



Influência dos parâmetros e critérios dos modelos de dano coesivo na previsão da resistência ao impacto de juntas adesivas

TIAGO FILIPE CAMPOS PEREIRA

novembro de 2018

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS E CRITÉRIOS DOS MODELOS DE DANO COESIVO NA PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE JUNTAS ADESIVAS

Tiago Filipe Campos Pereira

1130407

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS E CRITÉRIOS DOS MODELOS DE DANO COESIVO NA PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE JUNTAS ADESIVAS

Tiago Filipe Campos Pereira

1130407

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.

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutora Sandra Cristina de Faria Ramos

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Ricardo João Camilo Carbas

Investigador FEUP

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho por todo o apoio que me forneceu na parte da simulação numérica, na revisão do texto e incentivo ao longo da realização desta dissertação.

Também gostaria de agradecer à minha família pelo apoio dado.

Por fim, queria agradecer ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), por todo o conhecimento adquirido ao longo destes anos.

PALAVRAS CHAVE

Adesivos estruturais, elementos finitos, simulação numérica, junta de sobreposição simples, modelos de dano coesivo, impacto.

RESUMO

A ligação adesiva é um processo de união permanente entre os componentes de uma estrutura que utiliza um adesivo para unir os componentes após a sua cura. Este tipo de ligação, teoricamente, deveria ser pelo menos tão resistente como o material ligado. As juntas adesivas têm vindo cada vez a ser mais usadas em diversas aplicações. Para isso é importante conhecer o seu comportamento quando submetidos a cargas estáticas ou de impacto. Para a realização destes estudos são necessários *software* que utilizam o Método dos Elementos Finitos. Neste sentido surgem os modelos de dano coesivo que têm vindo a ser utilizados para prever a resistência das juntas adesivas e simular o crescimento de dano em estruturas após introdução das leis coesivas.

Este trabalho estuda as diferentes condições de Modelo de Dano Coesivo usadas para modelar uma camada adesiva numa junta de sobreposição simples, sujeita a uma carga de impacto. Os resultados numéricos são validados com recurso a um trabalho prévio experimental. Neste estudo considerou-se quatro comprimentos de ligação (12,5; 25; 37,5 e 50 mm) e três tipos de adesivos (Sikaforce® 7752 – dúctil, Araldite® AV138 – frágil e XNR6852 – dúctil) em juntas de sobreposição simples. Os vários parâmetros de estudo foram: rigidez elástica da lei coesiva, desacoplamento dos modos de carregamento com lei triangular, forma da lei coesiva, critérios de iniciação de dano e critério de propagação de dano.

Esta análise permitiu concluir que os Modelos de Dano Coesivo são uma técnica fiável para a previsão da resistência da junta adesiva, desde que as condições de modelação sejam corretamente selecionadas. Por outro lado, a análise numérica realizada permitiu compreender em detalhe qual a influência dos critérios usados nos modelos coesivos nos resultados obtidos nas simulações.

KEYWORDS

Structural adhesives, finite elements, numerical simulation, single-lap joints, cohesive zone models, impact.

ABSTRACT

Adhesive bonding is a process of permanent bonding between the components of a structure that uses an adhesive to join the components after curing. This type of connection, theoretically, should be at least as strong as the bonded material. Adhesive joints have increasingly been used in many applications. For this it is important to know their behavior when subjected to static or impact loads. To carry out these studies, software using the Finite Element Method is required. In this sense, cohesive zone models have been used to predict the strength of adhesive joints and to simulate the growth of damage in structures after definition of the cohesive laws.

This work studies the different Cohesive Zone Model conditions used to model an adhesive layer in a single-lap joint, subjected to impact loading. The numerical results are validated using previous experimental work. In this study four bonding lengths (12.5; 25; 37.5 and 50 mm) and three types of adhesives (Sikaforce® 7752 - ductile, Araldite® AV138 - brittle and XNR6852 - ductile) were considered in single-lap joints. The various parameters of study were: elastic stiffness of cohesive law, decoupling of loading modes with triangular law, cohesive law shape, damage initiation criteria and damage propagation criterion.

This analysis allowed to conclude that Cohesive Zone Models are a reliable technique to predict the adhesive joint strength, provided that the modeling conditions are correctly selected. On the other hand, the numerical analysis made it possible to understand in detail the influence of the criteria used in the cohesive models in the results obtained in the simulations.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
4ENF	<i>Four-Point End-Notched Flexure</i>
BK	Benzeggagh-Kenane
CLS	<i>Cracked Lap Shear</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
EF	Elementos finitos
ELS	<i>End-Loaded Split</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
exp	Exponencial
JSD	Junta sobreposição dupla
JSS	Junta sobreposição simples
MAXE	Critério de máxima deformação nominal
MAXS	Critério de máxima tensão nominal
MDC	Modelo de dano coesivo
PW	<i>Power Law</i>
QUADE	Critério de deformação quadrática
QUADS	Critério de tensão quadrática
SDEG	<i>Stiffness degradation</i>

TAST	<i>Thich adherend shear test</i>
TDCB	<i>Tapered Double-Cantilever Beam</i>
TFFV	Técnica do fecho da fenda virtual
trap	Trapezoidal
tri	Triangular
UV	Ultravioleta

Lista de Símbolos Romanos

E	Módulo de Young
G	Módulo de corte
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
L_o	Comprimento de sobreposição
L_T	Comprimento total dos provetes
$P_{máx}$	Força máxima
t_A	Espessura do adesivo
t_p	Comprimento de sobreposição

Lista de Símbolos Gregos

α	Parâmetro de critério
δ	Deslocamento
ϵ_f	Deformação de rotura à tração
ϵ_{n0}	Pico tensão de tração

ε_{s0}	Pico tensão ao corte
ρ	Densidade
σ_f	Tensão rotura elástica
σ_y	Tensão de arrancamento
τ_f	Força de falha ao corte
τ_{xy}	Tensão de corte
ν	Coefficiente de Poisson

Lista de Unidades

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
cm	Centímetros
g/cm^3	Grama por centímetro cúbico
GPa	Giga Pascal
J	Joule
kg	Kilos
kN	Kilo Newton
m/s	Metros por segundo
mm/min	Milímetro por minuto
MPa	Mega Pascal
μm	Micrómetro

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da interfase e interface [3]	5
Figura 2 – Energia de arrancamento em função da rugosidade da superfície [3]	7
Figura 3 – Adesivo empregue num componente de avião [8]	9
Figura 4 – Aplicação de adesivo num barco [10]	10
Figura 5 - Adesivos estruturais na indústria automóvel [12].....	10
Figura 6 – Carregamento à tração em juntas adesivas [14, 15]	11
Figura 7 – Carregamento à compressão em juntas adesivas [14, 15]	12
Figura 8 – Carregamento ao corte em juntas adesivas [14, 15]	12
Figura 9 – Carregamento em clivagem nas juntas adesivas [14, 15].....	13
Figura 10 – Carregamento ao arrancamento nas juntas adesivas [14, 15]	13
Figura 11 – Rotura adesiva [3]	14
Figura 12 – Rotura coesiva [3]	14
Figura 13 – Rotura pelo aderente [3]	14
Figura 14 – Rotura mista [3]	14
Figura 15 – Configurações de juntas adesivas [14]	15
Figura 16 - Efeito do chanfro na distribuição de tensões de corte [2]	16
Figura 17 – Dimensões do provete para adesivos rígidos (a) e flexíveis (b) segundo a norma EN ISO 527-2 [18]	19
Figura 18 – Dimensões do provete para ensaios à compressão segundo a norma ASTM D 695 [18].....	19
Figura 19 – Teste de Iosipescu [18]	20
Figura 20 – Teste Arcan [18]	20
Figura 21 – Ensaio de tração em juntas topo a topo [18].....	21
Figura 22 - Geometria do teste <i>Napkin Ring</i> [18].....	21
Figura 23 - Dimensões do ensaio TAST segundo a norma ISO 110003-2 [18].....	22
Figura 24 - a) Ensaio arrancamento de junta em T b) Ensaio de arrancamento a 180° [18]	22
Figura 25 – Provete de ensaio DCB [18]	23
Figura 26 – Provete de ensaio TDCB [18]	23

Figura 27 - Dimensões no ensaio ENF [18]	24
Figura 28 – Representação do ensaio ELS [18]	24
Figura 29 – Representação do ensaio 4ENF [18]	25
Figura 30 – Representação do ensaio SLB [18]	26
Figura 31 – Representação do ensaio CLS [18]	26
Figura 32 - Ensaio de Charpy [27]	26
Figura 33 - Ensaio de impacto em bloco (elaboração própria)	27
Figura 34 – Representação da técnica Hopkinson [18]	27
Figura 35 - 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 [46])	31
Figura 36 - Modelo coesivo triangular [53, 54]	32
Figura 37 - 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) [88]	34
Figura 38 - Exemplo de um modelo viscoelástico de Voigt [73]	36
Figura 39 – Forma, dimensões e configuração da amostra do ensaio [85]	37
Figura 40 - Efeito da taxa de carga na resistência ao corte [85]	38
Figura 41 – Dimensões dos provetes no trabalho de Al-Zubaidy et al. [86]	39
Figura 42 – Comparação do número de camadas de CFRP e tipo de ensaio [86]	39
Figura 43 – Dimensões dos provetes para os ensaios de Kemiklioglu [87]	40
Figura 44 – a) Máquina de Charpy b) Shimadzu AG-100 [87]	40
Figura 45 – Comparação dos adesivos Loctite 9466 e Scotch DP460 em ensaio de impacto repetido [87]	41
Figura 46 – Representação simplificada do elemento coesivo através de um elemento de mola [88]	41
Figura 47 - a) Deformação da chapa experimental; b) Deformação da chapa numérica [88]	42
Figura 48 – Representação do modelo MEF e dimensões [89]	42
Figura 49 – a) distribuição da tensão principal máxima na interface sob cargas de tração de impacto e b) distribuição da tensão principal máxima na interface sob cargas de tração de impacto [89]	43
Figura 50 – Representação do equipamento experimental [90]	44
Figura 51 - Relação entre a tensão incidente e o corte máximo medido nos manómetros [90]	45
Figura 52 - Representação do peso	49
Figura 53 - Atribuição do material	49

Figura 54 – Representação das condições fronteira	50
Figura 55 – Representação da velocidade imposta no programa Abaqus	50
Figura 56 – Mesh - exemplo de uma malha com L_0 igual a 12,5 mm	50
Figura 57 – Lei triangular do modelo de dano coesivo.....	51
Figura 58 - Dimensões e geometria do provetes de estudo.....	53
Figura 59 - Gráfico tensão-deslocamento do adesivo Araldite® AV138 [96]	55
Figura 60 – Equipamento para realização dos ensaios de impacto [94]	58
Figura 61 - Curva P- δ do adesivo XNR6852	59
Figura 62 - Comparação dos resultados obtidos para o adesivo XNR6852	59
Figura 63 - Curva P- δ do adesivo AV138.....	60
Figura 64 - Comparação dos resultados obtidos para o adesivo AV138	61
Figura 65 – Curva P- δ do adesivo RTV106	61
Figura 66 – Comparação dos resultados obtidos para o adesivo RTV106.....	62
Figura 67 - Curva P- δ do adesivo DP8005.....	62
Figura 68 - Comparação dos resultados obtidos para o adesivo DP8005	63
Figura 69 – Propagação de tensões para o adesivo AV138	64
Figura 70 - Dimensões e geometria do provetes de ensaio	65
Figura 71 - Distribuição de tensões arrancamento em função do x/L_0 para o adesivo 7752.....	68
Figura 72 - Distribuição de tensões corte em função do L_0 para o adesivo 7752.....	68
Figura 73 - Distribuição de tensões arrancamento em função do x/L_0 para o adesivo AV138.....	69
Figura 74 - Distribuição de tensões corte em função do x/L_0 para o adesivo AV138	70
Figura 75 - Distribuição de tensões arrancamento em função do x/L_0 para o adesivo XNR6852	70
Figura 76 - Distribuição de tensões corte em função do x/L_0 para o adesivo XNR6852	71
Figura 77 – Carga máxima para diferentes valores de rigidez elástica para o adesivo 7752	73
Figura 78 - Carga máxima para diferentes valores de rigidez elástica para o adesivo AV138.....	73
Figura 79 - Carga máxima para diferentes valores de rigidez elástica para o adesivo XNR6852	74
Figura 80 - Comparação entre os diferentes modos de carregamento para o adesivo 7752	74
Figura 81 - Comparação entre os diferentes modos de carregamento para o adesivo AV138.....	75
Figura 82 – Comparação entre os diferentes modos de carregamento para o adesivo XNR6852.....	75
Figura 83 - Comparação das diferentes leis para o adesivo 7752	76

Figura 84 - Comparação das diferentes leis para o adesivo AV138.....	77
Figura 85 – Comparação das diferentes leis para o adesivo XNR6852.....	77
Figura 86 – Comparação dos vários critérios de iniciação de dano para o adesivo 7752	79
Figura 87 - Comparação dos vários critérios de iniciação de dano para o adesivo AV138.....	79
Figura 88 - Comparação dos vários critérios de iniciação de dano para o adesivo XNR6852	80
Figura 89 – Comparação entre os vários parâmetros BK para Lo de 12,5 para o adesivo 7752	81
Figura 90 - Comparação entre os varios parâmetros BK para o adesivo 7752.....	82
Figura 91 - Comparação entre os varios parâmetros PW para Lo de 12,5 para o adesivo 7752.....	82
Figura 92 - Comparação entre os varios parâmetros PW para o adesivo 7752	83
Figura 93 - Comparação entre os varios parâmetros BK para Lo de 12,5 para o adesivo AV138	83
Figura 94 - Comparação entre os varios parâmetros BK para o adesivo AV138	84
Figura 95 - Comparação entre os varios parâmetros PW para Lo de 12,5 para o adesivo AV138	84
Figura 96 - Comparação entre os varios parâmetros PW para o adesivo AV138	85
Figura 97 - Comparação entre os varios parâmetros BK para Lo de 12,5 para o adesivo XNR6852	85
Figura 98 - Comparação entre os varios parâmetros BK para o adesivo XNR6852	86
Figura 99 - Comparação entre os varios parâmetros PW para Lo de 12,5 para o adesivo XNR6852	86
Figura 100 - Comparação entre os varios parâmetros PW para o adesivo XNR6852.....	87

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução dos adesivos [3]	6
Tabela 2 – Propriedades Aço DIN 55 Si7 [94]	53
Tabela 3 - Propriedades mecânicas do adesivo XNR6852 [95].....	54
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [97, 98]	55
Tabela 5 – Propriedades mecânicas adesivo RTV106 [99]	56
Tabela 6 – Propriedades mecânicas do adesivo DP8005 [53, 100]	56
Tabela 7 - Propriedades dos adesivos função da velocidade [94].....	57
Tabela 8 - Propriedades das fibras de carbono [103].....	66
Tabela 9 - Propriedades elásticas das fibras de carbono (1- direção das fibras; 2- direção perpendicular a 1 no plano da camada; 3- direção normal à camada) [98]	66
Tabela 10 – Propriedades dos adesivos de estudo [94, 104]	67
Tabela 11 -Variação percentual do E e G para os adesivos 7752, AV138 e XNR6852	72

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Organização da dissertação	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Ligações adesivas	5
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	8
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	9
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	11
2.1.4	Configurações possíveis de junta	15
2.1.5	Adesivos estruturais	17
2.2	Ensaio de juntas adesivas.....	18
2.2.1	Ensaio estáticos	18
2.2.2	Ensaio dinâmicos e de impacto.....	26
2.3	Previsão de resistência de juntas adesivas	28
2.3.1	Previsão para solicitações estáticas	28
2.3.1.1	Mecânica dos meios contínuos.....	28
2.3.1.2	Mecânica da fratura.....	29
2.3.1.3	Modelos de dano coesivo	30
2.3.1.4	Tipos de leis coesivas	31
2.3.1.5	Mecânica do dano.....	32
2.3.1.6	Método dos Elementos Finitos Extendido	33
2.3.2	Previsão para solicitações dinâmicas	35
2.3.2.1	Modelos analíticos	35

2.3.2.1.1	Modelos constitutivos da dependência da taxa de deformação dos adesivos.....	35
2.3.2.1.2	Modelo Voigt-Maxwell.....	35
2.3.2.1.3	Modelo Cowper-Symonds.....	36
2.3.2.1.4	Modelo Johnson-Cook	36
2.3.2.1.5	Modelos de sobretensão	36
2.3.2.1.6	Curvas de fluência e curvas isócronas de tensão-deformação	37
2.4	Comportamento de juntas adesivas ao impacto	37
2.4.1	Avaliação experimental	37
2.4.2	Previsão por métodos numéricos.....	41
3	DESENVOLVIMENTO	49
3.1	Técnica numérica para previsão da resistência	49
3.1.1	Condições da análise numérica	49
3.1.2	Formulação dos Modelos de Dano Coesivo	51
3.1.3	Validação da técnica numérica.....	53
3.1.3.1	Geometria das juntas.....	53
3.1.3.2	Materiais utilizados.....	53
3.1.3.2.1	Aderentes.....	53
3.1.3.2.2	Adesivos	54
3.1.3.2.3	XNR6852.....	54
3.1.3.2.4	Araldite® AV138	54
3.1.3.2.5	RTV106	55
3.1.3.2.6	3M® DP8005.....	56
3.1.3.3	Ensaio de impacto	57
3.1.3.4	Resultados obtidos.....	59
3.1.3.5	Discussão de resultados.....	63
3.2	Estudo numérico	65
3.2.1	Geometria da junta	65
3.2.2	Materiais utilizados	65
3.2.2.1	Aderente	65

3.2.2.2	Adesivos	66
3.2.3	Estudo de tensões	67
3.2.4	Estudo da influência dos parâmetros coesivos na resistência ao impacto	72
3.2.4.1	Rigidez elástica da lei coesiva	72
3.2.4.2	Desacoplamento dos modos de carregamento com lei triangular	74
3.2.4.3	Forma da lei coesiva	76
3.2.4.4	Critério de iniciação de dano	78
3.2.4.5	Critério de propagação de dano	80
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	91
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	95

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As ligações adesivas têm vindo a ter um crescimento importante na indústria. Isto porque estas ligações apresentam vantagens bastantes interessantes em reação às ligações mecânicas. Dentro destas vantagens destacam-se o facto de apresentarem boa resistência, redução de peso em comparação com as mecânicas, distribuição de tensões uniformes, rapidez de fabrico entre outras. No entanto os seus pontos negativos prendem-se ao facto de não ser possível o seu desmontagem e fraca resistência ao arrancamento. Também é bom frisar que o comportamento da ligação é dependente de fatores como o tipo de junta, o adesivo, o comprimento de sobreposição e a espessura da camada adesiva.

Dentro dos vários tipos de configurações de junta, destaca-se a junta de sobreposição simples (JSS). Estas juntas são bastantes usadas devido ao seu fácil fabrico embora a sua resistência não seja muito elevada devido à sua excentricidade das cargas o que provoca o aparecimento de tensões de arrancamento. A resistência das ligações adesivas também está influenciada com o tipo de adesivo aplicado. Estes podem-se dividir em dúcteis, como por exemplo, o 7752 e frágeis, como por exemplo o AV138. Também pode existir um misto destes dois, como por exemplo o XNR6852.

Para a sua aplicação é necessário saber quais as tensões e esforços que estas ligações são capazes de suportar. Para isso é necessário o seu estudo. Um método de estudo é o uso do método Elementos Finitos onde combina os vários critérios. Entre os métodos numéricos existentes, destacam-se os MDC que são uma ferramenta viável para a previsão de resistência de juntas adesivas. Estes métodos combinam critérios de resistência dos materiais para a iniciação do dano e conceitos da mecânica da fratura para a propagação de fendas.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar numericamente juntas adesivas sujeitas a solicitações de impacto, com diferentes comprimentos de sobreposição e colados com 3 adesivos distintos. Estes três adesivos diferentes foram o adesivo 7752, o adesivo AV138 e o adesivo XNR6852.

No trabalho numérico, pretende-se efetuar a previsão da resistência pelo Método de Elementos Finitos, em conjunto com Modelos de Dano Coesivo para a previsão da

resistência ao impacto da junta. Devido à existência de diferentes critérios de modo misto para a previsão do início e propagação do dano, pretende-se fazer um estudo numérico detalhado da influência da utilização dos vários tipos de critérios no resultado final da previsão da resistência. Por fim, também a realização de um estudo da variável de dano associada em função do carregamento para ajudar a explicar o carregamento obtido das juntas adesivas no processo de fratura.

1.3 Organização da dissertação

De modo a ser mais fácil a interpretação e análise desta tese, esta foi dividida nos seguintes capítulos:

O capítulo 1 exibe uma breve contextualização e os objetivos desta dissertação.

O capítulo 2 corresponde à revisão bibliográfica, onde fala da caracterização das juntas adesivas, aplicações comuns das juntas adesivas, esforços e modos de rotura, configurações possíveis de juntas, adesivos estruturais, ensaios estáticos e dinâmicos, previsão para solicitações estáticas e dinâmicas e por fim a avaliação experimental e precisão por métodos numéricos.

O capítulo 3 corresponde ao desenvolvimento onde esta dividida em duas partes principais. A primeira trata-se da técnica numérica para previsão da resistência onde são abordados os temas condições da análise numérica, formulação dos modelos de dano coesivo e validação da técnica numérica. A segunda parte trata-se do estudo numérico onde são abordados a geometria da junta, materiais utilizados e estudo da influência dos parâmetros coesivos na resistência ao impacto.

O capítulo 4 consiste na conclusão desta tese bem como referência a possíveis trabalhos futuros.

Por último, o último capítulo 5 apresenta a bibliográfica usadas ao longo deste trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligações adesivas
- 2.2 Ensaio de juntas adesivas
- 2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas
- 2.4 Comportamento de juntas adesivas ao impacto

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

As ligações adesivas definem-se como ligações onde é aplicado um material (adesivo) na superfície de outro material (aderente ou substrato) de modo a criar uma ligação entre eles capaz de resistir à separação [1]. Existem dois conceitos importantes e quando se fala de ligações adesivas, nomeadamente a interfase e interface (Figura 1). A interfase localiza-se em torno da ligação adesiva na qual os materiais apresentam características físicas e químicas diferentes. Já a interface está contida na interfase e corresponde à área física de contato entre o adesivo e o aderente [2].

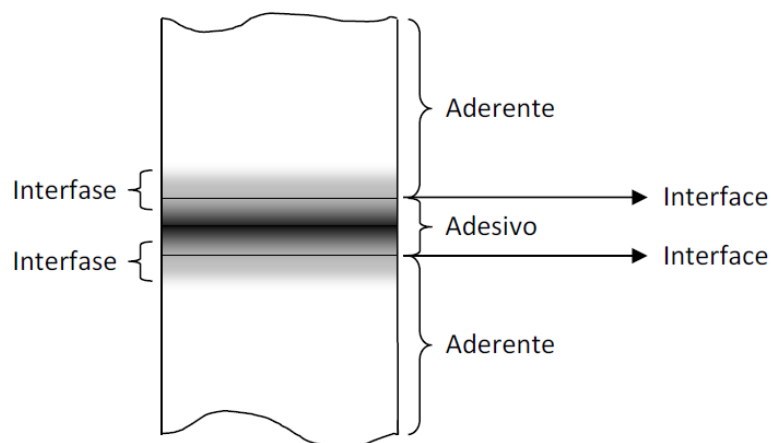


Figura 1 – Localização da interfase e interface [3]

Embora a primeira patente registada a um adesivo tenha ocorrido em 1750 na Inglaterra, relativa a uma cola a partir de peixe, esta técnica já era usada no tempo dos Egípcios. Estes usavam esta técnica onde os adesivos eram à base de gelatina, ovo e resinas extraídas de árvores para construções e armas [4, 5]. A Tabela 1 mostra a evolução dos adesivos.

Devido às exigências tecnológicas sentidas durante a segunda guerra mundial, foram desenvolvidos adesivos sintéticos constituídos por resinas de ureia-formaldeído e resinas fenólicas. Mais tarde, como estes adesivos apresentavam grande fragilidade, a química dos adesivos foi modificada e melhorada. Esta modificação permitiu a compatibilidade com diversos materiais e aumento da resistência mecânica. Atualmente, todos os adesivos são basados em polímeros sintéticos, como os acrílicos, fenólicos, epóxidos, entre outros [4].

Tabela 1 - Evolução dos adesivos [3]

	Adesivo
Até 1910	Colas elaboradas a partir de ossos de animais
	Colas obtidas a partir de peixes
	Adesivos de origem vegetal
1910	Fenol-formaldeído
	Colas de caseira
1920	Éter de celulose
	Resina alquídica
	Borracha <i>cyclized</i> em adesivos
	Policloropreno
	Adesivos derivados da soja
1930	Ureia-formaldeído
	Fitas sensíveis à pressão
	Filmes adesivos de resina fenólica
	Colas de acetato polivinílico para madeira
1940	Fenólicos-nitrilo
	Borracha clorada
	Melamina formaldeído
	Fenólicos-vinílicos
	Acrílicos
	Poliuretanos
1950	Epóxidos
	Cianoacrilatos
	Anaeróbicos
	Ligas epóxido
1960	Poliimida
	<i>Polibenzimidazole</i>
	<i>Polyquinoxaline</i>
1970	Acrílicos (segunda geração)
	Acrílicos sensíveis à pressão
	Poliuretanos estruturais
1980	Resinas termoendurecíveis modificadas
	Epóxidos em dispersão aquosa
	Adesivos de contacto em dispersão aquosa
	Termofusíveis espumados
	Resinas poliácromáticas para elevadas temperaturas
1990	Epóxido modificado com poliuretano
	Poliuretanos com cura por humidade
	Termofusíveis (<i>hot melts</i>) curáveis
	Sistemas de cura por luz e UV

Existem várias teorias sobre o método de adesão embora nenhuma delas consiga justificar na totalidade o comportamento das juntas adesivas.

Uma das primeiras teorias foi a teoria mecânica, que se baseia na penetração do adesivo em cavidades, fendas, irregularidades e poros de modo a causar um “encravamento” mecânico do adesivo no aderente (Figura 2). Para isto, a superfície deve ser limpa através de um ou vários tratamentos superficiais e o adesivo deve molhar convenientemente o substrato e ter uma viscosidade suficientemente baixa para preencher completamente os detalhes da superfície [3].

Topografia	Representação esquemática da superfície	Energia de arrancamento [kJ/m ²]
Chapa de cobre		
Plano		0,66
Plano + dendrites com 0,3 μm		0,67
Plano + dendrites com 0,3 μm + oxidação		0,77
Pirâmides 3 μm (alto-ângulo)		1,0
Pirâmides 2 μm (baixo-ângulo) + dendrites com 0,3 μm		1,3
Pirâmides 2 μm (baixo-ângulo) + dendrites com 0,3 μm + oxidação		1,5
Pirâmides 3 μm (alto-ângulo) + dendrites com 0,3 μm + oxidação		2,4
Chapa de níquel		
Estrutura alveolar		2,3

Figura 2 – Energia de arrancamento em função da rugosidade da superfície [3]

Esta teoria explica vários casos práticos de adesão, no entanto também pode ocorrer uma boa adesão entre superfícies lisas. Na colagem de materiais de baixa energia de superfície a rugosidade pode mesmo prejudicar a resistência da ligação [3].

Outra teoria é a teoria da adsorção, que é a mais aplicada e aceita para explicar os fenômenos interfaciais. Esta explica o mecanismo de adesão através das forças interatômicas e intermoleculares. Para isto é necessário que se estabeleça um íntimo contacto molecular na interface (ocorre quando o adesivo se espalha espontaneamente).

A teoria da difusão requer que os substratos e o adesivo sejam poliméricos, que tenham mobilidade molecular suficiente e sejam miscíveis. Quando estas condições estão criadas, forma-se uma ponte de ligação entre cadeias moleculares dos dois materiais através da interface.

Por fim, a teoria eletrostática requer que exista transferência de elétrons entre duas superfícies. Por exemplo, quando um polímero é colocado em contacto com um metal, na ligação adesiva, ocorrem transferências de elétrons (do eletropositivo para o eletronegativo) e *cria-se* uma dupla camada elétrica. Esta teoria é controversa porque as forças eletrostáticas não são necessariamente a causa da ligação [6].

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

As juntas adesivas têm vindo a ter um grande crescimento devido aos avanços tecnológicos dos adesivos e às suas vantagens face aos meios de ligação alternativos (soldadura e fixação mecânica). A primeira etapa do processo de ligação é a seleção do adesivo, onde os parâmetros com especial importância são resistência mecânica, temperatura de serviço, meio ambiente e o método de aplicação. De seguida, tem-se o projeto da junta, onde o nível de tensões não deve exceder a resistência do adesivo. Logo de seguida segue-se a preparação da superfície, que depende dos substratos a ligar, mas também do adesivo selecionado. Segue-se o fabrico da junta que envolve a aplicação do adesivo e sua cura. Por último tem lugar o controlo do processo, feito através de ensaios destrutivos e não destrutivos.

As principais vantagens das ligações adesivas são [3]:

- ✓ Redução ou mesmo eliminação das concentrações de tensões;
- ✓ Melhoria da resistência à fadiga;
- ✓ Redução do peso da estrutura;
- ✓ Boa resistência à corrosão;
- ✓ Distribuição mais uniforme das tensões;
- ✓ Elevada capacidade de amortecimento de vibrações;
- ✓ Permitem isolamento acústico;
- ✓ Capacidade de ligar substratos sensíveis ao choque;
- ✓ Permitem ligar e vedar em simultâneo;
- ✓ Permitem ligar todas as combinações de materiais;
- ✓ Não danificam o substrato ao contrário das ligações mecânicas.

Algumas desvantagens das ligações adesivas são [3]:

- ✓ Necessita de um tratamento das superfícies;
- ✓ Fraca resistência aos esforços de arrancamento e de clivagem;
- ✓ O processo de endurecimento pode demorar bastante tempo;
- ✓ Difícil desmontagem ou mesmo impossível;
- ✓ Fraca resistência à propagação de fendas de alguns adesivos;
- ✓ Pode ser necessário temperatura e pressão para a cura;
- ✓ Resistência e durabilidade limitada em condições extremas de serviço, nomeadamente de temperatura;
- ✓ Pode necessitar de ferramentas especiais para garantir o alinhamento dos substratos e o posicionamento.

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

As ligações adesivas são usadas em vários setores industriais, como por exemplo: aeronáutico, naval, automóvel, construção civil, mobiliário, indústria do calçado, entre outros.

Na indústria aeronáutica (Figura 3) estas ligações são bastante usadas, pois ajudam a reduzir o peso e conseqüentemente permitem reduzir o consumo de combustível (redução de emissões de CO₂), bem como uma melhoria na aerodinâmica, isto porque permitem melhorar o acabamento superficial da fuselagem. Apesar de apresentarem vantagens quando comparadas com a grande parte de meios de fixação mecânica existentes, é necessária especial atenção durante a fabricação de estruturas aeroespaciais, pois não existem meios de inspeção de qualidade capazes de avaliar o estado do adesivo [7].



Figura 3 – Adesivo empregue num componente de avião [8]

Tal como na indústria aeronáutica, na naval (Figura 4) existem características exigidas que têm de ser respeitadas, tais como a resistência à humidade, temperatura, boa durabilidade e carga. Os esforços que resultam normalmente nesta indústria são de flexão, corte e torção [9].



Figura 4 – Aplicação de adesivo num barco [10]

Na indústria automóvel (Figura 5) começou-se por usar as ligações adesivas na colagem dos para-brisas devido à capacidade de funcionar também como selante, e atualmente alargou-se às ligações da estrutura do automóvel, o que permite otimizar a rigidez à torção e tornar o veículo mais seguro e leve [11].

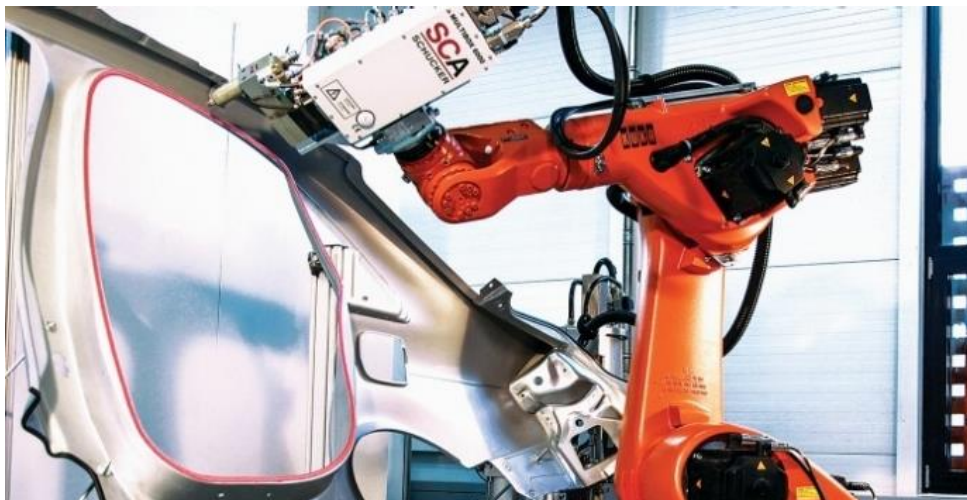


Figura 5 - Adesivos estruturais na indústria automóvel [12]

No setor da construção civil, os adesivos são aplicados para isolamentos térmicos, para fixação de granitos ou outras pedras, rodapés e mobiliário [1]. Graças à sua capacidade selante, também são usados em caixilharias [2].

Por fim, sem se dar por isso, está-se rodeado de objetos que incorporam adesivos. O calçado é um bom exemplo disso, pois na maioria dos casos as indústrias de calçado usam adesivos para unir as solas. Dependendo do tipo de calçado, são necessários diferentes tipos de adesivos com características específicas. Por exemplo, o calçado do dia a dia não requer adesivos de elevada performance; já o calçado de desporto é

bastante exigente pois é necessário um peso reduzido e resistência a altos níveis de impacto e flexão [13].

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

As ligações adesivas podem estar sujeitas a vários tipos de esforços, como por exemplo:

- ✓ Tração;
- ✓ Compressão;
- ✓ Corte;
- ✓ Clivagem;
- ✓ Arrancamento.

Esforços de tração – ocorrem quando surgem forças que 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 que são, portanto, as zonas críticas da junta e mais sujeitas ao início de dano (Figura 6).

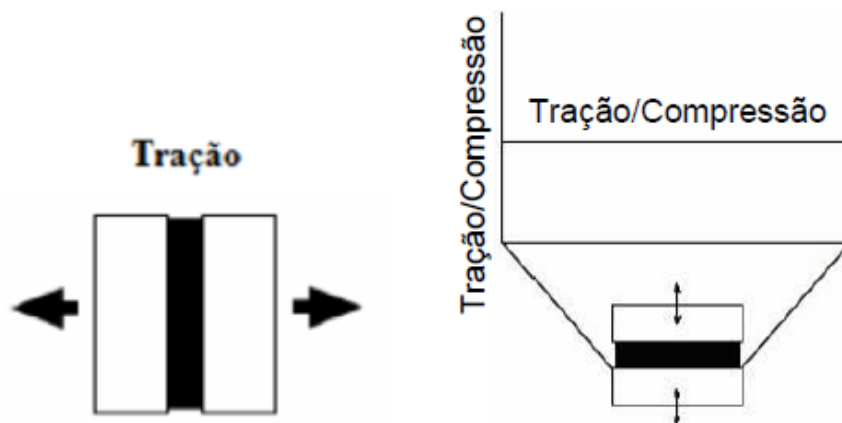


Figura 6 – Carregamento à tração em juntas adesivas [14, 15]

Esforços de compressão – este tipo de esforço é idêntico ao esforço de tração e apenas muda o sentido da força, já que a direção é a mesma. Um adesivo à compressão dificilmente rompe e em compressão pura praticamente não necessita de adesivo (Figura 7).

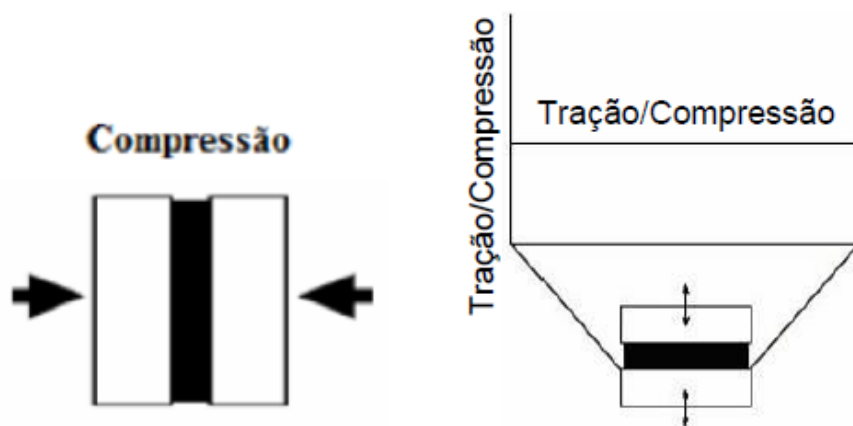


Figura 7 – Carregamento à compressão em juntas adesivas [14, 15]

Esforços de corte – resultam de forças que atuam no plano do adesivo e que tentam separar o adesivo. Através da Figura 8 verifica-se que os adesivos são geralmente mais resistentes quando solicitados a esforços de corte. Também se pode ver que a tensão mais elevada ocorre na extremidade da sobreposição enquanto no centro a tensão tem um valor inferior, pelo que contribui menos para a resistência da junta (Figura 8).

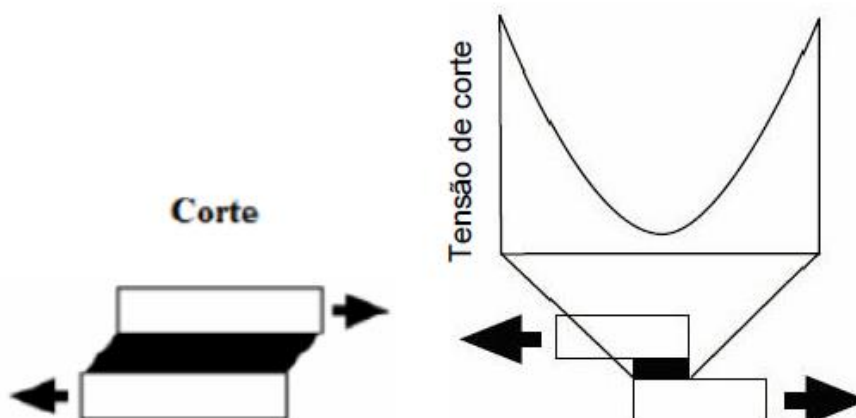


Figura 8 – Carregamento ao corte em juntas adesivas [14, 15]

Esforços de clivagem – definem-se como o tipo de esforço que surge quando forças aplicadas numa extremidade da junta atuam de modo a separar os substratos um do outro. Este tipo de esforço ocorre em substratos rígidos. Estas juntas oferecem menos resistência do que as juntas carregadas em corte, porque apenas uma pequena área da junta está a ser solicitada (Figura 9).

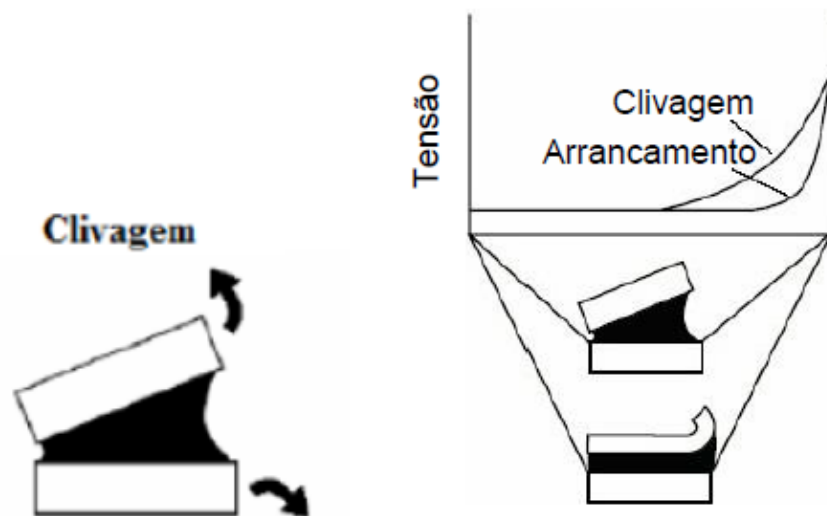


Figura 9 – Carregamento em clivagem nas juntas adesivas [14, 15]

Esforços de arrancamento – este tipo de esforço é idêntico ao de clivagem, mas aplica-se no caso de um ou ambos os substratos serem flexíveis. Como no caso anterior, estas juntas oferecem menos resistência do que as juntas carregadas em corte, porque apenas uma pequena área da junta está a ser solicitada (Figura 10).

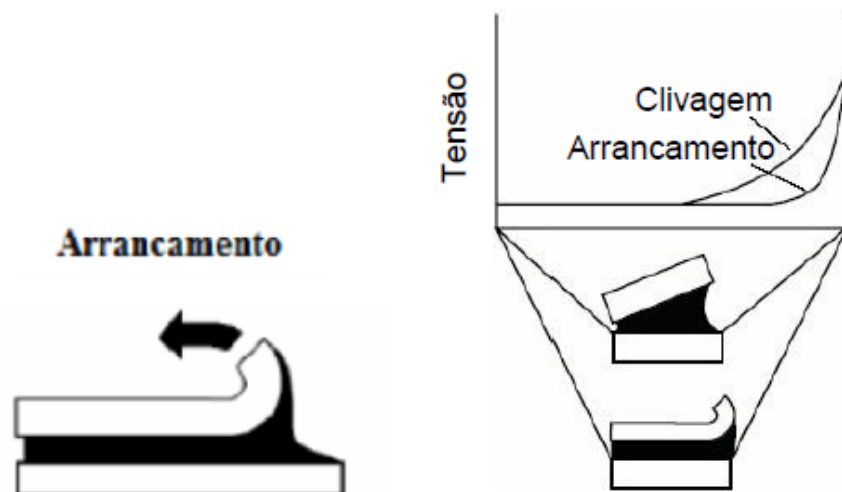


Figura 10 – Carregamento ao arrancamento nas juntas adesivas [14, 15]

Visto que as tensões de clivagem e de arrancamento se concentram em zonas mais localizadas, normalmente numa das extremidades da ligação, estes esforços devem ser evitados, e utilizar-se configurações em que predominam, preferencialmente, os esforços de corte.

Modos de rotura

Existem diferentes modos de rotura possíveis em juntas adesivas: rotura coesiva, rotura adesiva, rotura do aderente ou rotura mista.

A rotura adesiva (Figura 11) ocorre na interface entre o substrato e o adesivo. Após a rotura, a superfície de um dos substratos não apresenta adesivo. Este facto deve-se geralmente a uma má preparação das superfícies.



Figura 11 – Rotura adesiva [3]

A rotura coesiva (Figura 12) ocorre no interior do adesivo, ou seja, ocorre quando os substratos e a ligação entre o adesivo e o substrato são mais fortes do que a resistência interna do próprio adesivo. Neste caso, ambas as superfícies dos substratos estão cobertas de adesivo.

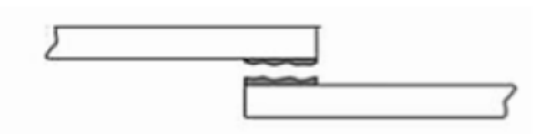


Figura 12 – Rotura coesiva [3]

A rotura coesiva no aderente (Figura 13) é o modo de rotura preferencial, pois é utilizada a totalidade da resistência dos materiais constituintes da junta.

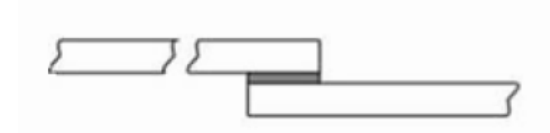


Figura 13 – Rotura pelo aderente [3]

Por vezes a rotura ocorre por uma combinação de rotura adesiva e rotura coesiva, caso em que se designa por rotura mista (Figura 14). Pode dever-se, neste caso, a uma má limpeza de uma dada região das superfícies a ligar ou até mesmo do próprio adesivo.



Figura 14 – Rotura mista [3]

2.1.4 Configurações possíveis de junta

As juntas adesivas apresentam um número número de configurações e deve-se escolher a que melhor desempenhar a função pretendida. As mais comuns são apresentadas na Figura 15.

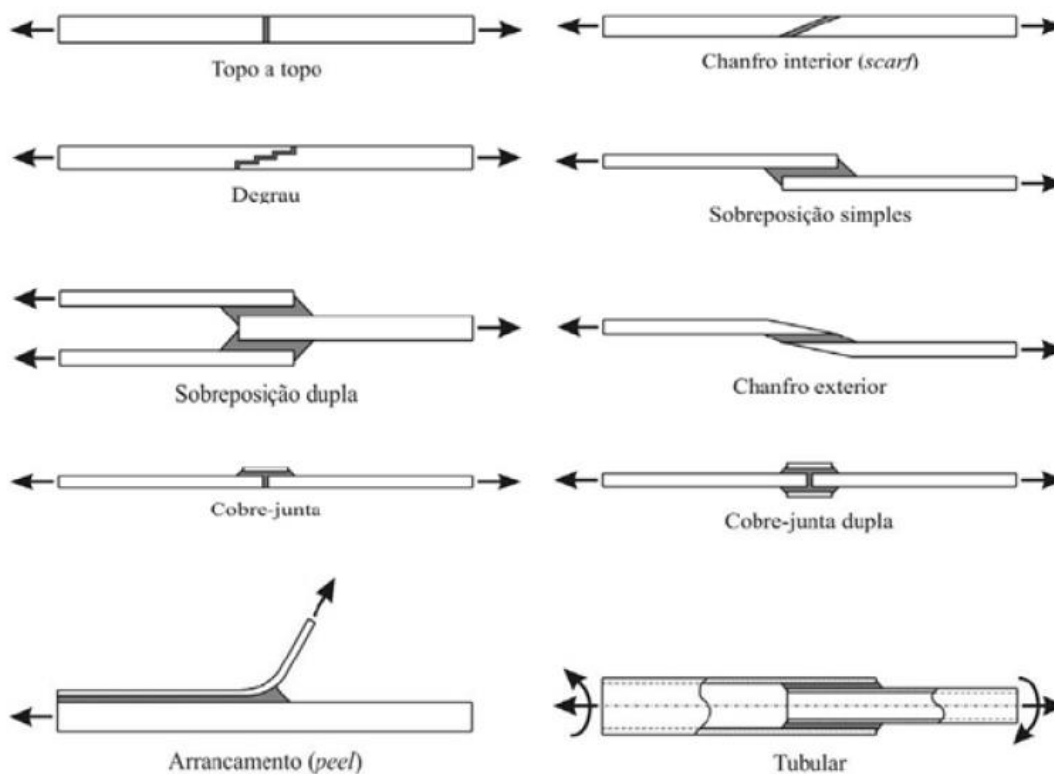


Figura 15 – Configurações de juntas adesivas [14]

As **juntas topo a topo**, apesar de serem as mais simples de fabricar, não apresentam os melhores resultados. Isto ocorre porque existem elevadas concentrações de tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da ligação. Este tipo de configuração de junta não resiste à flexão porque o adesivo fica sujeito a clivagem/arrancamento. A utilização de uma cobre-junta dupla elimina este inconveniente.

As **juntas de chanfro interior** apresentam uma geometria semelhante às juntas topo a topo, porém, a área de união entre os substratos é maior devido ao declive existente. Este declive faz com que a resistência da junta adesiva aumente, devido à criação de tensões de corte que são mais favoráveis para o adesivo, impedindo que esteja sob um carregamento puro de tração.

As **juntas em degrau** são semelhantes às juntas de chanfro inferior, embora as rampas sejam substituídas por um conjunto de degraus, cujo objetivo é também aumentar a área com adesivo e garantir que a junta não esteja submetida unicamente a um

carregamento puro de tração. Contudo, a criação destes degraus faz aumentar os custos de fabricação.

As **juntas de sobreposição simples (JSS)** são as mais utilizadas na indústria pois são de fácil fabrico e o adesivo é solicitado maioritariamente ao corte. No entanto, surge o efeito de flexão que não é benéfico. Para contrariar este efeito podem-se usar as juntas de sobreposição dupla (JSD) onde os efeitos de flexão são consideravelmente menores. Todavia, o seu fabrico é mais demorado e pode não ser possível usar este tipo de configuração de junta.

As **juntas de sobreposição dupla (JSD)** são constituídas por três substratos, e o seu principal objetivo é contornar o problema de flexão nas JSS. Este aumento de área colada faz aumentar a resistência da junta, o que faz melhorar o seu desempenho à flexão. No entanto, é necessário mais tempo de fabrico o que por vezes torna inexecutável a sua fabricação.

As **juntas com chanfros exteriores** foram desenvolvidas para reduzir os picos de tensão que ocorrem na extremidade dos aderentes das juntas (Figura 16). Contudo, o tempo de fabrico é maior e existe uma maior dificuldade em maquinar o chanfro.

As **juntas cobre-junta** e as **juntas cobre-junta dupla** são usadas quando não é possível usar juntas de sobreposição. Quando se espera que existam esforços de flexão a cobre junta dupla é mais indicada, à semelhana das juntas de sobreposição simples e dupla.

As **juntas de arrancamento** definem-se pela combinação de um substrato flexível ou fino com outro é rígido ou espesso. Neste tipo de caso o mais usual é que o adesivo esteja sujeito a esforços normais numa zona bastante concentrada do adesivo, o que provoca uma solitação de arrancamento.

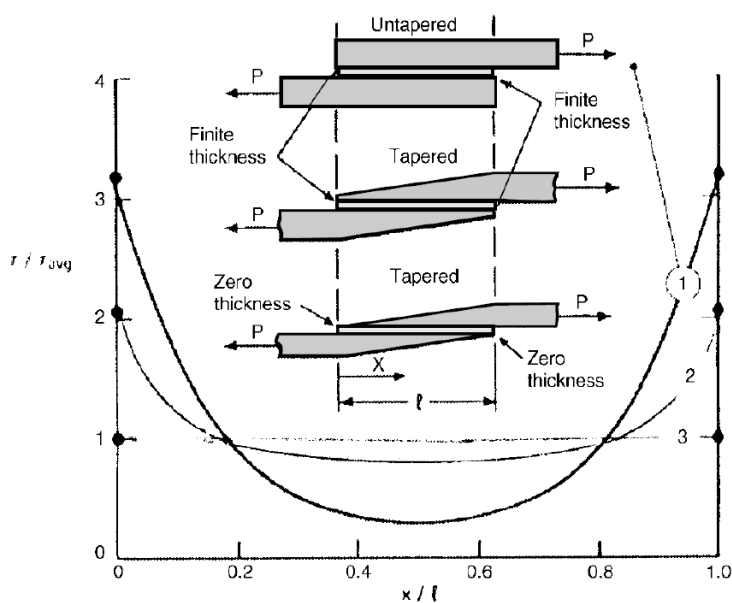


Figura 16 - Efeito do chanfro na distribuição de tensões de corte [2]

As **juntas tubulares** possibilitam a união de tubos com ou sem chanfros. Assim sendo, o diâmetro dos tubos tem de ser diferente para que um possa encaixar no outro. Caso não exista um perfeito alinhamento podem surgir tensões de arrancamento. Para combater este problema podem-se usar chanfros para garantir o alinhamento. Assim sendo, a camada adesiva irá maioritariamente sofrer esforços de corte ou de torção.

2.1.5 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais são normalmente usados em aplicações permanentes de alta resistência. Estes devem garantir uma elevada rigidez, resistência à tração e uma flexibilidade suficiente para resistir às forças que vão estar sujeitos. É espectável que apresentem uma resistência ao corte superior a 6 MPa [16].

Estes adesivos podem ser divididos em cinco famílias distintas:

- ✓ Acrílicos;
- ✓ Epóxidos;
- ✓ Fenólicos;
- ✓ Poliimidias;
- ✓ Poliuretanos.

Acrílicos

Dentro do grupo dos adesivos acrílicos incluem-se os adesivos anaeróbicos, os cianoacrilatos e os acrílicos modificados. Os anaeróbicos têm uma grande aplicação em peças roscadas, rolamentos, peças estriadas e de geometria cilíndrica. Curam geralmente à temperatura ambiente e na ausência de oxigénio. A sua resistência pode ser idêntica da dos epóxidos. Os adesivos cianoacrilatos são conhecidos pela sua capacidade de colagem quase instantânea. A sua cura é influenciada pela humidade e espessura. Apresentam uma resistência ao corte excelente, mas baixa resistência ao arrancamento. Nos acrílicos modificados faz-se a incorporação de polimetilmetacrilato e borracha de nitrilo. Isto faz com que apresente uma elevada resistência à humidade, boa resistência ao arrancamento e ao impacto. Podem ser aplicados a uma grande variedade de materiais como por exemplo, entre os plásticos e metais.

Epóxidos

Os adesivos epóxidos caracterizam-se por serem os adesivos mais versáteis, e podem ser usados em quase todos os materiais da indústria de construção mecânica. Estes podem ser modificados, o que melhora assim algumas propriedades. Dá-se como exemplos, os epóxidos modificados com borracha (aumento da tenacidade e a resistência ao arrancamento), epóxidos-fenólicos (melhoria da resistência a altas temperaturas), epóxido-nylon (elevada resistência ao corte e ao arrancamento), epóxido-polisulfitos (excelente flexibilidade e resistência química) e os epóxidos-vinilos (boa resistência ao impacto e ao arrancamento).

Fenólicos

Os adesivos fenólicos são usados principalmente para colagem de madeiras. Devido à sua boa resistência ao calor e estabilidade dimensional, têm sido usados na indústria automóvel em calços de travão. Apesar disto, a ligação de metal/madeira é frágil, o que incentiva ao aparecimento dos fenólicos modificados. Os adesivos nitrilo-fenólicos resistem ao corte até 35 MPa e apresentam excelentes propriedades ao arrancamento e à fadiga. Os vinilo-fenólicos, apresentam muito sucesso para metais pois possuem excelente resistência ao corte, arrancamento, impacto e agentes químicos. Por fim, os adesivos neopreno-fenólicos possuem temperaturas de trabalho entre os -55 e 95°C [6].

Poliimidas

Os adesivos de poliimida ou poliaromáticos de alta temperatura são os adesivos que apresentam melhores capacidades de utilização a altas temperaturas. Estes adesivos possuem uma temperatura de transição vítrea pelo menos 100°C acima da dos epóxidos o que lhes permite serem usados a temperaturas muito mais altas. No entanto, o seu custo elevado e a necessidade de temperaturas elevadas para a cura fazem com que sejam mais limitados de se usar.

Poliuretanos

Os adesivos poliuretanos são adesivos que possuem uma resistência ao corte e à tração inferiores aos outros adesivos. Contudo, apresentam características como a boa resistência ao arrancamento (resistência ao corte da ordem dos 20 MPa), às vibrações, ao choque, bom comportamento a baixas temperaturas e boa adesão em superfícies metálicas. O seu tempo de cura à temperatura ambiente pode durar várias horas.

2.2 Ensaio de juntas adesivas

O uso de adesivos estruturais como método de ligação permanente implica a existência de metodologias de ensaio que permitam obter dados relativos sobre o comportamento a longo prazo. Desta forma, torna-se necessário conhecer o comportamento das juntas quando sujeitas aos diferentes tipos de carregamento (tração, compressão, corte arrancamento ou clivagem). Os ensaios podem ser divididos em duas categorias distintas: os estáticos e os dinâmicos. Os ensaios estáticos decorrem em condições quase-estáticas, a baixa velocidade e baixa taxa de deformação. Já os ensaios dinâmicos são utilizados para taxas de deformação mais elevadas.

2.2.1 Ensaio estáticos

Ensaio quase-estáticos

A geometria mais usada para realizar ensaios de tração, de acordo com a norma EN ISO 527-2 [17], está representada na Figura 17. As amostras da Figura 17 (a) são utilizadas

para adesivos rígidos como é o caso dos epóxidos, onde os deslocamentos são relativamente pequenos, enquanto a representada na Figura 17 (b) é mais adequada para adesivos flexíveis, como por exemplo, o poliuretano, onde os alongamentos podem exceder vários milímetros [18].

Durante um ensaio de tração é possível registar a carga e o deslocamento para a posterior geração de um gráfico tensão-deslocamento. A partir deste gráfico é possível determinar o módulo de Young e, caso seja medida a deformação na direção transversal, também é possível determinar o coeficiente de Poisson.

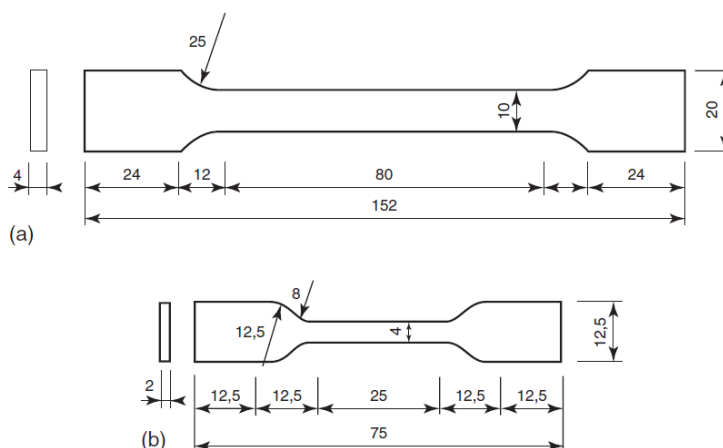


Figura 17 – Dimensões do provete para adesivos rígidos (a) e flexíveis (b) segundo a norma EN ISO 527-2 [18]

Os ensaios à compressão não são tão utilizados pelo facto de se poder obter as propriedades através de ensaios de tração. A Figura 18 mostra a geometria para ensaios de compressão segundo a norma ASTM D 695 [19].

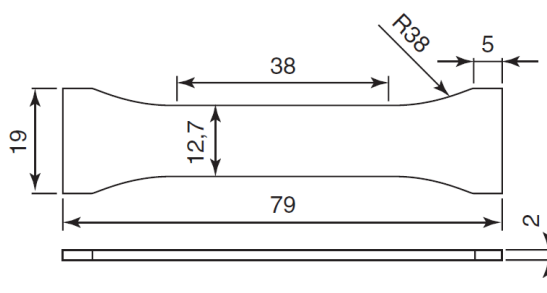


Figura 18 – Dimensões do provete para ensaios à compressão segundo a norma ASTM D 695 [19]

O ensaio de losipescu (Figura 19) envolve o fabrico de provetes em forma de viga com entalhe, e pode ser aplicado a adesivos de acordo com a norma ASTM D5379 [20]. Os provetes podem ser do tipo maciço de adesivo ou em junta adesiva, embora estes últimos sejam pouco eficazes para adesivos pouco rígidos. O teste consiste num carregado assimétrico em compressão de tal forma que o momento seja zero no centro da amostra. O movimento do ensaio gera tensões de corte que podem ser obtidas

através da leitura da carga aplicada e da deformação. As tensões de corte também podem ser obtidas através do módulo de corte.

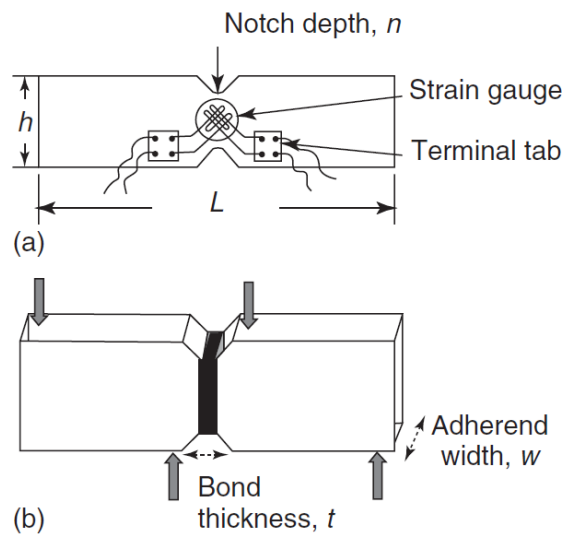


Figura 19 – Teste de losipescu [18]

No ensaio Arcan (Figura 20) podem ser utilizados provetes maciços ou de juntas adesivas e com um formato de “borboleta”. Contrariamente ao ensaio de losipescu, os provetes apresentam bom desempenho mesmo para adesivos dúcteis. O dispositivo permite que as amostras sejam testadas em modo I, modo II e modo misto. Para testar em modo I puro o ângulo da solicitação a exercer sobre o provete, relativamente à orientação da Figura 20, é de 90° , para o modo II puro o ângulo é de 0° e para o modo misto o ângulo deve estar compreendido entre estes dois valores limite. Como este teste é muito versátil, este tem sido muito usado para avaliar as propriedades de plásticos, compósitos e adesivos.

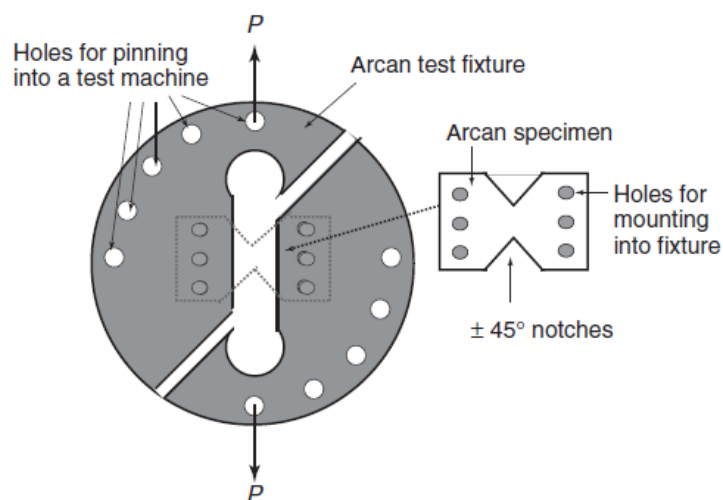


Figura 20 – Teste Arcan [18]

O ensaio de tração em juntas topo a topo (Figura 21), segundo a norma ASTM D 897 [21], é dos mais comuns para determinar as propriedades para esse tipo de solicitações. Este ensaio consiste na ligação adesiva de dois cilindros metálicos que estão sujeitos a esforços de tração. Para isto, é necessário que a carga seja aplicada perpendicularmente à linha de adesão e que as superfícies de interface e colagem dos aderentes sejam paralelas.

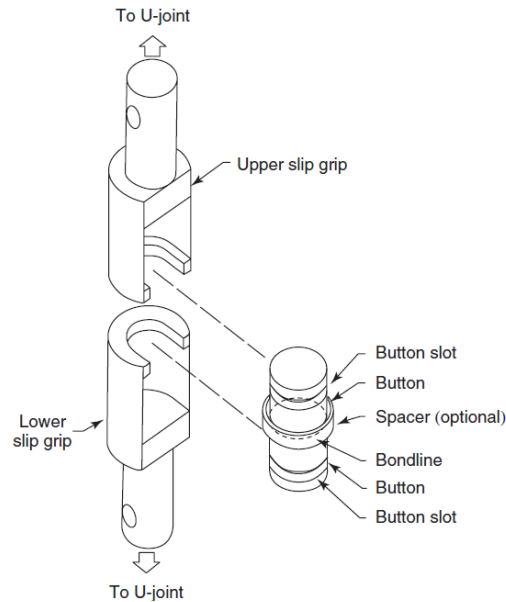


Figura 21 – Ensaio de tração em juntas topo a topo [18]

A tensão de corte e o módulo de corte podem ser determinados através de tubos ou cilindros aos quais é aplicado momento torsor. No caso dos tubos existe o ensaio *Napkin Ring* (Figura 22), em que é criada uma camada adesiva na periferia de ambos os tubos, de igual diâmetro, enquanto no caso do ensaio com cilindro, o provete consiste numa simples junta topo a topo. Em ambos os casos, é indispensável a perfeita concentricidade dos aderentes. Os resultados são obtidos através do registo do momento e do ângulo de torção.

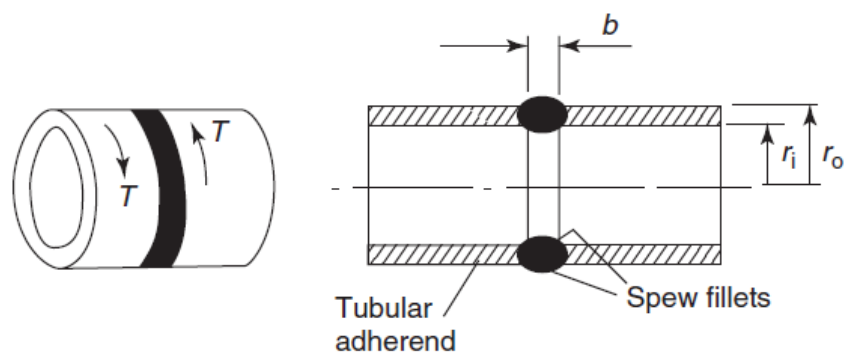


Figura 22 - Geometria do teste *Napkin Ring* [18]

O ensaio *Thick-Adherend Shear Test* (TAST), detalhado nas normas ISO 11003-2 [22] e ASTM D 3983 [23], é dos mais populares para determinação das propriedades ao corte, uma vez que tanto o fabrico dos provetes como das ferramentas de ensaio é relativamente simples. A geometria do provete é essencial pois, quanto menos o comprimento de ligação e maior a espessura dos substratos, maior será a probabilidade de arrancamento, o que pode levar a uma análise incorreta do comportamento do adesivo. A utilização de um suporte rígido elimina a flexão do dispositivo, o que diminui a tensão de arrancamento da junta (Figura 23).

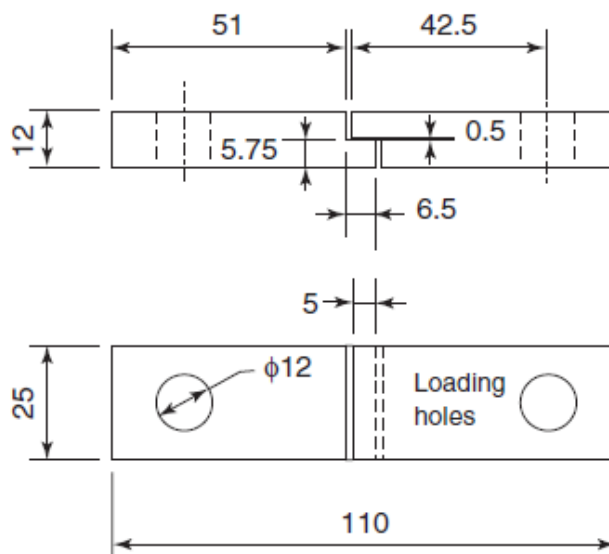


Figura 23 - Dimensões do ensaio TAST segundo a norma ISO 110003-2 [18]

Os dois ensaios de arrancamento mais comuns são o ensaio de arrancamento de junta em T (ASTM D 1876 [24]) e o ensaio de arrancamento a 180° (ASTM D 903 [25]). No primeiro caso, ambos os aderentes são flexíveis num equipamento de tração, enquanto no segundo caso um aderente é flexível e o outro é rígido (Figura 24).

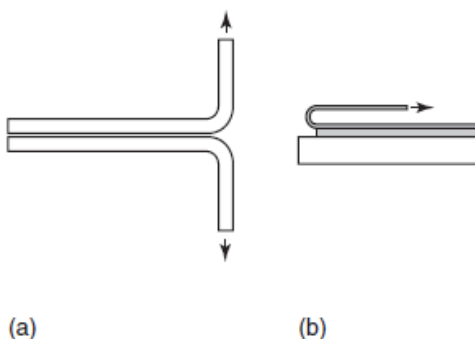


Figura 24 - a) Ensaio arrancamento de junta em T b) Ensaio de arrancamento a 180° [18]

Testes de fratura

Na mecânica da fratura, a previsão de resistência das juntas é geralmente feita através de uma análise energética. Existem vários testes para determinação da taxa crítica de libertação de energia de deformação à tração (G_{IC}) e ao corte (G_{IIC}).

Para determinar G_{IC} , os provetes ensaiados são sujeitos a tensões normais. A partir da propagação da fenda consegue-se estimar este valor. Os ensaios mais utilizados para obtenção de G_{IC} são o *Double-Cantilever Beam* (DCB) e o *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB).

O ensaio *Double-Cantilever Beam* (DCB) é o mais prático para determinar a resistência à fratura em modo I (G_{IC}). O provete é constituído por duas vigas de igual comprimento e uma espessura constante de adesivo entre as vigas, mas não na totalidade. Porém, a propagação da fenda pode ser instável, o que pode provocar alguma dificuldade para determinar o valor de G_{IC} . Na norma ASTM D 3433 [26] são indicadas as dimensões dos provetes bem como a forma de determinar a altura mínima dos substratos para evitar deformação plástica.

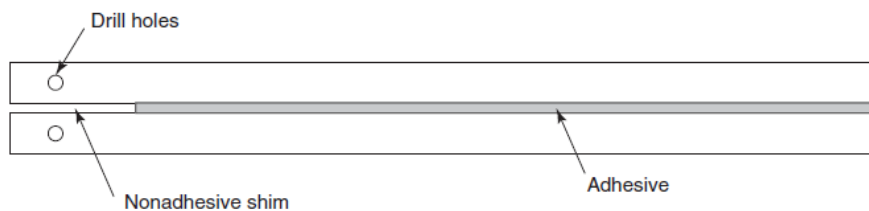


Figura 25 – Provede de ensaio DCB [18]

Outro ensaio é o *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB), foi inicialmente desenvolvido com o principal objetivo de estudar o crescimento da fenda sem que seja necessária a sua medição. No entanto, os substratos TDCB são mais complexos de fabricar do que os DCB, especialmente quando o substrato utilizado é fabricado em material compósito (Figura 26). A geometria apresentada nos provetes TDCB é igualmente simétrica como a dos provetes DCB, mas ao longo do seu comprimento existe o aumento de altura $h(a)$.

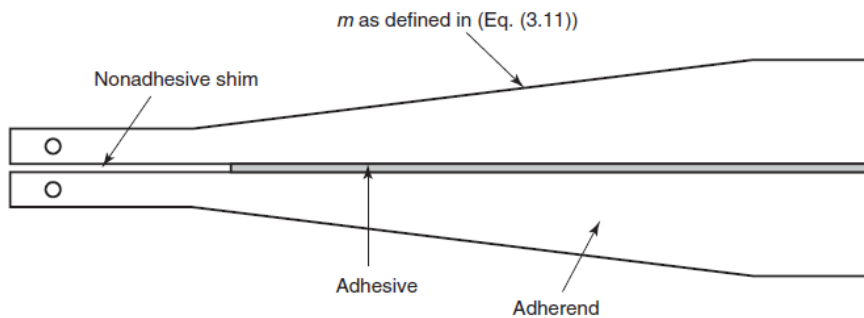


Figura 26 – Provede de ensaio TDCB [18]

Segundo a norma ASTM D3433, o ensaio TDCB é uma alternativa ao ensaio com provetes DCB para a determinação de G_{IC} , independentemente do comprimento da fenda. A determinação de G_{IIC} tem interesse pois é o principal modo de carregamento. Para tal, os ensaios mais utilizados para caracterização dos adesivos quando solicitados em modo II são o *End-Notched Flexure* (ENF), o *End-Loaded Split* (ELS) e o *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF).

O ensaio *End-Notched Flexure* (ENF) consiste num simples carregamento de flexão em três pontos onde o carregamento é aplicado a meio do provete (Figura 27). Num dos lados do substrato é criada uma pré-fenda. No entanto, o crescimento da fenda pode ser instável, o que depende da ductilidade do adesivo e do comprimento inicial de fenda. Uma das dificuldades deste ensaio é o facto de a carga aplicada tender a fechar a fenda, o que dificulta assim a visualização da sua propagação. Este ensaio é o mais conhecido para determinar G_{IIC} .

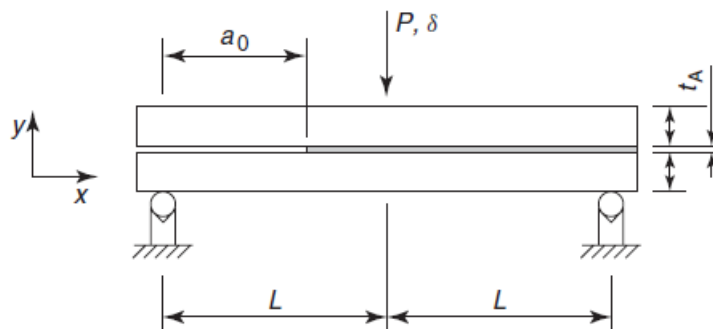


Figura 27 - Dimensões no ensaio ENF [18]

No ensaio *End-Loaded Split* (ELS) o provete é encastrado do lado oposto à pré-fenda (Figura 28). Os aderentes neste ensaio são solicitados na vertical e é medida a força aplicada, o deslocamento e o crescimento da fenda ao longo o carregamento. As principais desvantagens deste ensaio estão relacionadas com a obtenção de G_{IIC} , pois existem grandes deslocamentos presentes neste ensaio, e também ainda às condições de aperto uma vez que é necessário garantir o encastramento perfeito.

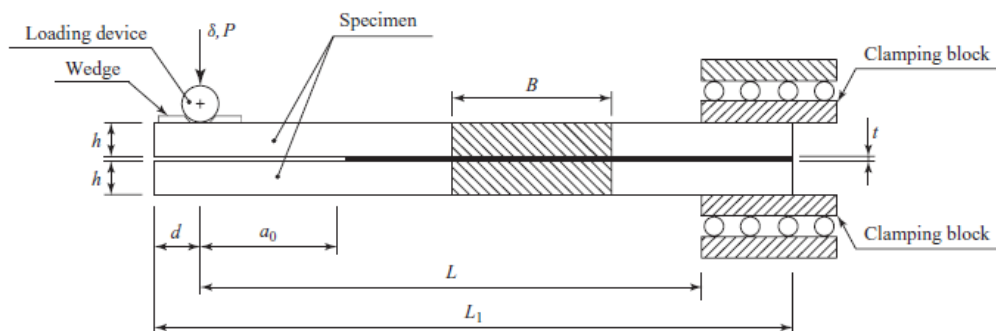


Figura 28 – Representação do ensaio ELS [18]

O ensaio *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF) tem algumas semelhanças com o ensaio ENF. A diferença está na aplicação da força. Enquanto no ensaio ENF a força é aplicada no meio do provete, no ensaio 4ENF a força é transferida a uma barra composta por duas vigas, o que faz com que o provete fique carregado em quatro pontos (Figura 29). Isto faz com que o momento fletor entre os dois pontos de carregamento seja constante. As desvantagens deste ensaio estão relacionadas com o facto de este apresentar problemas relacionados com o atrito na zona de pré-fenda devido ao tipo de carregamento, com a maior complexidade do *setup* de ensaio e com a não existência de procedimento não normalizado.

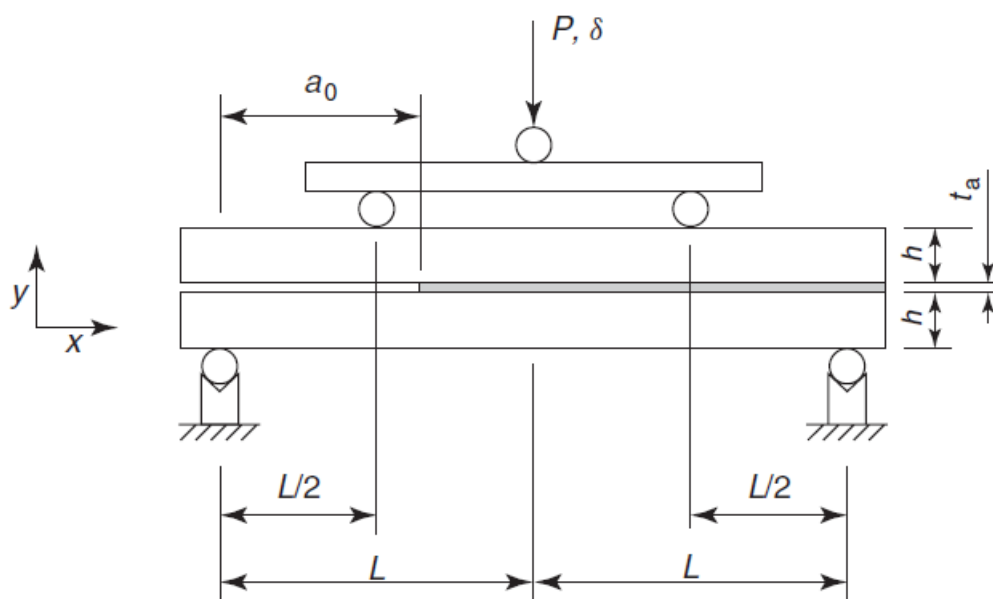


Figura 29 – Representação do ensaio 4ENF [18]

Para além do interesse de conhecer o comportamento das juntas em modo I e modo II, existe também o interesse em conhecer o seu comportamento em modo misto. Alguns dos ensaios mais utilizados em modo misto são: *Fixed-Ratio Mixed Mode* (FRMM), *Single-Leg Bending* (SLB), *Cracked-Lap Shear* (CLS).

O ensaio *Fixed-Ratio Mixed Mode* (FRMM) requer um acessório similar ao usado no ELS. A carga é aplicada no aderente superior, o que deixa o inferior livre. Este ensaio consegue promover valores de modo misto intermédios.

O ensaio *Single-Leg Bending* (SLB) também é usado para avaliar a taxa crítica de libertação de energia (G_c) em modo misto (Figura 30). Este ensaio tem como base o ensaio ENF só que, ao contrário deste, o substrato inferior tem menor comprimento, o que faz com que uma das extremidades do provete fique apoiada apenas no braço superior. Esta alteração origina a existência de uma solitação combinada com componentes de modo I e modo II. Este ensaio está regulamentado pela norma ASTM 2004.

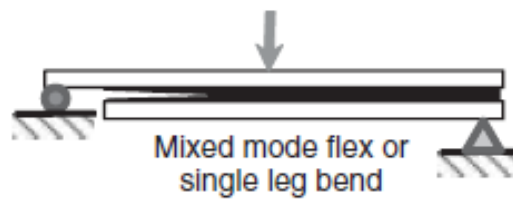


Figura 30 – Representação do ensaio SLB [18]

O ensaio *Cracked Lap Shear* (CLS) consiste numa solicitação à tração onde o provete apresenta diferentes comprimentos nos dois substratos (Figura 31). As cargas aplicadas a cada substrato do provete produzem em ambos abertura (modo I) e corte (modo II).



Figura 31 – Representação do ensaio CLS [18]

2.2.2 Ensaios dinâmicos e de impacto

Através dos ensaios dinâmicos é possível determinar a resistência dinâmica ou ao impacto de materiais e estruturas, bem como as propriedades dos respetivos materiais a uma dada velocidade de solicitação. Os ensaios de impacto mais usados são: Charpy, impacto no bloco ASTM e de Hopkinson.

Os ensaios Charpy (Figura 32) são especificados para materiais metálicos e termoplásticos. O ensaio consiste em libertar um pêndulo a uma altura fixa, o que fratura a amostra. A energia perdida pelo pendulo é determinada pela altura máxima que este atinge apos o impacto. O provete contém um entalhe, onde a batida ocorre do lado oposto deste entalhe.



Figura 32 - Ensaio de Charpy [27]

Outro ensaio é o teste de impacto segundo a norma ASTM D950 para a resistência ao impacto das ligações adesivas (Figura 33). Trata-se de um ensaio entre dois blocos onde é lançado um pêndulo sobre a junta adesiva. Daí regista-se a energia absorvida pela junta adesiva, que posteriormente é dividida pela área da camada adesiva para retirar a energia de fratura (G_C). Uma das desvantagens deste ensaio prende-se ao facto de ser necessário garantir o paralelismo das superfícies dos blocos o que, devido à sua dificuldade, pode inviabilizar a repetibilidade dos resultados obtidos.

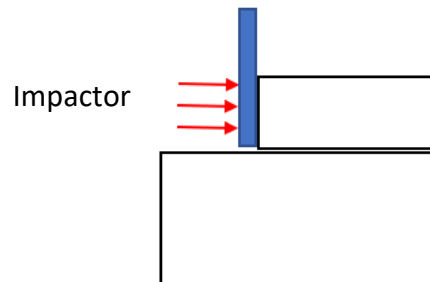


Figura 33 - Ensaio de impacto em bloco (elaboração própria)

Por fim a técnica da barra de Hopkinson, em particular, a *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) inicialmente foi usada somente para testes de compressão em metais, mas hoje em dia com algumas configurações diferentes podem ser usadas para testes de tração, torção e flexão em diferentes tipos de materiais. A barra de Hopkinson é constituída por três barras cilíndricas. A primeira barra, barra de projétil, colide com uma segunda barra, o que faz criar o impacto. Esta segunda barra, barra incidente, transmite a pressão ao provete. Por sua vez, a terceira barra (barra de transmissão) recebe parte da pressão que foi aplicada no provete (Figura 18). Este ensaio é capaz de desenvolver taxas de deformação muito elevadas devido a ser usado ar comprimido para lançar o projétil. Deste ensaio é possível reconstruir a curva tensão-deformação dinâmica do material testado.

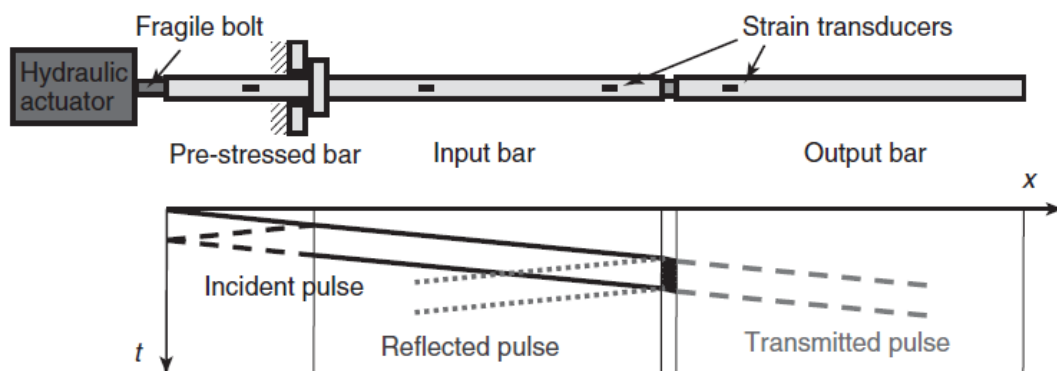


Figura 34 – Representação da técnica Hopkinson [18]

2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

2.3.1 Previsão para solicitações estáticas

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, o que possibilita 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 atrás. 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 [28], que parte do princípio 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 [29] é então a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, e esta foi inicialmente aplicada por Harris and Adams [30], 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 [31]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços. Um deles é 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, o Método de Elementos Finitos Estendido (MEFX), que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

2.3.1.1 *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 [28], 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. [32] 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 do comprimento de sobreposição (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 [33]. 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 and Adams [30], 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.

2.3.1.2 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, estes se mantêm com dimensões inferiores às críticas, embora se possam 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 [34]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [35] 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 [36]. 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 [37] e por Rice [38] 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_{Ic} [39], 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 sollicitação.

2.3.1.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com os estudos de Barenblatt [40] e Dugdale [41], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas. Estes estudos deram 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 [42].

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [43]. 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 35), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [44], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [45].

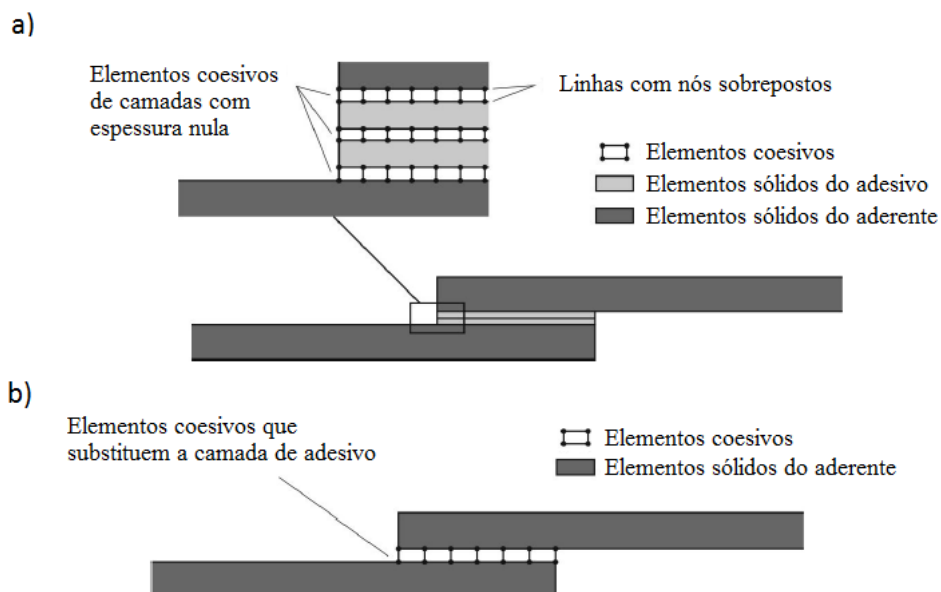


Figura 35 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [46])

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, o que permite 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 [47]. 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 [48].

2.3.1.4 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [49], triangular [50], exponencial [51], polinomial [52] e trapezoidal [45]. 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 [53].

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 [54]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [55] 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 36).

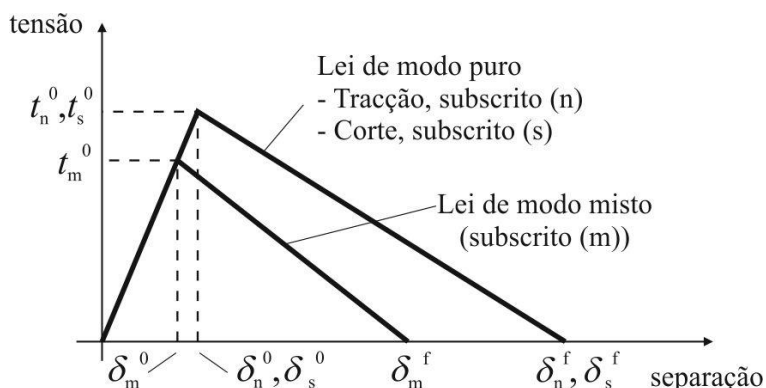


Figura 36 - Modelo coesivo triangular [53, 54]

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 [56].

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 [57] e modo II [58].

2.3.1.5 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 and Ladevèze [59] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. [60] 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 [42].

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 [61]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em

função da carga para simulações estáticas [62] ou do número de ciclos para análises de fadiga [63, 64]. 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 [65].

Hua et al. [66] 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. [67] 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.

2.3.1.6 Método dos 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 $P_{máx}$, 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 descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [68]. Belytschko and Black [69], 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 [70]. 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 [71].

Campilho et al. [72] utilizaram 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 37). 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.

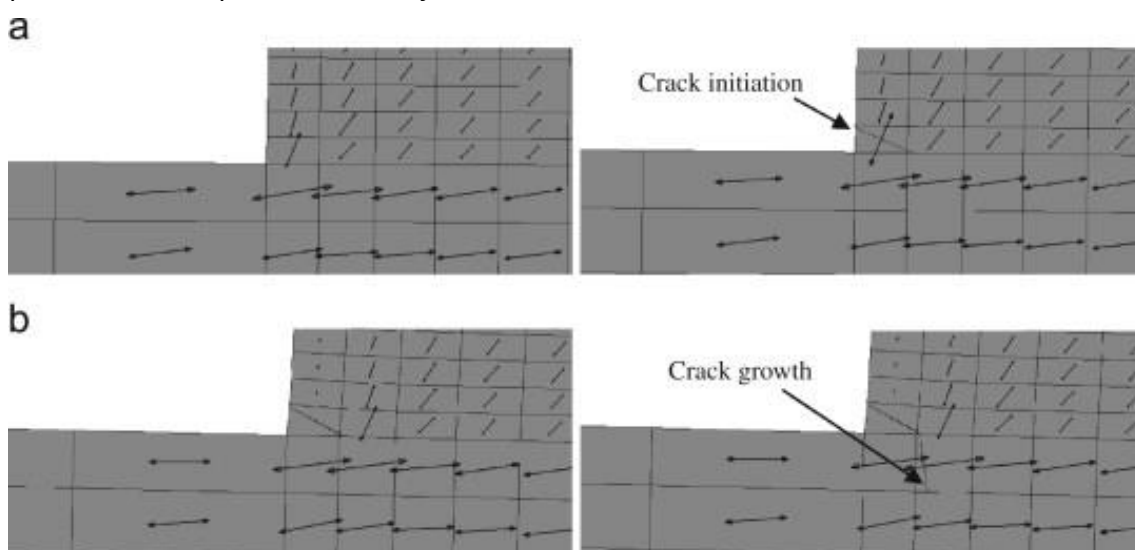


Figura 37 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [88]

2.3.2 Previsão para solicitações dinâmicas

2.3.2.1 Modelos analíticos

Neste próximo capítulo serão descritos os diferentes modelos para modelação de juntas adesivas para solicitações dinâmicas ou de impacto.

2.3.2.1.1 Modelos constitutivos da dependência da taxa de deformação dos adesivos

Para projetar com sucesso juntas que sejam capazes de suportar as solicitações dinâmicas ou de impacto é necessário conhecer o seu comportamento. Para isto, é necessário que os projetistas tenham em sua posse métodos que permitam conhecer a resistência das juntas sob impacto. Os fatores que controlam a resistência ao impacto de estruturas adesivas são as propriedades do substrato, do adesivo, da geometria da junta e do tipo de carga. Estes parâmetros são os que influenciam a resistência de uma junta adesiva sob impacto.

O uso de um modelo numérico para a modelação de juntas adesivas permite o cálculo das tensões e deformações presentes no adesivo e substratos. Os adesivos podem apresentar comportamento viscoelástico e viscoplástico, que podem ser representados usando um modelo constitutivo [73].

2.3.2.1.2 Modelo Voigt-Maxwell

No modelo viscoelástico de Voigt-Maxwell (descrito em detalhe no trabalho de Mainardi and Spada [74]), a deformação elástica de um adesivo em função do tempo utiliza a soma de tensões em elementos do tipo mola e amortecedor para modelar o comportamento do adesivo (Figura 38). A complexidade deste modelo pode ser aumentada pela adição de elementos adicionais [73].

Sato e Ikegami [75] fizeram um estudo sobre as propriedades viscoelásticas de um adesivo estrutural e modelaram a tensão dinâmica de juntas adesivas sujeitas a impacto usando o modelo de Voigt-Maxwell de três e cinco elementos. Estes autores concluíram que o modelo de cinco elementos era capaz de descrever o comportamento do adesivo e capaz de replicar a geometria de forma mais precisa.

Khan et al. [76] usaram uma abordagem semelhante a partir de uma combinação de molas lineares e não lineares para modelar o comportamento uniaxial compressivo de um polímero em condições operacionais quase estáticas e dinâmicas. Este modelo apresentou uma boa concordância com as observações experimentais numa alargada gama de taxa de deformação e temperatura. Mais tarde, Iwamoto et al. [77], aplicando o mesmo tipo de modelagem, com o modelo de quatro elementos, conseguiram expressar com sucesso as características básicas dos adesivos estruturais das curvas experimentais, como os estágios elástico linear, amortecimento de deformação e endurecimento de deformação.

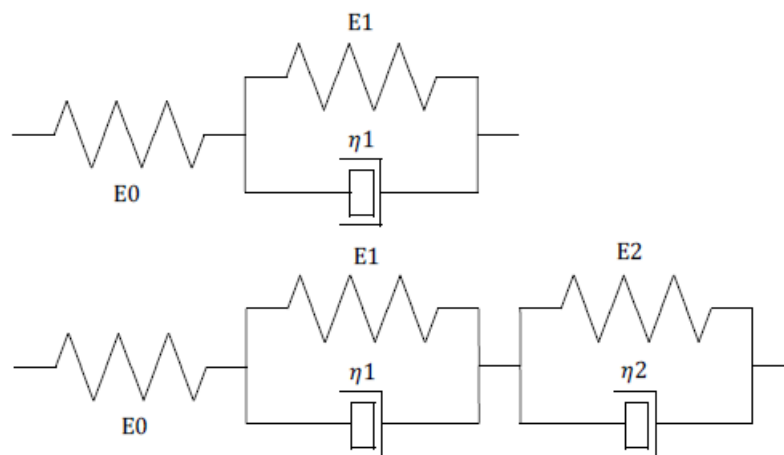


Figura 38 - Exemplo de um modelo viscoelástico de Voigt [73]

2.3.2.1.3 Modelo Cowper-Symonds

Este modelo [78] é usado para simular a dependência da taxa de deformação dos materiais. Pode ser visto como um modelo simples elasto-plástico com endurecimento sujeito a uma taxa de deformação variável.

Goglio et al. [79], através deste modelo, concluíram que embora com precisões razoáveis para altas taxas de deformação, o modelo não era o mais adequado para taxas menores de deformação.

2.3.2.1.4 Modelo Johnson-Cook

Enquanto os dois modelos anteriores (Voigt-Maxwell e Cowper-Symonds) são de natureza viscoelástica, este modelo é de natureza viscoplástico. Morin et al. [80] e Goglio et al. [79] concluíram que para altas taxas de deformação, este método não é tao preciso quanto o modelo de Cowper-Symonds.

2.3.2.1.5 Modelos de sobretensão

Nos modelos de sobretensão, o efeito de dependência da taxa de deformação é alcançado através do aumento das tensões para além da superfície de cedência com a aplicação da carga, seguida de relaxamento ao longo do tempo até a superfície de cedência.

Kitagawa et al. [81] desenvolvem um modelo para descrever a dependência da taxa de um polipropileno que mostrou ser capaz de modelar as propriedades viscoelásticas de materiais poliméricos, embora com algumas limitações.

Anos mais tarde, Chiu and Jones [82] desenvolveram um modelo constitutivo unificado para uma construção adesiva onde se demonstrou com dados experimentais que o

modelo é capaz de modelar o comportamento dependente da taxa de deformação bem como o relaxamento de fluência e relaxamento de tensões.

Crocombe [83] juntamente com Zgoul [84] aplicaram um modelo de sobretensão para prever o comportamento da taxa de deformação de JSS e de ensaios *Thick Adherent Shear Tests* (TAST). Nas JSS o modelo foi capaz de modelar corretamente a resposta da junta, o que não se verificou nos ensaios TAST.

2.3.2.1.6 Curvas de fluência e curvas isócronas de tensão-deformação

Crocombe [83] estudou modelação e previsão da resistência de juntas dependente da taxa de deformação, em que se consideraram leis de fluência e curvas tensão-deformação isócronas num software. Ele descobriu que as curvas de fluência não eram adequadas para modelar as taxas de deformação crescentes, pois exigem uma quantidade elevada de etapas de tempo para chegar a uma solução exata. No entanto, concluiu-se que uma solução baseada em curvas isócronas tensão-deformação, derivadas de dados experimentais, é eficaz para o material e configuração em estudo.

2.4 Comportamento de juntas adesivas ao impacto

2.4.1 Avaliação experimental

Yokoyama and Shimizu [85] efetuaram ensaios experimentais quase-estáticos num equipamento de tração e dinâmicos através de um ensaio de *Hopkinson* modificado com o objetivo de examinar os efeitos da taxa de carregamento, espessura de camada adesiva e a resistência ao corte dos materiais dos aderentes. Estes ensaios foram realizados com um adesivo de cianoacrilato e substratos de aço e liga de alumínio.

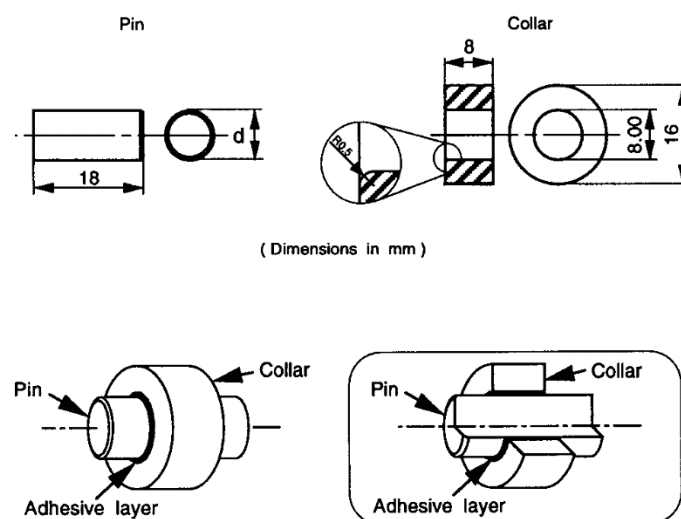


Figura 39 – Forma, dimensões e configuração da amostra do ensaio [85]

Para reduzir/eliminar as concentrações de tensões induzidas nas extremidades da amostra, estas foram ligeiramente arredondadas (Figura 39). Depois de os substratos montados, a cura durou 30 horas à temperatura ambiente.

Através da Figura 40, observa-se que a resistência das juntas adesivas aumenta com o aumento da taxa de carregamento, independente dos materiais utilizados, ainda que com valores inferiores para o substrato de alumínio. Este aumento deve-se ao facto de as características viscoelásticas dinâmicas do adesivo serem muito sensíveis à taxa de deformação.

Também foi possível demonstrar que a espessura da camada adesiva tinha uma grande influência no desempenho, registando o máximo até uma espessura de 25 μm . A diminuição na resistência ao corte nas juntas adesivas para valores superiores a 25 μm , pode ser devido à presença de tensões residuais internas ou a uma maior possibilidade de existir falhas ou defeitos maiores dentro da ligação adesiva.

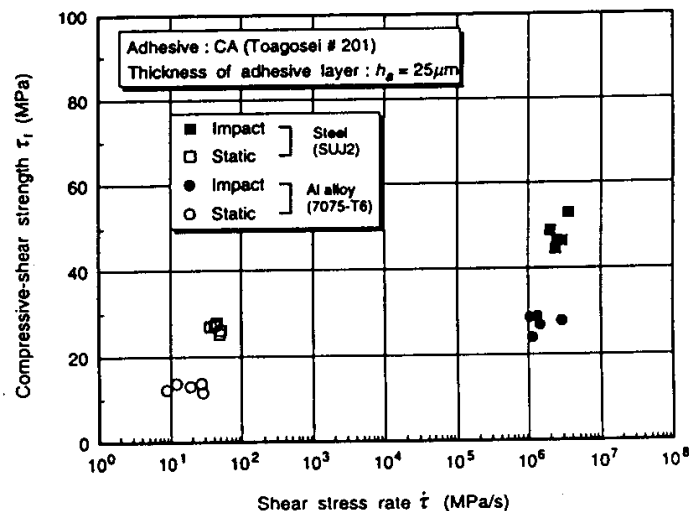


Figura 40 - Efeito da taxa de carga na resistência ao corte [85]

Al-Zubaidy et al. [86] realizaram ensaios de impacto em juntas adesivas de cobre-junta dupla (Figura 41). Estes autores efetuaram ensaios com uma e três camadas de CFRP (fibra de carbono reforçada com polímero) com o adesivo Araldite® 420 em regime quase-estático e dinâmico. Os resultados obtidos nos ensaios dinâmicos foram comparados com os ensaios estáticos para destacar a influência da taxa de carregamento. As dimensões dos provetes são mostradas na Figura 41. O comprimento de L_1 e L_2 pode variar de 10 a 60 mm.

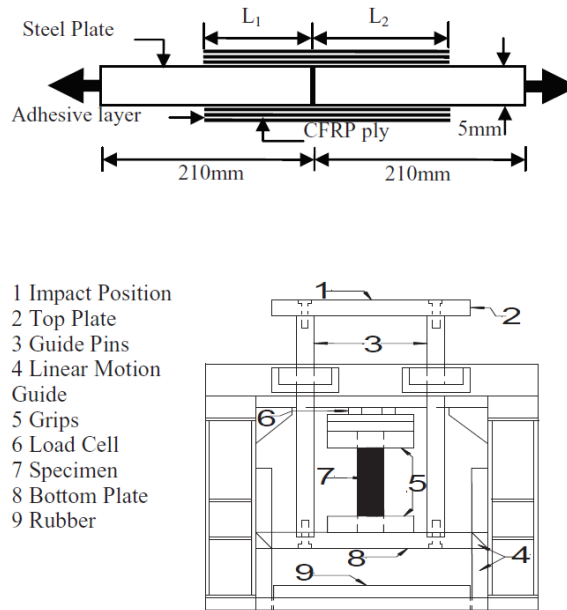


Figura 41 – Dimensões dos provetes no trabalho de Al-Zubaidy et al. [86]

Ao comparar os resultados estáticos com os de impacto (Figura 42), repara-se que existe uma grande influência da velocidade de solitação na resistência atingida. Apesar disso, não foi possível estabelecer uma ligação direta entre a velocidade de ensaio e o comprimento de sobreposição, por não se conseguir obter uma correlação direta entre as duas variáveis.

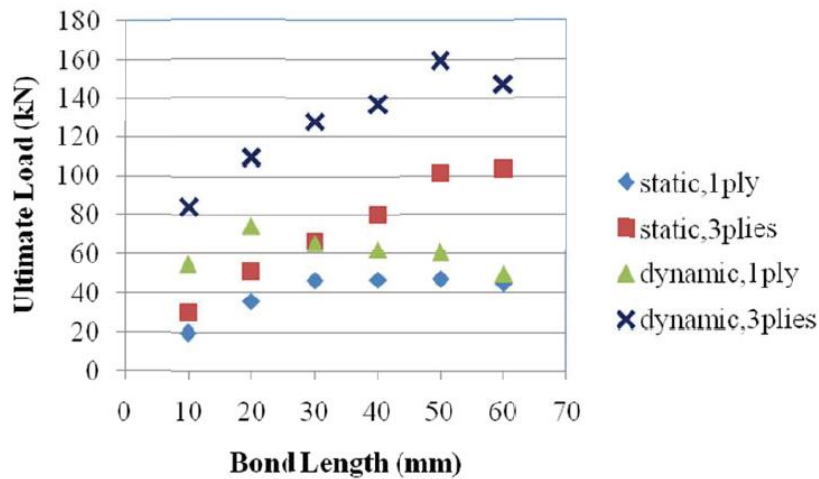


Figura 42 – Comparação do número de camadas de CFRP e tipo de ensaio [86]

Kemiklioglu [87], com o objetivo de comparar as diferenças de comportamento entre adesivos dúcteis e frágeis, ensaiou dois adesivos com resistências semelhantes em condições de teste estático e dinâmico para diferentes energias de impacto (de 5 a 20 J

com intervalos de 5 J). A Figura 43 mostra as dimensões dos provetes utilizados nos ensaios.

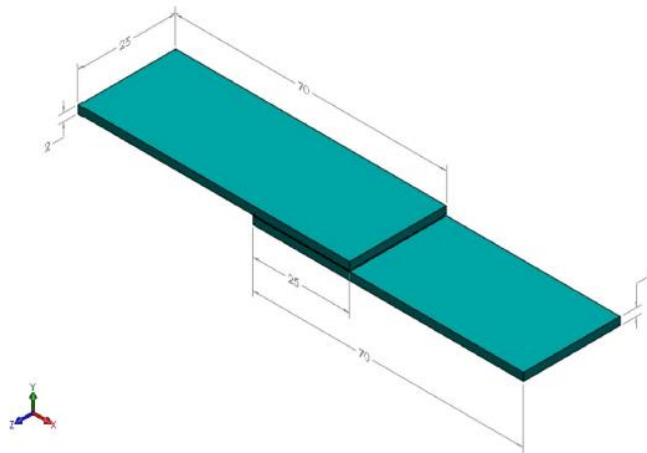


Figura 43 – Dimensões dos provetes para os ensaios de Kemiklioglu [87]

Para os ensaios dinâmicos usou-se a máquina de Charpy (Figura 44 (a)) e para os ensaios quase-estáticos foi utilizada uma máquina Shimadzu AG-100 com uma capacidade de carga de 200 kN (Figura 44(b)).

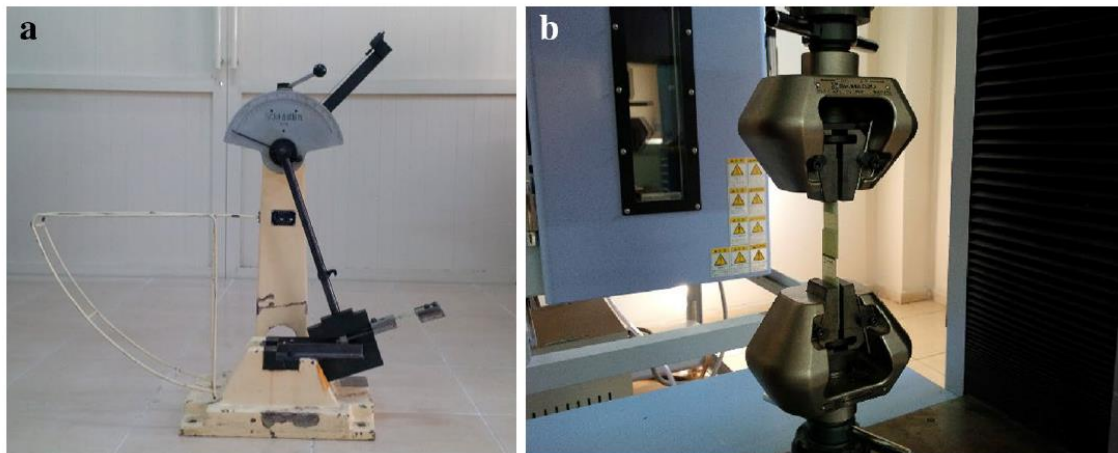


Figura 44 – a) Máquina de Charpy b) Shimadzu AG-100 [87]

Conforme se observa na Figura 45, os ensaios com adesivos dúcteis (Scotch DP460) apresentaram resistência mais elevada nos ensaios de impacto simples e de impacto repetido a 15 J. Pelo contrário, o adesivo frágil (Loctite 9466) apresentou valores mais elevados de impacto repetido de 5 e 10 J. Para ambos os adesivos o resultado de impacto com resistência mais elevada foi nos ensaios de 10 J.

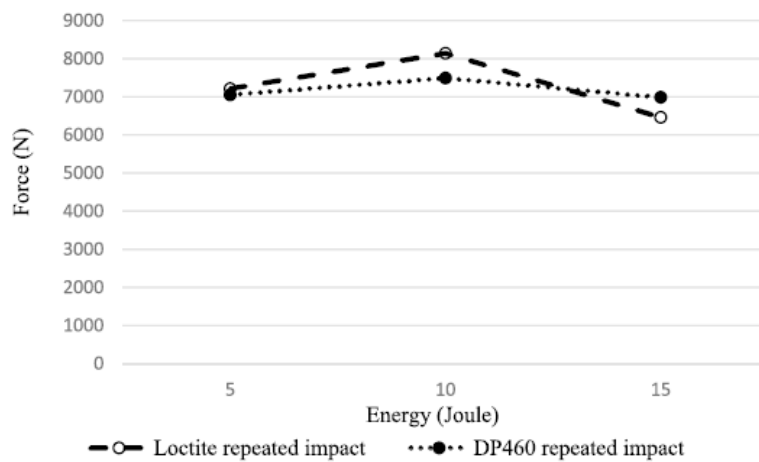


Figura 45 – Comparação dos adesivos Loctite 9466 e Scotch DP460 em ensaio de impacto repetido [87]

2.4.2 Previsão por métodos numéricos

No passado, devido à falta de informação e conhecimento sobre modelos de previsão, no geral, as ligações adesivas eram sobredimensionadas. Com o passar do tempo foram-se desenvolvendo técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência cada vez mais refinadas.

Alguns trabalhos já elaborados nesta área são descritos de seguida. O trabalho de Morin et al. [88] tem como objetivo propor um elemento coesivo tridimensional macroscópico simplificado para a engenharia de colisões. A originalidade baseava-se num novo elemento coesivo capaz de representar um comportamento elasto-viscoplástico, com capacidade de modelar a iniciação e a propagação de fendas no material. Para além do reduzido tempo de cálculo, a grande vantagem está no facto da sua calibração ser simplificada em comparação com os elementos coesivos já existentes.

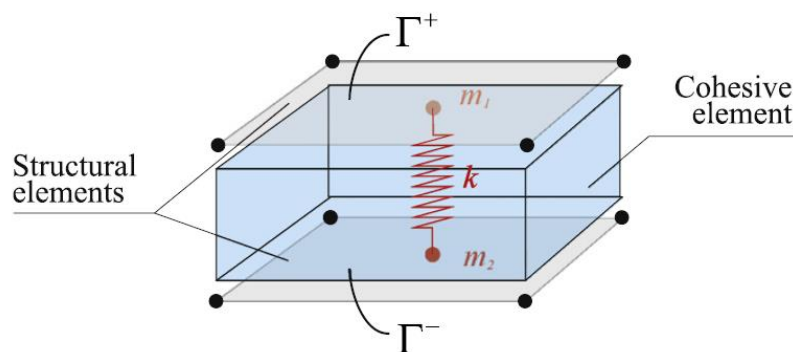


Figura 46 – Representação simplificada do elemento coesivo através de um elemento de mola [88]

A geometria é baseada num elemento desenvolvido na interface entre dois elementos. Estes elementos consistem num hexaedro de 8 nós, que pode ser visto como uma mola generalizada entre dois elementos estruturais opostos (Figura 46). Esta mola discreta é

ligada aos centros da face inferior e superior, cujas malhas entre as duas partes a ligar devem coincidir. Estas malhas podem ser construídas por elementos de casca, elementos sólidos ou por uma combinação de ambos.

Em suma, através do programa Abaqus® foi possível concluir que, para além de reduzir o tempo de computação, este elemento coesivo leva a uma resposta estrutural muito próxima da real. Os elementos coesivos clássicos requerem testes avançados. O elemento desenvolvido, graças à simplicidade de calibração comparado com os elementos coesivos existentes, à simplicidade de implementação e ao reduzido tempo de computação, torna-se mais adequado para a indústria.

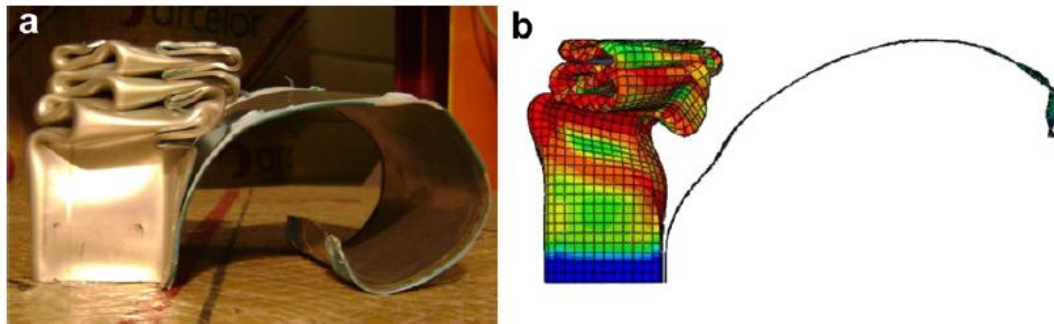


Figura 47 - a) Deformação da chapa experimental; b) Deformação da chapa numérica [88]

Liao et al. [89], através do método de Cowper-Symonds, realizaram um estudo numérico de ondas de propagação de tensão e distribuição de tensões em solicitações de impacto. Para este efeito, realizaram uma modelação em 3D de uma JSS para estudar os efeitos do módulo de Young dos aderentes, da velocidade inicial de impacto, do comprimento de sobreposição e da espessura da camada adesiva.

A Figura 48 mostra um modelo de cálculo do método de elementos finitos (MEF).

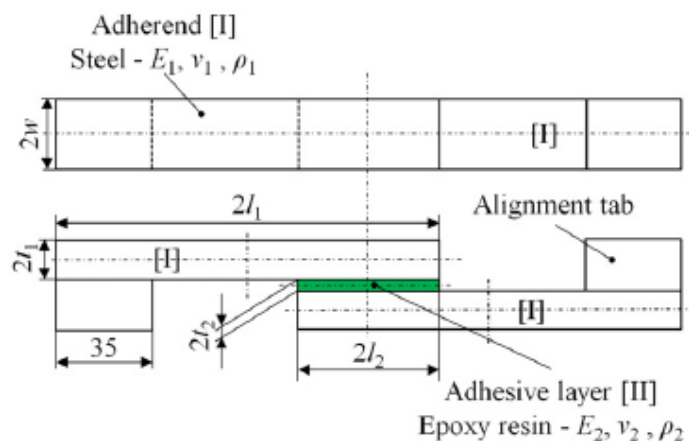


Figura 48 – Representação do modelo MEF e dimensões [89]

Ao comparar os resultados obtidos com os resultados experimentais em condições idênticas, foi possível validar o método utilizado numa junta com resina epóxida. Verificou-se que a rotura do adesivo tem origem pelo centro deste e na direção da largura (junto ao limite da camada adesiva), como se mostra na Figura 49 (a). Por fim observou-se que, à medida que a velocidade inicial converge para zero, a distribuição de tensões apresenta um padrão semelhante aos ensaios estáticos, ainda que com valores mais elevados.

Ao comparar os resultados dos ensaios obtidos numericamente com os experimentais em condições idênticas, verificou-se que existia uma concordância razoável para a resina epóxida utilizada, o que permitiu validar o método para a resina em questão. Verificou-se que a origem da rotura se dá pelo centro do adesivo e na direção da largura na lateral da interface. Também se observou que a tensão máxima principal para cargas de impacto aumenta quando o módulo de Young dos aderentes aumenta, o comprimento de sobreposição do adesivo diminui, a espessura do adesivo diminui e a velocidade de impacto aumenta. No caso das cargas de tração estáticas, a tensão principal máxima aumenta à medida que o módulo de Young dos aderentes diminui, o comprimento de sobreposição do adesivo diminui e a espessura do adesivo aumenta. Por fim, na Figura 49 (b) observa-se ainda que à medida que a velocidade inicial converge para zero, a distribuição de tensões apresenta um padrão semelhante nos ensaios estáticos.

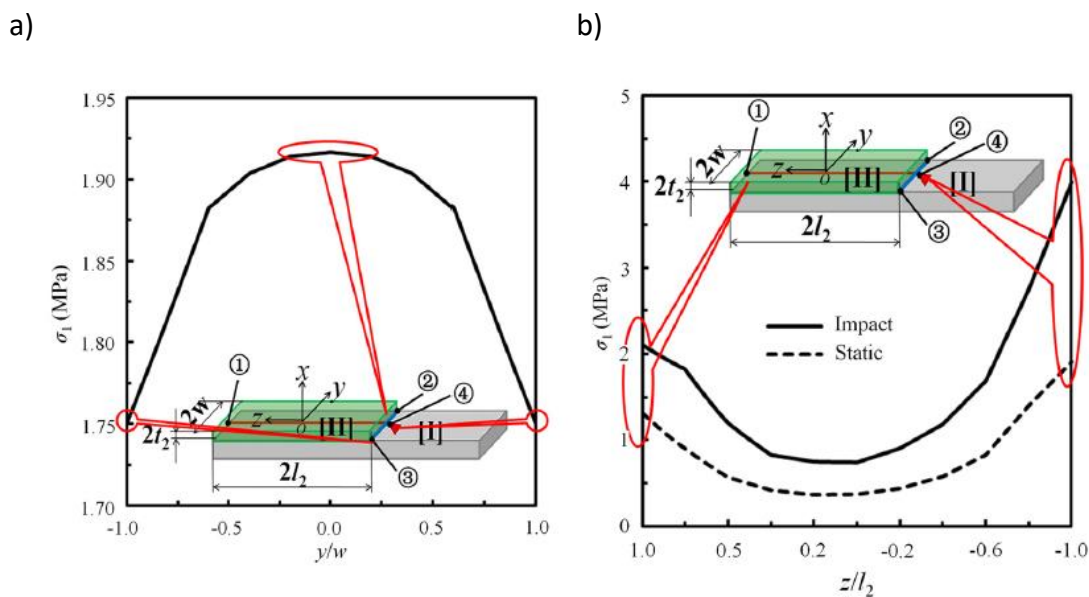


Figura 49 – a) distribuição da tensão principal máxima na interface sob cargas de tração de impacto e b) distribuição da tensão principal máxima na interface sob cargas de tração de impacto [89]

Kihara et al. [90] elaboraram um equipamento experimental capaz de medir a resistência ao corte de camadas adesivas submetidas a cargas de impacto. Os resultados experimentais realizados com o equipamento foram comparados com os resultados calculados a partir do MEF.

O equipamento experimental foi desenvolvido para ensaios de corte por impacto. As dimensões e a forma principal do equipamento experimental são mostradas na Figura 50. Este equipamento é composto por um prisma hexagonal (R) e duas placas retangulares (P). Foram aplicados dois tipos de adesivo, um deles usado para detetar o início da fratura e outro para colagem estrutural. O impacto ocorre quando a haste 0 colide com a haste 1.

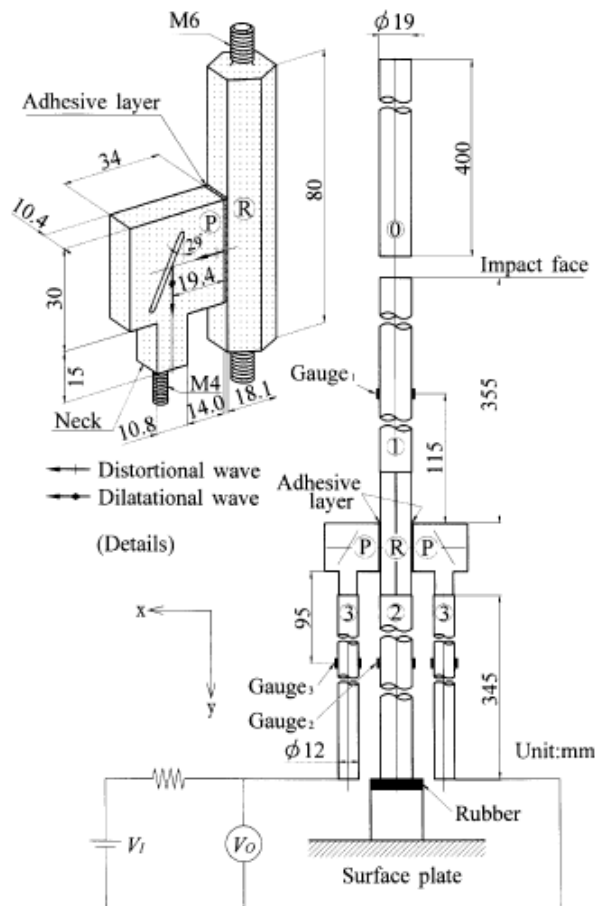


Figura 50 – Representação do equipamento experimental [90]

Ao aplicar uma tensão elevada, a camada adesiva fratura principalmente devido a corte. Para validar este método foi comparada a tensão de corte máxima com a resistência ao corte por impacto, que foi medida através de uma junta topo-a-topo submetida a cargas de impacto de torção. Como estes dois valores são muito próximos (Figura 51), concluiu-se que a resistência ao corte da camada adesiva submetida a cargas de impacto pode ser medida com este equipamento.

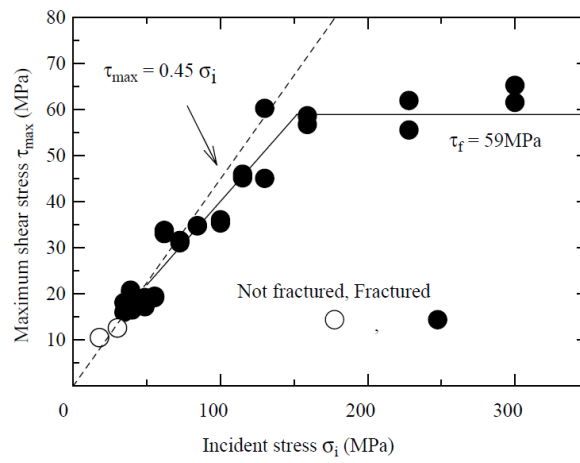


Figura 51 - Relação entre a tensão incidente e o corte máximo medido nos manómetros [90]

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Técnica numérica para previsão da resistência
- 3.2 Estudo numérico

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Técnica numérica para previsão da resistência

Neste trabalho é estudada uma junta de sobreposição simples com modelo de dano coesivo por análise métodos elementos finitos. Ao longo do trabalho numérico são descritos todos os parâmetros utilizados.

3.1.1 Condições da análise numérica

A análise numérica foi suportada pelo *software* Abaqus® através do método de elementos finitos. O modelo consiste num modelo 2D com as dimensões apresentadas no capítulo 3.1.3.1. De modo a simular a massa do equipamento do ensaio experimental (a vermelho na Figura 52) foi adicionada uma secção suplementar no seguimento do aderente superior. A densidade desta secção foi calculada de modo a igualar a massa real.



Figura 52 - Representação do peso

Foram criadas, para cada adesivo em estudo, as suas propriedades de *density*, *elastic* e o método utilizado. Os métodos foram o *quads damage*, *quade damage*, *maxs damage* e *maxe damage*. Os adesivos também foram definidos como *traction separation*. Os materiais foram atribuídos às secções previamente definidas. Como é possível ver na Figura 53, a zona a vermelho corresponde ao adesivo, enquanto tudo o resto é o substrato.



Figura 53 - Atribuição do material

O módulo *step* foi definido como *dynamic, explicit* com um tempo de ensaio de 1 ms. Neste módulo o *history* output foi definido para registar o deslocamento e a força de reação a cada 500 incrementos. De modo a registar a carga a cada instante foi criado um registo da soma das forças de reação na aresta correspondente ao encastramento. Para o registo do deslocamento foi selecionado o vértice inferior entre o aderente e a massa experimental.

No módulo *Load* foi aplicado um encastramento de um dos lados do provete ficando $U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$ (reações lado esquerdo da Figura 54) e do lado oposto no extremo do aderente (reações lado direito da Figura 54) bloqueou-se o deslocamento no eixo Y de modo a reproduzir as condições experimentais do ensaio.



Figura 54 – Representação das condições fronteira

Como se trata de uma simulação numérica representativa de um ensaio experimental de impacto, foi necessário aplicar uma velocidade à massa para igualar a energia que sofreria no ensaio de impacto (Figura 55). Para uma energia de 40 J a velocidade correspondente é de 1750 mm/s.



Figura 55 – Representação da velocidade imposta no programa Abaqus

No módulo *mesh* (Figura 56) foi utilizado um controlo da malha do tipo *sweep* para o adesivo e para o restante modelo foi utilizado do tipo *structured*. Os elementos sólidos para modelar os aderentes são do tipo CPE4R. Já os elementos coesivos utilizados para modelação do adesivo são do tipo COH2D4. Foi criada uma malha refinada onde as dimensões de cada quadrilátero poderiam variar entre 0,2 mm (zonas mais próximas dos pontos críticos) até 3 mm (zonas não tão importantes para o estudo).

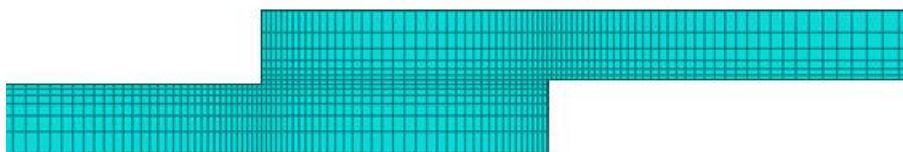


Figura 56 – Mesh - exemplo de uma malha com L_0 igual a 12,5 mm

Para uma melhor visualização e análise dos resultados obtidos foram requeridos os seguintes parâmetros: S e SDEG no módulo *visualization*. O S corresponde às tensões de von Mises e o SDEG permite visualizar a distribuição de dano na camada adesiva.

O tempo de ensaio do modelo numérico é de 5 ms, controlado automaticamente para cada incremento pelo *software*. O programa também garante que a duração desse intervalo para a velocidade de propagação de onda de impacto aplicado não exceda o comprimento de cada elemento. No *field output* para que a evolução temporal em representação gráfica se configurou para períodos de 50 μ s. Já no *history output* foi configurado de modo a fazer o registo do deslocamento e das forças de reação a cada 100 incrementos.

3.1.2 Formulação dos Modelos de Dano Coesivo

Em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [53]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [50], linear parabólico [49], exponencial [51], polinomial [52] e trapezoidal [45]. Pela sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada [54]. O modelo triangular 2D está representado na Figura 57, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

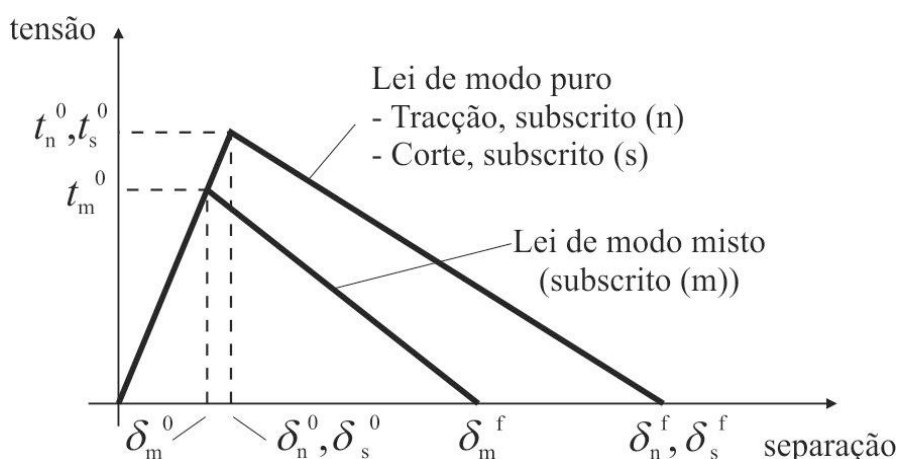


Figura 57 – Lei triangular do modelo de dano coesivo

Nesta lei, distinguem-se dois modos. O modo puro caracteriza-se por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar a tração e corte [56]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente direta de deformação e de uma deformação

de corte que são determinados recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas, entre aderentes rígidos, as tensões existentes na membrana são desprezadas. Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz K_{COH} , a qual relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida da seguinte forma:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} \mathbf{t}_n \\ \mathbf{t}_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_n \\ \boldsymbol{\varepsilon}_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (1)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja uma formulação local, esta é usada para simular fraturas de espessura nula, em que os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [91]. 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 esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [56]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério de tensão nominal quadrática, expresso pela seguinte expressão:

$$\left\{ \frac{\langle \mathbf{t}_n \rangle}{\mathbf{t}_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\mathbf{t}_s}{\mathbf{t}_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (3)$$

$\langle \rangle$ 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 [58]. Quando \mathbf{t}_m^0 é atingido (Figura 57), pela igualdade da equação 5, 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 57) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC}

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (4)$$

3.1.3 Validação da técnica numérica

3.1.3.1 Geometria das juntas

Os provetes utilizados nos ensaios experimentais foram de JSS fabricadas com uma geometria baseada nas normas ASTM D1002 [92] e ISO 4587 [93].

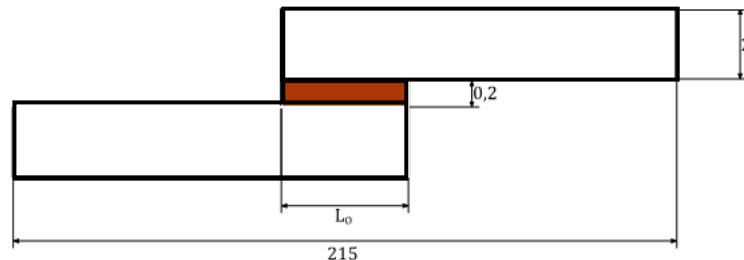


Figura 58 - Dimensões e geometria do provetes de estudo

A Figura 58 trata-se de uma JSS formada por dois aderentes de iguais dimensões e o adesivo. O comprimento de sobreposição é 25 mm e a espessura do adesivo de 0,2 mm.

3.1.3.2 Materiais utilizados

3.1.3.2.1 Aderentes

O aderente usado no estudo numérico foi o aço DIN 55 Si7. Este aço define-se por ser um aço de alta resistência, garantindo que não ocorre deformação plástica dos aderentes durante a aplicação de carga. Na Tabela 2 é possível ver as propriedades deste material.

Tabela 2 – Propriedades Aço DIN 55 Si7 [94]

Propriedades	Aço DIN 55 Si7
E [MPa]	210
ρ [g/cm ³]	7,8
ν	0,3
σ_y [MPa]	1078
σ_f [MPa]	1600
ϵ_f [%]	6

3.1.3.2.2 Adesivos

As propriedades dos adesivos usadas por Campilho et al. [95] foram iguais neste trabalho numérico. Para isso foram selecionados quatro adesivos com propriedades distintas entre si: o XNR6852, o Araldite® AV138, o RTV106 e o 3M® DP8005.

3.1.3.2.3 XNR6852

O adesivo XNR 6852 apresenta alta resistência à tração (aproximadamente 60 MPa), típica de um adesivo epóxico. Exibe um alto alongamento, não apresenta um comportamento frágil nem para ensaios de impacto nem para ensaios quase estáticos. Ainda possui uma alta ductilidade, típico de um adesivo de poliuretano. A Tabela 3 mostra as propriedades mecânicas do adesivo XNR6852.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do adesivo XNR6852 [95].

Propriedades	Valor	Propriedades	Valor
E [MPa]	1742	t_n [MPa]	42,9
G [MPa]	645,2	t_s [MPa]	28,7
ρ [g/cm ³]	1,5	G_{IC} [N/mm]	-
ν	0,4 ^a	G_{IIC} [N/mm]	18

^a valor típico para adesivos epóxidos

3.1.3.2.4 Araldite® AV138

O Araldite® AV138 é um adesivo resina epóxico frágil que para curar a baixas temperaturas tem de ser aplicada com o endurecedor HV998. Este adesivo apresenta resistência a elevadas temperaturas e emite uma baixa quantidade de gases ideal para ligar materiais de famílias diferentes tais como metias, polímeros e compósitos. A Figura 59 mostra os valores de tensão-deslocamento entre o ensaio à tração e é possível verificar que apresenta um comportamento frágil.

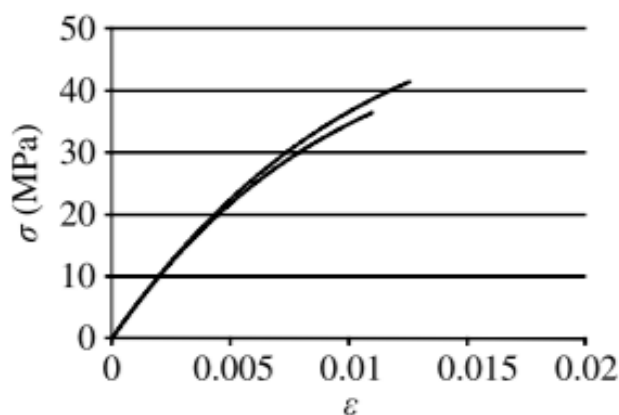


Figura 59 - Gráfico tensão-deslocamento do adesivo Araldite® AV138 [96]

A Tabela 3 mostra as propriedades mecânicas do Araldite® AV138.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [97, 98]

Propriedades	Valor	Propriedades	Valor
E [MPa]	4890	t_n [MPa]	41,0
G [MPa]	1560	t_s [MPa]	30,2
ρ [g/cm ³]	1,7	G_{IC} [N/mm]	0,35
ν	0,35 ^a	G_{IIC} [N/mm]	4,91

^b valor do fabricante

3.1.3.2.5 RTV106

O adesivo Momentive® RTV106 é extremamente versátil. Os seus pontos fortes são a sua elevada flexibilidade a baixas temperaturas, bom desempenho a altas temperaturas excelente resistência às condições ambientais e resistência química e também ótimo isolante elétrico. As propriedades estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas adesivo RTV106 [99]

Propriedades	Valor	Propriedades	Valor
E [MPa]	1,6	t_n [MPa]	2,3
G [MPa]	0,86	t_s [MPa]	1,97
ρ [g/cm ³]	1,07	G_{IC} [N/mm]	2,73
ν	-	G_{IIC} [N/mm]	5

3.1.3.2.6 3M® DP8005

Por último, o adesivo 3M® DP8005 apresenta-se como sendo um adesivo dúctil com um tempo de cura rápida. Em poucos minutos este adesivo consegue atingir bons valores resistência mecânica. Pode ser usado para substituir ligações mecânicas (parafusos ou rebites) e em polímeros com baixa energia de superfície para se evitar o tratamento de superfície ou mesmo ataques químicos.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do adesivo DP8005 [53, 100]

Propriedades	Valor	Propriedades	Valor
E [MPa]	590	t_n [MPa]	6,3
G [MPa]	159	t_s [MPa]	8,4
ρ [g/cm ³]	1,06	G_{IC} [N/mm]	1,1
ν	0,3 ^a	G_{IIC} [N/mm]	6

Nas tabelas apresentadas anteriormente (Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6) é possível ver as propriedades mecânicas para as condições de ensaio estático. Os resultados de E e t_n foram obtidos experimentalmente através de ensaios de tração e o G e t_s através de ensaios de corte (TAST). Já as energias de fratura G_{IC} foram determinadas através de ensaios DCB e o G_{IIC} através do ENF.

Foram determinadas as propriedades a diferente velocidades de ensaio no decorrer do trabalho de Campilho et al. [95] e se observadas na Tabela 7. As propriedades para as velocidades de 1 mm/min e 100 mm/min foram determinadas por ensaios experimentais. Para a velocidade de 105000 mm/min (1,75 m/s) resultam da extrapolação logarítmica a partir das propriedades de menor velocidade de ensaio [84].

Tabela 7 - Propriedades dos adesivos função da velocidade [94]

Adesivo	Velocidade (mm/min)	t_n [MPa]	t_s [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
XNR6852 E-2	1	42,9	28,7	1,68	18
	100	46	33,6	-	-
	105000	53,7	45,8	1,68	18
AV138	1	41	30,2	0,35	4,9
	100	49,1	36,2	-	-
	105000	70,2 (30) *	51,7 (22,1) *	0,35	4,9 (0,6) *
RTV106	1	2,3	1,97	2,73	5
	100	-	-	-	-
	105000	-	-	-	-
DP8005	1	6,3	8,4	1,1	6
	100	13	17,4	-	-
	105000	27,5	36,7	1,1	6

* valores estimados

3.1.3.3 Ensaios de impacto

No ensaio de impacto experimental realizado em laboratório por Valente [94] foi utilizado um equipamento Rosand® Instrumented Falling Weight Impact type 5 HV (Figura 60). O ensaio de impacto realizado neste aparelho consiste na queda de um peso que ao embater no provete transfere a sua energia potencial para este.

O aderente superior é fixado por uma amarra e um parafuso. É necessário utilizar um calço para assegurar um correto alinhamento e assim eliminar possíveis cargas excêntricas. No aderente inferior é fixado o peso com um parafuso e um calço. Para garantir o correto alinhamento no momento de impacto, o peso corre numa guia.

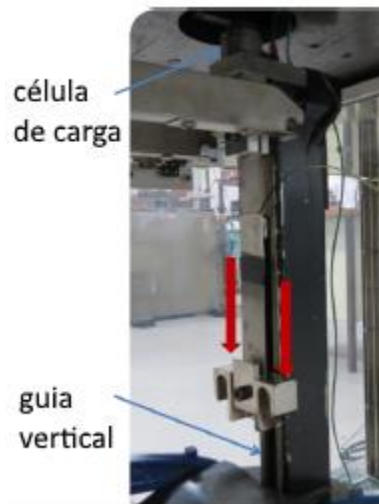


Figura 60 – Equipamento para realização dos ensaios de impacto [94]

A energia transferida para o provete devido à queda do peso é registada numa célula de carga localizada no sistema de retenção do aderente superior.

De modo a poder replicar e comparar os ensaios experimentais e modelos numéricos, foi adicionado um peso ao aderente superior do modelo numérico. Este peso tem como objetivo obter-se uma energia de impacto de 40 J.

Através energia potencial, equação (5), foi possível calcular a altura de queda do peso de modo a obter uma energia de impacto de 40 J. Nesta equação o E representa a energia de impacto no provete, m representa a massa do peso fixado ao aderente superior, g corresponde à aceleração gravítica e h_0 corresponde à altura de queda do peso. A altura correspondente foi de 15,7 cm.

$$E = m \times g \times h_0 \quad (5)$$

Na simulação numérica devido ao facto de não ser possível simular a distância de queda, foi utilizada a energia cinética, equação (6), para obter a velocidade no momento do impacto. Nesta equação o E representa a energia, o m corresponde à massa fixa ao aderente e o v corresponde à velocidade de impacto. Para as condições do ensaio, a velocidade é de 1,75 m/s.

$$E = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad (6)$$

As dimensões do peso adicional como extensão do aderente superior foram de 25 mm de largura e 3 mm de espessura. A sua densidade foi devidamente calculada de modo a obter a massa idêntica à utilizada nos ensaios experimentais de 26 kg.

3.1.3.4 Resultados obtidos

A validação do modelo numérico vai ser considerada como resultados de referência os resultados obtidos por Valente [94].

A curva P- δ do adesivo XNR6852 é apresentada na Figura 61. É possível identificar três patamares de recuperação antes de ser atingida a carga máxima (também presente na referência numérica). Registou-se o deslocamento máximo, bem como o deslocamento correspondente à carga máxima com valores semelhantes ao da referência numérica. Estes valores foram significativamente superiores.

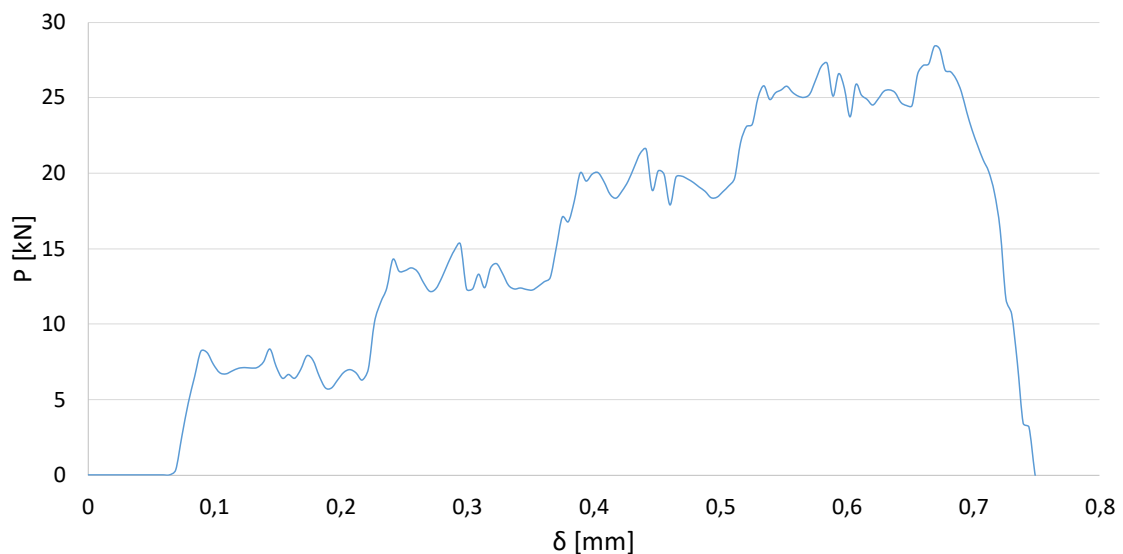


Figura 61 - Curva P- δ do adesivo XNR6852

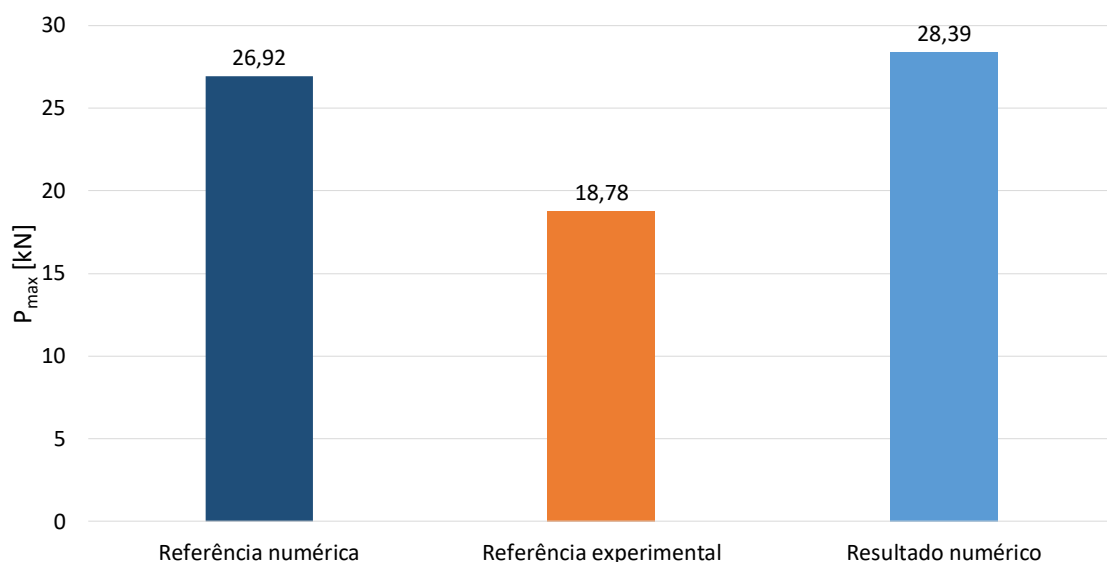


Figura 62 - Comparação dos resultados obtidos para o adesivo XNR6852

Na Figura 62 pode-se comparar os valores de carga máxima obtidos com o adesivo XNR 6852 para cada um dos ensaios. O resultado numérico obtido foi de 5% superior ao da referência numérica, registando-se um aumento substancial de 51% em relação à referência experimental. A referência numérica diz respeito aos valores retirados de um trabalho enquanto que o resultado numérico diz respeito aos valores obtidos no ensaio numérico.

Na Figura 63 é apresentada a curva carga-deslocamento ($P-\delta$) com o uso do adesivo AV138. Devido ao facto de os elevados calores de carga máxima atingida e à disparidade entre as curvas da referência numérica e do resultado numérico, os valores de tensões coesivas foram revistos. A tensão coesiva à tração (t_n) foi arbitrada e a tensão coesiva ao corte (t_s) foi ajustada para cumprir a mesma proporção dos valores obtidos experimentalmente para velocidades de ensaio inferiores. A tenacidade ao corte (G_{IC}) foi também reduzida para aproximar ao valor de tenacidade à tração (G_{IC}) na mesma proporção dos outros autores.

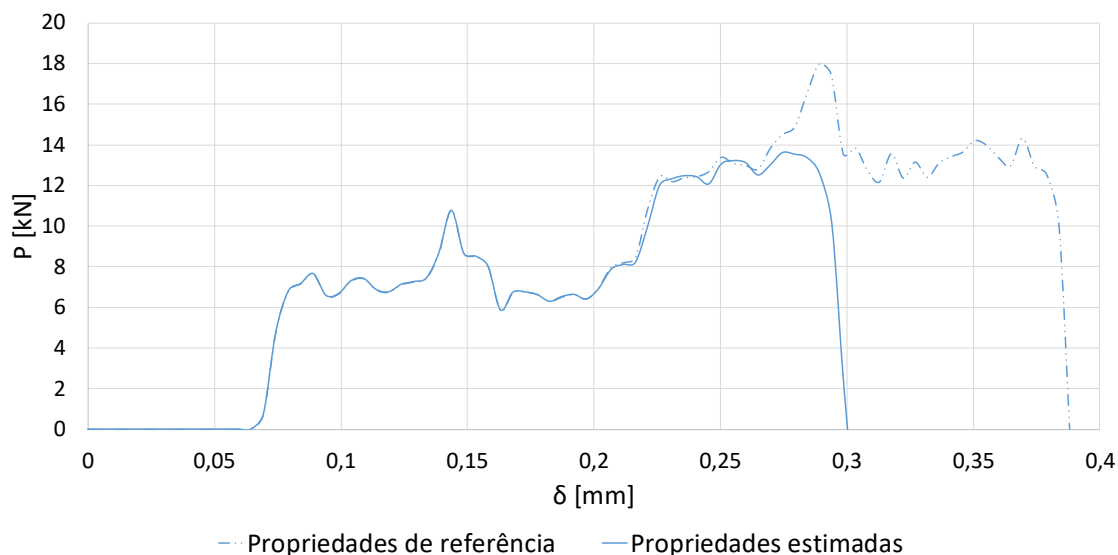


Figura 63 - Curva $P-\delta$ do adesivo AV138

Depois de introduzidas as alterações descritas acima foram obtidos novos resultados que advêm num modelo numérico mais representativo das referências experimentais.

Na Figura 64 são mostrados os valores de carga máxima obtidos com o adesivo em causa. Ao comparar o valor da carga máxima obtida nos resultados numéricos usando as propriedades de referência, com os resultados obtidos na referência numérica, conclui-se que este último apresenta um valor de 25% superior. Ao atribuir as propriedades estimadas, o valor obtido foi 6% menor do que o valor obtido na referência numérica, mas ficou mais próximo da referência experimental.

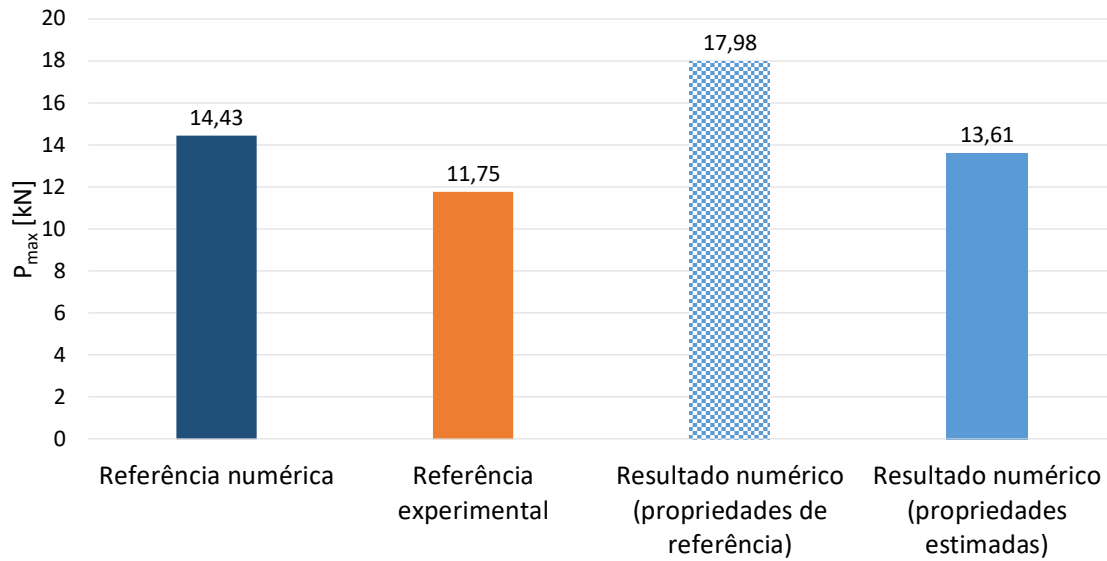


Figura 64 - Comparação dos resultados obtidos para o adesivo AV138

O resultado numérico efetuado com o adesivo RTV106 produziu um resultado com uma variação de carga acentuada ao longo do deslocamento (Figura 65). A curva que representa o resultado obtido não coincide com a da referência numérica. Assim sendo, aplicando uma linha de tendência de média móvel de período igual a 31, obtém-se um perfil da curva idêntico. Os resultados numéricos apresentaram um deslocamento máximo bastante maior do que aquele obtido experimentalmente. Por outro lado, o deslocamento correspondente à carga máxima coincide numericamente e experimentalmente.

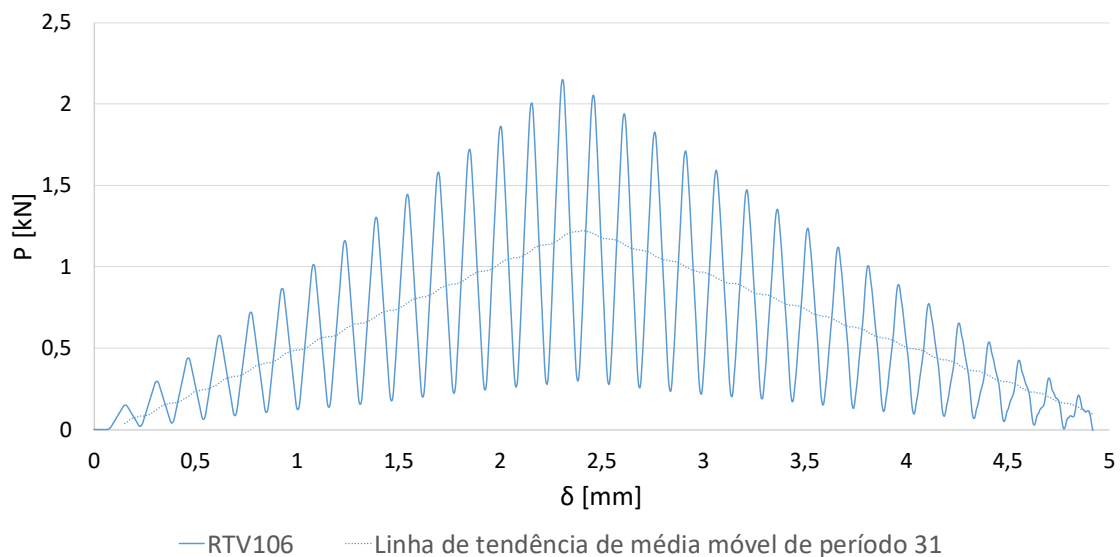


Figura 65 – Curva P- δ do adesivo RTV106

Na Figura 66 é possível observar que todos os resultados obtidos por ensaio numérico ficaram abaixo da média dos resultados experimentais. O valor mais elevado na curva tensão-deslocamento sem linha de tendência foi obtido no resultado numérico. Ao ser aplicada a linha de tendência obtém-se um valor muito próximo da referência numérica (inferior a 1 %). O resultado numérico ficou a 51% abaixo da referência experimental. Ao ser aplicada a linha de tendência a diferença aumenta para 72%.

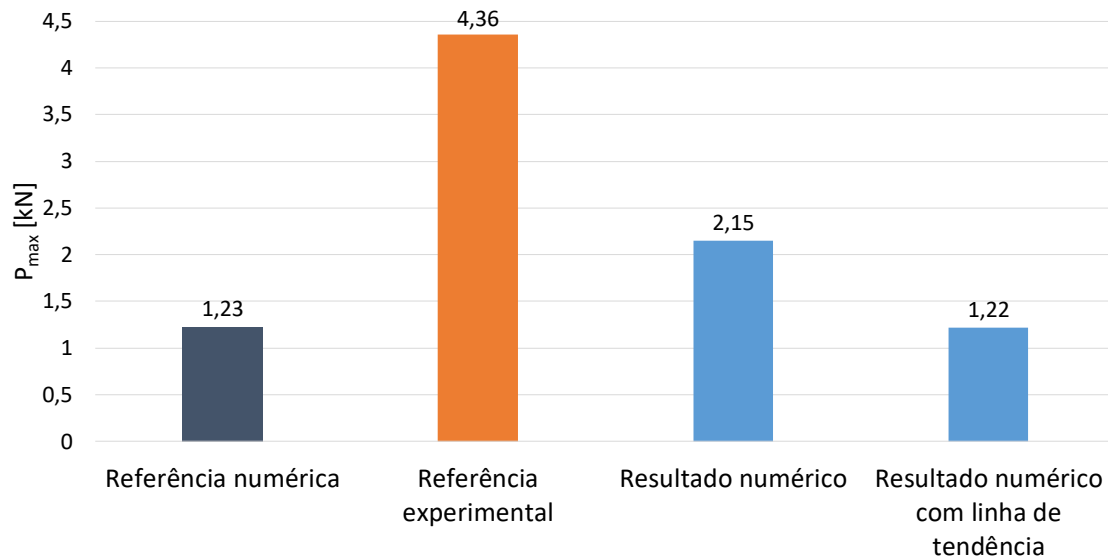


Figura 66 – Comparação dos resultados obtidos para o adesivo RTV106

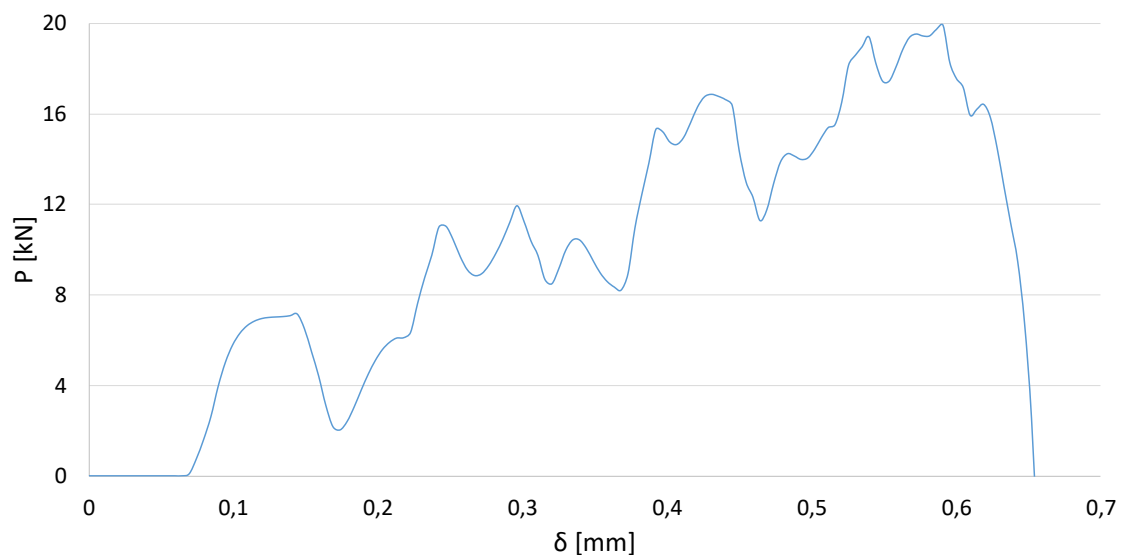


Figura 67 - Curva P-δ do adesivo DP8005

O perfil da curva tensão-deslocamento do adesivo DP8005 (Figura 67) é em tudo semelhante ao perfil de referência [95], ainda que com um maior desnivelamento ao longo da curva. Os 3 patamares de recuperação apresentados pela referência numérica

são também apresentados no resultado da Figura 67 e estão presentes em ambos os casos para valores de deslocamento semelhantes. O deslocamento máximo ocorre em linha com o gráfico de referência numérica, mas com valores significativamente inferiores ao deslocamento obtido na referência experimental.

Observando os valores máximos ocorridos no adesivo DP8005, presentes na Figura 68, pode concluir-se que o valor do resultado numérico tem um valor próximo da referência numérica (menos de 1 % de diferença). Esses valores são no entanto 19% superiores aos valores obtidos experimentalmente.

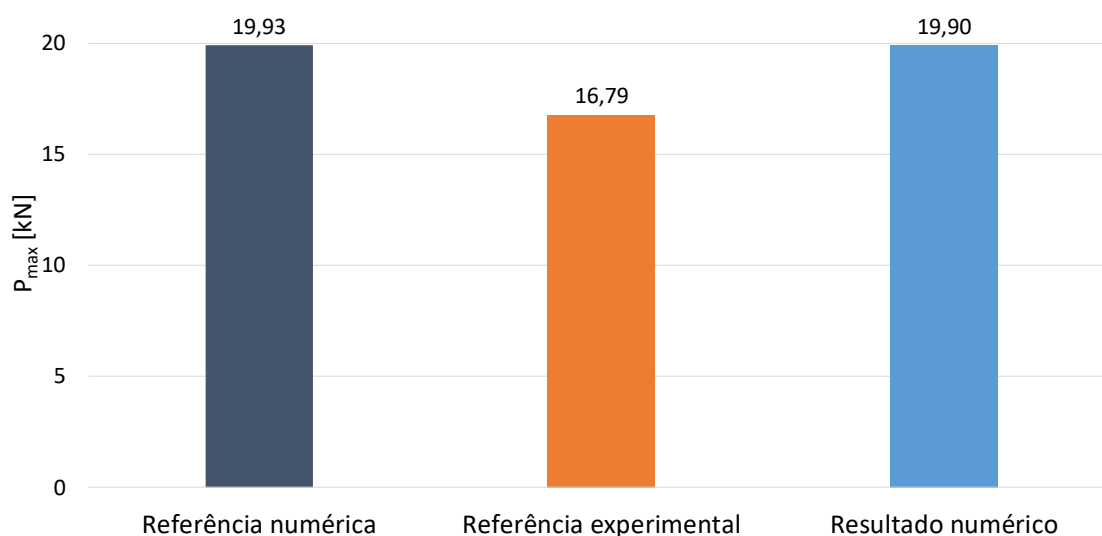


Figura 68 - Comparação dos resultados obtidos para o adesivo DP8005

3.1.3.5 Discussão de resultados

Todas as curvas $P-\delta$ dos resultados numéricos apresentam algum deslocamento inicial sem que seja registada força de reação no encastramento. Pode verificar-se este fenómeno nos ensaios dinâmicos realizados por Araújo et al. [101] e Varajão [102] com a utilização do *software* Abaqus®.

Este efeito é originado por efeitos de inércia associados à aplicação de uma carga dinâmica. Para observar esse efeito, campo *field output* foi momentaneamente configurado para registar todos os incrementos temporais para se obter uma sequência gráfica dos primeiros momentos do ensaio numérico. Na Figura 69 está representada a propagação de tensões de von Mises provocada pelo impacto.

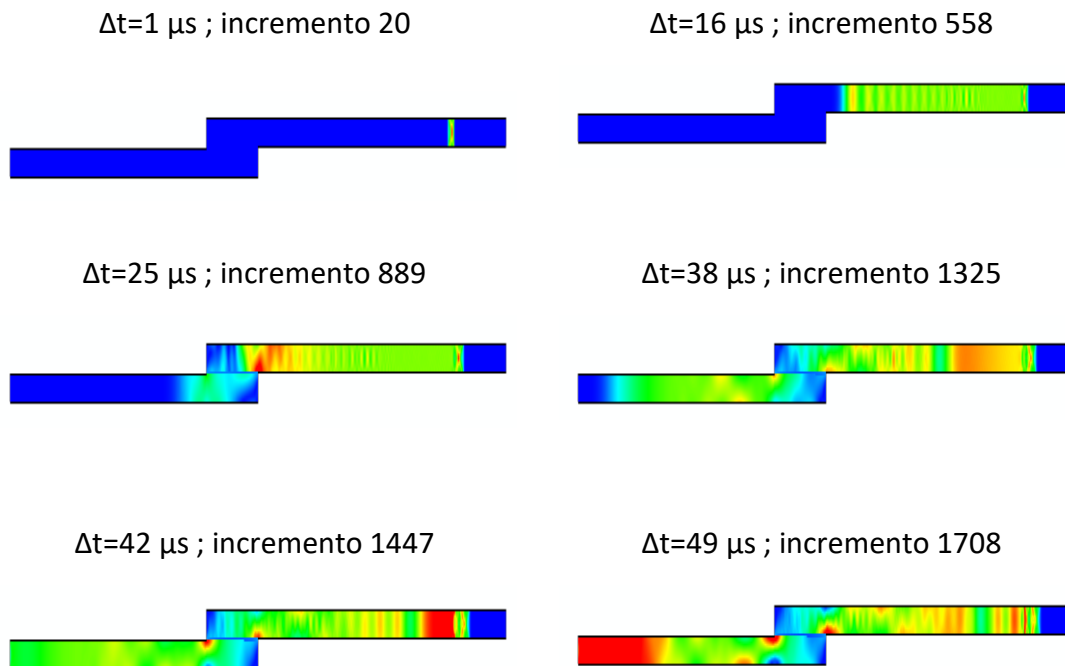


Figura 69 – Propagação de tensões para o adesivo AV138

Os resultados numéricos com o adesivo XNR652 obtiveram uma elevada concordância com a referência numérica. A diferença para a referência experimental é de 51%, por causa das mesmas razões enunciadas no adesivo DP8005. Pode-se concluir que a extrapolação de propriedades resulta em valores de tensões coesivas demasiado elevados.

No caso do adesivo AV138 não foi possível replicar o resultado da referência numérica. Assim sendo, alguns valores de algumas propriedades tiveram de ser ajustados de modo a obter resultados mais representativos dos resultados experimentais obtidos por Valente [94]. Com os resultados concluiu-se que a velocidade de impacto de 1,75 m/s não é válida para este adesivo. O modelo foi validado através de propriedades estimadas.

O modelo para o adesivo RTV106 não pode ser considerado válido porque mesmo tendo sido possível replicar a referência numérica através de uma linha de tendência, os valores numéricos ficaram aquém do esperado (referência experimental). Ao não ser possível modelar a rotura adesiva nos modelos numéricos aplicados, apenas rotura coesiva é considerada, e tendo havido rotura adesiva nos ensaios experimentais realizados por Valente [94] seria de esperar valores de carga máxima superiores nos ensaios numéricos. Esta incoerência deve-se ao facto de apenas se utilizarem propriedades válidas para casos estáticos.

No adesivo DP8005 a diferença entre o resultado numérico e a referência numérica prende-se ao facto de ter sido usada uma malha uniforme sem utilização do efeito *bias*

utilizada por Valente [94]. No ensaio numérico é considerada uma homogeneidade perfeita dos materiais, espessuras constantes, ausência de bolhas de ar e ainda a existência de folgas nos ensaios experimentais. É esperado que a deformação experimental seja superior à estimada pelo modelo numérico.

3.2 Estudo numérico

3.2.1 Geometria da junta

Para apurar qual a influência das alterações geométricas no comportamento de cada junta adesiva, são alterados vários parâmetros de modo a estudar o seu efeito na carga máxima suportada e também na distribuição de tensões.

Em primeiro lugar, serão alteradas as dimensões do comprimento de sobreposição. Posteriormente serão alterados os expoentes das leis coesivas de modo a observar qual o que melhor se ajusta aos valores obtidos experimentalmente.

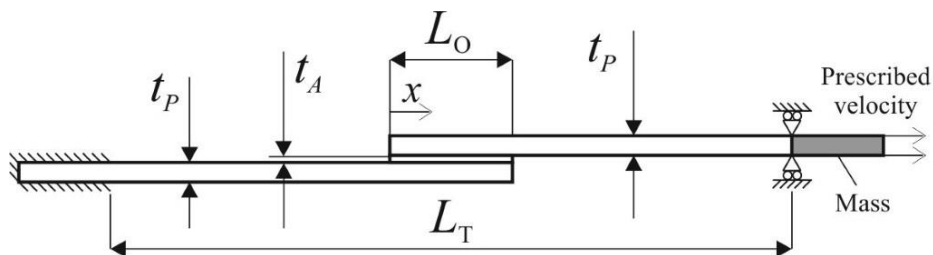


Figura 70 - Dimensões e geometria do provetes de ensaio

As dimensões da Figura 70 são todas iguais às da Figura 58, exceto o L_T , que neste estudo é de 180 mm e o t_p , que é de 3 mm.

3.2.2 Materiais utilizados

3.2.2.1 Aderente

Na realização do trabalho prático os aderentes utilizados foram de compósito reforçado a fibras de carbono, cuja propriedades relevantes são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades das fibras de carbono [103]

Aderente	Fibras de Carbono
Diâmetro [μm]	7 - 10
Densidade [g/cm^3]	1,6 – 1,9
Resistência à tração [MPa]	4000
Módulo de elasticidade [GPa]	230 - 240
Alongamento [%]	1,4 – 1,8

Estas fibras são muito utilizadas na indústria automóvel tanto devido à sua estética como às suas excelentes propriedades. Dentro destas propriedades destacam-se a baixa densidade, elevada resistência à tração, baixo coeficiente de expansão térmica e alta resistência à abrasão e à corrosão. Contudo, as suas desvantagens são o custo relativamente elevado e a reduzida resistência ao impacto. A deformação plástica dos aderentes não foi considerada para poder-se validar o modelo numérico. Estas fibras estão cada vez mais presentes nas áreas de engenharia que apresentem leveza e resistência. Para validação do modelo numérico não foram consideradas as propriedades de deformação dos aderentes.

Tabela 9 - Propriedades elásticas das fibras de carbono (1- direção das fibras; 2- direção perpendicular a 1 no plano da camada; 3- direção normal à camada) [98]

Propriedades	Valor	Propriedades	Valor
E_1 [MPa]	109000	G_{23} [MPa]	3200
E_2 [MPa]	8819	ν_{12}	0,342
E_3 [MPa]	8819	ν_{13}	0,342
G_{12} [MPa]	4315	ν_{23}	0,38
G_{13} [MPa]	4315		

3.2.2.2 Adesivos

Os adesivos empregues no estudo numérico foram os AV138, 7752 e o XNR6852. Estes adesivos apresentam comportamentos completamente distintos entre si. Os adesivos 7752 e XNR6852 foram descritos anteriormente.

O SikaForce® 7752 é um adesivo dúctil. Ao comparar-se com o AV138 e o XNR6852, este é o que apresenta menor resistência ao corte e tração. Este adesivo é à base de poliuretano e a mistura da resina e endurecedor numa razão de 100 g/20 g, respetivamente.

Tabela 10 – Propriedades dos adesivos de estudo [94, 104]

Adesivo	AV138	7752	XNR6852
E [MPa]	4890	490	1742
G [MPa]	1560	190	645,2
ν	0,3	0,3	0,3
σ_f [MPa]	30	11,49	53,7
τ_f [MPa]	22,1	10,17	45,8
ε_n^0	0,0121	0,1918	0,2114
ε_s^0	0,078	0,5482	1,00

3.2.3 Estudo de tensões

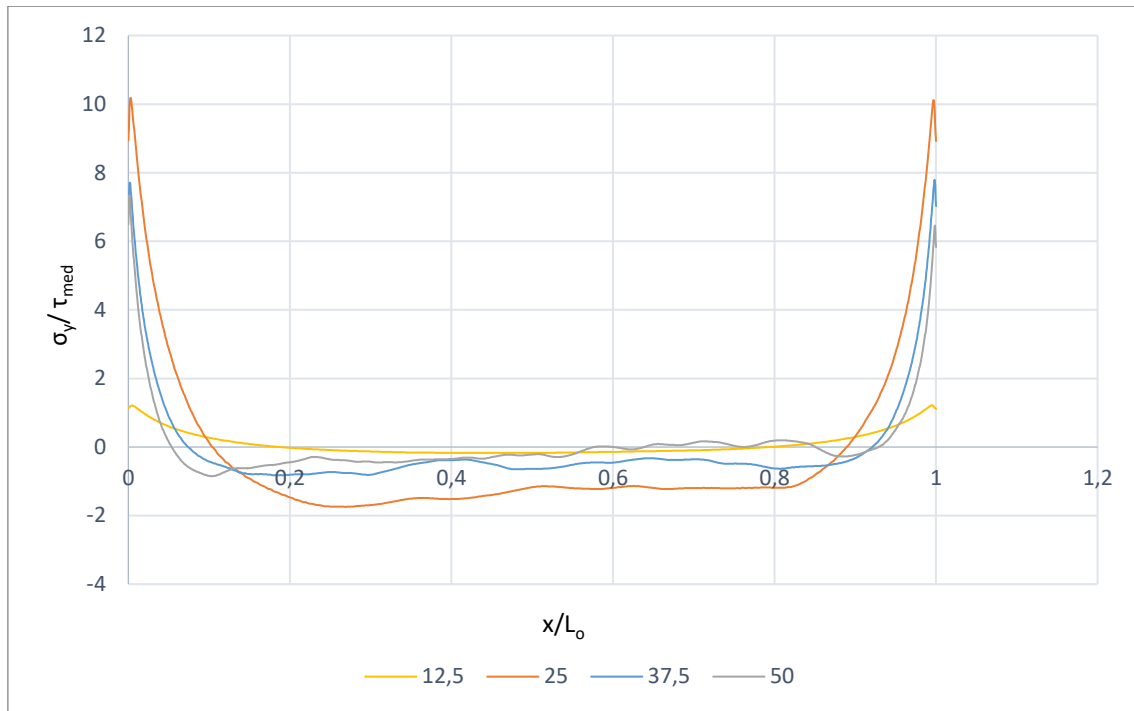
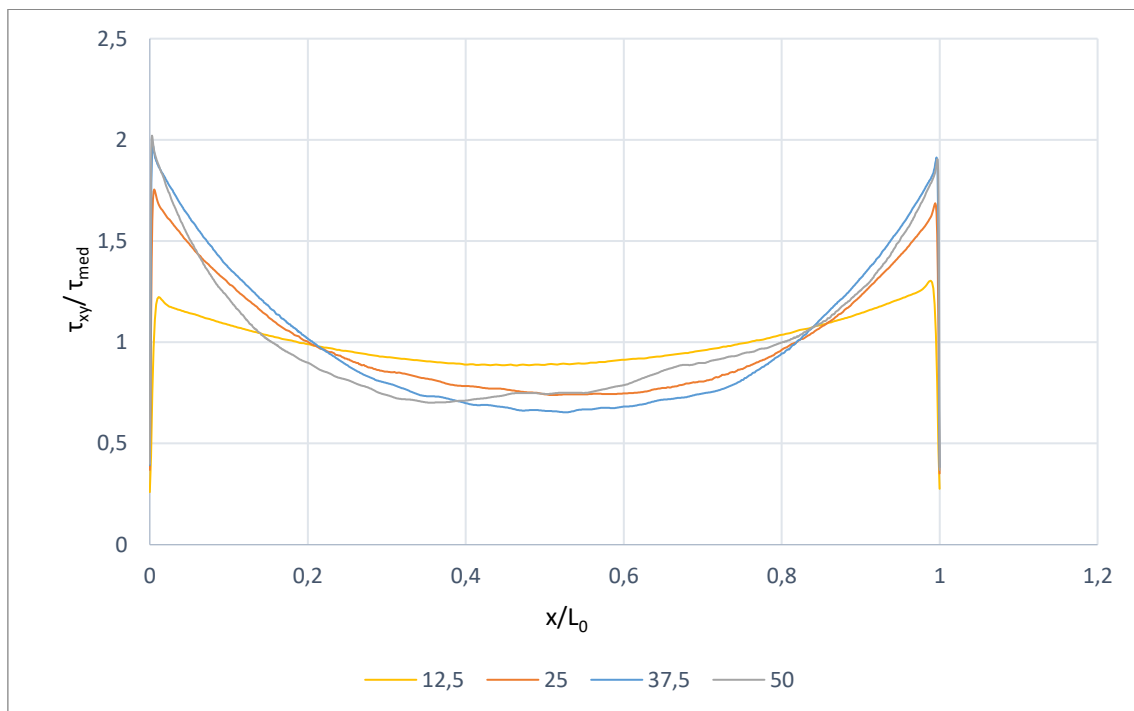
As distribuições de tensões σ_y/τ_{med} (divisão da tensão de arrancamento pela tensão de corte média) em função do x/L_o (divisão do valor dos coordenados x pelo comprimento total de sobreposição) são apresentadas na Figura 71. De um modo geral verifica-se que as tensões de corte apresentam valores inferiores às tensões de arrancamento exceto em zonas particulares, como é o caso das extremidades da ligação da junta.

Na região interior da camada adesiva ocorrem tensões de compressão e nas periferias tensões de tração. Este fenómeno é originado pela curvatura ou deformação transversal da junta que é orientada pelos substratos. As tensões de arrancamento originam uma diminuição da resistência da junta adesiva, podendo levar à rotura prematura.

Este estudo mostrou que os picos de tensões σ_y ocorrem sempre nas extremidades da ligação.

O estudo do adesivo 7752 (Figura 71) representa os valores de tensão σ_y/τ_{med} em função de x/L_o . O valor máximo para o adesivo em causa foi para L_o de 25 mm que atingiu aproximadamente 10. No sentido inverso, o que apresentou menor valor foi o de 12,5 mm, que atingiu aproximadamente os 1,5.

Para o mesmo adesivo, porém, para a distribuição de tensões de corte (Figura 72), verifica-se que tanto para L_o de 50 mm como de 37,5 mm os valores foram os maiores e bastante próximos. É possível ver alguma simetria entre os extremos.

Figura 71 - Distribuição de tensões arrancamento em função do x/L_0 para o adesivo 7752Figura 72 - Distribuição de tensões corte em função do L_0 para o adesivo 7752

A distribuição de tensões de arrancamento para o adesivo AV138 é representada na Figura 73. Existe pouca diferença entre as tensões de arrancamento para L_0 de 25 mm e de 37,5 mm. Os locais onde há concentração de tensões de corte são os extremos da

camada adesiva. O comprimento de L_0 onde reside o maior pico é o 25 mm e o melhor desempenho é registado para o de maior comprimento, ou seja, para L_0 igual a 50 mm. Não existe simetria entre as extremidades. Como se trata de um adesivo rígido a magnitude da concentração de tensões de corte é a superior dos três adesivos do estudo.

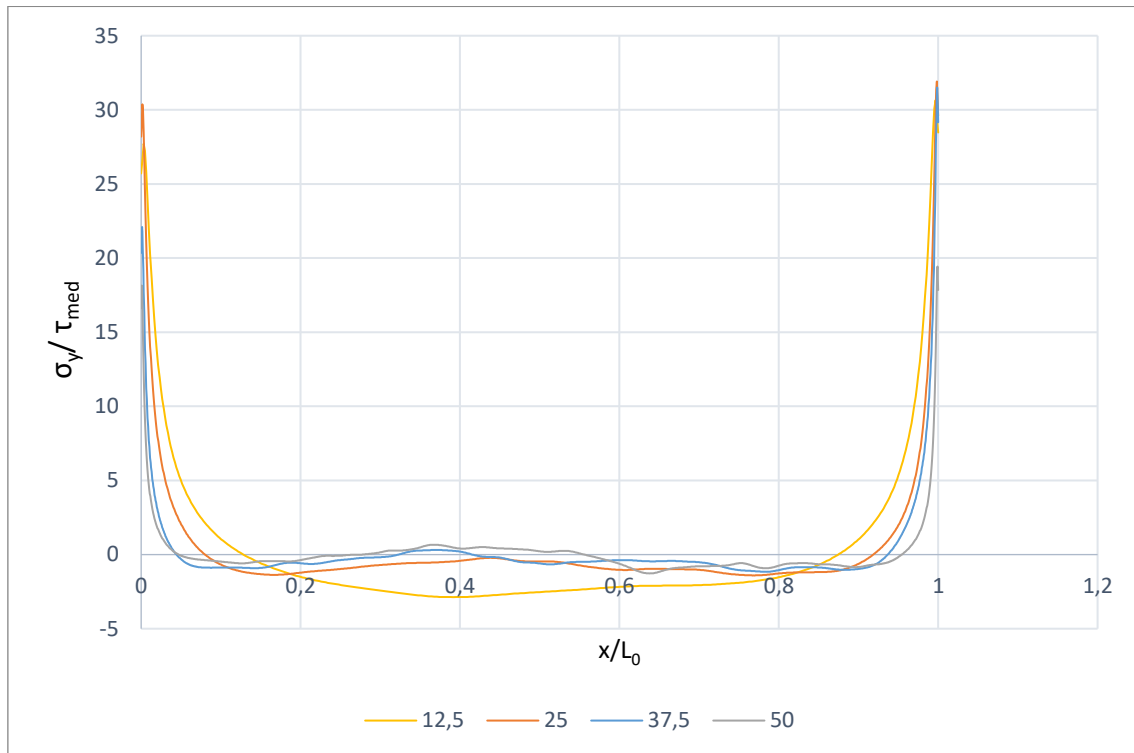


Figura 73 - Distribuição de tensões arrancamento em função do x/L_0 para o adesivo AV138

Nas tensões de corte do adesivo AV138 (Figura 74), todas as dimensões de L_0 apresentam resultados com os extremos desiguais, ou seja, a tensão de corte numa das extremidades é apresenta magnitude inferior. Tanto na distribuição de tensões de arrancamento como na distribuição de tensões de corte se verifica assimetria e, neste caso, uma maior variação no interior da ligação. O pico registado foi no L_0 de 50 mm e, pelo contrário, o menor pico foi obtido para o L_0 de 12,5 mm.

Ao analisar as tensões de arrancamento do adesivo XNR6852 (Figura 75), o melhor desempenho é verificado para o L_0 de 50 mm. A tensão mais elevada dá-se para um L_0 de 25 mm. Também se observa que as distribuições permanecem assimétricas. Como este adesivo apresenta uma rigidez intermedia em relação ao adesivo 7752 e ao AV138, a magnitude da concentração de tensões de corte encontra-se intermédia.

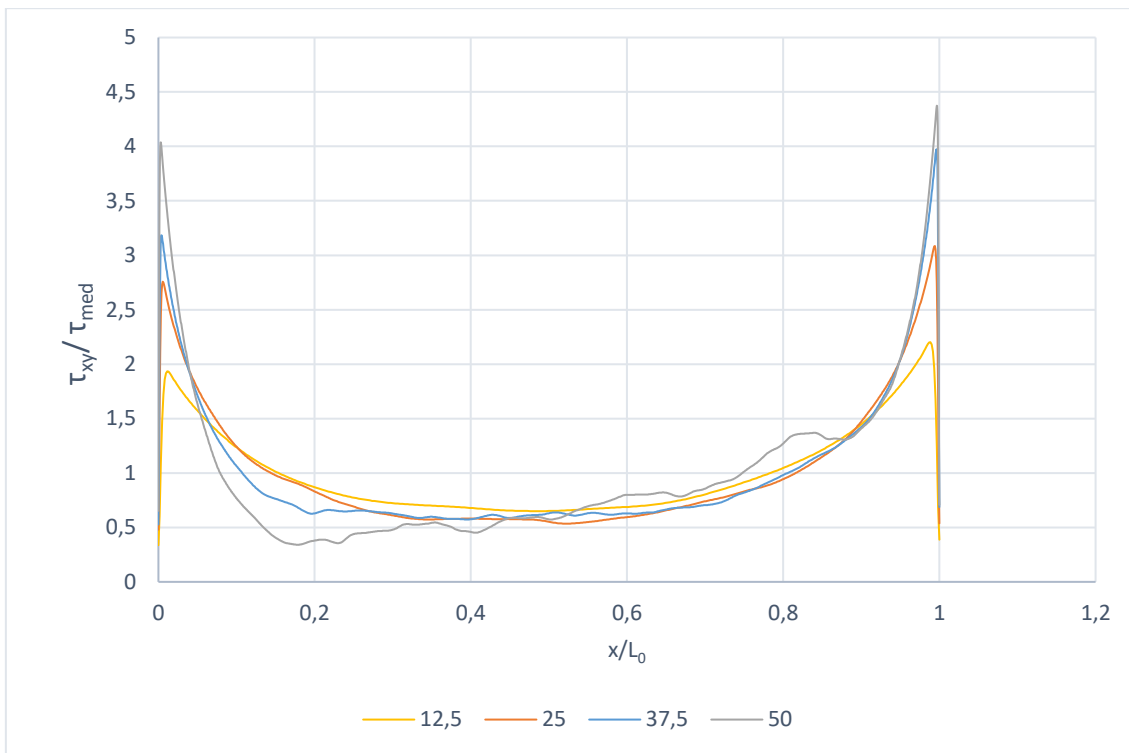


Figura 74 - Distribuição de tensões corte em função do x/L_0 para o adesivo AV138

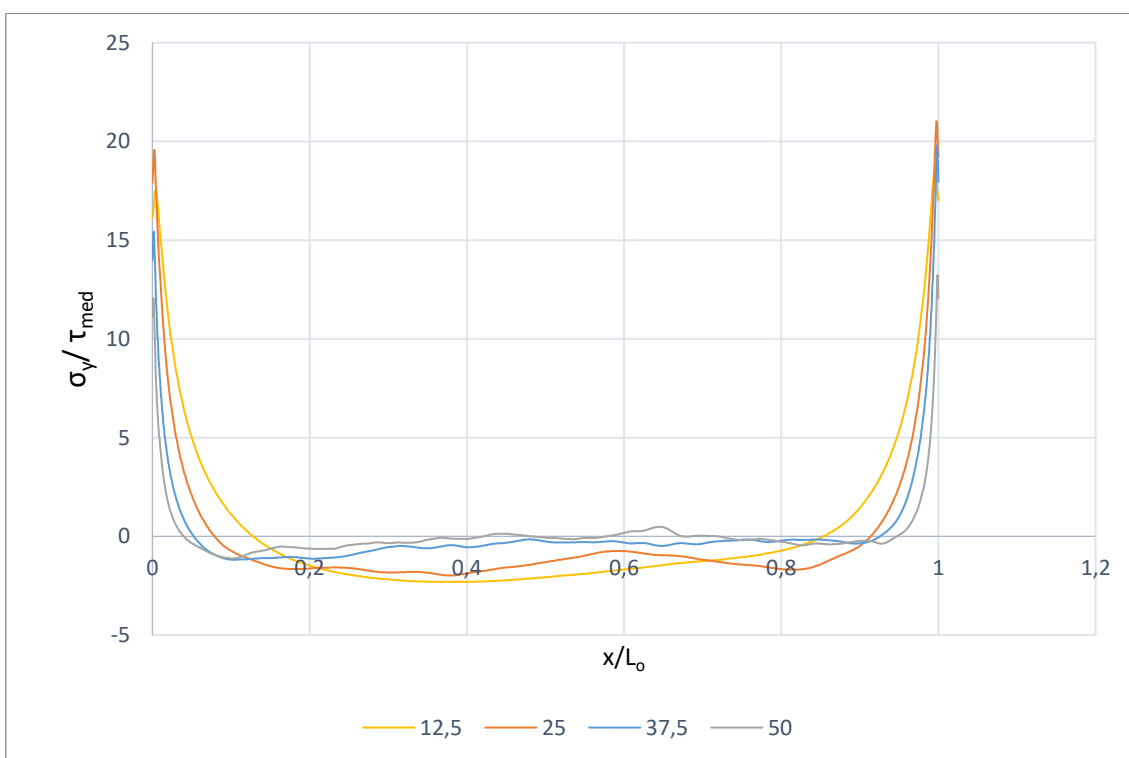


Figura 75 - Distribuição de tensões arrancamento em função do x/L_0 para o adesivo XNR6852

É possível observar a distribuição de tensão de corte na Figura 76. O L_0 que apresenta piores resultados de tensões de corte é para 50 mm, porém o de 37,5 mm também mostra valores próximos do de 50 mm. Mais uma vez não existe simetria na distribuição de tensões de arrancamento. Tal como na distribuição de arrancamento, a concentração de tensões de corte tem valores intermédios aos obtidos com os adesivos 7752 e AV138, uma vez que este apresenta valores intermédios de rigidez.

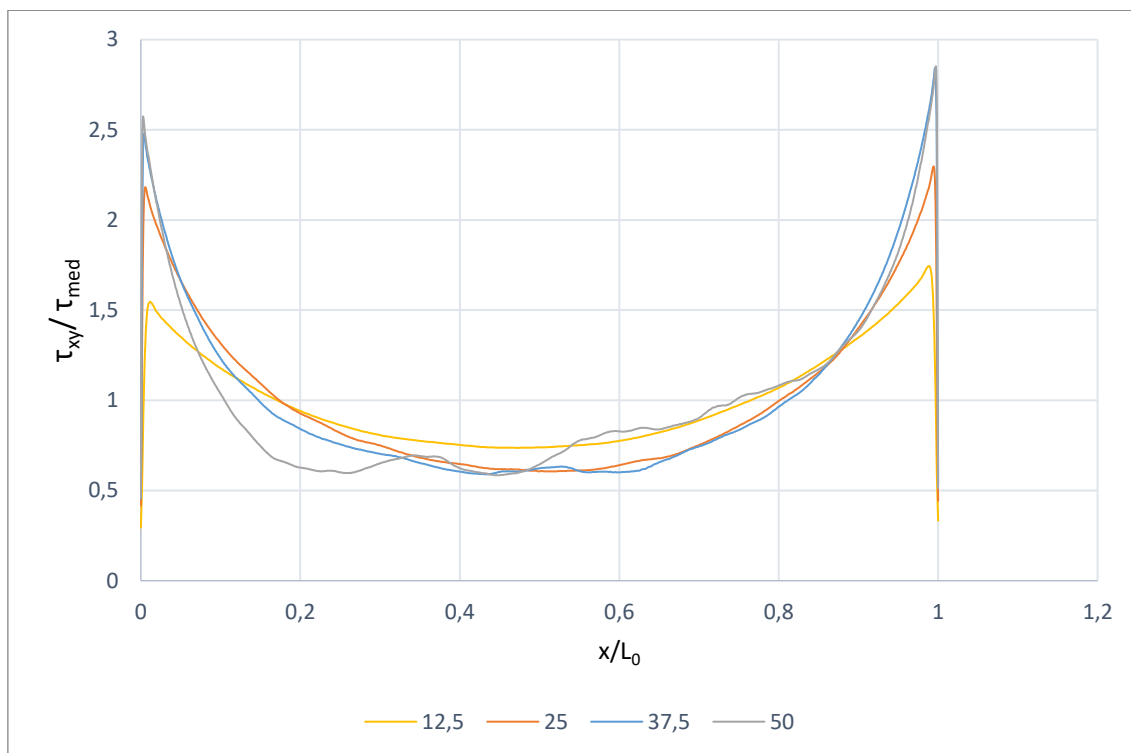


Figura 76 - Distribuição de tensões de corte em função do x/L_0 para o adesivo XNR6852

Pode-se observar que o adesivo AV138 atinge os maiores picos de tensão de corte entre os três adesivos, principalmente devido à sua rigidez ser superior o que promove maior concentração de tensões. O adesivo XNR6852 apresenta para todos os valores de L_0 tensões de pico de corte menores que o AV138 e o adesivo 7752 devido à sua flexibilidade.

Também é possível concluir que o adesivo AV138 apresenta maiores tensões de arrancamento devido à sua rigidez. Logo a força total da ligação é afetada pela menor deformação plástica. Por outro lado, o adesivo 7752 permite uma melhor distribuição de tensões na ligação. Devido à sua capacidade de plastificar, a camada adesiva tende a suportar maior força. Por fim, o adesivo XNR6852, devido à sua flexibilidade moderada, apresenta valores intermédios em comparação com os outros dois adesivos.

Os picos de tensões são menores para cargas de corte devido às tensões poderem ser espalhadas por áreas maiores do que as tensões de arrancamento. Daí o porquê de as ligações adesivas apresentarem melhores valores quando carregadas em corte.

3.2.4 Estudo da influência dos parâmetros coesivos na resistência ao impacto

3.2.4.1 Rigidez elástica da lei coesiva

Neste subcapítulo foi estudada a influência da rigidez elástica quando submetida a ensaios de impacto. Para isso foi feito o estudo em vários estados, desde -75% a +100% comparativamente aos valores originais, como mostra a Tabela 11.

Tabela 11 -Variação percentual do E e G para os adesivos 7752, AV138 e XNR6852

	(%)	-75%	-50%	-25%	0	25%	50%	75%	100%
7752	E [MPa]	122,5	245	367,5	490	367,5	612,5	735	857,7
	G [MPa]	47,5	95	142,5	190	142,5	237,5	285	332,5
AV138	E [MPa]	1222,5	2445	2667,5	4890	6112,5	7335	8557,5	9780
	G [MPa]	390	780	1170	1560	1950	2340	2730	3120
XNR6852	E [MPa]	435,5	871	1306,5	1742	2177,5	2613	3048,5	3484
	G [MPa]	161,3	322,6	483,9	645,2	806,5	967,8	1129,1	1290,4

A Figura 77 apresenta a comparação de resistência do adesivo 7752 para os diferentes valores E e G (sem variação de rigidez).

Para o adesivo 7752 observou-se que o desvio máximo foi 13,76% para um L_0 de 25 mm para valores de -50% os parâmetros E e G . No oposto, o que apresentou menos desvio percentual foi o L_0 de 50 mm para 25% dos parâmetros com 0,27% de desvio. Como se pode ver na Figura 77, existem valores com desvios muito próximos do zero. Isto ocorre porque como o adesivo 7752 se trata de um adesivo dúctil, e a sua capacidade de plastificação é superior aos outros adesivos estudados, o que permite uma melhor distribuição de tensões ao longo da área de ligação.

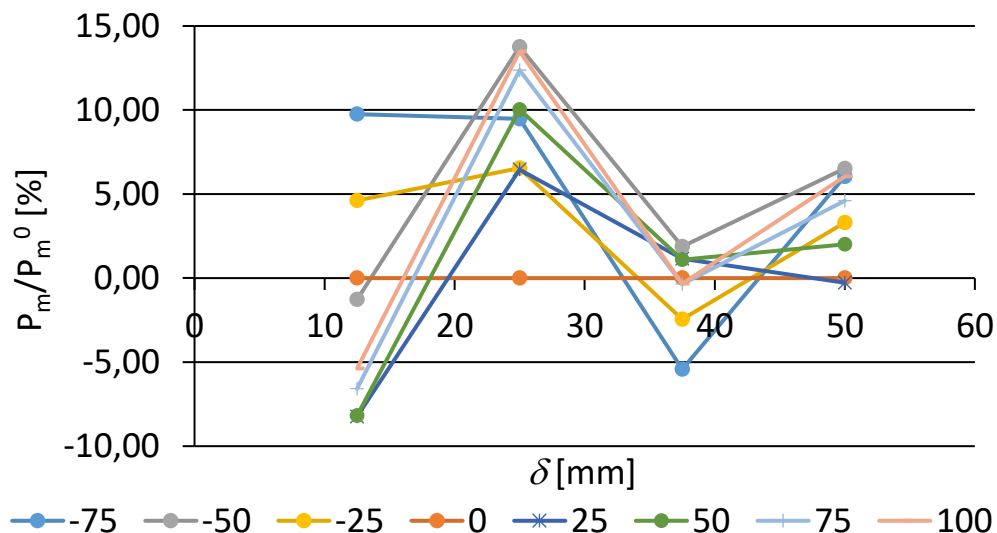


Figura 77 – Carga máxima para diferentes valores de rigidez elástica para o adesivo 7752

Para o adesivo AV138 (Figura 78), verificou-se que o desvio máximo foi de 11,24% para um L_0 de 12,5 mm e com parâmetros de -75%. Pelo contrário, o que apresentou menor desvio foi o parâmetro de 50% onde o seu desvio máximo foi de 1,64% para um L_0 de 25 mm.

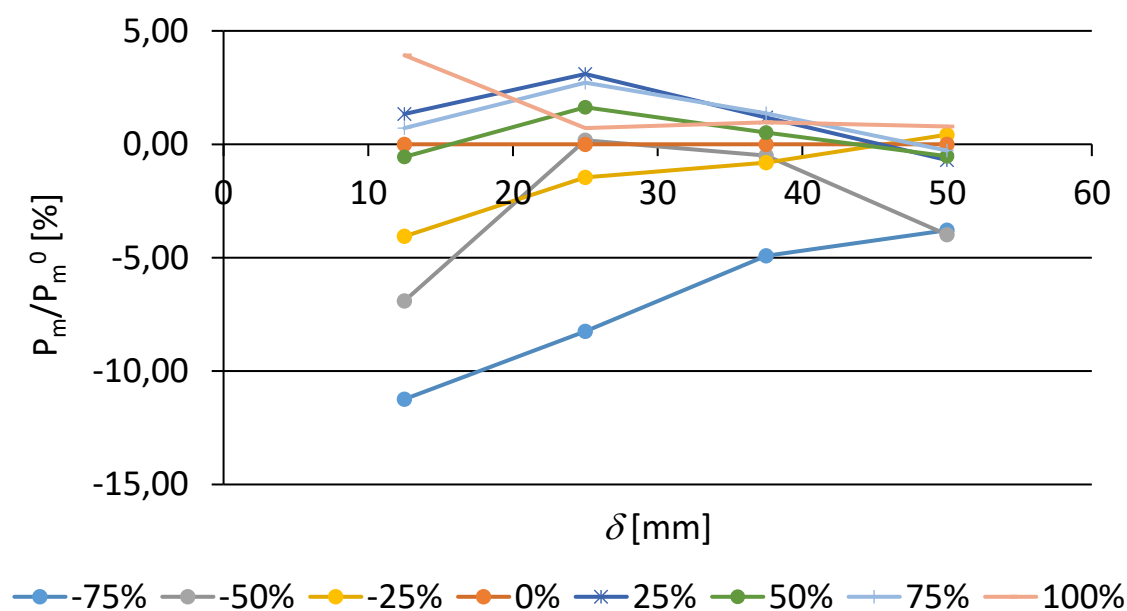


Figura 78 - Carga máxima para diferentes valores de rigidez elástica para o adesivo AV138

Por último caso, o adesivo XNR6852 (Figura 79), verificou-se que a amplitude maior foi de 3,68% para um L_0 de 12,5 mm e com parâmetros de -50%. Pelo contrário, o que apresentou menor desvio foi o parâmetro de -25% onde o seu desvio máximo foi de 0,3% para um L_0 de 12,5 mm.

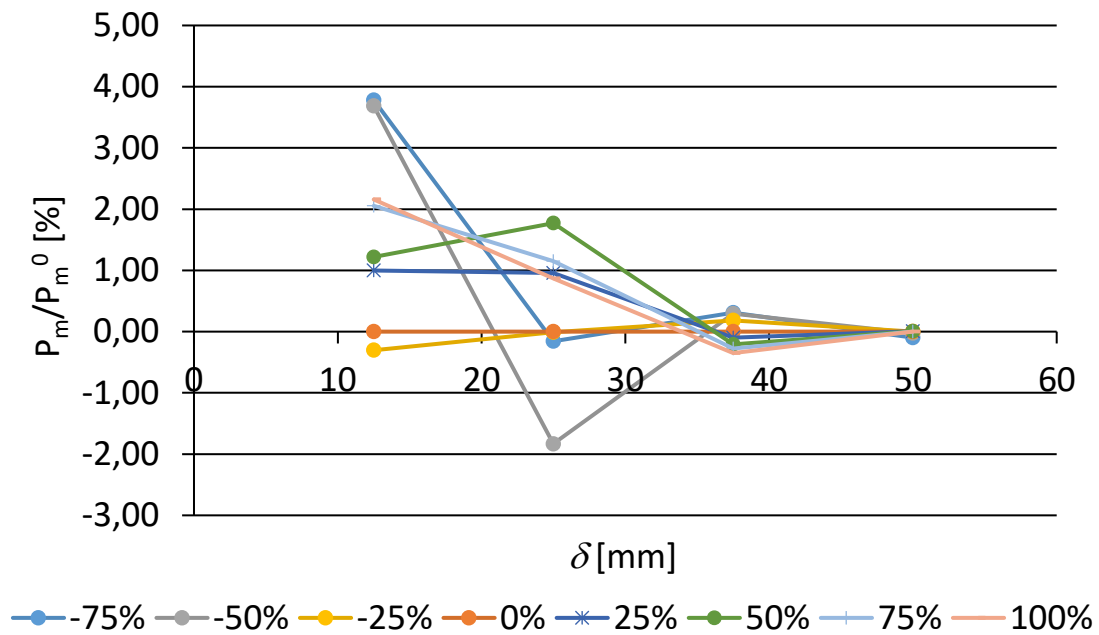


Figura 79 - Carga máxima para diferentes valores de rigidez elástica para o adesivo XNR6852

3.2.4.2 Desacoplamento dos modos de carregamento com lei triangular

A Figura 80, Figura 81 e Figura 82 apresentam a comparação entre os dados acoplados e desacoplados em carregamento com lei triangular para os três adesivos de estudo.

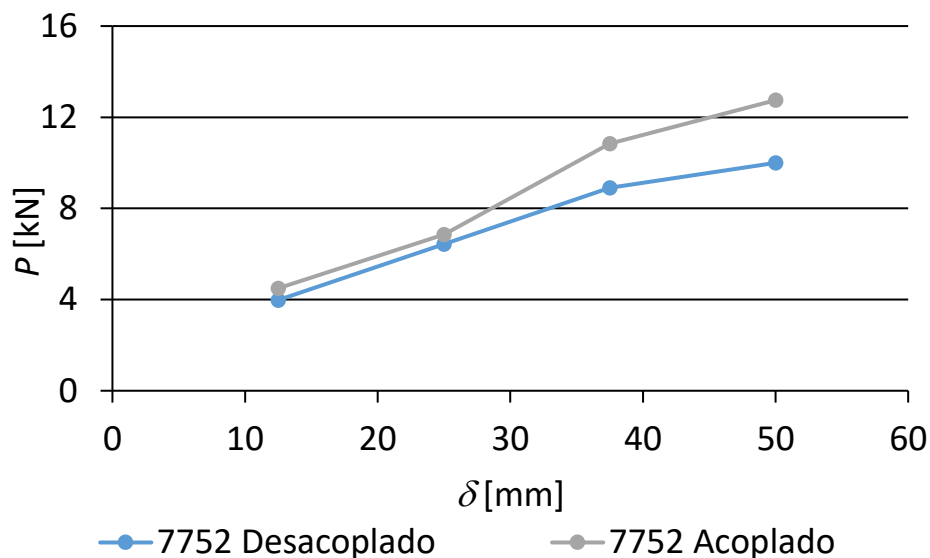


Figura 80 - Comparação entre os diferentes modos de carregamento para o adesivo 7752

Para o adesivo 7752 (Figura 80), é possível verificar que os valores do acoplado foram superiores ao desacoplado. As diferenças em valores percentuais foram: para o L_0 de 12,5 mm o acoplado é superior em 12,99%, para L_0 de 25 mm o acoplado é superior em

6,47%, para L_0 de 37,5 mm o acoplado é superior em 21,76% e, por fim, para o L_0 de 50 mm o acoplado é superior em 27,49%.

A Figura 81 representa os valores entre os resultados acoplado e desacoplado para o adesivo AV138. Tal como no adesivo anteriormente mencionado, todos os valores acoplados são superiores aos valores desacoplado. De facto, os valores percentuais foram: L_0 de 12,5 mm o acoplado é superior em 24,92%, para L_0 de 25 mm o acoplado é superior em 26,12%, para L_0 de 37,5 mm o acoplado é superior em 23,53% e, por fim, o L_0 de 50 mm o acoplado é superior em 25,14%.

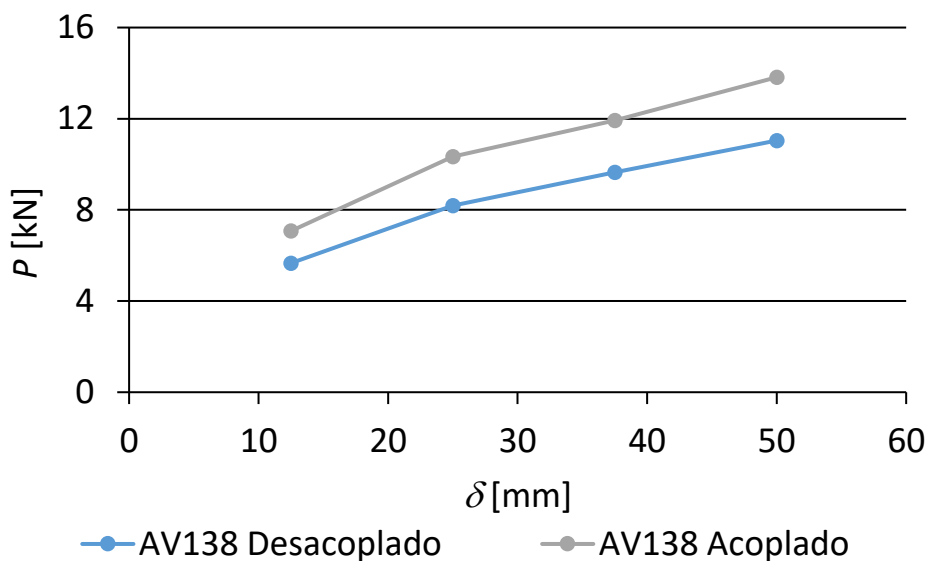


Figura 81 - Comparação entre os diferentes modos de carregamento para o adesivo AV138

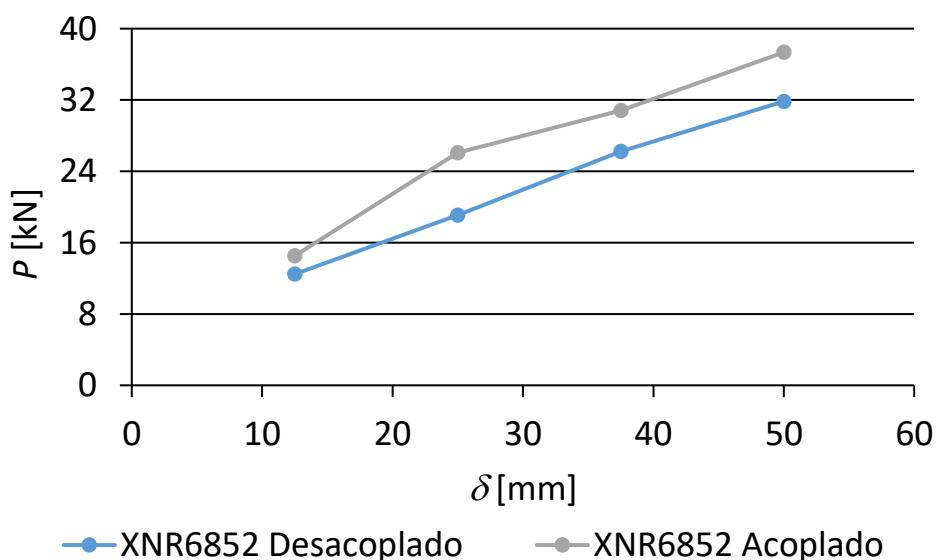


Figura 82 – Comparação entre os diferentes modos de carregamento para o adesivo XNR6852

Em suma, a Figura 82 representa análise realizada para o adesivo XNR6852. Mais uma vez, os valores acoplados apresentaram mostraram-se superiores aos desacoplados. Para os demais valores de L_0 , os desvios foram 16,50% para L_0 igual a 12,5 mm, 36,71% para L_0 igual a 25 mm, 17,51% para L_0 igual a 37,5 mm e 17,26% para L_0 de 50 mm.

3.2.4.3 Forma da lei coesiva

Na análise seguinte foram usadas três leis distintas no modo desacoplado para verificar qual a lei que se ajusta melhor a cada tipo de adesivo. As leis foram a triangular, a exponencial e a trapezoidal. A Figura 83 mostra a influência das diferentes leis para vários L_0 do adesivo 7752.

Através da análise da Figura 83 é possível ver que as três leis apresentam valores muito próximos da triangular. A lei que melhor se ajusta à lei triangular é a exponencial, com um desvio máximo de 0,12% para L_0 de 37,5 mm. Contudo, o maior desvio registado na lei trapezoidal em relação à triangular foi de 2,4% para L_0 de 25 mm.

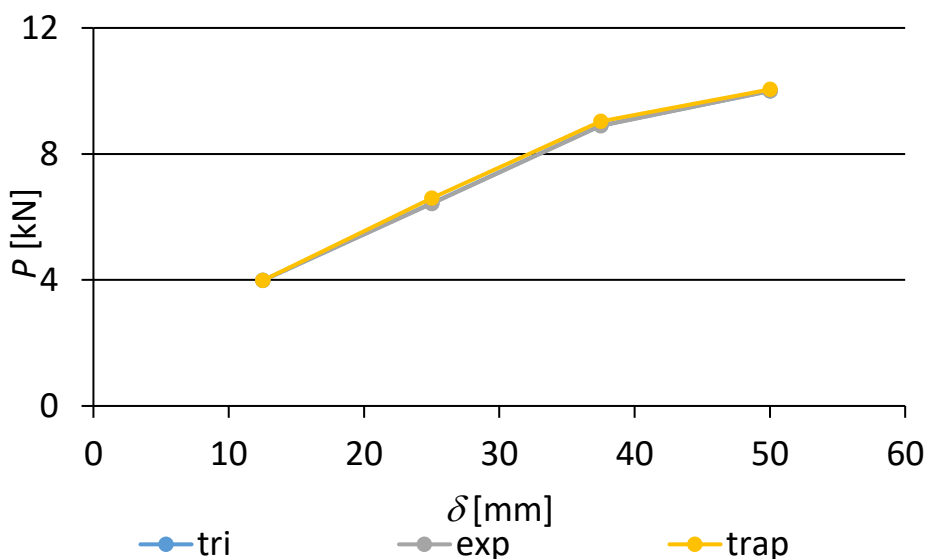


Figura 83 - Comparação das diferentes leis para o adesivo 7752

A Figura 84 mostra a influência das diferentes leis para o adesivo AV138. Por observação da Figura 84 é possível verificar que a lei triangular, a exponencial e a trapezoidal apresentam valores próximos entre si. Os desvios da lei exponencial em relação à triangular foram: 2,29% para L_0 de 12,5 mm, 3,66% para L_0 de 25 mm, 1,24% para L_0 de 37,5 mm e de 0,69% para L_0 de 50 mm. Já em relação à trapezoidal os valores dos desvios foram: 4,37% para L_0 de 12,5 mm, 3,30% para L_0 de 25 mm, 1,55% para L_0 de 37,5 mm e de 1,81% para L_0 de 50 mm.

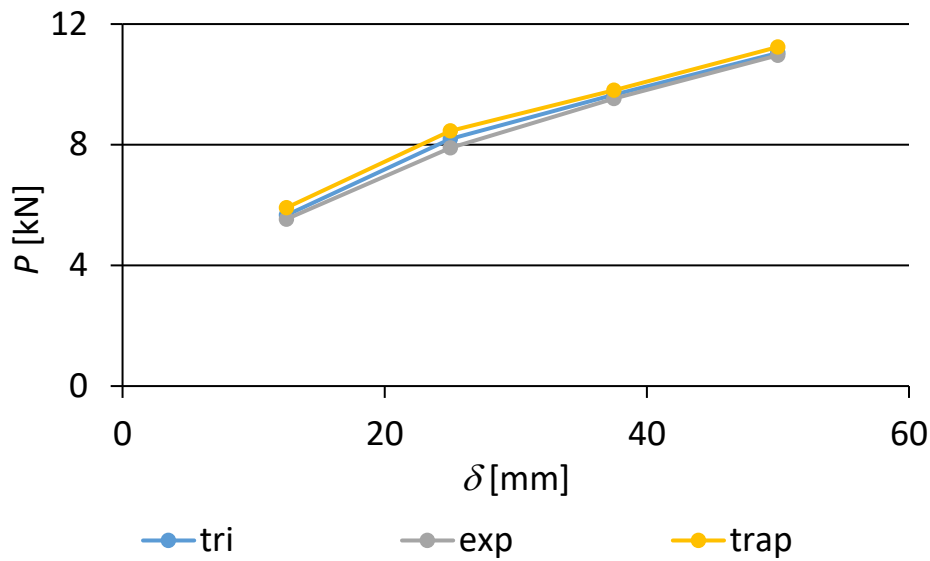


Figura 84 - Comparação das diferentes leis para o adesivo AV138

Tal como no adesivo 7752, anteriormente mencionado, a influência das diferentes leis do adesivo XNR6852 (Figura 85) apresenta resultados semelhantes entre si. Os desvios da lei exponencial em relação à triangular foram: 0,65% para L_0 de 12,5 mm, 0,37% para L_0 de 25 mm, 2,95% para L_0 de 37,5 mm e de 0,36% para L_0 de 50 mm. Já a diferença da trapezoidal em relação ao triangular foi de 1,94% para L_0 de 12,5 mm, 0,34% para L_0 de 25 mm, 3,49% para L_0 de 37,5 mm e de 0,81% para L_0 de 50 mm.

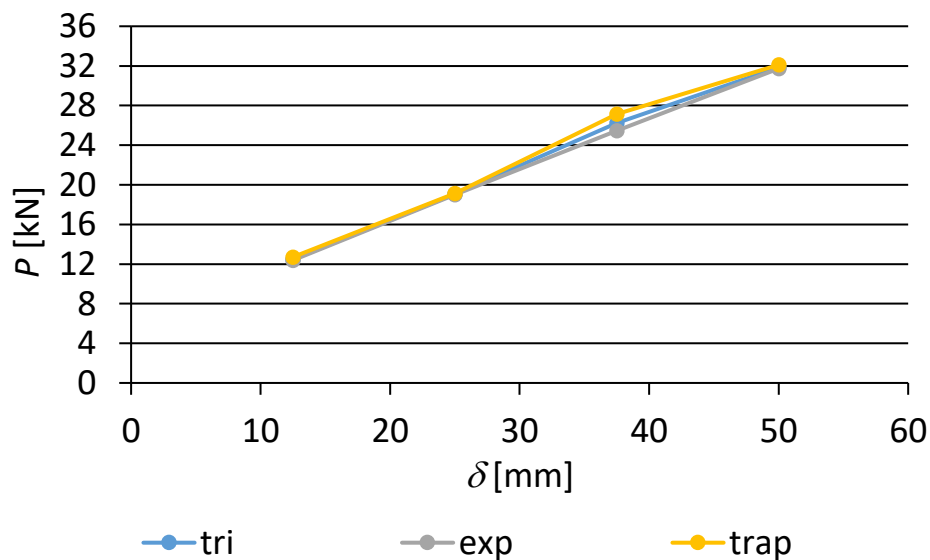


Figura 85 – Comparação das diferentes leis para o adesivo XNR6852

3.2.4.4 Critério de iniciação de dano

Neste subcapítulo vai-se estudar os diferentes critérios de iniciação de dano para cada adesivo. Os critérios foram: o Quads, o Maxs, o Maxe e o Quade.

O critério QUADS (critério de tensão quadrática) é dado pela seguinte expressão:

$$f = \left(\frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_n^0} \right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^0} \right)^2, \quad (7)$$

onde t_n , t_s e t_t representam os valores máximos de tensão nominal pura para a direção normal e tangencial, respetivamente. O dano começa quando $f=1$.

O critério MAXS (critério de máxima tensão nominal) representa-se segundo a seguinte fórmula:

$$f = \max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\}, \quad (8)$$

onde os t_n , t_s e t_t representam os valores máximos de tensão nominal pura para a direção normal e as tangenciais, respetivamente. O dano começa quando $f=1$.

O critério MAXE (critério de máxima deformação nominal) é definido segundo a seguinte expressão:

$$f = \max \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0}, \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0}, \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^0} \right\}, \quad (9)$$

onde os ε_n , ε_s e ε_t representam os valores máximos de deformação nominal pura para a direção normal e tangenciais, respetivamente. O dano começa quando $f=1$.

O critério QUADE (critério de deformação quadrática) é dado pela seguinte expressão:

$$f = \left(\frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_n^0} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^0} \right)^2, \quad (10)$$

onde os ε_n , ε_s e ε_t representam os valores máximos de deformação nominal pura para a direção normal e para a tangenciais, respetivamente. O dano começa quando $f=1$.

Na Figura 86 é possível ver que, para o adesivo 7752, os critérios Quads e Maxs apresentam resultados muito semelhantes entre si para todos os comprimentos de L_0 , enquanto os critérios Maxe e Quade se distanciam. O desvio máximo do Maxs, registado em relação ao Quads, é de 2,94% para L_0 de 50 mm, ao passo que o desvio do Maxe é de 626,14% para L_0 de 12,5 mm e para o Quade é de 539,28% para L_0 de 12,5 mm.

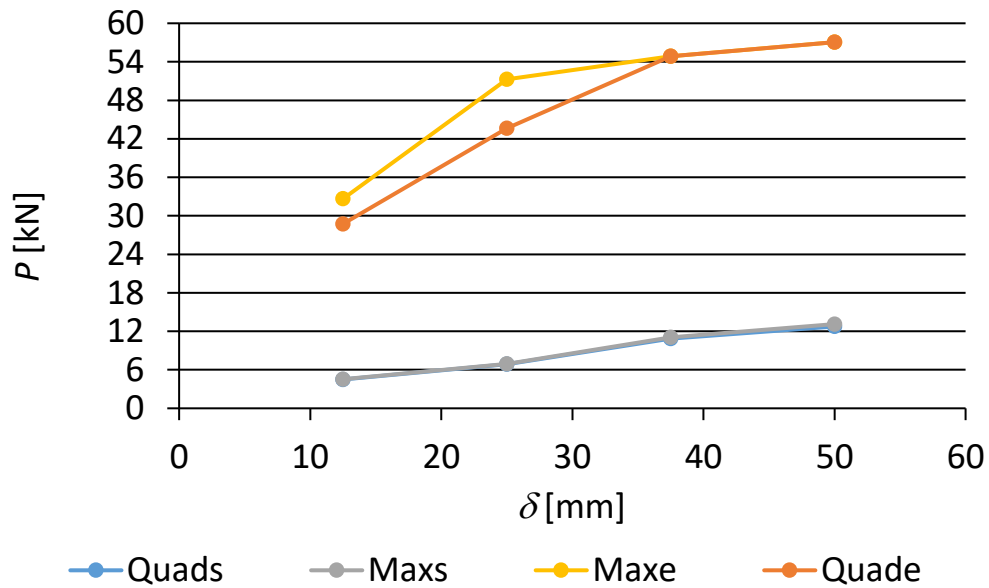


Figura 86 – Comparação dos vários critérios de iniciação de dano para o adesivo 7752

Os resultados do adesivo AV138 mostram-se muito próximos entre os critérios Quads e Maxs.

Na Figura 87 é possível verificar mais uma vez que, para o adesivo AV138, os critérios Quads e Maxs apresentam valores semelhantes entre si para os vários L_0 . O desvio máximo do Maxs registado em relação ao Quads é de 2,54% para L_0 de 25 mm, ao passo que o desvio do Maxe é de 160,90% para L_0 de 12,5 mm e para o Quade é de 109,87% para L_0 de 12,5 mm.

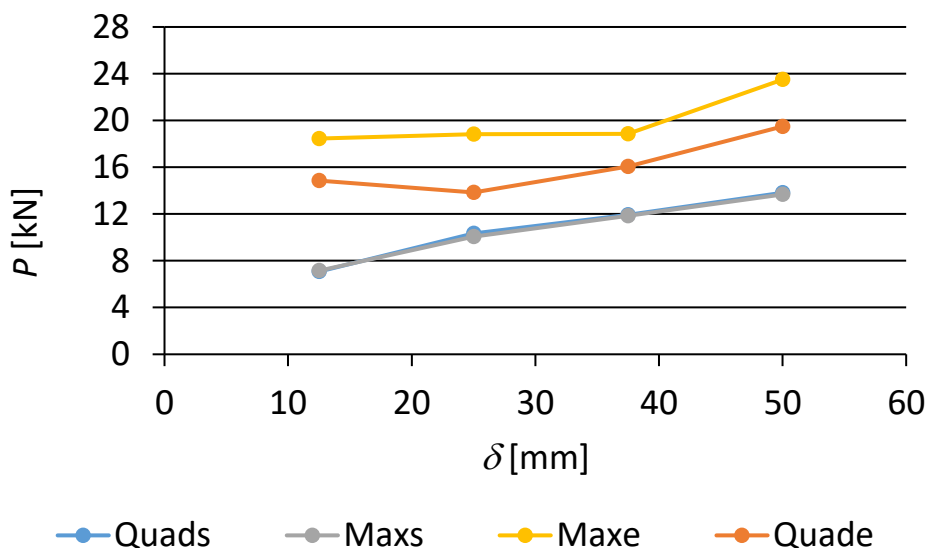


Figura 87 - Comparação dos vários critérios de iniciação de dano para o adesivo AV138

No adesivo XNR6852 (Figura 88) os critérios voltam a apresentar resultados semelhantes entre o Quads e o Maxs, e o Maxe e Quade. Em relação aos desvios registados, o máximo do Maxs em relação ao Quads é de 4,95% para L_0 de 25 mm, ao passo que o desvio do Maxe é de 258,34% para L_0 de 12,5 mm e para o Quade é de 258,34% para L_0 de 12,5 mm.

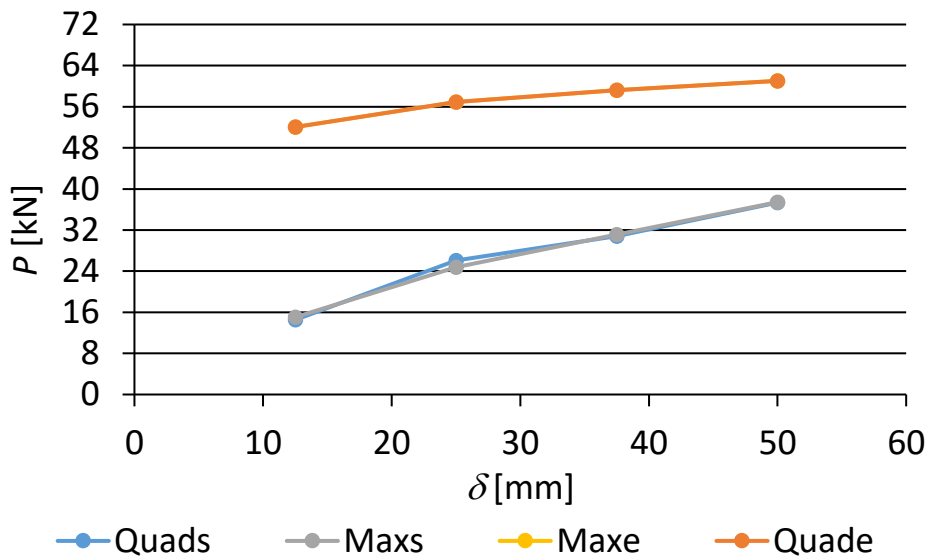


Figura 88 - Comparação dos vários critérios de iniciação de dano para o adesivo XNR6852

É possível concluir que, quando maior for o L_0 , maior será a força P para iniciação do dano.

3.2.4.5 Critério de propagação de dano

O critério *Power Law* (PW) estabelece que a falha sob condições mistas é determinada pela interação, por uma lei de potências, das energias necessárias para causar o dano nos modos individuais (normal e dois tangencial). A expressão é a seguinte:

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right)^\alpha = 1, \quad (11)$$

onde o G_I , G_{II} e G_{III} representa o trabalho realizado pelas tensões e deslocamentos associados às direções normais e tangenciais, respetivamente. G_{IC} , G_{IIC} e G_{IIIC} representam as energias que causam a falha nas direções normais, primeira e segunda tangenciais, respetivamente. O parâmetro α foi estudado para valores de 0,5; 1; 1,5; e 2.

O critério Benzeggagh-Kenane (BK) é especialmente útil quando as energias de fratura em ambas direções tangenciais coincidem, ou seja, $G_{IIC} = G_{IIIC}$. Este modelo é dado pela seguinte equação:

$$G_{eq}^c = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right)^\eta, \quad (12)$$

onde os valores de G_{IC} e G_{IIC} representam as taxas críticas de libertação de energia de fratura. η trata-se de um parâmetro do material. Os valores estudados foram 0,5; 1; 1,5.

Para os dois critérios referidos anteriormente, o critério de iniciação usado foi o Quads. Este capítulo aborda a precisão da lei PW e BK. A BK foi realizada variando o parâmetro η para valores de 0,5, 1 e 2,5 comparando com os valores base de PW 1. Já o PW foi elaborado variando o parâmetro α para valores de 0,5; 1; 1,5; 2.

Para o adesivo 7752, todos os parâmetros são muito semelhantes entre si, como se pode ver nas Figura 89 e Figura 90. O desvio máximo entre o BK 0,5 em relação ao PW 1 é de 0,07% para L_0 de 37,5 mm, entre o BK 1 e PW 1 é de 0,04% para L_0 de 50 mm e para BK e PW 1 é de 0,02 para L_0 de 50 mm. Pode-se concluir que o parâmetro α não é muito influenciador neste adesivo e que o melhor que se ajusta ao PW 1 é o BK 2,5.

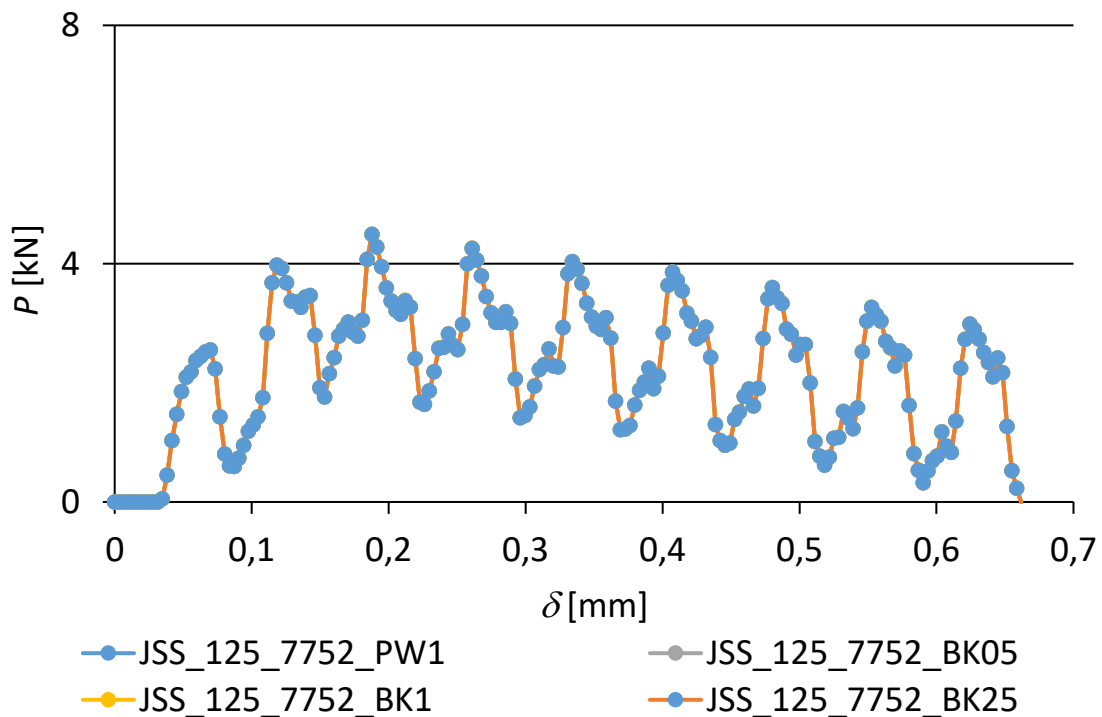


Figura 89 – Comparação entre os vários parâmetros BK para L_0 de 12,5 para o adesivo 7752

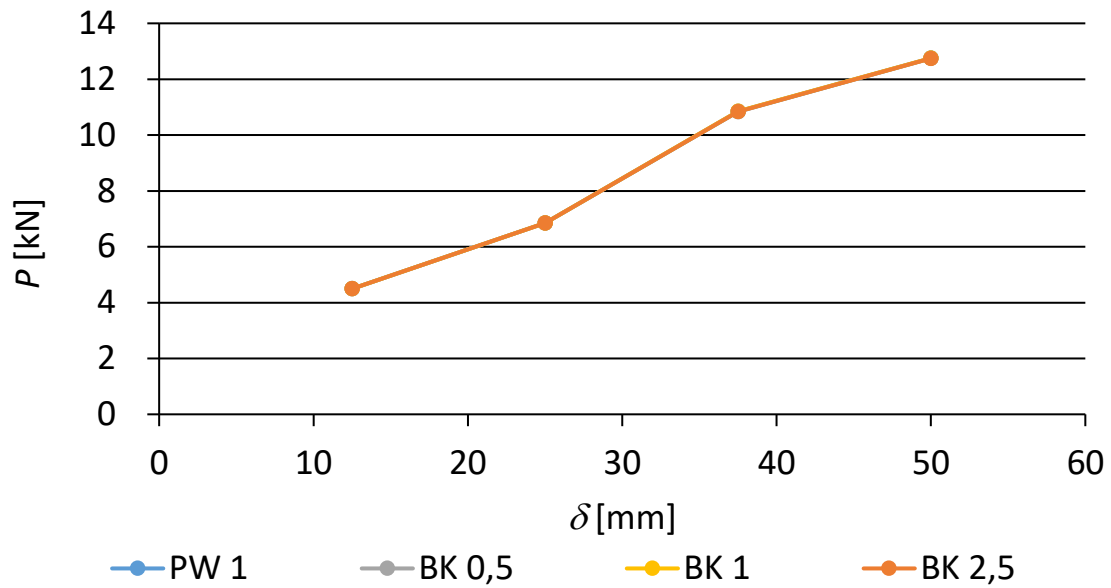


Figura 90 - Comparação entre os varios parâmetros BK para o adesivo 7752

Nas Figura 91 e Figura 92, referente ao mesmo adesivo, mostra-se que para o critério PW, considerando vários valores de α (0,5, 1, 1,5 e 2), surgiram resultados muito semelhantes. O desvio máximo entre o PW 0,5 em relação ao PW 1 é de 0,48% para L_0 de 37,5 mm, entre o PW 1,5 e PW 1 é de 0,07% para L_0 de 37,5 mm e para PW 2 e PW 1 é de 0,1% para L_0 de 37,5 mm. Pode-se concluir que o parâmetro η não é muito influenciador neste adesivo e que o melhor ajuste ao PW 1 é o PW 1,5.

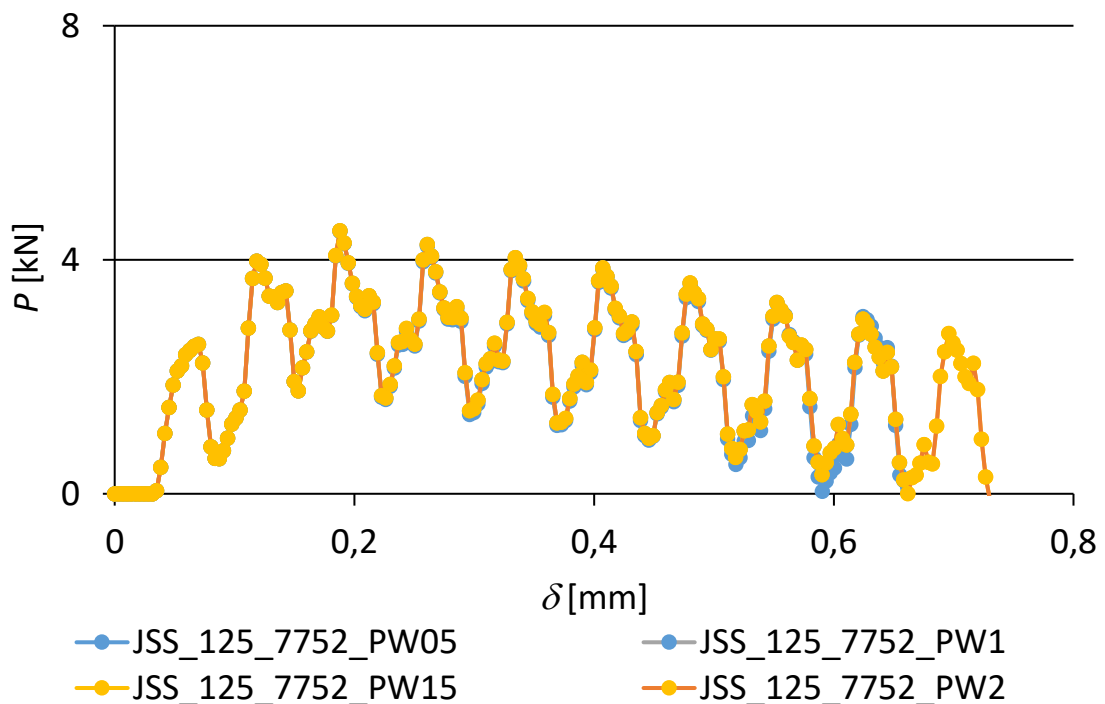


Figura 91 - Comparação entre os varios parâmetros PW para L_0 de 12,5 para o adesivo 7752

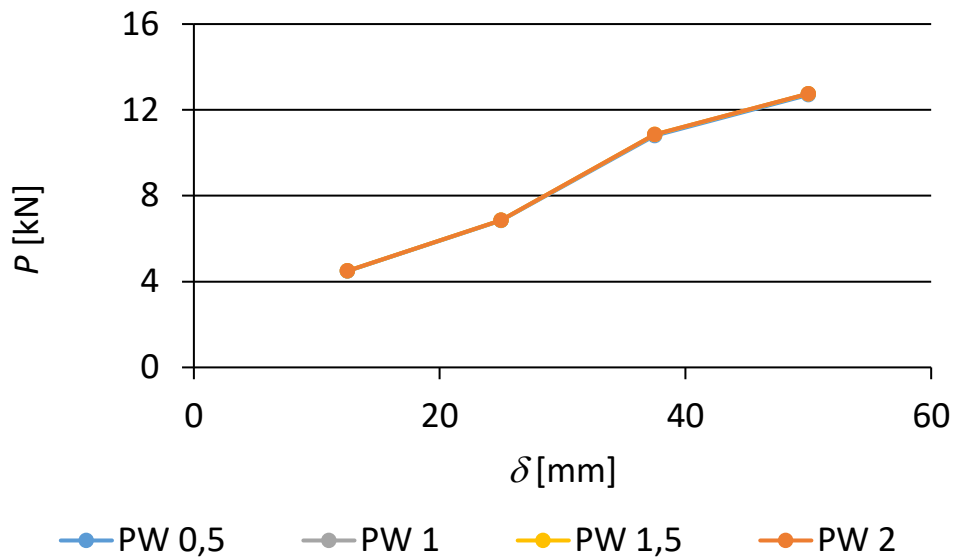


Figura 92 - Comparação entre os varios parâmetros PW para o adesivo 7752

A comparação apresentada nas Figura 93 e Figura 94 refere-se ao adesivo AV138. Os resultados foram semelhantes entre os diferentes valores de α e comprimentos de L_0 . O desvio máximo entre o BK 0,5 em relação ao PW 1 é de 5,09% para L_0 de 25 mm, entre o BK 1 e PW 1 é de 3,06% para L_0 de 25 mm e para BK 2,5 e PW 1 é de 10,88% para L_0 de 25 mm. O parâmetro que melhor se ajusta ao PW 1 é o BK 1.

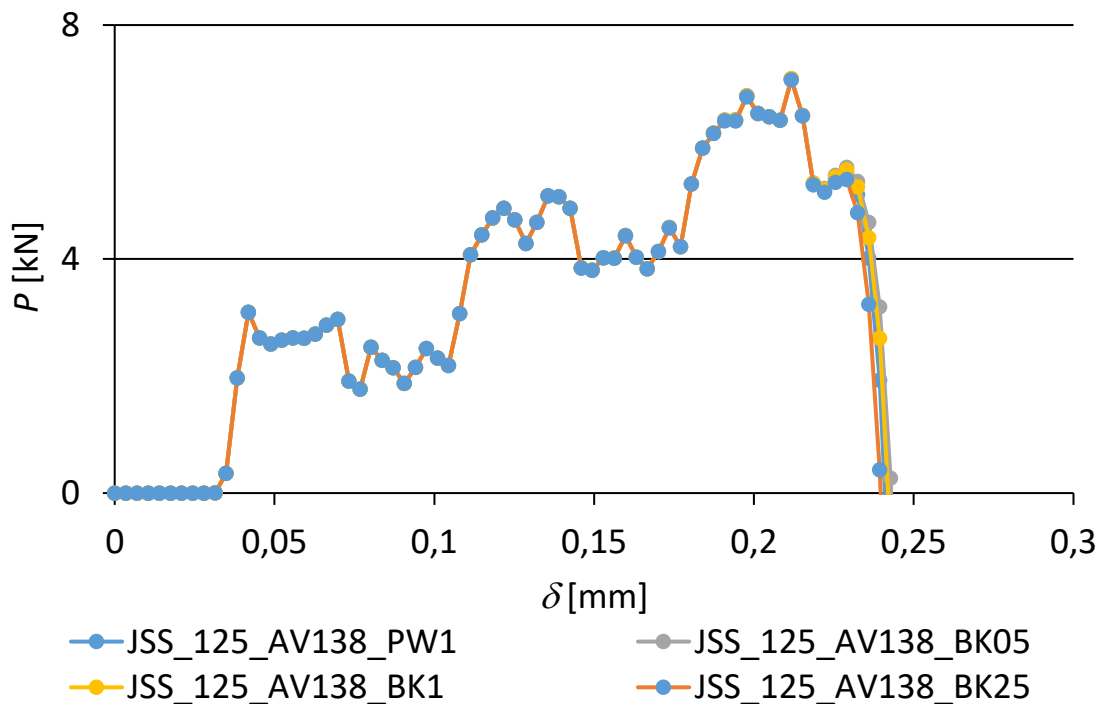


Figura 93 - Comparação entre os varios parâmetros BK para L_0 de 12,5 para o adesivo AV138

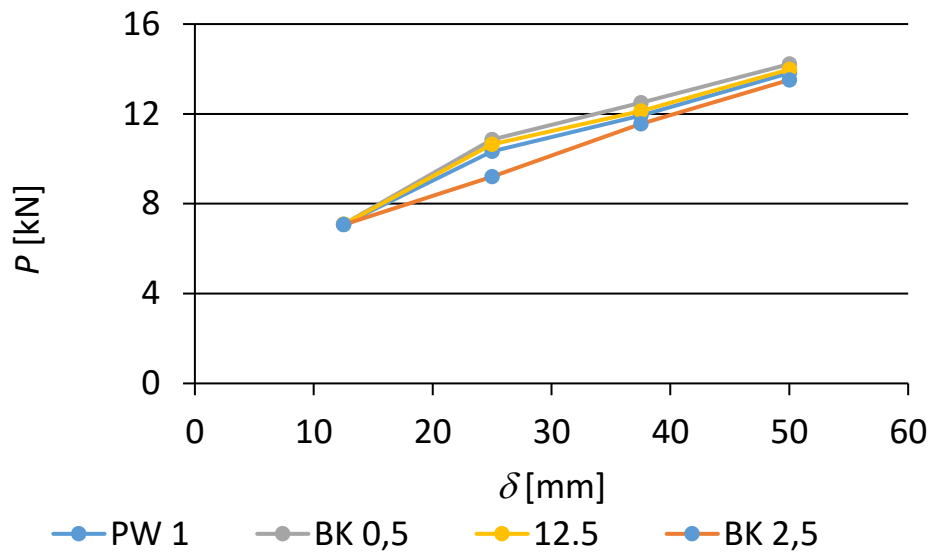


Figura 94 - Comparação entre os varios parâmetros BK para o adesivo AV138

Na Figura 95 e Figura 96, referentes ao mesmo adesivo, mostram-se os valores obtidos pelo critério PW. O desvio máximo entre o PW 0,5 em relação ao PW 1 é de 23,73% para L_0 de 25 mm, entre o PW 1,5 e PW 1 é de 5,92% para L_0 de 37,5 mm e para PW 2 e PW 1 é de 7,64% para L_0 de 37,5 mm. É possível concluir que o PW 0,5, como apresenta o maior desvio, é o pior critério para este adesivo, enquanto o melhor é o PW 1,5.

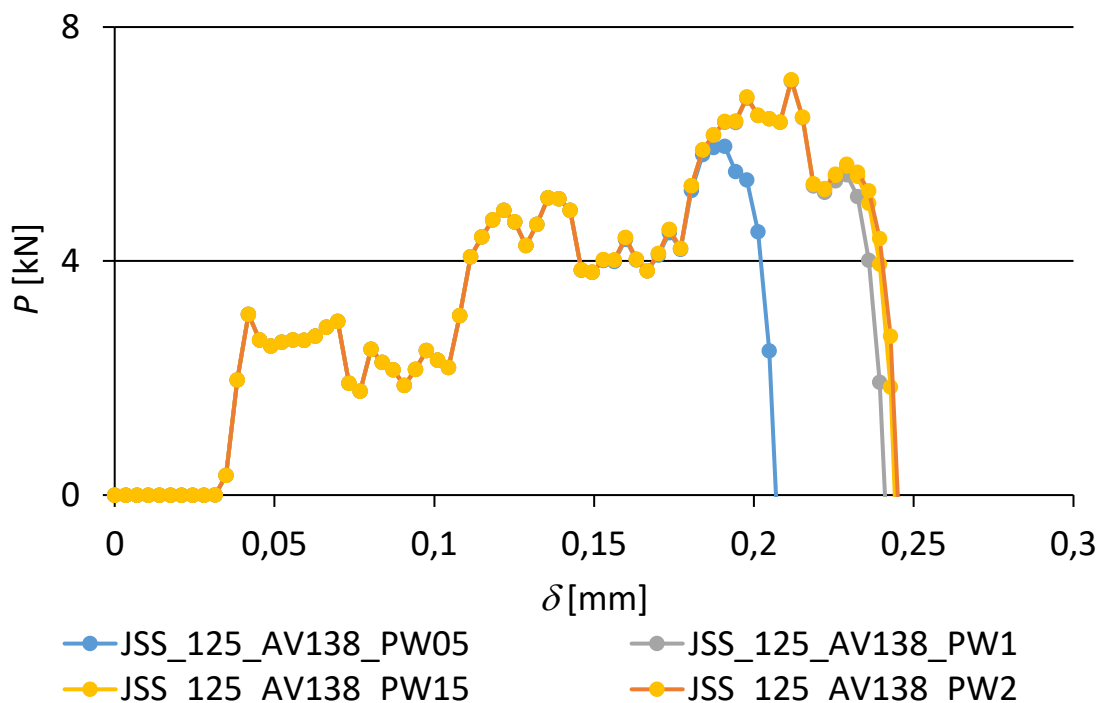


Figura 95 - Comparação entre os varios parâmetros PW para L_0 de 12,5 para o adesivo AV138

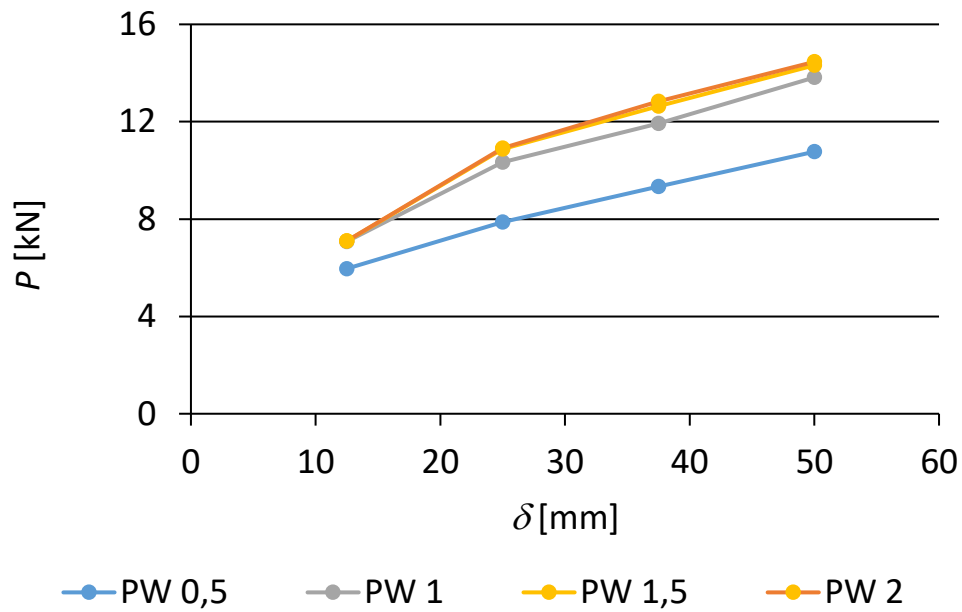


Figura 96 - Comparação entre os varios parâmetros PW para o adesivo AV138

A Figura 97 é referente ao adesivo XNR6852, onde relata o critério BK. O desvio máximo entre o BK 0,5 em relação ao PW 1 é de 42,07% para L_0 de 50 mm, entre o BK 1 e PW 1 é de 41,55% para L_0 de 50 mm e para BK 2,5 e PW 1 é de 29,37% para L_0 de 50 mm. O parâmetro que melhor se ajusta ao PW 1 é o BK 2,5. Também é possível verificar que, para L_0 inferiores a 25 mm, o desvio não ultrapassa os 14,05%.

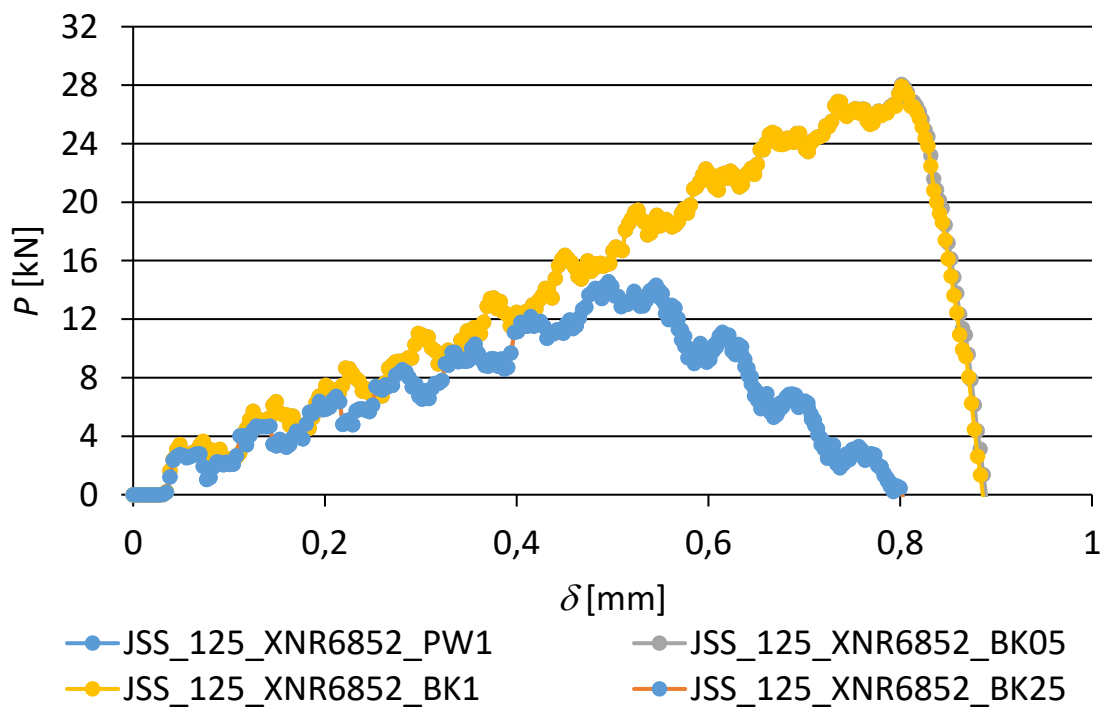


Figura 97 - Comparação entre os varios parâmetros BK para L_0 de 12,5 para o adesivo XNR6852

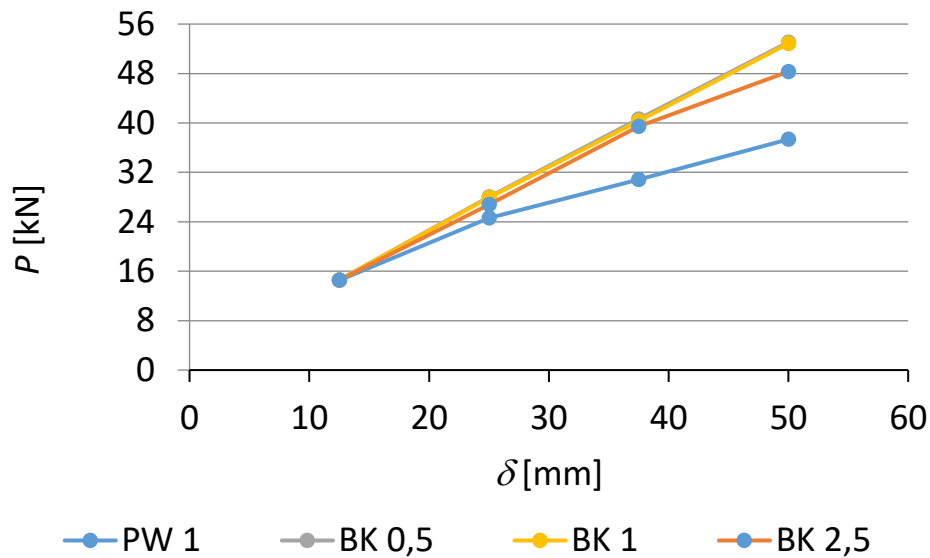


Figura 98 - Comparação entre os varios parâmetros BK para o adesivo XNR6852

Na Figura 99 e Figura 100, referentes ao mesmo adesivo, mostra-se os valores obtidos pelo critério PW. O desvio máximo entre o PW 0,5 em relação ao PW 1 é de 21,33% para L_0 de 25 mm, entre o PW 1,5 e PW 1 é de 6,78% para L_0 de 50 mm e para PW 2 e PW 1 é de 15,54% para L_0 de 50 mm. Assim, pode-se concluir que o que apresenta melhor resultado é o PW 1,5 e o pior PW 0,5.

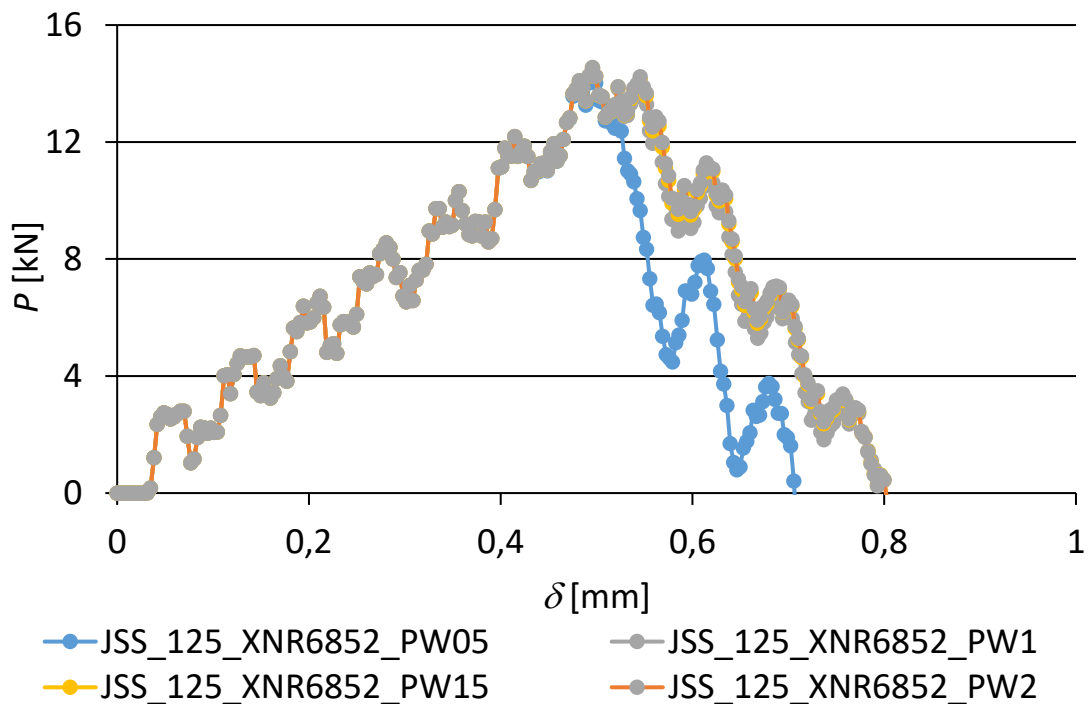


Figura 99 - Comparação entre os varios parâmetros PW para L_0 de 12,5 para o adesivo XNR6852

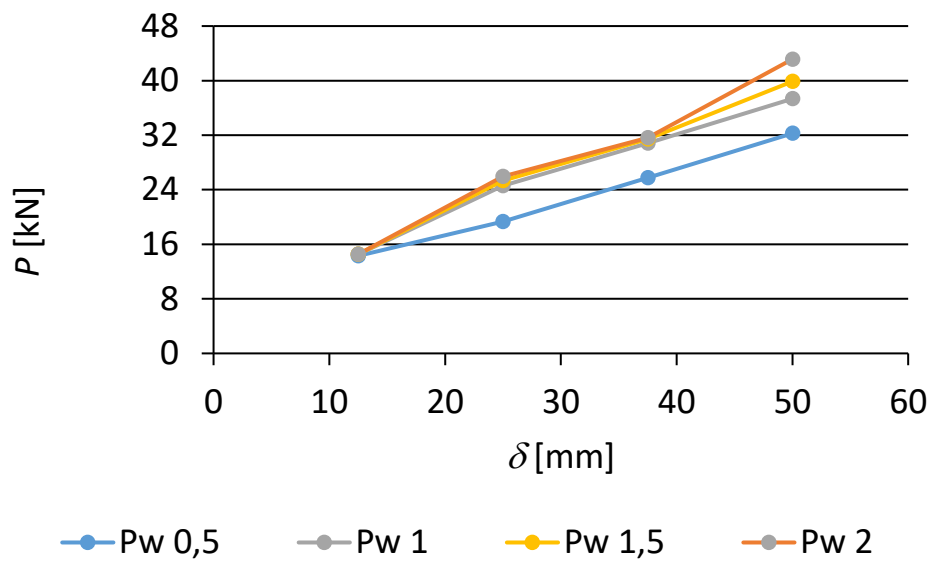


Figura 100 - Comparação entre os varios parâmetros PW para o adesivo XNR6852

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Os principais objetivos deste trabalho foram o estudo do comportamento de três adesivos estruturais diferentes para os vários critérios. Os critérios de estudo foram a rigidez elástica da lei coesiva, o desacoplamento dos modos de carregamento com a lei triangular, forma da lei coesiva, critério de iniciação de dano e critério de propagação de dano.

As conclusões para as diferentes análises foram as seguintes:

- A rigidez elástica coesiva da lei coesiva para o adesivo 7752 revelou pouca influência, uma vez se tratar de um adesivo dúctil. Desta forma, o adesivo sofre plastificação, tornando-se menos dependente da rigidez elástica do adesivo. O desvio máximo registado em relação ao valor original foi para -75% com L_0 de 12,5 mm, onde registou 9,75%. Já para o adesivo AV138 verificou-se um desvio maior que o anterior, na ordem dos 11% para um L_0 de 12,5 mm com uma variação de -75%. No caso do adesivo XNR6852, o desvio sofrido foi de valor intermédio a estes dois casos anteriores, cerca de 4%, uma vez que se trata do material com flexibilidade moderada.
- Para a distribuição de tensões de arrancamento registadas no adesivo 7752, verificou-se que o pico ocorreu para um L_0 de 25 mm, alcançando o valor de 10. A curva que apresentou os melhores resultados foi de 12,5 mm que, atingiu $\sigma_y/\tau_{med}=1,5$. A tensão de corte para este adesivo verificou-se que os valores máximos foram para L_0 de 50 mm e 37,5 mm com valor aproximado de 2. Como se trata de um adesivo dúctil, este permite uma melhor distribuição de esforços e, devido à sua flexibilidade, apresenta os menores valores. Para o adesivo AV138, como se trata de um adesivo rígido, este apresentou a tensão de arrancamento superior dos três adesivos de estudo. A curva com maior valor foi para L_0 de 25 mm e 37,5 mm. As tensões de corte máxima foram obtidas para L_0 de 50 mm e as mínimas para L_0 de 12,5 mm. Por fim, o pico da tensão de arrancamento para o adesivo XNR6852 foi obtido para L_0 de 25 mm, e o melhor desempenho para L_0 de 50 mm. Já nas tensões de corte, o máximo foi para L_0 de 50 mm e o melhor para L_0 de 12,5 mm. Como se trata de um adesivo com rigidez intermedia em relação ao adesivo 7752 e AV138, a magnitude da concentração de tensões de corte encontra-se intermédia. De um modo em geral verifica-se que as tensões σ_y/τ_{med} apresentam valores inferiores às tensões τ_{xy}/τ_{med} exceto em zonas particulares, como é o caso das extremidades da ligação da junta.

Também se concluiu que os picos de σ_y/τ_{med} e τ_{xy}/τ_{med} ocorrem sempre nas extremidades da ligação.

- No estudo do desacoplamento dos modos de carregamento verificou-se que, para todos os adesivos, os valores do modelo acoplado apresentaram valores superiores ao desacoplado. Isto acontece porque o cálculo do acoplado é mais grosseiro. Para o adesivo 7752 o desvio máximo foi de 27,49% para L_0 de 50 mm. Já para o adesivo AV138 o desvio máximo foi de 26,12% para L_0 de 37,5 mm. Por fim, o adesivo XNR6852 apresentou um desvio máximo de 36,71% para L_0 de 25 mm.
- A análise da forma da lei coesiva mostrou que os adesivos 7752, AV138 e XNR6852 apresentaram valores muito próximos para os três critérios (triangular, exponencial e trapezoidal). O desvio máximo foi registado no trapezoidal e foi de 4,37% para um L_0 de 12,5 mm. O desvio mínimo foi de 0,69% para um L_0 de 50 mm. Em suma, concluiu-se que os três critérios não variam muito os seus valores para os adesivos do estudo.
- Os estudos dos critérios de iniciação de dano mostraram que os critérios Quads e Maxs apresentaram resultados próximos para todos os adesivos. Já os critérios Maxe e Quade apresentaram valores mais discrepantes, tornando não recomendável a sua aplicação nestes adesivos.
- A análise dos critérios de propagação de dano permitiu concluir que, para o adesivo 7752, tanto os valores de BK como PW são bastantes semelhantes, com desvios máximos de 0,5%. Para o adesivo AV138, os parâmetros BK apresentaram resultados semelhantes, exceto o BK 2,5, que se distanciou mais do que os outros. No parâmetro PW aquele que melhor se ajustou ao PW 1 é o PW 1,5 e PW 2. Por fim, a análise do adesivo XNR6852 apresentou valores de BK próximos para L_0 inferior a 25 mm. No parâmetro PW, o valor que melhor se ajustou foi o PW 1,5 com um desvio de 6,78%.

Para trabalhos futuros sugere-se a comparação dos resultados obtidos neste trabalho com um trabalho experimental e a comparação de resultados com simulações 3D para avaliar efeitos sobre as tensões que possam surgir em simulações 3D que em 2D não ocorreram.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] R.D and Adams, "Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications," *Elsevier Science*, 2005.
- [2] E. M. Petrie, "Handbook of Adhesives and Sealants," *McGraw-Hill Education*, 2007.
- [3] A. M. G. Pinto, "Ligações adesivas," I. S. E. Porto, Ed., ed, 2016/2017.
- [4] J. Da Silva, "Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido," Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2012.
- [5] L. F. M. d. Silva, "A. Öchsner, and R.D. Adams, Handbook of Adhesion Technology," *Springer Berlin Heidelberg*, 2011.
- [6] L. F. M. d. Silva, A. G. d. Magalhaes, and M. F. S. d. Moura, *Juntas adesivas estruturais*. Publindústria, 2007.
- [7] P. KD, "Applications of adhesives in aerospace," *Adams RD. Adhesive bonding: Science, technology and applications*, Woodhead Publishing Limited. Cambridge England, 2005.
- [8] (05/2018). *Adesivo empregue num componente de avião*. Available: https://www.google.pt/search?q=aeronautical+structural+adhesives&tbm=isch&tbs=rimg:CQIO-707mPCXljiVAEalA3IpLL-8YbQnwrZHRhY1TKPGQQ9VrQE2ZM3udpylLe7wTf_1cuq57eWPHU0bp2RjCyDCkXCoSCZUARqUDciksEdql8ckg8RZGKhIjv7xhtCfCtkcRAnTIJuxEJ5kqEglGFjVMo8ZBDxFgQYaj57xPmioSCVWtATZkze52EdDiaaVOgg-RKhIjNkUt7vBN_19wRU8-T9khDqHQqEgm6rnt5Y8dTRhFAmqqsU0dunyoSCenVGMLIMKRcEa2Xf-7VxZYe&tbo=u&sa=X&ved=2ahUKEwje4cqI4dDbAhXB1hQKHXP7BiYQ9C96BAGBEBs&biw=1536&bih=734&dpr=1.25#imgsrc=qWyjtx8neDJsZM:
- [9] H. M. B. a. marine, *Adams RD. Adhesive bonding: Science, technology and applications*. Woodhead Publishing Limited. Cambridge England, 2005.
- [10] (05/2018). *Aplicação de adesivo num barco*. Available: https://www.google.pt/search?q=naval+structural+adhesives&tbm=isch&tbs=rimg:CSOuZKSKbP-6ljgOZzsXRZX9W6VluvAuQpnxDbdwKuSRoHEkGeCpe_1oUwpyMBbFvQvpRctepU0SUphU80hz43j9WyoSCQ5nOxdFlf1bERK6gzJOFS0KKhIjPWW68C5CmfERyCTu8y6oNngqEgkNt3Aq5JGgcRHG9LFOU2EFLioSCSQZ4I97-hTCEaAKfreEO5uWKhIjNlwFsW9C-IERllqm4zc7lgUqEgly176lTRJskRH2AIOTcY3_1_1ioSCdTzSHPjeP1bEZ0-GEijHHHT&tbo=u&sa=X&ved=2ahUKEwiUgq-p5NDbAhVDEVAKH12Cr0Q9C96BAGBEBs&biw=1536&bih=686&dpr=1.25#imgsrc=Dmc7F0WV_VuMvM:
- [11] D. K. Automobiles, "Adhesive bonding: Science, technology and applications. Woodhead Publishing Limited," *Cambridge England*, 2005.
- [12] (05/2018). *Adesivos estruturais na indústria automóvel* Available: <https://www.google.pt/search?biw=1536&bih=686&tbm=isch&sa=1&ei=Dh4h>

- [W7T8DYHyUv37u5gO&q=automotive+structural+adhesives&gs_l=img.3...591157.591157.0.591659.1.1.0.0.0.111.111.0j1.1.0....0...1c.1.64.img..0.0.0....0.C8DoX32BXJM#imgsrc=J6nJLFKLSWYMaM:](https://www.google.com/search?q=automotive+structural+adhesives&gs_l=img.3...591157.591157.0.591659.1.1.0.0.0.111.111.0j1.1.0....0...1c.1.64.img..0.0.0....0.C8DoX32BXJM#imgsrc=J6nJLFKLSWYMaM:)
- [13] J. Martín-Martínez, "Adhesive bonding: Science, technology and applications," *Woodhead Publishing Limited.*, Cambridge England, 2005.
- [14] A. Pinto, "Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos," Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [15] M. R.D.F., "Estudo de reparações adesivas pela técnica de remedo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência," Tese Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013.
- [16] D. Packham, "Handbook of Adhesion," *John Wiley & Sons, Chichester*, 2005.
- [17] I. O. f. Standardization, *ISO 527-2:2012, Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*. 2012.
- [18] L. F. M. d. Silva, D. A. Dillard, B. Blackman, and R. D. Adams, *Testing adhesive joints: best practices* (John Wiley & Sons). 2012.
- [19] "ASTM D695. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, ASTM," 2010.
- [20] A. International, *ASTM D5379/D5379M-12 Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*. 2012.
- [21] A. International, "ASTM D897 -08(2016) Standard Test Method for Tensile Properties of Adhesive Bonds," 2016.
- [22] I. O. f. Standardization, "ISO 11003-2:2001 Adhesives -- Determination of shear behaviour of structural adhesives -- Part 2: Tensile test method using thick adherends.," 2001.
- [23] A. International, *ASTM D3983 - 98(2011) Standard Test Method for Measuring Strength and Shear Modulus of Nonrigid Adhesives by the Thick-Adherend Tensile-Lap Specimen*. 2011.
- [24] A. International, *ASTM D1876-08(2015) Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test)*. 2015.
- [25] A. International, *ASTM D903 - 98(2010) Standard Test Method for Peel or Stripping Strength of Adhesive Bonds*. 2010.
- [26] A. International, "ASTM D3433-99(2012) Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints," 2012.
- [27] (05/2018). *Ensaio de Charpy*. Available: https://www.google.pt/search?q=ensaio+de+charpy&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjJ-rK62a3bAhXC6RQKHZRIACIQ_AUICigB&biw=1536&bih=734#imgsrc=f8OgY5WY62-gVM:
- [28] O. Volkersen, "Die nietkrafterteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten," *Luftfahrtforschung* 15, pp. 41-47, 1938.
- [29] R. D. Adams and N. A. Peppiatt, "Stress analysis of adhesive-bonded lap joints," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 9, no. 3, pp. 185-196, July 1, 1974 1974.

- [30] J. A. Harris and R. A. Adams, "Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 4, no. 2, pp. 65-78, 4// 1984.
- [31] J. L. Curiel Sosa and N. Karapurath, "Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method," *Composites Science and Technology*, vol. 72, no. 7, pp. 788-791, 4/13/ 2012.
- [32] R. D. Adams, J. Comyn, and W. C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*, 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1997.
- [33] S. K. Panigrahi 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*, vol. 26, no. 2, pp. 183-201, January 1, 2007 2007.
- [34] L. F. M. da Silva, A. G. de Magalhães, and M. F. S. F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Porto: Publindústria, 2007.
- [35] A. A. Griffith, "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 221, no. 582-593, pp. 163-198, 1921-01-01 00:00:00 1921.
- [36] M. L. Williams, "The stresses around a fault or crack in dissimilar media," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 49, no. 2, pp. 199-204, April 1, 1959 1959.
- [37] J. Hutchinson, "Plastic stress and strain fields at a crack tip," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 16, no. 5, pp. 337-342, 1968.
- [38] J. R. Rice, "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 35, no. 2, pp. 379-386, 1968.
- [39] G. Fernlund and J. K. Spelt, "Failure load prediction of structural adhesive joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 11, no. 4, pp. 221-227, 1991/10/01 1991.
- [40] G. I. Barenblatt, "The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks," *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 23, no. 3, pp. 622-636, 1959/01/01 1959.
- [41] D. S. Dugdale, "Yielding of steel sheets containing slits," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 8, no. 2, pp. 100-104, 5// 1960.
- [42] K. Duan, X. Hu, and Y.-W. Mai, "Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 39-53, 2004/01/01 2004.
- [43] G. Ji, Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, and S.-S. Pang, "Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 47, no. 18-19, pp. 2445-2458, 9// 2010.
- [44] A. Turon, J. Costa, P. P. Camanho, and C. G. Dávila, "Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, no. 11, pp. 2270-2282, 11// 2007.
- [45] M. S. Kafkalidis 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*, vol. 39, no. 17, pp. 4367-4383, 8// 2002.

- [46] L. F. M. da Silva and R. D. S. G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. Springer, 2011.
- [47] Q. D. Yang and M. D. Thouless, "Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints," (in English), *International Journal of Fracture*, vol. 110, no. 2, pp. 175-187, 2001/07/01 2001.
- [48] M. D. Banea, 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*, vol. 26, no. 7, pp. 939-953, 2012/04/01 2012.
- [49] O. Allix and A. Corigliano, "Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens," (in English), *International Journal of Fracture*, vol. 77, no. 2, pp. 111-140, 1996/06/01 1996.
- [50] G. Alfano 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*, vol. 50, no. 7, pp. 1701-1736, 2001.
- [51] N. Chandra, H. Li, C. Shet, and H. Ghonem, "Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 39, no. 10, pp. 2827-2855, 5// 2002.
- [52] J. Chen, "Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 15, no. 5, pp. 429-442, 2002.
- [53] A. M. G. Pinto, A. G. Magalhães, R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura, and A. P. M. Baptista, "Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive," *The Journal of Adhesion*, vol. 85, no. 6, pp. 351-376, 2009/05/26 2009.
- [54] C. D. M. Liljedahl, A. D. Crocombe, M. A. Wahab, and I. A. Ashcroft, "Damage modelling of adhesively bonded joints," (in English), *International Journal of Fracture*, vol. 141, no. 1-2, pp. 147-161, 2006/09/01 2006.
- [55] M. de Moura, J. Gonçalves, A. Marques, and P. De Castro, "Prediction of compressive strength of carbon–epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model," *Composite Structures*, vol. 50, no. 2, pp. 151-157, 2000.
- [56] R. D. S. G. Campilho, 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*, vol. 45, no. 5, pp. 1497-1512, 3/1/ 2008.
- [57] M. F. S. F. de Moura, 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*, vol. 68, no. 10–11, pp. 2224-2230, 8// 2008.
- [58] M. F. S. F. de Moura, 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*, vol. 46, no. 6, pp. 1589-1595, 3/15/ 2009.
- [59] L. Daudeville and P. Ladevèze, "A damage mechanics tool for laminate delamination," *Composite Structures*, vol. 25, no. 1–4, pp. 547-555, // 1993.

- [60] H. Khoramishad, A. D. Crocombe, K. B. Katnam, and I. A. Ashcroft, "Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model," *International Journal of Fatigue*, vol. 32, no. 7, pp. 1146-1158, 7// 2010.
- [61] P. I. Kattan and G. Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools* (no. vol. 1). Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- [62] P. Raghavan and S. Ghosh, "A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding," *Mechanics of Materials*, vol. 37, no. 9, pp. 955-979, 9// 2005.
- [63] M. M. A. Wahab, I. A. Ashcroft, A. D. Crocombe, and S. J. Shaw, "Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 15, no. 7, pp. 763-781, 2001/01/01 2001.
- [64] M. Imanaka, T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, and M. Kimoto, "Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 17, no. 7, pp. 981-994, 2003/01/01 2003.
- [65] V. Shenoy, I. A. Ashcroft, G. W. Critchlow, and A. D. Crocombe, "Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 77, no. 7, pp. 1073-1090, 5// 2010.
- [66] Y. Hua, A. D. Crocombe, M. A. Wahab, and I. A. Ashcroft, "Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 28, no. 6, pp. 302-313, 9// 2008.
- [67] Z. Chen, 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*, vol. 78, no. 6, pp. 990-1007, 4// 2011.
- [68] S. Mohammadi, *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. Wiley, 2008.
- [69] T. Belytschko and T. Black, "Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 45, no. 5, pp. 601-620, 1999.
- [70] N. Moës, J. Dolbow, and T. Belytschko, "A finite element method for crack growth without remeshing," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 46, no. 1, pp. 131-150, 1999.
- [71] Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. Vélizy-Villacoublay, 2013.
- [72] R. D. S. G. Campilho, M. D. Banea, F. J. P. Chaves, and L. F. M. d. Silva, "eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I," *Computational Materials Science*, vol. 50, no. 4, pp. 1543-1549, 2// 2011.
- [73] J. Machado, E. Marques, and L. F. d. Silva, "Adhesives and adhesive joints under impact loadings: An overview," *The Journal of Adhesion*, pp. 1-32, 2017.
- [74] F. Mainardi and G. Spada, "Creep, relaxation and viscosity properties for basic fractional models in rheology," *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 193, no. 1, pp. 133-160, 2011.
- [75] C. a. Sato and K. Ikegami, "Dynamic deformation of lap joints and scarf joints under impact loads," *International journal of adhesion and adhesives*, pp. 17-25, 2000.

- [76] A. S. Khan, O. Lopez-Pamies, and R. Kazmi, "Thermo-mechanical large deformation response and constitutive modeling of viscoelastic polymers over a wide range of strain rates and temperatures. International," *Journal of Plasticity*, pp. 581-601, 2006.
- [77] T. Iwamoto, T. Nagai, and T. Sawa, "Experimental and computational investigations on strain rate sensitivity and deformation behavior of bulk materials made of epoxy resin structural adhesive. International," *Journal of Solids and Structures*, 2010.
- [78] G. Cowper and P. Symonds, "Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams," *DTIC Document*, 1957.
- [79] L. Goglio, L. Peroni, M. Peroni, and M. Rossetto, "High strain-rate compression and tension behaviour of an epoxy bi-component adhesive," *International journal of adhesion and adhesives*, pp. 329-339, 2008.
- [80] D. Morin, et al., "Identification of a new failure criterion for toughened epoxy adhesive. Engineering fracture mechanics," pp. 2481-3500, 2010.
- [81] M. Kitagawa, T. Mori, and T. Matsutani, "Rate-dependent nonlinear constitutive equation of polypropylene," *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, pp. 85-95, 1989.
- [82] W. Chiu and R. Jones, "Unified constitutive model for thermoset adhesive, FM73," *International journal of adhesion and adhesives*, pp. 131-136, 1995.
- [83] A. D. Crocombe, "Modelling and predicting the effects of test speed on the strength of joints made with FM73 adhesive," *International journal of adhesion and adhesives*, pp. 21-27, 1995.
- [84] M. Zgoul and A. D. Crocombe, "Numerical modelling of lap joints bonded with a rate-dependent adhesive," *International journal of adhesion and adhesives*, pp. 355-366, 2004.
- [85] T. Yokoyama and H. Shimizu, "Determination of impact shear strength of adhesive joints with the split Hopkinson bar," *Key Engineering Materials*, pp. 317-322, 1998.
- [86] H. Al-Zubaidy, X. Zhao, and R. Al-Mahaidi, "Effect of impact tensile load on strength of CFRP bonded steel plate joints," *Procedia Engineering*, pp. 1312-1317, 2011.
- [87] U. Kemiklioglu, et al, "Strength comparison of ductile and brittle adhesives under single and repeated impacts," *Applied Adhesion Science*, p. 15, 2015.
- [88] D. Morin, B. Bourel, B. Bennani, F. Lauro, and D. Lesueur, "A new cohesive element for structural bonding modelling under dynamic loading," *International Journal of Impact Engineering*, 2011.
- [89] L. Liao, T. Kobayashi, T. Sawa, and Y. Goda, "3-D FEM stress analysis and strength evaluation of single-lap adhesive joints subjected to impact tensile loads," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2011.
- [90] K. Kihara, H. Isono, H. Yamabe, and T. Sugibayashi, "A study and evaluation of the shear strength of adhesive layers subjected to impact loads," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2002.
- [91] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura, and J. J. M. S. Domingues, "Modelling single and double-lap repairs on composite materials," *Composites Science and Technology*, vol. 65, no. 13, pp. 1948-1958, 10// 2005.

- [92] A. International, "ASTM D1002-10, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)," *ASTM International*, 2010.
- [93] I. O. f. Standardization, "ISO 4587:2003, Adhesives -- Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies," 2003.
- [94] J. P. A. Valente, "Estudo de alterações geométricas em juntas adesivas solicitadas ao impacto," Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2017.
- [95] R. D. S. G. Campilho, D. C. Moura, M. D. Banea, and L. F. M. da Silva, "Adhesive thickness effects of a ductile adhesive by optical measurement techniques," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 57, pp. 125-132, 3// 2015.
- [96] R. D. S. G. Campilho, A. M. G. Pinto, M. D. Banea, R. F. Silva, and L. F. M. d. Silva, "Strength Improvement of Adhesively-Bonded Joints Using a Reverse-Bent Geometry," *Journal of Adhesion Science and Technology*, pp. 2351-2368, 2011.
- [97] T. M. d. S. Faneco, "Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade," Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- [98] R. D. S. G. Campilho, M. D. Banea, J. A. B. P. Neto, and L. F. M. d. Silva, "Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 44, pp. 48-56, 2013.
- [99] E. Marques, M. Banea, L. da Silva, R. Carbas, and C. Sato, "Effect of Low Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Energy of a Room Temperature Vulcanizing Silicone Adhesive," 2016.
- [100] L. da Silva, R. da Silva, J. Chousal, and A. Pinto, "Alternative Methods to Measure the Adhesive Shear Displacement in the Thick Adherend Shear Test," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 15-29 (15) 15, 2008.
- [101] H. A. M. Araújo, J. J. M. Machado, E. A. S. Marques, and L. F. M. da Silva, "Dynamic behaviour of composite adhesive joints for the automotive industry," *Composite Structures*, vol. 171, pp. 549-561, 7/1/ 2017.
- [102] J. Varajão, "Impact of CFRP adhesive joints for the automotive industry," 2015.
- [103] (08/2018). *Análise da resistência à compressão de compósito cimentício reforçado com fibras.* Available: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgisMAK/analise-resistencia-a-compressao-composito-cimenticio-reforcado-com-fibras-mesocarpo-dende?part=2>
- [104] R. J. B. d. Rocha, "Evaluation of different damage initiation and growth criteria in the cohesive zone modelling analysis of single-lap bonded joints," Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016.