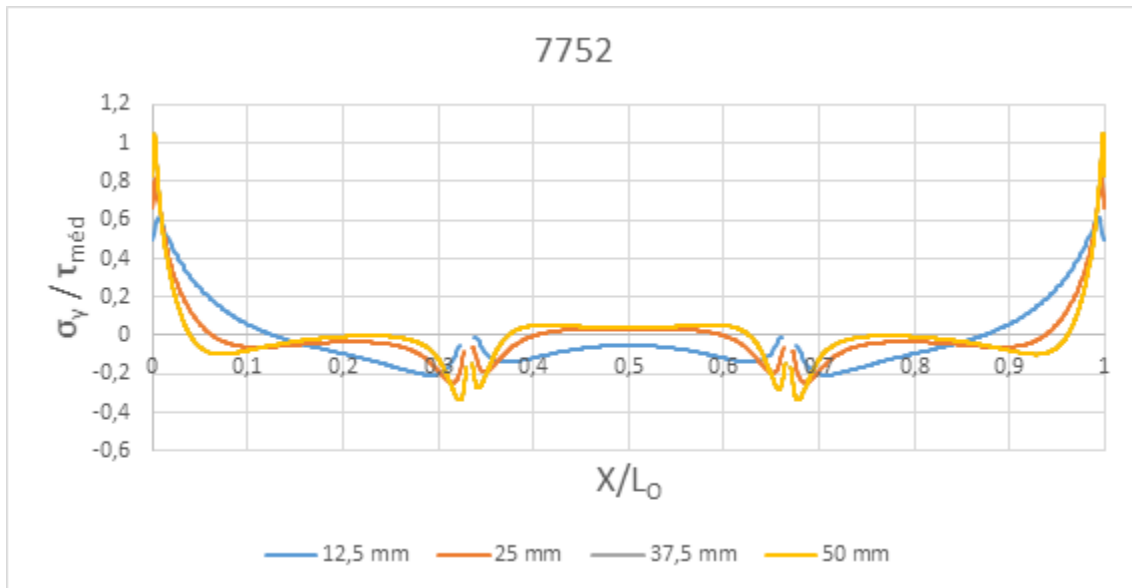


Figura 156 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo Sikaforce® 7752 em função de L_0

Numa primeira análise da distribuição de tensões σ_y confirma-se que, independentemente de L_0 , a tensão σ_y é bastante inferior à tensão de $\tau_{méd}$, com exceção das extremidades dos degraus e das transições internas de degrau. Os picos de tensão σ_y verificam-se nas posições $x/L_0 \approx 0$ e 1, ou seja, nas extremidades da ligação, e nas transições de degrau (posições $x/L_0 \approx 0,33$ e $0,67$), embora os picos de tensão registados nestas posições sejam de carácter compressivo. Seguindo a análise das tensões de arrancamento verifica-se que, a par da variação interna de tensões provocadas pela transição de degraus, os picos de tensão que se desenvolvem nas extremidades de L_0 , em semelhança ao fenómeno que ocorre nas JSS, origina um momento fletor que promove o arrancamento das extremidades da junta [48, 123], acompanhado de fenómenos de compressão da região central de sobreposição. No que diz respeito ao perfil do gráfico da distribuição da tensão σ_y , verifica-se que os picos (tração e compressão) aumentam progressivamente com L_0 . De um modo geral, esta tendência é típica das juntas adesivas, conforme se pode verificar por diversos estudos desenvolvidos [124], onde diversas vezes este comportamento afeta a linearidade do aumento da resistência das juntas com o aumento do L_0 , em particular nos casos em que se utilizam adesivos frágeis.

3.2.3.2.2 Tensões de corte

Neste subcapítulo, da Figura 157 à Figura 159, são apresentados os gráficos referentes à distribuição tensões de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para os três adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente) em função de L_0 .

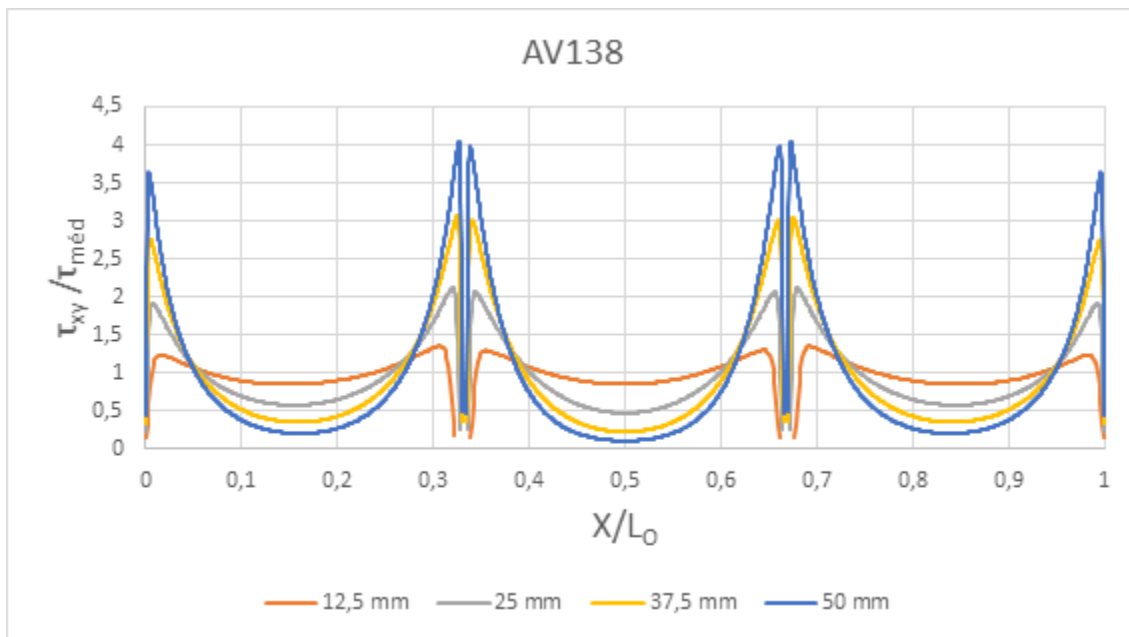


Figura 157 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo Araldite® AV138 em função de L_0

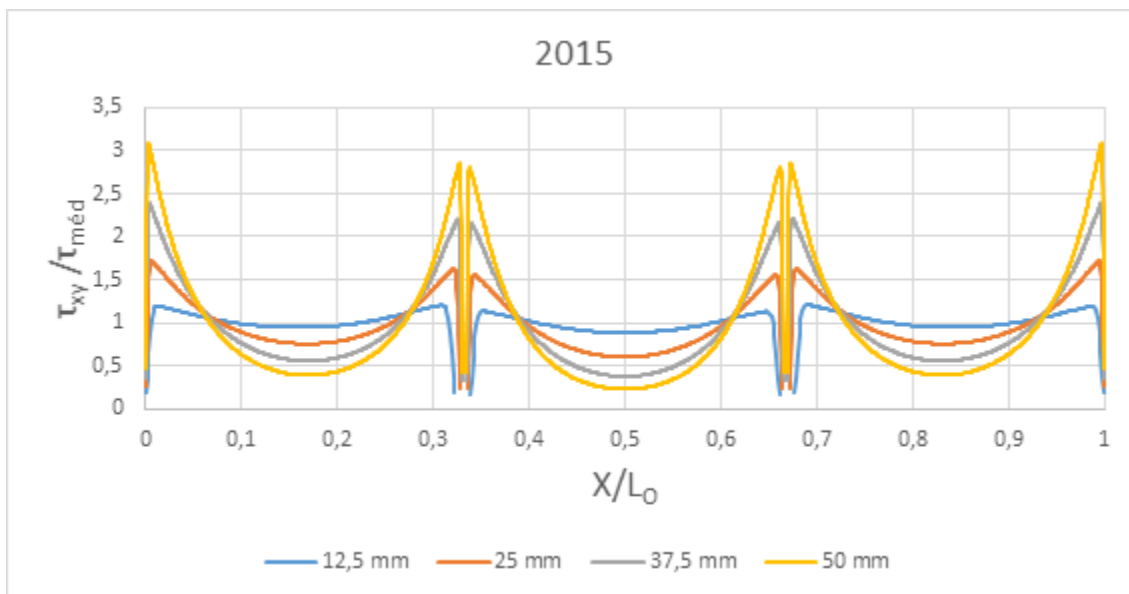


Figura 158 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de L_0

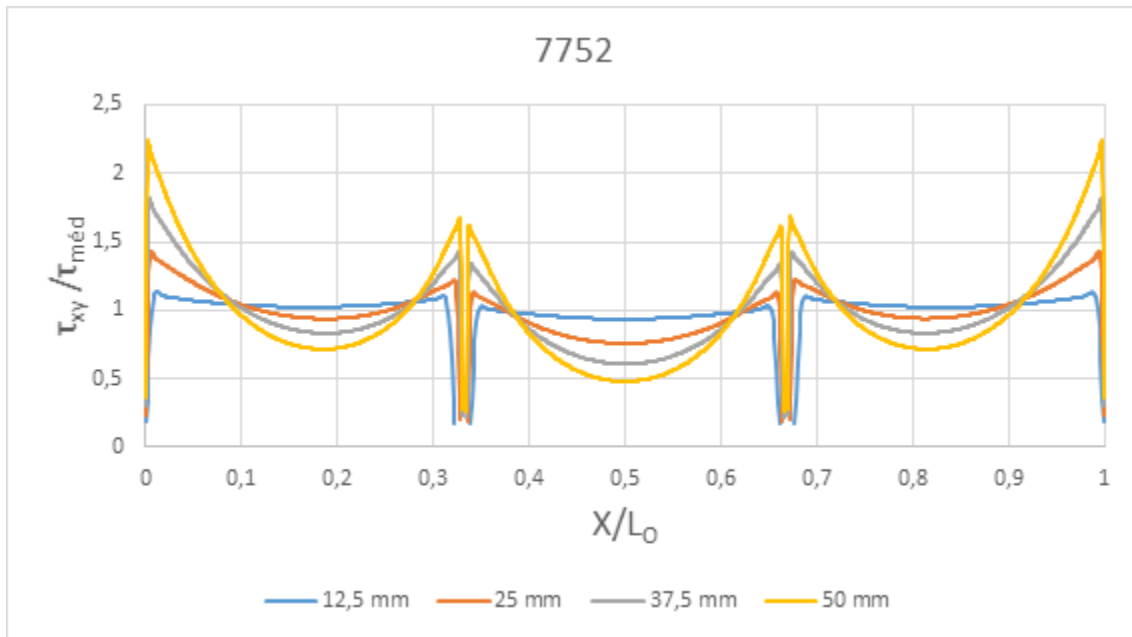


Figura 159 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo Sikaforce® 7752 em função de L_0

No que diz respeito à distribuição de tensões τ_{xy} , verifica-se a existência de uma grande variação no valor dos picos de tensão nas extremidades de L_0 e nas transições entre degraus. No entanto, dentro dos patamares de sobreposição, a evolução da tensão de corte é análoga à variação verificada nas JSS, ou seja, parte central pouco solicitada e picos de tensão nas extremidades de sobreposição [125]. Esta distribuição característica das tensões τ_{xy} , deve-se a fenómenos relacionados com a variação da deformação axial dos aderentes ao longo de L_0 , já que esta é cada vez menor na direção da redução da espessura do aderente. Assim, dois aderentes em sobreposição, com comportamentos opostos no que respeita à deformação, originam picos de tensões τ_{xy} em ambas as extremidades de sobreposição. De verificar que a magnitude de tensões τ_{xy} é ligeiramente superior nas extremidades de L_0 , comparativamente aos picos verificados nas transições de degrau, embora esta variação não seja muito significativa [41].

Desta forma, numa análise preambular da distribuição de tensões τ_{xy} para os três adesivos utilizados, é possível verificar que os picos registados nas extremidades de L_0 e nas transições entre degraus aumentam conforme o aumento de L_0 , devido ao crescente gradiente de deformação. No caso do adesivo frágil, o Araldite® AV138, os picos de tensão τ_{xy} nas posições $x/L_0 \approx 0,33$ e $0,67$ (transições de degrau) apresentam um valor superior ao observado em $x/L_0 \approx 0$ e 1 (nas extremidades de sobreposição). O oposto ocorre em juntas ligadas com adesivos dúcteis, em que os picos de maior valor são registados na extremidade da sobreposição. Este comportamento tem maior clareza na distribuição de tensões τ_{xy} do adesivo Sikaforce® 7752.

Ao analisar a evolução das tensões τ_{xy} em função de L_0 , é evidente que os picos de tensão aumentam progressivamente com este parâmetro, devido ao crescente

gradiente de deformação axial dos aderentes. A alteração do perfil de tensões τ_{xy} , provocado pelo aumento do L_0 , pode afetar substancialmente o desempenho das ligações adesivas, especialmente se o adesivo for frágil. Neste caso, a rotura da ligação ocorre quando é alcançada a tensão de rotura do adesivo. Geralmente, o processo de rotura desencadeia-se nas extremidades de sobreposição da camada adesiva. Este tipo de fenómeno não é tão crítico quando se utilizam adesivos dúcteis, uma vez que este tipo de adesivo é passível de sofrer plastificação, ou seja, quando a tensão de pico é atingida verifica-se que a carga transmitida continua a aumentar até se atingir o limite de ductilidade do adesivo [126].

Usualmente, a rotura das juntas adesivas ocorre nas extremidades de sobreposição, dado que é o local com maiores concentrações das tensões τ_{xy} e por ser uma zona favorável ao aparecimento de tensões σ_y . Este fenómeno não tem tanta influência em juntas ligadas com adesivos dúcteis, uma vez que as propriedades deste tipo de adesivos permitem a sua plastificação, ou seja, após atingir o seu limite elástico continuam a aumentar transmissão de carga até atingir o limite de ductilidade (limite plástico) [126].

3.2.3.3 *Estudo da variável de dano*

Neste subcapítulo é dado a conhecer o estudo da variável de dano SDEG realizado para o instante em que as juntas atingem $P_{m\acute{a}x}$. Desta forma, foi analisado o estado de dano ao longo da camada adesiva e da camada interlaminar, para o incremento em que é obtido o $P_{m\acute{a}x}$, em função de L_0 , para todos os adesivos em questão.

Como foi demonstrado no ponto 3.2.2.2.1, em juntas ligadas com o Araldite® AV138 e com $L_0=12,5$ e 25 mm, foram verificadas roturas interlaminares simultaneamente à rotura coesiva. O gráfico da Figura 160 mostra que no instante em que é atingido o $P_{m\acute{a}x}$ a camada adesiva não se encontra danificada, com exceção de uns picos muito pouco significativos nas zonas de transição dos degraus.

Outro facto que comprova a existência de rotura interlaminar nas juntas mencionadas é a distribuição da variável SDEG ao longo da camada interlaminar próxima do degrau da extremidade, ou seja, para valores de x/L_0 entre 0 e, aproximadamente, 0,33. Na Figura 161 está apresentada essa distribuição, onde é possível verificar que, para juntas com $L_0=12,5$ e 25 mm, a camada interlaminar regista valores de dano muito próximo de 1.

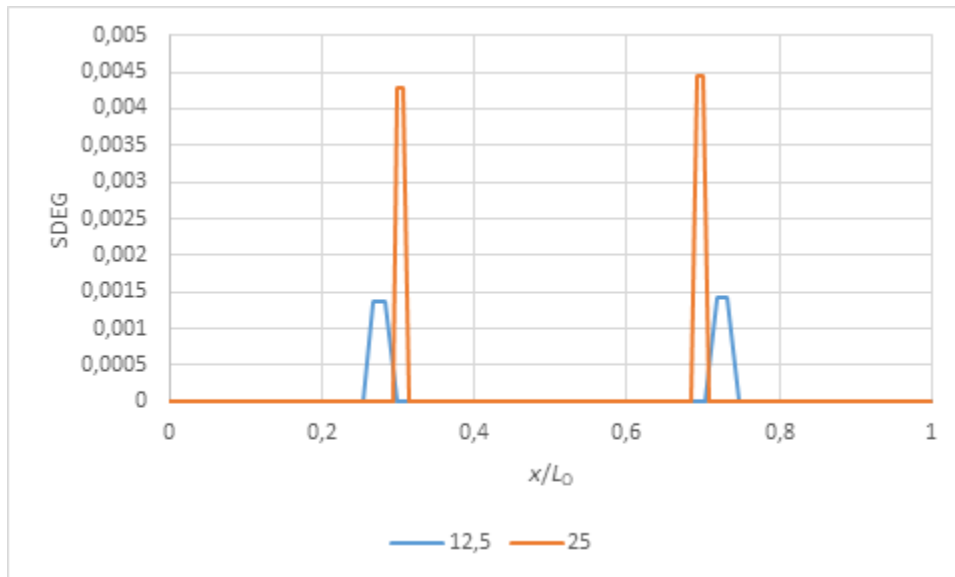


Figura 160 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com $L_0=12,5$ e 25 mm

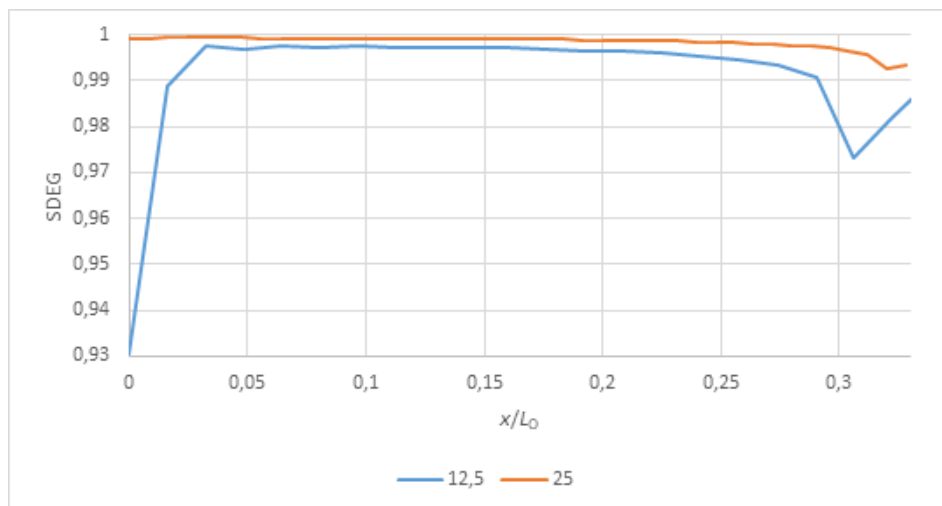


Figura 161 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com $L_0=12,5$ e 25 mm

Em relação às juntas com $L_0=37,5$ e 50 mm ligadas com o mesmo adesivo foi registada uma rotura interlaminar e coesiva em simultâneo. Os dados do gráfico apresentado na Figura 162 confirmam a rotura do adesivo próximo das zonas de sobreposição de degrau, onde se registam valores de dano na camada adesiva de 1. Também é possível observar que o adesivo Araldite® AV138 tem uma transição repentina entre os elementos coesivos não danificados e danificados, devido à falta de capacidade deste adesivo para se plastificar.

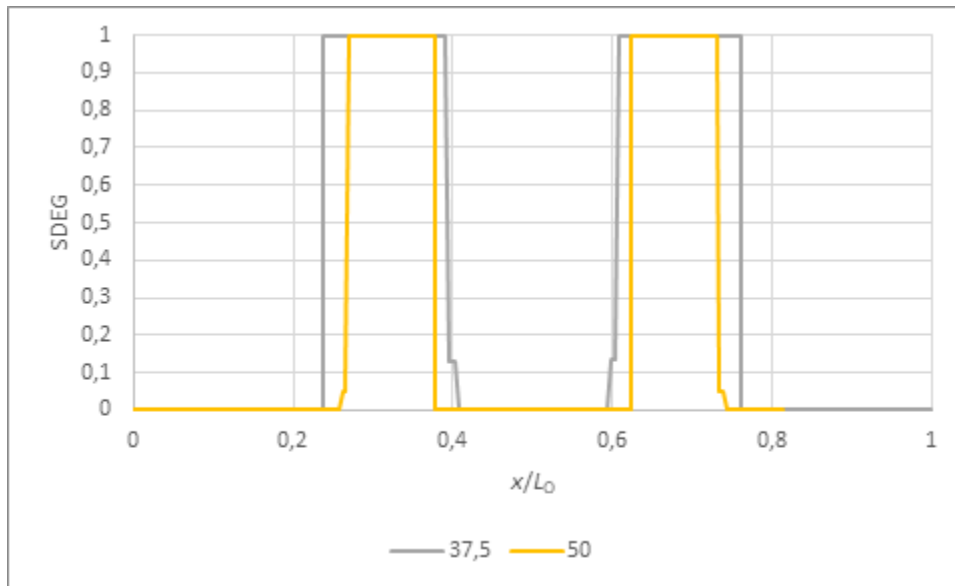


Figura 162 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{\text{máx}}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com $L_0=37,5$ e 50 mm

Por outro lado, através distribuição da variável SDEG ao longo da camada interlaminar adjacente ao degrau da extremidade, verifica-se que o dano é muito próximo de 1 em toda a sua extensão. Ainda que ligeiramente e pouco significativo, o valor do dano tem maiores valores na zona do degrau próxima da extremidade. Visto isto, o estudo da variável do dano valida a existência de uma rotura interlaminar e coesiva do adesivo uma forma simultânea.

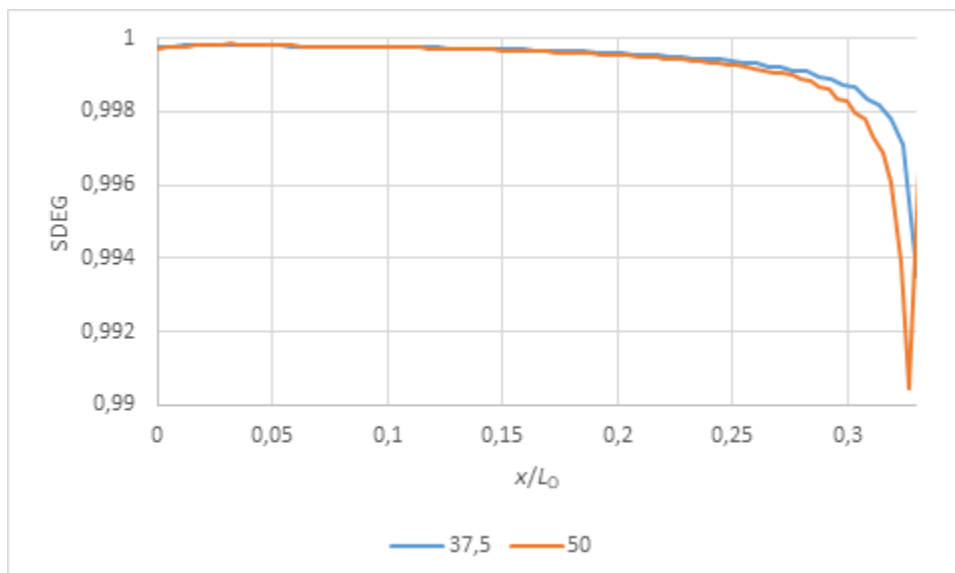


Figura 163 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de $P_{\text{máx}}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com $L_0=37,5$ e 50 mm

Com a diminuição da rigidez do adesivo utilizado, a evolução do dano torna-se mais uniforme no que diz respeito à sua distribuição ao longo de L_0 . Uma vez que a camada adesiva tem capacidade de sofrer deformações plásticas antes da ocorrência da rotura total da junta.

O fenómeno enunciado pode ser observado na Figura 164, onde estão representadas as curvas da distribuição da variável de dano SDEG, ao longo da camada adesiva, em juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 para cada L_0 , registadas no incremento em que é atingido $P_{m\acute{a}x}$. Neste caso, pode-se verificar que apenas existe uma ligeira variação do dano imposto ao adesivo localizado na face dos degraus das extremidades de sobreposição, comprovando a uniformização do dano pela camada adesivo. Em contrapartida, no degrau interior é de notar a ausência de dano na sua região central devido às baixas tensões desenvolvidas neste local.

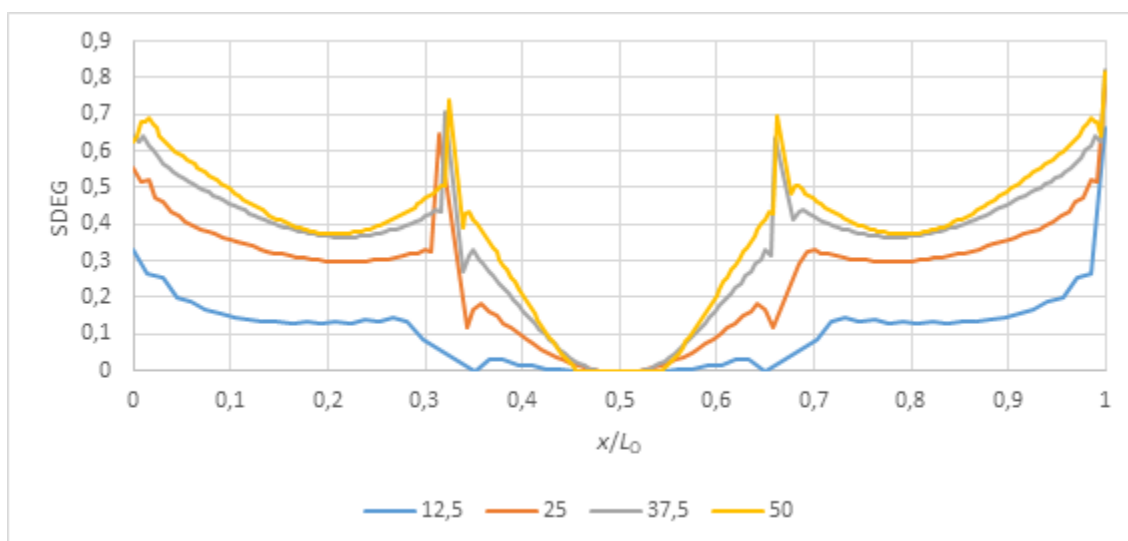


Figura 164 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 em função do L_0

Para além de se obter uma melhor distribuição do dano para este adesivo registam-se, igualmente ao adesivo Araldite® AV138, roturas interlaminares. A Figura 165 mostra que, independentemente do L_0 das juntas em análise, o dano presente na camada interlaminar próxima do degrau da extremidade apresenta valores muito próximos de 1. Tal como no adesivo Araldite® AV138, este estudo comprova os modos de rotura analisados no ponto 3.1.3.1.2 para o adesivo Araldite® 2015, ou seja, roturas interlaminares em simultâneo com a coesiva para todos os valores de L_0 .

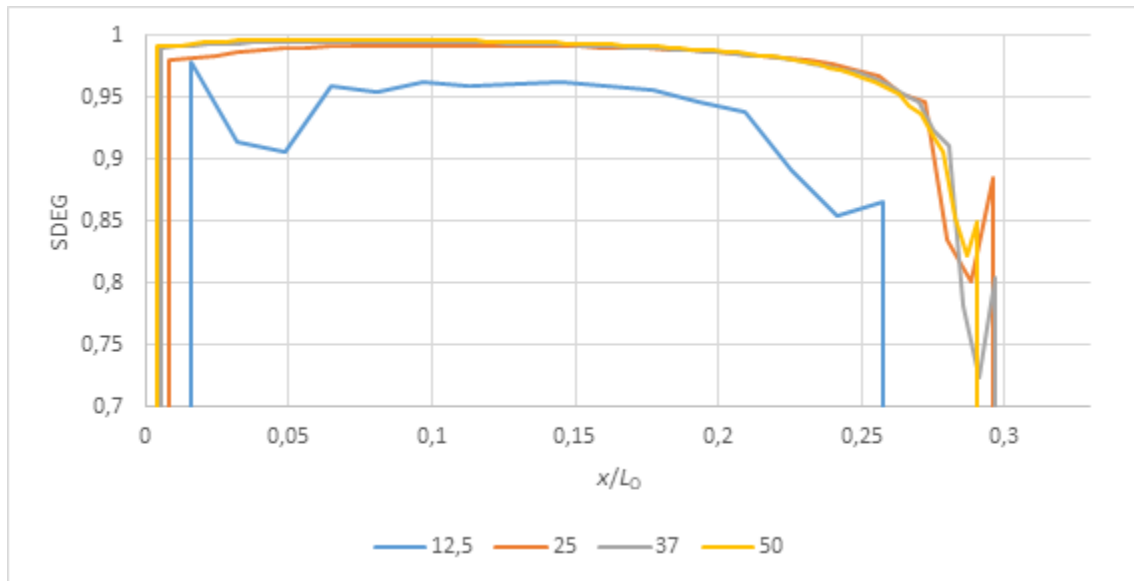


Figura 165 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de $P_{máx}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 em função do L_0

Dado que o adesivo Sikaforce® 7752 é o adesivo, entre os utilizados no estudo, com maior ductilidade, também é o que tem mais capacidade de sofrer maiores deformações plásticas. Este facto é responsável pela grande uniformização do valor de dano ao longo da camada de adesivo. Como se pode observar na Figura 166, os picos dos valores de dano registados neste adesivo são significativamente inferiores aos verificados nos restantes adesivos. As propriedades mecânicas inferiores deste adesivo resultam numa capacidade de carga mais reduzida.

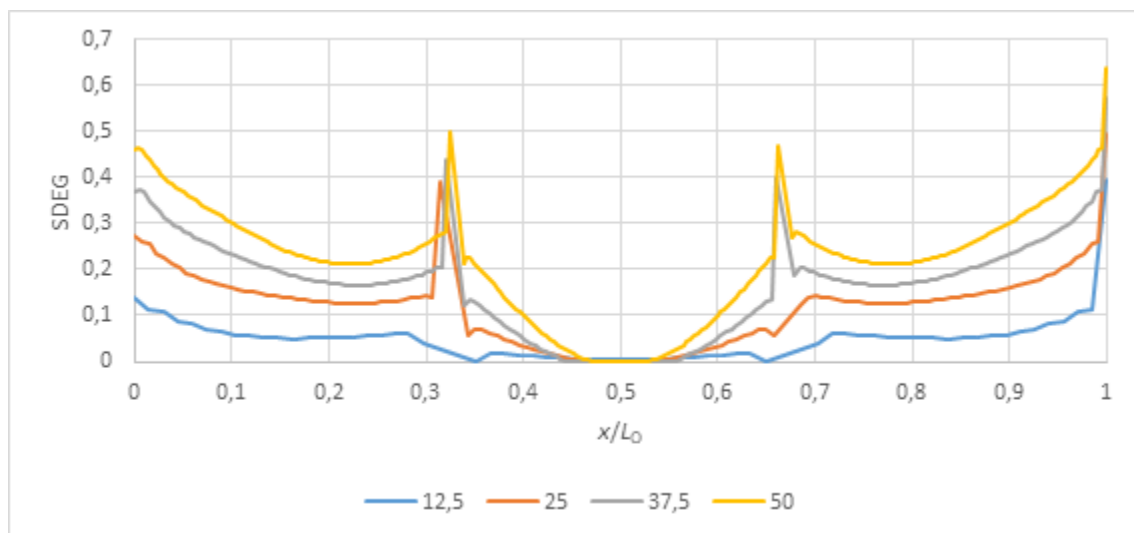


Figura 166 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{máx}$ em juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 em função do L_0

Contrariamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, este adesivo não regista valores de dano na camada interlaminar, como se pode verificar no gráfico da Figura 167. Este efeito traduz-se em roturas coesivas do adesivo para todas as juntas ligadas com o Sikaforce® 7752, independentemente do valor de L_0 , tal como foi explicado no ponto 3.1.3.1.2.

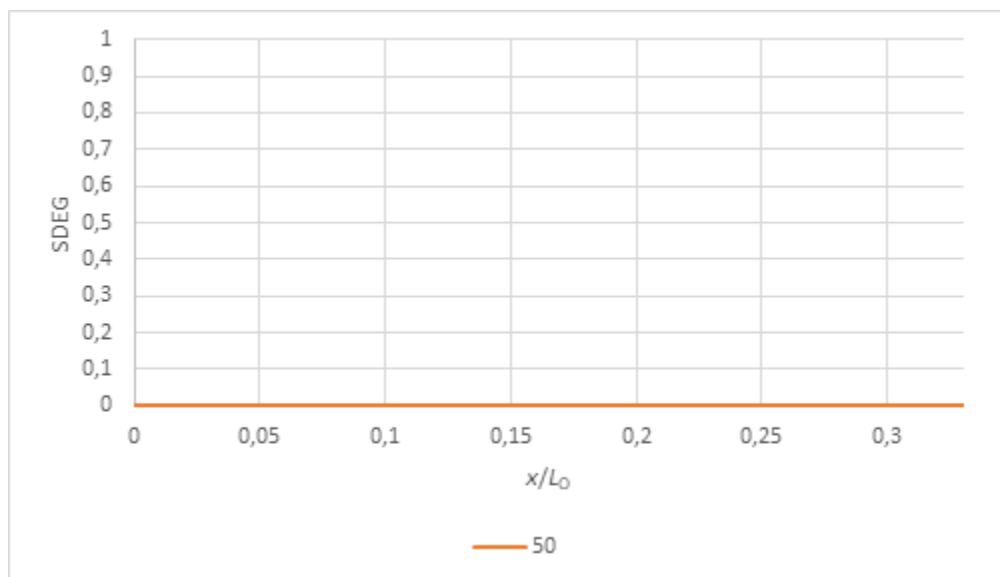


Figura 167 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=50$

3.2.3.4 Previsão da resistência

Neste subcapítulo apresenta-se um estudo com o objetivo de avaliar a capacidade dos MDC em prever a resistência das juntas adesivas estudadas, assim como explicar de forma detalhada os resultados obtidos para os diversos tipos de junta. Apresentam-se inicialmente as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais. De seguida, é efetuada uma comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos por MDC.

Da Figura 168 à Figura 171 apresentam-se as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, para cada um dos valores de L_0 de junta definidos. As curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 apresentam um comportamento semelhante durante o regime elástico. A partir da análise da Figura 138 à Figura 141 verifica-se que as curvas $P-\delta$ das várias juntas experimentais apresentam uma correlação aceitável com a curva $P-\delta$ numérica no que concerne ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ e respetivos valores de deslocamento. Em relação à evolução dos valores de P ao longo do processo de rotura (após de atingir $P_{m\acute{a}x}$) verifica-se igualmente um acordo aceitável entre as curvas experimentais e a curva numérica. No que diz respeito aos deslocamentos de rotura, verifica-se que este foi bastante inferior para a curva numérica, esta diferença pode ser justificada pela

possibilidade de escorregamento das garras que fixam que juntas durante o ensaio de tração e pela flexibilidade da máquina de ensaios. De referir que os ressaltos verificados na curva numérica da Figura 168 correspondem ao rompimento sucessivo dos elementos coesivos em diferentes níveis.

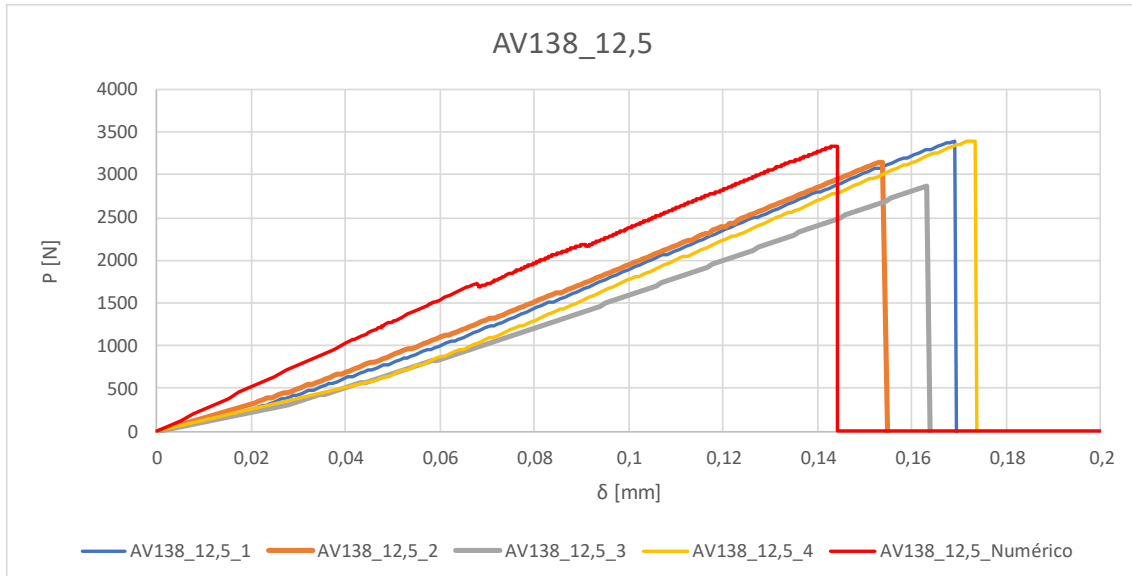


Figura 168 - Curvas P - δ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm

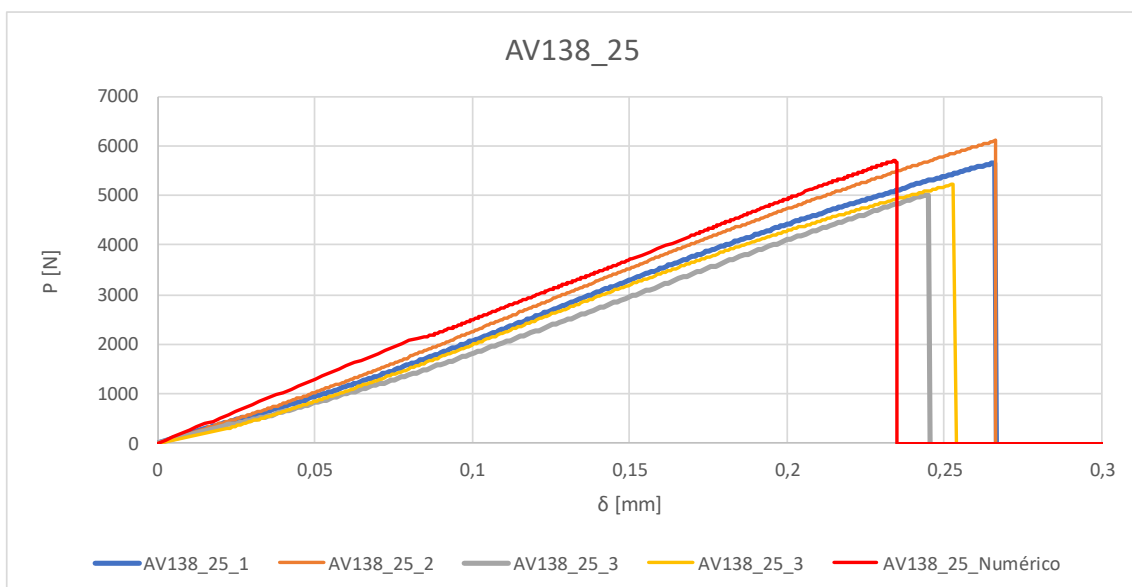


Figura 169 - Curvas P - δ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=25$ mm

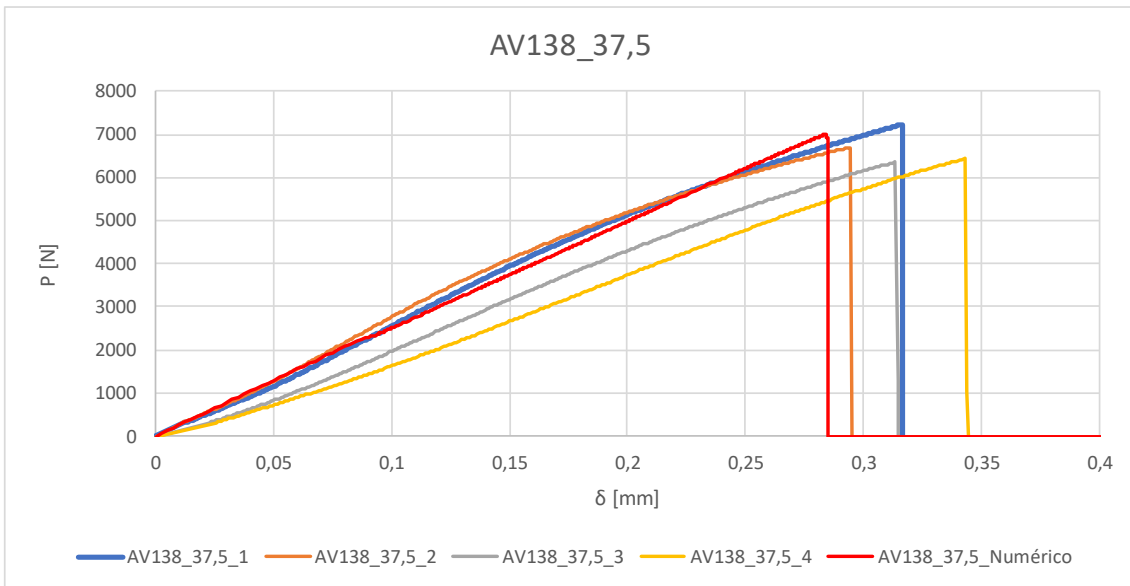


Figura 170 - Curvas P - δ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=37,5$ mm

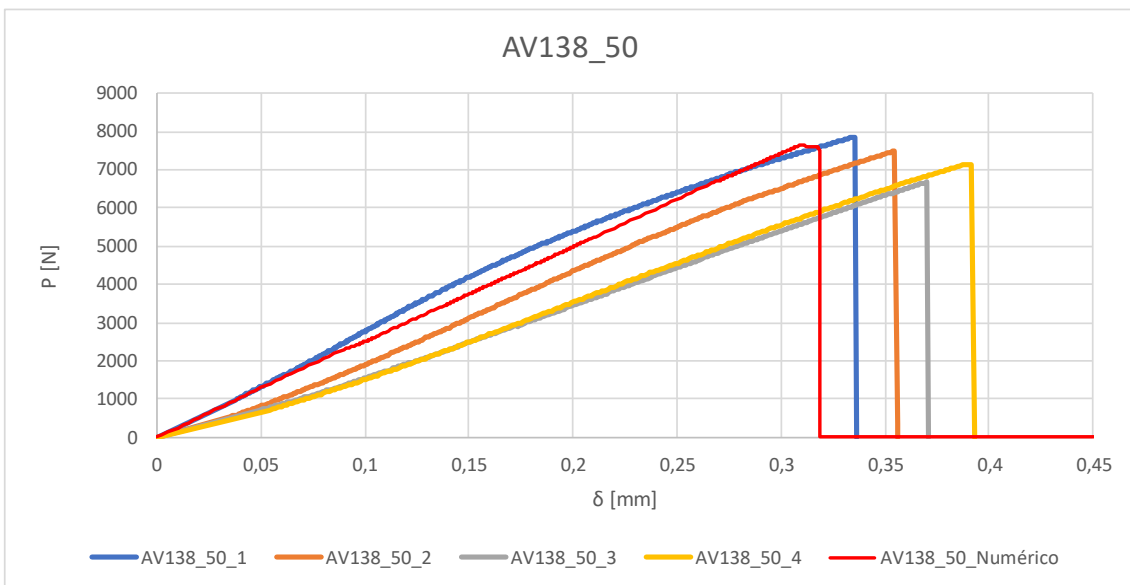


Figura 171 - Curvas P - δ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm

Relativamente às curvas P - δ experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, verifica-se que estas apresentam um comportamento elástico semelhante para cada valor de L_0 . Em todas as juntas com $L_0=12,5$; 25; 37,5 e 50 mm (Figura 168, Figura 169, Figura 170 e Figura 171, respetivamente) verifica-se que as curvas P - δ das juntas experimentais apresentam uma boa correlação com a curva P - δ numérica no que concerne ao valor de $P_{m\acute{a}x}$, embora se verifique que o deslocamento correspondente seja inferior para as curvas numéricas. Em relação ao deslocamento de rotura, verifica-se uma discrepância significativa em termos de valores e

comportamento, especialmente na evolução dos valores de P ao longo do processo de rotura da junta.

Da Figura 172 à Figura 175 representam-se as curvas P - δ experimentais e numéricas das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015, para os 4 valores de L_0 .

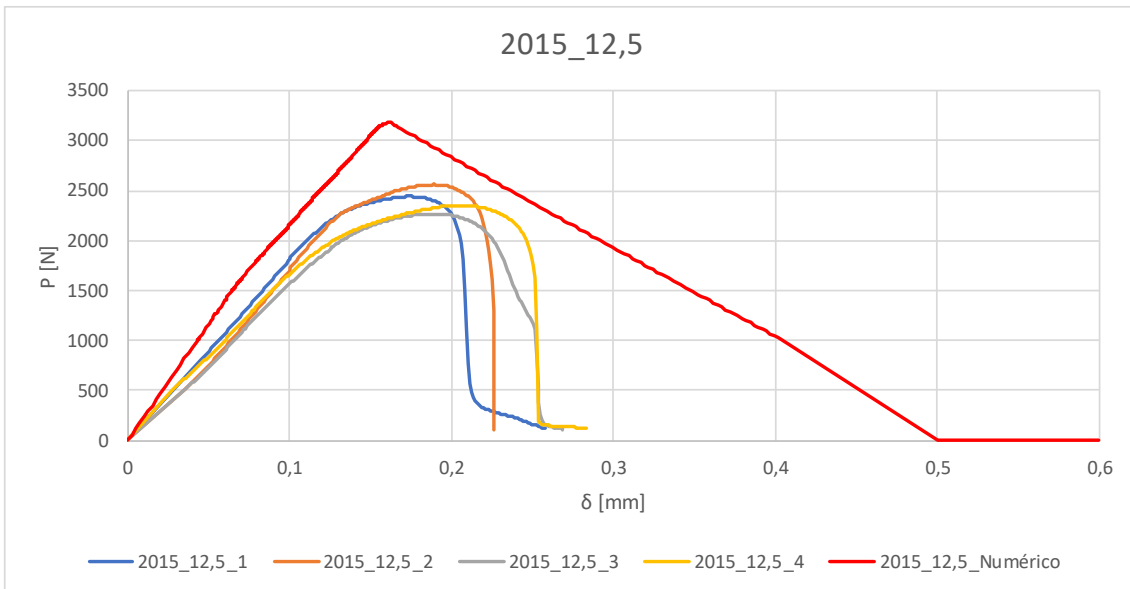


Figura 172 - Curvas P - δ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=12,5$ mm

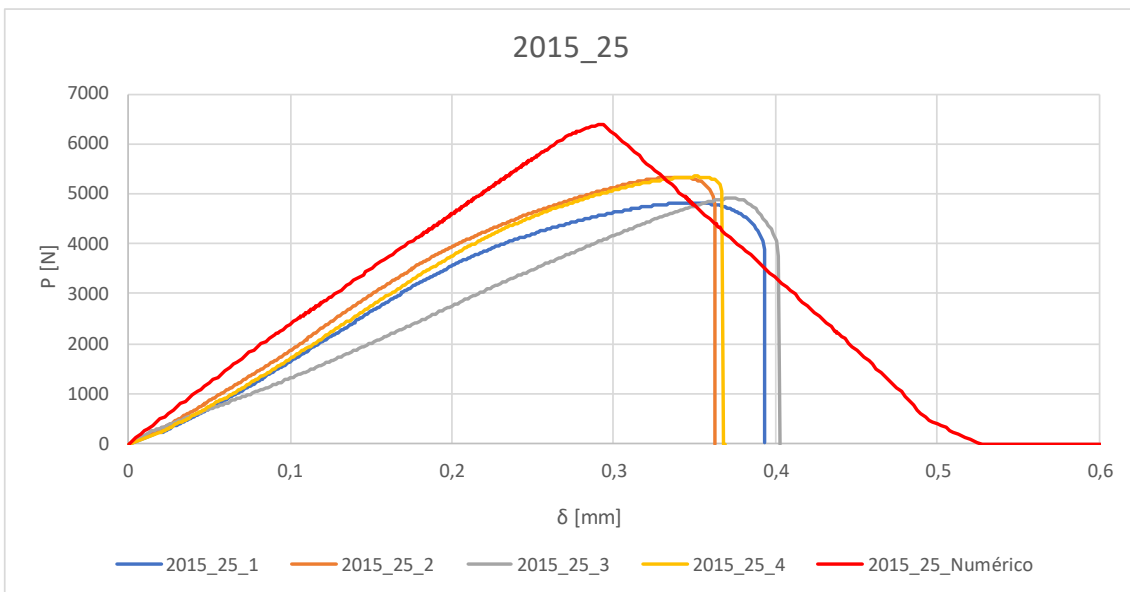


Figura 173 - Curvas P - δ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=25$ mm

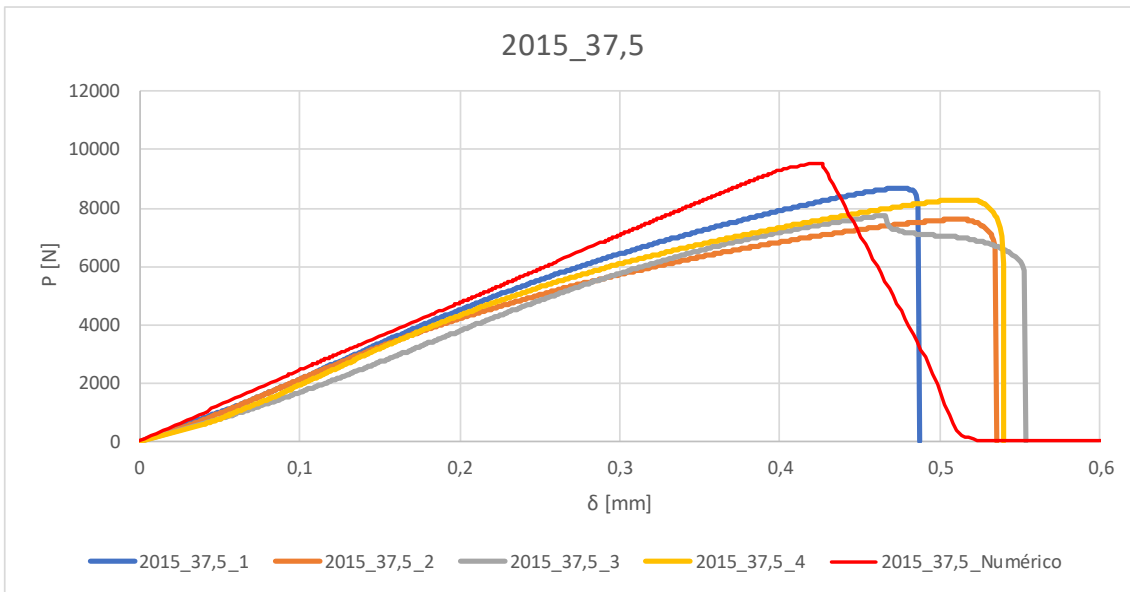


Figura 174 - Curvas P - δ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm.

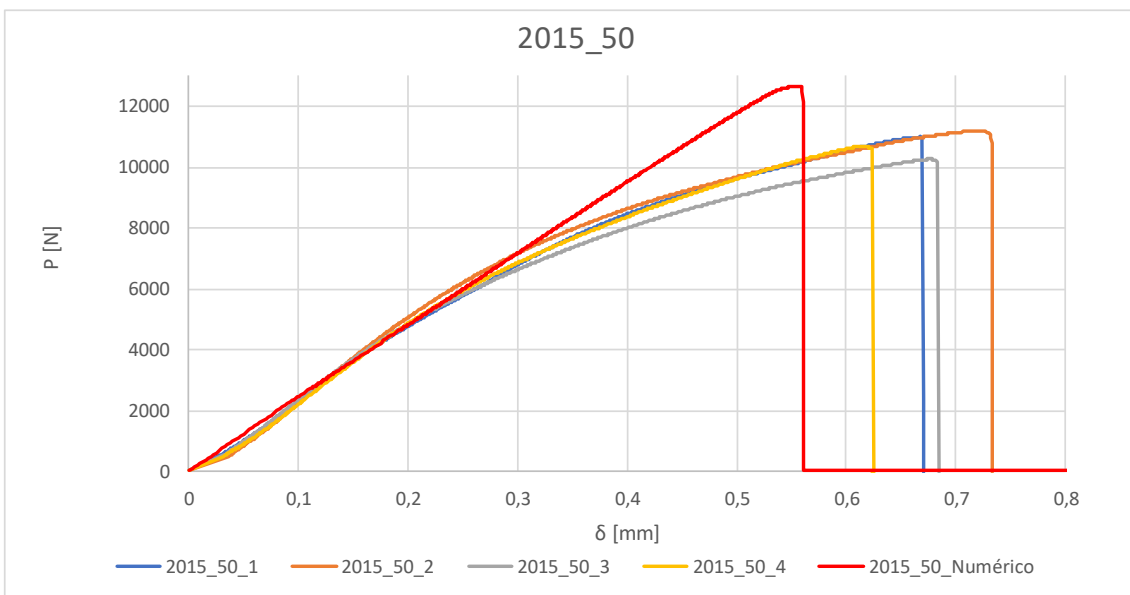


Figura 175 - Curvas P - δ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=50$ mm

Relativamente às curvas P - δ experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015, verifica-se que estas apresentam um comportamento elástico semelhante para cada valor de L_0 . Em todas as juntas com $L_0=12,5$; 25; 37,5 e 50 mm (Figura 172, Figura 173, Figura 174 e Figura 175, respetivamente), verifica-se que as curvas P - δ das juntas experimentais apresentam uma discrepância significativa com a curva P - δ numérica no que concerne ao valor de $P_{m\acute{a}x}$, verificando-se ainda um deslocamento correspondente bastante inferior para as curvas numéricas.

Da Figura 146 à Figura 149 apresentam-se as curvas P - δ experimentais e numéricas das juntas coladas com adesivo Sikaforce® 7752, para os 4 valores de L_0 .

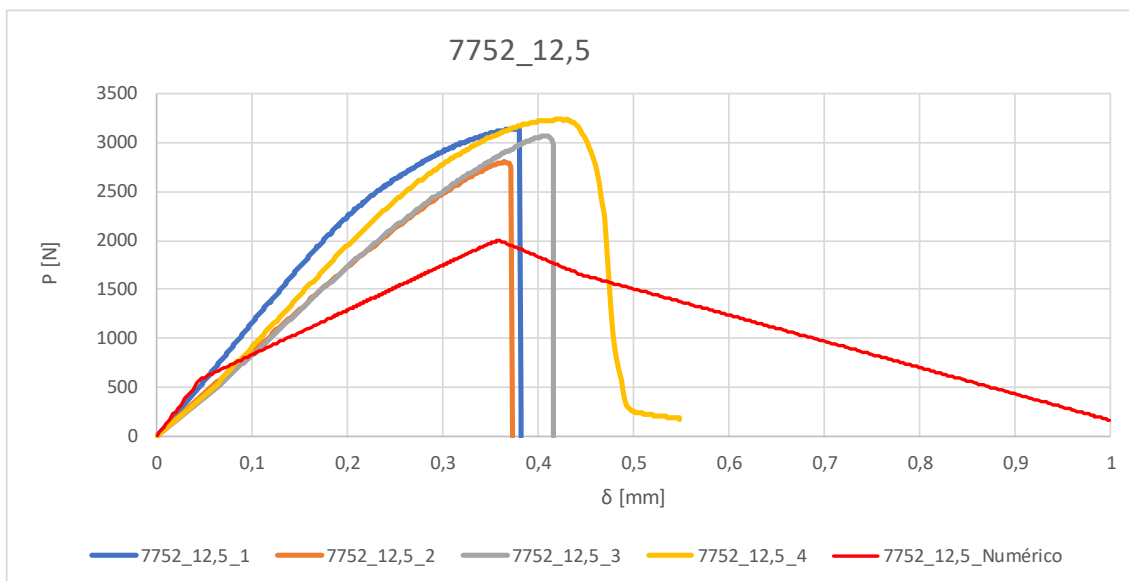


Figura 176 - Curvas P - δ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm

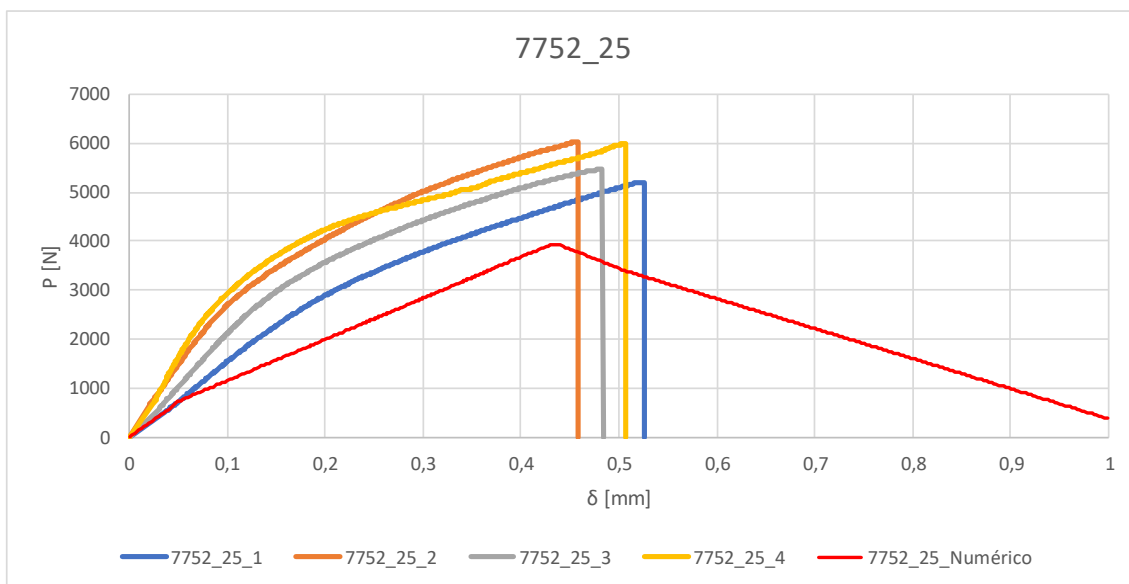


Figura 177 - Curvas P - δ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=25$ mm

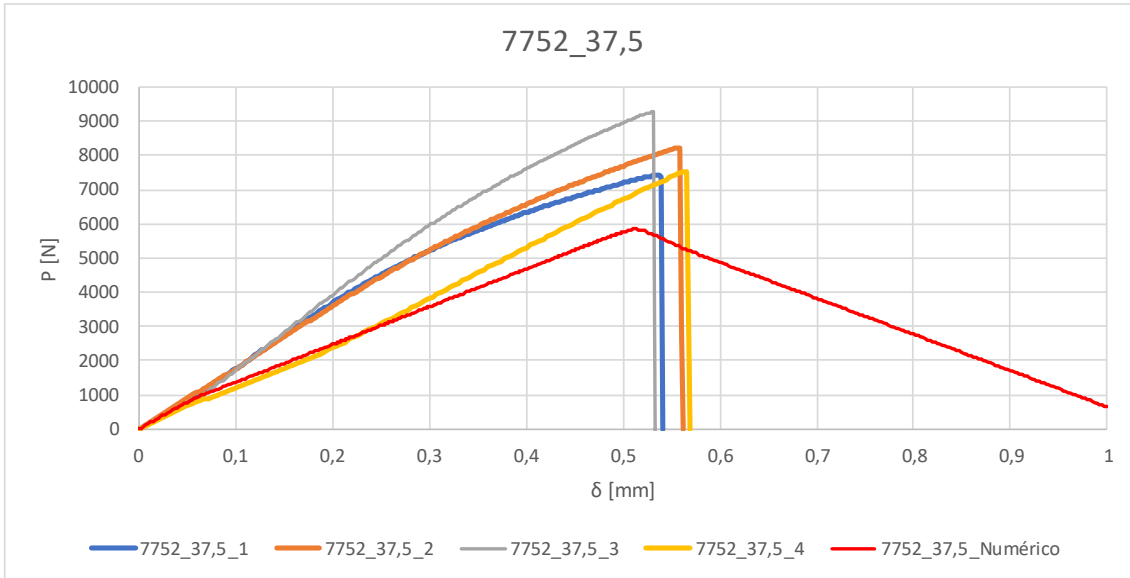


Figura 178 - Curvas P - δ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=37,5$ mm

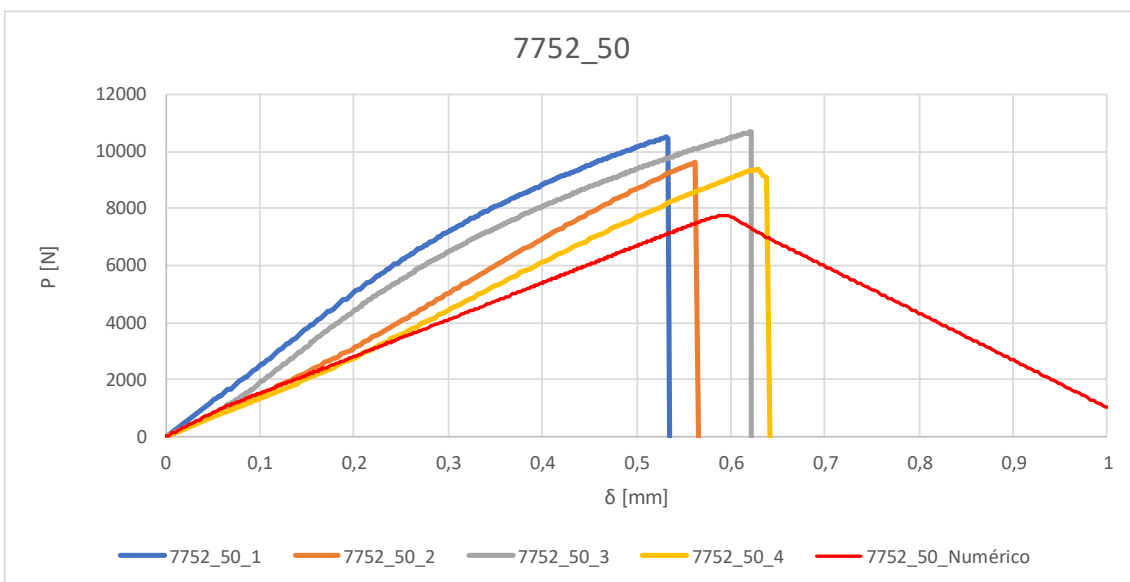


Figura 179 - Curvas P - δ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm

Pela análise das curvas P - δ experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752, verifica-se a existência de uma concordância aceitável na fase inicial do carregamento das juntas. No que diz respeito ao valor de $P_{\text{máx}}$ e respetivo deslocamento, verifica-se que as curvas numéricas atingem menores valores comparativamente com os resultados obtidos experimentalmente, excetuando para o caso do $L_0=50$ mm, em que duas das curvas experimentais apresentam maior deslocamento. Relativamente à evolução das curvas P - δ numéricas e experimentais ao longo do processo de rotura da junta, verifica-se igualmente divergência de

comportamento quer em termos de evolução dos valores de P quer no que respeita aos deslocamentos de rotura. A discordância obtida entre os gráficos numéricos e os experimentais, pode ser justificada pelo facto do MDC aplicado no estudo EF não ser o mais adequado para traduzir o comportamento plástico devido à alta ductilidade do adesivo Sikaforce® 7752.

De seguida efetua-se uma análise dos resultados de $P_{\text{máx}}$ por adesivo em função de L_0 , onde se pretende avaliar a capacidade do modelo numérico implementado no estudo na determinação dos valores de resistência. Na Figura 150, Figura 151 e Figura 152 mostram-se os gráficos onde estão representados os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos experimentalmente e numericamente pelas juntas coladas com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente. No que concerne aos resultados obtidos experimentalmente, os valores apresentados referem-se aos valores médios de $P_{\text{máx}}$ e respetivo desvio padrão.

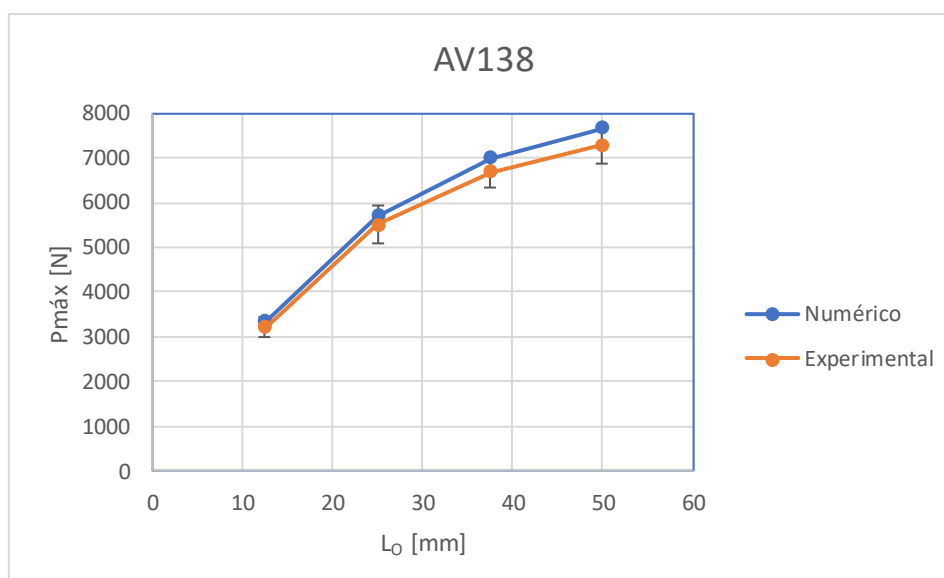


Figura 180 - Valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos experimentalmente e numericamente para juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 em função do valor de L_0 .

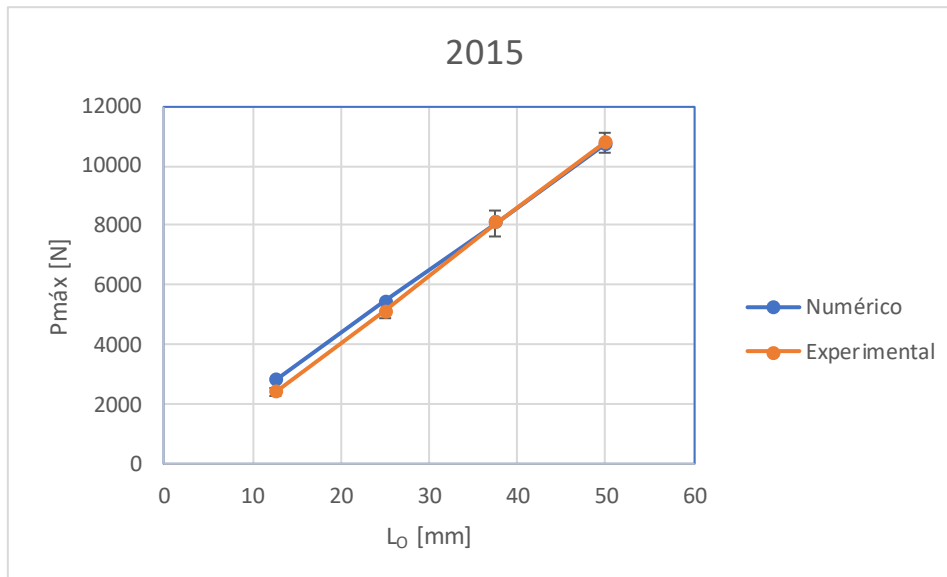


Figura 181 - Valores de $P_{máx}$ obtidos experimentalmente e numericamente para juntas coladas com adesivo Araldite® 2015 em função do valor de L_0

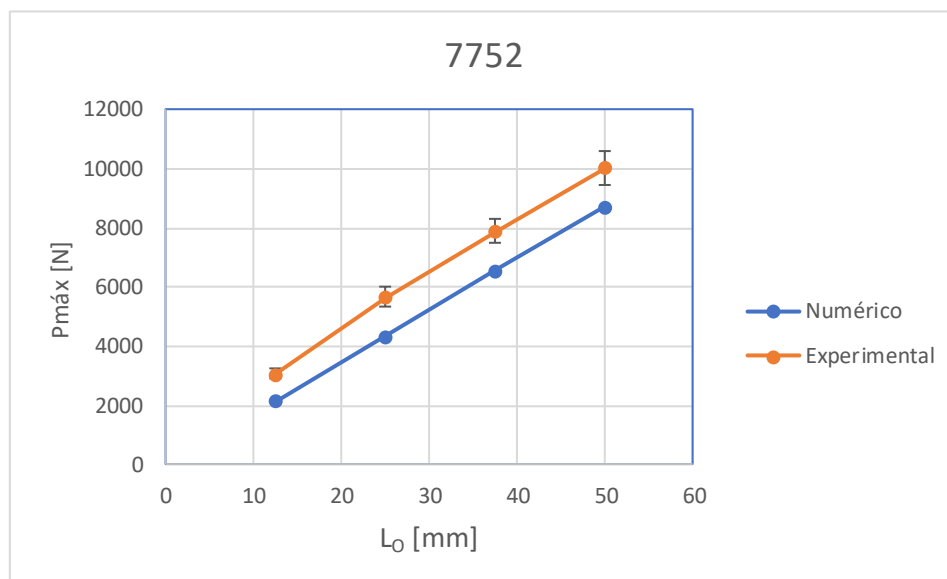


Figura 182 - Valores de $P_{máx}$ obtidos experimentalmente e numericamente para juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 em função do valor de L_0 .

Pela análise dos resultados, verifica-se a existência de uma correlação aceitável entre os resultados numéricos e experimentais para todos os adesivos. De facto, a melhor aproximação foi registada para o AV138, em que o máximo desvio percentual dos valores de $P_{máx}$ determinados para o adesivo em questão foram de 4,2% para $L_0=12,5$ mm, 3,6% para $L_0=25$ mm, 4,7 mm para $L_0=37,5$ mm 2,4% e 5,1 % para $L_0=50$ mm.

No que diz respeito ao adesivo Araldite® 2015, notou-se uma diferença um pouco significativa já que os valores de $P_{máx}$ determinados experimentalmente foram mais

baixos que os numéricos. Em termos de percentagem, o desvio verificado foi de 32,4, 25,4, 18,3 e 17,6 % para os valores de $L_0=12,5, 25, 37,5$ e 50 mm, respetivamente.

Por outro lado, para o adesivo Sikaforce® 7752, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ determinados numericamente foram significativamente mais baixos que os experimentais. Em termos de percentagem, o desvio verificado foi de 34,8, 30,8, 25,9 e 22,9% para $L_0=12,5, 25, 37,5$ e 50 mm, respetivamente. A diferença verificada entre resultados numéricos e experimentais deve-se à rotura ocorrer após plastificação significativa, que não é capturada com precisão pelo MDC triangular aplicado no estudo numérico. Na verdade, os MDC implementados na técnica EF subestimam as tensões transmitidas após o início do dano, o que geralmente resulta em valores de $P_{m\acute{a}x}$ inferiores. Para melhores resultados, uma boa solução passaria pelo uso de MDC trapezoidais na técnica de EF [99] para obtenção de resultados mais precisos. No entanto, no geral, considera-se que se obteve uma previsão bastante satisfatória.

3.2.3.5 Comparação com juntas em degrau com aderentes de alumínio

Neste capítulo serão analisados e comparados os valores da $P_{m\acute{a}x}/b$ (largura do provete) em degrau com aderentes em PRFC obtidos experimentalmente na presente dissertação, com os valores os de $P_{m\acute{a}x}$ registados no trabalho experimental realizado por Silva [105], referente a juntas em degrau com aderentes em alumínio. De referir que foi necessário dividir o $P_{m\acute{a}x}$ pela largura do provete uma vez que as juntas de alumínio utilizadas nos ensaios de Silva [105] apresentavam uma largura de 25 mm e no estudo em questão apenas 15 mm.

Numa análise preliminar do gráfico de $P_{m\acute{a}x}/b$ em função de L_0 para o adesivo Araldite® AV138, apresentado na Figura 135, verifica-se as juntas fabricadas com aderentes em PRFC revelam maior resistência, exceto para $L_0=12,5$ mm, em que o valor da resistência é inferior em cerca de 17%. Isto pode-se justificar pelo facto de terem ocorrido algumas interlaminares, como se verificou no ensaio numérico destas juntas. Tendo o PRFC uma rigidez superior ao alumínio, este apresenta menor taxa de deformação diferencial ao longo da sobreposição, e como o adesivo Araldite® AV138 é altamente frágil, ou seja, muito suscetível a deformações, este incorre num desempenho inferior em juntas com aderentes de alumínio. Para os restantes comprimentos de sobreposição o valor máximo de resistência é ligeiramente superior, ou seja, verifica-se uma melhoria da capacidade de carga da junta em PRFC. Em termos percentual e para valores de para $L_0=25, 37,5$ e 50 mm, a junta de material compósito regista mais 4,6, 9,7 e 6,78 % de resistência comparativamente às juntas com aderentes em alumínio.

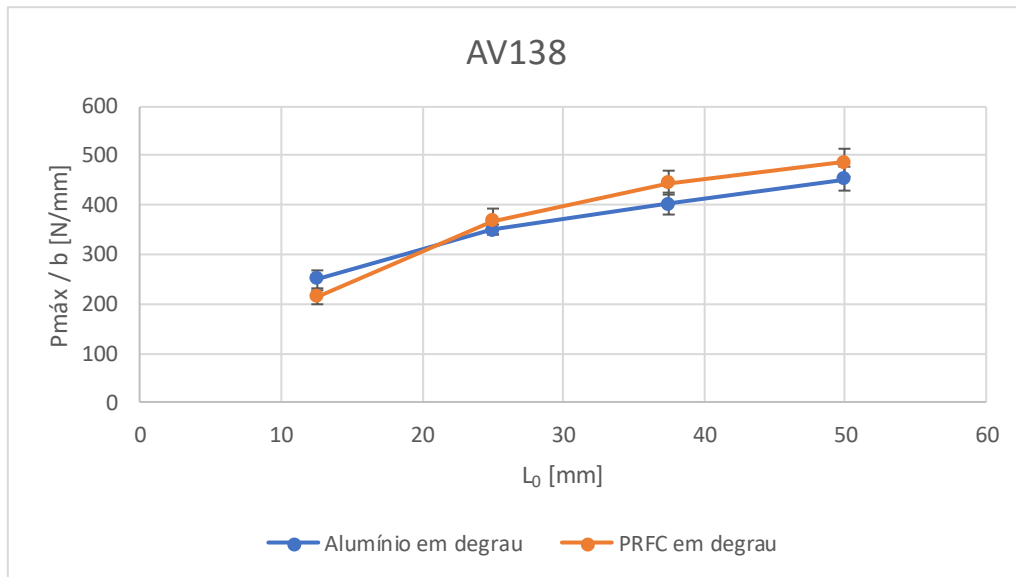


Figura 183 – $P_{máx}/b$ em função de L_0 para juntas em degrau ligadas com o Araldite® AV138

Na Figura 136 pode-se observar a distribuição de tensões τ_{xy} ao longo da camada adesiva para juntas com aderentes de alumínio e PRFC com $L_0=50$ mm, onde se verifica que as tensões desenvolvidas nas juntas fabricadas com PRFC são significativamente inferiores às registadas nas juntas com aderentes de alumínio.

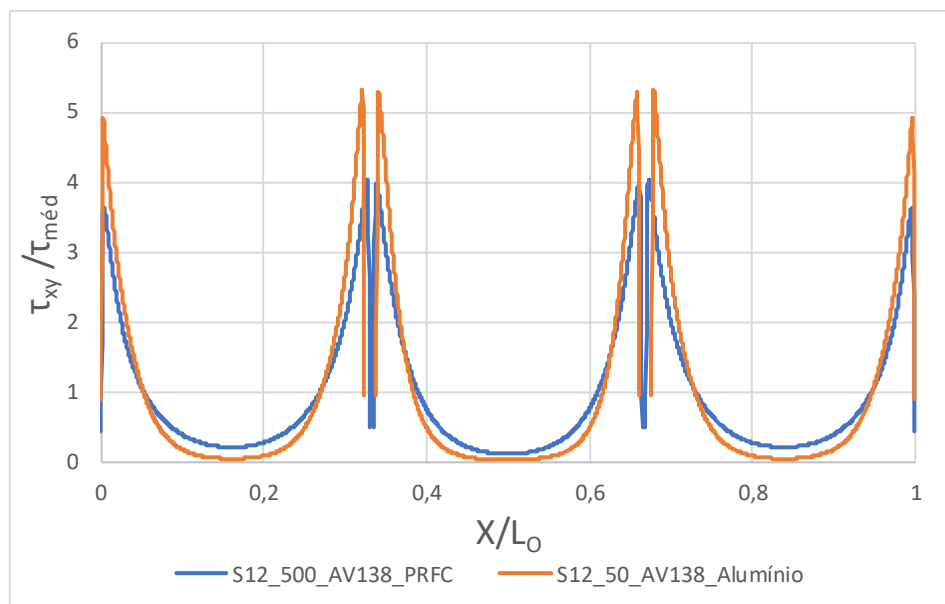


Figura 184 - Comparação das tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ em juntas em degrau ligadas com o Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm

Relativamente às juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015, a Figura 137 mostra uma resistência inferior para as juntas em fibras de carbono. Para os valores de $L_0=12,5$, 25 e 37,5 mm as juntas em compósito apresentam capacidade de carga inferior em -30,7, -

24,1, -8,7 % comparativamente às juntas de alumínio. Esta diferença tende a reduzir-se com o aumento de L_0 , o que vez pode ser justificado pela possibilidade de ocorrência de roturas interlaminares verificadas ao nível do ensaio numérico que prejudicam gravemente a capacidade de resistência. Por fim para $L_0=50$ mm as juntas de material compósito já apresentam maior resistência do que as do alumínio nomeadamente um valor superior em 4,4 %.

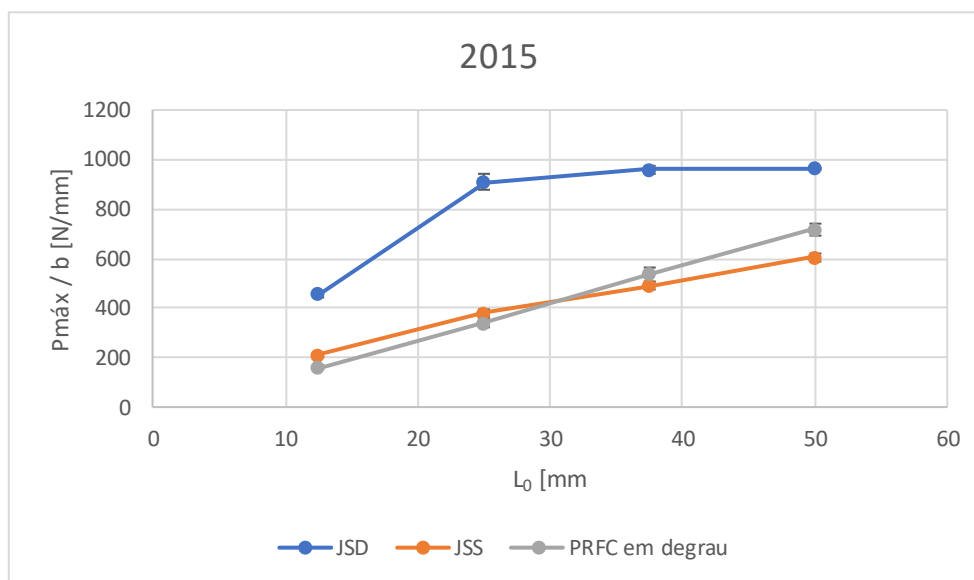


Figura 185 - $P_{máx}$ / Largura em função de L_0 para juntas em degrau ligadas com o Araldite® 2015

Por último, sendo o Sikaforce® 7752 o adesivo mais dúctil e flexível usado no estudo, estas propriedades permitiram obter uma melhor aproximação no que toca à comparação da resistência máxima verificada nas juntas em compósito e alumínio uma vez que é possível deste modo evitar roturas interlaminares das diferentes camadas de fibras de carbono dos substratos estudados, esta aproximação de resultados pode ser verificada no gráfico da Figura 186. Em relação à diferença de resistência entre as juntas fabricadas com diferentes materiais, as juntas em PRFC possuem uma capacidade de carga superior em 18,1% para o valor de $L_0=12,5$ mm em comparação com as juntas em alumínio. Esta diferença percentual entre as duas juntas adesivas mantém-se praticamente constante dado que, para os valores de $L_0=25$, 37,5 e 50 mm, os desvios obtidos foram de 17,6, 13,2 e 10,4%, respetivamente. De apontar que área de colagem não é a mesma nos três casos e, desta forma, se fosse procedido à normalização em relação à área de colagem, não se observaria uma diferença tão significativa entre as JSD e as outras configurações de junta.

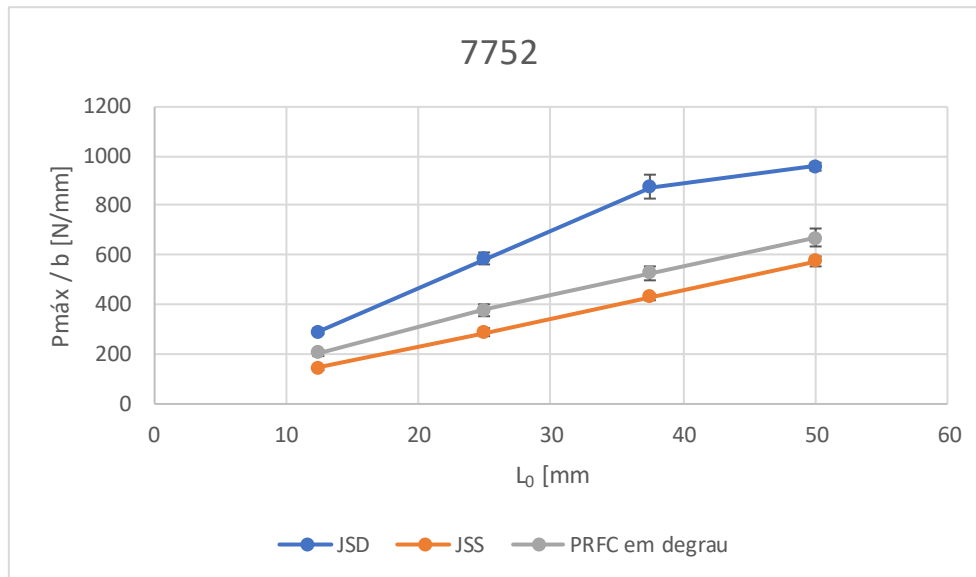


Figura 186 - $P_{máx}/b$ em função de L_0 para juntas em degrau ligadas com o Sikaforce® 7752

3.2.3.6 Comparação com juntas de sobreposição simples e dupla

Do mesmo modo que o capítulo anterior, também neste capítulo serão analisados e comparados os valores experimentais da $P_{máx}$ obtidos para juntas em degrau com aderentes em PRFC com os valores de resistência de JSS e JSD em alumínio resultantes dos trabalhos experimentais levados a cabo por Carvalho et al. [127, 128].

Com a observação do gráfico da Figura 187, onde estão apresentados os valores de $P_{máx}/b$ (largura do provete) para juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138, verifica-se que as juntas em degrau registam valores de resistência entre os obtidos em JSS e JSD, para todos os L_0 . Contrariamente ao que acontece em JSD, a capacidade de carga das juntas em degrau é sempre inferior em função de L_0 apesar de existir uma aproximação com o aumento do comprimento de sobreposição, ou seja, enquanto para $L_0=12,5$ existe uma capacidade de carga inferior de 127,2 %, para $L_0=50$ mm regista-se apenas uma diferença de 39,7%. Em relação às outras configurações, as JSS têm uma resistência significativamente inferior, uma vez que estes tipos de juntas apresentam picos elevados na distribuição de tensões. Este fenómeno tem mais evidência no desempenho de adesivos frágeis, como é o caso do Araldite® AV138. A nível percentual, para $L_0=12,5$ mm existe uma igualdade na capacidade de carga entre as juntas de material compósito e alumínio. Para $L_0=25,37,5$ e 50 mm, as juntas em degrau exibem uma resistência superior em 26,6, 28 e 23,1% relativamente às JSS.

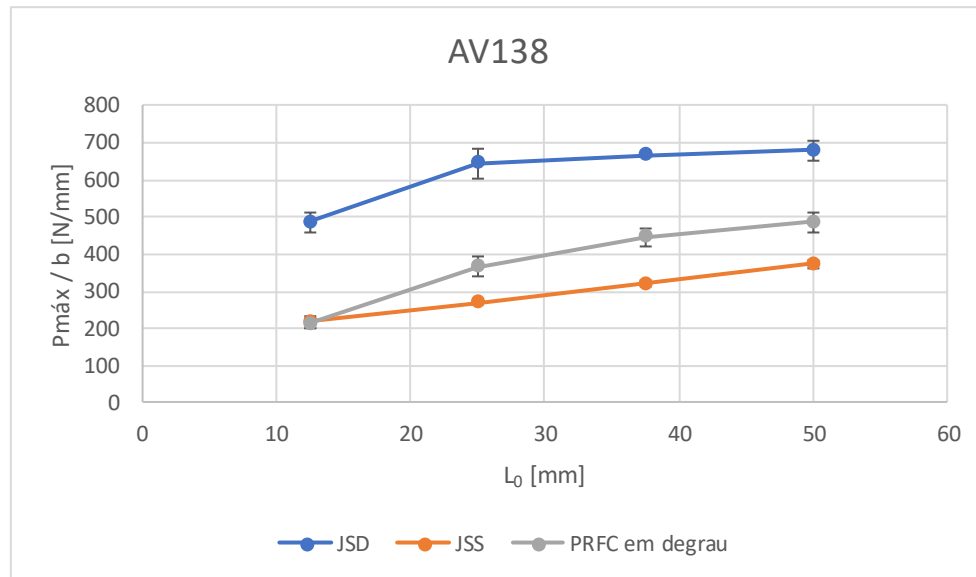


Figura 187 – $P_{m\acute{a}x}/b$ em função de L_0 para juntas em degrau ligadas com o Araldite® AV138

Com a análise do gráfico da Figura 188, verifica-se que, para o adesivo Araldite® 2015, a diferença de resistência entre as juntas em degrau e JSS é significativamente inferior em comparação com as observadas no adesivo Araldite® AV138. Isto deve-se ao adesivo Araldite® 2015 apresentar maior ductilidade, e conseqüentemente ser menos suscetível aos picos de tensões das JSS. Contudo, para $L_0=12,5$ e 25 mm o valor de capacidade de resistência das juntas em PRFC é inferior em 31,8 e 11,5%, respetivamente devido à possibilidade de existência das roturas interlaminares que reduz significativamente a capacidade de carga. À medida que se aumenta o valor de L_0 , a diferença de resistência entre as juntas em degrau e as JSS reduz-se gradualmente e as juntas em material compósito para $L_0=37,5$ e 50 mm passam a apresentar uma capacidade de carga superior em 9,1% e 15,5%. Em relação às JSD, estas têm um melhor comportamento quando comparadas com as outras configurações, dado que se obtêm valores de $P_{m\acute{a}x}$ superiores para todos os L_0 . Para $L_0=12,5$ e 25 mm, as juntas em degrau apresentam 184,39 e 167,4% menos resistência do que as juntas em degrau. Contudo, entre $L_0=25$ e 50 mm as JSD apenas diminuem a sua superioridade a nível capacidade de carga em 78,5 e 34,1%. Esta diminuição deve-se à deformação do alumínio para os valores de carga atingidos, o que causa uma rotura prematura do adesivo. Para os mesmos valores de carga, o PRFC não apresenta grandes deformações devido à sua elevada rigidez, e as tensões desenvolvidas são menores. Por este motivo, e dado que as juntas em degrau demonstram um comportamento linear no aumento da resistência, a diferença entre estas duas configurações reduz.

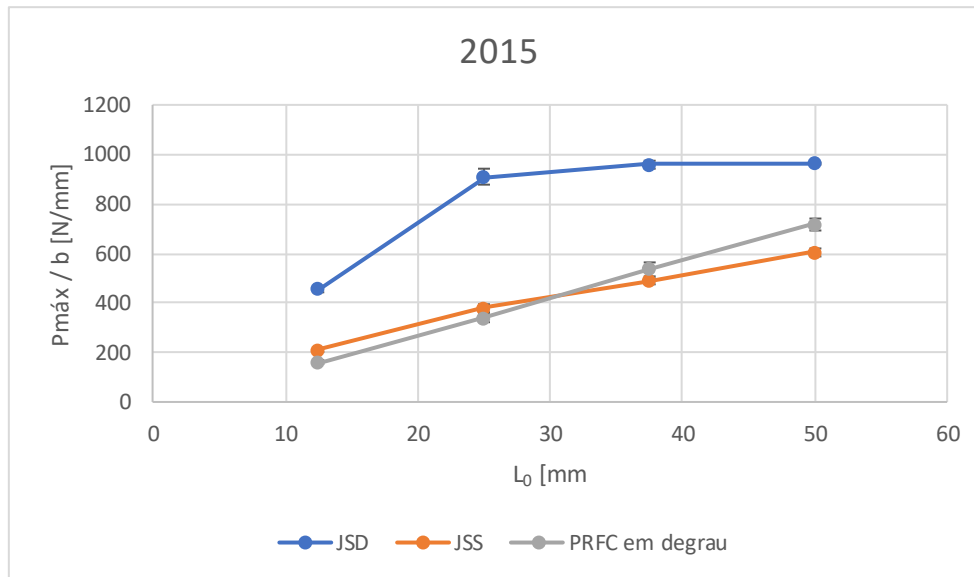


Figura 188 - $P_{máx}/b$ em função de L_0 para juntas em degrau ligadas com o Araldite® 2015

Acerca das juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752, o gráfico da Figura 189 mostra que os resultados verificados nas juntas em degrau e nas JSS apresentam uma diferença ligeiramente significativa. Nestas duas configurações observa-se que para o valor de $P_{máx}$ com $L_0=12,5$ mm obtém-se uma superioridade de 28,9% de $P_{máx}$ para as juntas em PRFC, e à medida que comprimento sobreposição aumenta, verifica-se uma ligeira redução até que para $L_0=50$ mm, a carga máxima atingida é 14,1% superior para as juntas em PRFC. Comparativamente às JSD, as juntas em PRFC revelam menor resistência em, sensivelmente, 50% para todos os L_0 .

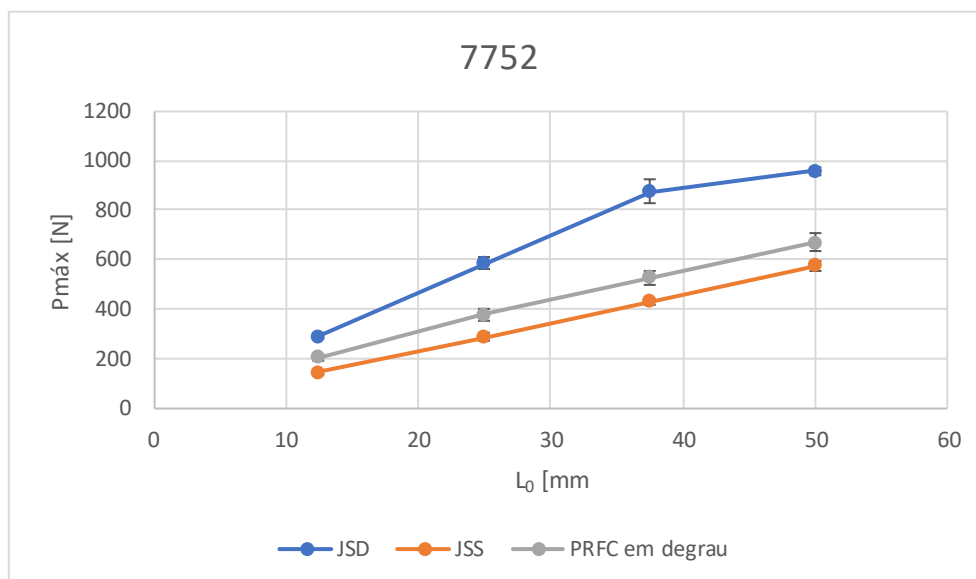


Figura 189 - $P_{máx}/b$ em função de L_0 para juntas em degrau ligadas com o Sikaforce® 7752

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação teve como objetivo estudar por análise numérica e experimental o comportamento de ligações adesivas com configuração em degrau solicitadas à tração. O trabalho desenvolvido incidiu no estudo e análise do desempenho desta configuração geométrica, investigando a influência que a variação do valor de L_0 e a ductilidade do adesivo exercem na resistência das juntas.

No que respeita ao estudo numérico, foi realizada a análise de tensões, análise de dano e da resistência das juntas através de estudos EF simulados no *software* ABAQUS®, usando os valores daqui retirados para comparação com os valores experimentais obtidos.

Pela análise da distribuição σ_y é possível concluir que, para que qualquer L_0 estudado, as tensões σ_y são bastante inferiores à tensão $\tau_{méd}$, excetuando nas extremidades de L_0 e nas transições de degrau, devido ao momento fletor criado. Pela observação dos gráficos tensões σ_y obtidos para cada um adesivos em estudo entende-se que, quanto maior for a ductilidade do adesivo utilizado, menores são os picos de tensões. Por esta razão, nos adesivos dúcteis verificaram-se picos de tensões σ_y inferiores aos registados nos adesivos rígidos, onde as tensões aumentam de forma repentina nas extremidades da sobreposição. Deste modo, para o adesivo Araldite® 2015 verificaram-se valores de pico das tensões σ_y inferiores ao adesivo Araldite® AV138, onde se verificaram os maiores valores de pico, devido à rigidez superior deste adesivo, que provoca uma tensão σ_y elevada numa área muito pequena da sobreposição. Os valores de tensão mais reduzidos foram obtidos no adesivo Sikaforce® 7752 devido à sua menor rigidez, o que faz com que este adesivo seja capaz de distribuir as tensões de forma mais gradual por uma área maior de sobreposição. Relativamente à distribuição de tensões τ_{xy} , é possível verificar que os picos de tensões existem nas extremidades de L_0 e nas transições de degrau, independentemente do adesivo. Contudo, no interior dos patamares de sobreposição a evolução da tensão de corte é semelhante à que se verifica nas JSS. Os picos de tensão verificam-se na parte extremidade de sobreposição, sendo a parte central pouco solicitada. Desta forma, é possível verificar que, no caso do adesivo flexível, os picos os de tensão experimentados nas transições de degraus são significativamente mais baixos do que os desenvolvidos na extremidade de L_0 . Todavia, com o aumentar da rigidez do adesivo usado, é possível observar que estes valores se aproximam, e na situação do adesivo Araldite® AV138 os picos de tensão gerados nas transições de degraus chegam a ultrapassar o valor do pico da extremidade da

sobreposição. É evidente ainda que os picos de tensão τ_{xy} aumentam progressivamente em função de L_0 e, da mesma forma que se verifica nas tensões σ_y , os picos de tensões τ_{xy} diminuem com o aumento da ductilidade do adesivo. Tendo em conta a análise das tensões σ_y e τ_{xy} , é plausível inferir que as roturas das juntas ocorrem por norma nas extremidades de sobreposição, já que nestas posições existem grandes concentrações de tensões.

A análise numérica da variável de dano SDEG possibilitou a melhor compreensão do comportamento e processo de rotura dos adesivos utilizados. Através deste estudo foi possível concluir que, para os Araldite® AV138 e Araldite® 2015, o tipo de rotura verificado foi essencialmente coesivo e interlaminar em todas as juntas, enquanto para o adesivo mais dúctil Sikaforce® 7752 a rotura foi puramente coesiva no adesivo. Ao contrário deste último adesivo, o Araldite® AV138, revelou o seu carácter frágil com uma transição abrupta de estados de dano, o que contrapõe com o comportamento de transição gradual e suave dos restantes adesivos em análise.

No que diz respeito à validação da técnica EF, os ensaios experimentais permitiram validar os resultados numéricos para dois dos adesivos em estudo, designadamente para o Araldite® AV138 e 2015. Já com o adesivo Sikaforce® 7752, os valores de resistência estimados numericamente foram inferiores aos obtidos experimentalmente. Tal facto deve-se ao tipo de MDC implementado no estudo não ser o mais apropriado para traduzir com exatidão o comportamento plástico deste adesivo. Outro fator a apontar é que o adesivo Sikaforce® 7752, apesar de se tratar do adesivo mais dúctil, experimentalmente apresenta algumas zonas onde existe parcialmente rotura interlaminar para certos provetes de $L_0=25, 37,5$ e 50 mm, o que contrapõe os resultados numéricos, onde foram obtidas roturas totalmente coesivas. Outros motivos mecânicos que podem justificar a rotura interlaminar nos resultados experimentais quando se utiliza o Sikaforce® 7752 podem ser: o processo de produção das juntas em material compósito, nomeadamente o processo de colagem das diferentes camadas das fibras de carbono não ter sido 100% eficiente, ou a maquinagem dos degraus ter induzido defeitos nos aderentes de compósito.

A comparação dos resultados experimentais obtidos nas juntas em degrau com aderentes de PRFC com os das juntas com aderentes em alumínio permitiu concluir que a utilização do material compósito no fabrico de juntas adesivas se traduz num ligeiro aumento da resistência. Este comportamento justifica-se pela rigidez do PRFC ser bastante superior à do alumínio, o que leva a uma menor taxa de deformação ao longo de L_0 , favorável a adesivos suscetíveis a deformações. Contudo, para o Araldite® AV138 na situação de $L_0=12,5$ mm, e para o Araldite® 2015 nomeadamente para $L_0=12,5, 25$ e $37,5$ mm, registou-se que a capacidade de carga máxima das juntas de PRFC é ligeiramente inferior à das juntas de alumínio, o que pode ser justificado pela possibilidade de existência de rotura interlaminar durante a solicitação de tração, como se verificou no estudo numérico. Os adesivos Araldite® AV138 e 2015 são

acompanhados deste tipo de rotura, o que influencia de forma negativa a capacidade de resistência.

Por sua vez, para o adesivo Sikaforce® 7752, as juntas em PRFC registam valores superiores de carga máxima para todos os valores de L_0 comparativamente aos valores obtidos para as juntas de alumínio, dado que este adesivo é muito dúctil e os fenómenos referidos anteriormente não têm tanta influência.

Relativamente à comparação com JSS e JSD, os valores de $P_{máx}$ para as juntas de material compósito situam-se de uma forma geral em todos os adesivos entre os valores de JSD e JSS, independentemente de L_0 . Por outro lado, a resistência das JSD é bastante superior à obtida em JSS e juntas em degrau. Os valores registados para JSS apresentam os menores valores de $P_{máx}$, excetuando no caso do adesivo Araldite® 2015, para os dois L_0 mais baixos, em que a capacidade carga das juntas em PRFC é ligeiramente inferior às das JSS.

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

- Fazer variar o valor de L_0 entre degraus;
- Utilização de dois adesivos na zona de colagem;
- Estudo do desempenho de adesivos frágeis com aderentes de diferente rigidez;
- Variação do número de degraus e respetivo efeito na distribuição de tensões e resistência da junta.
- Realização de ensaios de fadiga para este tipo de configuração geométrica.

REFERÊNCIAS

5 REFERÊNCIAS

1. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Tese de Doutoramento:Faculdade de Engenharia da universidade do Porto.
2. Silva, J.P.M.d., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2012, Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
3. iberfit.Lda. *Adesivos estruturais*. 2019 Data de de acesso Abril 2019]; Available from: <http://www.iberfit.pt/index.php/2014-01-27-19-07-51/colas-industriais/adesivos-estruturais/item/97-adesivos-estruturais-geral>.
4. Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction*, Hanser. New York, 1997.
5. Carneiro, M.A.d.S., *Estudo experimental e numérico de juntas adesivas em T com aderentes de alumínio*, in *Departamento De Engenharia Mecânica*. 2016, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
6. Gleich, D., M. Van Tooren, and A. Beukers, *Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures*. *Journal of adhesion science and technology*, 2001. **15**(9): p. 1091-1101.
7. Ribeiro, A., A. De Jesus, and A. Ferreira, *Comportamento estático e à fadiga de juntas coladas com perfis pultrudidos*. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões* ISSN, 2008. **1646**: p. 7078.
8. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000: McGraw-Hill.
9. Institution, B.S., *DIN EN 923 Adhesives: Terms and definitions*. 2015.
10. BLOGADHESIVOINDUSTRI. *Adesivos Poliuretânicos para laminação*. 2015 Data de acesso Abril 2019]; Available from: <http://blogadhesivoindustrial.com/>.
11. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, and M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007: Publindustria.
12. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005: Elsevier.
13. Louro, A., et al., *Adesivos estruturais na construção de aviões*. Relatório da unidade curricular Projeto FEUP do Mestrado em Engenharia Mecânica, 2011.
14. Ribeiro, D., L. Devesa, and R. Barbosa, *Efeito da temperatura na resistência de juntas de sobreposição simples*. 2018, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
15. AdhesiveSystems, i. *A Look into Epoxy and Other Types of Adhesives Used in the Automotive Industry*. Data de acesso Abril 2019]; Available from: <http://instantca.com/a-look-into-epoxy-and-other-types-of-adhesives-used-in-the-automotive-industry/>.
16. Cognard, P., *Handbook of adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding*. Vol. 1. 2005: Elsevier.

17. Eletrónico, C. *PLACA CIRCUITO IMPRESSO*. 2019 Data de Acesso Abril 2019]; Available from: <http://www.catalogoeletronico.com.br/placa-circuito-impresso>.
18. 3M™_Adhesive_Sealants. *Strong, durable bonds that flex and seal*. 2017 Data de Acesso Abril 2019]; Available from: <https://multimedia.3m.com/mws/media/8118310/3mtm-adhesive-sealant-brochure.pdf>.
19. Sika. *Colagem de pavimentos de madeira*. 2018 Data de Acesso Abril 2019]; Available from: <https://www.100solucoessika.pt/zonas/colagem-de-pavimentos-de-madeira-2/>.
20. GRAND_VIEW_RESEARCH, *Construction Adhesive Market Report Construction Adhesive Market Analysis By Resin Type (Acrylic Adhesive, Polyurethanes, Polyvinyl Acetate,Epoxy),by Technology,by application,by application,by region,and segment Forecasts,2018-2025*. 2016.
21. Landrock, A.H. and S. Ebnesajjad, *Adhesives technology handbook*. 2008: William Andrew.
22. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica.Instituto Superior de Engenharia do Porto.
23. Adams, R.D., et al., *Structural adhesive joints in engineering*. 1997: Springer Science & Business Media.
24. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*. 2016, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
25. *ASTM D5573: Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints*. . 2012, ASTM International.
26. *Plastics Decorating Magazine – Bond Failure Modes*. Data de acesso: Abril 2019]; Available from: <http://www.plasticsdecorating.com/ENEWS/ENews.asp?item=adhesivebondfailure>.
27. Da Silva, L.F., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Springer Science & Business Media.
28. *Adhesives, Glues and Sealants – Types of fractures - Failure Modes of adhesive bonding*. Data de acesso: Abril 2019]; Available from: <http://www.adhesiveandglue.com/fracture-of-adhesive.html>.
29. Packham, D., *In Handbook of adhesion second edition*. 2005: Wiley Online Library.
30. Brockmann, W., et al., *Adhesive Bonding as a Joining Technique*. Adhesive Bonding: Materials, Applications and Technology, 2009: p. 1-3.
31. Owens, J.F.P., *Studies on stiffness and fracture behaviour in adhesively bonded composite-to-metal sear joints.*, in *A Thesis Master of Science in Engineering: University of New Brunswinck*. 1998.
32. Army-MR, N.-A., *Air Force-11*. Composite Materials Handbook. Vol. 3:Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, and Analysis. 2013: Department of Defense, United:States of America: MIL - HDB-17-3F.
33. Adams, R. and N. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of strain analysis, 1974. **9**(3): p. 185-196.

34. Das, M., E. Madenci, and D. Ambur, *Three-dimensional nonlinear analyses of scarf repair in composite laminates and sandwich panels*. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2008. **3**(9): p. 1641-1658.
35. Constante, C.J., *Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
36. Montes, J.R., L.C. Martínez, and J.C. del Real Romero, *Procesos industriales para materiales no metálicos*. 2006: Editorial Visión Libros.
37. You, M., et al., *A numerical and experimental study of adhesively bonded aluminium single lap joints with an inner chamfer on the adherends*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(1-2): p. 71-76.
38. Golewski, P. and T. Sadowski, *Investigation of the effect of chamfer size on the behaviour of hybrid joints made by adhesive bonding and riveting*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **77**: p. 174-182.
39. Harris, J. and R. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
40. Da Silva, L.F.M. and A. Öchsner, *Modeling of adhesively bonded joints*. 2008: Springer.
41. Ichikawa, K., Y. Shin, and T. Sawa, *A three-dimensional finite-element stress analysis and strength evaluation of stepped-lap adhesive joints subjected to static tensile loadings*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(8): p. 464-470.
42. Akpınar, S., *The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers*. Composites Part B: Engineering, 2014. **67**: p. 170-178.
43. Habenicht, G., *Applied adhesive bonding. A Practice Guide for Flawless Results*. ISBN, 2009: p. 978-3.
44. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**: p. 41-47.
45. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. **9**(3): p. 185-196.
46. Harris, J.A. and R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
47. Curiel Sosa, J.L. and N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
48. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics, 1944(66): p. A17-A27.
49. Panigrahi, S. and B. Pradhan, *Three dimensional failure analysis and damage propagation behavior of adhesively bonded single lap joints in laminated FRP composites*. Journal of Reinforced plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
50. Hart-Smith, L., *Stress analysis- A continuum mechanics approach(in adhesive bonded joints)*. Developments in adhesives- 2.(A 82-28576 13-39) London, Applied Science Publishers, 1981, 1981: p. 1-44.

51. Penado, F.E., *A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1998. **11**(3): p. 272-287.
52. Duan, K., X. Hu, and Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
53. Liljedahl, C., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International journal of fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
54. Volkersen, O., *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung 15, 1938: p. 41-47.
55. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
56. Panigrahi, S.K. and B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
57. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Vol. Edições Técnicas. 2007, Porto: Publindústria.
58. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
59. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
60. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(5): p. 337-342.
61. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.
62. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
63. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. **23**(3): p. 622-636.
64. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
65. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011: Springer.
66. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
67. Turon, A., et al., *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
68. Kafkalidis, M.S. and M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.

69. Yang, Q.D. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
70. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, and R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
71. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
72. Alfano, G. and M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
73. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
74. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and repaired sandwich panel by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
75. Pinto, A.M.G., et al., *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
76. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
77. de Moura, M., et al., *Prediction of compressive strength of carbon-epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures, 2000. **50**(2): p. 151-157.
78. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.
79. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
80. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10-11): p. 2224-2230.
81. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
82. Daudeville, L. and P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
83. Khoramishad, H., et al., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
84. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.

85. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
86. Wahab, M.M.A., et al., *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
87. Imanaka, M., et al., *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.
88. Shenoy, V., et al., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
89. Hua, Y., et al., *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
90. Chen, Z., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
91. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008: Wiley.
92. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
93. Moës, N., J. Dolbow, and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
94. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
95. Campilho, R.D.S.G., et al., *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
96. de Moura, M.F.d.S., A.M.B. de Morais, and A.G. de Magalhães, *Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico*. 2005.
97. Kooloor, S. and M. Tamin, *Mode-II interlaminar fracture and crack-jump phenomenon in CFRP composite laminate materials*. Composite Structures, 2018. **204**: p. 594-606.
98. Neto, J., R.D. Campilho, and L. Da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
99. Ribeiro, F., et al., *Strength and damage growth in composite bonded joints with defects*. Composites Part B: Engineering, 2016. **100**: p. 91-100.
100. Vable, M. and J.R. Maddi, *Boundary element analysis of adhesively bonded joints*. International journal of adhesion and adhesives, 2006. **26**(3): p. 133-144.
101. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*, in *Departamento em Engenharia Mecânica*. 2005, Tese de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

102. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*, in *Departamento de Engenharia Mecânica do Porto*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
103. Campilho, R.D., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2013. **44**: p. 48-56.
104. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
105. Silva, J.O.d.S., *Estudo de juntas adesivas em degrau: análise experimental e numérica por modelos de dano coesivo*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2018, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
106. Ribeiro, T.E.A., et al., *Damage analysis of composite-aluminium adhesively-bonded single-lap joints*. Vol. 136. 2016. 25-33.
107. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. *International Journal of Fracture*, 1996. **77**: p. 111-140.
108. Kafkalidis, M. and M. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. *International Journal of Solids and Structures*, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
109. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. *International Journal of Solids and Structures*, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
110. Da Silva, L.F. and R.D. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*, in *Advances in numerical modeling of adhesive joints*. 2012, Springer. p. 1-93.
111. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. *Composites Science and Technology*, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
112. Campilho, R.D.S.G., M. De Moura, and J. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009. **29**(2): p. 195-205.
113. Pocius, A., *Adhesion and Adhesives Technology, An introduction: The chemistry and physical properties of elastomer-based adhesives*. 2002, Hansen Gardner Publications, Inc., Maplewood Cincinnati.
114. Andersson, T. and U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. *International Journal of Solids and Structures*, 2004. **41**(2): p. 413-434.
115. Högberg, J.L. and U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
116. Campilho, R., et al., *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.

117. De Moura, M., et al., *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(8): p. 419-426.
118. Gonçalves, D.J.D.C., *ESTUDO DE JUNTAS ADESIVAS EM DEGRAU: ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA POR MODELOS DE DANO COESIVO*, in *Departamento de engenharia Mecânica*. 2018, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
119. De Moura, M., R. Campilho, and J. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10-11): p. 2224-2230.
120. Marques, E. and L.F. da Silva, *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. The Journal of Adhesion, 2008. **84**(11): p. 915-934.
121. Campilho, R.D.S.G., et al., *Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single-and double-strap repairs*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(6): p. 678-686.
122. Darwish, S. and A. Ghanya, *Critical assessment of weld-bonded technologies*. Journal of Materials Processing Technology, 2000. **105**(3): p. 221-229.
123. Zhao, B., Z.-H. Lu, and Y.-N. Lu, *Two-dimensional analytical solution of elastic stresses for balanced single-lap joints—Variational method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **49**: p. 115-126.
124. Reis, P., F. Antunes, and J. Ferreira, *Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints*. Composite structures, 2005. **67**(1): p. 125-133.
125. Mortensen, F. and O.T. Thomsen, *Simplified linear and non-linear analysis of stepped and scarfed adhesive-bonded lap-joints between composite laminates*. Composite Structures, 1997. **38**(1-4): p. 281-294.
126. Nunes, S., et al., *Comparative failure assessment of single and double lap joints with varying adhesive systems*. The Journal of Adhesion, 2016. **92**(7-9): p. 610-634.
127. Carvalho, U. and R. Campilho, *Validation of pure tensile and shear cohesive laws obtained by the direct method with single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **77**: p. 41-50.
128. Carvalho, U. and R. Campilho, *Application of the direct method for cohesive law estimation applied to the strength prediction of double-lap joints*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2016. **85**: p. 140-148.