



Efeito dos parâmetros coesivos na resistência ao impacto de juntas adesivas compósitas de sobreposição dupla

LUÍS ANDRÉ RODRIGUES GOMES

novembro de 2021

EFEITO DOS PARÂMETROS COESIVOS NA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE JUNTAS ADESIVAS COMPÓSITAS DE SOBREPOSIÇÃO DUPLA

Luís André Rodrigues Gomes

1150874

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

EFEITO DOS PARÂMETROS COESIVOS NA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE JUNTAS ADESIVAS COMPÓSITAS DE SOBREPOSIÇÃO DUPLA

Luís André Rodrigues Gomes

1150874

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

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Luís Miguel Pereira Durão

Professor Coordenador, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Ricardo João Camilo Carbas

Investigador, FEUP

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao ISEP, em particular aos docentes que me acompanharam ao longo da minha vida universitária e pela partilha do conhecimento que me abre portas para o meu futuro.

Ao meu orientador, Dr. Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pela disponibilidade, pelo apoio e pela dedicação que demonstrou ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

À minha namorada que esteve presente em todos os bons e maus momentos e pela força e incentivo ao longo deste percurso.

Aos meus pais e à minha irmã pelo apoio, carinho e dedicação durante todo o meu percurso quanto estudante.

Aos meus amigos e colegas que contribuíram para o alcance deste meu objetivo.

PALAVRAS-CHAVE

Método de Elementos Finitos; Modelos de dano coesivo; Impacto; Ensaio de queda; Junta de sobreposição dupla; Adesivo estrutural.

RESUMO

Ao longo dos anos as ligações adesivas tornaram-se cada vez mais relevantes, quando se pretende utilizar um processo de ligação entre dois materiais distintos. Para além da sua utilização abrangente na maioria dos casos, o seu processo de fabrico apresenta geralmente um custo inferior aos restantes métodos de ligação. Para ser possível avaliar o desempenho e a resistência da junta adesiva, utilizam-se metodologias numéricas baseadas no Método de Elementos Finitos (MEF). Em casos reais, as ligações adesivas estão também sujeitas a cargas dinâmicas, como por exemplo de impacto. Devido à escassez de literatura sobre o comportamento das juntas adesivas ao impacto, o seu estudo tornou-se relevante para que todas as técnicas utilizadas e ensaios realizados sejam validados, para que seja possível prever o comportamento das juntas a este tipo de carregamentos.

O principal objetivo desta dissertação é o estudo da influência dos parâmetros coesivos na previsão do comportamento e da resistência de juntas adesivas de sobreposição dupla (JSD) solicitadas ao impacto. Para o efeito, consideram-se simulações numéricas pelo MEF e modelos de dano coesivo (MDC). Inicialmente, foi realizada uma validação com dados experimentais, para validação da técnica proposta para análise de juntas adesivas ao impacto. Para avaliar a influência dos parâmetros coesivos, fez-se variar cada parâmetro coesivo desde -75% a 100% do parâmetro original em intervalos de 25%, mantendo os restantes inalterados. Os adesivos utilizados para este estudo numérico são o Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7752. Como aderente utilizou-se em ambos os casos o pré-impregnado Seal® Texipreg HS 160 RM.

A validação da técnica numérica proposta foi realizada com sucesso para a modelação de juntas adesivas ao impacto. Concluiu-se que os parâmetros coesivos estudados, exceto a tenacidade à tração (G_{Ic}), apresentam relevância no comportamento dos adesivos e, consequentemente, na previsão de resistência de juntas adesivas.

KEYWORDS

Finite Element Method; Cohesive Zone Models; Impact; Drop-test; Double-lap Joints; Structural adhesive.

ABSTRACT

Over the years, adhesive bonds have become increasingly relevant when one intends to use a bonding process between two different materials. In addition to its widespread use in most cases, its manufacturing process is generally cheaper than for the other joining methods. To be able to evaluate the performance and strength of the adhesive joint, numerical methodologies based on the Finite Element Method (FEM) are used. In real cases, adhesive joints are also subjected to dynamic loads, such as impact. Due to the scarcity of literature on the behavior of adhesive joints under impact, its study has become relevant so that all the used techniques and tests performed are validated, so that it is possible to predict the behavior of the joints to this type of loading.

The main objective of this dissertation is to study the influence of cohesive parameters in predicting the behavior and strength of double-lap joints under impact loads. For this purpose, numerical simulations by FEM and cohesive zone models (CZM) are considered. Initially, a study was carried out with experimental data, to validate the proposed technique for analyzing impact-adhesive joints. To evaluate the influence of the cohesive parameters, each cohesive parameter was varied from -75% to 100% of the original parameter at 25% intervals, keeping the rest unchanged. The adhesives used for this numerical study are the Araldite® AV138 and the Sikaforce® 7752. As adherend, the pre-preg Seal® Texipreg HS 160 RM was used in both cases.

Validation of the proposed numerical technique was successfully accomplished to model bonded joints under impact loads. It was concluded that the cohesive parameters studied, except for a tensile toughness (G_{Ic}), present relevance in the behavior of adhesives and, consequently, in the strength prediction of adhesive joints.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
JSS	Junta de sobreposição simples
JSD	Junta de sobreposição dupla
MDC	Modelos de dano coesivo
MEF	Método de elementos finitos
MEFX	Método de elementos finitos estendido
SHPB	<i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>
TAST	<i>Thick Adherend Shear Test</i>
TDCB	<i>Tapered Double-Cantilever Beam</i>
TFFV	Técnica de fecho de fenda virtual

Lista de Símbolos

E	Módulo de Elasticidade
G	Módulo de Corte
G_c	Taxa crítica de libertação de energia
G_{Ic}	Tenacidade à tração
G_{IIc}	Tenacidade ao corte

L_0	Comprimento de sobreposição
$P_{\text{máx}}$	Carga máxima
t_n	Tensão coesiva à tração
t_n^0	Resistência coesiva à tração
t_s	Tensão coesiva ao corte
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
γ_f	Deformação de rotura ao corte
δ_n	Deslocamento em tração
δ_n^0	Deslocamento de tração correspondente a $P_{\text{máx}}$
δ_{rot}	Deslocamento de rotura
δ_s	Deslocamento em corte
δ_s^0	Deslocamento de corte correspondente a $P_{\text{máx}}$
ε_f	Deformação de rotura à tração
ρ	Massa volúmica
σ_f	Tensão de rotura à tração
σ_y	Tensão de cedência à tração
σ_y	Tensão de arrancamento
τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_{med}	Tensão média de corte
τ_{xy}	Tensão de corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte
ν	Coeficiente de Poisson

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da interface entre os aderentes e o adesivo (adaptado de [2])	8
Figura 2 - Diferentes tipos das juntas mais comuns [7]	9
Figura 3 - Exemplos de aplicação de juntas adesivas no Airbus A380 [8]	10
Figura 4 - Exemplos de aplicações de juntas adesivas na indústria automóvel [12]	11
Figura 5 - Ensaio de tração instrumentado de um provete [14]	12
Figura 6 - Ensaio Iosipescu (aplicação de cargas assimétricas num provetes com dois entalhes em V) [13]	13
Figura 7 - Ensaio Arcan (adaptado de [13])	13
Figura 8 - Ensaio TAST [13]	14
Figura 9 - Ensaio de arrancamento com uma junta do tipo "T" segundo a norma ASTM D1876 [15]	15
Figura 10 - Ensaio de arrancamento a 180° [16]	15
Figura 11 - Ensaio rolete flutuante [13]	16
Figura 12 - <i>Climbing drum test</i> [13]	16
Figura 13 - Diferentes modos de rotura	17
Figura 14 - Provette DCB com blocos de carga (a) e provete TDCB e (b), segundo a norma ASTM [13]	17
Figura 15 - <i>Falling wedge test</i> [17]	18
Figura 16 - <i>ASTM Block Impact Test</i> [4]	19
Figura 17 - Ensaio da barra de Hopkinson [17]	19
Figura 18 - <i>Drop test</i> (adaptado de [4])	20
Figura 19 - Dimensões da JSS (a) e JSD (b)	34
Figura 20 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [47]	35
Figura 21 - Curvas σ - ϵ relativas ao adesivo Sikaforce® 7752 [50]	37
Figura 22 - Aplicação de calor nas camadas com uma pistola de ar quente	39
Figura 23 - Prensa de pratos quentes utilizada para prensar as placas	40
Figura 24 - Ciclo térmico programado para a cura das placas	40
Figura 25 - Processo de lixagem e limpeza dos substratos	41
Figura 26 - Provette de uma JSD finalizado	42

Figura 27 - Provete preparado para ensaio	42
Figura 28 - Laboratório de Processos Avançados de Ligação do INEGI	43
Figura 29 - Máquina de <i>drop weight</i>	43
Figura 30 - Configuração dos parâmetros para o <i>drop test</i> no <i>software</i> da máquina.....	44
Figura 31 - Provete colocado na máquina de <i>drop weight</i>	44
Figura 32 - Curvas $P-\delta$ experimentais de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=12,5$ mm.....	45
Figura 33 - Curvas $P-\delta$ experimentais de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=25$ mm.....	45
Figura 34 - Curvas $P-\delta$ experimentais de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=50$ mm.....	46
Figura 35 - Valores médios de $P_{\text{máx}}$ correspondentes às JSS com o adesivo AV138	46
Figura 36 - Curvas $P-\delta$ experimentais de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=12,5$ mm	47
Figura 37 - Curvas $P-\delta$ experimentais JSS com o adesivo 7752 e $L_0=25$ mm	48
Figura 38 - Curvas $P-\delta$ experimentais JSS com o adesivo 7752 e $L_0=50$ mm	48
Figura 39 - Valores médios de $P_{\text{máx}}$ correspondentes às JSS com o adesivo 7752	49
Figura 40 - Comparação dos valores médios de $P_{\text{máx}}$ correspondentes às JSS com o adesivo AV138 e o adesivo 7752	50
Figura 41 - Esboço de uma JSD com $L_0=12,5$ mm	51
Figura 42 - Definição das propriedades do aderente	51
Figura 43 - Definição das propriedades do adesivo.....	52
Figura 44 - <i>Field output</i> ensaio dinâmico	53
Figura 45 - Criação da partição	53
Figura 46 - Refinamento da malha	54
Figura 47 - Provete JSD final	54
Figura 48 - Lei triangular do modelo de dano coesivo (Adaptado de [58])	55
Figura 49 - Determinação das propriedades do aderente no <i>software</i> Abaqus®	56
Figura 50 - Determinação das propriedades dinâmicas do adesivo Araldite® AV138 no <i>software</i> Abaqus®	57
Figura 51 - Determinação das propriedades elásticas do adesivo Araldite® AV138 no <i>software</i> Abaqus®	57
Figura 52 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numérica de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=12,5$ mm.....	58
Figura 53 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numérica de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=25$ mm.....	59
Figura 54 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numérica de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=50$ mm.....	59

Figura 55 - Comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais e numérico das JSS com o adesivo AV138 ...	60
Figura 56 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=12,5$ mm	61
Figura 57 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=25$ mm	61
Figura 58 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=50$ mm	62
Figura 59 - Comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais e numérico das JSS com o adesivo 7752	63
Figura 60 - Distribuição de tensões de corte τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de L_0 em JSD	64
Figura 61 - Distribuição de tensões de arrancamento σ_y com o adesivo AV138 em função de L_0 em JSD	65
Figura 62 - Distribuição de tensões de corte τ_{xy} com o adesivo 7752 em função de L_0 em JSD	65
Figura 63 - Distribuição de tensões de arrancamento σ_y com o adesivo 7752 em função de L_0 em JSD ...	66
Figura 64 - Curvas P - δ de JSD com o adesivo AV138 em função de L_0	67
Figura 65 - Valores de $P_{\text{máx}}$ de JSD com o adesivo AV138 em função de L_0	68
Figura 66 - Curvas P - δ de JSD com o adesivo Sikaforce® 7752 em função de L_0	69
Figura 67 - Valores de $P_{\text{máx}}$ de JSD com o adesivo AV138 em função de L_0	69
Figura 68 - Curva P - δ com adesivo AV138 em função de L_0	70
Figura 69 - Curva P - δ com adesivo Sikaforce® 7752 em função de L_0	71
Figura 70 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=12,5$ mm	72
Figura 71 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=25$ mm	73
Figura 72 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=50$ mm	73
Figura 73 - Variação percentual de $P_{\text{máx}}/P_{\text{máx}}^0$ com variações de E e G entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo AV138	74
Figura 74 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=12,5$ mm	74
Figura 75 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=25$ mm	75
Figura 76 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=50$ mm	75
Figura 77 - Variação percentual de $P_{\text{máx}}/P_{\text{máx}}^0$ com variações de E e G entre -75% a +100% para os diferentes L_0 e com adesivo Sikaforce® 7752	76
Figura 78 - Definição da variável de dano em tração, d_n , no Abaqus® (que pode ser extrapolada para d_s) [47]	77

Figura 79 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado e com adesivo AV138 e $L_0=12,5$ mm	78
Figura 80 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado e com adesivo AV138 e $L_0=25$ mm	78
Figura 81 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado e com adesivo AV138 e $L_0=50$ mm	79
Figura 82 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ correspondentes a modo-misto e desacoplado para os diferentes L_0 e com adesivo AV138	79
Figura 83 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm	80
Figura 84 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=25$ mm	80
Figura 85 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm	81
Figura 86 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ correspondentes a modo-misto e desacoplado para os diferentes L_0 e com adesivo Sikaforce® 7752	81
Figura 87 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=12,5$ mm.....	82
Figura 88 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=25$ mm.....	82
Figura 89 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=50$ mm.....	83
Figura 90 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de t_n^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 e com adesivo AV138.....	83
Figura 91 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV 138 e com $L_0=12,5$ mm.....	84
Figura 92 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV 138 e com $L_0=25$ mm.....	84
Figura 93 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV 138 e com $L_0=50$ mm.....	85
Figura 94 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 e com adesivo AV138.....	85
Figura 95 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=12,5$ mm.....	86

Figura 96 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=25$ mm.....	86
Figura 97 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=50$ mm.....	87
Figura 98 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 e com adesivo AV138	87
Figura 99 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=12,5$ mm	88
Figura 100 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=25$ mm.....	88
Figura 101 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=50$ mm.....	89
Figura 102 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de t_n^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 e com adesivo Sikaforce® 7752.....	89
Figura 103 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=12,5$ mm	90
Figura 104 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=25$ mm	90
Figura 105 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=50$ mm	91
Figura 106 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo Sikaforce® 7752.....	91
Figura 107 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=12,5$ mm.....	92
Figura 108 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=25$ mm.....	92
Figura 109 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=50$ mm.....	93
Figura 110 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo Sikaforce® 7752	93
Figura 111 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=12,5$ mm	94
Figura 112 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=25$ mm	94

Figura 113 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=50$ mm	95
Figura 114 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=12,5$ mm	96
Figura 115 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=25$ mm	96
Figura 116 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=50$ mm	97
Figura 117 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=12,5$ mm	98
Figura 118 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=25$ mm	99
Figura 119 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=50$ mm	99
Figura 120 - Variação percentual de $P_{máx}/P_{máx}^0$ com variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 e com adesivo AV138	100
Figura 121 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=12,5$ mm	100
Figura 122 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=25$ mm	101
Figura 123 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=50$ mm	101
Figura 124 - Variação percentual de $P_{máx}/P_{máx}^0$ com variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo Sikaforce® 7752	102

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Estudos ao impacto de juntas adesivas	27
Tabela 2 - Dimensões dos provetes de ensaio (dimensões em mm)	33
Tabela 3 - Propriedades elásticas do <i>carbon fiber reinforced polymer</i> (CFRP) [46]	34
Tabela 4 - Propriedades interlaminares do CFRP [46]	35
Tabela 5 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [47, 49]	36
Tabela 6 - Propriedades dinâmicas do adesivo Araldite® AV138 [1]	36
Tabela 7 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752 [50]	37
Tabela 8 - Propriedades dinâmicas do adesivo Sikaforce® 7752	38
Tabela 9 - Influência de L_0 na resistência de JSS com o adesivo AV138	47
Tabela 10 - Influência de L_0 na resistência de JSS com o adesivo 7752	50
Tabela 11 - Comparação dos valores de $P_{máx}$ experimentais e numérico das JSS fabricadas com o adesivo AV138	60
Tabela 12 - Comparação dos valores de $P_{máx}$ experimentais e numérico das JSS fabricadas com o adesivo 7752	62
Tabela 13 - Influência de L_0 na $P_{máx}$ em JSD com o adesivo AV138	68
Tabela 14 - Influência de L_0 na $P_{máx}$ em JSD com o adesivo Sikaforce® 7752	70
Tabela 15 - Cargas máximas em função dos diferentes L_0	71
Tabela 16 - Cargas máximas em função dos diferentes L_0	72
Tabela 17 - $P_{máx}$ e variação percentual de $P_{máx} / P_{máx}^0$ correspondentes a variações G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100% com adesivo AV138	95
Tabela 18 - $P_{máx}$ e variação percentual de $P_{máx} / P_{máx}^0$ correspondentes a variações G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100% com adesivo Sikaforce® 7752	97

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização da dissertação	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Ligações adesivas	7
2.1.1	Caracterização geral	7
2.1.2	Configurações possíveis de junta	8
2.1.3	Aplicações.....	9
2.2	Ensaaios de juntas adesivas	11
2.2.1	Ensaaios estáticos	11
2.2.1.1	Ensaaios de tração	11
2.2.1.2	Ensaaios de compressão	12
2.2.1.3	Ensaaios de corte	12
2.2.1.4	Ensaaios de arrancamento	14
2.2.1.5	Ensaaios de caracterização à fratura	16
2.2.2	Ensaaios dinâmicos e de impacto.....	17
2.3	Previsão de resistência de juntas adesivas	20
2.3.1	Previsão para solicitações estáticas	20
2.3.1.1	Métodos analíticos.....	20
2.3.1.2	Métodos numéricos	21
2.3.1.3	Mecânica dos meios contínuos.....	21
2.3.1.4	Mecânica da fratura.....	22
2.3.1.5	Modelos de dano coesivo	22
2.3.1.6	Mecânica do dano.....	23

2.3.1.7	MEFX	23
2.3.2	Previsão para solicitações dinâmicas	24
2.3.2.1	Métodos analíticos.....	24
2.3.2.1.1	Modelo de Voigt/Maxwell	24
2.3.2.1.2	Modelo Cowper-Symonds.....	25
2.3.2.1.3	Modelo Johnson-Cook	25
2.3.2.1.4	Modelos de sobretensão	25
2.3.2.2	Métodos numéricos	25
2.4	Comportamento de juntas adesivas ao impacto	26
2.4.1	Avaliação experimental	26
2.4.2	Previsão por métodos numéricos.....	26
2.4.3	Estado da arte	27
3	DESENVOLVIMENTO	33
3.1	Trabalho experimental.....	33
3.1.1	Geometria e dimensões das juntas	33
3.1.2	Materiais utilizados	34
3.1.2.1	Aderentes.....	34
3.1.2.2	Adesivos.....	35
3.1.2.2.1	Araldite® AV138	35
3.1.2.2.2	Sikaforce® 7752.....	37
3.1.3	Fabrico das juntas.....	38
3.1.3.1	Fabrico das placas	38
3.1.3.2	Cura das placas	39
3.1.3.3	Corte das placas.....	40
3.1.3.4	Preparação superficial e colagem dos provetes	40
3.1.4	Ensaio das juntas	42
3.1.5	Resultados obtidos e discussão.....	45
3.2	Trabalho numérico.....	50
3.2.1	Condições da análise numérica	50

3.2.2	Modelos de dano coesivo.....	54
3.2.3	Determinação das propriedades dos materiais	56
3.2.4	Validação da técnica numérica com juntas de sobreposição simples.....	58
3.2.5	Estudo das juntas de sobreposição dupla	63
3.2.5.1	Distribuição de tensões	63
3.2.5.2	Previsão da resistência.....	67
3.2.5.3	Estudo da influência dos parâmetros coesivos na resistência ao impacto	70
3.2.5.3.1	Rigidez elástica da lei coesiva.....	72
3.2.5.3.2	Desacoplamento dos modos de carregamento com lei triangular	76
3.2.5.3.3	Resistências coesivas.....	81
3.2.5.3.4	Tenacidades à fratura	93
3.2.5.3.5	Combinação dos vários parâmetros.....	98
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	105
4.1	Conclusões	105
4.2	Propostas de trabalhos futuros.....	106
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	109

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Hoje em dia, cada vez mais, as juntas adesivas são eleitas para soluções de ligações entre estruturas. Ao contrário das ligações convencionais, tais como, as ligações aparafusadas e soldadas, as ligações adesivas trazem grandes vantagens e possuem características únicas. A redução da concentração de tensões, a distribuição uniforme das tensões ou a junção de materiais heterogêneos, são exemplos de vantagens para que este tipo de ligações seja considerado uma boa opção.

Com o aumento da procura da utilização das ligações adesivas, sentiu-se cada vez mais a necessidade de estudá-las para que se conheça bem o seu comportamento em diferentes tipos de solicitações.

Este trabalho surge devido à oportunidade de melhorar e aprofundar os estudos já realizados nesta área de investigação. Os resultados tiveram como base a análise do Método de Elementos Finitos (MEF) de juntas de sobreposição dupla (JSD) ao impacto.

1.2 Objetivos

Neste trabalho pretende-se estudar numericamente, com o uso do MEF, juntas adesivas de sobreposição dupla com substratos em compósito, considerando diferentes comprimentos de sobreposição (L_0). Para este trabalho foi utilizado o *software* Abaqus®, de forma a haver uma análise minuciosa no que diz respeito à rigidez e à resistência coesiva.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 4 capítulos principais, cujos conteúdos são de seguida descritos sucintamente.

No capítulo 1 apresenta-se a contextualização do tema abordado, assim como a enumeração dos objetivos estabelecidos inicialmente e a forma como estará estruturada a dissertação.

No capítulo 2 é efetuada a revisão bibliográfica sobre os assuntos relevantes para o enquadramento deste trabalho. A revisão bibliográfica inicia-se com uma breve explicação dos conceitos base necessários para a interpretação da dissertação, tais

como a caracterização geral de uma junta adesiva, as possíveis configurações, e as possíveis aplicações de juntas adesivas. De seguida, apresenta-se as diversas configurações geométricas de uma junta adesivas, dando mais relevância à junta que vai ser estudada, a JSD. Posteriormente, descrevem-se alguns ensaios experimentais que podem ser utilizados para juntas adesivas e, por fim, salienta-se a previsão de resistência de juntas adesivas, tanto para solicitações estáticas como dinâmicas, dando a conhecer alguns métodos numéricos e analíticos que permitem prever o comportamento de uma junta adesiva.

O capítulo 3 consiste no desenvolvimento da dissertação. Este capítulo divide-se pelo trabalho experimental e pelo trabalho numérico. O estudo de validação é feito com juntas de sobreposição simples (JSS) e serve para validar os modelos de dano coesivo (MDC). No âmbito do trabalho experimental descreve-se a geometria e as dimensões das juntas utilizadas. De seguida, apresentam-se os aderentes e os adesivos utilizados. Após a descrição dos materiais utilizados, apresenta-se o fabrico das juntas e posteriormente os ensaios. Por fim, faz-se a discussão dos resultados obtidos. No trabalho numérico, inicialmente apresentam-se as condições da análise numérica, os modelos de dano coesivo e a determinação das propriedades dos materiais. De seguida, apresenta-se a análise do estudo do efeito do comprimento de sobreposição e do estudo da influência dos parâmetros coesivos na resistência, que consiste no objetivo principal da dissertação.

O quarto capítulo finaliza a estrutura da dissertação e baseia-se na validação dos objetivos planeados inicialmente e na apresentação de propostas para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligações adesivas
- 2.2 Ensaaios 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

2.1.1 Caracterização geral

Atualmente as ligações adesivas estão a superar as ligações convencionais, como as aparafusadas e as soldadas. Nas grandes indústrias, como aeronáutica ou aeroespacial, este tipo de juntas são cada vez mais desenvolvidas [1]. Trata-se de uma ligação que é preferencialmente substituta das ligações mecânicas, uma vez que apresenta concentração de tensões mais baixas e baixa densidade. Esta propriedade torna-se muito importante quando se trata de indústrias de alta precisão de dimensionamento e de construção. A ligação adesiva tem a capacidade de absorver grandes cargas dinâmicas.

Existe dois grandes tipos de adesivos: estrutural e não estrutural. Os adesivos estruturais são adesivos que são capazes de resistir a tensões ao corte que excedam os 6,9 MPa, dependendo do tipo do adesivo [2]. Depois de ocorrer a cura da ligação, os polímeros nos adesivos estruturais são reticulados, o que torna os polímeros insolúveis e solidificados [3]. O adesivo não-estrutural é usado para ligações temporárias ou para ligações de aderentes mais fracos, em que é formada uma camada protetora. A ligação resultante das forças intermoleculares entre os dois materiais a ligar designa-se como adesão [2, 4].

A junta adesiva é composta por dois constituintes: o adesivo e o aderente. Trata-se por adesivo, o componente de ligação dos dois (ou mais) materiais a ligar. Já o aderente é o componente que se deve ligar através do adesivo. Como se verifica na Figura 1, a junta adesiva é constituída por duas interfases, por dois aderentes (ou mais) e pelo adesivo [4]:

- **Adesivo:** pode ser definido como um material polimérico capaz de promover a união entre dois substratos e com capacidade de resistir à sua separação, pela ação combinada de diferentes forças: forças adesivas (adesão) e forças coesivas (coesão);
- **Aderente:** o material que se pretende ligar. As ligações acontecem com dois aderentes no mínimo;

- **Interfase:** A interfase é a região entre o adesivo e os aderentes e tem características físicas e químicas diferentes das propriedades *bulk* (propriedades das regiões internas do material) do adesivo ou do aderente. As características da interfase são importantes para determinar as propriedades mecânicas da junta adesiva;
- **Interface:** plano de contacto entre o adesivo e os aderentes. A interface está contida na interfase.

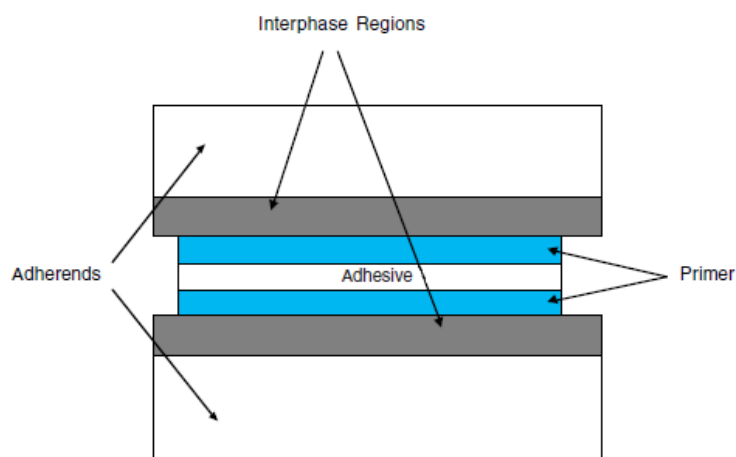


Figura 1 - Representação da interface entre os aderentes e o adesivo (adaptado de [2])

2.1.2 Configurações possíveis de junta

Ao longo do tempo, desenvolveram-se vários tipos de juntas adesivas. Estas têm de ser adequadas conforme o material, geometrias das peças a ligar e esforços atuantes. O tipo de junta adesiva mais utilizada é a junta de sobreposição simples (JSS), uma vez que é a junta com a maior simplicidade e rapidez de fabrico. Como se pode verificar na Figura 2, o facto do carregamento não ser colinear faz com que se observe flexão nos aderentes, o que leva ao aparecimento de esforços de arrancamento [5]. A junta de sobreposição dupla (JSD) elimina esse efeito. Mesmo que este tipo de ligação reduza os esforços por arrancamento, quando aplicada uma carga muito elevada, a flexão nos dois aderentes paralelos provoca esforços de compressão e de arrancamento ao longo das camadas do adesivo. Estes casos geram a impossibilidade de esta junta ser aplicada em grande parte dos casos, devido ao aumento de espessura num dos lados da junta. Para solucionar o facto de o carregamento não ser feito no mesmo plano, são usados outros tipos de juntas, nomeadamente a junta com chanfro interior, em degrau, cobre-junta e cobre-junta dupla. Das opções de junta mais usuais para carregamentos ao mesmo nível, a mais utilizada é a junta com chanfro interior, uma vez que esta junta apresenta uma área de colagem maior e as tensões de corte são significativamente menores comparativamente com as juntas em degrau. Uma possibilidade de melhorar a distribuição de tensões é introduzir chanfros nos aderentes. Desta forma, a área de contacto com o adesivo será maior e as tensões serão mais distribuídas [6].

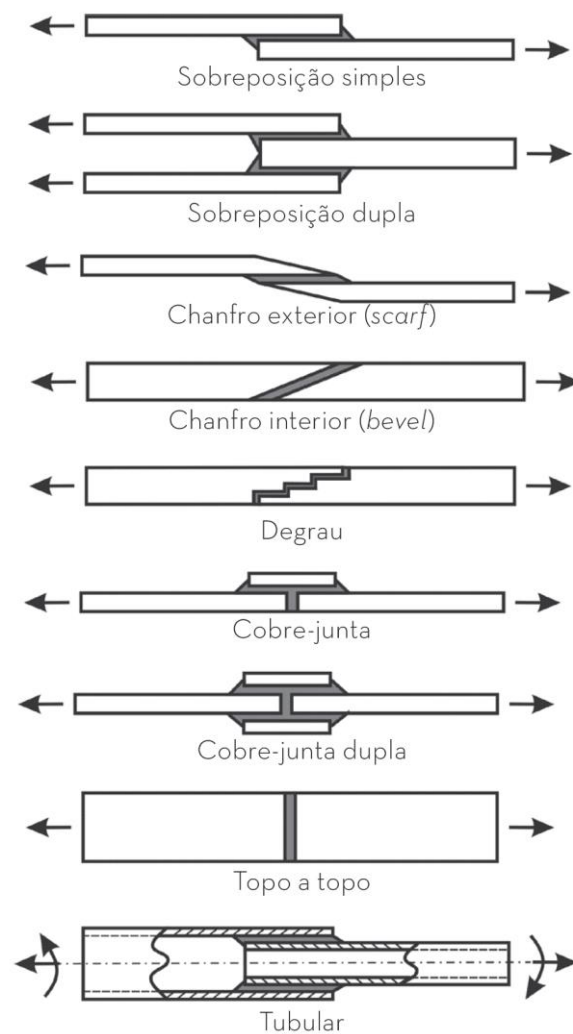


Figura 2 - Diferentes tipos das juntas mais comuns [7]

2.1.3 Aplicações

As indústrias aeroespacial e aeronáutica são as principais responsáveis para o desenvolvimento deste tipo de ligações. O fenómeno de adesão já é utilizado há milhares de anos. Esta tecnologia veio a sofrer uma grande evolução, quando se pretendeu introduzir materiais metálicos e compósitos reforçados com fibra [2, 8].

No caso da indústria aeronáutica, o uso de ligações adesivas tem um grande impacto direto na eficiência do veículo. Como a massa deste será reduzida substancialmente, os consumos de combustível e de emissões de CO₂ e de outros gases poluentes serão também afetados positivamente. Também é de notar que, com a implementação de juntas adesivas, o *design* será melhorado, o que revela melhores resultados aerodinâmicos [8].

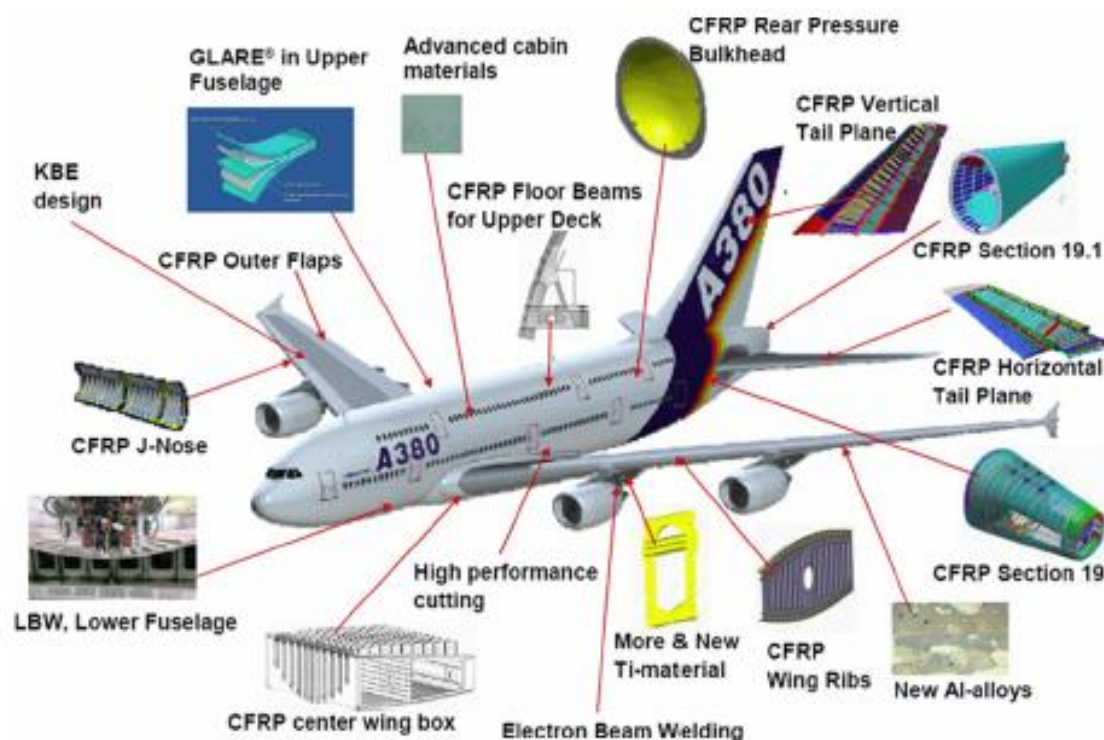


Figura 3 - Exemplos de aplicação de juntas adesivas no Airbus A380 [8]

Na Figura 3 é possível verificar várias zonas de um Airbus A380 em que se utiliza juntas adesivas de modo a diminuir a massa. Com a evolução da indústria, o avião anteriormente descrito, comparativamente com o seu antecessor Airbus A320, possui um aumento cerca de 27% da utilização de compósitos e de juntas adesivas [9].

Este tipo de tecnologia também é adotado na indústria automóvel. Neste caso, os adesivos são mais utilizados para a fixação dos para-brisas devido à sua capacidade de funcionar como um selante. Para além disso, as ligações adesivas passaram a ser mais utilizadas nas ligações da carroçaria, uma vez que com as juntas adesivas, é possível criar estruturas mais eficientes ao impacto. Desta forma, têm-se vindo a desenvolver carroçarias com um maior fator de segurança para o cliente [10]. Conforme a Figura 4, com a evolução da indústria automóvel eletrificado, as ligações adesivas são as mais escolhidas para a montagem das baterias [11].

Embora as grandes indústrias anteriormente descritas sejam o maior foco para esta tecnologia de ligação, no dia-a-dia é possível encontrar produtos em que os adesivos se inserem. Desde a indústria do calçado à indústria cosmética ou embalagem, estas ligações acabam por ser bastante importantes devido à sua capacidade de fixação e de ligação.

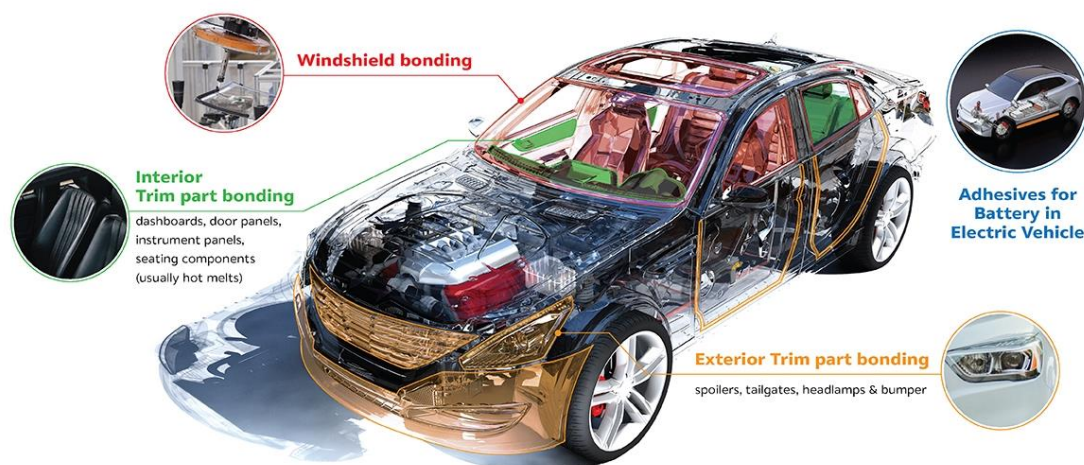


Figura 4 - Exemplos de aplicações de juntas adesivas na indústria automóvel [12]

2.2 Ensaios de juntas adesivas

Com o objetivo de conhecer melhor as características dos materiais, são utilizados diferentes tipos de testes. Conforme as características que se pretende analisar, utilizam-se diferentes testes que se adequam a cada dado que seja do material que já seja conhecido. Os ensaios são divididos em ensaios estáticos e ensaios dinâmicos. Os ensaios estáticos, são considerados ensaios quasi-estáticos, uma vez que é aplicado cargas progressivas numa velocidade baixa e baixa taxa de deformação. Pelo contrário, os ensaios dinâmicos caracterizam-se por ser aplicada uma carga num intervalo de tempo instantâneo e por haver elevadas taxas de deformação.

2.2.1 Ensaios estáticos

2.2.1.1 Ensaios de tração

Ensaios de tração com provetes maciços de adesivo

Um dos testes mais comuns para a determinação de propriedades mecânicas de um adesivo é o teste à tração. As propriedades determinadas são específicas a cada tipo de amostra ou adesivo; são obtidos sob um estado de tensão uniforme e uniaxial. Também é usual usar-se os ensaios de tração para outros tipos de materiais. Este ensaio é normalmente efetuado segundo a norma ISO 527-2 que explicita, como por exemplo, as dimensões do provete, velocidades de teste e condições ambientais de teste. O resultado obtido será uma curva força-deslocamento [13]. Na Figura 5 verifica-se um ensaio à tração instrumentado de um provete. Para a obtenção de resultados, são usados uns sensores para o registo da tensão ao longo do ensaio. Após a separação completa dos aderentes, é extraída uma curva tensão-deformação.

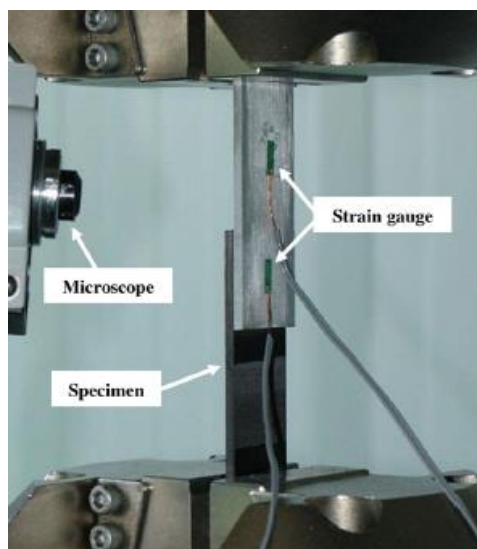


Figura 5 - Ensaio de tração instrumentado de um provete [14]

Ensaio de tração em juntas topo a topo

Os ensaios de tração em juntas topo a topo são os mais indicados para obter a resistência à tração de uma junta adesiva. Este teste a norma ASTM D897 e também é possível obter mais resultados, como por exemplo o módulo de elasticidade do adesivo. Uma grande vantagem é que apenas ocorre rotura na junta, logo é possível reutilizar os provetes para um teste futuro. Os provetes têm uma forma geométrica circular e são ligados através do adesivo. Para a obtenção dos resultados, será aplicada uma força simétrica e perpendicular ao plano de colagem [13].

2.2.1.2 Ensaio de compressão

Sólidos compactos são geralmente considerados não compressíveis. As cargas aplicadas ao material não envolvem um esforço de compressão significativo, por consequência, é necessário adaptar o ensaio a cada tipo de material. Os ensaios de compressão seguem a norma ISO 604 ou ASTM D695.

2.2.1.3 Ensaio de corte

Estes tipos de ensaios são tipicamente os mais usados no estudo de um adesivo ou de uma ligação adesiva, uma vez que serão os esforços de corte que terão mais impacto na resistência de uma junta adesiva [13].

Ensaio de corte em JSS

Para a caracterização de uma junta adesiva é usual aplicar ensaios de corte em JSS (juntas sobreposição simples). Neste caso, através do uso de uma máquina de ensaios convencional, será aplicado um esforço paralelo ao plano de colagem nas extremidades dos substratos até ocorrer a rotura do provete, provocando maioritariamente esforços

de corte na área de colagem. Este ensaio é geralmente executado sob as normas ASTM D 1002, ISO 4587 ou equivalente e permite obter a tensão de corte aparente (τ) [13].

Ensaio Iosipescu ou *V-notched beam shear method*

O ensaio *V-notched beam* foi originalmente proposto por Iosipescu para testar a resistência dos metais e juntas soldadas sob condições de corte puro. Este ensaio, é utilizado também para caracterizar compósitos. Segue a norma ASTM D5379 e consiste em aplicar cargas de compressão assimétricas em quatro pontos distintos. Isto faz com que seja provocada uma zona de momento nulo no centro do provete e que seja criada uma sollicitação de corte puro. Através deste ensaio é possível obter τ e o módulo de corte (G). O provete consiste num pequeno paralelepípedo retângulo maciço com dois entalhes em V simétricos em relação ao seu eixo axial [13].

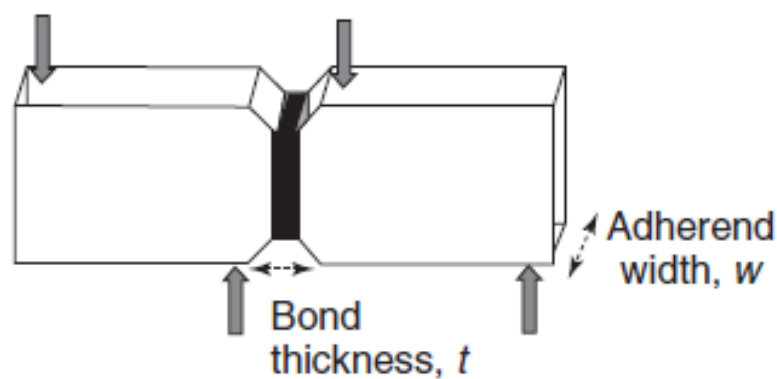


Figura 6 - Ensaio Iosipescu (aplicação de cargas assimétricas num provetes com dois entalhes em V) [13]

Ensaio Arcan ou *Notched plate shear method*

Este ensaio consiste em fixar o provete em quatro pontos distintos e simétricos. Os provetes são usualmente maciços de adesivo ou provetes de junta e constam com dois entalhes simétricos com abertura de 90°. É possível determinar τ e G . Com a aplicação de forças simétricas, o afastamento das garras provoca tensões de corte no provete [13].

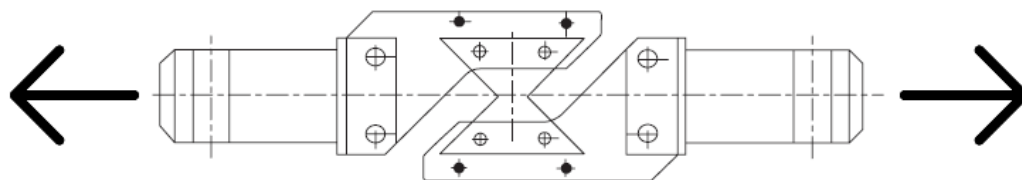


Figura 7 - Ensaio Arcan (adaptado de [13])

Ensaio *Thick Adherend Shear Test (TAST)*

Este tipo de ensaio é muito utilizado devido à facilidade de fabrico e da sua forma simples. A resistência ao corte do adesivo é caracterizável, pois obtém-se τ e G . As normas mais usuais que regem este ensaio são a ASTM D3983 ou a ISO 11003-2, sendo

que a principal diferença entre os dois tipos de teste é a dimensão do provete. Os provetes do ensaio TAST possuem uma geometria simples com um pequeno degrau que se situa na área de sobreposição. O aço é o material mais usado para que seja solicitado corte quase puro ao adesivo, uma vez que ainda há picos de tensão [13].

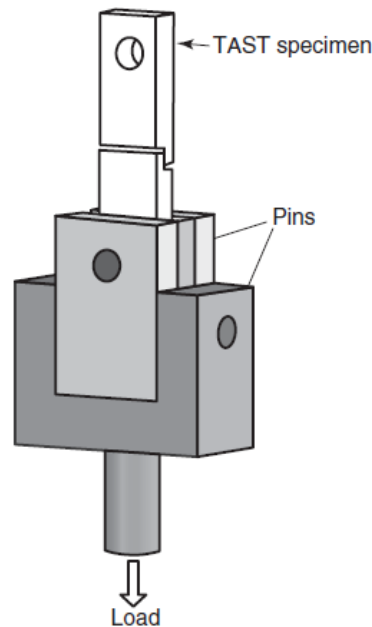


Figura 8 - Ensaio TAST [13]

Ensaio de junta topo a topo em torção ou *Napkin-ring test*

Este ensaio contém os princípios do ensaio de tração em juntas topo a topo. A diferença reside no momento torsor aplicado ao provete, que por sua vez se transfere para o adesivo provocando um estado de tensão de corte puro. Com este ensaio também é possível obter τ e G [13].

2.2.1.4 Ensaios de arrancamento

Existem vários ensaios que possibilitam a avaliação da junta em termos de esforços provocados por arrancamento. Estes tipos de testes dependem fundamentalmente da preparação da junta. É necessário haver uma preparação prévia para que haja uma boa ligação entre o adesivo e o aderente.

Junta tipo “T”

Neste ensaio, dois aderentes flexíveis são colados pelo adesivo formando um “T”. A estes dois provetes será aplicada uma força de tração, provocando a rotura por arrancamento [13]. Este ensaio segue a norma ASTM D1876, e na Figura 9 verifica-se todas as dimensões que são relevantes para este ensaio.

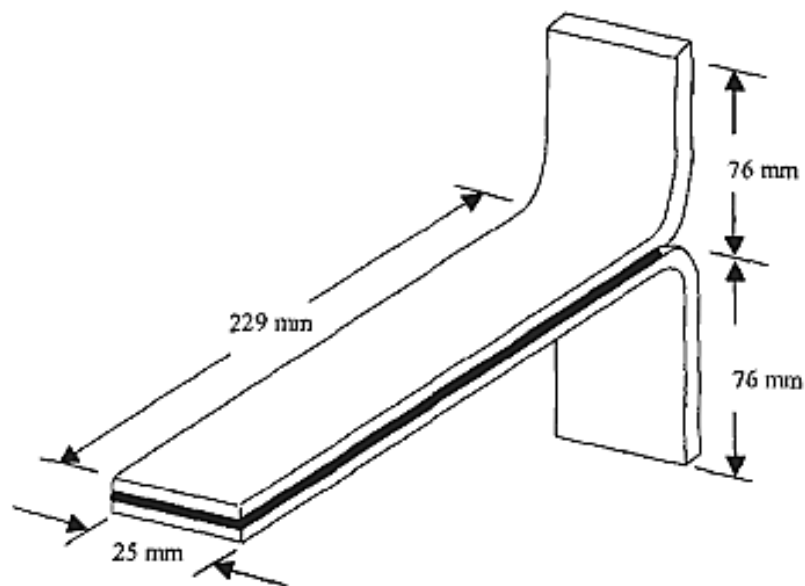


Figura 9 - Ensaio de arrancamento com uma junta do tipo "T" segundo a norma ASTM D1876 [15]

Arrancamento a 180°

Para analisar um tipo de ligação flexível-rígido é normal a utilização deste tipo de ensaio. O substrato rígido é fixo e o substrato flexível é dobrado a 180° e puxado de forma a haver rotura na junta [13].

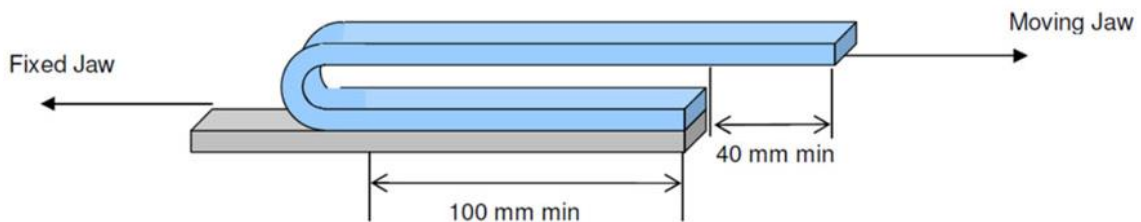


Figura 10 - Ensaio de arrancamento a 180° [16]

Rolete flutuante

Os adesivos estruturais não modificados, por norma, são frágeis. Mas são facilmente melhorados, mudando as suas formas físicas e químicas. Este tipo de teste é mais utilizado para a análise dos adesivos mais dúcteis e mais frágeis [13]. O teste do rolete flutuante segue a norma ASTM D3167 e consiste em aplicar forças de arrancamento com a amplitude pretendida. Como se verifica na Figura 11 a inclinação do arrancamento, é dada pela amplitude imposta ao aderente 1. Neste ensaio dá-se o arrancamento quando se aplica uma força de tração ao provete 2.

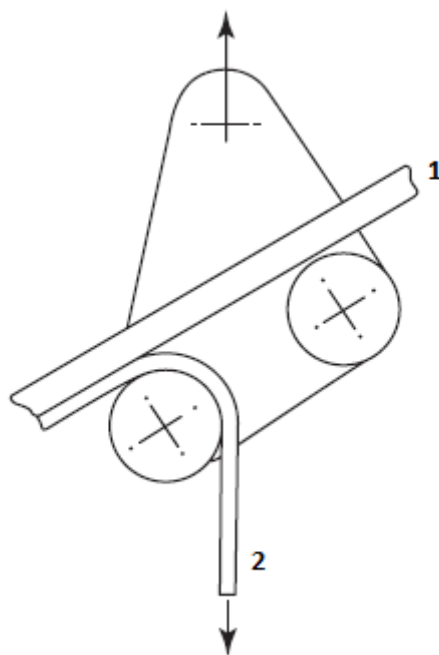


Figura 11 - Ensaio rolete flutuante [13]

Climbing drum test

Este ensaio é utilizado para situações que os aderentes ligados não são flexíveis o suficiente para provocar o arrancamento noutra forma. O aderente menos rígido será enrolado num cilindro rígido. Nesta forma, será provocada uma elevada força de arrancamento no adesivo [13].

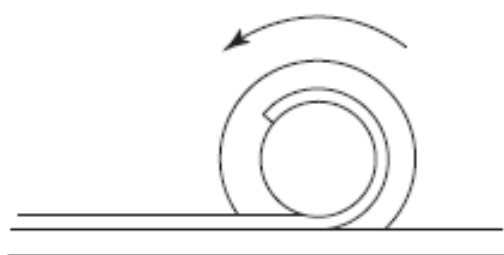


Figura 12 - Climbing drum test [13]

2.2.1.5 Ensaios de caracterização à fratura

Os ensaios de caracterização à fratura dividem-se entre os tipos de roturas conhecidas. Na Figura 13 apresentam-se os diferentes modos de fratura. No modo 1 ocorre uma rotura por abertura da fenda. Já nos modos 2 e 3 são provocados esforços de corte, sendo que a diferença é a orientação da rotura, ou seja, o modo 2 esta apresenta uma direção da fenda e no modo 3 direção perpendicular.

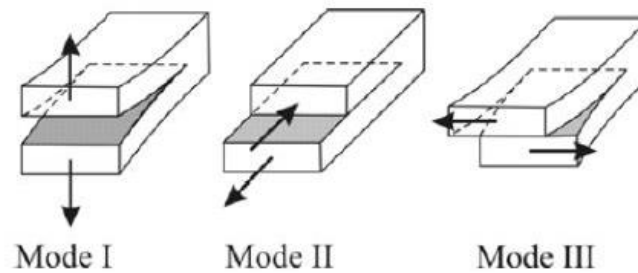


Figura 13 - Diferentes modos de rotura

Double Cantilever Beam (DCB) e Tapered Double Cantilever Beam (TDCB)

Estes dois testes são utilizados para determinar a taxa crítica de libertação de energia de deformação em modo 1 (G_{Ic}). Os provetes DCB são geralmente os mais escolhidos, devido à sua simplicidade de fabrico. Já os provetes TDCB são mais complexos e mais caros, mas têm a vantagem de o aumento constante da sua altura fornecer uma mudança linear da flexibilidade com o comprimento da fenda. Os dois ensaios seguem a norma ASTM D3433 onde é possível verificar os tipos de carregamento e as dimensões do provete [13].

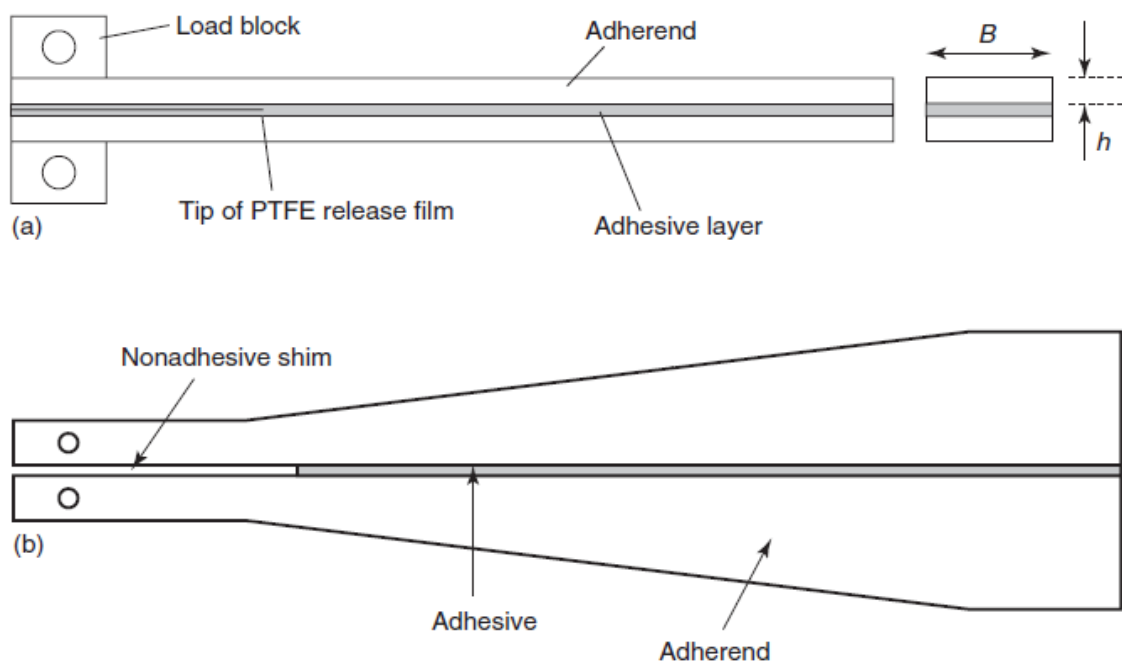


Figura 14 - Provette DCB com blocos de carga (a) e provete TDCB e (b), segundo a norma ASTM [13]

2.2.2 Ensaios dinâmicos e de impacto

Os testes dinâmicos que determinam o E e o G . Apesar da viscosidade natural dos adesivos poliméricos, as propriedades abaixo da temperatura de transição-vítrea não são significativamente dependentes.

Ensaio com pêndulo (IZOD e Charpy)

A análise ao impacto de estruturas ligadas requer uma análise cuidadosa. Os ensaios IZOD e Charpy são específicos para materiais metálicos ou termoplásticos. Mas estes testes não devem ser realizados em adesivos e não podem ser utilizados em juntas adesivas, uma vez que levam à má interpretação dos resultados [13]. Para o ensaio de Charpy, a carga de impacto é aplicada por um pêndulo largado numa altura fixa. O provete é fraturado e a energia dissipada é determinada pela altura máxima que o pêndulo alcança após impacto [17]. Na Figura 15, é possível verificar outro tipo de teste que se equipara ao ensaio de Charpy. Neste teste, uma cunha é largada a uma determinada altura. Após o embate com o provete de teste, é provocada a fratura do adesivo.

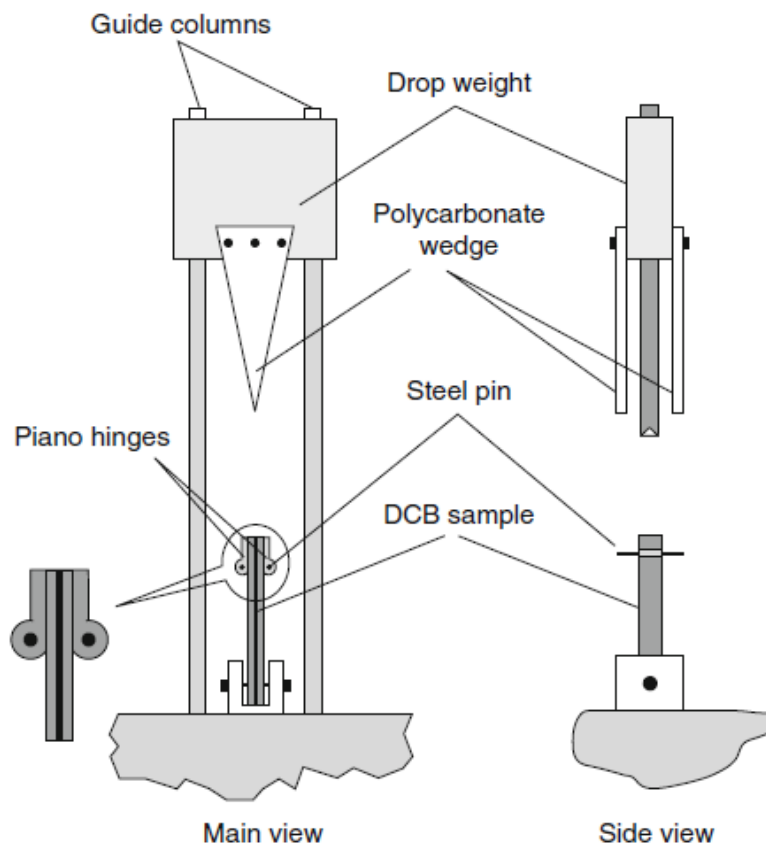


Figura 15 - Falling wedge test [17]

Ensaio de impacto em blocos ASTM (*ASTM Block Impact Test*)

Para se conseguir contornar as controvérsias nas juntas adesivas provocadas nos ensaios IZOD e Charpy, utiliza-se este tipo de ensaio. Estes testes seguem as normas EN 29653 e ISO 9653. Em particular, é necessária uma maior atenção para o desenvolvimento da máquina de impacto e para o fabrico dos provetes, assim como com a configuração do teste, uma vez que o impacto nos blocos é muito consistente. Este ensaio consiste em provocar o impacto de um pêndulo nos provetes ligados pelos adesivos. Os resultados são obtidos na mesma forma que no ensaio de Charpy [13].

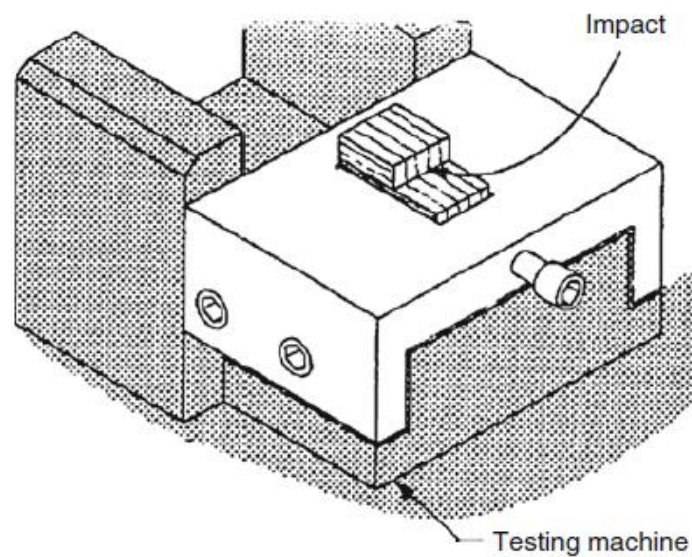


Figura 16 - ASTM Block Impact Test [4]

Barra de Hopkinson

A principal técnica para estudar o comportamento dinâmico de materiais de média a alta taxa de deformação é a barra de Hopkinson. Este teste possui várias configurações de modo a criar várias condições de esforço, como por exemplo torção, flexão, tração ou compressão. É com uma configuração particular denominada *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) que é possível determinar o comportamento dinâmico de juntas adesivas. Este ensaio consiste em lançar um projétil com ar comprimido e provocar o impacto com a barra de *input*, que transmite o impulso ao provete, e de seguida é parcialmente propagado desde o provete à barra de *output*. Calculando a diferença entre os dois impulsos, é possível retirar a curva tensão-deformação do material testado [13].

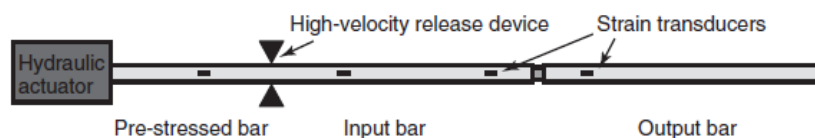


Figura 17 - Ensaio da barra de Hopkinson [17]

Drop test

Neste teste, seguindo a teoria de de Zwolinski et al. [4], cada provete está sujeito a três quedas de uma altura de 0,914 m. Através de uma inspeção visual e pela medição da resistência elétrica, é possível analisar a presença de danos no provete. Para adesivos é recomendado avaliar o desempenho ao impacto com uma série de seis quedas de 1,52 m, com um provete formado com uma ligação *plastic leaded chip carrier* (PLCC). No *drop test*, é possível retirar a resistência da junta e não do adesivo em si.

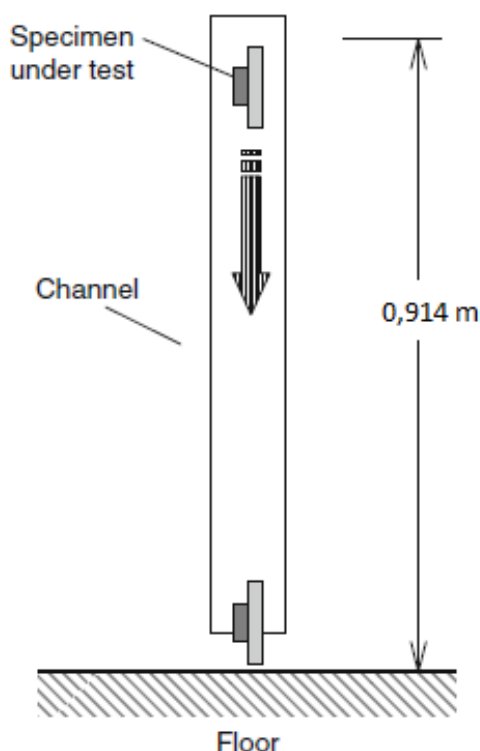


Figura 18 - Drop test (adaptado de [4])

2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

A previsão de resistência de juntas adesivas obtém importância, uma vez que, com esta, é possível dimensionar diferentes tipos de estruturas. Assim, o erro de ocorrer um sobredimensionamento ou um subdimensionamento é mínimo. É importante ter em mente, que mesmo assim existe sempre um sobredimensionamento, e isto ocorre devido aos coeficientes de segurança aplicados previamente para que a estrutura não falhe. Já no caso das ligações adesivas, ao longo do tempo, foi-se reduzindo o sobredimensionamento devido ao aparecimento de técnicas que tornavam a ligação mais eficiente e mais fiável. Para a previsão de resistência de juntas adesivas recorre-se a dois métodos, nomeadamente as expressões de forma fechada (métodos analíticos) e os métodos numéricos.

2.3.1 Previsão para solicitações estáticas

2.3.1.1 Métodos analíticos

Um dos primeiros investigadores a aprofundar o estudo dos métodos analíticos foi Volkersen [18], cujo modelo apenas consistia em obter as distribuições de tensões de corte em juntas adesivas.

Inicialmente, Volkersen analisava materiais inteiramente elásticos solicitados à tração e com o adesivo sujeito apenas a esforços de corte. Neste método, todos os esforços de arrancamento eram desprezados, devido à alta rigidez dos aderentes.

Devido às geometrias simplificadas, esforços e as condições fronteira, a previsão será fundamentada por critérios de tensões e de deformações. Deste modo, estes métodos acabam por ser substituídos pelos métodos numéricos.

2.3.1.2 Métodos numéricos

Este tipo de métodos surge de forma a obter um resultado mais fiável e fidedigno no comportamento das ligações adesivas, sem introduzir as simplificações que são necessárias fazer nos métodos analíticos. Estes métodos trazem uma grande evolução para a previsão de resistência de juntas adesivas, uma vez que é possível também estudar e prever o comportamento no regime plástico dos materiais.

Harris e Adams [19] introduziram fatores que influenciam o comportamento da junta, como por exemplo, a rotação da junta, a plasticidade dos substratos e do adesivo, e os filetes da junta, à técnica que fundamentaram, o Método de Elementos finitos (MEF). O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões que por abordagens energéticas como a técnica de fecho virtual (TFFV). No entanto, estas técnicas de modelação dificultam a avaliação do desenvolvimento da fenda, pois será necessário recriar a malha ao longo da propagação da fenda, o que pode trazer consequências a nível do esforço computacional.

Devido à grande evolução que a modelação numérica sofreu, a modelação de dano por modelos de dano coesivo (MDC) teve um elevado impacto para a previsão de resistência das juntas adesivas. Esta técnica tem como vantagem a agregação do modelo convencional por MEF para as zonas que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover o desenvolvimento e propagação de fendas.

Mais tarde, com o desenvolvimento da modelação numérica, começou-se a usar outra técnica para modular a propagação da fenda, o Método de Elementos Finitos Extendido (MEFX). Este método utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

2.3.1.3 Mecânica dos meios contínuos

A técnica da mecânica dos meios contínuos utiliza os modelos analíticos ou numéricos, como por exemplo o MEF, para obter os valores de tensão, deformação ou energia de deformação. Estes resultados são usualmente utilizados num critério de falha para estimar a resistência de estruturas. Porém, estes tipos de critérios contêm limitações devido às concentrações de tensões geradas pelas arestas vivas nas extremidades da

região de sobreposição. Numa análise MEF a uma estrutura com juntas adesivas, as tensões numa determinada região aumentam com o refinamento da malha impedindo a obtenção de convergência. Assim, todos os resultados obtidos em previsões serão dependentes da malha utilizada. Estes critérios não têm em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a existência de defeito no adesivo.

2.3.1.4 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos não é adequada caso os existam defeitos do material, reentrâncias ou arestas vivas ou outro tipo de tensões singulares, uma vez que este método não considera descontinuidades ao longo da estrutura e no material. Neste método, são contabilizados todos os defeitos da junta que podem ser importantes para a sua aplicação, como por exemplo, os defeitos de fabrico ou qualquer tipo de ação causada ao longo do seu funcionamento. Na mecânica da fratura pode-se aceitar que as tensões registadas através da mecânica dos meios contínuos sejam infinitas nas extremidades da fenda da fratura. Sempre que o ângulo da fenda de fratura seja menos que 180° , este resultado está sempre presente. Esta conclusão foi descoberta por Williams [20] para singularidades de tensões num entalhe em cunha. Nos vários estudos que incluem juntas adesivas, não é usual aplicarem o fator de concentração de tensões, uma vez que este não é determinável o percurso da fenda até à interface. Então, pelo contrário, é comum usar a taxa de libertação de energia, G , e a respetiva taxa crítica de libertação de energia, G_c (Fernlund e Spelt [21]). A fratura da junta tem de ocorrer segundo um método misto, uma vez que existe uma discrepância entre as propriedades dos materiais e a complexidade do campo de tensões. O conceito de superfície de fratura deve ser introduzido, uma vez que o critério de falha para o modo misto é desenvolvido num modo análogo ao critério de falha clássico.

2.3.1.5 Modelos de dano coesivo

Um grande número de investigações tem sido dedicado ao problema da formação e desenvolvimento da fenda durante a fratura frágil nos sólidos. Um dos pioneiros a investigar este tipo de caso foi Griffith [22], cujo estudo recaiu para a determinação do comprimento crítico da fratura numa determinada carga aplicada. Assumindo uma fenda com forma elítica num corpo infinito sujeito a uma tensão homogénea infinita, Griffith obteve uma expressão matemática para o comprimento crítico da fenda que corresponde ao aumento total de energia. Ao longo dos anos, com o desenvolvimento técnico e computacional, a teoria de Griffith foi sendo aprimorada e generalizada. Os modelos de dano coesivo (MDC) podem-se basear geralmente como elementos de mola ou como elementos coesivos. Estes podem ser aplicados em MEF convencionais para a modelação do comportamento de fratura em vários materiais, inclusive em juntas adesivas. O princípio fundamental dos métodos de dano coesivo diz que, aplicando

artificialmente zonas de propagação da fenda, é possível avaliar o crescimento da fenda através da aplicação de uma descontinuidade no campo de deslocamentos. As leis do MDC são aplicadas entre nós partilhados por elementos coesivos, sob a forma de leis coesivas (tração-separação). O MDC proporciona uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo do percurso da fenda, independentemente dos parâmetros microscópicos no início da fenda. Para a contabilização da degradação do material, é analisada a resistência e a perda da rigidez até à rotura total.

2.3.1.6 *Mecânica do dano*

A mecânica de dano é considerada um método alternativo aos MDC, no qual a introdução de dano gera redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano utilizam um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução da resistência e da rigidez. Daudeville e Ladevèze [23] estudaram a mecânica de dano, em que consiste implementar a delaminação de compósitos ou a rotura da matriz. Já Khoramishad et al. [24] desenvolveram este mesmo método para camadas finas de adesivo. Com estas investigações provou-se que, à aplicação da carga, é possível representar a severidade do dano antes de se dar o início da fenda, assim como a propagação da mesma. As variáveis de dano podem ser classificadas sob dois principais grupos. No primeiro, consideram-se variáveis que preveem a quantidade de dano pela redefinição das propriedades do material, mas que não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. Já no segundo método, as variáveis intervenientes são relacionadas diretamente com a definição de um tipo específico de dano, como por exemplo, as porosidades ou a área relativa a micro-cavidades [25]. Para a mecânica do dano, através da carga em simulações estáticas ou do número de ciclos da análise da fadiga, é possível definir o crescimento do dano. Comparando com os MDC para fadiga, nas técnicas da mecânica de dano não é possível distinguir entre a fase de iniciação e de propagação da fadiga. Contudo, pode ser simulada a evolução do dano causado na pré-rotura. Mas por outro lado, a modelação por MDC está limitada a percursos já pré-definidos de propagação de fenda, pelo que é recomendável a utilização dos métodos de mecânica do dano caso o percurso da fenda não seja conhecido ou se o dano for mais disperso [26].

2.3.1.7 *MEFX*

Com a evolução do MEF, surge o MEFX. Este método é usado para a modelação da propagação do dano em estruturas e é baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e deformação para avaliação da rotura (definido por G_{IC}), 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, ao contrário dos MDC, não é necessário conhecer o caminho da propagação da fenda. Sendo assim, permite-se que a fenda se propague livremente ao longo do material, sem que seja

imposta a coincidência da geometria da malha com as descontinuidades, para além que também já não é requerida a reconstrução da malha nas proximidades da fenda [27]. Nos finais dos anos 90, Belytschko e Black [28] apresentaram as características fundamentais deste método e implementaram funções de enriquecimento nas proximidades do elemento finito para contabilizar a presença de fenda. Com isto, é possível que a fenda seja alinhada arbitrariamente dentro da malha. Para fissuras com uma curvatura severa, pode ser necessário recorrer à remodelação da malha, mas apenas em locais consideravelmente longe da fissura, que por sua vez será muito mais fácil. Devido à propagação da fenda, a extremidade da fenda altera constantemente a sua direção, uma vez que está dependente da carga aplicada e da geometria da estrutura.

2.3.2 Previsão para solicitações dinâmicas

2.3.2.1 Métodos analíticos

Os métodos utilizados na previsão para solicitações dinâmicas ou de impacto são diferentes dos métodos analisados anteriormente, uma vez que é necessário ter em conta as componentes das deformações viscoelástica e viscoplástica. Neste tipo de métodos, existe uma dependência das propriedades dos materiais como a taxa de deformação. Nos próximos subcapítulos vão ser apresentados alguns métodos relevantes para a previsão de resistência em solicitação ao impacto.

2.3.2.1.1 Modelo de Voigt/Maxwell

Voigt e Maxwell [1] expressam, através dos seus modelos viscoelásticos, a deformação elástica de um adesivo em função do tempo. Estes modelos podem obter um grau de complexidade superior, adicionando elementos suplementares. Os parâmetros utilizados para uma análise dinâmica têm de ser determinados via experimental.

Sato e Ikegami [29] estudaram a propagação das ondas de tensão e a concentração de tensões dinâmicas sob a carga de impacto em JSS e juntas com chanfro exterior e chanfro interior (*scarf*).

Mais tarde, um modelo unidimensional que, caracterizando o comportamento termomecânico finito complexo e altamente não linear de polímeros viscoelásticos, é desenvolvido por Khan et al. [30] e baseiam-se numa combinação de molas lineares e não lineares, incorporando o comportamento polimérico típico, como a diluição por corte, amolecimento térmico em temperaturas mais altas e a dependência não linear da deformação e da taxa de carregamento.

2.3.2.1.2 Modelo Cowper-Symonds

Segundo Cowper e Symonds [31], este modelo consiste na utilização de conceitos elastoplásticos e é utilizado para a previsão da dependência da taxa de deformação. O comportamento dinâmico das juntas coladas é influenciado pelas propriedades mecânicas dinâmicas do material dos aderentes e dos adesivos. Goglio et al. [32] aplicaram o modelo de Cowper-Symonds no estudo da influência da taxa de deformação na resistência máxima à rotura e compressão num adesivo epóxico. Embora os resultados obtidos para taxas de deformação mais elevadas estejam validados, não foram encontrados resultados suficientemente satisfatórios para toda a gama de velocidade de ensaio utilizadas.

2.3.2.1.3 Modelo Johnson-Cook

A proposta do modelo de Johnson-Cook [33] contrapõe os últimos dois modelos apresentados, o modelo Voigt/Maxwell e o modelo Cowper-Symonds. Ao contrário destes dois modelos referidos, que fundamentam as suas soluções em base de modelos de modelos viscoelástica, o modelo de Johnson-Cook tem como base um modelo viscoplástico. Desta forma, este modelo permite relacionar a deformação após rotura com a taxa de deformação do material [34].

2.3.2.1.4 Modelos de sobretensão

Os modelos de sobretensão consistem em aplicar uma carga elevada no material em alternância com períodos de relaxamento, de forma que seja possível avaliar a taxa de deformação. Por consequência, os modelos de sobretensão geram estados de tensão extremamente elevados, em que é possível que os mesmos excedam a tensão de cedência [34].

2.3.2.2 Métodos numéricos

Englobando os modelos previamente apresentados, o estudo da previsão de resistência de juntas adesivas sujeitas a solicitações de impacto apoia-se nos métodos de solicitações estáticas e especialmente no MEF. Exigindo a utilização de modelos dinâmicos tem de se ter em conta os efeitos de inércia, é necessário recorrer à determinação das propriedades dos materiais consoante a taxa de deformação aplicada. Carlberger e Stigh [35] validaram a combinação dos modelos de dano coesivo com a mecânica da fratura para condições de impacto, em que as mais comuns são a lei triangular e a lei trapezoidal.

Com os efeitos de inércia do material e as propriedades já conhecidas, os modelos estáticos podem ser ajustados para situações dinâmicas.

2.4 Comportamento de juntas adesivas ao impacto

2.4.1 Avaliação experimental

Yokoyama e Shimizu [36] realizaram os ensaios experimentais quasi-estáticos e dinâmicos com o auxílio de um equipamento de tração e um ensaio com barra de Hopkinson, respetivamente. O ensaio com a barra de Hopkinson é modificado para analisar os efeitos da taxa de carregamento, assim como, da espessura de camada adesiva e dos materiais dos aderentes na resistência ao corte. O provete é composto por aderentes de aço e alumínio e por um adesivo com base cianoacrilato. Com os resultados dos testes, é possível verificar que a resistência ao corte aumenta significativamente com o aumento da taxa de carregamento. A espessura da camada de adesivo e os materiais dos aderentes são afetados diretamente com estes efeitos. Foi descoberto que a resistência da junta de provetes com adesivo cianoacrilato aumenta até que a espessura da camada de adesivo ronde os 25 μm e consequentemente diminui quando essa camada é ultrapassada.

Al-Zubaidy et al. [37] analisaram ensaios de impacto em juntas adesivas. Foi utilizada uma camada de polímero reforçado (CFRP) com fibra de carbono unidirecional para unir duas placas de aço. Foram realizados dois tipos de ensaios, um com uma camada de CFRP e outro com três camadas em regime quasi-estático e dinâmico. Os resultados dinâmicos foram comparados com os que foram submetidos à tração estática para destacar a influência da taxa de carregamento. Verificou-se que a carga de impacto tem influência significativa na resistência da junta, mas pouca influência no comprimento efetivo da ligação.

Kemiklioglu et al. [38] estudaram as diferenças de comportamento entre adesivos dúcteis e frágeis. Os aderentes escolhidos são constituídos compósitos de epóxido de fibra de vidro utilizando um método de fabrico de impregnação de resina assistida a vácuo (VARIM). Como materiais de união foram usados dois tipos de adesivos, Loctite-9466 e DP-460, sendo estes frágil e dúctil, respetivamente. Uma vez que a estes possuem resistências próximas sob carga estática, foram aplicados diferentes patamares de energia de 5, 10, 15 e 20 Joules. Os resultados obtidos mostram que as resistências à rotura destes dois adesivos dependem das cargas de impacto impostas.

2.4.2 Previsão por métodos numéricos

Usando a modelação de JSS com quatro adesivos epóxidos e três aderentes de liga de alumínio, Harris e Adams [39] chegaram à conclusão de que, em comparação com os valores estáticos obtidos, a resistência da junta não é significativamente afetada pelas elevadas taxas de carregamento. A energia absorvida é elevada quando a carga aplicada na junta é suficiente para que ocorra a deformação plástica nos aderentes antes da falha.

Carlberger e Stigh [35] usaram três modelos diferentes em ensaios com um adesivo epóxico para estudar a dinâmica da fratura. Com o auxílio dos métodos de elementos finitos tridimensionais (3D-MEF), são analisadas as propagações da onda de tensão e as distribuições de tensão na interface da JSS sob cargas de tração de impacto. É importante referir que é necessário ter em consideração a taxa de deformação do adesivo usando o método de Cowper-Symonds. Foi verificado que se inicia a rotura da junta próximo à área intermediária das bordas das interfaces ao longo da direção da largura. Para além disso, também são analisados os efeitos do módulo de elasticidade do aderente, o comprimento de sobreposição, e a espessura da camada adesiva e a velocidade de impacto inicial da massa nas propagações da onda de tensão e as distribuições de tensão da interface.

2.4.3 Estado da arte

Na Tabela 1 apresentam-se breves descrições de estudos ao impacto de juntas adesivas anteriormente já realizados. Os testes apresentados, são na generalidade para JSS, uma vez que não existem muitos estudos para JSD e outras geometrias de junta.

Tabela 1 - Estudos ao impacto de juntas adesivas

Referências Bibliográficas	Descrição do trabalho
<i>Impact rupture of structural adhesive joints under different stress combinations</i> [40]	Neste estudo, foi utilizado o método do pêndulo, preparado para estudar as tensões de corte de juntas adesivas. Esta configuração de teste é a mais adequada para estudar possíveis modificações do comportamento da junta, passando da condição de carregamento estático para dinâmico, mantendo o tipo de provete. O provete é constituído por aderentes em aço ligados por um adesivo epóxi (<i>Hysol</i> 3425). Vários comprimentos de ligação, espessura de adesivo e aderente foram testados, para atingir a rutura sob diferentes combinações de tensões de arrancamento e de corte. Os resultados foram obtidos através de soluções estruturais e situam-se fora da zona limite previamente calculada em condições estáticas.
<i>Influence of tensile impact and strain rate on the response of adhesively bonded single lap joints</i> [41]	Este trabalho tem como objetivo estudar a elevada taxa de deformação do adesivo ao impacto. Para o desenvolvimento do estudo, utilizaram-se provetes JSS compostos por aderentes de laminado de epóxico reforçado com fibra de vidro unidirecional e foi imposta uma velocidade de impacto de $2,04E+5$ mm/min. Como

máquina de ensaio, usou-se um pêndulo instrumentado e modificado, equipado com um aparelho de tensão de impacto especialmente desenvolvido. Os resultados indicaram que as juntas adesivas testadas sob uma maior taxa de carregamento demonstram maior rigidez e resistência. Mais tarde, as propriedades dependentes da taxa de deformação derivadas dos dados experimentais serão utilizadas em conjunto com a análise FEM para conduzir estudos paramétricos e otimizar o desempenho das juntas. Os mecanismos de falha observados deduzidos do estudo de microscopia eletrônica de varredura dos provetes rejeitados também são apresentados.

A critical assessment of the block impact test for measuring the impact strength of adhesive bonds [42]

Neste trabalho, foi feita uma análise de um teste de impacto amplamente recomendado para adesivos, o ensaio de impacto em blocos ASTM. Foi demonstrado que o teste apresenta várias limitações relacionadas com a dificuldade de montagem do provete e a necessidade de fixar a máquina de ensaio de impacto a uma base rígida e pesada. A análise de FEM foi usada para indicar como a natureza das tensões principais no adesivo depende da precisão com que o pêndulo entra em contacto com o provete.

3-D FEM stress analysis and strength evaluation of single-lap adhesive joints subjected to impact tensile loads [43]

Neste trabalho, são analisadas pelo 3D-MEF a propagação das ondas de tensão e as distribuições de tensão da interface da JSS sob cargas de impacto. No teste, leva-se em consideração a taxa de deformação do adesivo. O método de previsão para solicitações dinâmicas utilizado é o método de Cowper-Symonds. A rotura da junta inicia-se junto da interface. Também são analisados os efeitos do módulo de Young do aderente, o comprimento de sobreposição e, a espessura da camada adesiva e a velocidade de impacto inicial nas propagações da onda de tensão e as distribuições de tensão da interface. Para além disso, as características são comparadas com as da junta sob cargas estáticas, que mostram as diferentes propriedades. Os resultados medidos confirmam os resultados obtidos numericamente. A resistência da JSS, que é descrita usando energia de impacto, é obtida entre 5,439 e 5,620 J.

*Finite element analysis
of adhesively bonded
composite joints
subjected to impact
loadings [44]*

Este trabalho tem como objetivo analisar os efeitos geométricos e materiais em JSD submetidas a carregamentos dinâmicos no plano. As análises 3D-MEF foram realizadas com velocidades quasi-estáticas e de impacto. A JSD foi usada para o caso quasi-estático, enquanto para a análise dinâmica foi adicionada a barra de Hopkinson. No ensaio assumiu-se o comportamento elástico para o adesivo e para os aderentes e extraiu-se a tensão de corte média e o campo de tensões uniforme. Na análise dos resultados, observou-se que a rigidez ao corte do adesivo aumenta a tensão de corte média. Os valores mais elevados de rigidez longitudinal do substrato tornam a tensão de corte média maior; ao passo que a uniformidade das tensões da junta é mais facilmente alcançada para menor rigidez dos substratos.

DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

3.2 Trabalho numérico

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

No presente capítulo será apresentado todo o trabalho laboratorial realizado para efeitos de validação do modelo numérico. Para este efeito, foram testadas JSS por ao impacto com diferentes L_0 utilizando dois diferentes tipos de adesivos. Peres et al. [45] efetuou os ensaios experimentais relacionados com esta dissertação. Após a obtenção dos resultados experimentais, estes serão comparados com os resultados obtidos numericamente no capítulo 3.2 para efeitos de validação, como início de um estudo numérico detalhado acerca do comportamento das JSD ao impacto.

3.1.1 Geometria e dimensões das juntas

Para as juntas JSS ensaiadas foram utilizados três L_0 : 12,5, 25 e 50 mm. Na Tabela 2 estão apresentadas todas as dimensões relevantes para o ensaio. Como se verifica, a espessura dos substratos exteriores é metade da espessura do substrato interior.

Tabela 2 - Dimensões dos provetes de ensaio (dimensões em mm)

Geometria de junta	Comprimento de sobreposição (L_0)	Espessura do adesivo (T_A)	Espessura do substrato (T_P)	Largura da junta (B)	Comprimento total da junta (L_T)
JSS	12,5/25/50	0,3	3	15	200
JSD	12,5/25/50	0,2	1,5/3	15	200

Na Figura 29 verifica-se o tipo de geometria da junta JSD. A T_P difere entre os substratos superior e inferior e o substrato intermédio. Neste caso, o substrato central possui o dobro da espessura dos substratos extremos.

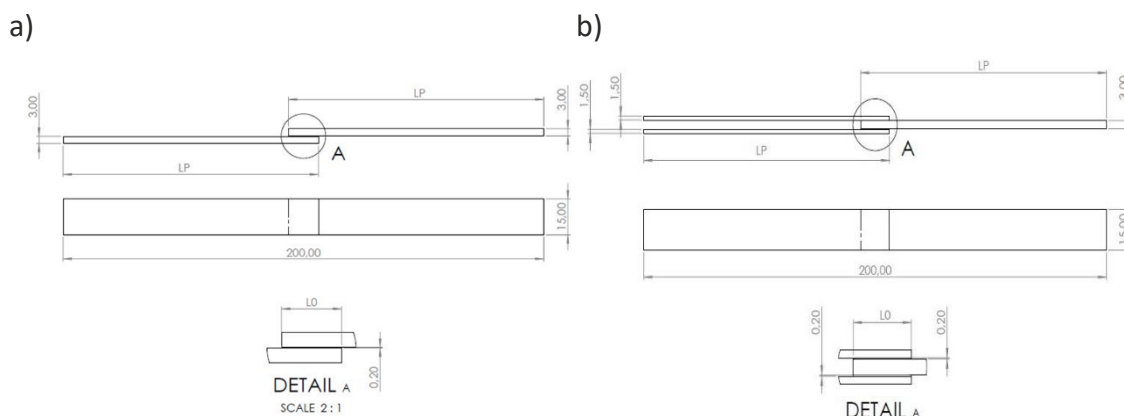


Figura 19 - Dimensões da JSS (a) e JSD (b)

3.1.2 Materiais utilizados

3.1.2.1 Aderentes

Para este ensaio, decidiu-se utilizar o pré-impregnado da marca Seal®, Texipreg HS 160 RM, uma vez que se trata de um material de elevada rigidez. Este aderente é constituído por reforço de fibras de carbono em resina epóxida. Para a composição dos provetes, considerou-se um empilhamento unidirecional de 20 camadas, com as fibras alinhadas longitudinalmente no sentido do carregamento.

Tabela 3 - Propriedades elásticas do *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) [46]

Compósito			Texipreg HS 160 RM		
E_1 [MPa]	$1,09 \times 10^5$	ν_{12}	0,342	G_{12} [MPa]	4315
E_2 [MPa]	8819	ν_{13}	0,342	G_{13} [MPa]	4315
E_3 [MPa]	8819	ν_{23}	0,380	G_{23} [MPa]	3200

Na Tabela 4 podem-se consultar as propriedades coesivas interlaminares do CFRP, correspondentes a uma velocidade de ensaio a 2 m/s. A velocidade de ensaio utilizada é 1,75 m/s, o que faz com que haja uma diferença desprezável nos resultados. Devido à indisponibilidade das propriedades da camada intralaminar, serão utilizadas as mesmas propriedades da camada interlaminar. Em situações reais significa que, seria necessário ocorrer uma homogeneização perfeita da resina no interior das fibras. Assim, é possível realizar os ensaios contabilizando apenas as propriedades das fibras. Mantendo as propriedades, pode ser feita a introdução de uma camada interlaminar em cada um dos aderentes ou, para além das suposições de modelação anteriores, adicionar ainda uma camada intralaminar em ambos os aderentes.

Tabela 4 - Propriedades interlaminares do CFRP [46]

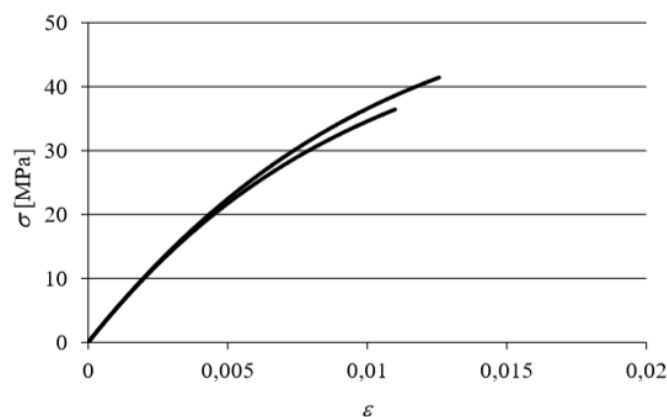
Compósito	Camada interlaminar
E [MPa]	108000
G [MPa]	4315
t_n [MPa]	40
t_s [MPa]	35
G_{lc} [N/mm ²]	0,39
G_{llc} [N/mm ²]	0,82
ρ [g/cm ³]	1,227

3.1.2.2 Adesivos

3.1.2.2.1 Araldite® AV138

A empresa suíça Huntsman Advanced Materials fabrica um adesivo estrutural denominado Araldite® AV138. Este adesivo é caracterizado pelo seu comportamento frágil, mas de elevada resistência. Normalmente este produto é aconselhado para a junção de materiais de diferentes famílias tais como metais, compósitos e polímeros.

Este adesivo é composto por dois componentes, resina AV138 e endurecedor HV998, e é fornecido em duas embalagens. Para se proceder à elaboração do adesivo, é necessário recorrer primeiramente à pesagem dos dois constituintes, com o auxílio de uma balança digital. A relação de mistura utilizada neste adesivo é do 100 g de resina para 40 g de endurecedor, com precisão de $\pm 5\%$. À temperatura ambiente, este adesivo apresenta-se sob a forma de pasta tixotrópica de cura, com baixa emissão de gases e perdas voláteis. Na Figura 20 é possível analisar o desempenho deste material.

Figura 20 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [47]

Na Tabela 5 verifica-se as propriedades mecânicas e de fratura mais importantes para o projeto e modelação numérica de juntas adesivas com o adesivo Araldite® AV138, obtidas para uma solicitação estática. Contudo, tratando-se de um ensaio de impacto, importa conhecer tanto as propriedades estáticas, como também as propriedades dinâmicas do adesivo. Valente [48] determinou as propriedades a diferentes velocidades de ensaio, que podem ser consultadas na Tabela 6. As propriedades a 1 mm/min e 100 mm/min foram determinadas através de resultados experimentais. Já os resultados para a velocidade de 105000 mm/min (equivalente a 1,75 m/s) resultam de extrapolação logarítmica a partir das propriedades obtidas com velocidades de ensaio menores.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [47, 49]

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

Tabela 6 - Propriedades dinâmicas do adesivo Araldite® AV138 [1]

Adesivo	Velocidade (mm/min)	σ_f [MPa]	τ_f [MPa]	G_{Ic} [N/mm]	G_{IIc} [N/mm]
Araldite® AV138	1	41	30,2	0,35	0,6
	100	49,1	36,2	0,35	0,6
	105000	70,2	51,7	0,35	0,6

3.1.2.2.2 Sikaforce® 7752

A empresa Sika® fornece um adesivo estrutural denominado Sikaforce® 7752. Este adesivo é apresentado no mercado em dois componentes distintos e é caracterizado pela sua base de poliuretano estrutural tixotrópico. A sua resistência a altas temperaturas é boa e a sua resina polioli com cargas e endurecedor de base isocianato possui uma baixa emissão de gases e perdas voláteis. O Sikaforce® 7752 pode ser aplicado em vários tipos de superfícies, tais como metais, cerâmicos, madeira e seus derivados. A sua cura ocorre à temperatura ambiente, e é capaz de resistir ao envelhecimento e à exposição química. Na Figura 21 apresentam-se as curvas σ - ε .

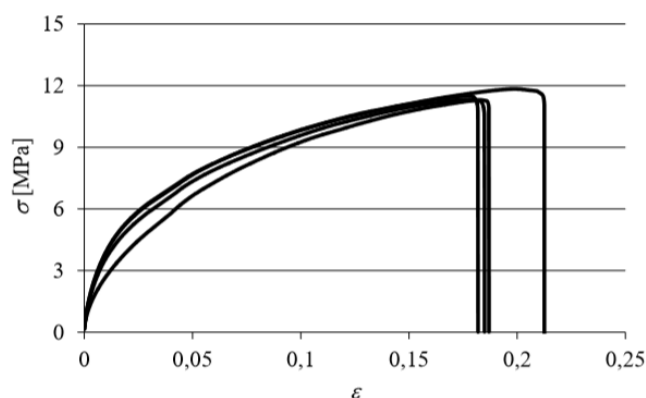


Figura 21 - Curvas σ - ε relativas ao adesivo Sikaforce® 7752 [50]

Tabela 7 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752 [50]

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

^a Valores do fabricante

Através das propriedades obtidas e apresentadas na Tabela 7 conclui-se que existe uma boa combinação entre a sua resistência e a elevada ductilidade típica dos poliuretanos. Segundo estes dados prevê-se que a resistência das juntas seja elevada, e assim as tensões nas camadas de adesivo podem ser elevadas. De facto, em juntas adesivas a plastificação sem rotura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas leva a uma elevada resistência.

Ao contrário do adesivo Araldite® AV138, as propriedades dinâmicas para uma velocidade de ensaio de 1,75 m/s foram obtidas através dos ensaios experimentais, de forma que estes dados se aproximem dos modelos numéricos. Na Tabela 8 podem ser consultados os valores obtidos para as propriedades dinâmicas.

Foram definidas numericamente através de um método inverso (ajuste de curvas $P-\delta$) no trabalho de Peres [45].

Tabela 8 - Propriedades dinâmicas do adesivo Sikaforce® 7752

Adesivo	Velocidade (mm/min)	σ_f (MPa)	τ_f (MPa)	G_{Ic} (N/mm)	G_{IIc} (N/mm)
Sikaforce® 7752	105000	29,875	26,442	1,18	2,705

3.1.3 Fabrico das juntas

Para o fabrico das juntas, procedeu-se a quatro passos distintos:

- Fabrico das placas;
- Cura das placas;
- Corte das placas;
- Preparação superficial e fabricação das juntas adesivas.

3.1.3.1 Fabrico das placas

Para que se proceda a um correto fabrico das placas de pré-impregnado da marca Seal®, Texipreg HS 160 RM, constituído por reforço de carbono em resina epóxida, é necessário seguir os seguintes passos:

1. Dimensionar as folhas do pré impregnado de carbono de forma a obter uma área de $300 \times 300 \text{ mm}^2$, com as fibras orientadas e de seguida cortar as mesmas. Para que após a sobreposição se obtenha uma espessura de placa de 3 mm, é necessário cortar 20 camadas de pré-impregnado por placa a fabricar;
2. Já com as 20 camadas cortadas procede-se o empilhamento das mesmas, tendo em conta a sequência de empilhamento $[0]_{20}$, ou seja, as fibras direccionadas na

mesma direção e paralelas à parede lateral da folha. Durante o empilhamento, com o auxílio de uma pistola de ar quente (Figura 22), as camadas são aquecidas, ativando a resina, para facilitar a colagem das camadas. Simultaneamente, é aplicada pressão com uma espátula do interior até às extremidades, para ajudar ao posicionamento de camada a camada. Para que não haja danos durante a aplicação desta pressão, é colocada uma película que é posteriormente removida após colagem das camadas;

3. Após a colagem das 20 camadas, a película de proteção permanece apenas nas extremidades da placa, onde servirá o efeito para proteger a placa no seu contacto com as placas do molde. Este é constituído por duas placas de alumínio com a mesma dimensão da placa. e por uma moldura de aço com 3 mm de altura e com área interna igual à área das placas de compósito, de forma a envolvê-la perfeitamente. Para compensar a altura das películas de proteção das placas, colocam-se dois espaçadores de alumínio (um em cada lado).

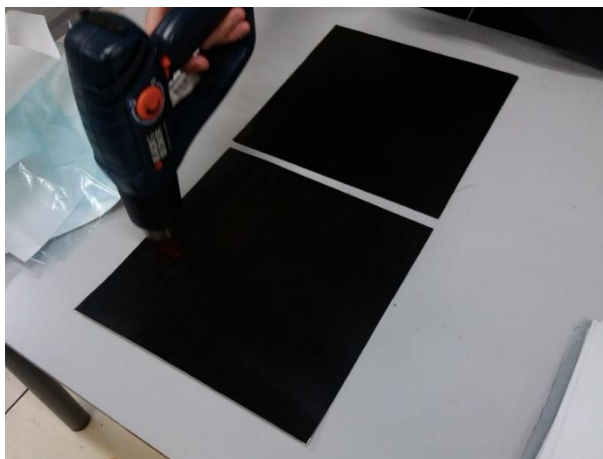


Figura 22 - Aplicação de calor nas camadas com uma pistola de ar quente

3.1.3.2 Cura das placas

Já com o empilhamento realizado, prossegue-se para a cura das placas. Nesta etapa, é utilizada uma prensa de pratos quentes (Figura 23) e as placas são sujeitas a um ciclo térmico anteriormente programado, conforme a Figura 24. Com a utilização deste ciclo, é possível controlar a pressão e a temperatura a que as placas estão submetidas durante o ciclo de cura. Ao longo do processo de cura, a viscosidade da resina epóxida vai diminuindo e a sua difusão vai ser mais uniforme ao longo de toda a área da placa. A prensa exerce uma pressão de 30 bar sob o molde e a cura dá-se a uma temperatura cerca de 130°C ao longo de 1 hora. Após a cura estar completa, retira-se a placa da prensa e deixa-se em arrefecimento ao longo de 1 hora à temperatura ambiente.



Figura 23 - Prensa de pratos quentes utilizada para prensar as placas

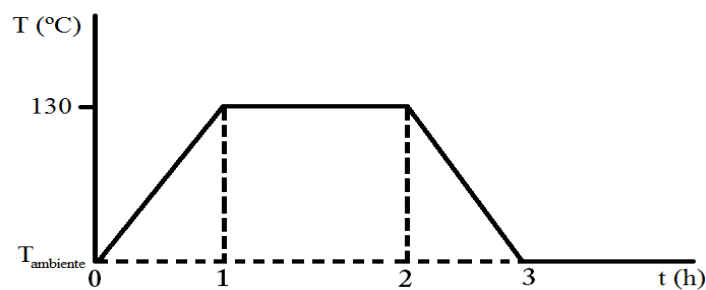


Figura 24 - Ciclo térmico programado para a cura das placas

3.1.3.3 Corte das placas

Após o término da cura, a placa é separada do molde, já com as propriedades mecânicas pretendidas, removem-se as películas de proteção, marcam-se as dimensões dos provetes e procede-se ao corte. Para a realização deste processo, é utilizada uma máquina de corte equipada com um disco diamantado e um sistema de pulverização de água, para prevenir possíveis aquecimentos na zona de corte e suspensão de partículas nocivas. Para os substratos superiores cortaram-se provetes com $280 \times 15 \text{ mm}^2$ e para os substratos inferiores cortou-se provetes com $200 \times 15 \text{ mm}^2$.

Os provetes foram cortados com alguma folga para que seja possível compensar a largura dos dentes do disco de corte e para que, posteriormente, seja possível aplicar uma lixagem para obter uma qualidade de acabamento superior.

3.1.3.4 Preparação superficial e colagem dos provetes

Após os aderentes já terem dimensões desejadas para o fabrico das juntas, prosseguiu-se para a preparação superficial e colagem dos provetes.

Esta etapa inicia com abrasão mecânica por lixagem (Figura 25) com o objetivo de eliminar todas as impurezas prejudiciais e aumentar a molhagem do material, para que

haja uma ligação forte e resistente entre o adesivo e o aderente. Para este processo utilizou-se uma lixa de grão P60 como agente de limpeza superficial. Após a conclusão da lixagem, usou-se acetona para remover os resíduos resultantes do processo de lixagem e outros que possam existir durante o processo de fabrico.

Após a preparação dos provetes, deu-se início à montagem e colagem dos aderentes. Para a obtenção da altura pretendida, coloca-se um fio de nylon entre os substratos, para que o adesivo seja uniformemente espalhado pela zona de sobreposição com uma espessura de 0,2 mm. De forma a prevenir possíveis deformações durante o processo da cura, com a ajuda de gabaritos, nomeadamente espaçadores e grampos, o provete é fixo para que sejam cumpridas todas as dimensões desejadas. Depois da aplicação do adesivo num dos aderentes, o outro entra em contacto com o efeito de báscula para que previna possíveis aprisionamentos de bolhas de ar.

Paralelamente ao processo de sobreposição dos aderentes e seguindo o mesmo processo anteriormente descrito, são colados calços ou *tabs* (espaçadores retangulares que cobrem a largura dos substratos nas extremidades) para garantir o alinhamento na fixação dos provetes nas amarras.



Figura 25 - Processo de lixagem e limpeza dos substratos

Após a conclusão do processo, o provete já apresenta a sua forma final (Figura 26). Já em período de ensaio, os calços são preparados para a fixação nas amarras. Assim, é possível inserir os provetes na máquina de ensaios e garantir a transmissão dos esforços durante a execução do ensaio



Figura 26 - Provete de uma JSD finalizado

3.1.4 Ensaio das juntas

Antes de prosseguir para o ensaio das juntas, é necessário preparar os provetes. Para que os provetes sejam fixos nas amarras, é necessário furar as extremidades para que seja possível a passagem de um pino M8. Adicionalmente à furação, colam-se *tabs* em aço com cerca de 2 mm de espessura para que a resistência na zona de fixação seja maior, dado que o aderente de fibra de carbono não possui resistência suficiente para suportar a carga num ensaio de impacto e pode rasgar pelo furo. De facto, caso isto aconteça, o ensaio deve ser considerado inválido.



Figura 27 - Provete preparado para ensaio

Os ensaios foram realizados no laboratório de Processos Avançados de Ligação da FEUP.



Figura 28 - Laboratório de Processos Avançados de Ligação do INEGI

A máquina utilizada para o ensaio é uma máquina típica de *drum test* (Figura 29). Após a fixação do provete, uma bigorna de 30 kg é libertada e cai livremente sobre a junta até que a situação de impacto aconteça. Para o registo de dados, a máquina possui um *software* especificamente desenvolvido. No *software* é também possível configurar a elevação do peso para que o impacto ocorra com a energia pretendida, como apresenta a Figura 30. Neste ensaio utilizou-se um valor de 40 J. Para que se obtenha este valor, a máquina elevou o peso a uma altura de aproximadamente 136 mm. Através da energia potencial, com uma massa de 30 kg e a aceleração gravítica, será prevista uma libertação de energia cinética no impacto de 40 J.

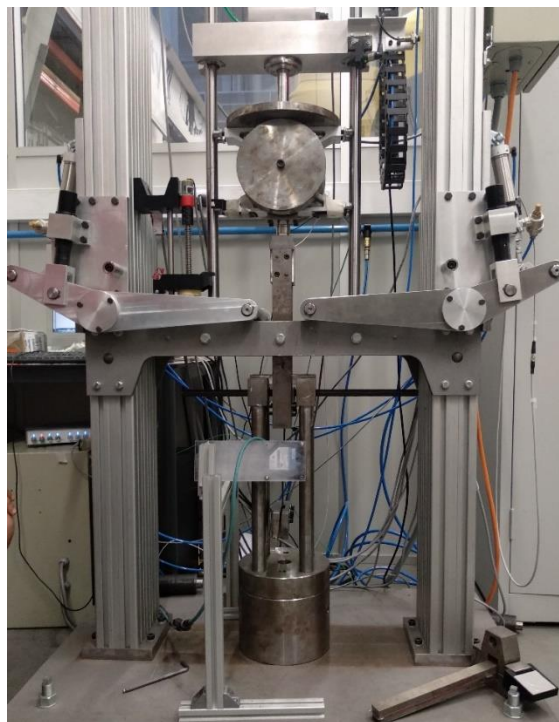


Figura 29 - Máquina de *drop weight*

Para a realização do ensaio, o provete é fixado em duas amarras pelas suas extremidades, e seguidamente é colocado na máquina e suportado por um apoio simples que impede o seu movimento vertical (Figura 31).

Para prosseguir para a obtenção dos resultados, paralelamente, coloca-se um sensor por feixe laser que permite a leitura do deslocamento da junta. Após a calibração de todo o sistema, a máquina está pronta para ser libertar o peso sobre a junta.

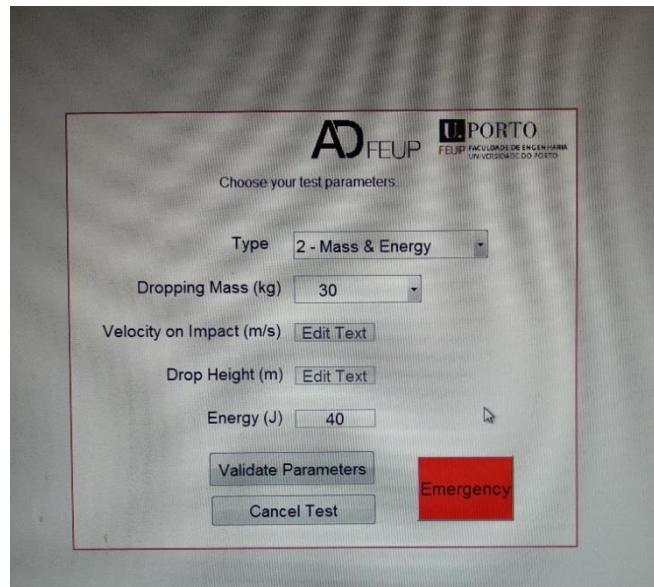


Figura 30 - Configuração dos parâmetros para o *drop test* no *software* da máquina



Figura 31 - Provete colocado na máquina de *drop weight*

3.1.5 Resultados obtidos e discussão

Para cada um dos casos foram testados 5 provetes com junta JSS, ainda que alguns deles tenham resultado em dados inválidos, como será possível observar no decorrer deste capítulo. Os resultados obtidos nas JSS com o adesivo AV138 para os vários L_0 encontram-se representados na Figura 32, Figura 33 e Figura 34, onde podem ser visualizadas as curvas $P-\delta$ correspondentes. Todas as falhas ocorridas experimentalmente foram coesivas no adesivo.

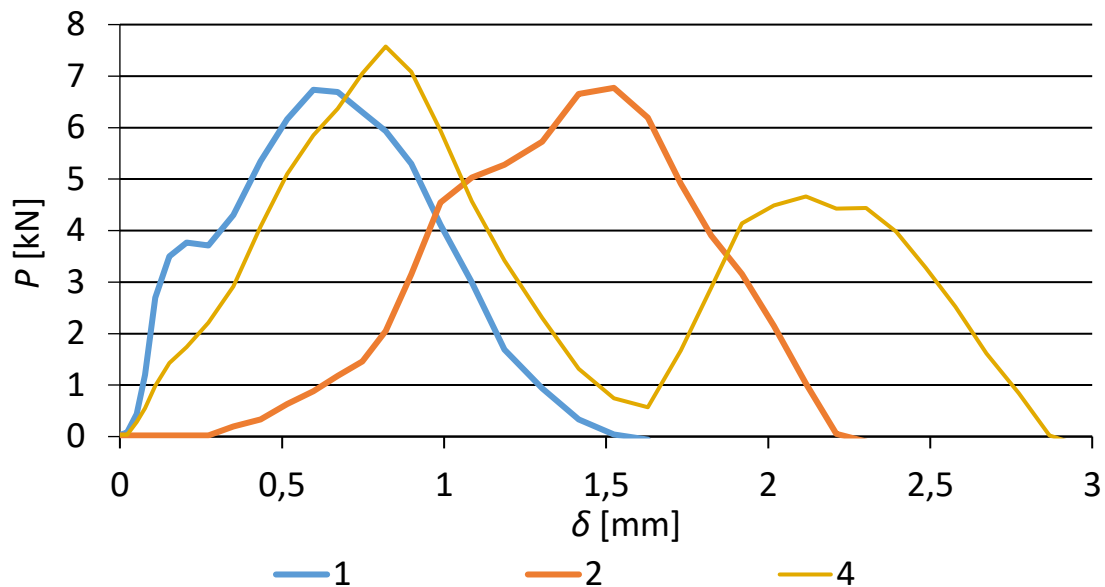


Figura 32 - Curvas $P-\delta$ experimentais de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=12,5$ mm

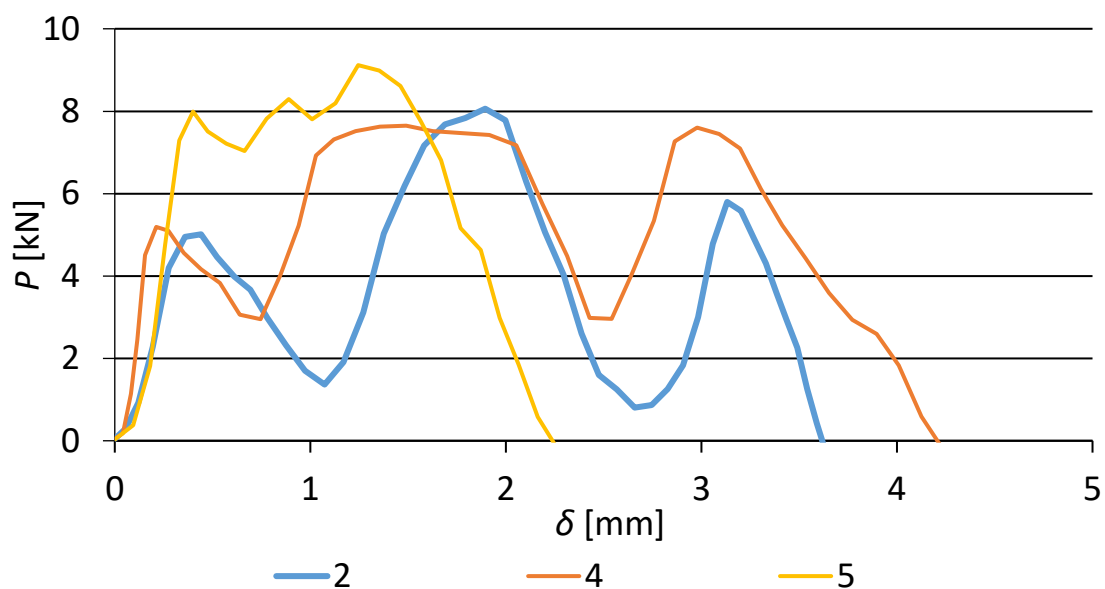


Figura 33 - Curvas $P-\delta$ experimentais de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=25$ mm

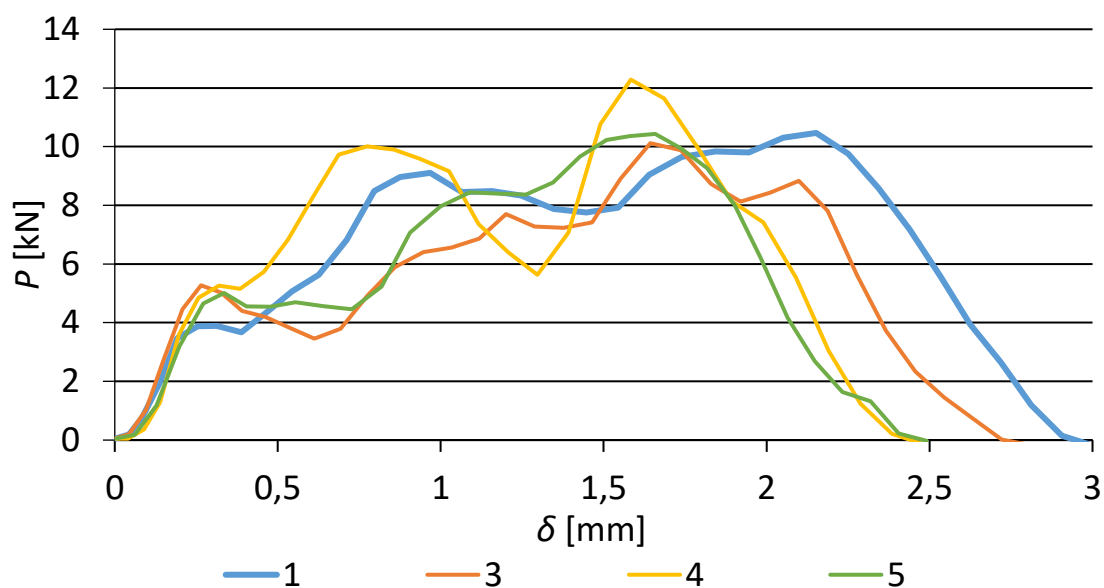


Figura 34 - Curvas P - δ experimentais de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=50$ mm

Verifica-se que o aumento de L_0 se traduz num aumento dos valores de carga máxima ($P_{\text{máx}}$), o que significa um aumento da resistência das juntas. A forma como evolui a resistência da junta, com o aumento de L_0 , pode ser visualizada na Figura 35.

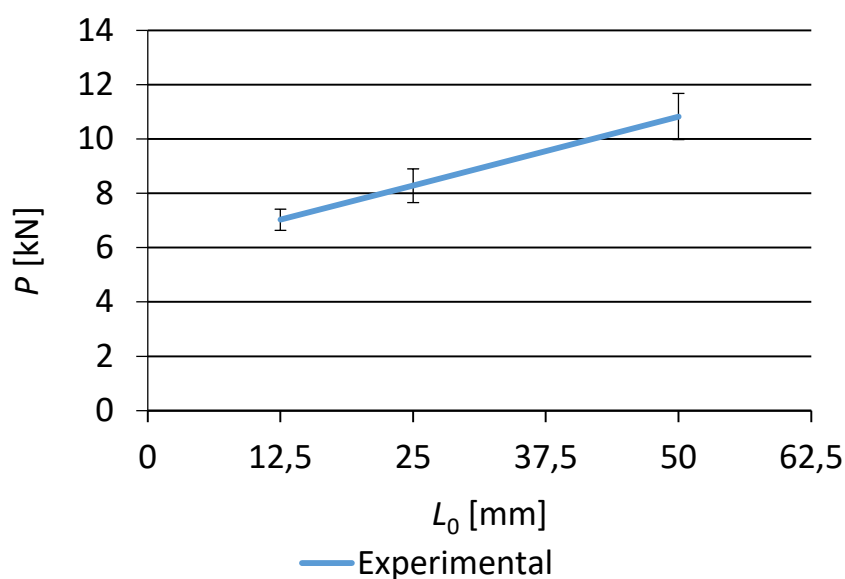


Figura 35 - Valores médios de $P_{\text{máx}}$ correspondentes às JSS com o adesivo AV138

Analisando a Figura 35 pode dizer-se que o aumento de resistência não é um aumento proporcional, embora se possa considerar praticamente linear, uma vez que o declive da reta que une os pontos correspondentes à junta com $L_0=12,5$ e $L_0=25$ mm é semelhante ao declive da reta que une os pontos das juntas com $L_0=25$ e $L_0=50$ mm.

A Tabela 9 permite visualizar de uma forma generalizada os valores de $P_{\text{máx}}$ correspondentes a cada um dos L_0 testados. A variação representa a diferença percentual entre a média dos provetes de determinado L_0 e a média dos provetes com $L_0=12,5$ mm.

Tabela 9 - Influência de L_0 na resistência de JSS com o adesivo AV138

L_0 [mm]	$P_{\text{máx}}$ [kN]		
	12,5	25	50
1	6,73	-	10,47
2	6,77	8,06	-
3	-	-	10,11
4	7,58	7,65	12,28
5	-	9,12	10,43
Média	7,03	8,28	10,82
Desvio	0,39	0,62	0,85
Variação (%)	-	17,8	53,9

As curvas P - δ correspondentes às JSS fabricadas com o adesivo 7752 para os vários L_0 podem ser consultadas na Figura 36, Figura 37 e Figura 38.

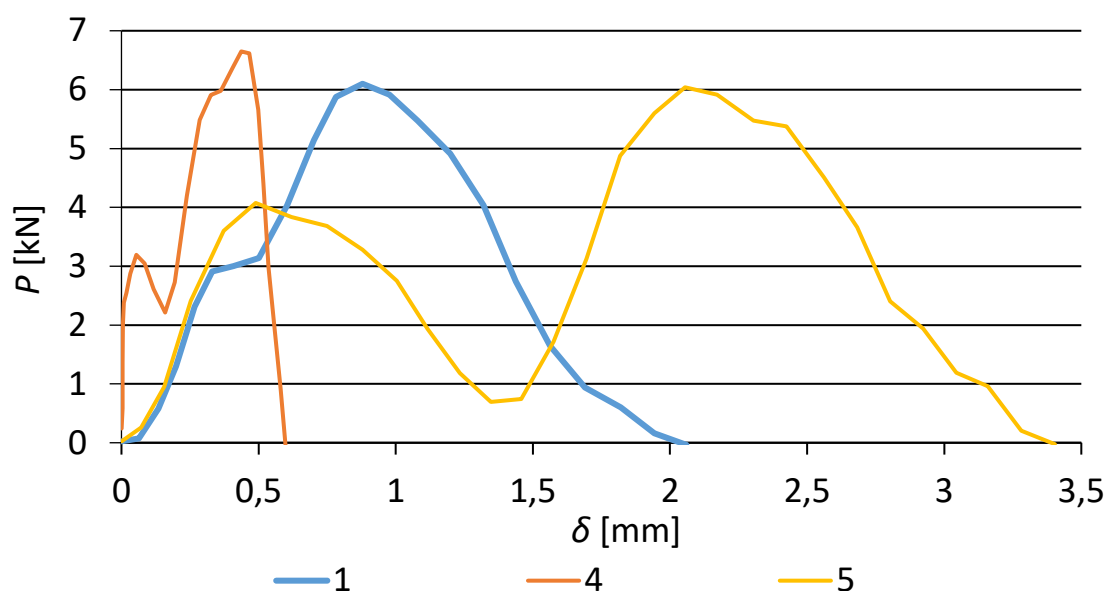


Figura 36 - Curvas P - δ experimentais de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=12,5$ mm

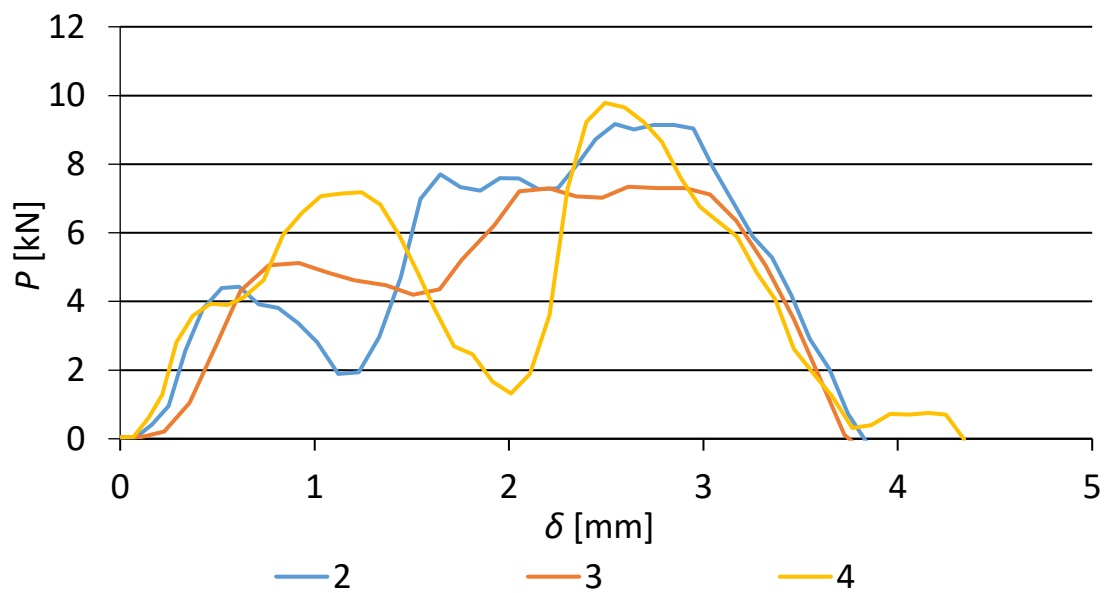


Figura 37 - Curvas P - δ experimentais JSS com o adesivo 7752 e $L_0=25$ mm

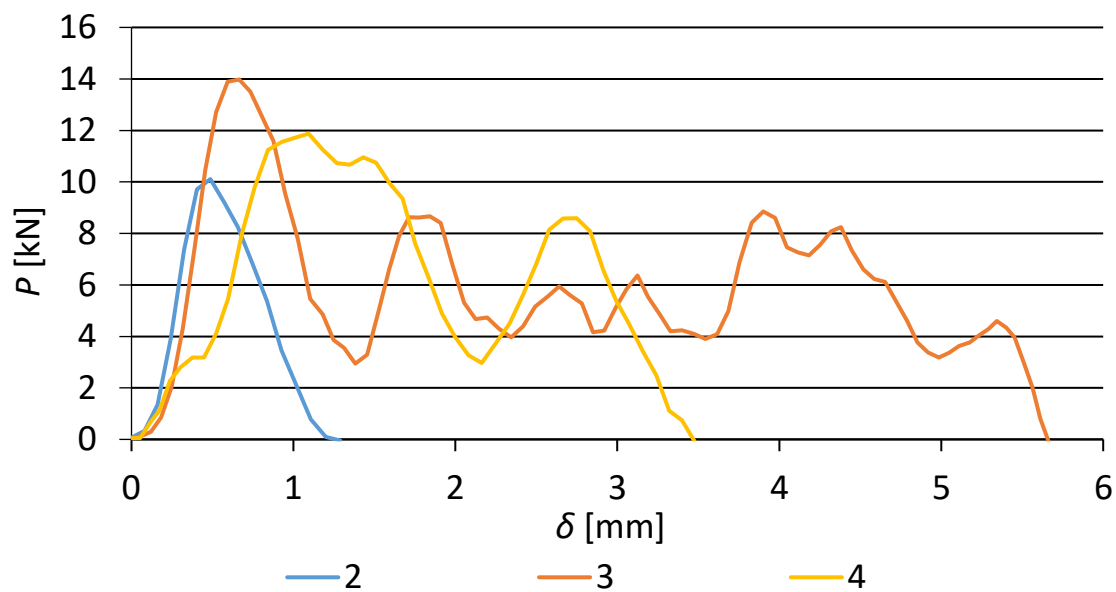


Figura 38 - Curvas P - δ experimentais JSS com o adesivo 7752 e $L_0=50$ mm

É notório, uma vez mais, que o aumento de L_0 se reflete num aumento dos valores de $P_{m\acute{a}x}$, contribuindo para o aumento da resist\^encia das juntas. A evolu\~cao da resist\^encia das juntas com o aumento de L_0 pode ser visualizada atrav\^s da Figura 39.

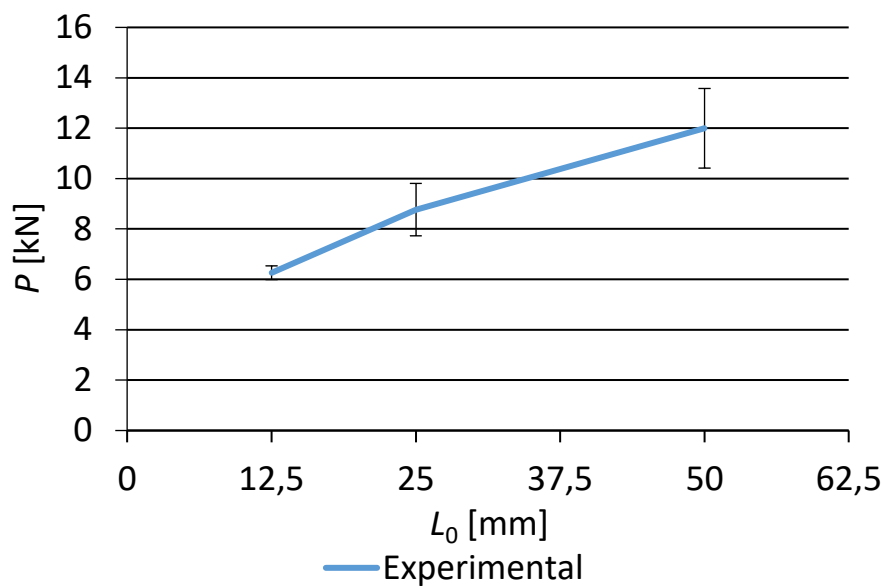


Figura 39 - Valores médios de $P_{\text{máx}}$ correspondentes às JSS com o adesivo 7752

Verifica-se que o aumento não é proporcional, uma vez que, expandindo a reta, a mesma não passa nos pontos de coordenadas (0,0). No entanto, comparando com as JSS fabricadas com o adesivo AV138, evidencia-se maior proporcionalidade, que pode ser justificada pela flexibilidade do adesivo em questão. A evolução da resistência da junta também é praticamente linear, uma vez que o declive da reta que une os pontos correspondentes à junta com $L_0=12,5$ e $L_0=25$ mm é semelhante ao declive da reta que une os pontos das juntas com $L_0=25$ e $L_0=50$ mm, embora neste caso se note uma ligeira diminuição.

Através da análise da Figura 40 e comparando os valores da variação percentual nas juntas fabricadas com ambos os adesivos, nota-se que as JSS fabricadas com o adesivo 7752 possuem uma variação percentual bem mais elevada, o que significa que o aumento do L_0 tem mais influência em adesivos flexíveis. Neste tipo de adesivo, contrariamente ao AV138, classificado como um adesivo frágil, a concentração de tensões nas juntas é inferior, para além de que, sendo um adesivo dúctil, tem a capacidade de absorver os picos de tensão que se possam verificar ao longo do L_0 . Por essa razão, o aumento de resistência nas juntas com adesivos dúcteis solicitadas ao impacto é mais significativo do que naquelas fabricadas com um adesivo rígido.

A Tabela 10 permite visualizar de uma forma generalizada os valores de $P_{\text{máx}}$ correspondentes a cada um dos L_0 testados. A variação representa a diferença percentual entre a média dos provetes de determinado L_0 e a média dos provetes com $L_0=12,5$ mm.

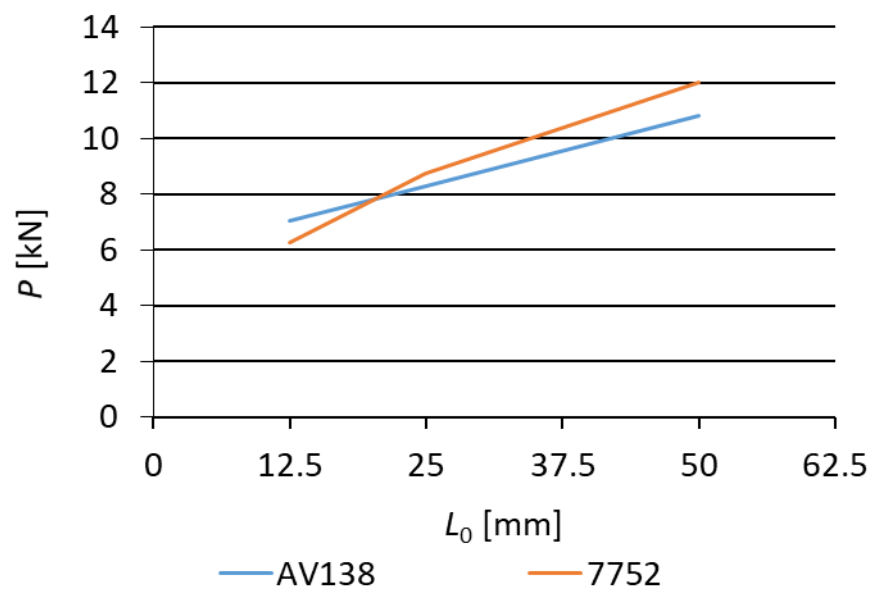


Figura 40 - Comparação dos valores médios de $P_{máx}$ correspondentes às JSS com o adesivo AV138 e o adesivo 7752

Tabela 10 - Influência de L_0 na resistência de JSS com o adesivo 7752

L_0 [mm]	$P_{máx}$ [kN]		
	12,5	25	50
1	6,10	-	-
2	-	9,17	10,12
3	-	7,34	13,98
4	6,65	9,78	11,88
5	6,04	-	-
Média	6,26	8,76	11,99
Desvio	0,27	1,04	1,58
Variação (%)	-	39,9	91,5

3.2 Trabalho numérico

3.2.1 Condições da análise numérica

Para a simulação das juntas adesivas através do MEF utilizou-se o software Abaqus® v6.17. O modelo foi contruído em 2D, porque as JSS e JSD apresentam de geometria simples e facilita bastante o processo, reduzindo o número de elementos presentes na

simulação. As dimensões dos modelos são as referidas no capítulo 3.1.1, para aproximar ao máximo a simulação dos ensaios realizados.

Inicialmente, no módulo Part, é esboçado o modelo com as dimensões requeridas (Figura 41; exemplo para JSD). Importa salientar que o esboço deve conter todas as áreas da junta e isolar a área de adesivo, a zona de sobreposição e uma área na extremidade da junta que irá simular um corpo rígido a uma certa velocidade de impacto.

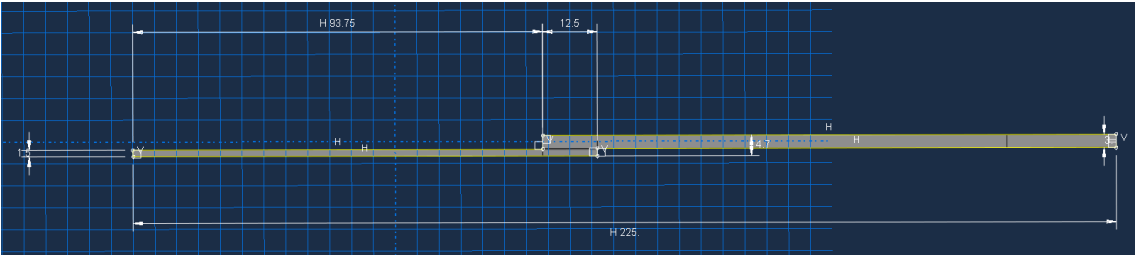


Figura 41 - Esboço de uma JSD com $L_0=12,5$ mm

No módulo *Property* são criados os materiais constituintes da junta. Para caracterizar os aderentes, em *Material Behaviors*, definem-se a densidade e as propriedades elásticas do tipo *Engineering Constants*.

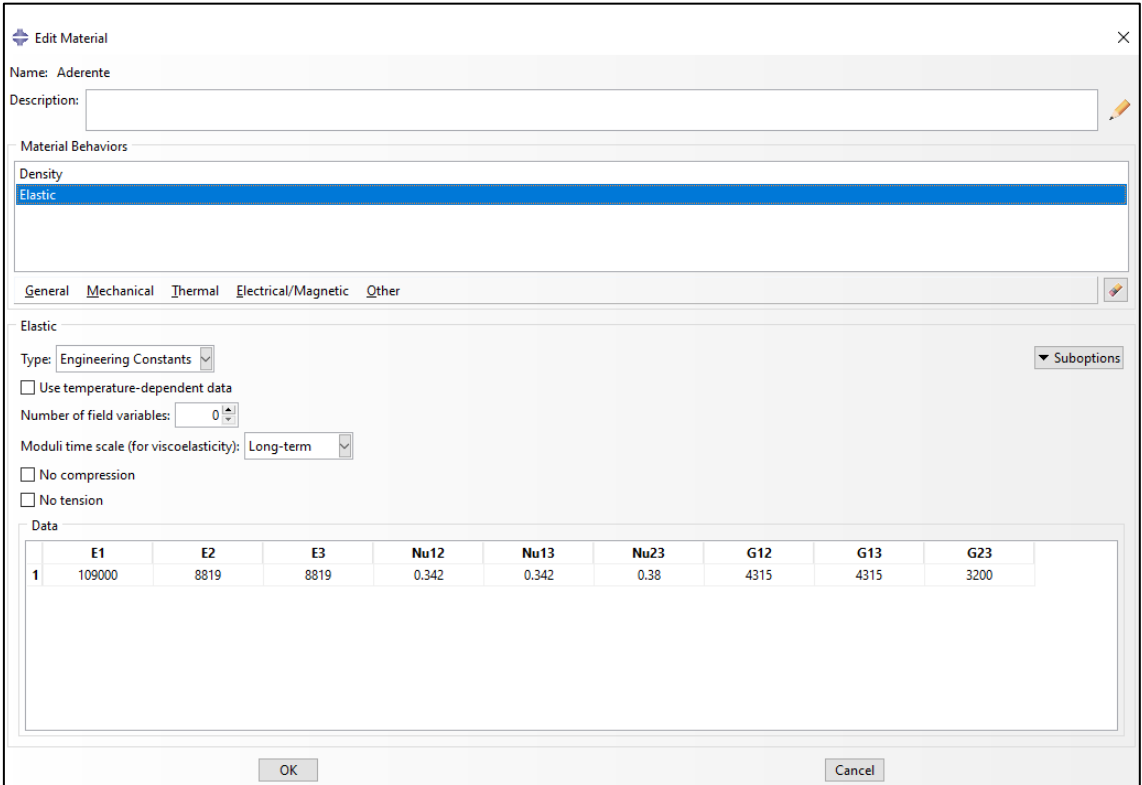


Figura 42 - Definição das propriedades do aderente

As propriedades do adesivo são definidas tendo em consideração que este é modelado por uma camada de elementos coesivos. Em *Material Behaviors*, define-se as

propriedades do adesivo. Uma vez que se tem de ter em conta a propagação do dano, a opção a selecionar é a *Quads Damage*.

No módulo *Step*, em *Field Output*, definem-se os parâmetros que se pretende utilizar para a análise pretendida. Para as análises pretendidas, é suficiente requisitar os parâmetros *CSTRESS*, *SDEG*, *LE*, *PE*, *PEEQ*, *RF*, *S*, *U* e *V* (*contact pressure and frictional shear stresses*, *Scalar stiffness degradation variable*, *logarithmic strain components*, *plastic strain components*, *equivalent plastic strain*, *all components of reaction forces*, *all stress components*, *all physical displacement components* e *all velocity components*, respetivamente). Para definir a curva $P-\delta$ em cada uma das simulações, são necessários os parâmetros *RF*, que determina as forças de reação aplicadas em toda a geometria da junta a qualquer momento, e *U*, que indica o deslocamento. Os restantes parâmetros permitem obter as tensões normais e de corte nas direções *x* e *y*.

Edit Material

Name: Adesivo

Description:

Material Behaviors

- Quads Damage**
- Damage Evolution
- Damage Stabilization Cohesive
- Density
- Elastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Quads Damage

Direction relative to local 1-direction (for XFEM): ☒ Normal ☐ Parallel **Suboptions**

Tolerance: 0.05

Position: Centroid

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	Nominal Stress Normal-only Mode	Nominal Stress First Direction	Nominal Stress Second Direction
1	11.49	10.17	10.17

OK Cancel

Figura 43 - Definição das propriedades do adesivo

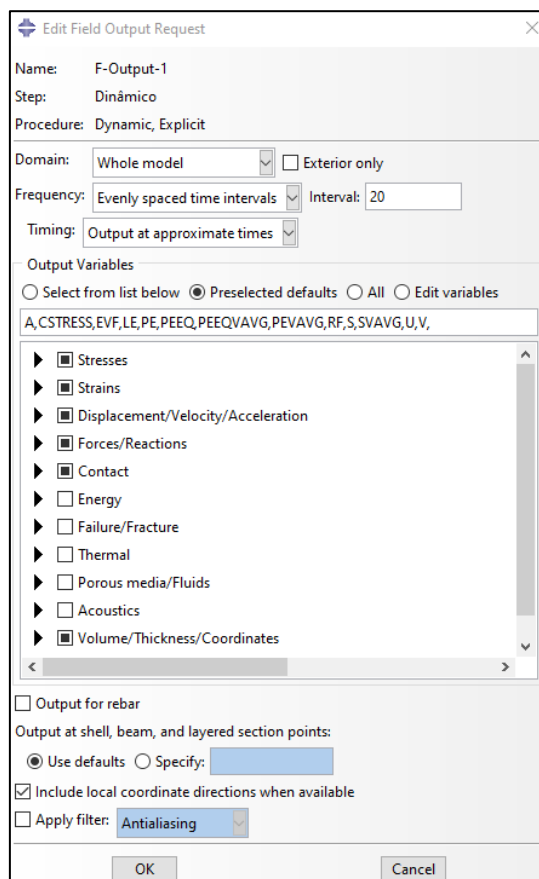


Figura 44 - Field output ensaio dinâmico

Para adaptar a junta para um teste dinâmico, é necessário criar uma massa com 25 mm de comprimento, fazendo a partição do substrato, para simular a carga dinâmica. À massa criada é atribuído um módulo de elasticidade bastante elevado (10^5 MPa) e uma massa volúmica de $2,322 \times 10^{-5}$ ton/mm³, definida a partir de um valor de energia cinética de 40 J para uma velocidade de solitação de 1,75 m/s.

$$U = \frac{1}{2}mv^2 \Leftrightarrow 40 = \frac{1}{2}m \times 1,75^2 \Leftrightarrow m = 26,12 \text{ kg} \quad (1)$$

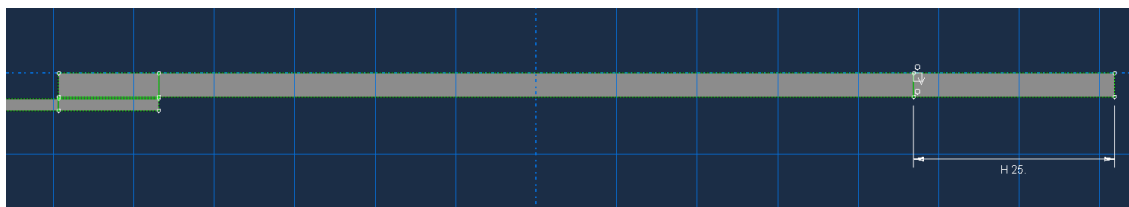


Figura 45 - Criação da partição

No módulo *Load*, em *Create Boundary Condition* definem-se as condições fronteira de cada um dos substratos. Para o substrato interior, é impedida a sua translação e a sua rotação em todas as suas direções, enquanto no substrato superior apenas é impedida a sua translação em y, para impossibilitar possíveis deslocamentos ao longo deste eixo.

Adicionalmente, para a JSD, aplica-se ainda condição de simetria. Para definir a velocidade da massa, ainda no módulo *Load*, em *Predefined Field* aplica-se uma velocidade de 1750 mm/s na direção 1.

No módulo *Mesh*, é criada a malha, onde são definidos o tipo de elementos, as suas condições, as suas dimensões e a sua densidade em cada zona da junta. Para o ensaio usou-se uma malha constituída por elementos quadriláteros, com um refinamento superior nas extremidades da sobreposição, ou seja, a quantidade de elementos nas fronteiras é superior, comparativamente com o número de elementos nas extremidades dos aderentes, como apresenta a Figura 46.

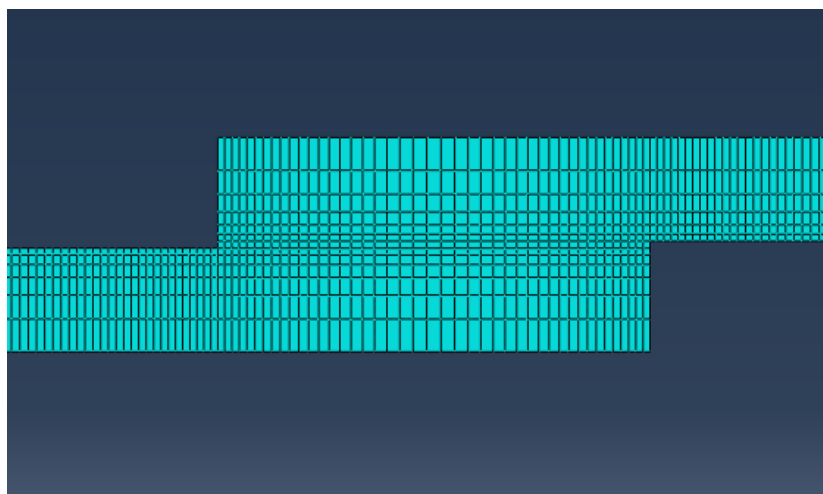


Figura 46 - Refinamento da malha

Para a atribuição do tipo de elemento, este foi definido com um controlo do tipo *Sweep*. Seguidamente, para a definição do adesivo utilizou-se o elemento coesivo do tipo *COH2D4*. Para o aderente e para a massa utilizou-se elementos estruturais do tipo *CPE4R*.

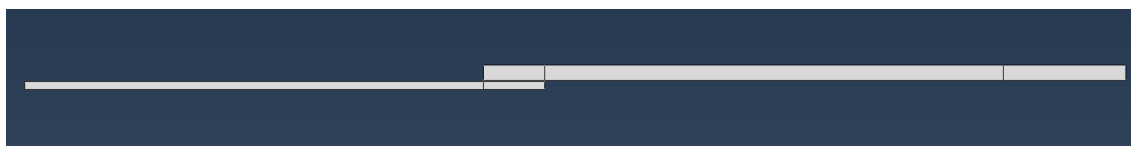


Figura 47 - Provete JSD final

3.2.2 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 [51]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [52], linear parabólico [53], exponencial [54], polinomial [55] e trapezoidal [56]. 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

[57]. O modelo triangular 2D está representado na Figura 37, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

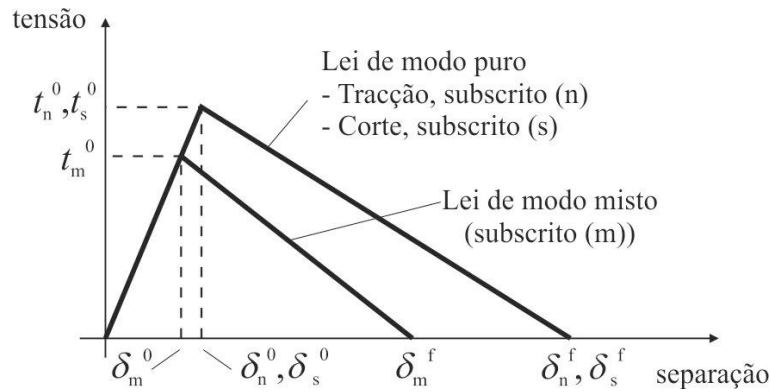


Figura 48 - Lei triangular do modelo de dano coesivo (Adaptado de [58])

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 foram anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar a tração e corte [59]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente direta de deformação e uma deformação de corte, que são determinadas 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} , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida da seguinte forma:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição é dependente 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 [60]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0 \quad (3)$$

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 [59]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério de tensão nominal quadrática, expresso pela seguinte expressão:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1 \quad (4)$$

$\langle \rangle$ 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 [61]. Quando t_m^0 é atingido (Figura 48), 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 48) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC}

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (5)$$

3.2.3 Determinação das propriedades dos materiais

Para a determinação das propriedades dos materiais, teve-se em conta as propriedades dinâmicas dos mesmos.

Relativamente ao aderente, o pré-impregnado da marca Seal®, Texipreg HS 160 RM, as propriedades determinadas no *software* são as mesmas que se encontram descritas na Tabela 3. Na apresenta-se a forma como foram determinadas.

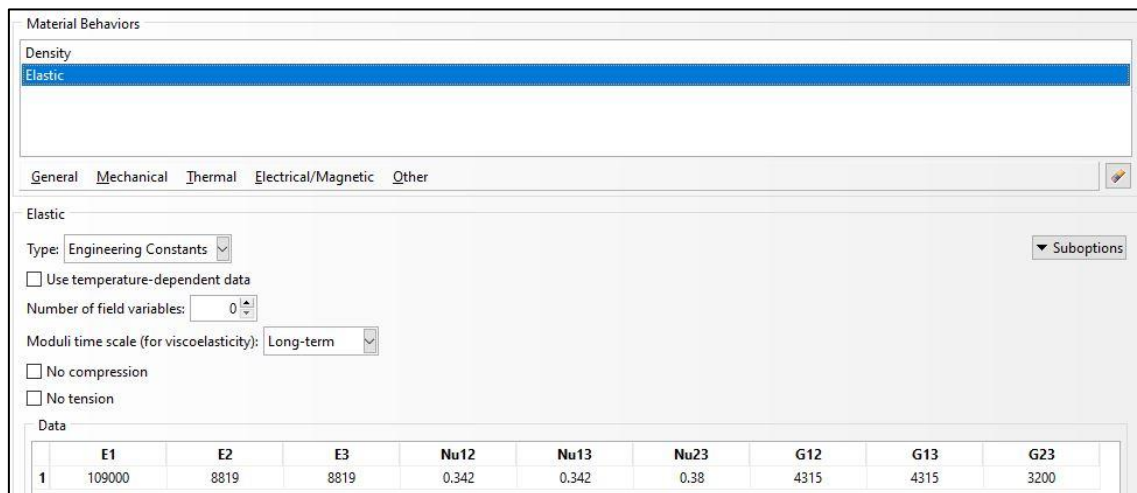


Figura 49 - Determinação das propriedades do aderente no software Abaqus®

Para a determinação das propriedades do adesivo Araldite® AV138 consideraram-se as propriedades dinâmicas (Figura 50) e as propriedades elásticas (Figura 51) do componente, representadas na tabela Tabela 6 e Tabela 5, respetivamente. As propriedades dinâmicas e elásticas do adesivo Sikaforce® 7752 foram determinadas por Peres [45].

Material Behaviors

Quads Damage

Damage Evolution
Damage Stabilization Cohesive
Density
Elastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Quads Damage

Direction relative to local 1-direction (for XFEM): ☒ Normal ☐ Parallel

Tolerance: 0.05

Position: Centroid

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	Nominal Stress Normal-only Mode	Nominal Stress First Direction	Nominal Stress Second Direction
1	70.2	51.7	51.7

Figura 50 - Determinação das propriedades dinâmicas do adesivo Araldite® AV138 no *software* Abaqus®

Material Behaviors

Quads Damage
Damage Evolution
Damage Stabilization Cohesive
Density
Elastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Elastic

Type: Traction

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

☐ No compression
☐ No tension

Data

	E/Enn	G1/Ess	G2/Ett
1	4890	1560	1560

Figura 51 - Determinação das propriedades elásticas do adesivo Araldite® AV138 no *software* Abaqus®

3.2.4 Validação da técnica numérica com juntas de sobreposição simples

Neste capítulo apresenta-se a validação da técnica numérica com JSS. Através dos ensaios experimentais realizados foi possível determinar as propriedades dinâmicas do adesivo Sikaforce® 7752. Nos ensaios numéricos validou-se os resultados obtidos para o adesivo AV138, dado que os as propriedades dinâmicas já eram conhecidas.

Nas Figura 52, Figura 53 e Figura 54 apresenta-se as curvas P - δ correspondentes às juntas JSS com o adesivo AV138. De uma forma geral, verifica-se uma grande diferença entre o δ_{rot} obtido experimentalmente e os resultados numéricos. O resultado de δ_{rot} experimental é influenciado pela técnica de medição utilizada no equipamento de *drop test*. O deslocamento é obtido através da integração dos dados do acelerómetro, resultando num afastamento significativo dos resultados experimentais do δ_{rot} [1]. Relativamente aos resultados obtidos de $P_{máx}$, tendo em conta que o modelo seguiu as propriedades indicadas em 3.1.2.2.1, podem ser considerados como válidos, uma vez que se registou valores bastante próximos do modelo numérico.

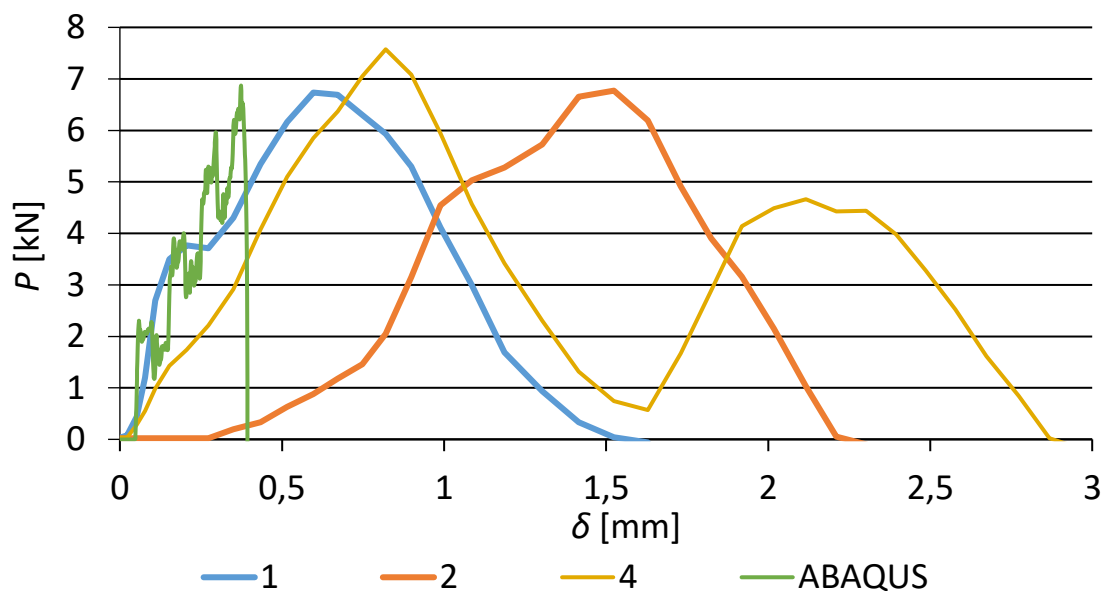


Figura 52 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=12,5$ mm

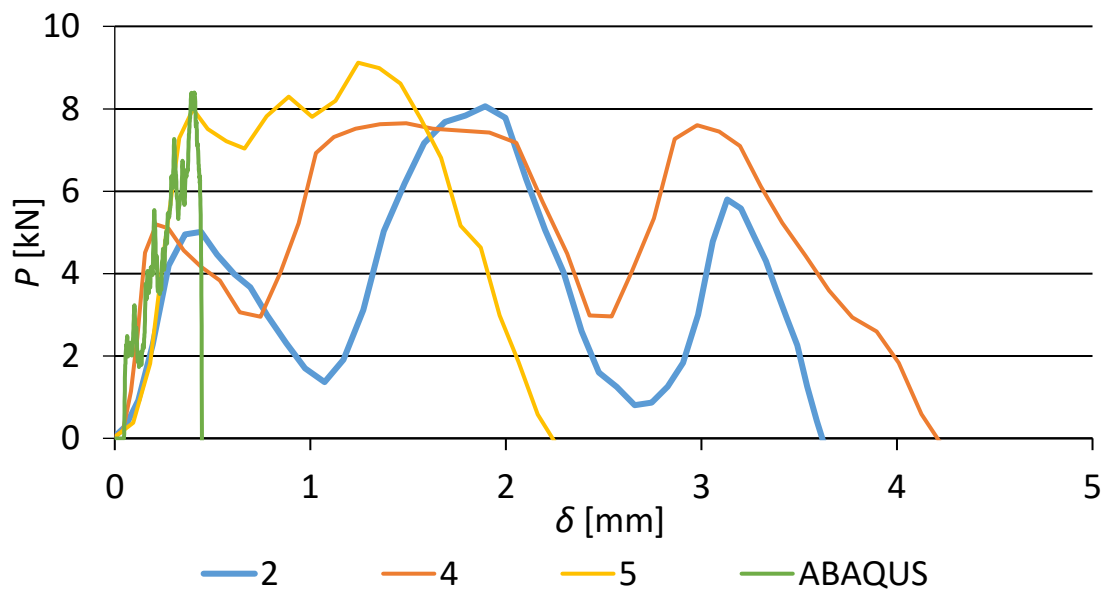


Figura 53 - Curvas P- δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=25$ mm

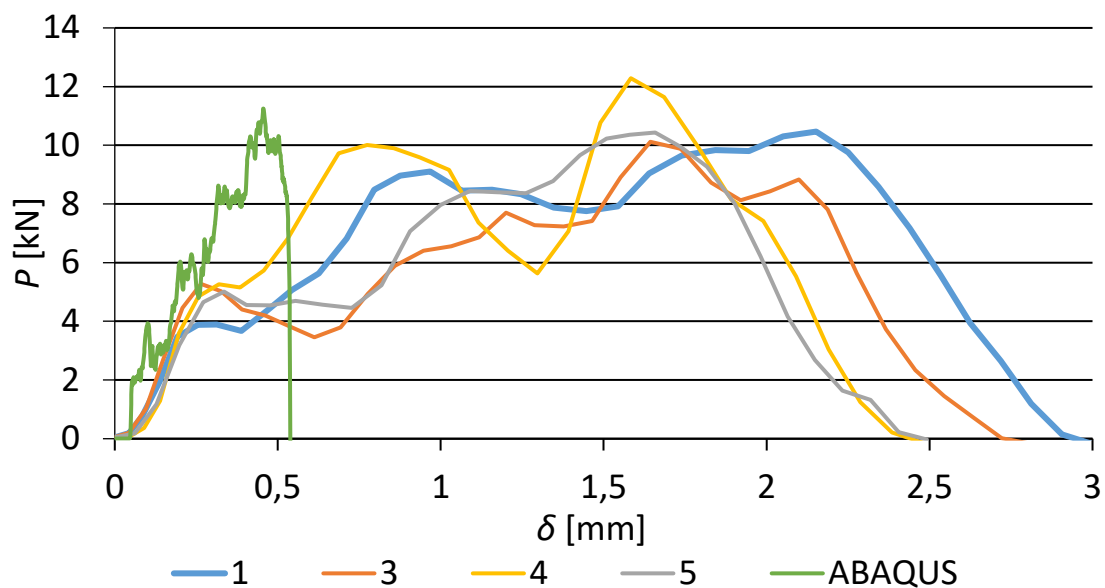
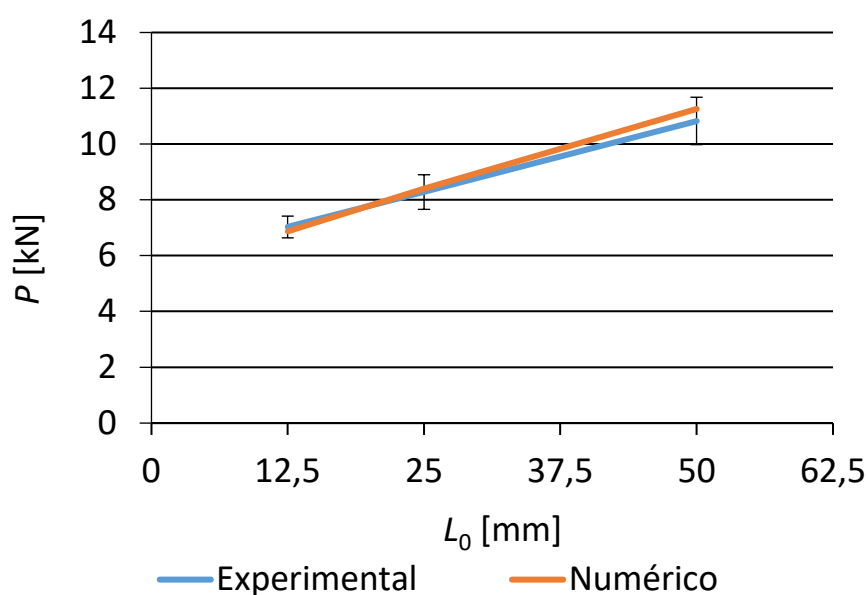


Figura 54 - Curvas P- δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=50$ mm

De forma a ter uma perspetiva geral sobre os valores de $P_{\text{máx}}$ e uma comparação devida com o modelo numérico, os dados gerais podem ser consultados na Tabela 11. Através dos valores registados da Tabela 11, verifica-se que a média dos resultados da análise experimental é muito próxima do valor correspondente ao modelo numérico. Através da Figura 55, verifica-se que a tendência é muito idêntica entre os resultados numéricos e experimentais.

Tabela 11 - Comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais e numérico das JSS fabricadas com o adesivo AV138

	$P_{\text{máx}}$ [kN]		
L_0 [mm]	12,5	25	50
1	6,73	-	10,47
2	6,77	8,06	-
3	-	-	10,11
4	7,58	7,65	12,28
5	-	9,12	10,43
Média	7,03	8,28	10,82
Desvio	0,39	0,62	0,85
Numérico	6,87	8,40	11,25
Diferença [%]	-2,28	1,45	3,97

Figura 55 - Comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais e numérico das JSS com o adesivo AV138

A diferença percentual entre os resultados numéricos e experimentais pode ser analisada na última linha da Tabela 11. O valor numérico negativo deste parâmetro significa que o valor experimental é inferior ao valor experimental obtido. Uma vez que a diferença não excede os 4% em nenhum dos L_0 analisados, pode dizer-se que os MDC têm a capacidade de prever com precisão a resistência das JSS solicitadas ao impacto.

Na Figura 56, Figura 57 e Figura 58 estão representadas as curvas P - δ experimentais e numéricas referentes às JSS fabricadas com o adesivo 7752 para cada um dos L_0 testados.

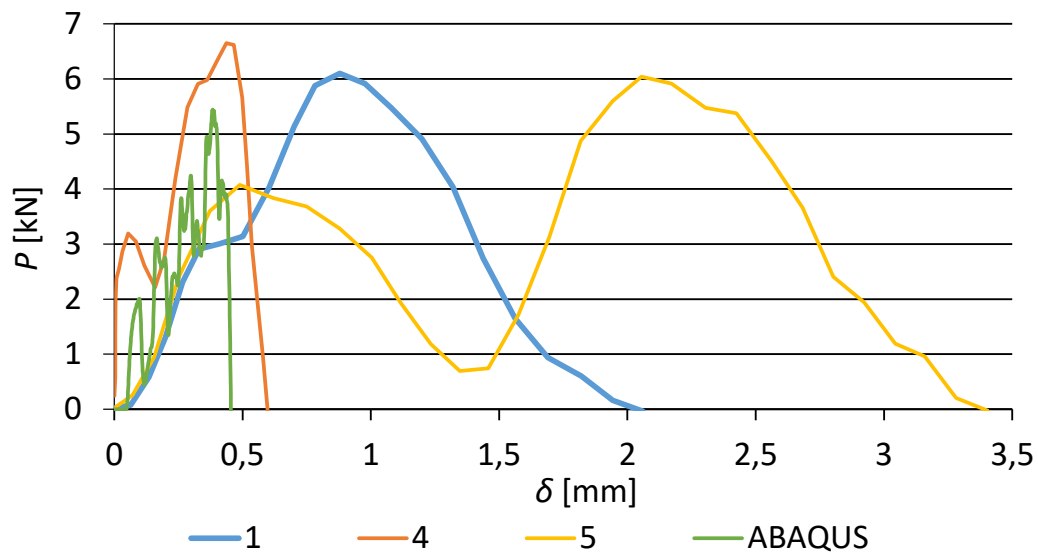


Figura 56 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=12,5$ mm

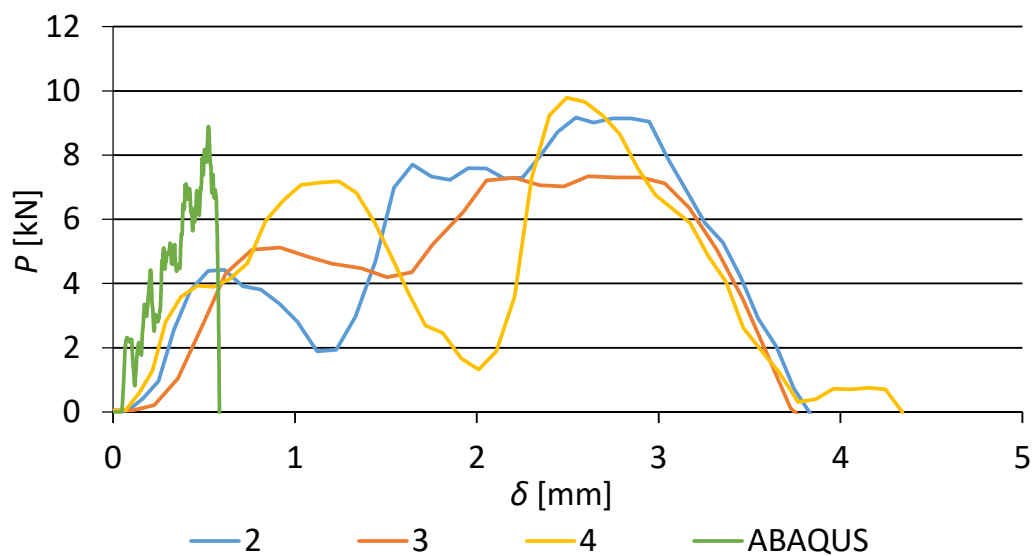


Figura 57 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=25$ mm

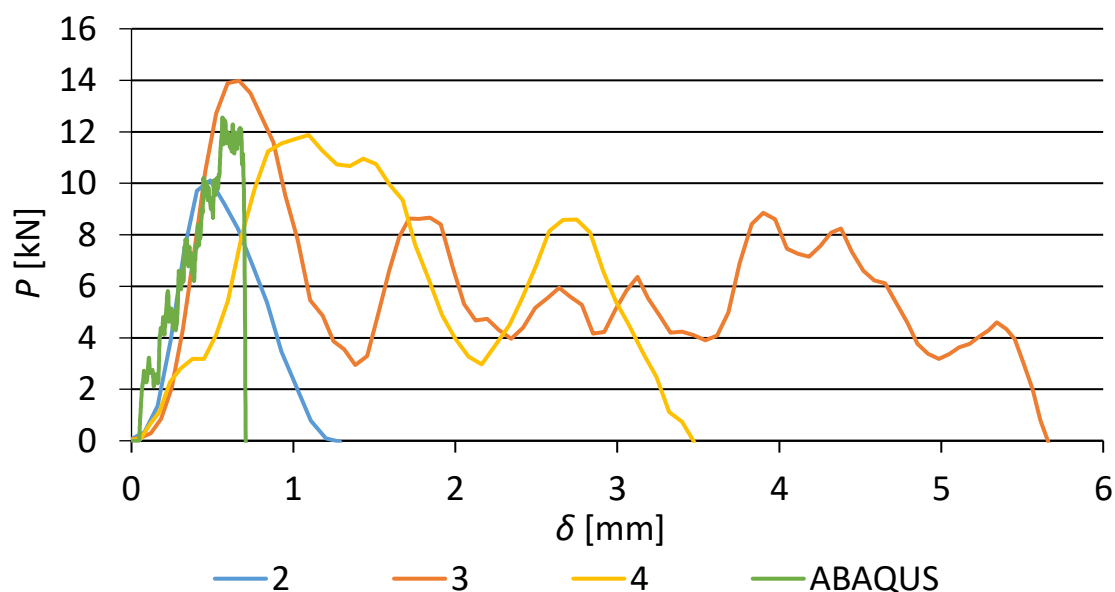


Figura 58 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=50$ mm

Pelo mesmo motivo do caso anterior, com o adesivo AV138, o δ_{rot} experimental encontra-se bastante afastado do modelo numérico. Relativamente aos valores de $P_{\text{máx}}$, verifica-se que o modelo numérico está bastante próximo dos resultados experimentais, como seria expectável, uma vez que as propriedades dinâmicas do adesivo indicadas no capítulo 3.1.2.2.2 foram baseadas no ensaio de impacto das JSS.

De forma a ter uma perspetiva geral sobre os valores de $P_{\text{máx}}$ e uma comparação devida com o modelo numérico, os dados gerais podem ser consultados na Tabela 12.

Tabela 12 - Comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais e numérico das JSS fabricadas com o adesivo 7752

L_0 [mm]	$P_{\text{máx}}$ [kN]		
	12,5	25	50
1	6,10	-	-
2	-	9,17	10,12
3	-	7,34	13,98
4	6,65	9,78	11,88
5	6,04	-	-
Média	6,26	8,76	11,99
Desvio	0,27	1,04	1,58
Numérico	5,44	8,89	12,55
Diferença [%]	-13,10	1,48	4,67

Pela análise da Tabela 12, verifica-se que os resultados experimentais são muito próximos aos resultados obtidos numericamente, sendo que a variação apenas ultrapassa o desvio-padrão no caso das JSS com $L_0=12,5$ mm.

A diferença percentual entre o $P_{\text{máx}}$ numérico e o $P_{\text{máx}}$ experimental apresenta valores superiores aos das JSS fabricadas com o AV138, o que é expectável uma vez que as propriedades dinâmicas do adesivo 7752 foram determinadas no próprio ensaio experimental, enquanto no caso anterior estas já tinham sido validadas noutros trabalhos semelhantes.

Na Figura 59 apresenta-se a evolução dos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais e numéricos em função do aumento do L_0 .

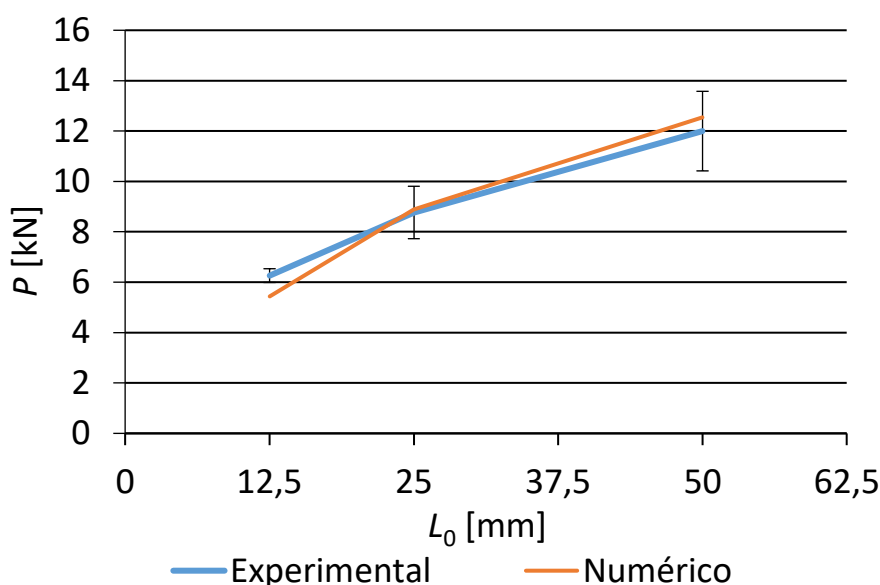


Figura 59 - Comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais e numérico das JSS com o adesivo 7752

3.2.5 Estudo das juntas de sobreposição dupla

3.2.5.1 Distribuição de tensões

As distribuições de tensões apresentadas relacionam o quociente entre o valor de tensão no corte (τ_{xy}) e no arrancamento (σ_y) e o valor médio da tensão de corte (τ_{med}) com o quociente entre a coordenada x e o L_0 da junta em estudo. Assim, é possível obter uma curva com valores adimensionais e compreender da distribuição das tensões ao longo de todo o L_0 .

Para este estudo, com o adesivo Araldite® AV138, Peres et al. [45] obteve três curvas idênticas da distribuição de τ_{xy} , conforme representado na Figura 60, apenas fazendo variar o L_0 e verificou um pico de tensões assimétrico nas extremidades da zona de sobreposição. No entanto, é visível que, com o aumento do L_0 , a concentração de tensões nessa zona também aumenta, pelo que se pode referir que a JSD com $L_0=50$ mm

se destaca pelo maior pico numa das extremidades. Assim, é de salientar que a JSD que apresenta melhores resultados é a de menor L_0 (12,5 mm). Nota-se que com o aumento do L_0 o gradiente de tensões também aumenta, uma vez que para comprimentos de sobreposição baixos ($L_0=12,5$ e $L_0=25$ mm) os valores registados são mais uniformes que em $L_0=50$ mm. Neste último caso, verificam-se os valores mínimos de tensão na zona intermédia da sobreposição, mas registam-se os picos mais elevados nas extremidades. Assim, pode-se afirmar que o valor de τ_{xy}/τ_{med} nunca é nulo ao longo de todo L_0 , o que permite afirmar que toda a zona de sobreposição está ao corte, ainda que não se registem concentração de tensões significativas na zona central da ligação.

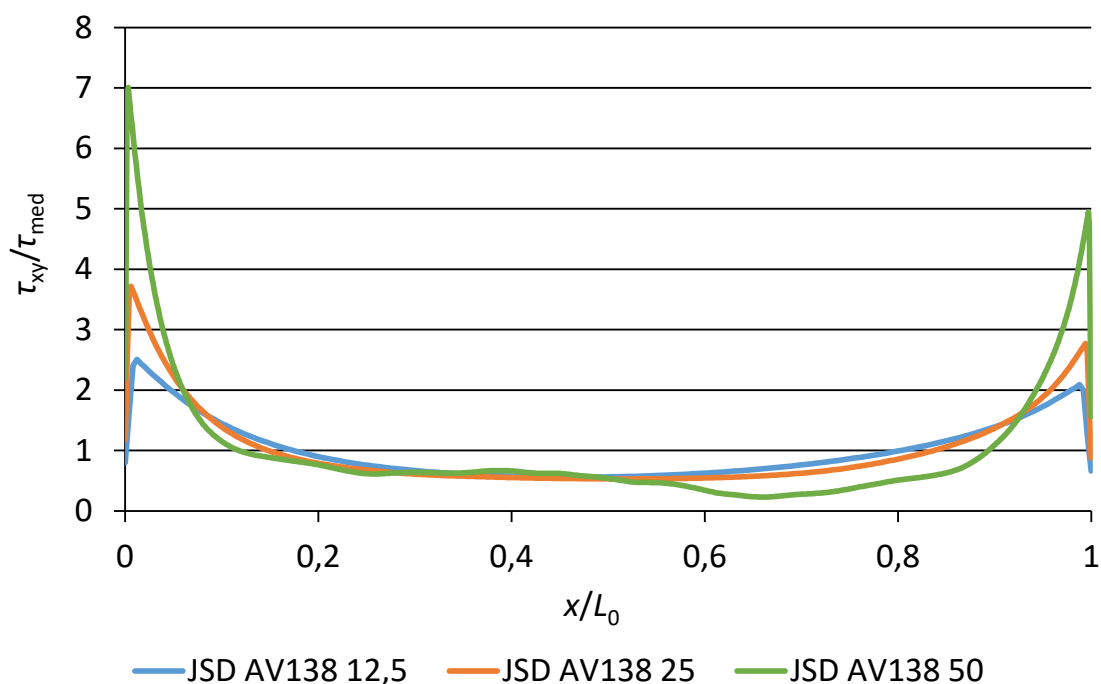


Figura 60 - Distribuição de tensões de corte τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de L_0 em JSD

A assimetria dos picos de tensão nas extremidades do L_0 deve-se à propagação de ondas de tensão resultantes da solicitação dinâmica de impacto, contrariamente àquilo que se verifica em ensaios quási-estáticos, onde os picos de tensão, ainda que ocorram nas extremidades, possuem valores nivelados [62, 63].

Na Figura 61 está representada a distribuição de tensões σ_y ao longo de todo o L_0 numa JSD com o adesivo AV138. Verificam-se, à semelhança da distribuição de tensões τ_{xy} , picos de tensões nas extremidades do adesivo. No entanto, para além do posicionamento da concentração de tensões ser no mesmo local, ao longo de L_0 não se verificam valores significativos de tensão, sendo os mesmos desprezáveis, pelo que se retira que as tensões de arrancamento se verificam, maioritariamente, nas extremidades da junta.

Mais uma vez a JSD com $L_0=50$ mm apresenta o pior desempenho de σ_y à semelhança de τ_{xy} . Pelo contrário, na JSD com $L_0=12,5$ e $L_0=25$ mm apresentam melhores

desempenhos. Assim, verifica-se que a concentração de σ_y , bem como o seu gradiente, aumentam com o aumento de L_0 .

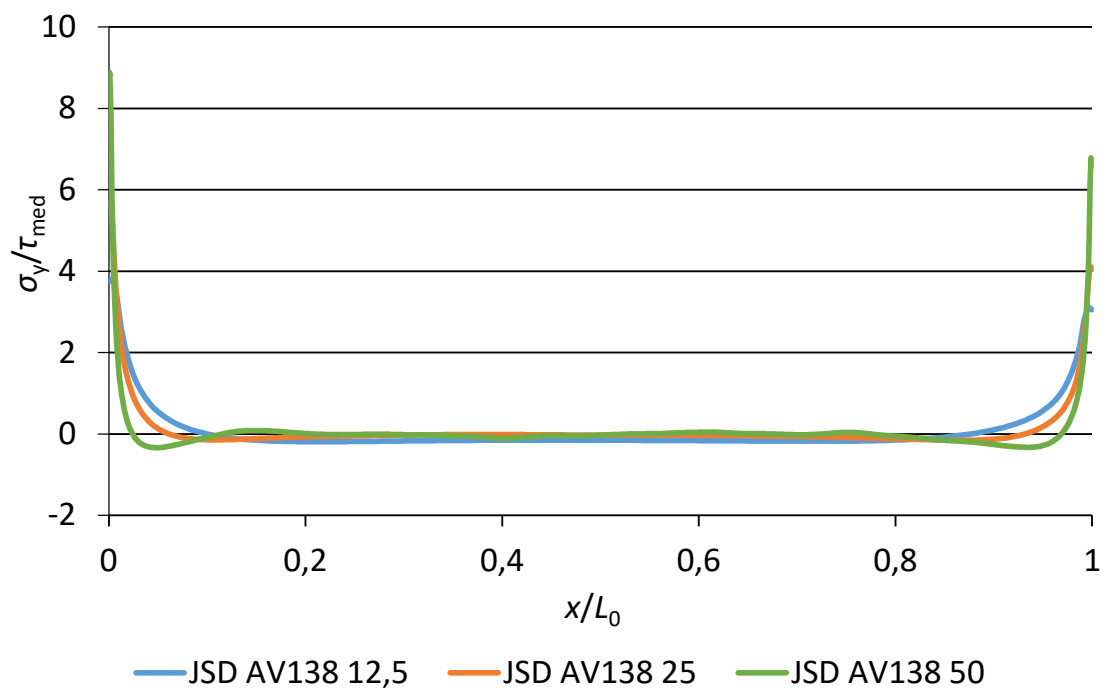


Figura 61 - Distribuição de tensões de arrancamento σ_y com o adesivo AV138 em função de L_0 em JSD

Avaliando igualmente a JSD com o adesivo Sikaforce® 7752, a Figura 62 e a Figura 63 ilustram as distribuições de τ_{xy} e σ_y , respetivamente, em função de L_0 .

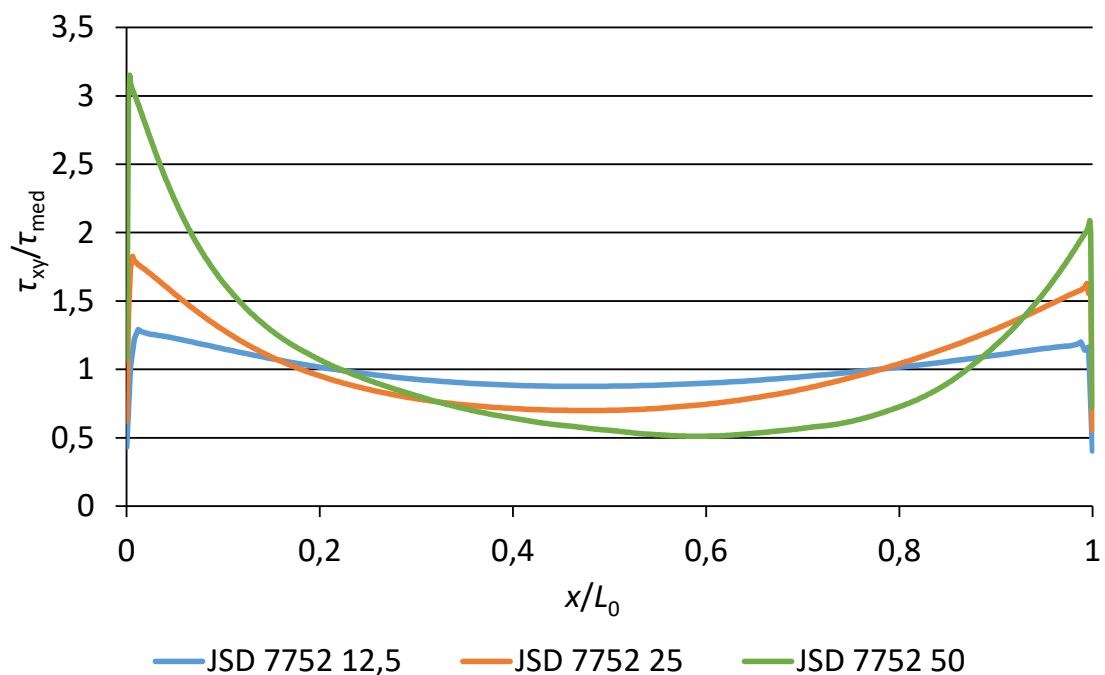


Figura 62 - Distribuição de tensões de corte τ_{xy} com o adesivo 7752 em função de L_0 em JSD

Pode-se verificar que, na distribuição de τ_{xy} , os picos de concentração de tensões se dão nas extremidades de L_0 .

Na JSD com $L_0=50$ mm é onde se regista o pior desempenho, ao contrário da junta com $L_0=12,5$ mm, verificando-se nesta última a distribuição de tensões mais uniforme e de menor valor máximo. Assim, é possível afirmar que, tal como no caso anterior com o adesivo AV138, a concentração de tensões aumenta com o aumento de L_0 .

Importa destacar, também, o aumento do gradiente de tensões com o aumento de L_0 . Na JSD com $L_0=12,5$ mm os valores de concentração de tensões são relativamente uniformes ao longo de toda a sobreposição, embora se verifiquem picos de tensão nas extremidades. No entanto, verifica-se que as juntas de L_0 superior, embora registem valores de tensão inferiores ao longo do adesivo, apresentam picos mais elevados, o que revela o aumento do gradiente de concentração de tensões.

Na Figura 63 repete-se o mesmo comportamento verificado nas juntas com o adesivo AV138. A concentração de tensões, bem como o gradiente das mesmas, aumentam com o aumento de L_0 . A JSD com $L_0=50$ mm é a que apresenta picos de tensão mais elevados, contrariamente ao evidenciado nas juntas com $L_0=12,5$ mm. Os picos de tensão, uma vez mais, situam-se nas extremidades de L_0 .

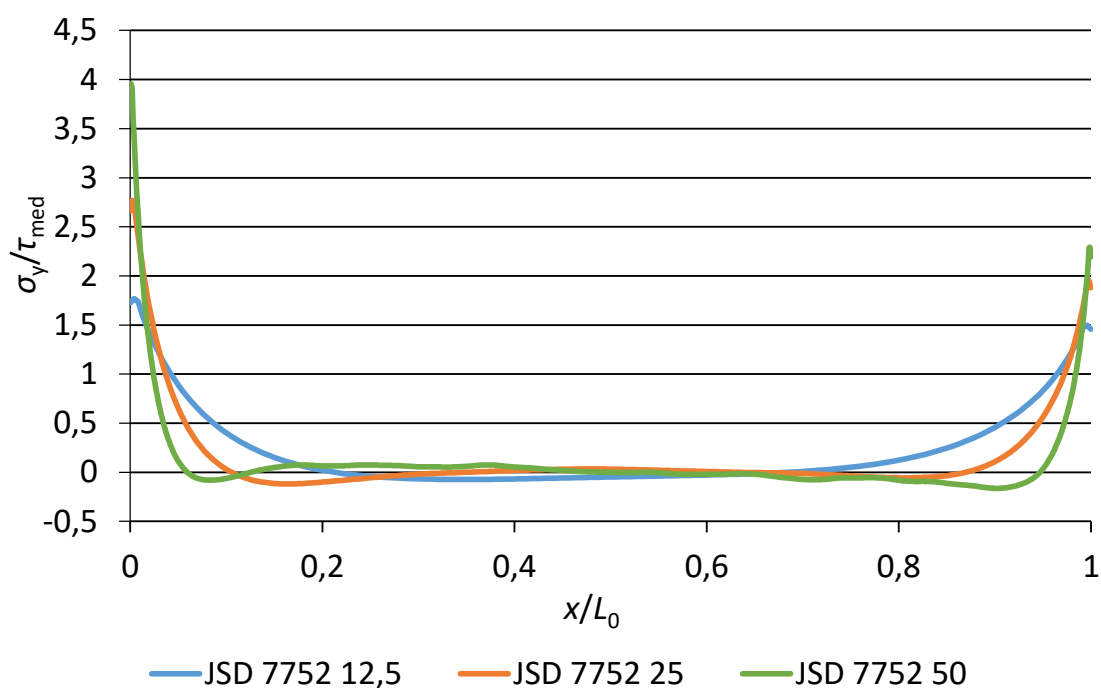


Figura 63 - Distribuição de tensões de arrancamento σ_y com o adesivo 7752 em função de L_0 em JSD

3.2.5.2 Previsão da resistência

A distribuição de tensões apresentada ao longo da dissertação relaciona o quociente entre o valor de tensão efetiva, tanto de corte (τ_{xy}) como de arrancamento (σ_y), e o valor médio da tensão de corte (τ_{med}).

Na Figura 64 encontram-se as curvas $P-\delta$ correspondentes às JSD com o adesivo AV138 em função de L_0 .

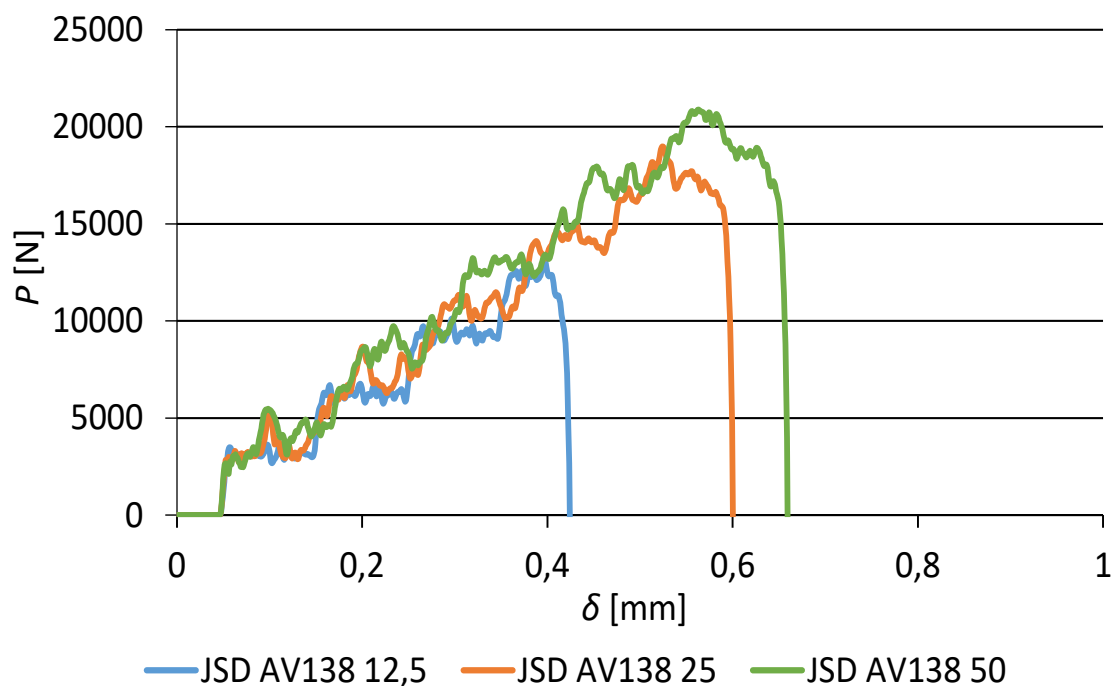


Figura 64 - Curvas $P-\delta$ de JSD com o adesivo AV138 em função de L_0

Mais uma vez, o aumento de L_0 implica um aumento de $P_{máx}$ e de δ_{rot} , contribuindo para um aumento de resistência da junta.

Na Figura 65 pode-se visualizar a forma como se dá o aumento do valor de $P_{máx}$ à medida que o L_0 aumenta. Pode afirmar-se que o crescimento não se dá de forma linear. A redução do declive da reta que une os pontos correspondentes aos vários L_0 consecutivos é justificada pelo aumento da concentração de tensões neste tipo de junta. Como o desempenho das JSD diminui com o aumento de L_0 , o aumento de resistência é cada vez inferior, até que se atinja um patamar ou valor máximo.

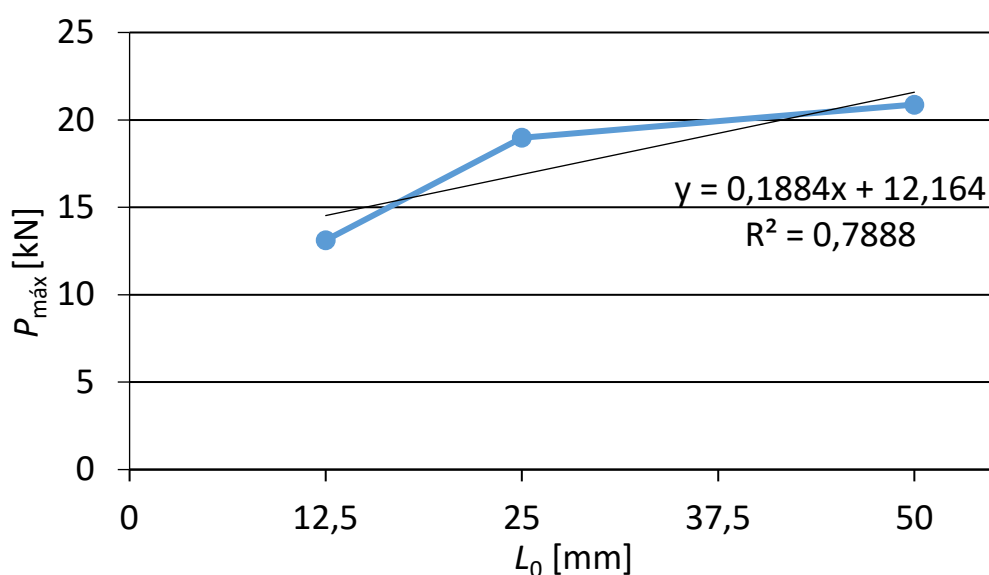


Figura 65 - Valores de $P_{máx}$ de JSD com o adesivo AV138 em função de L_0

Pode-se visualizar o efeito do aumento de L_0 , bem como a sua eficácia, através da leitura dos dados da Tabela 13, que compara os valores de $P_{máx}$ e a sua variação percentual em relação aos valores correspondentes à JSD com $L_0=12,5$ mm.

Tabela 13 - Influência de L_0 na $P_{máx}$ em JSD com o adesivo AV138

L_0 [mm]	$P_{máx}$ [kN]	Variação [%]
12,5	13,11	-
25	18,98	44,8
50	20,88	59,3

As curvas P - δ correspondentes às JSD com o adesivo Sikaforce® 7752, em função dos vários L_0 considerados, encontram-se representadas na Figura 66. Verifica-se, novamente, um aumento considerável do valor de $P_{máx}$. O aumento de L_0 traduz-se num aumento da resistência das juntas, aumentando a $P_{máx}$ e o δ_{rot} .

A Figura 67 mostra de que forma evolui a $P_{máx}$ em função do aumento de L_0 . Embora o modelo numérico se aproxime bastante da reta de regressão linear, é perceptível uma diferença no declive das retas que unem os pontos correspondentes às juntas com $L_0=12,5$ e $L_0=25$ mm e as juntas com $L_0=25$ e $L_0=50$ mm. Tal circunstância é justificada, uma vez mais, pelo aumento da concentração de tensões em juntas com L_0 superior. No entanto, neste caso, esse efeito não é considerável.

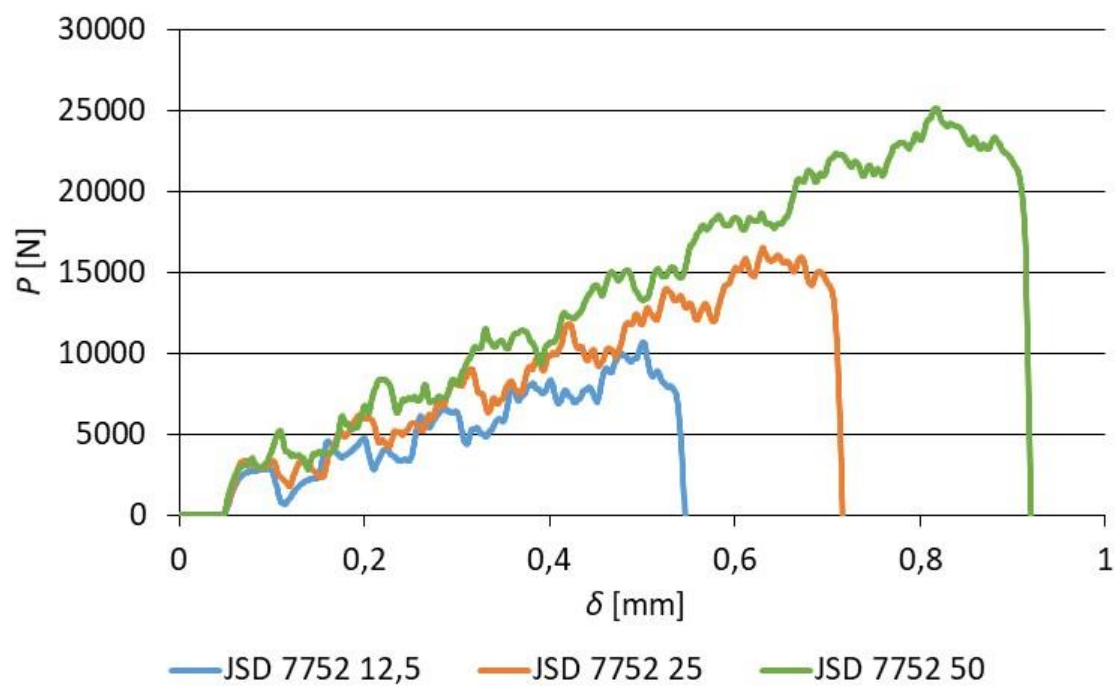


Figura 66 - Curvas P- δ de JSD com o adesivo Sikaforce® 7752 em função de L_0

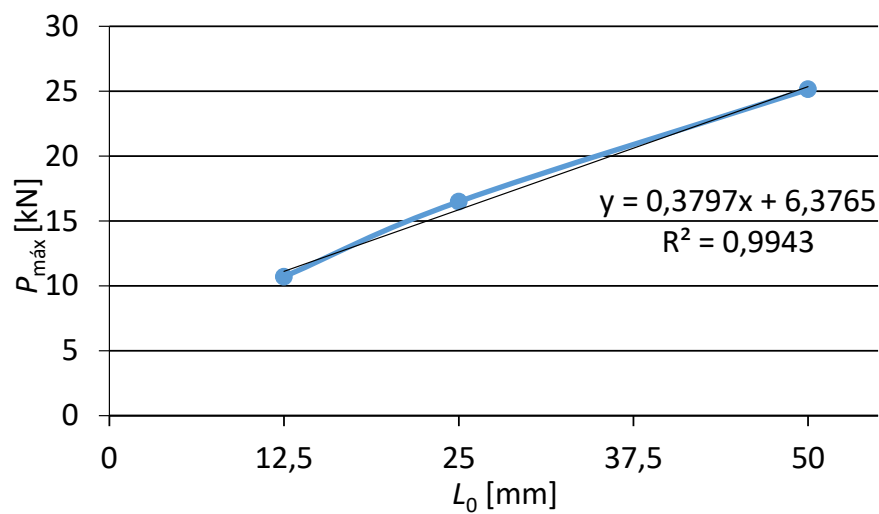


Figura 67 - Valores de $P_{\text{máx}}$ de JSD com o adesivo AV138 em função de L_0

A Tabela 14 permite avaliar a taxa de aumento de L_0 em JSD com o adesivo Sikaforce® 7752, comparando os valores de $P_{\text{máx}}$ e a sua variação percentual em relação à junta com $L_0=12,5$ mm.

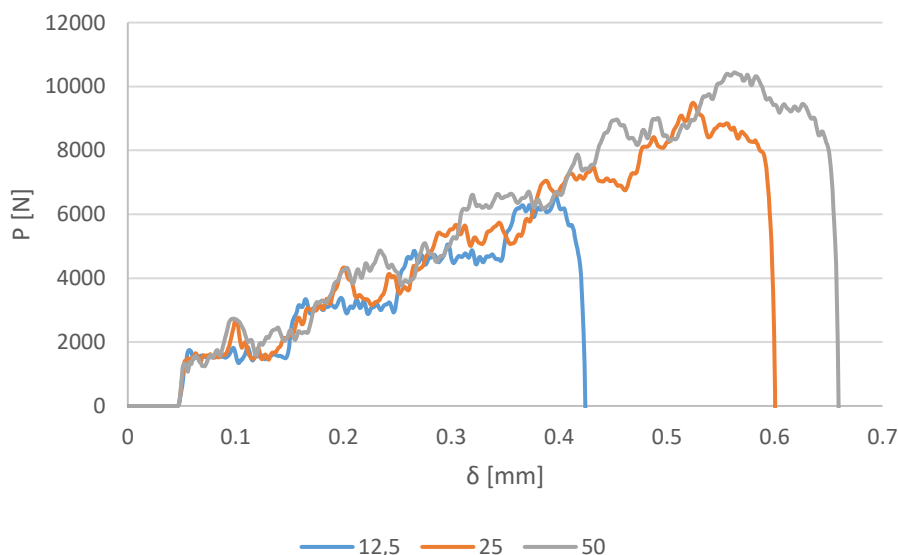
Tabela 14 - Influência de L_0 na $P_{\text{máx}}$ em JSD com o adesivo Sikaforce® 7752

L_0 [mm]	$P_{\text{máx}}$ [kN]	Variação [%]
12,5	10,71	-
25	16,49	54,0
50	25,15	134,8

3.2.5.3 Estudo da influência dos parâmetros coesivos na resistência ao impacto

Com o objetivo de perceber a influência dos parâmetros coesivos na resistência da JSD ao impacto, fez-se variar cada parâmetro coesivo entre -75% e +100% em relação aos valores dos parâmetros coesivos validados.

Na Figura 68 estão representadas as curvas P - δ do adesivo AV138 em função dos diferentes L_0 estudados. Como se pode comprovar, com o aumento do L_0 , a resistência aumenta, uma vez que a área de sobreposição é superior. À medida que a zona de sobreposição aumenta, o deslocamento máximo também aumenta. Verifica-se que o deslocamento máximo e o deslocamento correspondente à carga máxima são aproximadamente iguais, do que se pode concluir que o adesivo AV138 é um adesivo frágil, pois após atingir a carga máxima não tem capacidade de sustentar essa carga acabando por ocorrer a fratura.

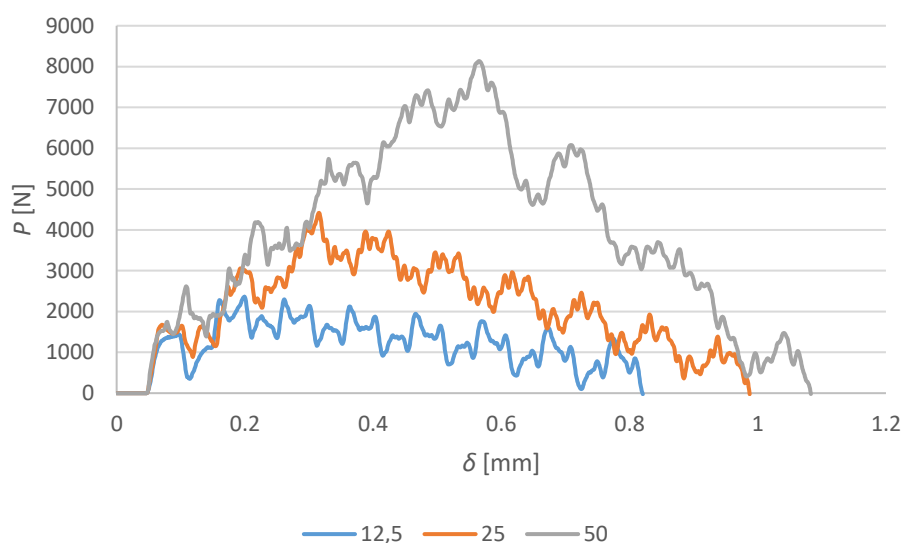
Figura 68 - Curva P - δ com adesivo AV138 em função de L_0

Na Tabela 15 estão apresentados os valores das cargas máximas ($P_{\text{máx}}$) para cada L_0 . Estes valores vão servir de valores de referência.

Tabela 15- Cargas máximas em função dos diferentes L_0

L_0 [mm]	12,5	25	50
$P_{\text{máx}}$ [N]	6555,9	9492,0	10440,0

Na Figura 69 estão representadas as curvas P - δ do adesivo Sikaforce®7752 em função dos diferentes L_0 estudados. Ao contrário do adesivo AV138, pode-se verificar uma maior ductilidade, uma vez que após atingir o deslocamento correspondente à carga máxima, este admite um deslocamento considerável antes de ocorrer a rotura. Com o aumento do L_0 , tal como no AV138, a carga máxima correspondente aumenta, uma vez que esta característica está diretamente relacionada com a zona de sobreposição e não com o tipo de adesivo estudado. Com o aumento da área de colagem, o deslocamento pré rotura será maior, pois as cargas suportadas serão maiores. Verifica-se também que quanto menor for o L_0 , maior será a deformação após atingir o deslocamento correspondente à carga máxima. Para o adesivo Sikaforce®7752 verifica-se pequenas variações de P ao longo da deformação, uma vez que estas são o resultado da propagação das ondas de tensão.

Figura 69 - Curva P - δ com adesivo Sikaforce® 7752 em função de L_0

Na Tabela 16 são apresentados os valores de carga máxima ($P_{\text{máx}}$) atingidos para cada L_0 , valores estes que vão servir de referência.

Tabela 16 - Cargas máximas em função dos diferentes L_0

L_0 [mm]	12,5	25	50
$P_{\text{máx}}$ [N]	2366,2	4419,4	8136,0

3.2.5.3.1 Rigidez elástica da lei coesiva

Para estudar a influência da rigidez elástica da lei coesiva, fez-se variar os módulos de elasticidade à tração (E) e ao corte (G) em simultâneo, uma vez que o coeficiente de Poisson (ν) tem que se manter e relaciona estas duas propriedades.

Na Figura 70, Figura 71 e Figura 72 apresentam as diferentes curvas P - δ , correspondentes às variações referidas, para os L_0 estudados referentes ao adesivo AV138.

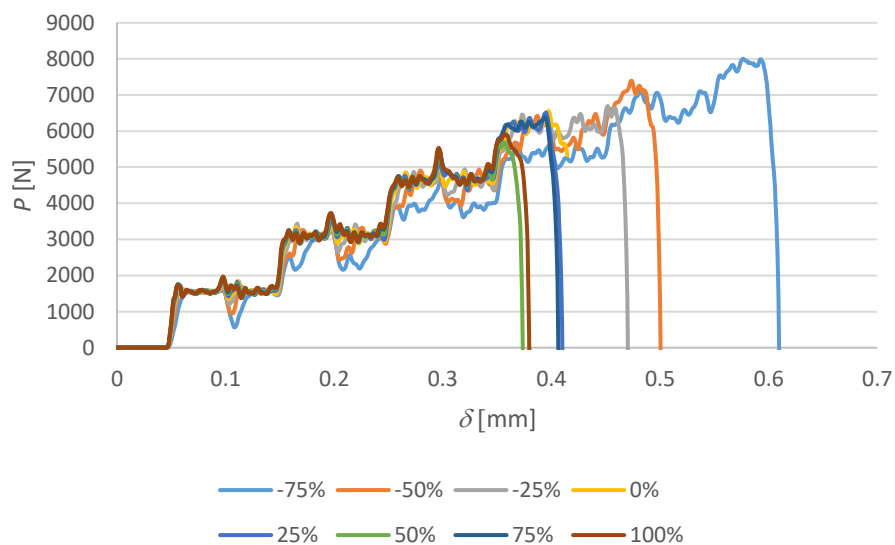


Figura 70 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=12,5$ mm

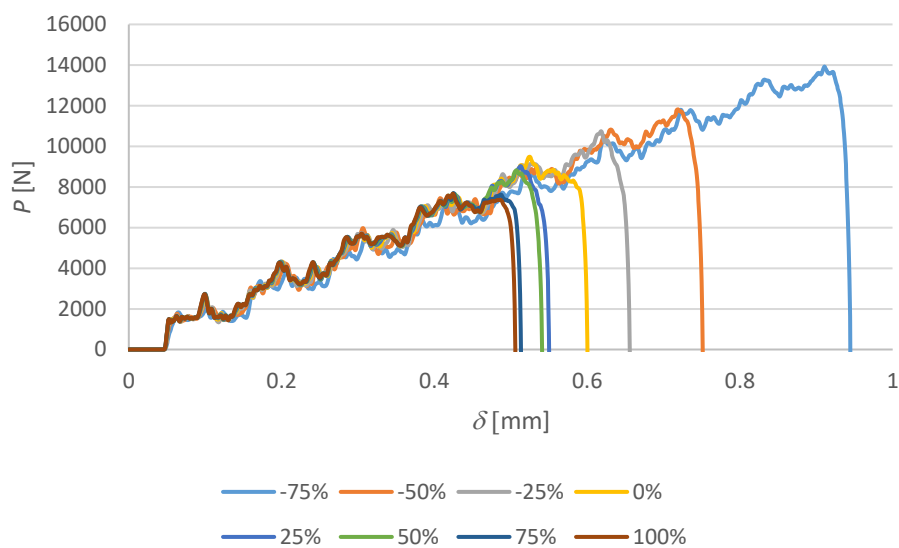


Figura 71 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=25$ mm

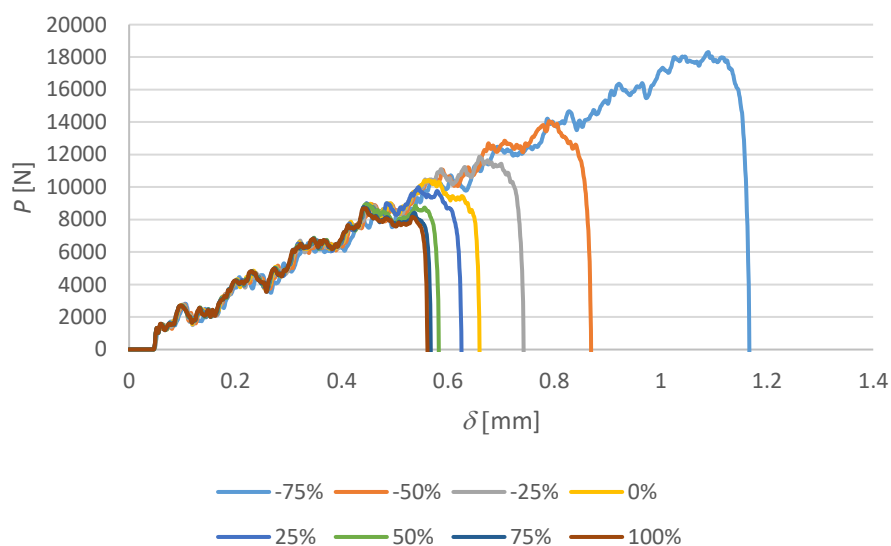


Figura 72 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=50$ mm

Na Figura 73 compara-se a resistência da JSD variando a rigidez para os diferentes L_0 . Para cada curva, relaciona-se os valores de carga máxima em função da carga máxima de referência e a variação de E e G em relação ao valor referência. Numa forma geral, verifica-se que, tal como acontece com os deslocamentos máximos, quanto maior for o L_0 maior será a resistência da junta. Com variações superiores à rigidez de referência, verifica-se que os dados obtidos são muito idênticos o que se pode concluir que L_0 deixa ter tanta influência para comparação da rigidez.

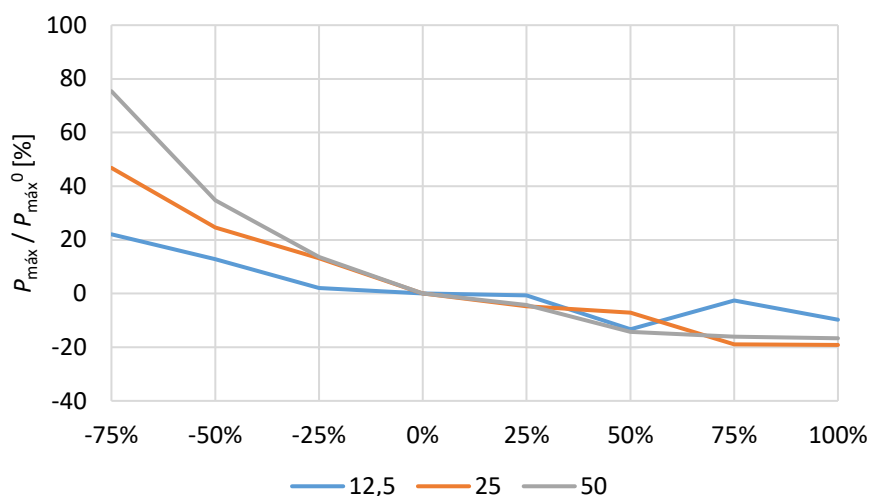


Figura 73 - Variação percentual de $P_{máx}/P_{máx}^0$ com variações de E e G entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo AV138

Na Figura 74, Figura 75 e Figura 76 apresentam-se as curvas P - δ de todas as variações nos intervalos referidos e todos os L_0 para o adesivo Sikaforce® 7752. As conclusões retiradas para o adesivo AV138 também se podem aplicar neste caso, apesar deste adesivo ser do tipo dúctil. Neste caso, verifica-se uma maior influência das diminuições da rigidez assim como nos deslocamentos respeitantes à carga máxima e também aos deslocamentos máximos. Pelo contrário, e como se esperava, admite cargas significativamente inferiores comparado com o adesivo AV138.

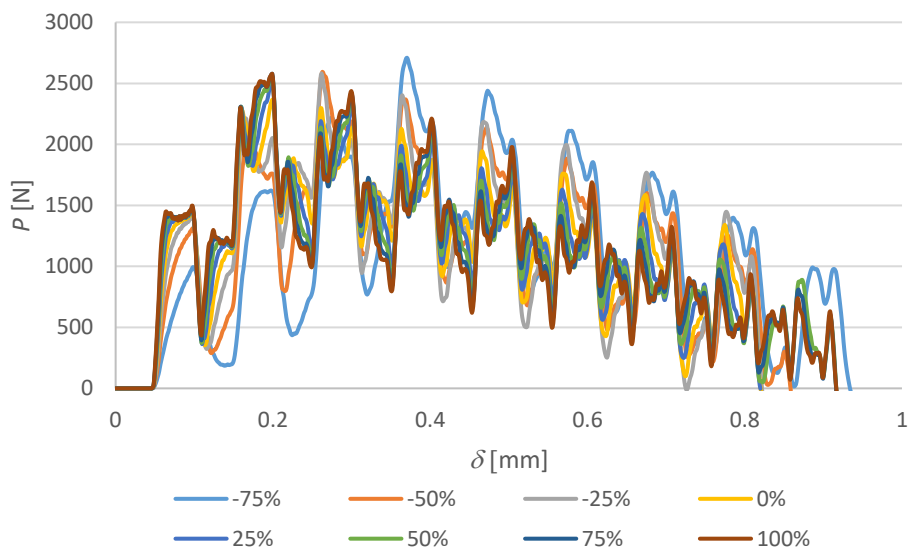


Figura 74 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=12,5$ mm

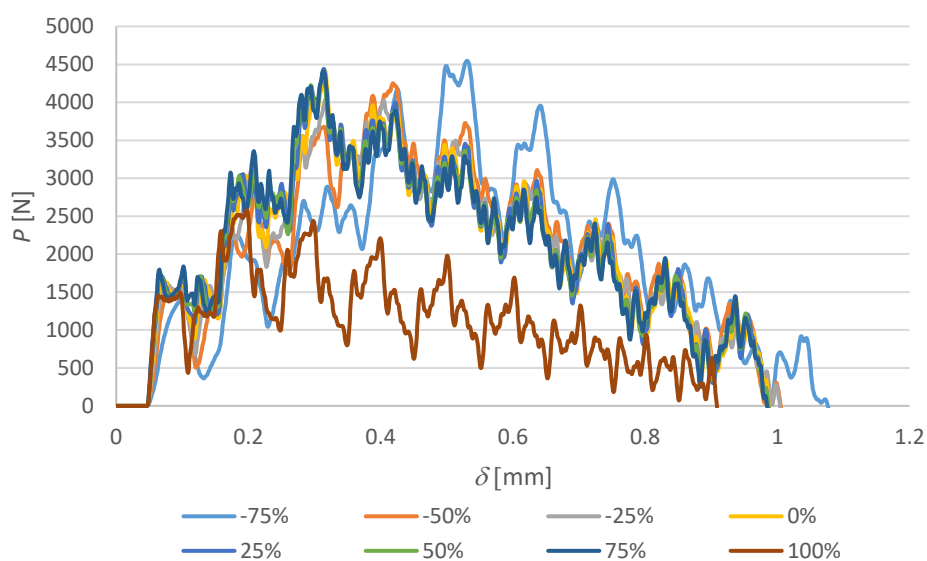


Figura 75 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=25$ mm

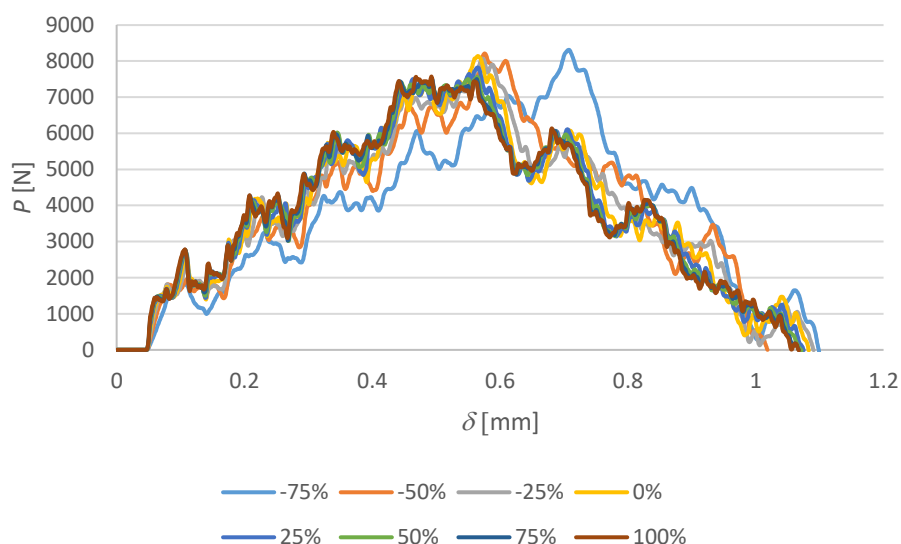


Figura 76 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=50$ mm

Como se verifica na Figura 77, a JSD com menor L_0 (12,5 mm) é a que é capaz de suportar uma maior carga em relação a L_0 superiores. Para uma rigidez de -75% da rigidez de referência, este adesivo consegue suportar aproximadamente mais 15% de carga. O mesmo acontece para uma variação de +100% da rigidez, este suporta aproximadamente 10%.

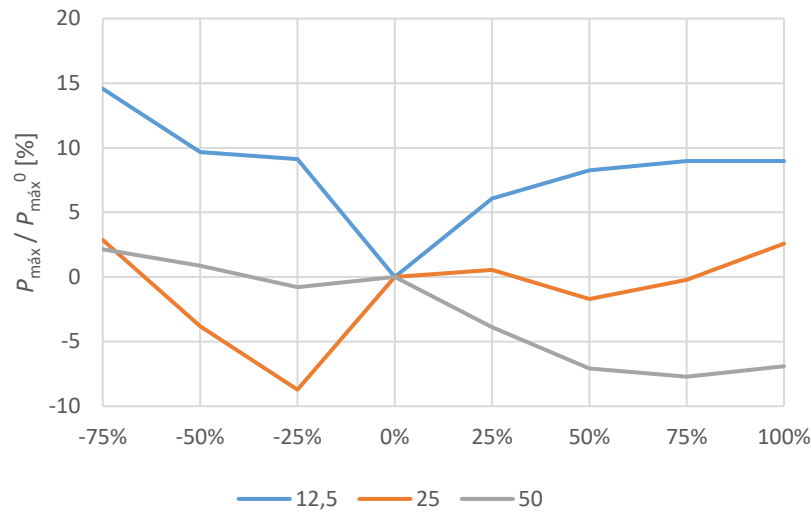


Figura 77 - Variação percentual de $P_{máx}/P_{máx}^0$ com variações de E e G entre -75% a +100% para os diferentes L_0 e com adesivo Sikaforce® 7752

3.2.5.3.2 Desacoplamento dos modos de carregamento com lei triangular

Neste subcapítulo faz-se uma análise comparativa entre o modelo coesivo triangular em modo, e o mesmo modelo triangular, embora com os modos de tração e corte desacoplados, ou seja, sem a utilização dos critérios de modo misto para criar uma lei única para os elementos coesivos (equação 4). Quanto ao processo de amaciamento, em vez de se reger pela (equação 5), este é agora individual, considerando independente o efeito da tenacidade à tração (G_{lc}) e a tenacidade ao corte (G_{llc}). Assim, para que haja rotura de uma ligação coesiva, não é necessário recorrer ao critério referido, podendo existir elementos que ainda resistam a um tipo de solicitação sem resistir ao outro (tração e corte).

As fases de amaciamento das leis MDC são definidas pelo *software* Abaqus® pela especificação da variável de dano (d_n para tração e d_s para corte), definida em função do deslocamento efetivo após a iniciação do dano ($\delta_n - \delta_n^0$ para tração ou $\delta_s - \delta_s^0$ para corte). Esta formulação é descrita pela formulação descrita de seguida. Na Figura 78 é possível visualizar o significado de d_n para a lei triangular, que pode ser extrapolado para o cálculo de d_s [64]. Por esta formulação t_n e t_s são definidos como

$$\begin{aligned} t_n &= (1 - d_n) t_n^{und} \\ t_s &= (1 - d_s) t_s^{und} \end{aligned} \quad (6)$$

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

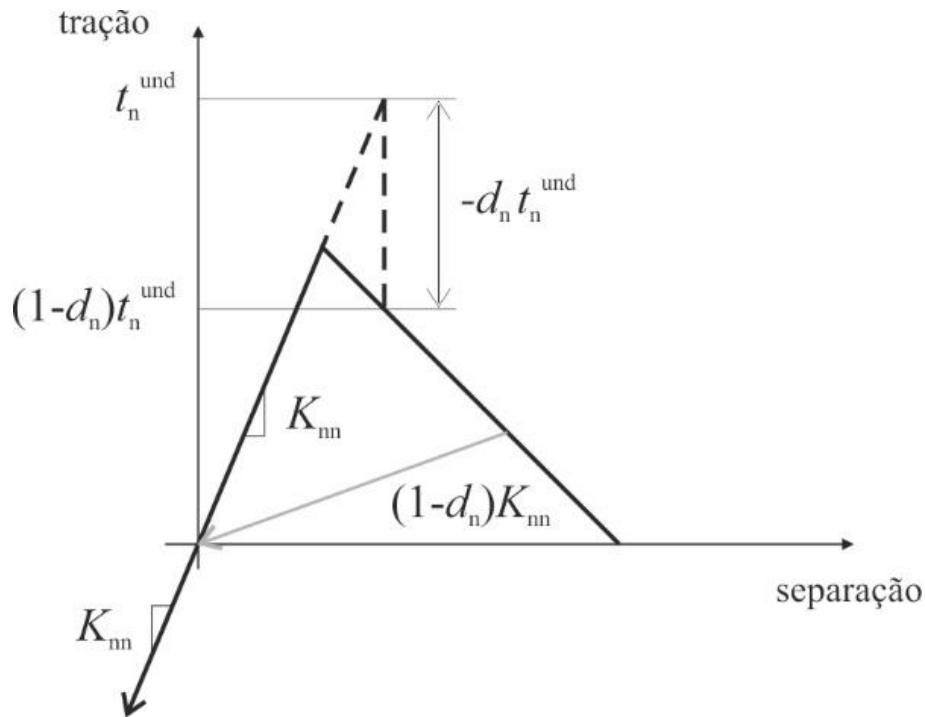


Figura 78 - Definição da variável de dano em tração, d_n , no Abaqus® (que pode ser extrapolada para d_s) [47]

Tendo como base estes pressupostos, a expressão genérica (em tração ou corte) de $d_{n,s}$ para a lei triangular assume a forma [64]

$$d_{n,s} = \frac{\delta_{n,s}^f (\delta_{n,s} - \delta_{n,s}^0)}{\delta_{n,s} (\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^0)}. \quad (7)$$

No *software*, nas propriedades do adesivo em *damage evolution*, introduz-se o desacoplamento. Em vez de se considerar um amaciamento linear misto, introduziu-se um conjunto de pontos, de forma individual para a tração e corte, que passam a reger esse amaciamento. Estes pontos foram gerados recorrendo ao *software* MatLab, com as expressões 6 e 7.

Na Figura 79, Figura 80 e Figura 81 estão apresentadas as curvas $P-\delta$ relativas ao modo misto e ao desacoplado para os diferentes L_0 , com o adesivo AV138. Em todas as situações estudadas, verificou-se que a zona inicial dos ensaios é igual para o modo-misto e desacoplado, uma vez que esta zona corresponde ao domínio elástico, antes do aparecimento do dano (até t_m^0). Quando se atinge t_m^0 o comportamento dos dois modos é diferente, devido às razões apresentadas anteriormente. No modo desacoplado, para este adesivo, verifica-se que o deslocamento máximo ($\delta_{máx}$) corresponde na ordem dos 110% do $\delta_{máx}$ no modo misto.

Na Figura 82 está representada a variação percentual da carga máxima atingida em relação à carga máxima de referência. Como referido anteriormente, para os L_0 estudados, verifica-se que as cargas máximas atingidas no modo desacoplado são sempre superiores, comparativamente ao modo-misto. Para $L_0=12,5$ mm a diferença entre as 2 formulações é insignificativa (aproximadamente 0,001%). À medida que se aumenta o L_0 a variação também aumenta, o que leva a concluir que a precisão dos resultados com a formulação do modo desacoplado é indiferenciada pelo aumento do L_0 .

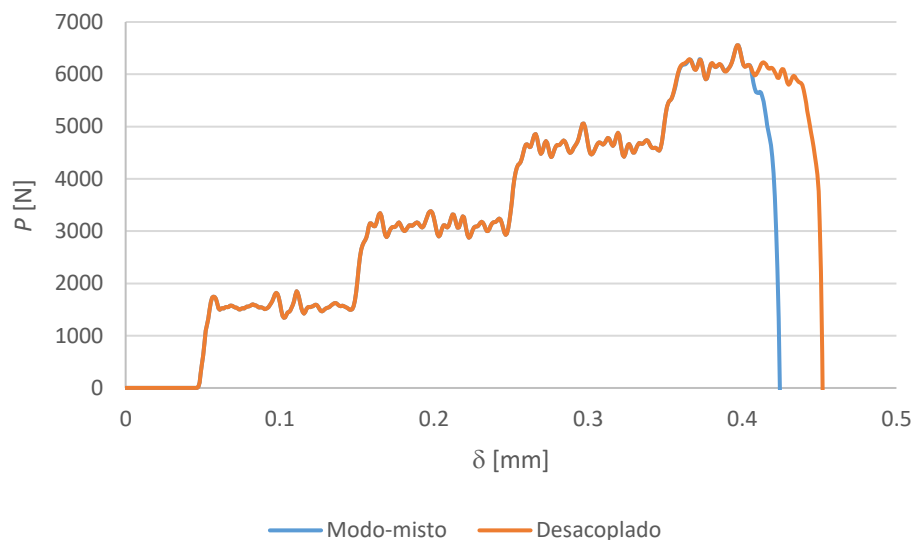


Figura 79 - Curvas P - δ correspondentes a modo-misto e desacoplado e com adesivo AV138 e $L_0=12,5$ mm



Figura 80 - Curvas P - δ correspondentes a modo-misto e desacoplado e com adesivo AV138 e $L_0=25$ mm

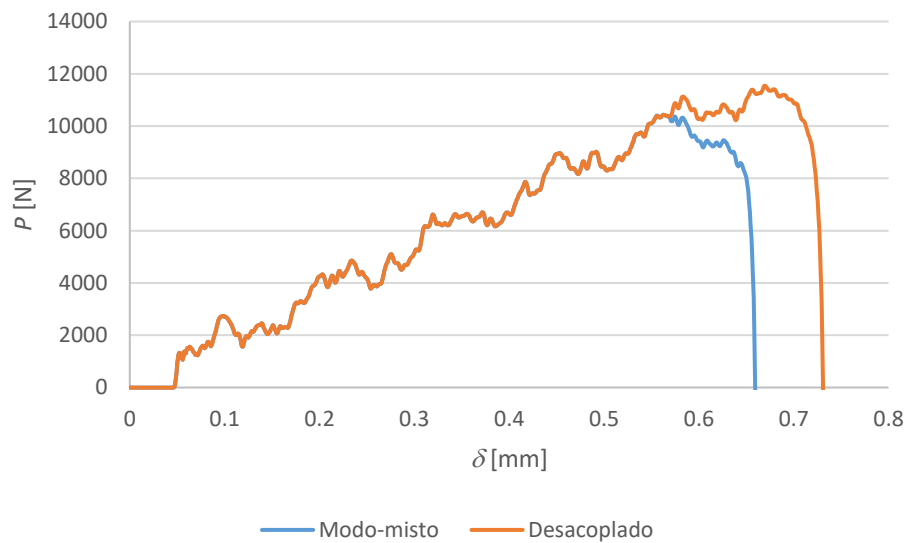


Figura 81 - Curvas P - δ correspondentes a modo-misto e desacoplado e com adesivo AV138 e $L_0=50$ mm

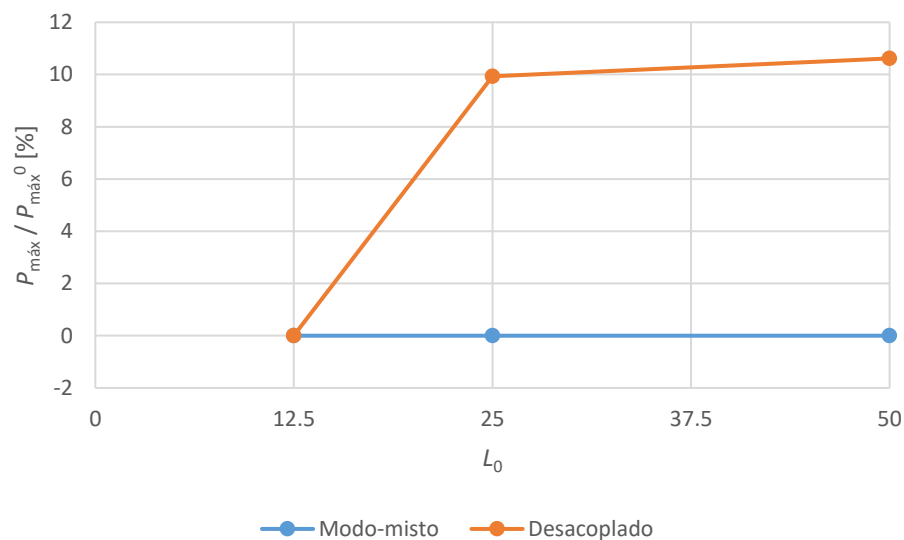


Figura 82 - Variação percentual de $P_{\text{máx}}/P_{\text{máx}}^0$ correspondentes a modo-misto e desacoplado para os diferentes L_0 e com adesivo AV138

As curvas P - δ em modo misto e desacoplado para os diferentes L_0 estudados, com o adesivo Sikaforce® 7752 apresentam-se na Figura 83, Figura 84 e Figura 85. Como já referido anteriormente, e como se pode também verificar no caso do adesivo AV138, o deslocamento correspondente ao domínio elástico é igual para ambos os modos. No modo desacoplado, o adesivo não é capaz de resistir a deslocamentos tão elevados como no modo-misto, sendo os $\delta_{\text{máx}}$ registados cerca de 26%, 32% e 42% dos $\delta_{\text{máx}}$ registados com o modo-misto, para $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$ mm e $L_0=50$ mm, respetivamente. Verifica-se também que as cargas máximas, no modo desacoplado, são inferiores que no modo misto.

Na Figura 86 está representada a variação percentual da carga máxima atingida em relação à carga máxima de referência. Ao contrário do adesivo AV138, e como já referido, a carga máxima atingida no modo desacoplado é consideravelmente inferior, comparativamente ao modo-misto. Para $L_0=12,5$ mm, verifica-se uma variação cerca de 2%, mas com o aumento do L_0 a variação pode chegar a valores na ordem dos 30%. Concluindo, usando o modelo desacoplado, embora a parte inicial das curvas $P-\delta$ seja modelada da forma correta, na zona de propagação há diferenças visíveis entre os dois modelos que tendem a aumentar com o aumento de L_0 .

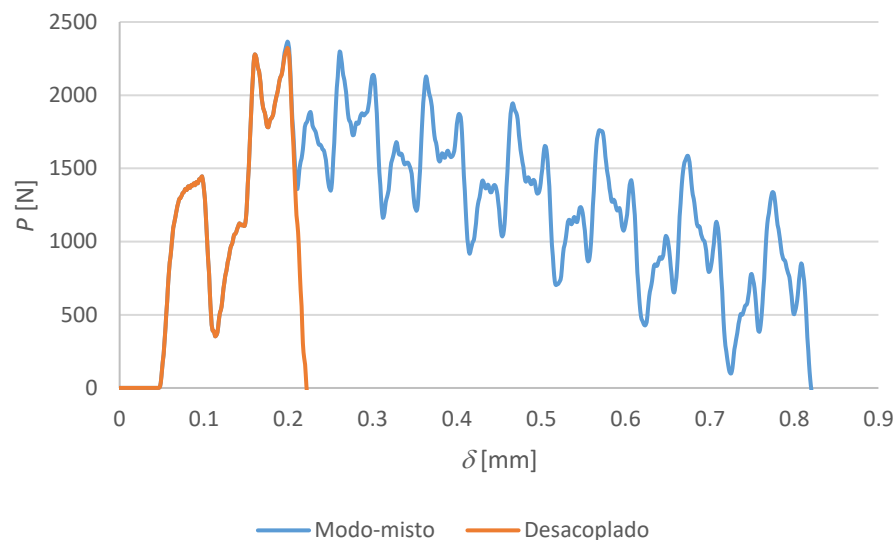


Figura 83 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm

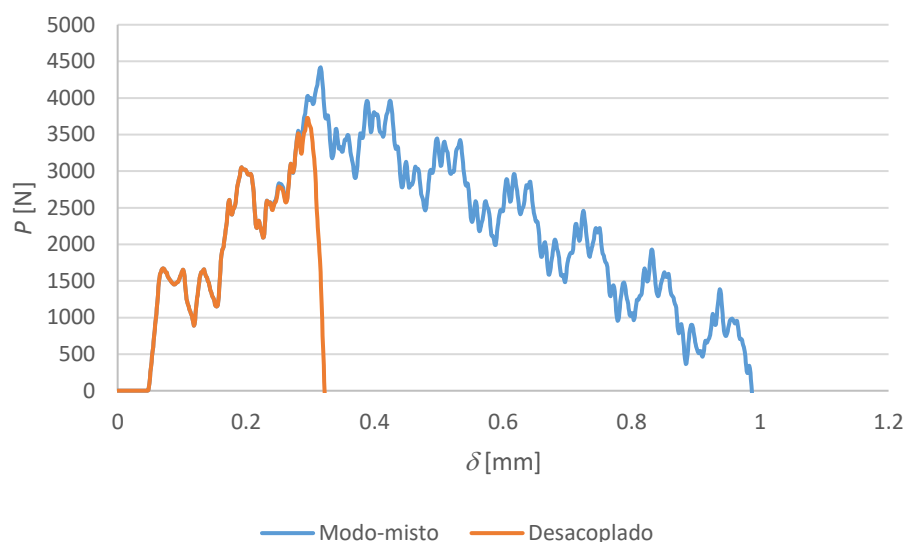


Figura 84 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=25$ mm

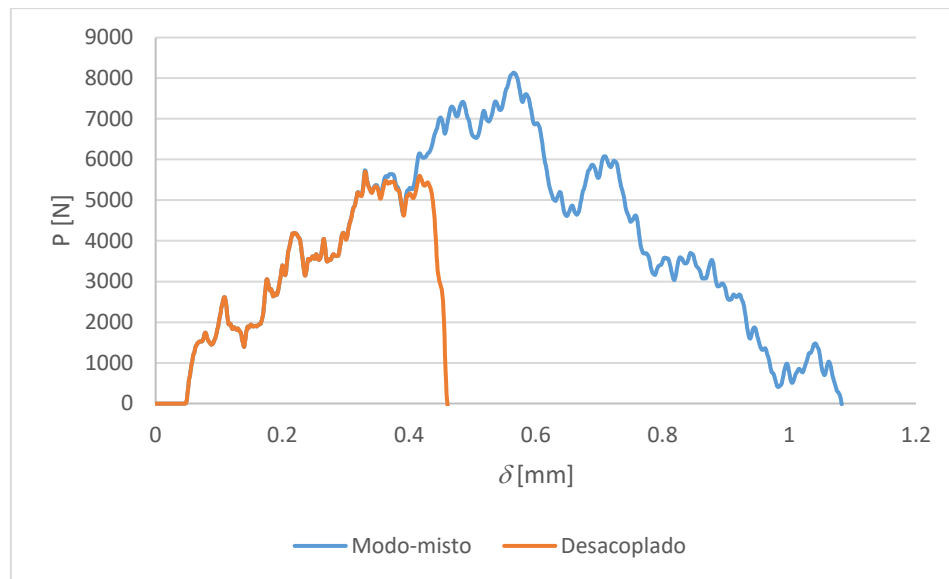


Figura 85 - Curvas P - δ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm

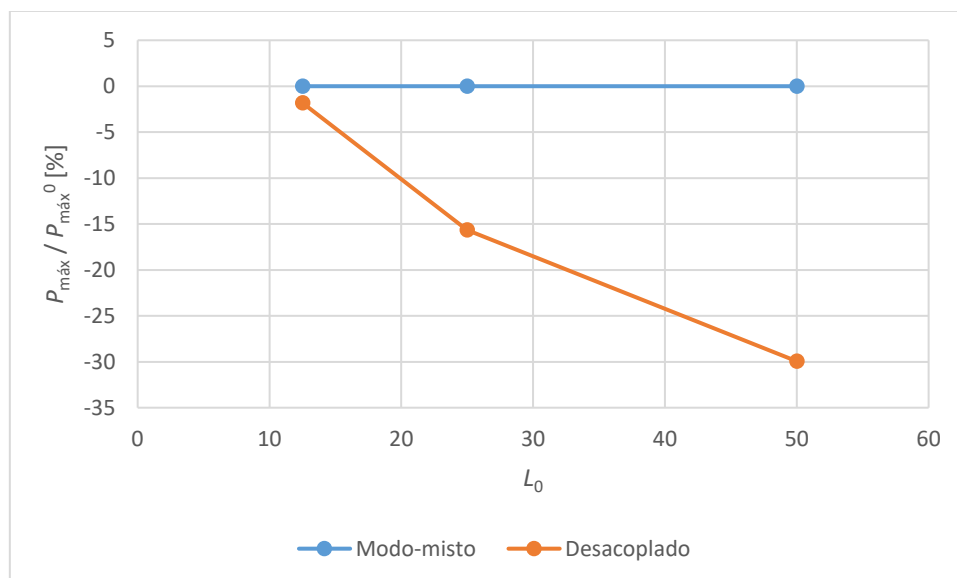


Figura 86 - Variação percentual de $P_{máx}/P_{máx}^0$ correspondentes a modo-misto e desacoplado para os diferentes L_0 e com adesivo Sikaforce® 7752

3.2.5.3.3 Resistências coesivas

Com o objetivo de estudar a influência das resistências coesivas no comportamento e resistência de JSD solicitadas ao impacto, fez-se variar a resistência coesiva à tração (t_n^0) e a resistência coesiva ao corte t_s^0 individualmente e em simultâneo nos mesmos intervalos percentuais já utilizados.

Na Figura 87, Figura 88 e Figura 89 estão representadas as curvas P - δ correspondentes às variações efetuadas a t_n^0 , para todos os L_0 estudados do adesivo AV138. Numa forma geral verifica-se que, com o aumento do t_n^0 , o deslocamento máximo (δ_m^f) também

umenta. Para os L_0 estudados, verifica-se a zona elástica não sofre alterações com as variações de t_n^0 . Com o aumento do L_0 verifica-se uma divergência do $P_{m\acute{a}x}$.

A Figura 90 representa a influência de t_n^0 na resistência da junta. De um modo geral, e como é esperado, verifica-se que o aumento de t_n^0 normalizado da junta conduz a um aumento da carga suportada pela JSD, que pode chegar aproximadamente a 15% para $L_0=50$ mm. Para $L_0=12,5$ mm, nota-se que a carga suportada pode chegar aproximadamente a 22% da carga suportada com t_n^0 de referência. Para $L_0=12,5$ mm, verifica-se uma variação de 15% de $P_{m\acute{a}x}$ comparativamente a $L_0=25$ mm e $L_0=50$ mm. O mesmo se verifica para variações positivas. Para uma variação da $P_{m\acute{a}x}$ de 100%, observa-se, para $L_0=12,5$ mm, uma variação, aproximadamente, de 5% comparando com os restantes L_0 .

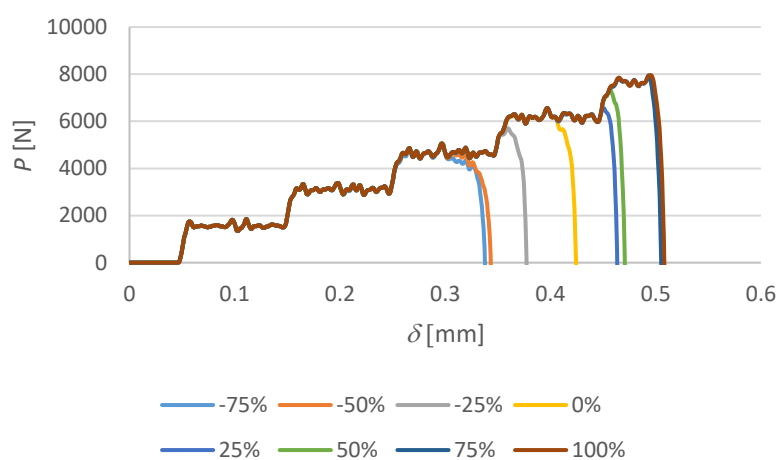


Figura 87 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=12,5$ mm

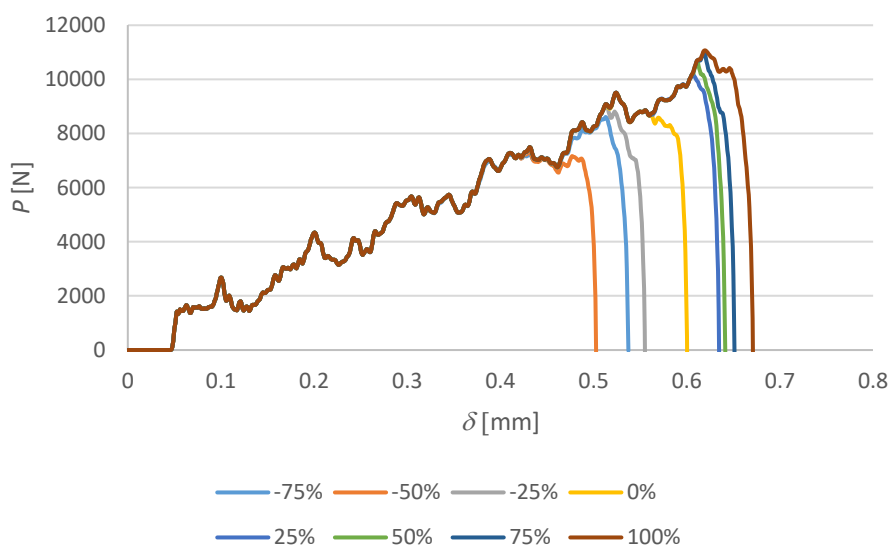


Figura 88 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=25$ mm

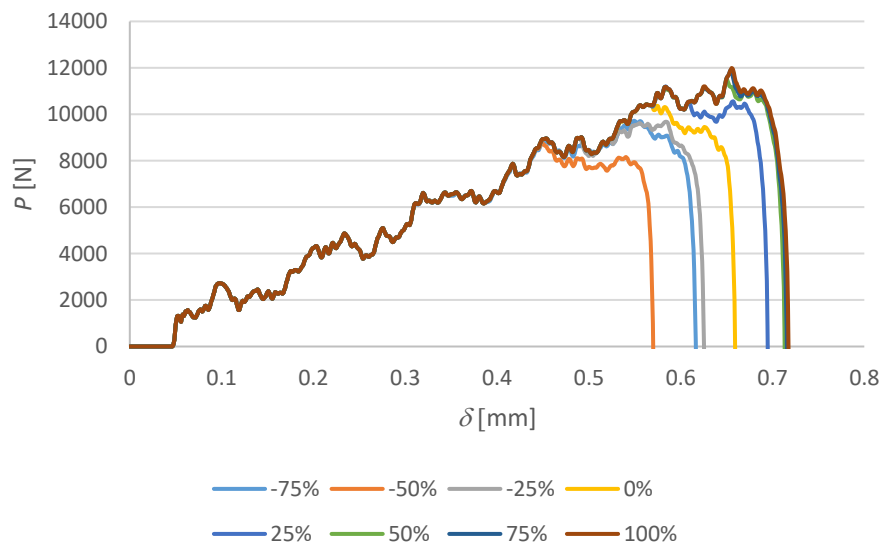


Figura 89 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=50$ mm

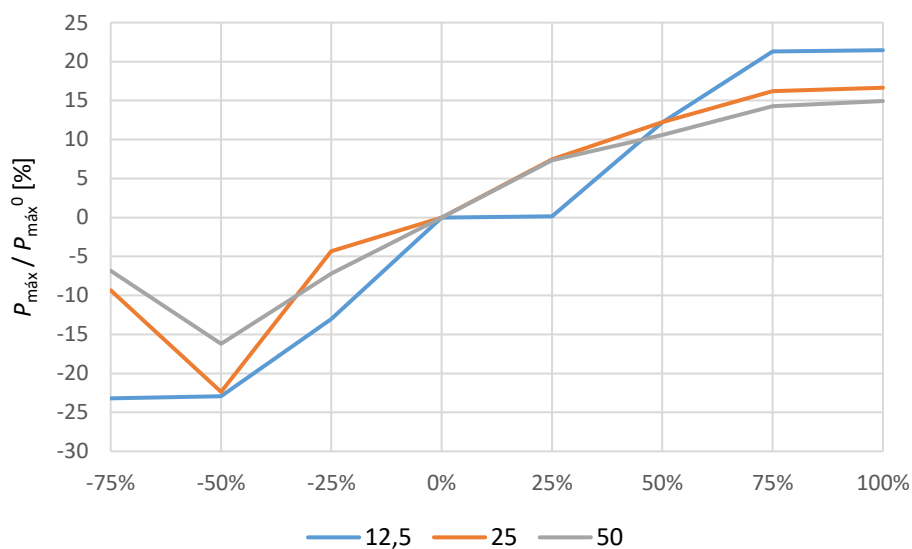


Figura 90 - Variação percentual de $P_{\text{máx}}/P_{\text{máx}}^0$ com variações de t_n^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 e com adesivo AV138

Na Figura 91, Figura 92 e Figura 93 estão representadas as curvas P - δ correspondentes às variações efetuadas a t_s^0 , para todos os L_0 estudados do adesivo AV138. Com o aumento de t_s^0 verifica-se que a carga máxima aumenta, aumentando também o deslocamento máximo.

A Figura 94 representa a influência de t_s^0 na resistência da junta para os diferentes L_0 . Tal com acontece com a variação de t_n^0 , nota-se um aumento considerável da carga máxima com o aumento de t_s^0 . Para $L_0 = 12,5$ mm, a diminuição do valor da variação de t_s^0 corresponde a valores da carga máxima substancialmente inferiores, comparando com o valor de referência.

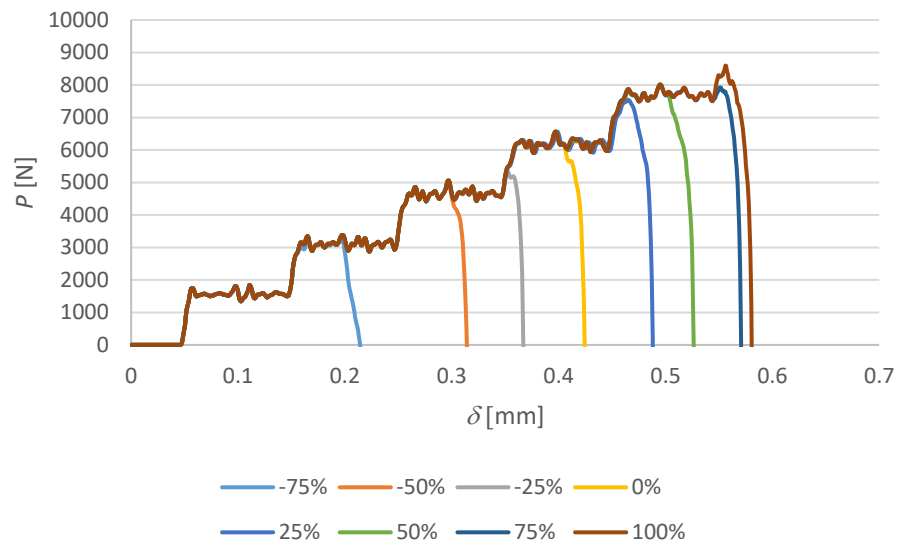


Figura 91 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV 138 e com $L_0 = 12,5$ mm

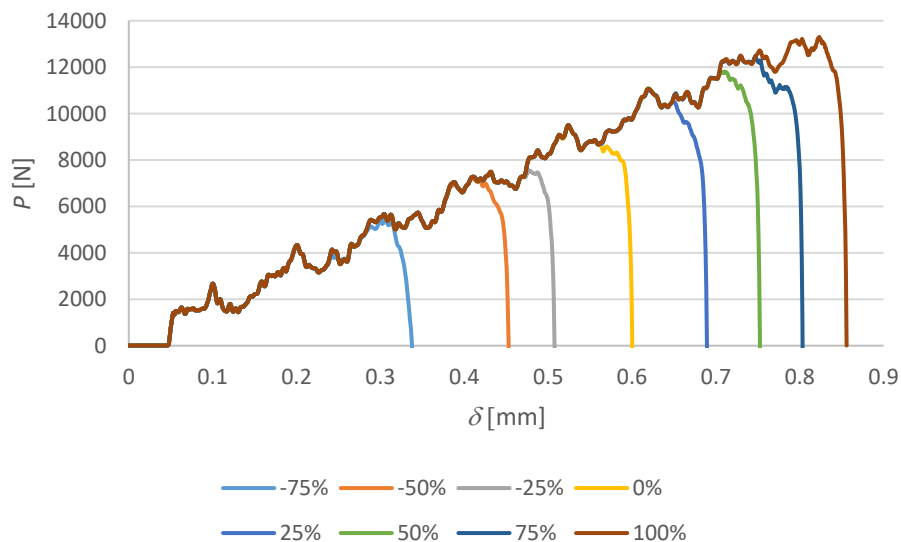


Figura 92 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV 138 e com $L_0 = 25$ mm

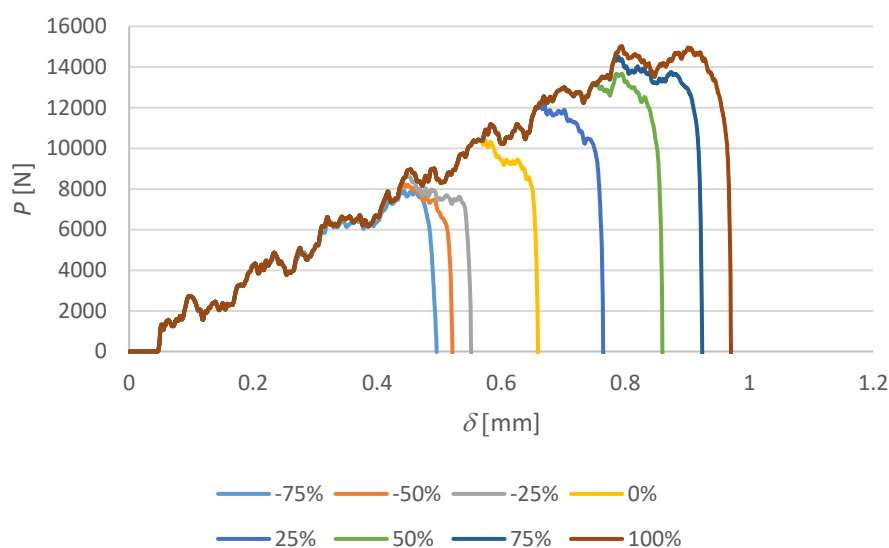


Figura 93 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV 138 e com $L_0=50$ mm

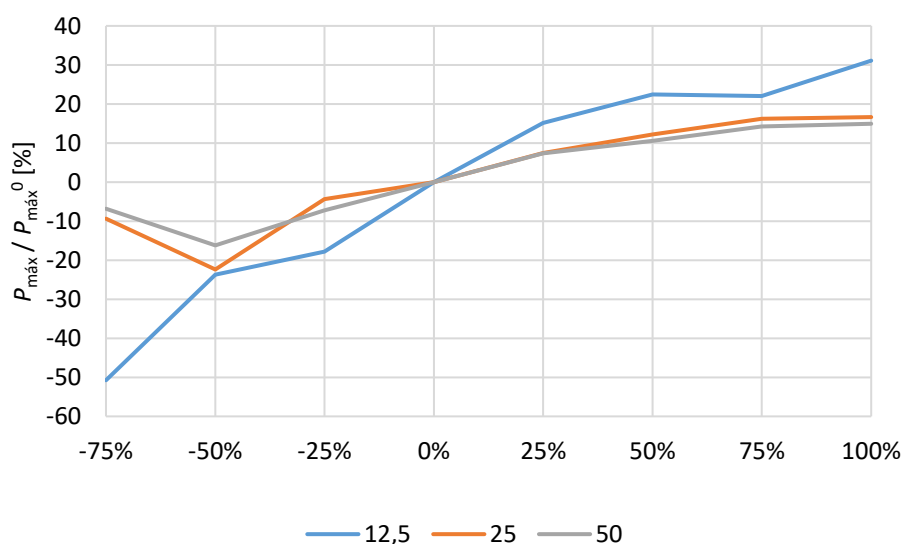


Figura 94 - Variação percentual de $P_{\text{máx}}/P_{\text{máx}}^0$ com variações de t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 e com adesivo AV138

Como se verifica na Figura 95, Figura 96 e Figura 97, estão apresentadas as curvas P - δ correspondentes às variações simultâneas de t_n^0 e t_s^0 para o adesivo AV138. A maior evidência apresentada é a semelhança das curvas P - δ com variação somente de t_s^0 (Figura 91, Figura 92 e Figura 93). A variação destes dois parâmetros resulta de um somatório das suas influências, dado que t_s^0 , como já foi explicado, apresenta uma influência consideravelmente superior a t_n^0 no comportamento destas juntas, pelo que era de esperar esta semelhança entre curvas.

A Figura 98 apresenta $P_{\text{máx}}/P_{\text{máx}}^0$ com variações de t_n^0 e t_s^0 em simultâneo. Observa-se que a variação entre t_n^0 e t_s^0 e apenas t_s^0 é aproximadamente a mesma e que a variação é o resultado da soma direta entre as curvas apenas de t_n^0 e de t_s^0 . Para uma variação de 100% de t_n^0 e t_s^0 verifica-se um aumento da carga máxima de aproximadamente de 100%, o que leva a concluir que ambos os parâmetros têm influência no adesivo AV138. Por outro lado, variando t_n^0 e t_s^0 individualmente (Figura 90 e Figura 94, respetivamente), verifica-se que a variação de $P_{\text{máx}}$ é inferior a quando variados simultaneamente. Para uma variação de t_s^0 de 100%, o adesivo apresenta uma variação de $P_{\text{máx}}$ aproximadamente de 30%. Pelo contrário, variando simultaneamente t_n^0 e t_s^0 a junta apresenta uma variação de $P_{\text{máx}}$ aproximadamente de 100%.

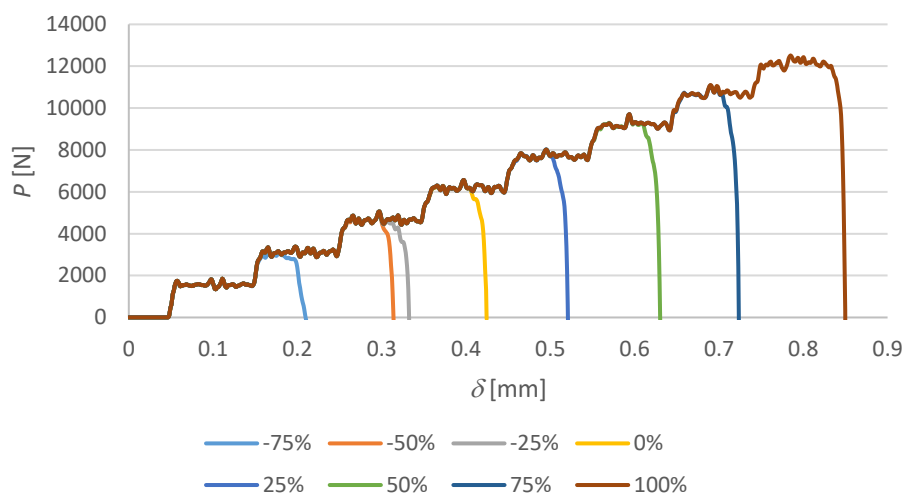


Figura 95 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=12,5$ mm

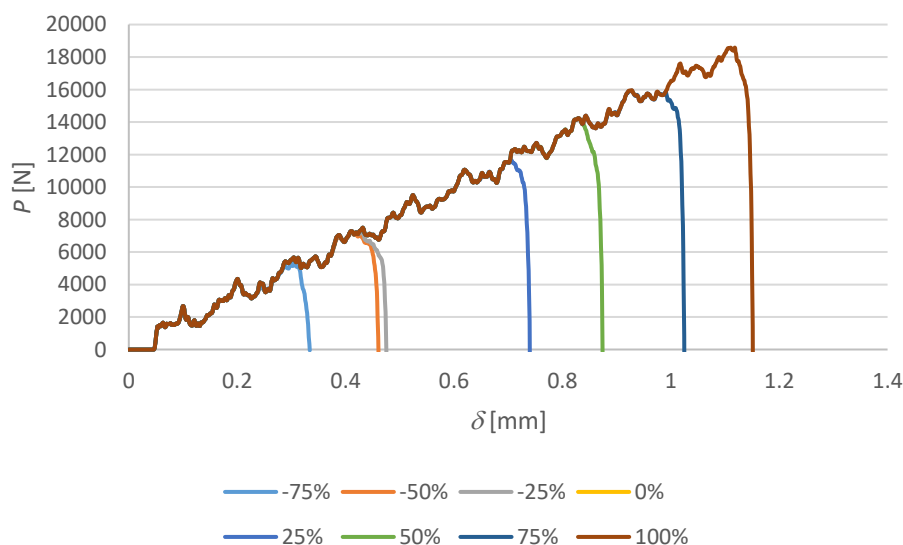


Figura 96 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=25$ mm

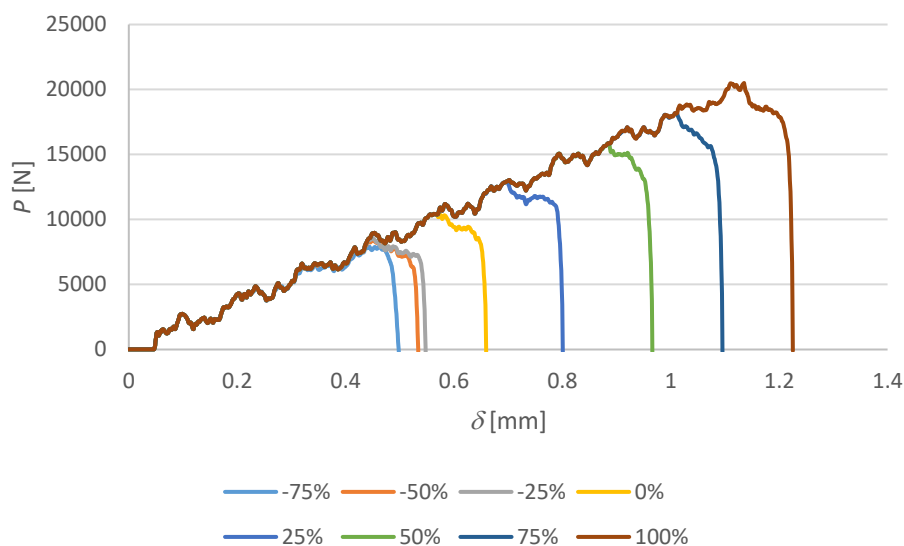


Figura 97 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=50$ mm

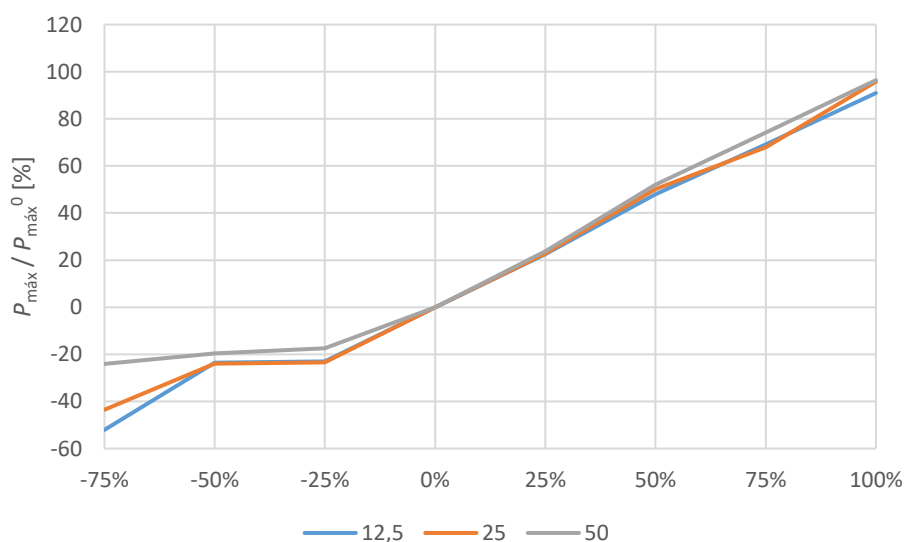


Figura 98 - Variação percentual de $P_{\text{máx}}/P_{\text{máx}}^0$ com variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 e com adesivo AV138

Na Figura 99, Figura 100 e Figura 101 estão representadas as curvas P - δ correspondentes às variações efetuadas a t_n^0 , para todos os L_0 estudados, do adesivo Sikaforce® 7752. Como mostrado anteriormente, e ao contrário do adesivo AV138, este adesivo suporta cargas muito inferiores. Para L_0 menores verifica-se que, variando t_n^0 , as curvas P - δ não variam significativamente, o que leva a concluir que esta propriedade não influencia de forma relevante o comportamento da JSD quando sujeita a cargas dinâmicas ao impacto. Com o aumento de L_0 , já se torna possível diferenciar a variação existente entre as variações estudadas. Isto pode acontecer devido ao aumento das tensões nos

extremos da junta. No entanto, comparando com t_s^0 , o efeito de t_n^0 é menos relevante, uma vez que o esforço de corte é o principal esforço a que a junta está sujeita.

Na Figura 102 é apresentada a variação percentual da carga máxima com variações de t_n^0 . Com o aumento de t_n^0 verifica-se que, independentemente do L_0 , a carga máxima tende a convergir a carga máxima correspondente ao t_n^0 de referência. Isto acontece, uma vez que, sendo o adesivo Sikaforce® 7752 do tipo dúctil, conforme confirmado em 3.2.5.3.1. Para adesivos frágeis, o t_n^0 tem mais influência do que para adesivos dúcteis.

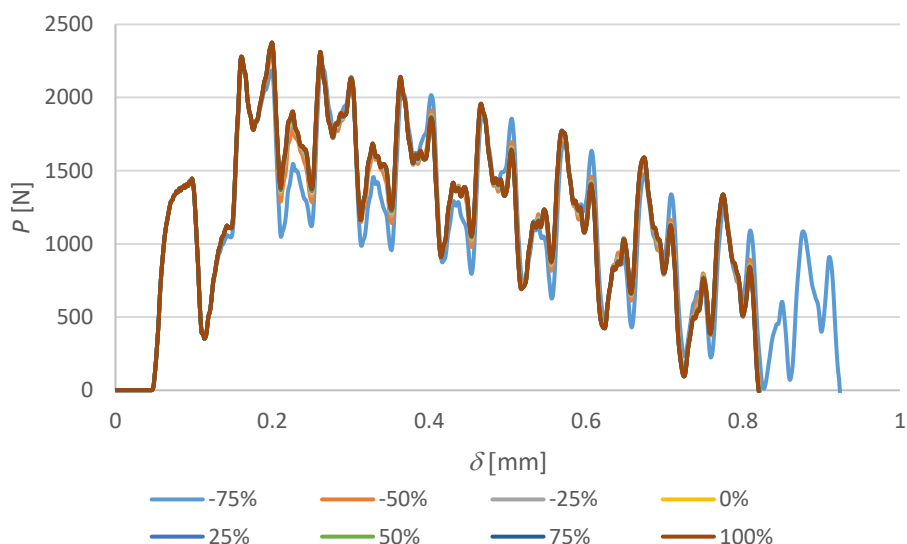


Figura 99 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=12,5$ mm

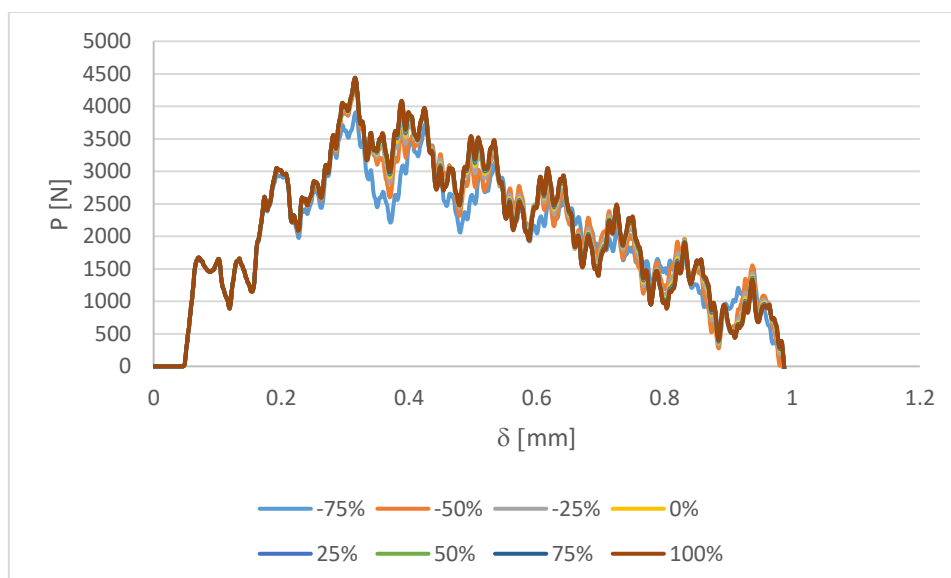


Figura 100 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=25$ mm

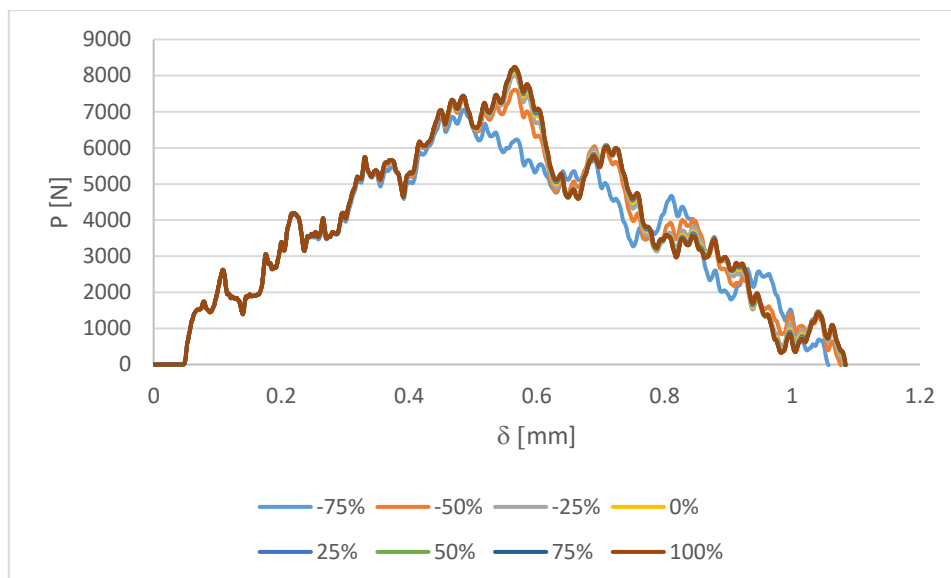


Figura 101 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=50$ mm

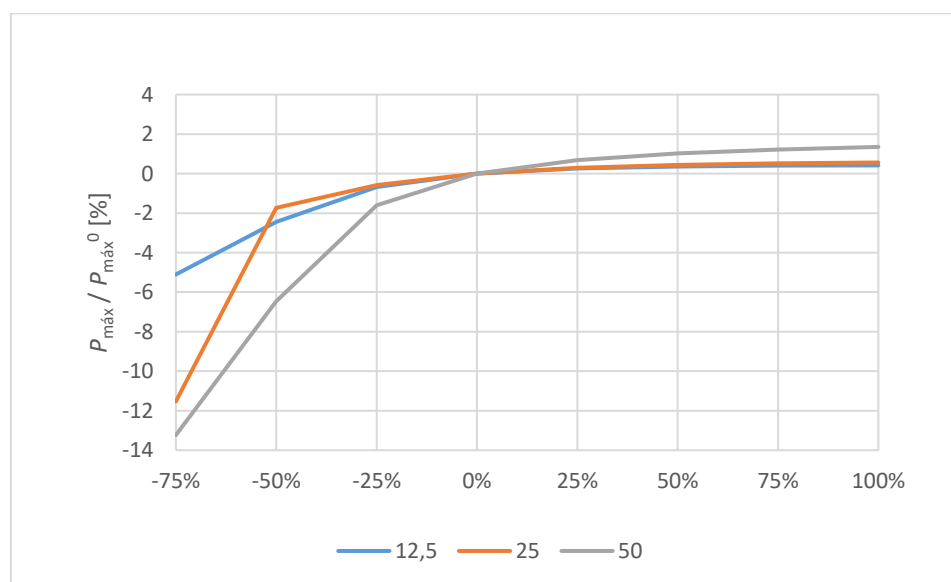


Figura 102 - Variação percentual de $P_{máx}/P_{máx}^0$ com variações de t_n^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 e com adesivo Sikaforce® 7752

Na Figura 103, Figura 104 e Figura 105 estão representadas as curvas P - δ correspondentes às variações efetuadas a t_s^0 , para todos os L_0 estudados do adesivo Sikaforce® 7752. À medida que L_0 aumenta, verifica-se uma tendência na relação entre a carga máxima e variação de t_s^0 . Como se esperava, quanto maior o L_0 , maior será o deslocamento máximo. No entanto, com o aumento de t_s^0 , menor será o deslocamento máximo atingido, mas a carga máxima será superior. Como exemplo, com $L_0=50$ mm, para uma variação de +100%, regista-se $P_{máx}=14000$ N e $\delta_{rot}=1$ mm, aproximadamente. Pelo contrário, para uma variação de -75%, tem-se que $P_{máx}=2000$ N e $\delta_{rot}=3,2$ mm, aproximadamente.

A influência de t_s^0 na resistência da junta pode verificar-se na Figura 106. Com os resultados apresentados, pode-se concluir que t_s^0 tem grande influência na junta entre os vários L_0 . A variação obtém uma tendência muito idêntica, comparando entre os diferentes L_0 . Verifica-se que a relação entre a variação e a carga máxima é praticamente direta. De facto, para uma variação de -75% do valor de referência, a JSD apresenta uma carga máxima aproximadamente de -75% da carga máxima de referência. O mesmo se verifica para o aumento de t_s^0 .

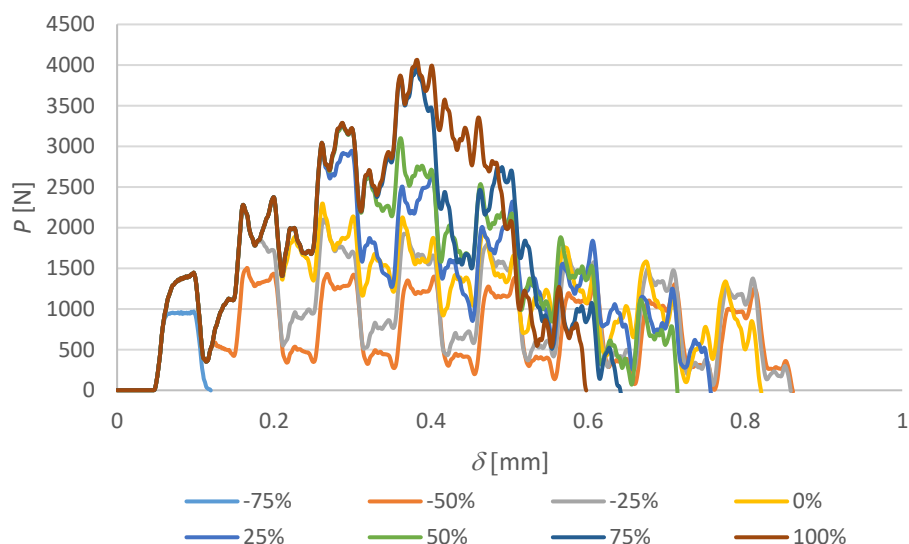


Figura 103 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=12,5$ mm

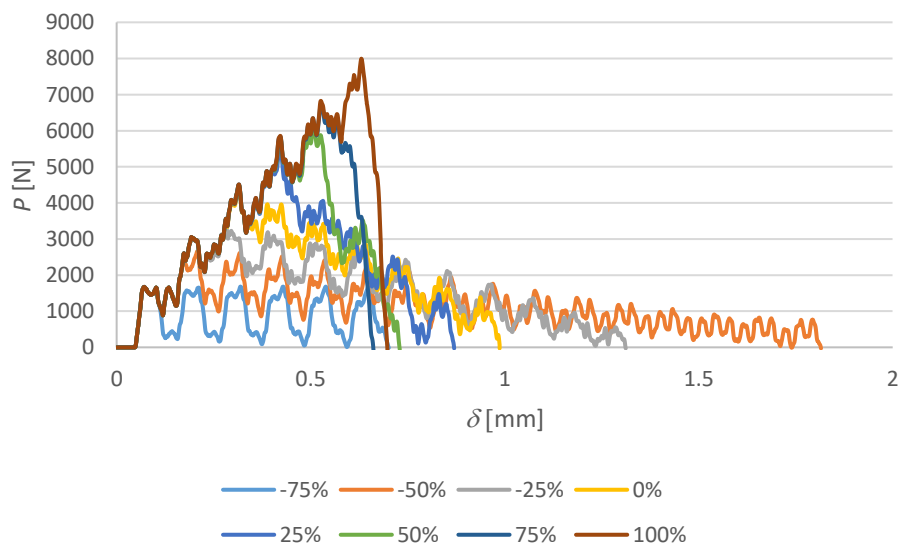


Figura 104 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=25$ mm

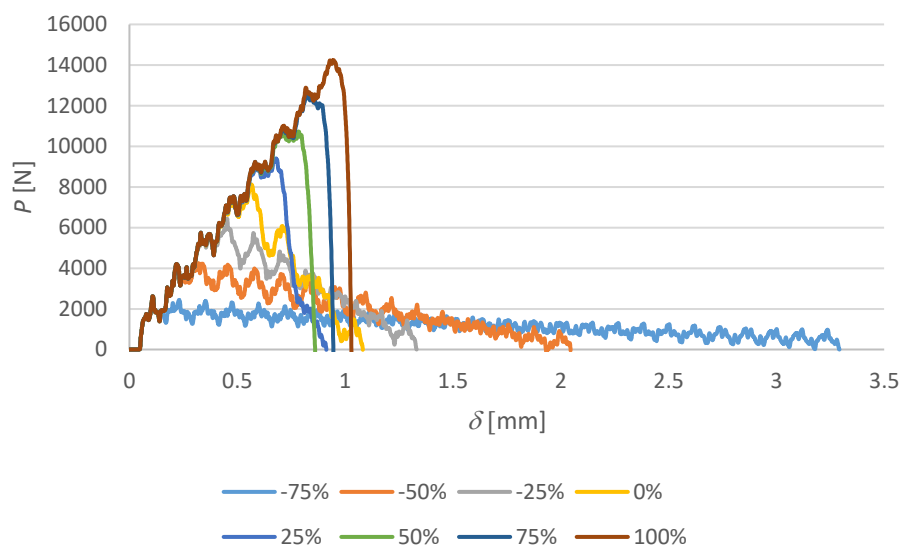


Figura 105 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=50$ mm

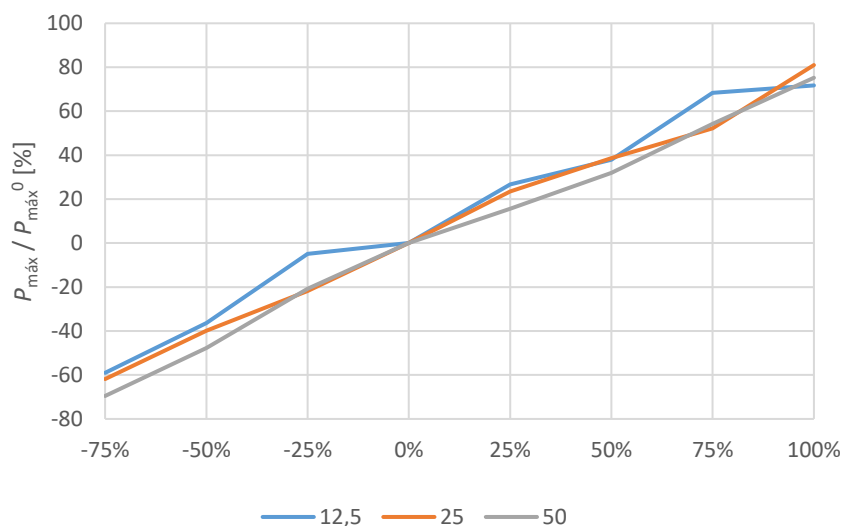


Figura 106 - Variação percentual de $P_{máx}/P_{máx}^0$ com variações de t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo Sikaforce® 7752

Na Figura 107, Figura 108 e Figura 109 estão representadas as curvas P - δ correspondentes às variações de t_n^0 e t_s^0 , para do adesivo Sikaforce® 7752. Como referido no caso do adesivo AV138, verifica-se também para este adesivo, uma semelhança entre as curvas com variação do t_n^0 e t_s^0 e as curvas com variação somente de t_s^0 . Variando em simultâneo os dois parâmetros, as curvas resultantes são o somatório dos efeitos das curvas com variação do t_n^0 e das curvas com variação do t_s^0 .

A Figura 110 apresenta $P_{máx}/P_{máx}^0$ com variações de t_n^0 e t_s^0 , com o adesivo Sikaforce® 7752. As curvas são muito idênticas às curvas com variação somente de t_s^0 (Figura 106).

Para uma variação de 100%, verifica-se um aumento de 80% de $P_{\text{máx}}$. Para uma variação de -75%, verifica-se uma redução de 60% para $L_0=12,5\text{mm}$ e para $L_0=12,5\text{mm}$. Para $L_0=50\text{mm}$, verifica-se uma redução de 70%. Assim, verifica-se que ambos os parâmetros têm influência nas juntas com adesivo Sikaforce® 7752. Comparando as variações simultâneas com a variação individual de t_n^0 e t_s^0 (Figura 102 e Figura 106, respetivamente), conclui-se que apenas t_s^0 tem influência na junta, uma vez que o corte é o principal esforço presente na junta. Variando 100% apenas t_s^0 verifica-se que a variação de $P_{\text{máx}}$ é aproximadamente 75% para L_0 superiores. Variando 100% t_n^0 e t_s^0 verifica-se que a variação de $P_{\text{máx}}$ é aproximadamente 77% para L_0 superiores.

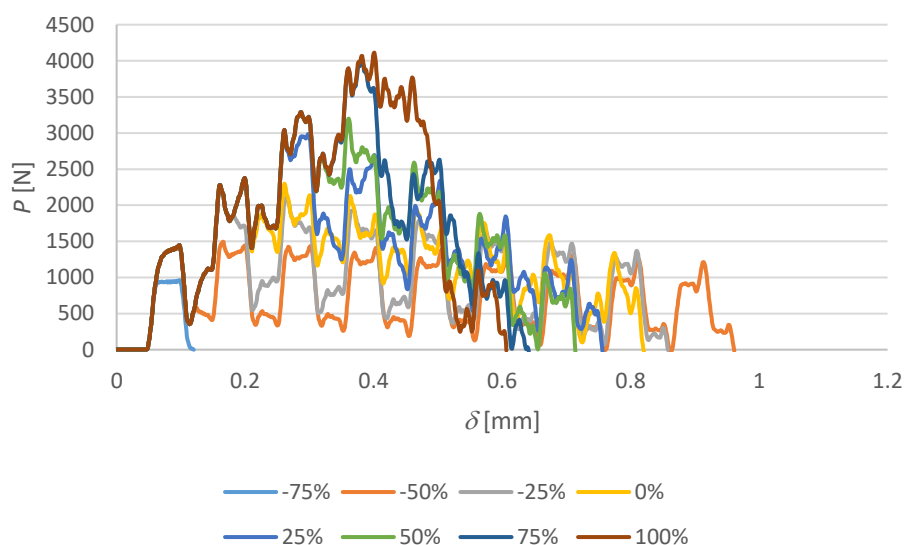


Figura 107 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=12,5\text{ mm}$

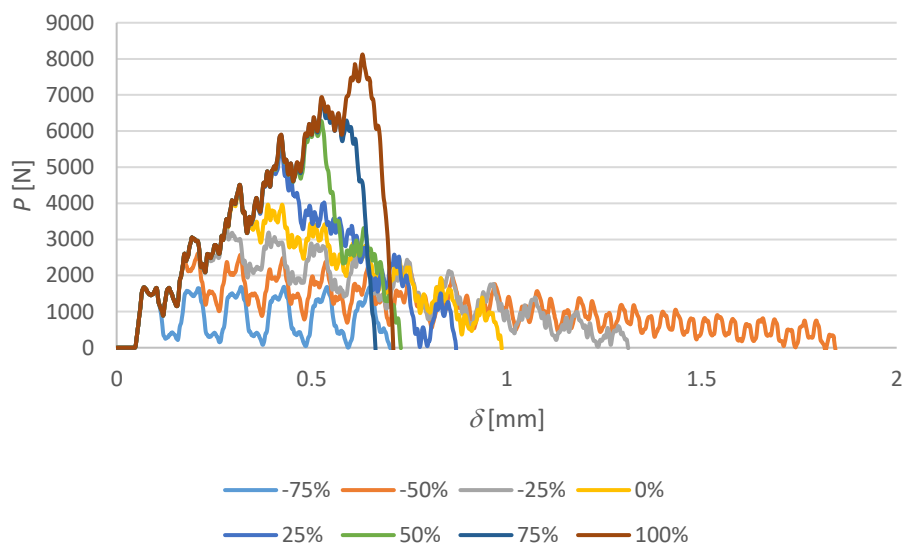


Figura 108 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=25\text{ mm}$

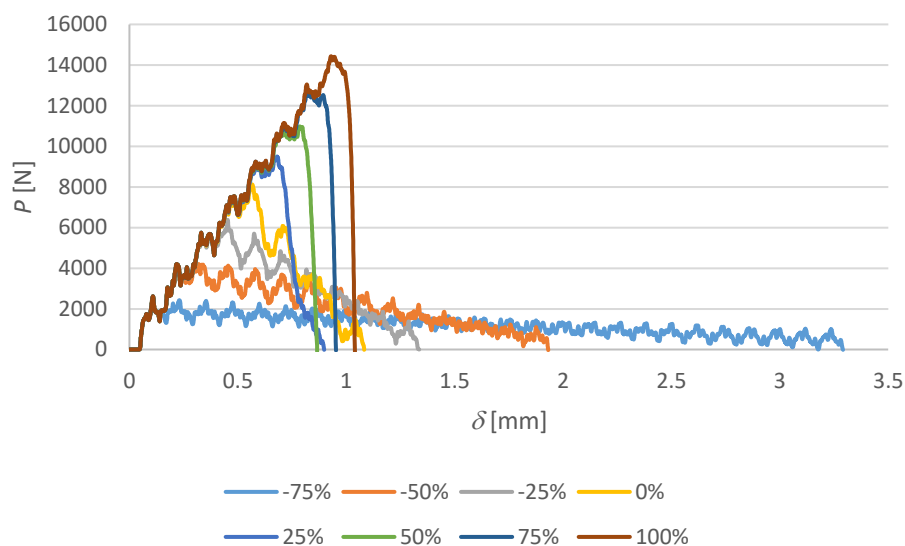


Figura 109 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=50$ mm

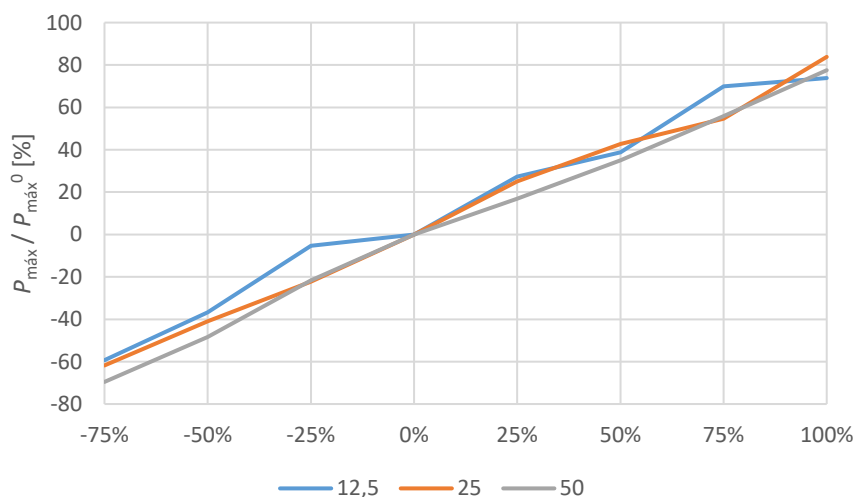


Figura 110 - Variação percentual de $P_{\text{máx}}/P_{\text{máx}}^0$ com variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo Sikaforce® 7752

3.2.5.3.4 Tenacidades à fratura

Para o estudo do efeito das tenacidades no comportamento e resistência de JSD solicitadas ao impacto, variou-se a tenacidade coesiva à tração (G_{Ic}) e a tenacidade coesiva ao corte (G_{IIc}), com os mesmos L_0 estudados anteriormente. Como já explicado, G_{Ic} e G_{IIc} representam a área abaixo da lei coesiva respetiva, pelo que se podem definir os deslocamentos máximos relativos à tração (δ_n^f) e ao corte (δ_s^f). Na Figura 111, Figura 112 e Figura 113 apresentam as curvas P - δ correspondentes às variações de G_{Ic} e G_{IIc} para o adesivo AV138. Para diferentes estudos, pode-se comprovar que, para qualquer variação, o adesivo apresenta sempre o mesmo comportamento.

Na Tabela 17 apresenta-se $P_{\text{máx}}$ e variação percentual de $P_{\text{máx}} / P_{\text{máx}}^0$ correspondente à alteração de G_{Ic} e G_{IIc} , para o adesivo AV138. Como se pode verificar, a variação de G_{Ic} e G_{IIc} , simultaneamente e individualmente, não apresenta qualquer alteração do comportamento da junta. A variação representada apenas está relacionada com o aumento de L_0 .

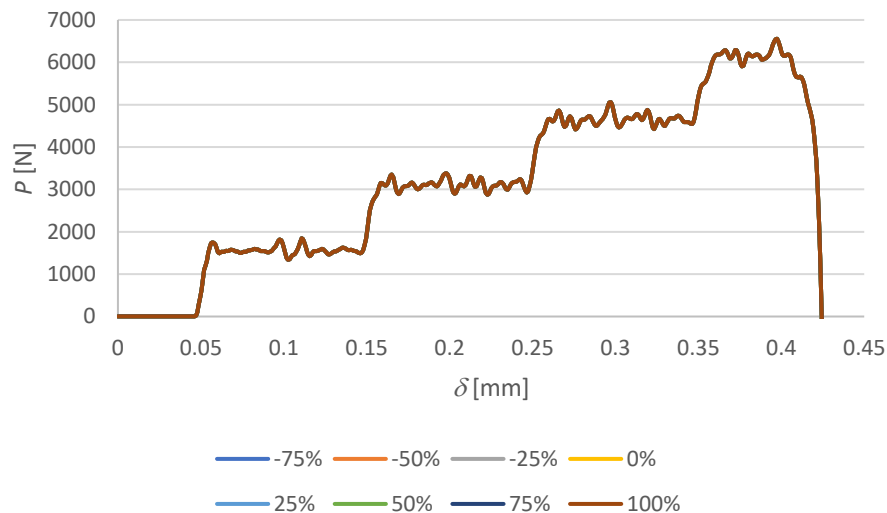


Figura 111 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=12,5$ mm

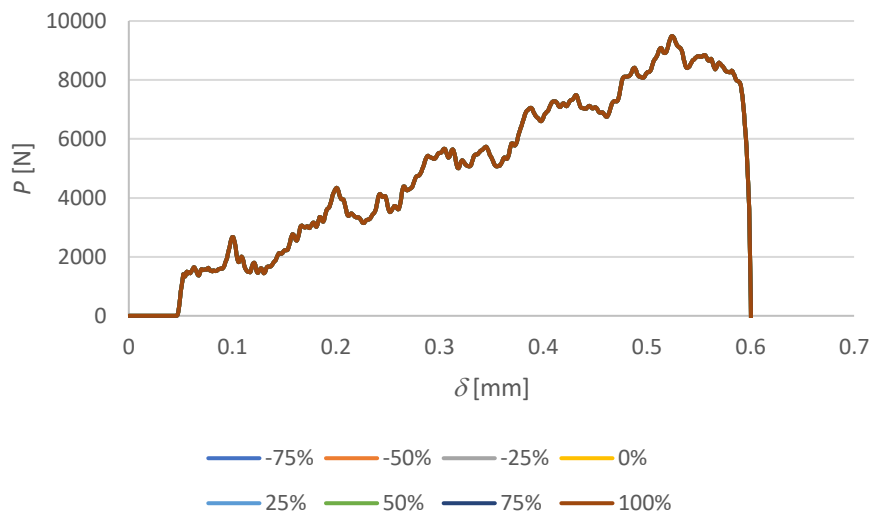


Figura 112 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=25$ mm

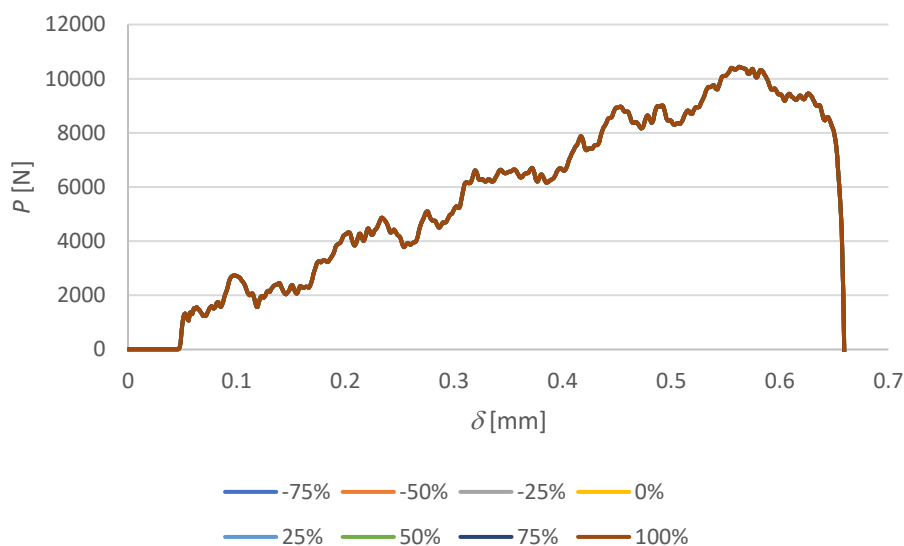


Figura 113 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=50$ mm

Tabela 17 - $P_{m\acute{a}x}$ e variação percentual de $P_{m\acute{a}x} / P_{m\acute{a}x}^0$ correspondentes a variações G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100% com adesivo AV138

L_0 [mm]	$P_{m\acute{a}x}$ [N]			$P_{m\acute{a}x} / P_{m\acute{a}x}^0$ [%]
	-75%	0%	100%	
12,5	6555,89	6555,89	6555,89	0
25	9491,98	9491,98	9491,98	44,8
50	10439,96	10439,96	10439,96	59,2

Na Figura 114, Figura 115 e Figura 116 apresentam-se as curvas P - δ correspondentes às variações de $P_{m\acute{a}x}$ com G_{Ic} e G_{IIc} . Pode-se comprovar, tal como acontece no adesivo AV138, que para qualquer variação, o adesivo apresenta sempre o mesmo comportamento. Assim, analisando as figuras, verifica-se que as curvas estão sobrepostas.

Na Tabela 18 apresenta-se $P_{m\acute{a}x}$ e variação percentual de $P_{m\acute{a}x} / P_{m\acute{a}x}^0$ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} com adesivo Sikaforce® 7752. Conforme o demonstrado para o adesivo AV138 e como se pode verificar, a variação simultânea e individual de G_{Ic} e G_{IIc} , não apresenta qualquer alteração do comportamento da junta. A variação representada apenas está relacionada com o aumento de L_0 .

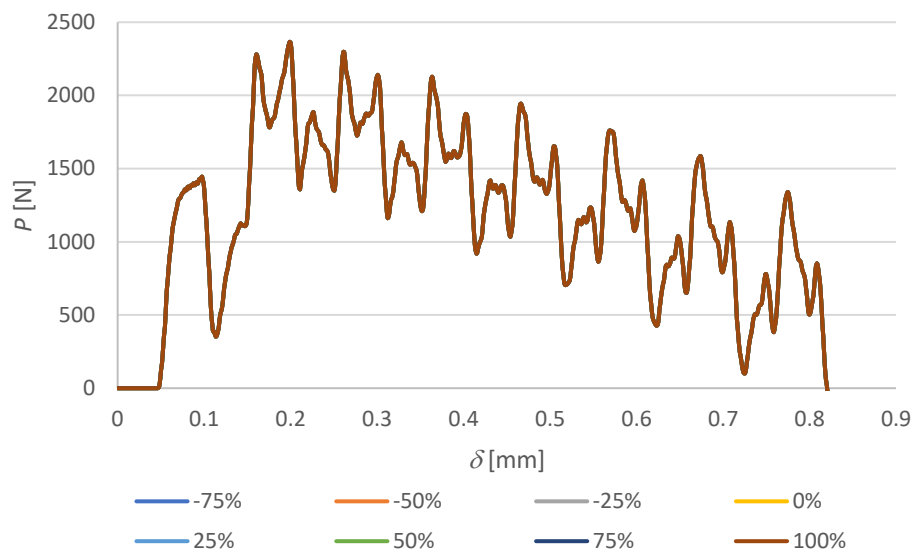


Figura 114 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{lc} e G_{llc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=12,5$ mm

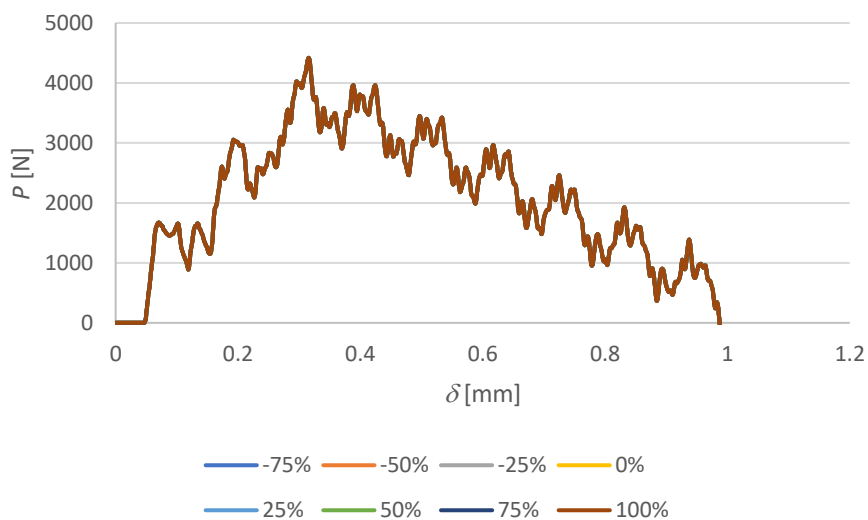


Figura 115 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{lc} e G_{llc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=25$ mm

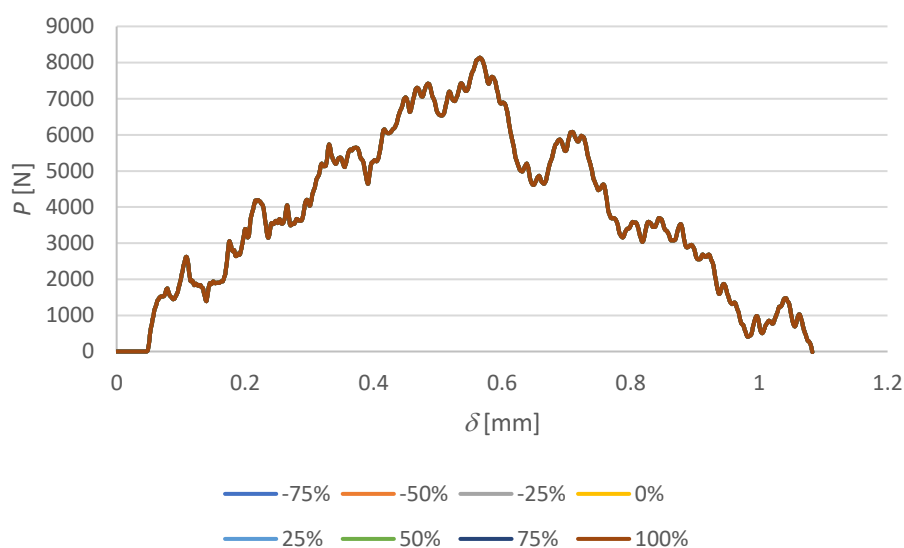


Figura 116 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{IC} e G_{IIC} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=50$ mm

Tabela 18 - $P_{m\acute{a}x}$ e variação percentual de $P_{m\acute{a}x} / P_{m\acute{a}x}^0$ correspondentes a variações G_{IC} e G_{IIC} entre -75% a +100% com adesivo Sikaforce® 7752

L_0 [mm]	$P_{m\acute{a}x}$ [N]			$P_{m\acute{a}x} / P_{m\acute{a}x}^0$ [%]
	-75%	0%	100%	
12,5	2366,23	2366,23	2366,23	0
25	4419,36	4419,36	4419,36	86,8
50	8135,95	8135,95	8135,95	243,8

Em função dos resultados obtidos, refere-se que, em trabalhos anteriores, também não foram encontradas diferenças estatísticas entre o G_{IC} e o G_{IIC} [45]. Como tal, estas propriedades foram mantidas constantes para as condições de impacto. De facto, embora os adesivos sejam governados por comportamentos viscoelásticos e viscoplásticos, pelo que se poderia esperar um aumento de G_{IC} e G_{IIC} com o aumento da taxa de deformação, essa variação geralmente não é tão representativa quando se trata de adesivos como os utilizados neste trabalho. Por exemplo, foram testadas resinas epóxicas frágeis nos modos I e II por Machado et al. [65, 66] e foi encontrada uma pequena redução de G_{IC} e G_{IIC} , inferior a 20%, para velocidades de ensaio entre 1 mm/min e 3 m/s, o que é quase o dobro da gama utilizada no presente trabalho. Num trabalho diferente, de Valente et al. [1], considerou-se que adesivos frágeis e moderadamente dúcteis não apresentavam dependência de G_{IC} e G_{IIC} com a taxa de

deformação, o que levou a uma boa representação numérica (por MDC) do comportamento experimental das JSS.

3.2.5.3.5 Combinação dos vários parâmetros

Este subcapítulo tem como objetivo estudar a variação dos vários parâmetros coesivos estudados em simultâneo. Sendo assim, fez-se variar E , G , t_n^0 e t_s^0 . Conforme explicado anteriormente, G_{IC} e G_{IIC} não têm influência nestes adesivos, daí não os incluir nesta análise.

Na Figura 117, Figura 118 e Figura 119 apresentam-se as curvas P - δ correspondentes a variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 para o adesivo AV138. Analisando as curvas, a variação de todos os parâmetros resulta do somatório da variação individual de cada um. Como seria de esperar, com o aumento de L_0 , tanto $P_{máx}$ como $\delta_{máx}$ também aumentam.

A Figura 120 apresenta a variação percentual de $P_{máx}/P_{máx}^0$ com variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 para o adesivo AV138. Como se pode verificar, os parâmetros estudados têm bastante influência neste adesivo. Para uma variação de -75%, este apresenta uma redução na ordem dos 50% de $P_{máx}^0$, assim como com um aumento de 100% da variação de todos os parâmetros conduz a um aumento de $P_{máx}/P_{máx}^0$ em média de 60% de $P_{máx}^0$. Comparando com a variação individual de cada parâmetro, conclui-se que t_n^0 e t_s^0 têm mais influência na junta do que E e G . Para a variação de -75% somente de E e G a junta apresenta uma variação de $P_{máx}$, aproximadamente de 75% (Figura 73). Quando a variação dos quatro parâmetros é igualmente -75%, a junta apresenta uma variação de $P_{máx}$, aproximadamente de -25%.

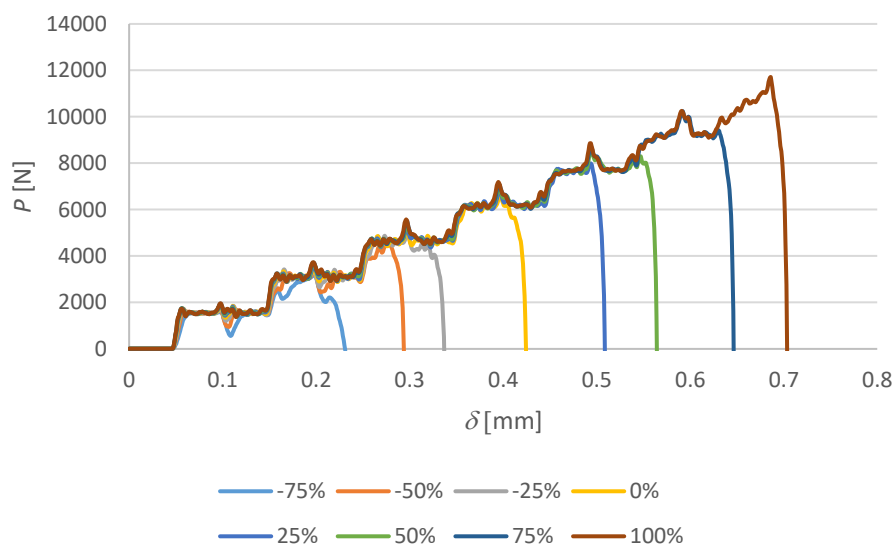


Figura 117 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=12,5$ mm

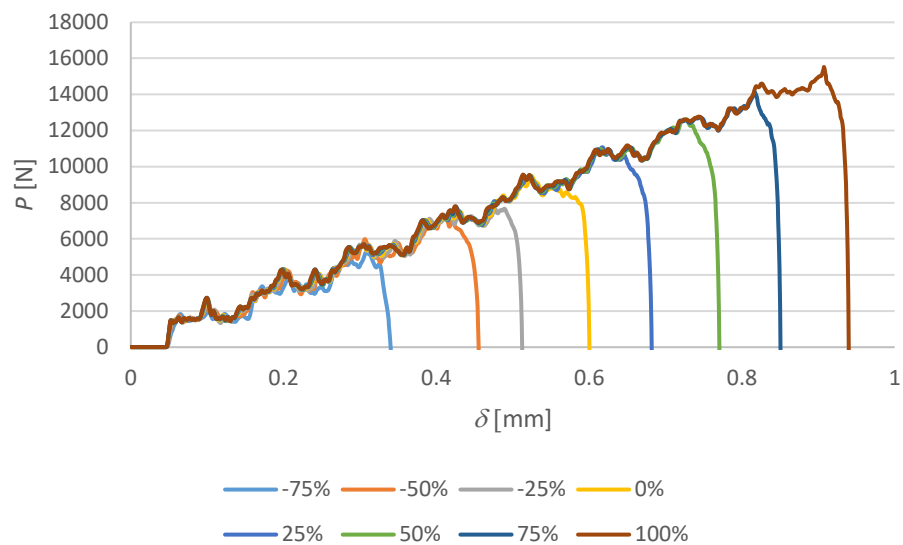


Figura 118 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=25$ mm

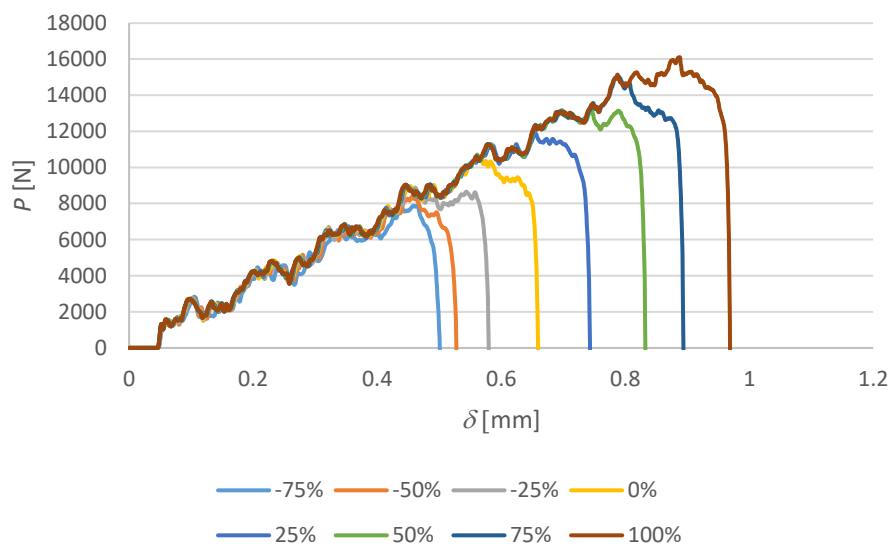


Figura 119 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138 e com $L_0=50$ mm

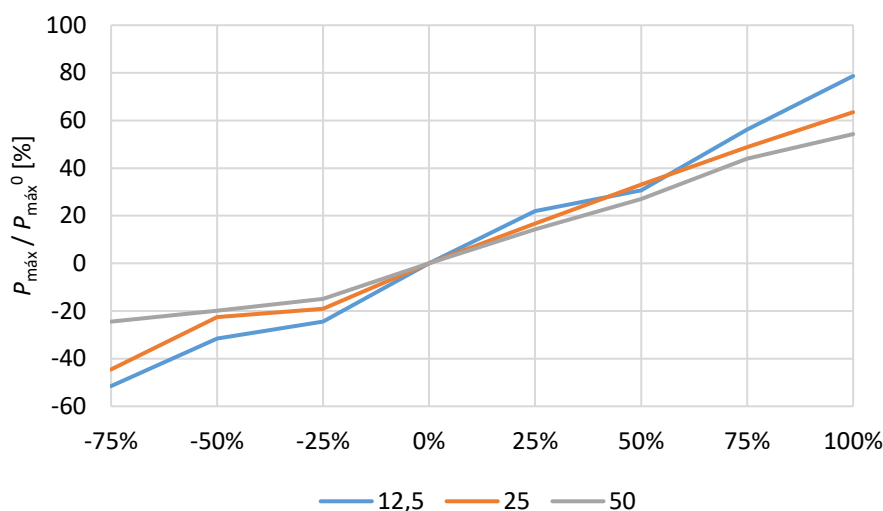


Figura 120 - Variação percentual de $P_{máx}/P_{máx}^0$ com variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 e com adesivo AV138

Na Figura 121, Figura 122 e Figura 123 apresenta-se as curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 para o adesivo Sikaforce® 7752. Como se verifica neste caso, e pelas mesmas razões explícitas para o adesivo AV138, as curvas representadas são o somatório da variação individual de cada parâmetro.

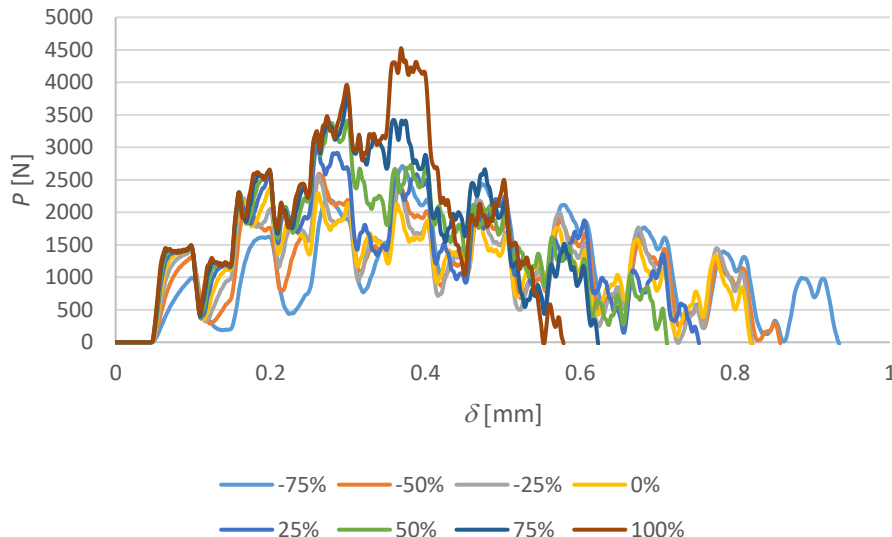


Figura 121 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=12,5$ mm

Na Figura 124 apresentam-se a variação percentual de $P_{máx}/P_{máx}^0$ com variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 para adesivo Sikaforce® 7752. Pode-se concluir que a variação destes parâmetros, quer individualmente quer simultaneamente, tem grande influência para o desempenho da junta. Com uma variação de -75% de todos os parâmetros, este adesivo

apresenta um $P_{\text{máx}}$ aproximadamente de -65%. Por outro lado, uma variação de 100% de todos os parâmetros leva este adesivo apresentar um $P_{\text{máx}}$ de 80% aproximadamente. Comparando a variação dos parâmetros simultaneamente e individualmente, verifica-se que as curvas da Figura 124 apresentam uma tendência bastante idêntica às curvas com variação apenas de t_s^0 (Figura 106). Assim, conclui-se que t_s^0 tem mais influência na junta que os restantes parâmetros. Para ambas as situações, com L_0 superiores, para uma variação de -75% apresentam uma variação de $P_{\text{máx}}$, aproximadamente, de -70%. Para $L_0=12,5$ mm e para uma variação de 100%, verifica-se que com a variação simultânea de todos os parâmetros, a variação de $P_{\text{máx}}$ aumenta de 75% para 90%.

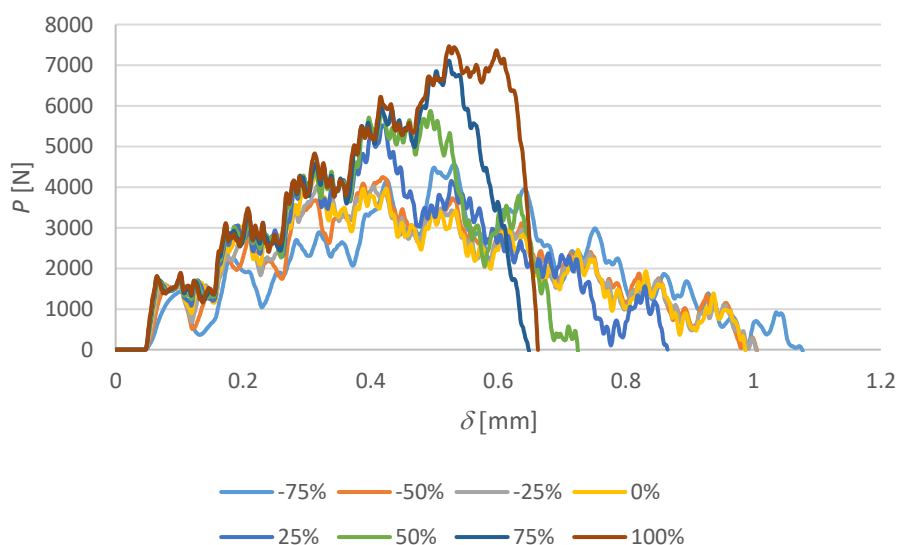


Figura 122 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=25$ mm

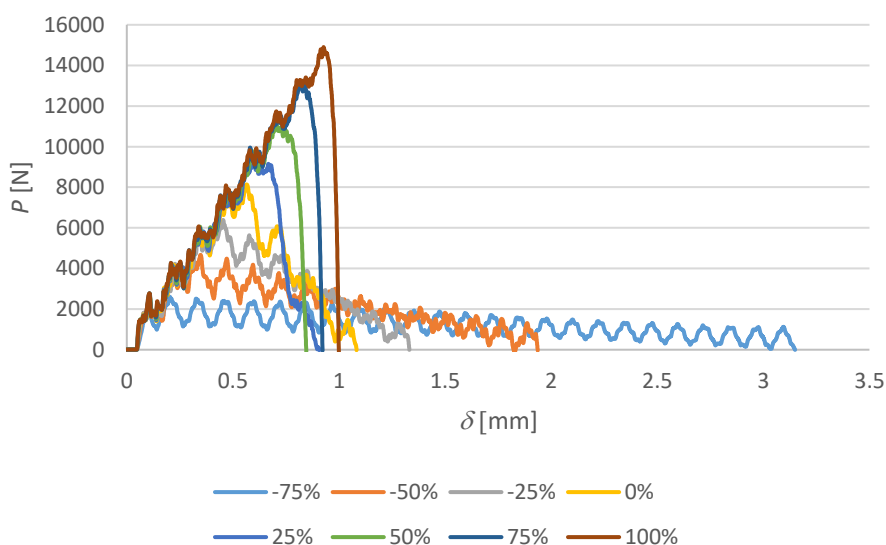


Figura 123 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=50$ mm

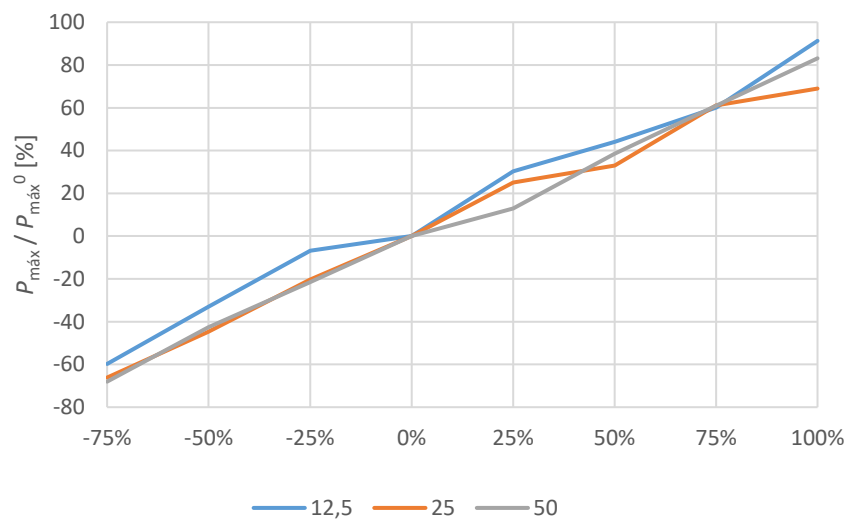


Figura 124 - Variação percentual de $P_{máx}/P_{máx}^0$ com variações de E , G , t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo Sikaforce® 7752

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Propostas de trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo o estudo da influência dos parâmetros coesivos da lei triangular de tração-separação usada para prever o comportamento de juntas de sobreposição dupla sujeitas ao impacto. Inicialmente foi realizado um estudo de validação das propriedades em JSS, o que se conclui que com o aumento de L_0 se traduz num aumento de resistência das juntas ao impacto. No entanto com o aumento de L_0 , o desempenho da junta piora, uma vez que aumenta bastante a concentração de tensões. Os vários modelos estudados foram inseridos em modelos numérico, simulando as suas propriedades de adesivo.

No âmbito do estudo numérico realizado após a validação do MDC, a rigidez coesiva apresenta uma influência distinta em ambos os adesivos, o que é de esperar, uma vez que é uma das principais diferenças entre eles. Em termos de resistência das juntas, a rigidez apresenta uma influência muito baixa em ambos os adesivos. Para o adesivo Sikaforce® 7752, com o aumento da variação da rigidez, verifica-se um aumento de $P_{máx}$, aproximadamente de 8%. Pelo contrário, para o adesivo AV138, com o aumento da variação de E e G , verifica-se uma diminuição de $P_{máx}$, sendo que para $L_0 = 25$ mm e $L_0 = 50$ mm a variação de $P_{máx}$ atinge os -20%.

Também foi estudado o efeito do desacoplamento do modelo coesivo nos modos puros de tração, de tal forma que estes são tratados de forma independente. Observou-se que, ao contrário do modo-misto, o modo desacoplado separa na fase de amaciamento o corte da tração. Comparando os deslocamentos máximos entre os modos, estes são menores no modo desacoplado para o adesivo Sikaforce® 7752 (cerca de 35%). Para o adesivo AV138, os deslocamentos máximos no modo-misto são cerca 90% dos atingidos em modo desacoplado. Relativamente à resistência verifica-se que, para ambos os adesivos, o modo desacoplado apresenta influência em relação ao modo-misto. Para o adesivo AV138, para comprimentos de sobreposição mais elevados, este parâmetro apresenta menos influência, uma vez que para $L_0 = 25$ mm verificou-se uma variação de $P_{máx}$ de 10% e para $L_0 = 50$ mm verificou-se uma variação de $P_{máx}$ de 10,6%. Concluindo, o modelo desacoplado não apresenta diferenças no adesivo AV138 com o aumento do L_0 . Pelo contrário, para o adesivo Sikaforce® 7752, no modelo desacoplado, verifica-se a diminuição de $P_{máx}$ com o aumento de L_0 .

Como é esperado, as resistências coesivas são as que mais influenciam a resistência da junta. A t_s^0 apresenta uma influência bastante superior que a resistência coesiva à tração

em ambos os adesivos, uma vez que o corte é o principal esforço a que este tipo de juntas estão sujeitas quando submetidas ao impacto. Quando ambas as resistências coesivas são variadas, é natural que os resultados sejam idênticos quando se varia apenas a resistência coesiva ao corte, dado que a resistência coesiva à tração apresenta baixa influência. No adesivo AV138 verifica-se que a influência da t_n^0 é praticamente nula, uma vez que não se constatou nenhuma variação a nível de deslocamentos e de cargas máximas. Para o adesivo Sikaforce® 7752, a diminuição de ambas resistências coesivas pode provocar a rotura prematura do adesivo. Sendo este adesivo do tipo dúctil, apresenta incrementos consideráveis de deslocamentos máximos quando se diminui a resistência coesiva ao corte. Quanto à resistência coesiva à tração, a sua influência é menor, no que diz respeito aos deslocamentos.

Relativamente às tenacidades, pode-se verificar que a sua variação não influencia ambas as juntas. Para as velocidades de ensaio utilizadas, não foram encontradas variações, tanto de deslocamentos máximos como cargas máximas. Embora os adesivos utilizados sejam governados por comportamentos viscoelásticos e viscoplásticos, um aumento das tenacidades seria esperado com o aumento da taxa de deformação, o que não acontece.

4.2 Propostas de trabalhos futuros

Como propostas de trabalhos futuros, sugere-se a comparação de diferentes leis coesivas na resistência ao impacto, tais como, trapezoidal, exponencial, entre outras. Para a compreensão dos efeitos dinâmicos durante o ensaio ao impacto, sugere-se o estudo numérico da propagação da tensão.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] Valente, J. P. A., Campilho, R. D. S. G., Marques, E. A. S., Machado, J. J. M., e da Silva, L. F. M., "Adhesive joint analysis under tensile impact loads by cohesive zone modelling," *Composite Structures*, vol. 222, p. 110894, 2019.
- [2] Edward, P., *Handbook of adhesives and Sealants*. Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill, 2000.
- [3] Adams, R., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. Amsterdão, Holanda: Elsevier, 2005.
- [4] Da Silva, L. F., Öchsner, A., e Adams, R. D., *Handbook of adhesion technology*. Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media, 2011.
- [5] Pinto, A. M. G., "Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos," Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2007.
- [6] Objois, A., Fargette, B., e Gilibert, Y., "The influence of the bevel angle on the micro-mechanical behaviour of bonded scarf joints," vol. 14, no. 8, pp. 1057-1070, 2000.
- [7] da Silva, L. F. M., de Magalhaes, A. G., e de Moura, M. F. S., *Juntas adesivas estruturais*. Porto, Portugal: Pubblindústria 2007.
- [8] Hamerton, I. e Kratz, J., "Chapter 9 - The use of thermosets in modern aerospace applications," in *Thermosets (Second Edition)*, Q. Guo, Ed. Bristol, Inglaterra: Elsevier, 2018, pp. 303-340.
- [9] Wilson, A., "9 - Developments in nonwovens for automotive textiles," in *Advances in Technical Nonwovens*, G. Kellie, Ed. Normanton, Inglaterra: Woodhead Publishing, 2016, pp. 257-271.
- [10] Kihara, K., Isono, H., Yamabe, H., e Sugibayashi, T., "A study and evaluation of the shear strength of adhesive layers subjected to impact loads," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 23, no. 4, pp. 253-259, 2003.
- [11] Pomykala, M. (2020, acedido em janeiro de 2021). *Electric vehicles and the growing significance of adhesives and sealants for battery assembly*. ASI, Adhesives & Sealants Industry. Disponível em: <https://www.adhesivesmag.com/articles/97601-electric-vehicles-and-the-growing-significance-of-adhesives-and-sealants-for-battery-assembly>
- [12] CIERRA™. (2020, acedido em janeiro de 2021). *Growing Demand for Polyurethane Adhesives in Electrical Vehicles*. Disponível em: <https://www.cierra.com/news&events/innovation/14>
- [13] Da Silva, L. F., Dillard, D. A., Blackman, B., e Adams, R. D., *Testing adhesive joints: best practices*. Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons, 2012.
- [14] Seong, M.-S., Kim, T.-H., Nguyen, K.-H., Kweon, J.-H., e Choi, J.-H., "A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum," *Composite structures*, vol. 86, no. 1-3, pp. 135-145, 2008.

- [15] Pocius, A. V. e Dillard, D. A., *Adhesion science and engineering: surfaces, chemistry and applications*. Amsterdão, Holanda: Elsevier, 2002.
- [16] Rachellowe. (2018, acedido em janeiro de 2021). *Peel adhesion test*. Impact Solutions. Disponível em: <https://www.impact-solutions.co.uk/peel-adhesion-test/>
- [17] Adams, R., "The pendulum impact test for adhesives and adhesive joints," in *Testing adhesive joints-best practices*, L. da Silva, D. Dillard, B. Blackman, and R. Adams, Eds. Weinheim, Alemanha: Wiley-VCH, 2012, pp. 280-283.
- [18] Volkersen, O., "Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten," *Luftfahrtforschung*, vol. 15, pp. 41-47, 1938.
- [19] Harris, J. e Adams, R., "Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 4, no. 2, pp. 65-78, 1984.
- [20] Williams, M., "The stresses around a fault or crack in dissimilar media," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 49, no. 2, pp. 199-204, 1959.
- [21] Fernlund, G. e Spelt, J. K., "Mixed-mode fracture characterization of adhesive joints," *Composites Science and Technology*, vol. 50, no. 4, pp. 441-449, 1994/01/01/ 1994.
- [22] Griffith, A. A., "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 221, no. 582-593, pp. 163-198, 1921-01-01 00:00:00 1921.
- [23] Daudeville, L. e Ladevèze, P., "A damage mechanics tool for laminate delamination," vol. 25, no. 1-4, pp. 547-555, 1993.
- [24] Khoramishad, H., Crocombe, A., Katnam, K., e Ashcroft, I., "Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model," vol. 32, no. 7, pp. 1146-1158, 2010.
- [25] Voyiadjis, G. Z. e Kattan, P. I., *A Comparative Study of Damage Variables in Continuum Damage Mechanics*. Arizona, EUA: CRC Press, 2005.
- [26] Shenoy, V., Ashcroft, I. A., Critchlow, G. W., e Crocombe, A., "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, 2010.
- [27] Mohammadi, S., *Extended finite element method: for fracture analysis of structures*. John Wiley & Sons, 2008.
- [28] Moës, N., Dolbow, J., e Belytschko, T., "A finite element method for crack growth without remeshing," vol. 46, no. 1, pp. 131-150, 1999.
- [29] Sato, C. e Ikegami, K., "Dynamic deformation of lap joints and scarf joints under impact loads," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 20, no. 1, pp. 17-25, 2000/02/01 2000.
- [30] Khan, A. S., Lopez-Pamies, O., e Kazmi, R., "Thermo-mechanical large deformation response and constitutive modeling of viscoelastic polymers over a wide range of strain rates and temperatures," *International Journal of Plasticity*, vol. 22, no. 4, pp. 581-601, 2006.
- [31] Cowper, G. R. e Symonds, P. S., "Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams," Brown Univ Providence R. I. 1957.

- [32] Goglio, L., Peroni, L., Peroni, M., e Rossetto, M., "High strain-rate compression and tension behaviour of an epoxy bi-component adhesive," *International journal of adhesion & adhesives*, vol. 28, no. 7, pp. 329-339, 2008.
- [33] Johnson, G. R. e Cook, W. H., "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures," in *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, 1983, vol. 21, no. 1, pp. 541-547: The Netherlands.
- [34] Machado, J., Marques, E., e da Silva, L. F., "Adhesives and adhesive joints under impact loadings: An overview," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 94, no. 6, pp. 421-452, 2018.
- [35] Carlberger, T. e Stigh, U., "An explicit FE-model of impact fracture in an adhesive joint," vol. 74, no. 14, pp. 2247-2262, 2007.
- [36] Yokoyama, T. e Shimizu, H., "Evaluation of impact shear strength of adhesive joints with the split Hopkinson bar," vol. 41, no. 4, pp. 503-509, 1998.
- [37] Al-Zubaidy, H., Zhao, X., e Al-Mahaidi, R., "Effect of impact tensile load on strength of CFRP bonded steel plate joints," vol. 14, pp. 1312-1317, 2011.
- [38] Kemiklioglu, U., Sayman, O., Batar, T., Soykok, I., Akderya, T., e Akan, E. J. A. A. S., "Strength comparison of ductile and brittle adhesives under single and repeated impacts," vol. 3, no. 1, pp. 1-9, 2015.
- [39] Harris, J. e Adams, R., "An assessment of the impact performance of bonded joints for use in high energy absorbing structures," vol. 199, no. 2, pp. 121-131, 1985.
- [40] Goglio, L. e Rossetto, M., "Impact rupture of structural adhesive joints under different stress combinations," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, no. 7, pp. 635-643, 2008.
- [41] Soltannia, B., Ahmadi-Moghadam, B., e Taheri, F., "Influence of tensile impact and strain rate on the response of adhesively bonded single lap joints," in *Proceedings ICCM International Conferences on Composite Materials*, 2013.
- [42] Adams, R. e Harris, J., "A critical assessment of the block impact test for measuring the impact strength of adhesive bonds," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 16, no. 2, pp. 61-71, 1996.
- [43] Liao, L., Kobayashi, T., Sawa, T., e Goda, Y., "3-D FEM stress analysis and strength evaluation of single-lap adhesive joints subjected to impact tensile loads," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 31, no. 7, pp. 612-619, 2011.
- [44] Hazimeh, R., Challita, G., Khalil, K., e Othman, R., "Finite element analysis of adhesively bonded composite joints subjected to impact loadings," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 56, pp. 24-31, 2015.
- [45] Peres, L. M. C., Arnaud, M. F. T. D., Silva, A. F. M. V., Campilho, R. D. S. G., Machado, J. J. M., Marques, E. A. S., dos Reis, M. Q., e da Silva, L. F. M., "Geometry and adhesive optimization of single-lap adhesive joints under impact," *The Journal of Adhesion*, p. In Press, 2021.
- [46] Araújo, H. A. M., Machado, J. J. M., Marques, E. A. S., e da Silva, L. F. M., "Dynamic behaviour of composite adhesive joints for the automotive industry," *Composite Structures*, vol. 171, pp. 549-561, 2017/07/01/ 2017.
- [47] Campilho, R. D. S. G., Banea, M. D., Neto, J. A. B. P., e da Silva, L. F. M., "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, 2013/07/01/ 2013.
- [48] Valente, J. P. A., Campilho, R. D. S. G., Marques, E. A. S., Machado, J. J. M., e da Silva, L. F. M., "Geometrical optimization of adhesive joints under tensile impact loads using cohesive zone modelling," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 97, p. 102492, 2020/03/01/ 2020.
- [49] Neto, J. A. B. P., Campilho, R. D. S. G., e da Silva, L. F. M., "Parametric study of adhesive joints with composites," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 37, pp. 96-101, 2012/09/01/ 2012.
- [50] Faneco, T. M. d. S., "Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade," 2014.
- [51] Pinto, A. M. G., Magalhães, A., Campilho, R. D. S. G., De Moura, M., e Baptista, A., "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.
- [52] Alfano, G. e Crisfield, M. A., "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.
- [53] Allix, O. e Corigliano, A., "Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens," *International Journal of Fracture*, vol. 77, no. 2, pp. 111-140, 1996.
- [54] Chandra, N., Li, H., Shet, C., e Ghonem, H., "Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces," *International Journal of Solids Structures*, vol. 39, no. 10, pp. 2827-2855, 2002.
- [55] Chen, J., "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.
- [56] Kafkalidis, M. e Thouless, M., "The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints," *International Journal of Solids Structures*, vol. 39, no. 17, pp. 4367-4383, 2002.
- [57] Liljedahl, C. D. M., Crocombe, A. D., Wahab, M. A., e Ashcroft, I. A., "Damage modelling of adhesively bonded joints," *International journal of fracture*, vol. 141, no. 1-2, pp. 147-161, 2006.
- [58] Campilho, R. D. S. G., Banea, M. D., Pinto, A. M. G., da Silva, L. F. M., e de Jesus, A. M. P., "Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 31, no. 5, pp. 363-372, 2011/07/01/ 2011.
- [59] Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F., e Domingues, J. J. M. S., "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, 2008/03/01/ 2008.
- [60] Campilho, R. D. S. G., De Moura, M. F. S. F., e Domingues, J. J. M. S., "Modelling single and double-lap repairs on composite materials," *Composites Science Technology*, vol. 65, no. 13, pp. 1948-1958, 2005.
- [61] Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F., e Domingues, J. J. M. S., "Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 29, no. 2, pp. 195-205, 2009/03/01/ 2009.

- [62] Nunes, S., Campilho, R., Da Silva, F., De Sousa, C., Fernandes, T., Banea, M., e Da Silva, L., "Comparative failure assessment of single and double lap joints with varying adhesive systems," *The Journal of Adhesion*, vol. 92, no. 7-9, pp. 610-634, 2016.
- [63] Carvalho, U. T. F. e Campilho, R. D. S. G., "Validation of pure tensile and shear cohesive laws obtained by the direct method with single-lap joints," *International Journal of Adhesion Adhesives*, vol. 77, pp. 41-50, 2017.
- [64] Campilho, R. D. S. G., Moura, D. C., Banea, M. D., e da Silva, L. F. M., "Adhesive thickness effects of a ductile adhesive by optical measurement techniques," *International Journal of Adhesion Adhesives*, vol. 57, pp. 125-132, 2015.
- [65] Machado, J. J. M., Marques, E. A. S., Campilho, R., e da Silva, L. F. M., "Mode I fracture toughness of CFRP as a function of temperature and strain rate," *Journal of Composite Materials*, vol. 51, no. 23, pp. 3315-3326, 2017/09/01 2016.
- [66] Machado, J. J. M., Marques, E. A. S., Campilho, R. D. S. G., e da Silva, L. F. M., "Mode II fracture toughness of CFRP as a function of temperature and strain rate," *Composites Part B: Engineering*, vol. 114, pp. 311-318, 2017/04/01/ 2017.