



INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS COESIVOS EM JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES SOLICITADAS AO IMPACTO

DUARTE MIGUEL DE SOUSA RIBEIRO BATALHA MACHADO

outubro de 2018

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS COESIVOS EM JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES SOLICITADAS AO IMPACTO

Duarte Miguel de Sousa Ribeiro Batalha Machado

1131284

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS COESIVOS EM JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES SOLICITADAS AO IMPACTO

Duarte Miguel de Sousa Ribeiro Batalha Machado

1131284

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.

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

A definir

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

A definir

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Doutor Raúl Duarte Salgueiral Gomes Campilho por ter orientado esta dissertação, pela sapiência, disponibilidade e incentivo.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, a todos os docentes de Mestrado e Licenciatura pelos conhecimentos transmitidos que solidificaram bases importantes para o futuro.

À minha família, principalmente aos meus Pais e irmão, e namorada pelo carinho, incentivo e apoio incondicional.

A todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente para o sucesso deste trabalho, nomeadamente os meus colegas e amigos.

PALAVRAS CHAVE

Método de Elementos Finitos; Impacto; Modelos de dano coesivo; Junta de sobreposição simples.

RESUMO

As ligações adesivas são, cada vez mais, uma alternativa utilizada em aplicações de engenharia. De facto, estas ligações apresentam várias vantagens em relação a outros métodos de ligação mais convencionais. A melhor distribuição de tensões, o baixo peso, a possibilidade de unir materiais dissimilares, o fácil atravancamento e a resistência à corrosão são algumas das características das ligações adesivas que as tornam tão úteis. A possibilidade de automatização e o custo não muito elevado tornam-nas viáveis. Apesar de bem conhecidas as propriedades dos adesivos, as juntas adesivas são influenciadas por vários outros parâmetros. Em função das muitas variáveis existentes, os comportamentos de juntas adesivas variam muito e são por vezes imprevisíveis. A crescente utilização deste tipo de ligação torna necessária a existência de ferramentas que auxiliem o seu projeto. O Método de Elementos Finitos, combinado com critérios ou modelos de dano, tem-se revelado eficaz na simulação e previsão do comportamento de juntas adesivas, possibilitando a redução de tempo de projeto e dos custos. Entre os critérios ou modelos de dano associados ao Método de Elementos Finitos, os modelos de dano coesivo revelam bastante eficácia, combinando parâmetros de resistência e tenacidade para prever o desempenho de juntas adesivas.

O principal objetivo desta dissertação é o estudo da influência dos parâmetros coesivos na previsão do comportamento e da resistência de juntas de sobreposição simples solicitadas ao impacto. A influência dos parâmetros coesivos foi estudada fazendo variar cada um destes parâmetros mantendo os restantes inalterados. Este estudo conta com os adesivos Araldite® AV138 (elevada rigidez) e Nagase Chemtex® XNR6852 E-2 (elevada tenacidade), para tentar compreender esta influência utilizando adesivos com diferentes propriedades. Os parâmetros coesivos estudados apresentam uma notória influência no comportamento dos adesivos e, conseqüentemente, na previsão de resistência de juntas adesivas.

KEYWORDS

Finite Element Method; Impact; Cohesive Zone Models; Single-lap Joint.

ABSTRACT

Adhesive bonds are increasingly becoming an alternative to engineering applications. In fact, these bonds have several advantages over more conventional joining methods. The improved stress distribution, low weight, the ability to bond dissimilar materials and the resistance to corrosion are some of the characteristics of the adhesive bonds that make them so useful. The possibility of automation and the moderate cost make them viable. Although the properties of the adhesives are well known, adhesive joints are influenced by several other parameters. Due to many variables, the behaviour of adhesive joints widely varies and sometimes it is unpredictable. The increasing use of this type of joining requires suitable tools to support the design process. The Finite Element Method, combined with damage criteria, has proven to be an effective way to simulate and predict the behaviour of adhesive joints, making it possible to reduce design time and costs. Among the damage criteria or models associated with the Finite Element Method, cohesive zone models (CZM) are highly effective, combining strength and toughness parameters to predict the performance of adhesive joints. The main purpose of this work is to study the influence of the cohesive parameters in predicting the behaviour and strength of single-lap joints subjected to impact loads. The influence of the cohesive parameters was studied by varying each of these parameters while keeping the remaining ones. Araldite® AV138 (high stiffness) and Nagase Chemtex® XNR6852 E-2 (high toughness) are the chosen adhesives in order to try to understand this influence using adhesives with different properties. The cohesive parameters studied have a significant influence on the behaviour of the adhesives and, consequently, on the strength prediction of adhesive joints.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
COH2D4	<i>4-node two-dimensional cohesive element</i>
CPE4R	<i>4-node bilinear plane strain quadrilateral, reduced integration, hourglass control</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
LE	<i>Logarithmic strain components</i>
MDC	Modelos de dano coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos eXtendidos
PE	<i>Plastic strain components</i>
PEEQ	<i>Equivalent plastic strain</i>
RF	<i>Reaction forces and moments</i>
S	<i>Stress components and invariants</i>
SDEG	<i>Scalar stiffness degradation</i>

Lista de Símbolos Romanos

E	Módulo de elasticidade longitudinal
E	Energia
g	Aceleração gravítica
G	Módulo de elasticidade transversal
G_C	Taxa crítica de libertação de energia
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
h_0	Altura de queda
L_0	Comprimento de sobreposição
P	Carga aplicada
$P_{máx}$	Carga máxima aplicada
t_n	Tensão coesiva à tração
t_{n0}	Resistência coesiva à tração
t_s	Tensão coesiva ao corte
t_{s0}	Resistência coesiva ao corte

Lista de Símbolos Gregos

δ	Deslocamento
ε_f	Deformação de rotura à tração
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Densidade
σ_f	Tensão de rotura à tração
σ_y	Tensão de cedência à tração

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Junta adesiva com indicação esquemática das interfases e interfaces (adaptado de [5])	8
Figura 2 - Distribuição de tensão em juntas soldadas, rebitadas e coladas [5]	10
Figura 3 - Exemplos de aplicação de juntas adesivas no Airbus A380 [8]	11
Figura 4 - Exemplos de aplicação de adesivos na indústria automóvel [10]	12
Figura 5 - Representação dos tipos de carregamento aplicáveis a juntas adesiva (aderentes a branco e adesivo a preto) [11]	14
Figura 6 - Distribuição da tensão de tração e de compressão [5]	14
Figura 7 - Distribuição da tensão de corte [5]	15
Figura 8 - Distribuição da tensão de clivagem e arrancamento [5]	16
Figura 9 - Distorção causada pela excentricidade das cargas [4]	16
Figura 10 - Influência da rigidez dos substratos na distribuição de tensões ao longo do comprimento de sobreposição [12]	17
Figura 11 - Influência da rigidez do adesivo na distribuição de tensões ao longo do comprimento de sobreposição [13]	17
Figura 12 - Modos de rotura em juntas adesivas [5]	18
Figura 13 - Diferentes modos de propagação de fendas [14]	19
Figura 14 - Configurações mais comuns de juntas adesivas [6]	19
Figura 15 - Possíveis configurações para juntas tubulares [4]	20
Figura 16 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [35]) ..	26
Figura 17 – Modelo coesivo triangular [44, 45]	27
Figura 18 - Lei coesiva triangular para valores de (a) G_{Ic} e (b) G_{IIc} num intervalo de -80% até +100% em relação ao inicial, com incrementos de 20% [49]	28
Figura 19 - Lei coesiva triangular para valores de (a) t_n^0 e (b) t_s^0 num intervalo de -80% até +100% em relação ao inicial, com incrementos de 20% [49]	28
Figura 20 - Percentagem de variação $P_{m\acute{a}x} / P_{m\acute{a}x}^0$ para valores de t_n^0 e t_s^0 , num intervalo de -80% até +100%, com incrementos de 20%	29
Figura 21 - Percentagem de variação $P_{m\acute{a}x} / P_{m\acute{a}x}^0$ para valores de G_{Ic} e G_{IIc} num intervalo de -80% até +100%, com incrementos de 20% [49]	30

Figura 22 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [64].....	32
Figura 23 - Influência da espessura da camada de adesivo na tensão de corte, para substratos de aço [80].....	37
Figura 24 - Influência da espessura da camada de adesivo na tensão de corte, para substratos de alumínio [80].....	37
Figura 25 - Influência da taxa de carregamento na tensão de corte, para substratos de alumínio e aço [80].....	38
Figura 26 - Influência do número de camadas de CFRP e do comprimento de sobreposição na resistência da cobre-junta dupla [81]	39
Figura 27 - Comparação da distribuição de tensões normais na interface entre caso de impacto e estático [83]	40
Figura 28 - Comparação de tensões e deslocamentos entre soluções analíticas de forma fechada (CM) e MEF (FEM) [76]	41
Figura 29 - Efeito da orientação das fibras na tensão de corte média [84].....	42
Figura 30 - Comparação entre resultados numéricos e experimentais e influência do comprimento de sobreposição em condições quase-estáticas [85].....	42
Figura 31 - Exemplo de visualização de resultado SDEG	45
Figura 32 - Atribuição de materiais no modelo de validação	46
Figura 33 - Controlo de malha no modelo de validação.....	46
Figura 34 - Malha do modelo de validação	46
Figura 35 – Condições de fronteira e solicitações aplicadas [1]	47
Figura 36 - Aplicação de velocidade inicial	47
Figura 37 – Lei triangular do modelo de dano coesivo.....	48
Figura 38 - Geometria da JSS de validação [91].....	50
Figura 39 - Sistema de fixação para ensaio ao impacto (adaptado de [99])	54
Figura 40 – Curva $P-\delta$ de validação do adesivo RTV106	55
Figura 41 - Comparação dos resultados obtidos com valores de referência para o adesivo RTV106	56
Figura 42 - Curva $P-\delta$ de validação do adesivo AV138.....	56
Figura 43 - Comparação do resultado obtido com valores de referência para o adesivo AV138	57
Figura 44 - Curva $P-\delta$ de validação do adesivo DP8005.....	58
Figura 45 - Comparação do resultado obtido com valores de referência para o adesivo DP8005	58

Figura 46 - Curva $P-\delta$ de validação do adesivo XNR6852 E-2	59
Figura 47 - Comparação do resultado obtido com valores de referência com o adesivo XNR6852 E-2	59
Figura 48 - Propagação de tensões após impacto com o adesivo AV138	60
Figura 49 – Sentido do efeito <i>bias</i> ao longo da zona de sobreposição	62
Figura 50 – Sentido do efeito <i>bias</i> ao longo de espessura dos aderentes	63
Figura 51 – Sentido do efeito <i>bias</i> ao longo do comprimento do substrato fora da zona de sobreposição	63
Figura 52 - Ilustração da geometria da junta, sem o peso (aderentes a cinzento e adesivo a castanho) ..	63
Figura 53 - Curva $P-\delta$ com adesivo AV138 em função de L_0	66
Figura 54 - Curvas $P-\delta$ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0	67
Figura 55 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=12,5$ mm.....	68
Figura 56 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=25$ mm.....	69
Figura 57 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=37,5$ mm.....	69
Figura 58 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=50$ mm.....	70
Figura 59 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de E e G entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo AV138	70
Figura 60 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=12,5$ mm	71
Figura 61 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=25$ mm	72
Figura 62 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=37,5$ mm	72
Figura 63 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=50$ mm	73
Figura 64 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de E e G entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo XNR6852 E-2	73
Figura 65 - Definição da variável de dano em tração, d_n , no Abaqus® (que pode ser extrapolada para d_s) [102].....	74
Figura 66 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo AV138, $L_0=12,5$ mm	75

Figura 67 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo AV138, $L_0=25$ mm .75	75
Figura 68 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo AV138, $L_0=37,5$ mm	76
Figura 69 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo AV138, $L_0=50$ mm .76	76
Figura 70 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x0}$ correspondentes a modo-misto e desacoplado para os diferentes L_0 , com adesivo AV138	77
Figura 71 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo XNR6852 E-2, $L_0=12,5$ mm.....	77
Figura 72 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo XNR6852 E-2, $L_0=25$ mm.....	78
Figura 73 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo XNR6852 E-2, $L_0=37,5$ mm.....	78
Figura 74 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo XNR6852 E-2, $L_0=50$ mm.....	79
Figura 75 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x0}$ correspondentes a modo-misto e desacoplado para os diferentes L_0 , com adesivo XNR6852 E-2	79
Figura 76 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=12,5$ mm.....	80
Figura 77 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=25$ mm.....	81
Figura 78 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=37,5$ mm.....	81
Figura 79 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=50$ mm.....	82
Figura 80 - 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 , com adesivo AV138	82
Figura 81 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=12,5$ mm.....	83
Figura 82 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=25$ mm.....	83
Figura 83 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=37,5$ mm.....	84
Figura 84 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=50$ mm.....	84

Figura 85 - 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 AV138.....	85
Figura 86 - 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, com $L_0=12,5$ mm.....	85
Figura 87 - 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, com $L_0=25$ mm.....	86
Figura 88 - 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, com $L_0=37,5$ mm.....	86
Figura 89 - 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, com $L_0=50$ mm.....	87
Figura 90 - 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 AV138.....	87
Figura 91 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=12,5$ mm.....	88
Figura 92 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=25$ mm.....	88
Figura 93 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=37,5$ mm.....	89
Figura 94 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=50$ mm.....	89
Figura 95 - 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 , com adesivo XNR6852 E-2.....	90
Figura 96 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=12,5$ mm.....	91
Figura 97 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=25$ mm.....	91
Figura 98 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=37,5$ mm.....	92
Figura 99 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=50$ mm.....	92
Figura 100 - 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 XNR6852 E-2.....	93
Figura 101 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=12,5$ mm.....	93

Figura 102 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=25$ mm.....	94
Figura 103 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=37,5$ mm.....	94
Figura 104 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=50$ mm.....	95
Figura 105 - 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 XNR6852 E-2	95
Figura 106 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=12,5$ mm.....	96
Figura 107 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=25$ mm.....	97
Figura 108 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=37,5$ mm.....	97
Figura 109 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=50$ mm.....	98
Figura 110 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de G_{Ic} entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo AV138	98
Figura 111 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=12,5$ mm.....	99
Figura 112 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=25$ mm.....	99
Figura 113 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=37,5$ mm.....	100
Figura 114 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=50$ mm.....	100
Figura 115 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de G_{IIc} entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo AV138	101
Figura 116 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=12,5$ mm	101
Figura 117 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=25$ mm	102
Figura 118 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=37,5$ mm	102

Figura 119 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=50$ mm	103
Figura 120 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo AV138	103
Figura 121 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=12,5$ mm	104
Figura 122 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=25$ mm	104
Figura 123 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=37,5$ mm	105
Figura 124 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=50$ mm	105
Figura 125 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de G_{Ic} entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo XNR6852 E-2	106
Figura 126 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=12,5$ mm	106
Figura 127 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=25$ mm	107
Figura 128 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=37,5$ mm	107
Figura 129 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=50$ mm	108
Figura 130 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de G_{IIc} entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo XNR6852 E-2	108
Figura 131 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=12,5$ mm.....	109
Figura 132 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=25$ mm.....	109
Figura 133 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=37,5$ mm.....	110
Figura 134 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=50$ mm.....	110
Figura 135 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo XNR6852 E-2	111

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1-Evolução dos adesivos ao longo das últimas décadas [2].....	7
Tabela 2 - Classificação dos adesivos em função do desempenho (adaptado de [16])	22
Tabela 3 - Propriedades do aderente [1].....	51
Tabela 4 – Propriedades estáticas dos adesivos	52
Tabela 5 - Propriedades dos adesivos em função da velocidade [1].....	53
Tabela 6 - Número de elementos de malha em função de L_0	64
Tabela 7 - Propriedades dos aderentes de alumínio	64
Tabela 8 - Cargas máximas em função dos diferentes L_0	66
Tabela 9 - Cargas máximas em função dos diferentes L_0	67

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização do relatório.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Ligações adesivas	7
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	9
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	11
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	13
2.1.4	Configurações possíveis de junta	19
2.1.5	Adesivos estruturais	21
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	23
2.2.1	Previsão para solicitações estáticas	24
2.2.1.1	Mecânica dos meios contínuos.....	24
2.2.1.2	Mecânica da fratura.....	24
2.2.1.3	Modelos de dano coesivo	25
2.2.1.3.1	Tipos de leis coesivas	27
2.2.1.3.2	Efeito dos parâmetros coesivos na resistência estática das juntas	27
2.2.1.4	Mecânico do dano	30
2.2.1.5	Método de Elementos Finitos Extendido.....	31
2.2.2	Previsão para solicitações dinâmicas	33
2.2.2.1	Modelos constitutivos da dependência da taxa de deformação dos adesivos	33
2.2.2.1.1	Modelo Voigt/Maxwell	33
2.2.2.1.2	Modelo Cowper-Symonds.....	34
2.2.2.1.3	Modelo Johnson-Cook	34

2.2.2.1.4	Modelos de sobretensão	34
2.2.2.1.5	Curvas de fluência e curvas isócronas de tensão-deformação	35
2.2.2.2	Modelos numéricos de impacto em juntas adesivas	35
2.3	Comportamento de juntas adesivas ao impacto	36
2.3.1	Avaliação experimental	36
2.3.2	Previsão por métodos numéricos.....	39
3	DESENVOLVIMENTO	45
3.1	Técnica numérica para previsão do comportamento ao impacto	45
3.1.1	Condições da análise numérica	45
3.1.2	Modelos de dano coesivo.....	48
3.1.3	Validação da técnica numérica.....	50
3.1.3.1	Geometria da junta	50
3.1.3.2	Materiais utilizados.....	50
3.1.3.2.1	Aderentes.....	50
3.1.3.2.2	Adesivos	51
3.1.3.3	Ensaio de impacto	53
3.1.3.4	Resultados obtidos.....	55
3.1.3.5	Discussão dos resultados	60
3.2	Estudo numérico	62
3.2.1	Condições da análise numérica	62
3.2.2	Geometria da junta	63
3.2.3	Materiais utilizados	64
3.2.3.1	Aderentes.....	64
3.2.3.2	Adesivos	65
3.2.4	Estudo da influência dos parâmetros coesivos na resistência ao impacto	65
3.2.4.1	Rigidez elástica da lei coesiva	68
3.2.4.2	Desacoplamento dos modos de carregamento com lei triangular.....	73
3.2.4.3	Resistências coesivas	79
3.2.4.4	Tenacidades à fratura	96

4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	115
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	119

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização do relatório

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As ligações adesivas são, cada vez mais, uma alternativa utilizada em aplicações de engenharia. De facto, estas ligações apresentam várias vantagens em relação a outros métodos de ligação mais convencionais. A melhor distribuição de tensões, o baixo peso, a possibilidade de unir materiais dissimilares, o fácil atravancamento, a resistência à corrosão são algumas das características das ligações adesivas que as tornam tão úteis. A possibilidade de automatização e o custo não muito elevado tornam-nas viáveis.

No que respeita aos adesivos, existe uma grande variedade, com propriedades muito distintas, que visam satisfazer as diferentes necessidades de diferentes projetos. A rigidez de um adesivo influencia sobremaneira o comportamento da junta, existindo adesivos muito rígidos e resistentes, outros mais dúcteis de baixa resistência e alguns de propriedades mais intermédias, que conseguem apresentar boa resistência e ductilidade. Além das propriedades referidas, também a tenacidade é bastante relevante, principalmente em juntas sujeitas ao impacto.

Apesar de bem conhecidas as propriedades dos adesivos, as juntas adesivas são influenciadas por vários outros parâmetros como por exemplo o tipo de substrato, por parâmetros geométricos como seja a espessura do adesivo e dos aderentes ou ainda o comprimento de sobreposição. Em função das muitas variáveis existentes, os comportamentos de juntas adesivas variam muito e são por vezes imprevisíveis. A crescente utilização deste tipo de ligação torna necessária a existência de ferramentas que auxiliem o seu projeto. O Método de Elementos Finitos, combinado com critérios ou modelos de dano, tem-se revelado eficaz na simulação e previsão do comportamento de juntas adesivas, possibilitando a redução de tempo de projeto e dos custos. Com o Método de Elementos Finitos podem ainda ser contemplados todos os parâmetros anteriormente referidos dos quais o comportamento das juntas adesivas depende. Entre os critérios ou modelos de dano associados ao Método de Elementos Finitos, os modelos de dano coesivo revelam bastante eficácia, combinando parâmetros de resistência e tenacidade para prever o desempenho de juntas adesivas.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é o estudo da influência dos parâmetros coesivos na previsão do comportamento e da resistência de juntas de sobreposição simples solicitadas ao impacto. Estes parâmetros coesivos são de extrema importância, uma vez que por eles se regem os modelos de dano coesivo (MDC) que permitem simular o comportamento dos adesivos. Como tal, estes modelos de dano coesivo foram incorporados em modelações numéricas de juntas adesivas sujeitas a impacto. Para proceder a esta análise, com base no Método de Elementos Finitos, foi utilizado o *software* Abaqus®. Depois de validados os modelos, estes foram utilizados no estudo desejado.

A influência dos parâmetros coesivos foi estudada, fazendo variar cada um destes parâmetros mantendo os restantes. Esta variação foi efetuada em percentagens iguais para todos os parâmetros. Nesta análise, os parâmetros estudados são os da lei triangular de tração-separação dos modelos de dano coesivo.

Este estudo conta com os adesivos Araldite® AV138 e Nagase Chemtex® XNR6852 E-2, para tentar compreender esta influência utilizando adesivos com diferentes propriedades. O AV138 apresenta elevada rigidez, caracterizando-se, portanto, pela sua fragilidade quando solicitado ao impacto. Por outro lado, o XNR6852 E-2 caracteriza-se por uma rigidez intermédia, combinando boa resistência e ductilidade, e elevada tenacidade.

1.3 Organização do relatório

Esta dissertação encontra-se dividida em 4 capítulos, com o objetivo de facilitar a análise e interpretação do trabalho desenvolvido.

No capítulo 1 é efetuada a contextualização do trabalho, são definidos os objetivos e é exposta a organização da informação.

No capítulo 2 é elaborada a revisão bibliográfica sobre conteúdos relevantes para este trabalho. Após uma breve introdução da evolução dos adesivos ao longo dos tempos, são abordadas as juntas adesivas de uma forma genérica, apresentando vantagens e desvantagens, e as suas aplicações mais comuns. De seguida, são apresentados os diferentes tipos de esforços e modos de rotura presentes em ligações adesivas, as suas principais configurações e os adesivos estruturais. Posteriormente, é abordada a previsão de resistência das juntas adesivas de uma perspetiva estática, onde são apresentados modelos numéricos relacionados com propagação de dano em juntas adesivas, e de uma perspetiva dinâmica, onde é apresentada a dependência da taxa de deformação e modelos numéricos de impacto. Finalmente, a previsão do comportamento das juntas adesivas sujeitas a impacto é abordada do ponto de vista experimental e numérico.

O capítulo 3 consiste, primeiramente, na validação da técnica numérica utilizada, sendo os resultados comparados com Silva [1]. Para tal são apresentadas as condições da análise numérica, como o tipo de carregamento, e as considerações tomadas nos modelos. É também explicado o modelo de dano coesivo empregue, no modelo de validação e na restante dissertação. De seguida são apresentados os resultados sobre a influência dos parâmetros coesivos no comportamento de juntas adesivas ao impacto. É também mostrada a geometria da junta e são apresentados os materiais utilizados, quer os adesivos, quer os substratos. Seguidamente, é explicado o ensaio de impacto a partir do qual se obtiveram os resultados experimentais que tornaram possível esta validação. Os resultados obtidos são apresentados e comparados com a referência numérica e com os resultados experimentais. Por fim, no que respeita à validação do modelo numérico, estes resultados são discutidos e analisados tendo em vista a sua validação. Posteriormente, depois de validados os modelos, procedeu-se ao estudo numérico desejado. De seguida, são apresentadas e explicadas algumas diferenças deste estudo, no que respeita ao modelo e à geometria da junta. Os materiais utilizados são também apresentados, nomeadamente os aderentes que são diferentes dos modelos de validação. Finalmente, é estudada a influência da variação dos parâmetros coesivos. Os parâmetros em estudo são a rigidez da lei coesiva, o desacoplamento dos modos de carregamento, as resistências e as tenacidades coesivas.

No capítulo 4 são apresentadas as conclusões obtidas e sugestões de possíveis trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

Os primeiros adesivos foram utilizados há milhares de anos, sendo complicado datar com precisão a sua origem [2]. Eram extraídos a partir de produtos naturais como ossos, peles, peixe, leite e plantas [3]. Estas primeiras formas de adesivos eram utilizados por caçadores para criar as suas armas [4].

O início da industrialização dos adesivos teve origem por volta de 1700. O primeiro registo de produção industrial é na Holanda na década de 1690, sendo, no entanto, a primeira patente foi registada no Reino Unido em 1754 [2]. Apesar da sua história com muitos anos, só desde o início do século passado foram introduzidos os adesivos com base em polímeros sintéticos [3, 4]. Este tipo de ligação teve uma maior evolução desde a década de 1940 com o maior desenvolvimento destes adesivos, que possuem propriedades que facilitam a adesão a mais materiais mais facilmente, permitindo também aumentar a resistência a maiores cargas e melhorar a resistência ao ambiente envolvente [4]. A Tabela 1 demonstra, de forma genérica, esta evolução ao longo dos últimos anos.

Tabela 1-Evolução dos adesivos ao longo das últimas décadas [2]

Década aproximada de disponibilização comercial	Adesivo
1910	Fenol-formaldeídos
1930	Ureia-formaldeídos
1940	Nitrilo fenólicos; Vinilo fenólicos; Acrílicos; Poliuretanos
1950	Epóxidos; Cianoacrilatos; Anaeróbicos
1960	Poliimidas; Polibenzimidazole; Polyquinoxaline
1970	Segunda geração de acrílicos

As ligações adesivas podem ser definidas como aquelas em que um material é aplicado na superfície de outros materiais, por forma a criar uma ligação entre eles e que seja capaz de resistir à sua separação [2]. O material ao qual se aplica o adesivo é conhecido como substrato ou aderente. Os diferentes materiais são ligados por

fenómenos de adesão. Adesão pode ser definida como a atração entre duas substâncias resultante das forças intermoleculares estabelecidas entre elas [3, 4]. Dois conceitos fundamentais neste fenómeno são a interfase e a interface (Figura 1). A interfase é a região entre o adesivo e o aderente, sendo que esta região apresenta diferentes características físicas e químicas do que o adesivo ou o aderente em bruto. A interface é definida como o plano ou a área física de contacto entre a superfície do adesivo e a superfície do aderente e está contida na interfase [4, 5]. Para a resistência da ligação importa ainda a coesão, que se define como a própria resistência interna do adesivo, quando este está sujeito a esforços. Ao contrário da adesão, as forças moleculares não são entre diferentes materiais, mas sim entre moléculas do mesmo material. Quanto maiores as forças intermoleculares, maior a coesão e resistência do adesivo [5].

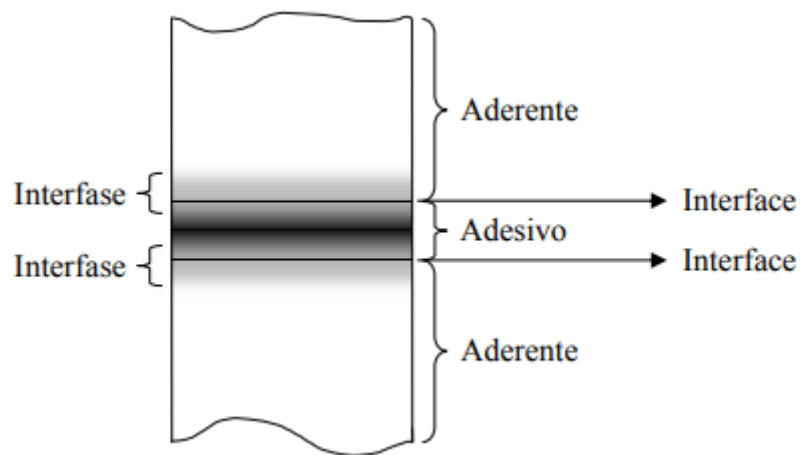


Figura 1 - Junta adesiva com indicação esquemática das interfases e interfaces (adaptado de [5])

Ao longo do tempo foram desenvolvidas várias teorias que tentam explicar os fenómenos de adesão, embora nenhuma os consiga explicar na sua plenitude.

A teoria mais antiga é a teoria mecânica, onde uma boa adesão ocorre quando o adesivo penetra os poros, fendas e irregularidades da superfície do substrato, dando - se, assim, um encravamento e aumentando a área de contacto. As forças de adesão correspondem à fixação (ancoragem) do adesivo nestas irregularidades, assumindo que a rugosidade das superfícies tem um papel importante nesta. Ainda segundo esta teoria é necessário que o adesivo molhe convenientemente a superfície do substrato e tenha viscosidade suficientemente baixa para preencher todos os detalhes. Pode recorrer-se a tratamentos superficiais, aumentando a rugosidade ou energia de superfície por exemplo, para aumentar a resistência da ligação. Contudo, a teoria mecânica não explica as boas ligações possíveis entre superfícies lisas [5].

A teoria da adsorção é a mais aceite e aplicada para explicar fenómenos de adesão. Esta adesão é justificada pelas forças interatómicas e intermoleculares estabelecidas entre superfícies. Muitas ligações envolvem apenas forças secundárias como pontes de

Hidrogénio ou forças de van der Waals, no entanto em determinadas situações também se formam ligações primárias como ligações covalentes ou iónicas. Para que estes fenómenos tenham lugar é necessário um excelente contacto molecular na interface, sendo preponderante uma boa molhagem. Os promotores de adesão e agentes de ligação facilitam a fixação do adesivo por reação química [5].

Existe também a teoria da difusão, que explica apenas ligações entre materiais poliméricos. Esta teoria defende que há uma inter-difusão entre cadeias moleculares dos diferentes materiais. Para que tal aconteça é necessária mobilidade molecular suficiente, miscibilidade e compatibilidade entre adesivo e aderente. O maior campo de aplicação é na soldadura através de solventes de termoplásticos ou soldadura por ação térmica [2, 5].

Por fim, refere-se a teoria eletrostática, que diz haver sempre uma diferença de potencial eletroquímico pela interface entre dois materiais em contacto, como seja o adesivo e o aderente [3]. Posto isto, as cargas elétricas tendem a atravessar a interface, do material eletropositivo para o material eletronegativo, estabelecendo uma dupla camada elétrica, responsável pelas forças de atração que garantem a adesão [2]. A controvérsia em torno desta teoria prende-se com o facto das forças eletrostáticas poderem não ser a causa, mas sim um resultado da ligação [6].

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

As ligações adesivas são, cada vez mais, uma alternativa utilizada em aplicações de engenharia, uma vez que apresentam várias vantagens em relação a outros métodos, mais convencionais [3]. Como qualquer outra ligação, as juntas adesivas têm como objetivo a transmissão de cargas entre dois componentes, sob as condições a que está sujeita, mantendo a integridade estrutural.

A resistência mecânica é fundamental para garantir uma ligação eficiente, mas é necessário ter em consideração vários outros aspetos na escolha de um adesivo adequado. A composição química e compatibilidade com os aderentes, a temperatura de serviço, o método de aplicação e o seu modo e tempo de cura, o meio ambiente a está sujeita são exemplos de fatores muito relevantes a ter em conta na seleção de um adesivo. Caso se trate de utilização em larga escala, os custos podem também ser uma variável determinante.

As principais vantagens em relação a outros métodos de ligação convencionais são a seguir apresentadas [3, 5, 6]:

- Redução ou eliminação de concentrações de tensão (Figura 2);
- Amortecimento de vibrações;
- Permite ligação entre materiais dissimilares e com diferentes coeficientes de expansão;

- Não ocorrem alterações estruturais, geralmente as propriedades dos aderentes não são afetadas;
- Boa resistência à corrosão;
- Flexibilidade de projeto, uma vez que permite unir formas mais complexas e superfícies irregulares;
- Ligação de materiais com reduzida espessura;
- Não danificam o substrato;
- Aumento da resistência à fadiga;
- Permitem ligar e vedar ao mesmo tempo;
- Isolamento acústico;
- Redução de peso;
- Globalmente mais económico;
- Método fácil de automatizar;
- Podem melhorar aspetos estético e aerodinâmico.

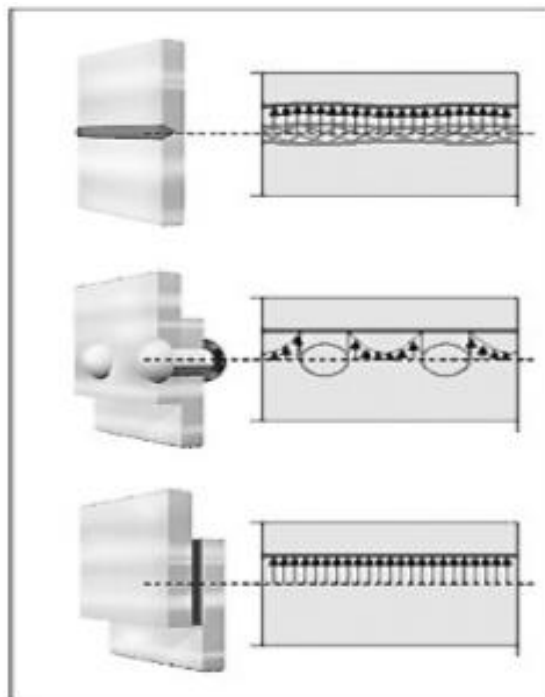


Figura 2 - Distribuição de tensão em juntas soldadas, rebitadas e coladas [5]

Apesar de tudo o que foi referido, as ligações adesivas estão também associadas a algumas desvantagens [3, 5, 6]:

- Projeto da ligação deve tentar eliminar esforços de clivagem, arrancamento e impacto;

- Necessidade de tratamento superficial dos aderentes;
- Processo pode ser demorado e pode necessitar de temperatura e/ou pressão;
- Muito dependente das condições de processamento;
- Desmontagem impossível ou muito difícil;
- Controlo de qualidade mais complicado;
- Resistência limitada em condições extremas como o calor ou a humidade;
- Possibilidade de fluência em situações de temperaturas elevadas;
- Projeto mais complexo, visto que não há nenhuma regra universalmente aceite para dimensionamento deste tipo de ligação.

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

A evolução referida dos adesivos nos últimos anos teve como um dos grandes impulsionadores a indústria aeronáutica e aeroespacial. A introdução de ligas metálicas mais leves como o alumínio e o titânio, bem como de materiais poliméricos (Figura 3), tornaram necessário o desenvolvimento das ligações adesivas, uma vez que alguns destes materiais não podem ser ligados por métodos convencionais como fixação mecânica ou soldadura [7].

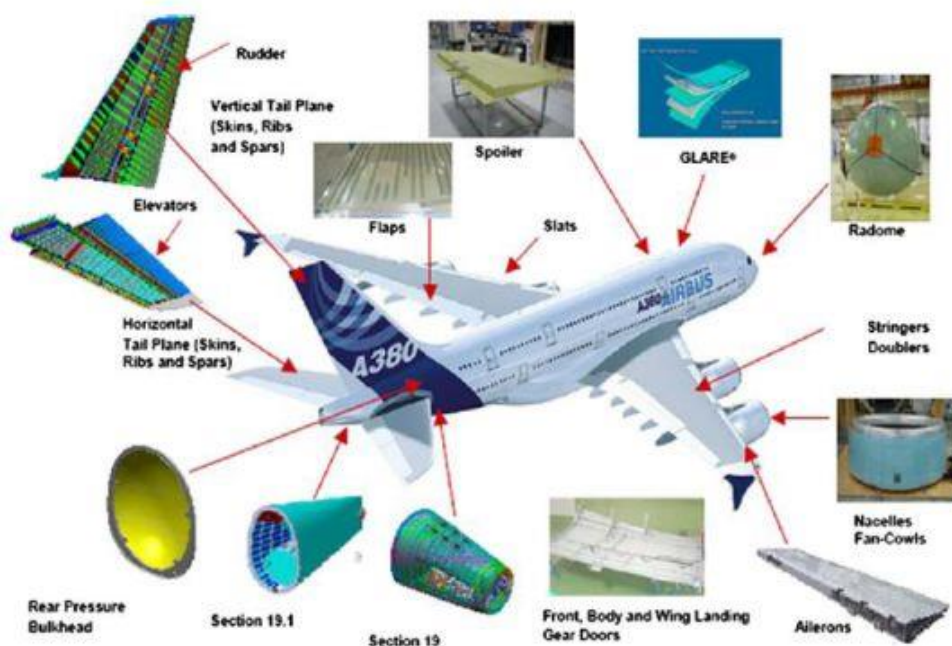


Figura 3 - Exemplos de aplicação de juntas adesivas no Airbus A380 [8]

Devido ao aparecimento de adesivos sintéticos, vários elementos de ligação mecânica, principalmente ligações rebitadas, foram substituídos por ligações adesivas, reduzindo a propensão de aparecimento de fendas de fadiga. O acabamento superficial que os

adesivos permitem são também importantes no desempenho aerodinâmico da aeronave. A utilização de adesivos permite ainda a redução de peso, economizando combustível e reduzindo emissões de gases poluentes. A possibilidade de unir materiais dissimilares com diferentes coeficientes de expansão térmica é outro benefício destas ligações, sendo que as aeronaves estão sujeitas a grandes amplitudes térmicas em funcionamento corrente [9]. A par de adesivos estruturais também se encontram muitos adesivos com função de vedante nesta indústria [2].

Na indústria automóvel, a utilização de adesivos começou há algumas décadas. Inicialmente foram utilizados como vedantes e por uma questão de design nos parabrisas. Posteriormente eram usados também no preenchimento de falhas nas soldaduras por forma a prevenir a corrosão. Com o aumento destas ligações verificou-se um aumento da rigidez dos veículos, facto que foi explorado pela indústria com vista a aumentar essencialmente a rigidez torsional, o que contribuiu para o desenvolvimento dos adesivos estruturais. Como na indústria aeronáutica e aeroespacial, também a indústria automóvel os materiais empregues nas carroçarias têm vindo a evoluir nos últimos anos, sendo mais utilizados materiais compósitos e ligas de alumínio. Como referido anteriormente este facto potencia o uso das ligações adesivas (Figura 4). Associado a esta filosofia de redução de peso está também o desenvolvimento de adesivos com grande capacidade de absorção de energia, que melhoram o comportamento da estrutura em caso de colisões [2, 3].

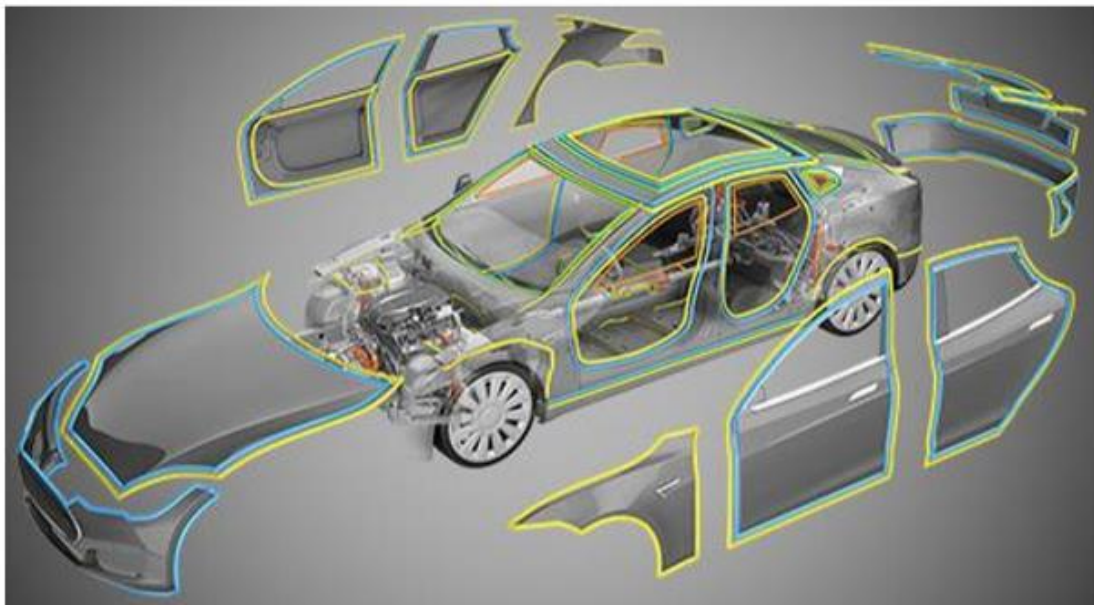


Figura 4 - Exemplos de aplicação de adesivos na indústria automóvel [10]

Na indústria naval as ligações adesivas também têm vindo a ganhar destaque. Tal como nas outras indústrias referidas, a utilização de diferentes materiais e a capacidade de ligar materiais dissimilares faz com que este tipo de ligação seja muito

apreciado. Pese ainda a capacidade de vedar, apresentar durabilidade, resistência à humidade e corrosão [2].

No setor da eletrónica os adesivos assumem grande preponderância, uma vez que permitem isolamento ou condutividade elétrica conforme necessário. O facto de ser um processo relativamente fácil de automatizar e ligar materiais com diferente rigidez são aspetos muito relevantes também nesta indústria [2].

Na área da construção civil as ligações adesivas são menos aplicadas, no entanto são utilizadas, por exemplo, em uniões de painéis de espessura reduzida, estruturas sandwich para isolamentos térmicos e fixação de revestimentos de pisos [2]. Os adesivos são ainda aplicados em caixilharias e tubagens devido à sua capacidade vedante [4].

De referir ainda que não se pode descurar também outras aplicações como na medicina dentária, onde são utilizados adesivos na ortodontia ou reparação de dentes, onde, com o auxílio de luz ultravioleta, é possível uma cura imediata [3]. A indústria do calçado é outro exemplo de um setor que utiliza adesivos há bastante tempo. Neste caso a escolha das ligações adesivas está associada a uma melhor distribuição de tensões pela zona colada, ao favorecimento a nível estético e à possibilidade de automatizar o processo [2].

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

No projeto de ligações adesivas, os esforços a que a junta adesiva está sujeita é um fator determinante, isto porque os adesivos apresentam comportamentos díspares em função do tipo de carregamento. A resistência máxima deste género de ligações é atingida quando submetida a tensões de corte, pelo que estas devem ser projetadas de forma a serem solicitadas apenas ao corte, tentando evitar outros tipos de esforços [6]. Na prática é muito complicado conseguir este objetivo, pelo que a grande parte deste tipo de uniões apresenta a combinação de dois ou mais tipos de carregamento. Esta dificuldade prende-se com vários fatores, como por exemplo o desalinhamento dos substratos que gera uma flexão, induzindo também esforços de arrancamento. As tensões mais importantes a que uma junta adesiva está sujeita são as de tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento (Figura 5).

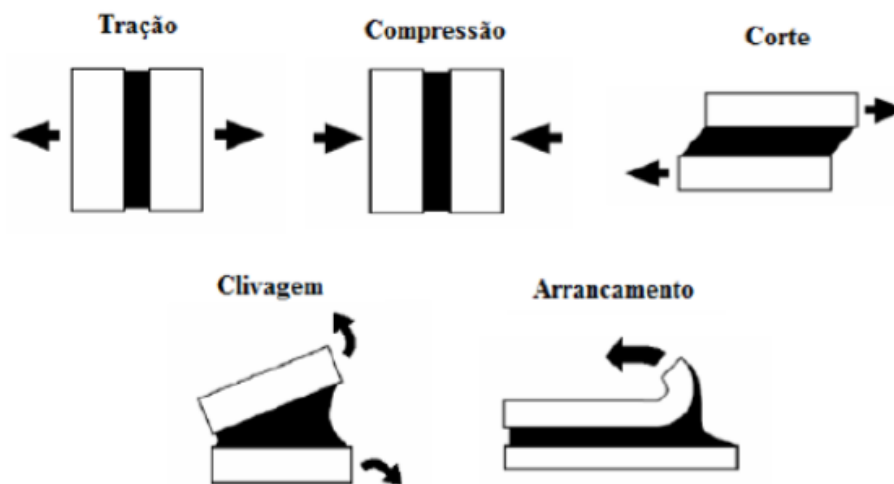


Figura 5 - Representação dos tipos de carregamento aplicáveis a juntas adesiva (aderentes a branco e adesivo a preto) [11]

Quando as forças atuam apenas perpendicularmente ao plano de corte, desenvolvem-se esforços de tração. Nesta situação, as tensões de corte são nulas e as tensões normais são uniformes ao longo de toda a zona de sobreposição (Figura 6). Todavia, a grande dificuldade em manter a espessura completamente uniforme ao longo de toda a ligação e o facto de as forças poderem não ser completamente perpendiculares, fazem com que possam aparecer picos de tensão nas extremidades devido a esforços de clivagem e arrancamento.

O caso dos esforços de compressão é muito semelhante aos de tração uma vez que as forças também atuam perpendicularmente ao plano de corte e originam uma distribuição de tensões constante (Figura 6). No entanto, no caso da compressão, as forças tendem a comprimir um aderente contra o outro pelo que, no caso de se conseguir compressão pura, o adesivo praticamente não possui qualquer utilidade [4].

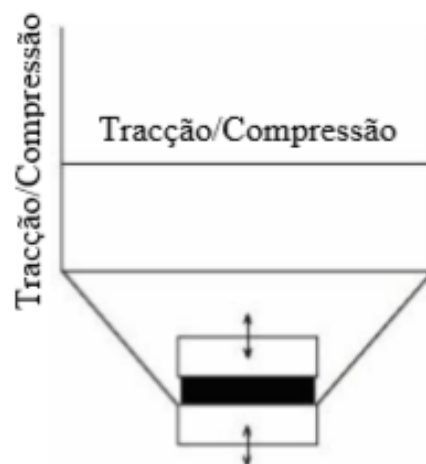


Figura 6 - Distribuição da tensão de tração e de compressão [5]

Relativamente às tensões de corte, estas aparecem quando as forças atuantes tendem a separar, provocando escorregamento entre os aderentes no plano do adesivo. Estas juntas são relativamente fáceis de produzir e muito utilizadas na prática [4]. Como demonstrado na Figura 7, as tensões de corte não são uniformes ao longo da junta, no caso uma JSS, apresentando picos nas extremidades. Este fenómeno deve-se à deformação diferencial dos substratos (maior nos aderentes dúcteis) ao longo do comprimento de sobreposição, visto que cada substrato se deforma longitudinalmente a uma taxa crescente a partir de uma extremidade até à extremidade oposta à sobreposição (Figura 10) [5]. Neste tipo de esforços, as tensões podem ser obtidas simplesmente dividindo a força aplicada pela área colada, pelo que um aumento desta confere mais resistência à junta. No entanto, para atingir este objetivo é mais eficaz aumentar a largura de sobreposição, uma vez que esta modificação aumenta a área de adesivo nas extremidades (zona mais crítica). Um aumento do comprimento de sobreposição, à partida também melhora a resistência da junta, contudo a uma taxa decrescente, visto que esta alteração acentua o efeito da deformação diferencial dos aderentes.

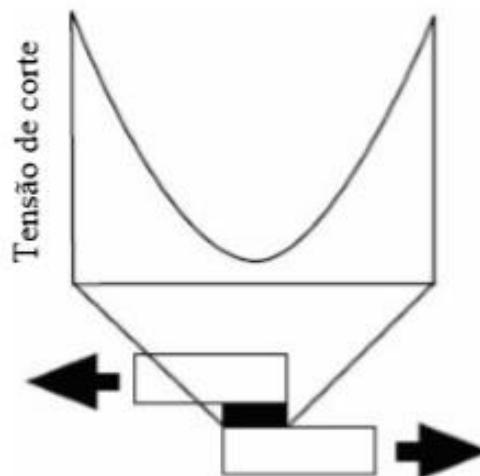


Figura 7 - Distribuição da tensão de corte [5]

Os esforços de clivagem aparecem quando forças que atuam de modo a separar os aderentes são aplicadas na extremidade da junta. Nesta situação existe uma forte concentração de tensões na referida extremidade (Figura 8).

A distribuição de tensões de arrancamento é em tudo semelhante à de clivagem (Figura 8). No caso do arrancamento um ou ambos os substratos serem flexíveis, estes podem deformar plasticamente por ação das forças aplicadas, o que leva à concentração das tensões numa zona mais localizada na extremidade afetada [5]. Os esforços de clivagem e arrancamento devem, sempre que possível, ser evitados, privilegiando os esforços de corte.

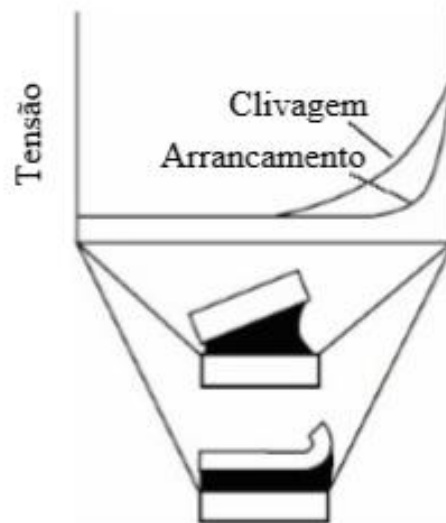


Figura 8 - Distribuição da tensão de clivagem e arrancamento [5]

Como referido anteriormente, nas JSS não é possível fazê-lo, visto que os aderentes sofrem flexão significativa (Figura 9) originando tensões normais.

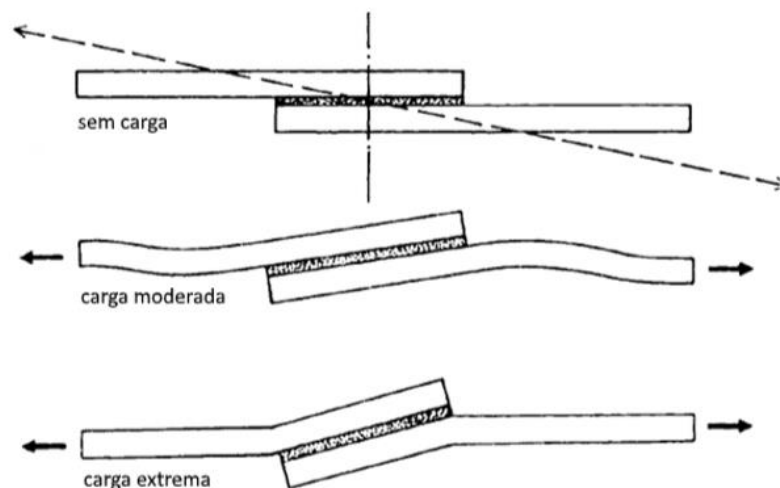


Figura 9 - Distorção causada pela excentricidade das cargas [4]

A rigidez dos aderentes tem elevada preponderância nas tensões de corte, como referido (deformação diferencial dos substratos mais acentuada quando estes são dúcteis), e de arrancamento (Figura 10). Na presença destes últimos esforços, a utilização de um adesivo dúctil e flexível permite a plastificação dos substratos na extremidade, transferindo este esforço para uma zona mais interior do adesivo, conferindo uma distribuição de tensões mais uniforme ao longo do comprimento de sobreposição e maior resistência à junta. Por outro lado, os adesivos rígidos sofrem danos que se iniciam na extremidade para deformações muito reduzidas (Figura 11).

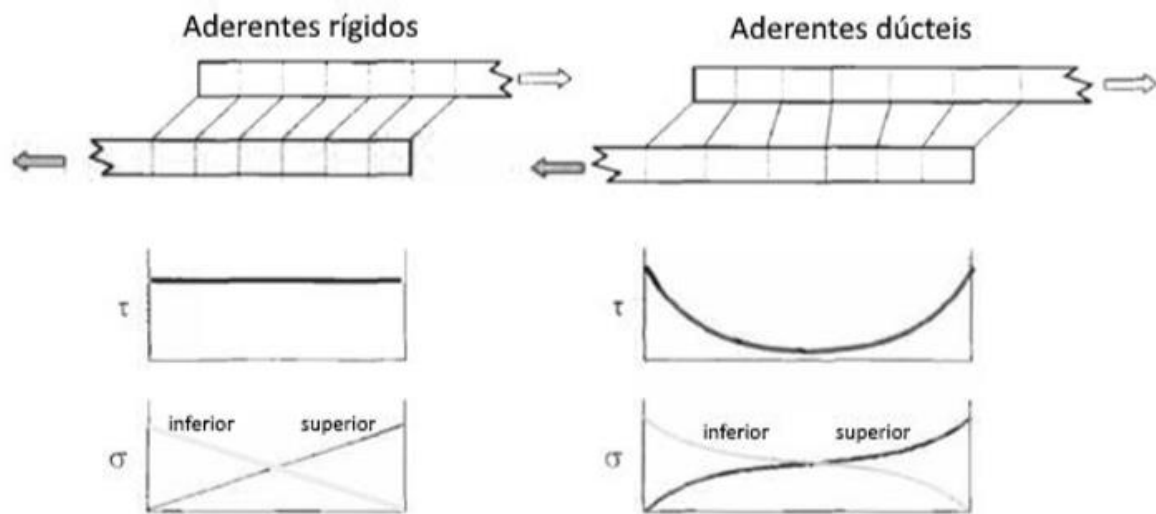


Figura 10 - Influência da rigidez dos substratos na distribuição de tensões ao longo do comprimento de sobreposição [12]

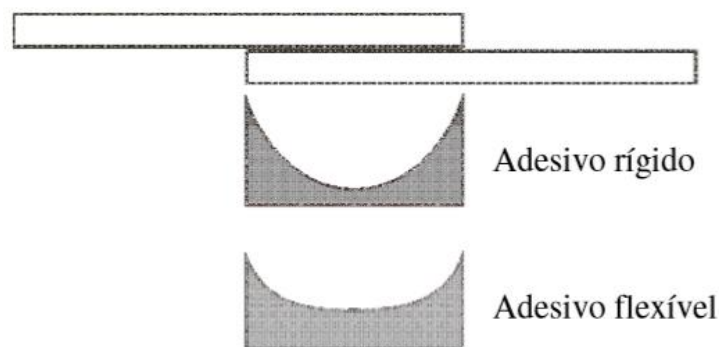


Figura 11 - Influência da rigidez do adesivo na distribuição de tensões ao longo do comprimento de sobreposição [13]

No que concerne aos modos de rotura de juntas adesivas, a análise dos mesmos é de grande importância por forma a avaliar o comportamento destas ligações e a eficácia do processo de fabrico. Os quatro principais modos de rotura são a rotura adesiva (a), a rotura coesiva (b), a rotura do substrato (c) e a rotura mista (d), e estão ilustrados na Figura 12.

A rotura adesiva acontece na interface entre o adesivo e um dos aderentes, caracterizando-se por uma separação entre adesivo e aderente, sem que seja atingida a resistência máxima de nenhum destes materiais. Neste caso, a falha ocorre na adesão entre o adesivo e a superfície do aderente, verificando-se que um dos aderentes não apresenta resíduos de adesivo, enquanto a superfície do outro aderente deverá estar totalmente coberta de adesivo. Este tipo de rotura pode dever-se a uma ineficaz preparação da superfície, incompatibilidade entre materiais ou a situações em que o adesivo esteja sujeito a condições para as quais este não seja recomendado. Em

JSS a existência de variações de tensões de arrancamento e de corte ao longo da espessura do adesivo pode também propiciar este tipo de rotura visto que os valores máximos destas tensões ocorrem junto da interface. A classificação deste tipo de rotura deve ser cuidada, uma vez que há roturas aparentemente adesivas que são na realidade coesivas, apresentando uma fina película de adesivo na superfície do substrato [3, 5].

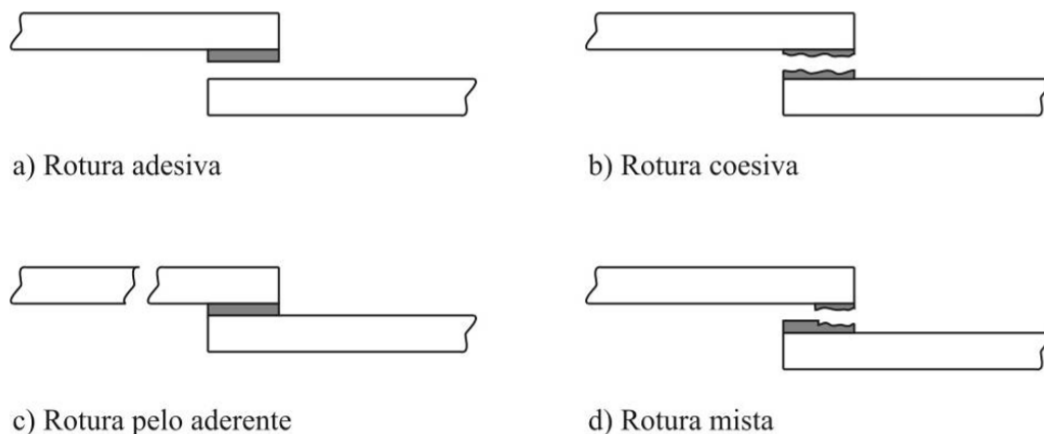


Figura 12 - Modos de rotura em juntas adesivas [5]

A rotura coesiva dá-se quando o aderente e a ligação entre adesivo e aderentes são mais resistentes do que o adesivo. Este modo de rotura ocorre por falha na coesão do adesivo. Neste caso as superfícies de rotura estão ambas cobertas com adesivo e indica uma boa preparação da superfície [5].

A rotura do substrato também é coesiva, mas neste caso a falha ocorre na coesão do aderente, sendo esta muito difícil de encontrar em materiais de elevada resistência. Este tipo de rotura evidencia uma junta bem concebida, uma vez que apresenta maior resistência do que o próprio substrato.

A rotura mista consiste na combinação de rotura adesiva com rotura coesiva. Por vezes este modo de rotura resulta de uma limpeza deficiente numa determinada região das superfícies a ligar, ou até da contaminação do próprio adesivo [5].

O modo de rotura preferencial é a rotura coesiva, seja no adesivo ou no aderente, pois esta implica o aproveitamento da totalidade da resistência dos materiais que compõem a junta [5].

A propagação de uma fenda de rotura pode acontecer de três modos diferentes, como mostrado na Figura 13. Enquanto o modo I ocorre por abertura, os modos II e III ocorrem por corte. No entanto, no modo II a propagação da fenda dá-se na direção normal à frente da fenda e no modo III a propagação ocorre de forma paralela [6].

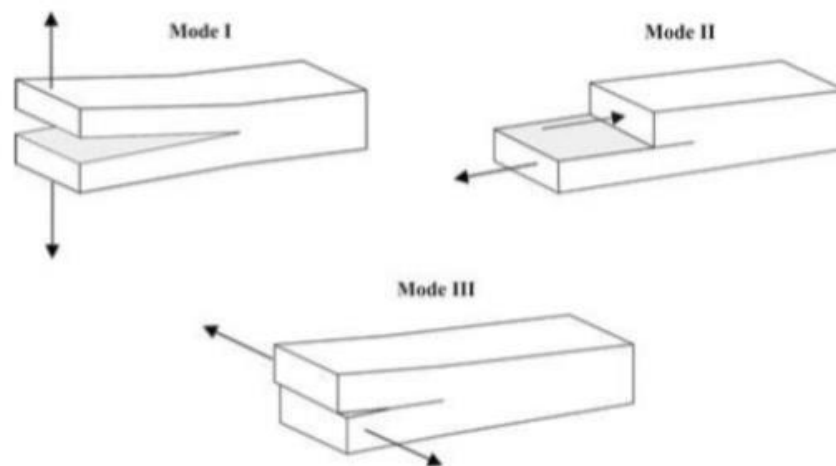


Figura 13 - Diferentes modos de propagação de fendas [14]

2.1.4 Configurações possíveis de junta

A geometria da junta adesiva apresenta elevada relevância, no sentido em que influencia, bem como as propriedades mecânicas, a distribuição de tensões ao longo da mesma. As principais configurações de junta utilizadas em engenharia estão ilustradas na Figura 14.

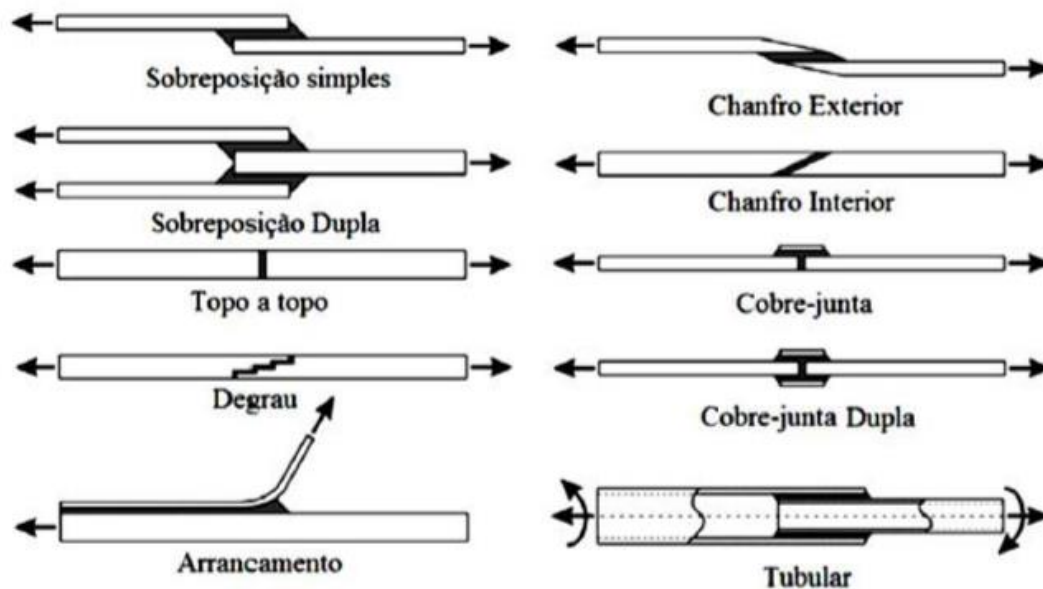


Figura 14 - Configurações mais comuns de juntas adesivas [6]

As JSS são as mais comuns em aplicações industriais pela simplicidade de fabrico. No entanto, a aplicação não centrada da carga provoca efeitos de flexão que originam tensões de arrancamento, reduzindo a resistência da junta, como referido anteriormente.

Com o objetivo de reduzir os efeitos de flexão são utilizadas juntas de sobreposição dupla, todavia este efeito pode ocorrer em cargas mais elevadas. Apesar da produção mais morosa, são juntas relativamente simples de fabricar.

As juntas com chanfro interior permitem uma redução do gradiente de esforços ao longo do adesivo. Este tipo de junta obriga à maquinagem dos substratos, o que dificulta e encarece a sua produção.

Com vista a diminuir o efeito de arrancamento nas extremidades são desenvolvidas juntas com chanfro exterior. Apresenta dificuldades semelhantes às juntas de chanfro interior.

As juntas topo a topo são utilizadas pela sua facilidade de produção, contudo, devido às elevadas tensões de arrancamento e corte a que está sujeita nas extremidades, não é muito eficaz. Além do mais, esta configuração não resiste a esforços de flexão, uma vez que o adesivo estaria sujeito a clivagem.

As juntas em degrau também foram desenvolvidas para diminuir os efeitos de arrancamento, no entanto, apesar da sua eficácia, os tempos de fabrico são mais elevados e a maquinagem dos degraus configura um problema em materiais compósitos, por exemplo. No caso destes materiais é mais fácil produzir os degraus durante o empilhamento.

Quando há possibilidade de acomodar mais material, podem utilizar-se a cobre-junta simples ou dupla, que apresentam melhor resistência do que as JSS, no entanto também estão sujeitas a esforços de arrancamento. A cobre-junta dupla diminui os efeitos de flexão em relação à cobre-junta simples, sendo, portanto, preferível usá-la quando possível, implicando tempos de produção mais elevados.

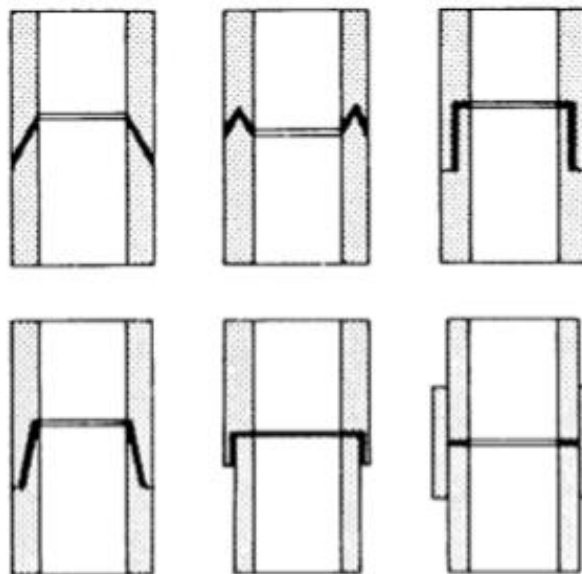


Figura 15 - Possíveis configurações para juntas tubulares [4]

As juntas tubulares tornam-se muito úteis na ligação de tubos (Figura 15). Quando sujeito a esforço axial ou torção, o adesivo estará sujeito maioritariamente ao corte, como desejável. Caso não haja um alinhamento perfeito dos eixos de revolução, podem gerar-se esforços de arrancamento. De forma a evitar esta situação e/ou a aumentar a resistência mecânica podem ser introduzidos chanfros ou ressalto. Estas ligações são mais complexas e não permitem um efetivo controlo de qualidade [4, 6]. As juntas de arrancamento acontecem geralmente quando um aderente muito mais fino é ligado a um aderente muito mais grosso. Como o próprio nome indica, estão sujeitas a arrancamento, o que não é desejável.

2.1.5 Adesivos estruturais

Os adesivos podem ser classificados de diversas maneiras, consoante os seus objetivos. As classificações mais usuais são quanto à sua origem, função ou desempenho, composição química, forma física, processo de endurecimento, durabilidade e tipo de substrato a aplicar.

Quanto ao seu desempenho, os adesivos podem ser classificados como adesivos estruturais e não estruturais. Os adesivos estruturais são utilizados para transferir cargas, sejam estas estáticas ou dinâmicas, entre os aderentes no ambiente em que estão inseridos. Normalmente são usados em aplicações permanentes que requerem elevada resistência mecânica. Estes adesivos apresentam elevada resistência coesiva e, quando empregues numa junta, esta deve exceder os 6,9 MPa de resistência ao corte, à temperatura ambiente. Os adesivos estruturais são considerados parte integrante da estrutura pelo que devem apresentar uma resistência semelhante à dos materiais a ligar. Este conjunto de adesivos não devem, ainda, sofrer fluência sob ação de cargas significativas por um longo período de tempo, devem apresentar boa resistência aos meios ambiente mais comuns e ser capazes de suportar estas transmissões de esforços consideráveis sem sofrer grandes deformações [3-5, 15].

A Tabela 2 apresenta alguns tipos de adesivos divididos mediante a sua função ou desempenho. Como se pode verificar na referida tabela, os adesivos estruturais dividem-se em cinco famílias de adesivos. A escolha destes adesivos deve sempre ter em consideração vários aspetos, como por exemplo o tipo de junta, os modos de carregamento, o ambiente onde vai operar ou o custo.

Os adesivos de epóxido são talvez os mais versáteis pois conseguem ligar vários substratos de diferentes materiais (excluindo apenas polímeros e elastómeros com baixa energia de superfície), e são facilmente modificáveis para atingir as propriedades requeridas para determinada aplicação. Isto faz com que estes adesivos sejam amplamente usados nos mercados automóvel, industrial e aeroespacial. Os adesivos epóxidos apresentam boa resistência mecânica e química e não produzem voláteis durante a cura. Apesar de um comportamento mais fraco ao arrancamento, podem ser facilmente aditivados com materiais mais resilientes [4].

Tabela 2 - Classificação dos adesivos em função do desempenho (adaptado de [16])

	Adesivos estruturais	Adesivos não estruturais
	Fenólicos-vinílicos	Silicone
<u>Fenólicos</u>	Fenólicos-nitrilo	<u>Borrachas sintéticas</u> Policloropreno e nitrilo
	Fenólicos-policloropreno	Polisulfureto
<u>Acrílicos</u>	Anaeróbicos	<u>Poliésteres</u>
	Cianoacrilatos	
<u>Poliuretano</u>		<u>Termofusíveis</u>
<u>Poliimida</u>		<u>Inorgânicos</u>
	Epóxido-poliimida	
	Epóxido-polisulfureto	
<u>Epóxido</u>	Epóxido-fenólicos	
	Epóxido-poliuretano	
	Epóxido-nitrilo	

Os adesivos fenólicos têm grande utilização na colagem de madeiras e madeiras com metais; apresentam boa resistência mecânica, boa resistência a temperaturas elevadas e a agentes ambientais e baixo custo. Em contrapartida, estes adesivos possuem baixa resistência à corrosão por solventes, elevada fragilidade e baixa resistência ao impacto. O seu processo de cura implica altas temperaturas, e os substratos devem ser porosos ou deve aplicar-se pressão durante o processo, para evitar o aparecimento de vazios, um vez que ocorre libertação de água [4, 5].

De uma maneira geral, os adesivos acrílicos têm um processo de cura muito rápido, o que se configura como uma vantagem no que diz respeito à automatização de processos. Quando implementados, resultam em juntas com boa resistência ao corte, apesar de um comportamento mais fraco ao arrancamento. Este tipo de adesivo cola, também, diversos tipos de materiais, sendo aplicado em plásticos e borrachas, por exemplo [5].

Principalmente desenvolvidas pela NASA, as poliimididas apresentam como grande vantagem o facto de suportarem temperaturas muito mais elevadas do que os epóxidos ou fenólicos, por exemplo. Os adesivos de poliimida estão mais confinados à indústria aeroespacial devido à sua aplicação complexa, visto que necessitam de altas temperaturas, pressão e longos tempos de cura, e ao seu elevado custo [4, 5].

Por fim, os poliuretanos apresentam bom comportamento a baixas temperaturas, boa resistência ao arrancamento, a choques, a vibrações, à abrasão, boa tenacidade e excelente flexibilidade, permitindo ligar superfícies a até 25 mm de distância. O processo de cura dá-se à temperatura ambiente, contudo este pode ser lento [5].

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

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

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [17], que parte do princípio que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade do adesivo se deformar plasticamente, da utilização de substratos de compósito ou de materiais diferentes. O MEF [18] é então a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [19], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Recorreu-se então à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas coladas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [20]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

Mais recentemente, começou-se a usar outra técnica para modelar o crescimento de fendas com uma tensão, o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), que utiliza

funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

2.2.1 Previsão para solicitações estáticas

2.2.1.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [17], que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [21] usou o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [22]. No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [19], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

2.2.1.2 Mecânica da fratura

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

suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, este se mantém com dimensões inferiores às críticas, embora se possa propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fissuras pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [23]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [24] através do estudo de fraturas em fibras de vidro, que lhe permitiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [25]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [26] e por Rice [27] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, G_I ou G_{II} , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [28], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na sollicitação.

2.2.1.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com estudos de Barenblatt [29] e Dugdale [30], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [31].

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [32]. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas

são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 16), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [33], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [34].

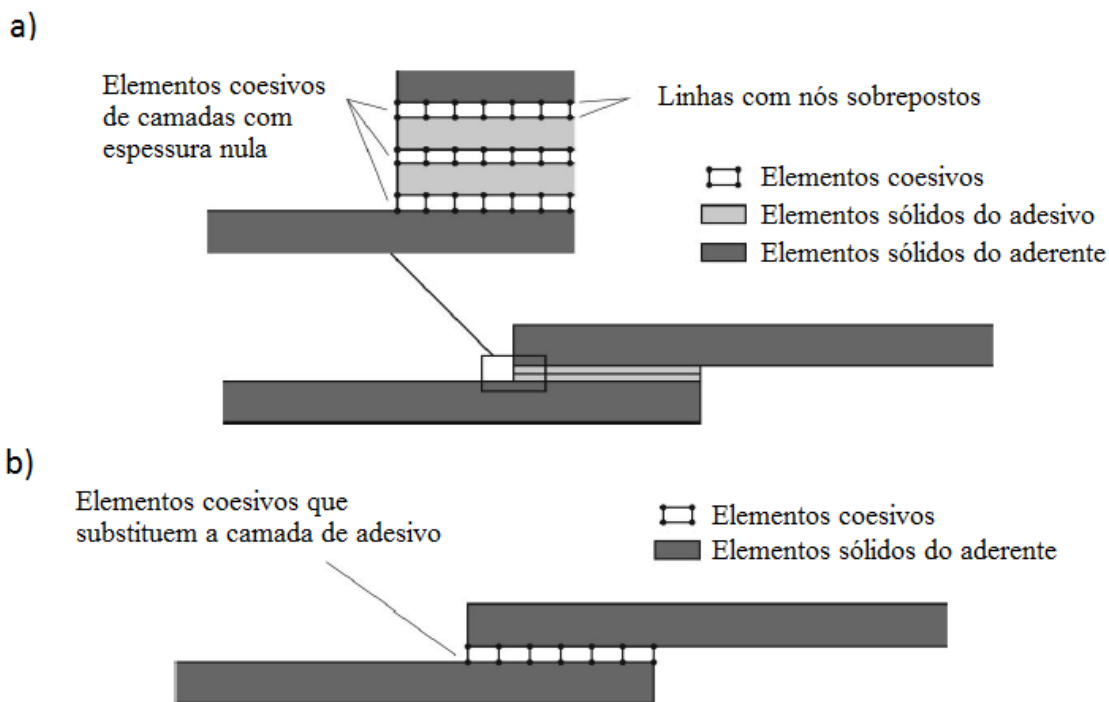


Figura 16 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [35])

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [36]. Este modelo está implementado em softwares, como o caso do Abaqus®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D apresenta uma componente adicional de corte [37].

2.2.1.3.1 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [38], triangular [39], exponencial [40], polinomial [41] e trapezoidal [34]. Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [42].

A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [43]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [44] de seis nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do Abaqus®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 17).

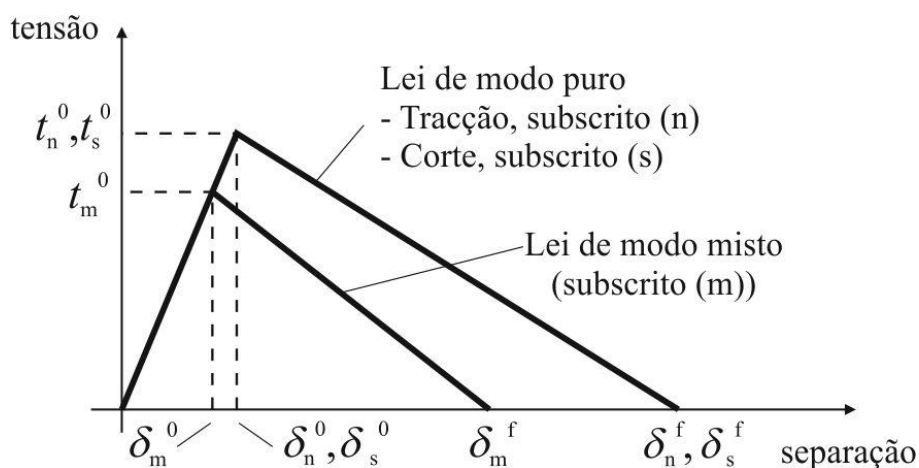


Figura 17 – Modelo coesivo triangular [44, 45]

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte [46].

Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [47] e modo II [48].

2.2.1.3.2 Efeito dos parâmetros coesivos na resistência estática das juntas

Os parâmetros coesivos que definem a lei coesiva triangular são G_{Ic} , G_{IIc} , t_n^0 e t_s^0 . Torna-se, portanto, necessário defini-los da melhor forma possível, existindo vários métodos para determinar estes parâmetros, através de testes específicos, como o método direto, método inverso, DCB ou ENF. O método a utilizar depende essencialmente da

situação em que vão ser usados os valores. Uma das características que mais influencia esta escolha é a espessura do adesivo. A influência destes parâmetros, e o conhecimento da precisão da simulação em relação à realidade, é de extrema importância para obter juntas bem dimensionadas [49].

As leis de MDC simulam o comportamento elástico, seguido de iniciação de dano, devido a falha local no material, e a sua propagação, tendo em conta a degradação gradual das propriedades do material até à rotura. Os parâmetros coesivos dão forma à lei coesiva, sendo que esta pode ser ajustada conforme o comportamento dos materiais ou da interface a simular. A lei coesiva triangular define-se por um comportamento linear elástico seguido de uma evolução do dano também linear (Figura 17) [49].

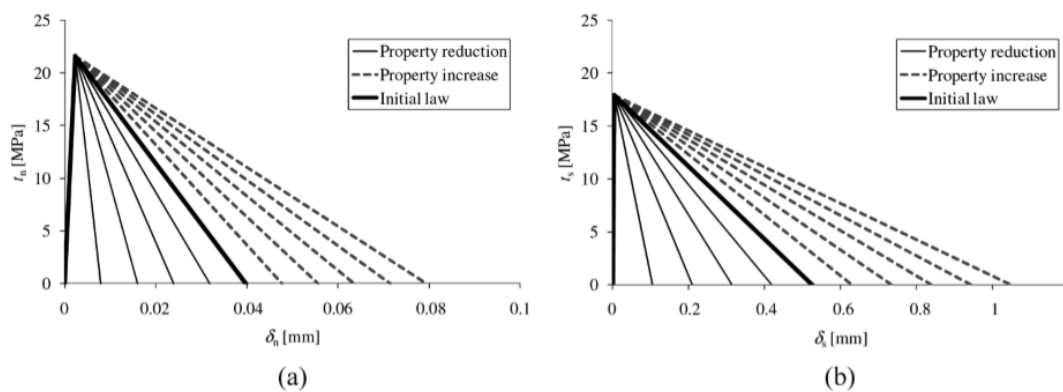


Figura 18 - Lei coesiva triangular para valores de (a) G_{Ic} e (b) G_{IIc} num intervalo de -80% até +100% em relação ao inicial, com incrementos de 20% [49]

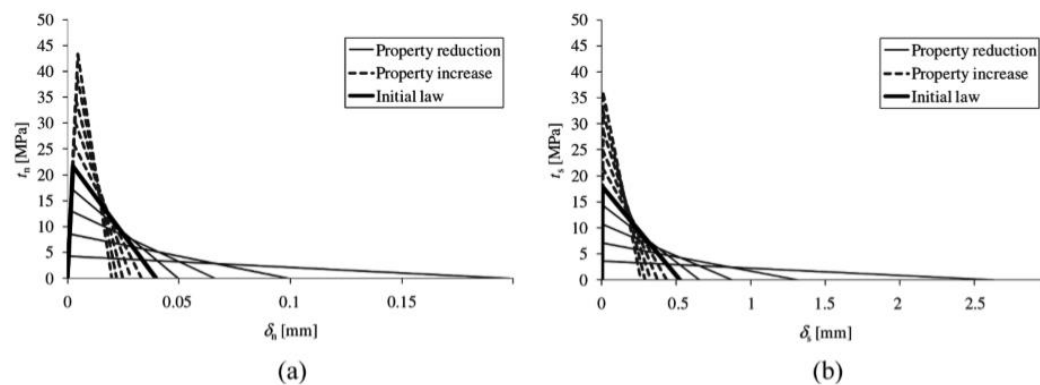


Figura 19 - Lei coesiva triangular para valores de (a) t_n^0 e (b) t_s^0 num intervalo de -80% até +100% em relação ao inicial, com incrementos de 20% [49]

A tenacidade à tração (G_{Ic}) e a tenacidade ao corte (G_{IIc}) representam a área abaixo da curva, pelo que permitem definir os deslocamentos máximos relativos à tração (δ_n^f) e ao corte (δ_s^f). A influência de cada parâmetro está evidenciada na Figura 18, do G_{Ic} na lei de tração e do G_{IIc} na lei de corte, e na Figura 19, do t_n^0 na lei de tração e do t_s^0 na lei de corte. Como expectável, ao variar G_{Ic} e G_{IIc} muda-se o declive da fase de

amaciamento, enquanto t_n^0 e t_s^0 permanecem idênticos. Por outro lado, modificando t_n^0 e t_s^0 , mantendo G_{Ic} e G_{IIc} , influencia bastante o comportamento de amaciamento e os valores de δ_n^f e δ_s^f , respetivamente [49].

Ao influenciarem, como demonstrado, as leis coesivas em modo puro, estes parâmetros vão também influenciar a lei de modo misto, como é evidente. Como referido anteriormente, o comportamento da simulação rege-se por esta lei, como tal a carga máxima que a ligação consegue transmitir, a sua resistência será também afetada. A Figura 20 e a Figura 21 mostram a interferência dos referidos parâmetros coesivos na carga máxima a que a junta consegue resistir. Estas figuras servem de exemplo desta mesma interferência e, como tal, foram escolhidas aquela em que as tenacidades (G_{Ic} e G_{IIc}) foram ambas alteradas em simultâneo e aquela em que o mesmo acontece com as resistências à tração e ao corte (t_n^0 e t_s^0).

Reduzindo os valores de G_{Ic} e G_{IIc} , as simulações tornam-se muito menos precisas, exceto para valores de L_0 muito baixos. Contrariamente, aumentando estes valores, os resultados são pouco afetados. O t_n^0 apresenta baixa influência no geral. Por outro lado, o t_s^0 influencia bastante os valores de $P_{m\acute{a}x} / P_{m\acute{a}x}^0$, principalmente quando o seu valor é reduzido. Aumentando t_s^0 não se regista uma melhoria dos valores de $P_{m\acute{a}x} / P_{m\acute{a}x}^0$ tão notória. Os resultados obtidos, variando ao mesmo tempo t_n^0 e t_s^0 , acabam por ser praticamente iguais aos da variação de t_s^0 apenas, demonstrando bem a sua importância [49]. Esta discrepância faz sentido atendendo ao facto de o adesivo estar essencialmente sujeito a corte. Em todos os referidos parâmetros verifica-se que uma redução do seu valor afeta muito mais os valores de carga que a junta atinge, do que um aumento.

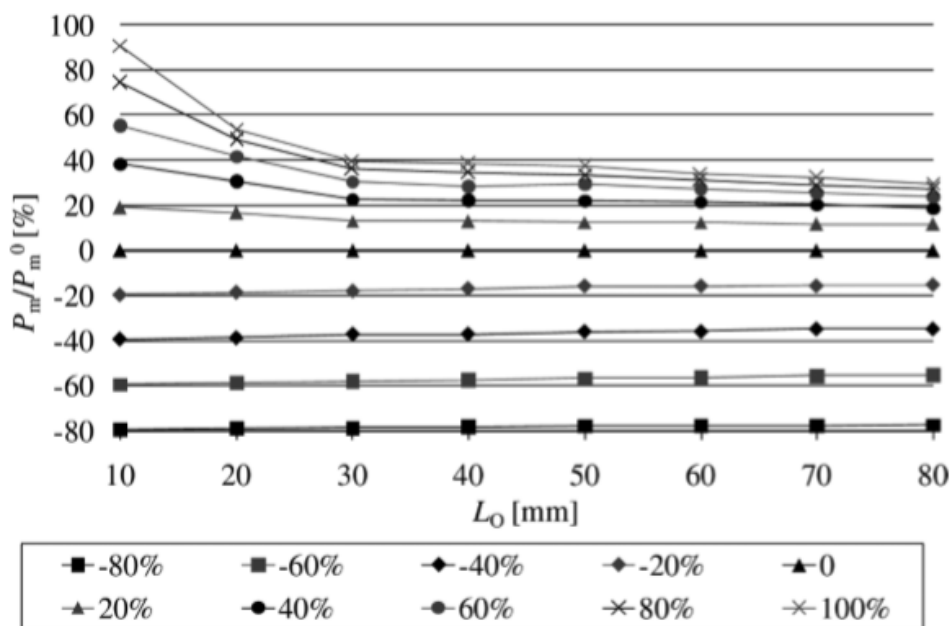


Figura 20 - Percentagem de variação $P_{m\acute{a}x} / P_{m\acute{a}x}^0$ para valores de t_n^0 e t_s^0 , num intervalo de -80% até +100%, com incrementos de 20%

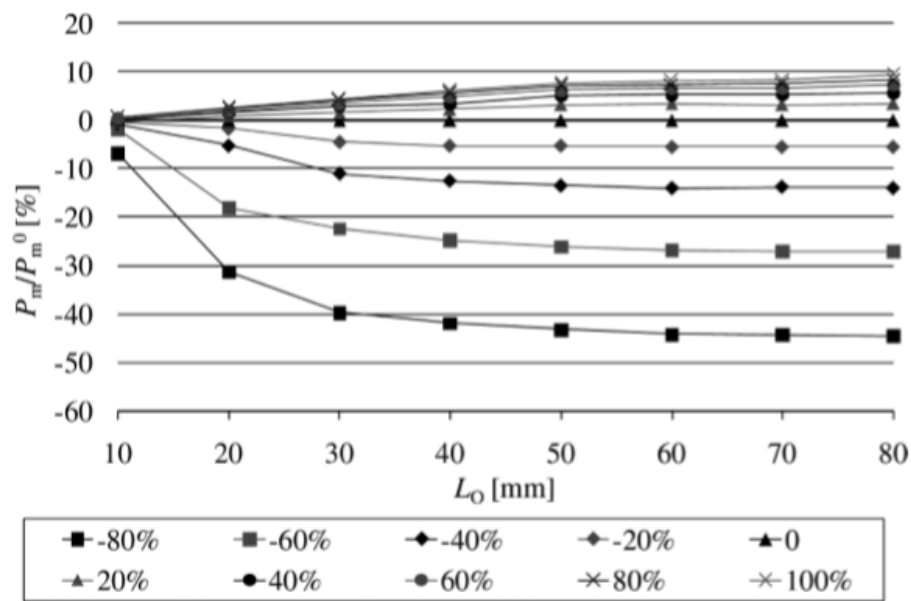


Figura 21 - Percentagem de variação $P_{máx} / P_{máx}^0$ para valores de G_{ic} e G_{lic} num intervalo de -80% até +100%, com incrementos de 20% [49]

Por fim, é necessário referir também a rigidez, materializada por E e G , que constituem também parâmetros coesivos, visto que influenciam a resistência da junta e, do ponto de vista geométrico, definem o declive da primeira reta, que simula o comportamento elástico. Os parâmetros de rigidez possuem maior influência em situações em que seja usado adesivo frágil, uma vez que este tipo de adesivo depende muito do valor de pico. No caso dos adesivos dúcteis, a rigidez tem menor influência, como consequência de estes não dependerem tanto do valor de pico, sendo possível a plastificação depois de atingido este valor e, conseqüentemente uma redistribuição dos esforços, diminuindo o gradiente de tensão [50].

2.2.1.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [51] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. [52] para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [31].

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos

materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [53]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [54] ou do número de ciclos para análises de fadiga [55, 56]. Comparativamente aos MDC e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [57].

Hua et al. [58] propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que permitiu obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. [59] usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de E e do coeficiente de *Poisson* (ν) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

2.2.1.5 *Método de Elementos Finitos Extendido*

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tração e corte correspondentes a $P_{máx}$, respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [60]. Belytschko e Black [61], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no

conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [62]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [63].

Campilho et al. [64] utilizou o MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, coladas com um adesivo dúctil, onde se comparou resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 22). Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

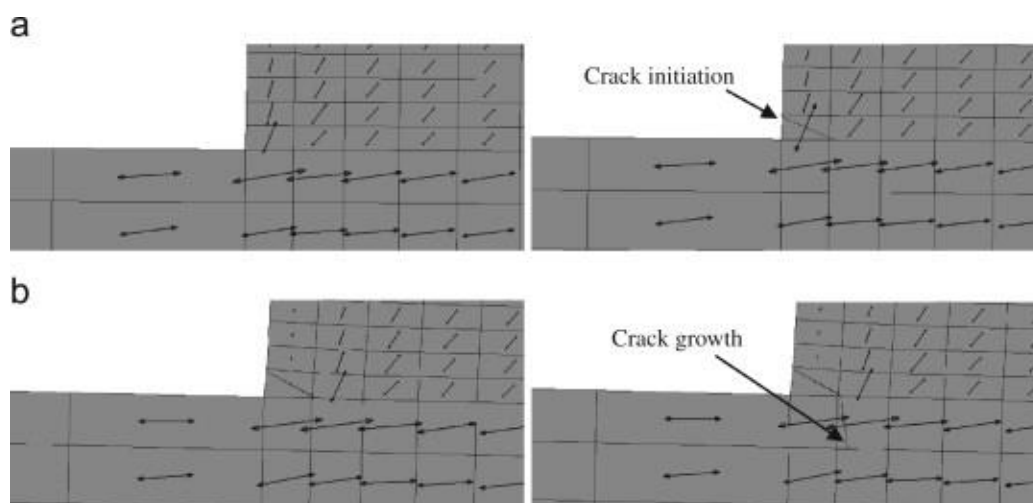


Figura 22 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [64]

2.2.2 Previsão para solicitações dinâmicas

Como referido, as ligações adesivas são bastante utilizadas em várias indústrias. Em algumas destas indústrias é esperado que estas ligações apresentem um desempenho adequado quando sujeitas a impactos, tornando-se necessário tentar perceber e otimizar o comportamento de juntas adesivas sujeitas a cargas com taxa de deformação elevada. O comportamento mecânico dos adesivos pode variar significativamente com a taxa de deformação, e com o objetivo de o tentar perceber, impõe-se que este seja caracterizado em função da mesma. Por exemplo, um adesivo dúctil, quando lhe são impostas cargas estáticas ou quase-estáticas, pode apresentar comportamento frágil quando sujeito a carregamentos consideráveis de forma repentina. Este facto está diretamente relacionado com a capacidade a absorção de energia da junta. Por isto, os testes experimentais são fundamentais, fornecendo resultados mais precisos, que em vários casos, como o exemplificado, podem ser considerados inesperados e imprevisíveis. Estes testes exigem um material adequado e são complicados de executar, sendo difícil e dispendioso replicar as condições de taxa de deformação elevada. Assim, o comportamento de juntas adesivas sujeitas a impacto configura um assunto bastante complexo [65].

Algumas das propriedades mais importantes para conceber uma junta adesiva sujeita a condições de impacto são E , G , t_n^0 , t_s^0 , G_{Ic} e G_{IIc} do adesivo. Além disto, a taxa de deformação depende da tensão de cedência, alongamento e a rigidez. Existem variados testes experimentais adequados a determinar cada uma destas propriedades [65].

O uso de adesivos em estruturas que requerem absorção de energia, como acontece por exemplo na indústria automóvel, faz com que seja fundamental a existência de métodos que permitam prever a resistência das juntas adesivas sujeitas a impacto. Com o objetivo de replicar o comportamento de juntas adesivas acima referido, existem modelos analíticos e modelos numéricos [65].

2.2.2.1 Modelos constitutivos da dependência da taxa de deformação dos adesivos

Os adesivos podem exibir comportamento viscoelástico e viscoplástico que podem ser representados pelo uso de um modelo constitutivo, tal como os MDC [65]. Os seguintes capítulos apresentam de forma resumida os modelos constitutivos existentes para modelação de juntas adesivas solicitadas ao impacto ou de forma dinâmica.

2.2.2.1.1 Modelo Voigt/Maxwell

Os modelos viscoelásticos de Voigt ou Maxwell, que permitem expressar a deformação elásticas de um adesivo em função do tempo, utilizam a soma das tensões em elementos do tipo mola ou amortecedor para modelar o comportamento do adesivo.

Adicionando elementos adicionais, a complexidade destes modelos pode ainda ser maior. Os parâmetros deste modelo devem ser determinados experimentalmente [65].

Sato e Ikegami [66] realizaram um estudo de concentração de tensões e propagação de ondas de impacto em juntas de diferentes geometrias. Para determinar as propriedades viscoelásticas do adesivo, foi usada a formulação de Voigt. Após comparação com resultados experimentais, foi possível concluir que este modelo foi capaz de descrever o comportamento do adesivo sujeito a alta taxa de deformação, principalmente em juntas de chanfro exterior e interior, sendo que em JSS foram obtidas deformações mais complexas [65, 66].

Khan et al. [67] utilizaram uma abordagem semelhante no seu trabalho, usando um modelo diferencial baseado na combinação de elementos de mola e amortecedores lineares e não lineares em função da temperatura e taxa de deformação. O resultado foi a criação de um novo modelo com pequenas alterações empíricas baseadas na observação experimental. Este tipo de modelação foi também utilizado no trabalho de Iwamoto et al. [68] para prever o comportamento à deformação por compressão e sensibilidade à taxa de deformação, conseguindo validar os resultados numéricos por comparação com os resultados experimentais.

2.2.2.1.2 Modelo Cowper-Symonds

Este modelo é amplamente usado para simular a dependência dos materiais da taxa de deformação, e pode ser caracterizado como um modelo elasto-plástico com endurecimento dependente da taxa de deformação [65, 69]. Goglio et al. [70] aplicaram este modelo no estudo da influência da taxa de deformação na resistência à rotura e à compressão num adesivo epóxico. Apesar dos resultados obtidos para taxas de deformação elevadas serem positivos, o mesmo não acontece em taxas de deformação mais pequenas, nem para todo o espetro de velocidades.

2.2.2.1.3 Modelo Johnson-Cook

O modelo Johnson-Cook [71] é um modelo viscoplástico que fornece uma descrição da deformação equivalente de rotura em função da taxa de deformação. Morin et al. [72] utilizaram este modelo para criar um critério de falha em materiais adesivos. Goglio et al. [70] concluiu que este modelo não é tao preciso como o de Cowper-Symonds para taxas de deformação elevadas [65].

2.2.2.1.4 Modelos de sobretensão

Neste género de modelos, o efeito da dependência da taxa de deformação é conseguido permitindo o aumento de tensão além da superfície de cedência independente da taxa de deformação na aplicação da carga, seguido de um

relaxamento de novo até à superfície de cedência, obtendo a dependência da mesma taxa [65].

Chiu e Jones [73] desenvolveram um modelo constitutivo unificado que permite prever o comportamento de um adesivo termofusível. Os resultados experimentais mostram a sua capacidade em reproduzir o comportamento de dependência da taxa de deformação, bem como a fluência e o alívio de tensões.

Zgoul e Crocombe [74] utilizaram um modelo de sobretensão viscoplástico em ensaios de JSS, mostrando a sua validade, à exceção dos ensaios TAST, em que os resultados não foram razoáveis.

2.2.2.1.5 Curvas de fluência e curvas isócronas de tensão-deformação

Um estudo que utiliza curvas de fluência e curvas isócronas de tensão-deformação para modelação e previsão da dependência da taxa de deformação na resistência de juntas adesivas foi realizado por Crocombe [75]. Neste estudo, concluiu-se que as curvas de fluência não se adequam na modelação de taxas de deformação em rampa, que são típicas em solicitações dinâmicas. Por outro lado, a solução baseada em curvas isócronas de tensão-deformação, estas últimas sendo derivadas a partir de resultados experimentais, permitiu uma modelação efetiva para o material e configuração utilizados [65].

2.2.2.2 Modelos numéricos de impacto em juntas adesivas

Os modelos numéricos que permitam simular o comportamento de juntas adesivas sujeitas a impacto estão a ser objeto de grandes pesquisas e estudos, com aplicação direta em indústrias. Existem vários modelos para tentar solucionar o problema, que podem incluir a dependência da taxa de deformação ou efeitos de inércia, que se tornam relevantes e influenciam o comportamento da junta. Os modelos dinâmicos mais complexos têm a capacidade de combinar simulação dos efeitos de inércia com a dependência da taxa de deformação, com o objetivo de identificar as zonas mais críticas no adesivo, com grandes concentrações de tensão, que correspondem naturalmente às zonas onde se vai iniciar a falha. Nestes casos é necessária a determinação de propriedades dos materiais para a taxa de deformação aplicada [65].

Para determinação de um critério de rotura são utilizadas duas abordagens: a resistência dos materiais e a mecânica da fratura. A abordagem de resistência dos materiais é baseada na máxima tensão ou deformação permitida para um dado material, não sendo especialmente adequada a juntas adesivas devido às singularidades das mesmas no que respeita a concentrações de tensão em zonas muito específicas. Contrariamente, a mecânica da fratura pode ser aplicada a essas mesmas singularidades, no entanto, este modelo requer conhecimentos acerca dos fatores de

intensidade de tensões críticas e assume que para que haja iniciação de rotura, já deve existir uma fenda no adesivo ou no substrato, o que nem sempre se verifica [65].

Alguns autores utilizaram os modelos de dependência da taxa de deformação de von-Mises e de Drucker-Prager para simular numericamente o comportamento em alguns testes específicos. Contudo, quando comparados com os resultados experimentais, as conclusões não são muito satisfatórias [65].

Mais recentemente, as duas abordagens têm sido combinadas em MDC, com vista a minimizar as falhas de ambas. Estes modelos podem ser implementados com sucesso para baixas espessuras, o que os torna ideais para juntas adesivas. Como referido anteriormente, os MDC seguem leis coesivas de tração-separação e reproduzem a rigidez e a degradação do elemento, podendo estas leis apresentar variadas formas, sendo as mais comuns a triangular e a trapezoidal. Carlberger e Stigh [76] demonstraram a validade desta abordagem na previsão de resistência ao impacto. Os softwares comerciais mais modernos conseguem prever com precisão esta resistência, usando modelos coesivos dinâmicos complexos com dados de dependência da taxa de deformação, como demonstrado por May et al. [77] Clarke et al. e [78] Avendaño et al. [79] nos seus estudos [65].

2.3 Comportamento de juntas adesivas ao impacto

Como anteriormente referido, o comportamento de juntas adesivas quando solicitadas a impacto é um assunto complexo que é alvo de muitas pesquisas e estudos, com o objetivo de entender os fatores que controlam a resistência das mesmas nestas condições. Entre estes fatores encontram-se, por exemplo, propriedades dos adesivos, dos substratos, geometria da junta e tipo de carregamento [65].

2.3.1 Avaliação experimental

Com recurso a uma barra de Hopkinson modificada, Yokoyama e Shimizu [80] procederam a ensaios dinâmicos com o objetivo de determinar a resistência ao corte de juntas adesivas sujeitas a impacto em função da taxa de carregamento, espessura do adesivo e materiais dos aderentes. Nestes testes foram utilizados aderentes de alumínio e de aço, com um adesivo de cianoacrilato. Relativamente à espessura do adesivo, esta revelou grande influência no desempenho das juntas, e constatou-se que a resistência ao impacto e a resistência estática das juntas foi aumentando até 25 μm de espessura, valor a partir do qual as juntas perdem resistência. Este fenómeno verificou-se em substratos de ambos os materiais (Figura 23 e Figura 24), permitindo encontrar uma espessura de referência para este tipo de adesivos. Outra conclusão deste estudo é que a resistência depende significativamente do material do substrato, tendo o aço atingido valores mais elevados do que o alumínio. Na Figura 25 são apresentados valores de tensão de corte atingidos para os diferentes materiais de

aderente em função da taxa de carregamento. As tensões de corte máximas aumentam com a taxa de carregamento, ainda que no alumínio esta influência seja menos considerável.

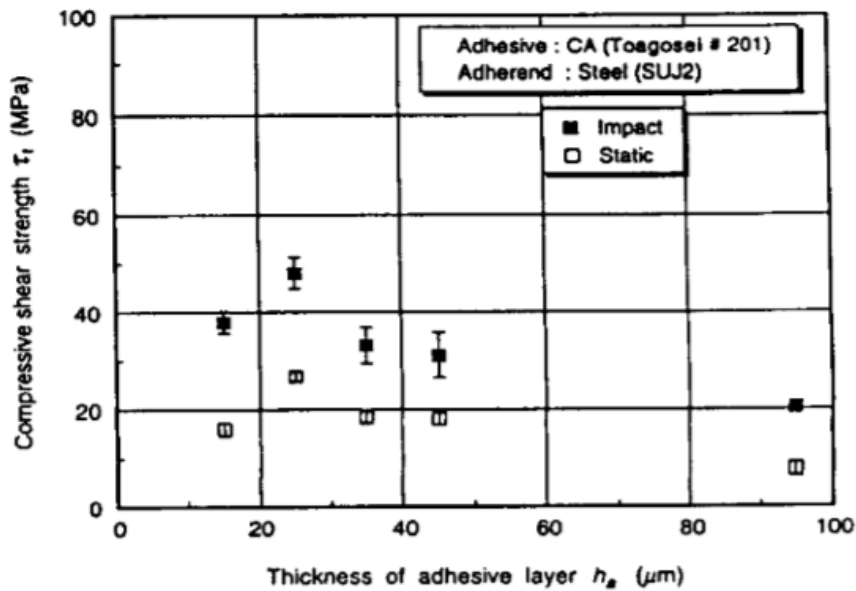


Figura 23 - Influência da espessura da camada de adesivo na tensão de corte, para substratos de aço [80]

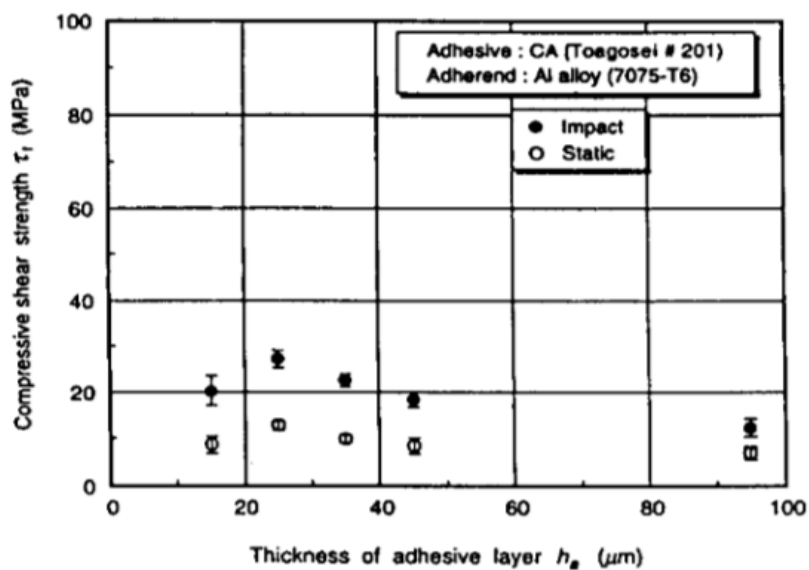


Figura 24 - Influência da espessura da camada de adesivo na tensão de corte, para substratos de alumínio [80]

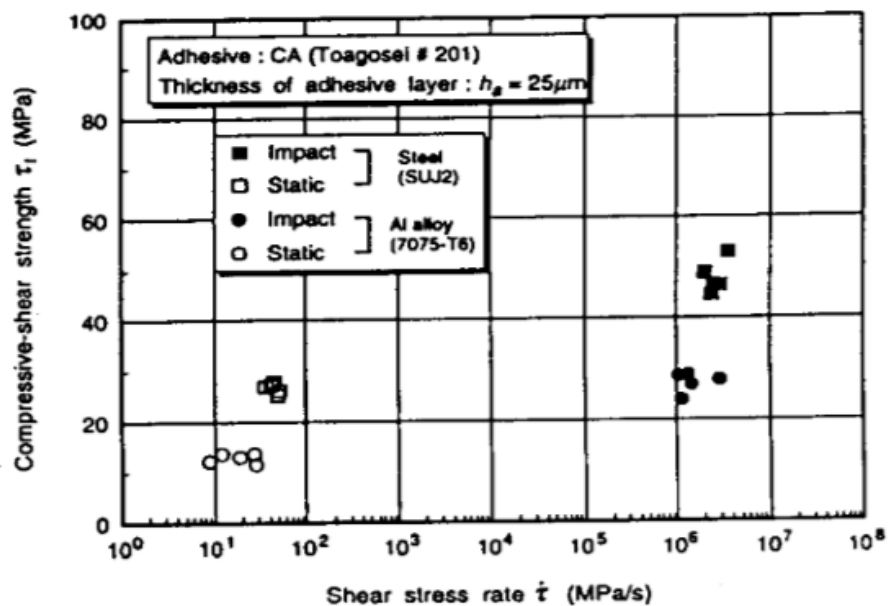


Figura 25 - Influência da taxa de carregamento na tensão de corte, para substratos de alumínio e aço [80]

Vários autores referem também a importância dos substratos em juntas adesivas sujeitas a impacto, uma vez que, utilizando um adesivo resistente e dúctil, a deformação plástica do aderente é que vai determinar a resistência última e a energia absorvida. A resistência e energia absorvida não dependem apenas das propriedades do adesivo, mas sim de toda a junta. Tipicamente, adesivos rígidos apresentam cargas máximas mais baixas e baixa energia absorvida, uma vez que não têm capacidade de manter a coesão durante o processo de impacto. Uma elevada absorção de energia é atingida com adesivos tenazes em conjunto com aderentes dúcteis. Por outro lado, adesivos tenazes mas em conjunto com aderentes rígidos fornecem alta resistência à junta, no entanto não são juntas capazes de absorver uma quantidade significativa de energia [65].

Zubaidy et al. [81] analisaram juntas adesivas de cobre-junta dupla testadas ao impacto. A cobre junta foi assegurada por um polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP), ligado com um adesivo epóxico entre camadas e aos aderentes de aço. Efetuaram ensaios com uma e três camadas de CFRP em condições quase-estáticas e dinâmicas. Os resultados (Figura 26) evidenciam uma resistência máxima acrescida nos ensaios dinâmicos, sendo que este facto é mais notório nas juntas com três camadas de CFRP. A influência do comprimento de sobreposição não é explícita uma vez que não se verifica uma tendência clara em todas as situações.

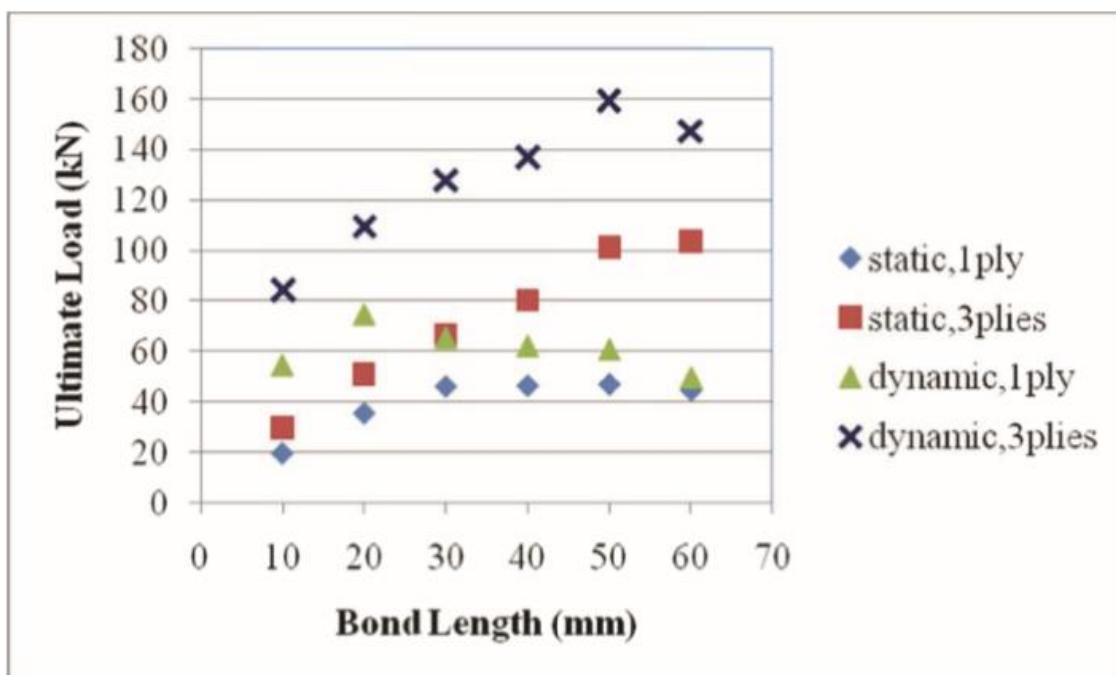


Figura 26 - Influência do número de camadas de CFRP e do comprimento de sobreposição na resistência da cobre-junta dupla [81]

A resistência ao impacto de juntas adesivas e a dependência da taxa de deformação pode ainda ser influenciada por fatores externos como a temperatura ou, também, por fenómenos de fadiga. A temperatura influencia o comportamento do adesivo, na medida em que este se pode apresentar mais dúctil ou mais frágil. Por outro lado, a temperatura pode ainda, ao nível dos substratos, influenciar o seu desempenho, alterando a sua estrutura cristalina no caso de aderentes poliméricos. Apesar de ainda carecer de informação, os fenómenos de fadiga parecem ocorrer para pequenos, mas repetidos impactos. As propriedades mecânicas do adesivo parecem influenciar este tipo de acontecimento [65].

2.3.2 Previsão por métodos numéricos

Como referido, o processo de modelação de comportamento de juntas adesivas ao impacto implica, normalmente, o uso de modelos dinâmicos, sendo que, para altas taxas de deformação, a influência dos efeitos de inércia torna-se relevante e adiciona tensões na junta que devem ser consideradas [65].

Harris e Adams [82] estudaram o comportamento de juntas adesivas de sobreposição simples, compostas por quatro adesivos epóxicos e três aderentes diferentes de alumínio, com base na modelação das mesmas, em condições quase-estáticas e dinâmicas. Os autores não consideraram os efeitos de inércia, apenas as propriedades de dependência da taxa de deformação, o que demonstraram ser válido para baixas taxas de carregamento e pequenas massas. Em alternativa, se os materiais não forem

muito sensíveis à taxa de deformação e as velocidades de impacto forem altas, utilizam-se modelos com propriedades quase-estáticas em conjunto com os efeitos de inércia com o objetivo de melhorar a precisão na previsão das tensões instaladas. De referir que a maior parte dos substratos metálicos não apresentam grande dependência da taxa de deformação [65].

Com o objetivo de estudar as ondas de propagação de tensão e a distribuição de tensões na interface em JSS submetidas a solicitações de impacto, Liao et al. [83] utilizaram a modelação 3D, tendo em conta a sensibilidade à taxa de deformação do adesivo em deformações elasto-plásticas. O modelo constitutivo da dependência da taxa de deformação escolhido foi o de Cowper-Symonds. Através do MEF examinou-se a influência do módulo de Young dos substratos, do comprimento de sobreposição, da espessura da camada adesiva e também da velocidade inicial de impacto nas ondas de propagação de tensão e na distribuição de tensões, procedendo-se também à análise da resistência das juntas. Em paralelo foram realizados ensaios experimentais, recriados pelas simulações, para comparação de resultados, permitindo a validação deste modelo para o adesivo em estudo. Neste trabalho conclui-se que, para solicitações ao impacto, a rotura tem início no centro (em relação à largura) da junta adesiva. Nas juntas sujeitas a impacto, à medida que a velocidade inicial converge para zero, a distribuição de tensões normais aproxima-se dos valores encontrados para o caso estático. Apesar desta aproximação, as tensões são sempre superiores no caso de impacto (Figura 27), devendo estas juntas cumprir requisitos mais exigentes.

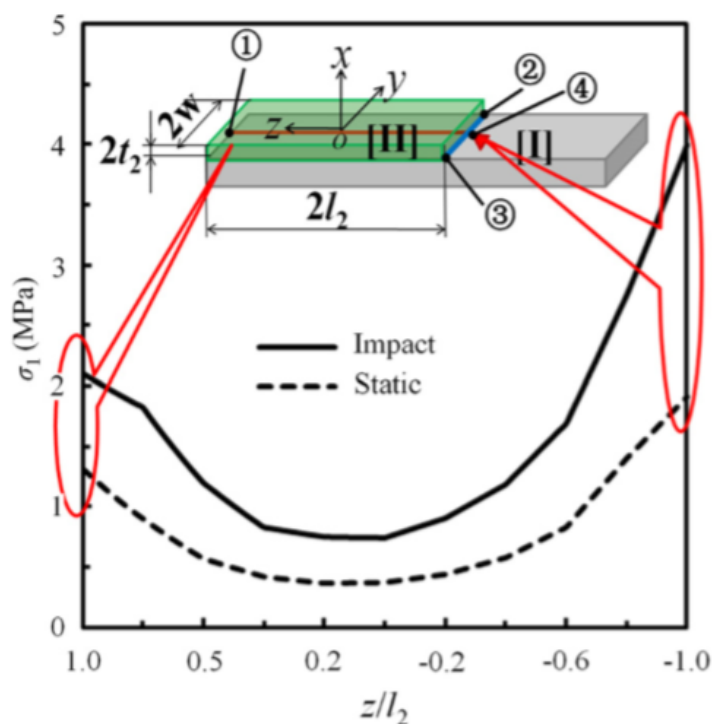


Figura 27 - Comparação da distribuição de tensões normais na interface entre caso de impacto e estático [83]

No entanto, a tendência de ambas as curvas é a mesma, apresentando picos de tensão nas extremidades. Verifica-se ainda um aumento das tensões normais, para juntas sujeitas ao impacto, relacionado com o aumento do módulo de Young ou da velocidade inicial de impacto ou com a diminuição seja da espessura do adesivo, seja do comprimento de sobreposição.

Carlberger e Stigh [76] utilizaram os resultados de soluções analíticas de forma fechada para comparar com resultados obtidos por simulações numéricas, que foram obtidas a partir de diferentes modelos. O MEF permitiu reproduzir o comportamento das juntas (Figura 28). Os autores concluíram ainda que as características do comportamento da onda de propagação e reflexão são adequadamente simuladas por MDC, e que as leis de tração-separação devem contemplar a dependência da taxa de deformação para serem mais realistas. De referir ainda que se a carga aplicada for muito elevada, a camada de adesivo pode entrar em rotura logo no primeiro período.

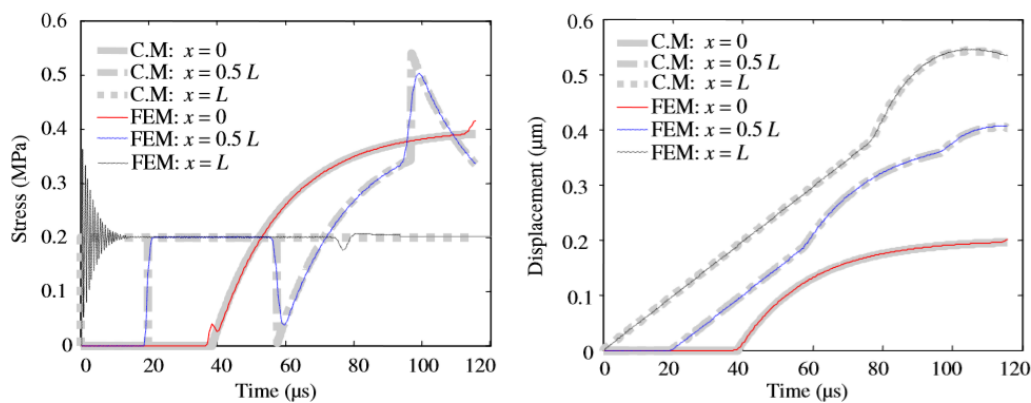


Figura 28 - Comparação de tensões e deslocamentos entre soluções analíticas de forma fechada (CM) e MEF (FEM) [76]

Com vista a estudar a influência da geometria e do material dos aderentes fabricados em compósito na distribuição de tensões de corte na camada adesiva numa junta de sobreposição dupla, Hazimeh et al. [84] realizaram um estudo pelo MEF em condições estáticas e de impacto. Este trabalho permitiu concluir que as heterogeneidades estruturais ou geométricas são independentes do tempo, uma vez que estas não sofrem alteração do caso quase-estático para o caso de impacto. Por outro lado, as heterogeneidades devido ao efeito das ondas de propagação são elevadas no início da simulação. No entanto, estas desaparecem em poucos microssegundos, momento a partir do qual se obtiveram resultados próximos entre caso estático e de impacto. Conclui-se que a tensão de corte média aumentou com o incremento da espessura dos substratos, do módulo de Young do adesivo ou da fração volúmica de fibras no aderente. Por outro lado, diminuiu com o incremento da espessura do adesivo e do comprimento de sobreposição. O valor das tensões de corte médias mais elevado é alcançado quando a orientação das fibras é igual à da carga (Figura 29).

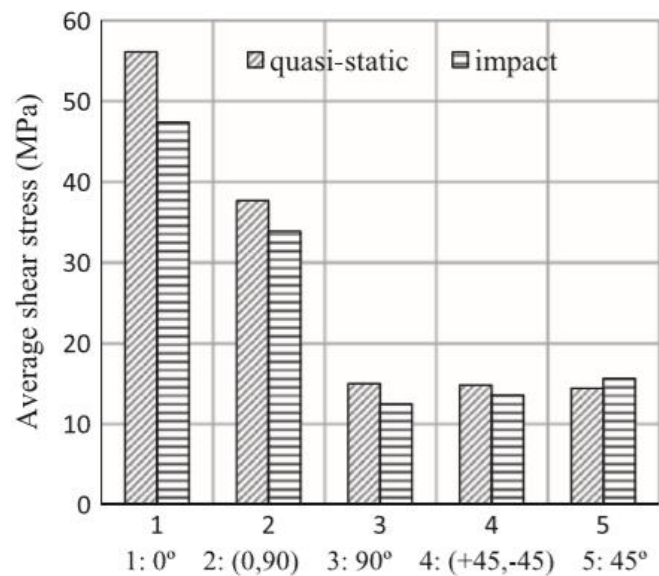


Figura 29 - Efeito da orientação das fibras na tensão de corte média [84]

Araújo et al. [85] usaram JSS, ligadas por um adesivo epóxico, com diferentes comprimentos de sobreposição para realização de ensaios experimentais e numéricos em condições quase-estáticas e de impacto, com vista ao estudo e análise de vibrações. Em ambas as condições, os modelos numéricos foram validados e os seus resultados mostram, tal como os resultados experimentais, um aumento de resistência com o aumento do comprimento de sobreposição (Figura 30). Em situações de impacto foi necessária uma carga maior até à rotura, verificando-se a sensibilidade à taxa de deformação por parte do adesivo usado. Relativamente ao amortecimento de vibrações, foram utilizados substratos em CFRP e em aço, mostrando os primeiros um melhor comportamento.

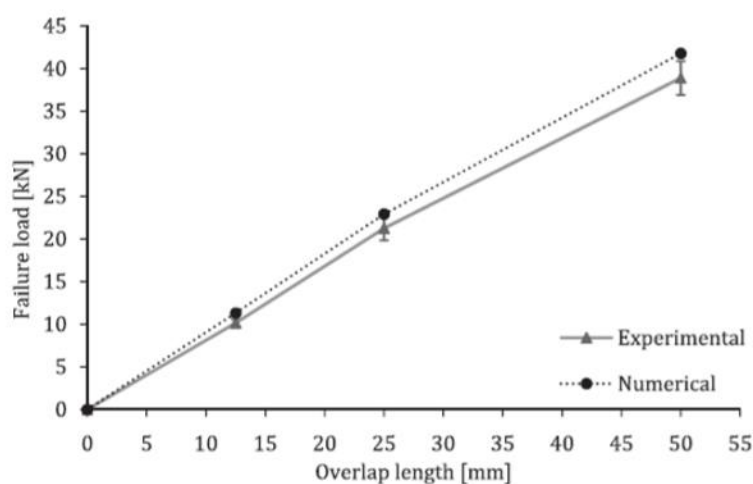


Figura 30 - Comparação entre resultados numéricos e experimentais e influência do comprimento de sobreposição em condições quase-estáticas [85]

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Técnica numérica para previsão do comportamento ao impacto
- 3.2 Estudo numérico

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Técnica numérica para previsão do comportamento ao impacto

Com o objetivo de estudar a influência dos parâmetros coesivos no comportamento de JSS sujeitas a impacto, recorreu-se a uma análise MEF com MDC. Neste capítulo pretende-se demonstrar a validade dos modelos usados, bem como descrever os elementos utilizados e as condições em que se procedeu à referida análise.

3.1.1 Condições da análise numérica

A análise numérica foi realizada com recurso ao *software* Abaqus® [86], uma vez que este possibilita a utilização de MDC. As condições de análise numérica usadas nesta dissertação foram as descritas por Silva [1]. O modelo numérico foi criado numa parte 2D deformável, permitindo a simplificação do mesmo e redução do número de elementos de malha. As propriedades dos adesivos aplicadas no modelo foram convertidas na lei tração-separação triangular de MDC, introduzindo-as como *traction separation* usando *quads damage*. Para simplificar o modelo, consideraram-se substratos de aço de alta resistência, pelo que não é necessário ter em consideração a sua deformação plástica, evitando a introdução de propriedades de plasticidade para os aderentes na validação.

Com vista a obter as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) (permitem a análise da resistência da junta, dos deslocamentos, da influência de parâmetros, entre outros), foram requisitados os parâmetros RF, que regista as reações em cada momento, e U, que disponibiliza o deslocamento, em *field outputs*. Vários outros parâmetros foram também requisitados como STATUS, CStress, LE, PEEQ, A, S, SDEG, EVF, PE e V. Alguns destes parâmetros são bastante relevantes para a análise dos resultados obtidos, sendo um dos mais importantes o SDEG que fornece informação sobre a degradação dos elementos coesivos, permitindo observar a distribuição e propagação do dano na camada adesiva (Figura 31).

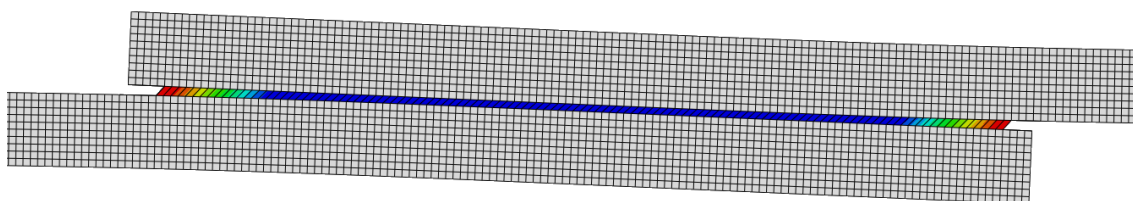


Figura 31 - Exemplo de visualização de resultado SDEG

Outros parâmetros fundamentais são o PEEQ e o S, que permitem identificar a deformação plástica e tensão equivalentes nos aderentes e a sua respetiva localização.

Na criação dos diferentes tipos de materiais são atribuídas as propriedades respetivas que regem o seu comportamento. Após a definição das diferentes secções do modelo, a cada uma destas é atribuído um material. Na Figura 32 é mostrada a atribuição do adesivo a verde. Às restantes secções da figura foram atribuídas as propriedades do aderente.



Figura 32 - Atribuição de materiais no modelo de validação

Neste modelo foram usados dois tipos de elementos diferentes, ambos explícitos. Na Figura 33 é possível observar o controlo de malha, onde está representada a amarelo a secção do adesivo com um controlo de malha do tipo *sweep*, à qual foram atribuídos elementos coesivos do tipo COH2D4 (duas dimensões e quatro nós). Todas as outras secções foram modeladas com um controlo de malha estrutural (a verde na Figura 33), com recurso a elementos bidimensionais quadriláteros de estados plano de deformação, do tipo CPE4R.



Figura 33 - Controlo de malha no modelo de validação

Em termos de dimensões, a malha aplicada ao modelo de validação foi uniforme. Como referido todos os elementos são quadriláteros, apresentando 0,2 mm de lado (Figura 34). A escolha desta dimensão prende-se com a espessura do adesivo, uma vez que, para a análise por MDC, esta secção foi modelada com elementos coesivos pela aproximação contínua descrita no capítulo 2.2.1.3. Como tal, o objetivo passa por deixar a secção do adesivo apenas com uma única linha de elementos. Neste modelo de validação, destas condições resultam 13250 elementos do tipo CPE4R e 125 elementos do tipo COH2D4, perfazendo um total de 13375 elementos.

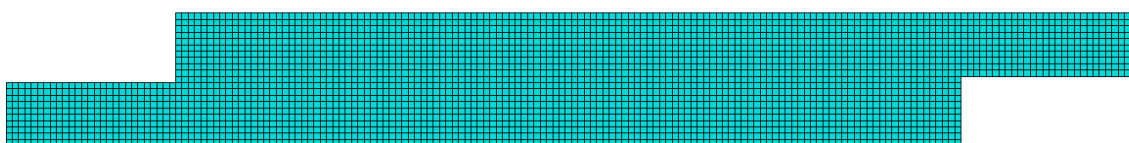


Figura 34 - Malha do modelo de validação

Com o objetivo de simular o ensaio de impacto, foram criadas condições fronteira e solicitações que pretendem recriar o comportamento da junta sujeita a impacto (Figura 35). Assim, efetuou-se um bloqueio de U_1 , U_2 e U_3 , criando um encastramento na extremidade, oposta à ligação, do substrato inferior. Enquanto U_1 e U_2 impedem movimentos de translação segundo os eixos X e Y , U_3 restringe as rotações em torno do eixo Z . Por forma a reproduzir as condições experimentais, também o substrato superior foi restringido ao nível de deslocamentos no eixo Y . Este bloqueio de U_2 foi introduzido na extremidade oposta à ligação adesiva, junto ao contacto com a secção que representa a massa do ensaio experimental (apresentada a vermelho na Figura 35). As dimensões e a densidade desta secção foram calculadas de forma a igualar a massa utilizada nos ensaios.

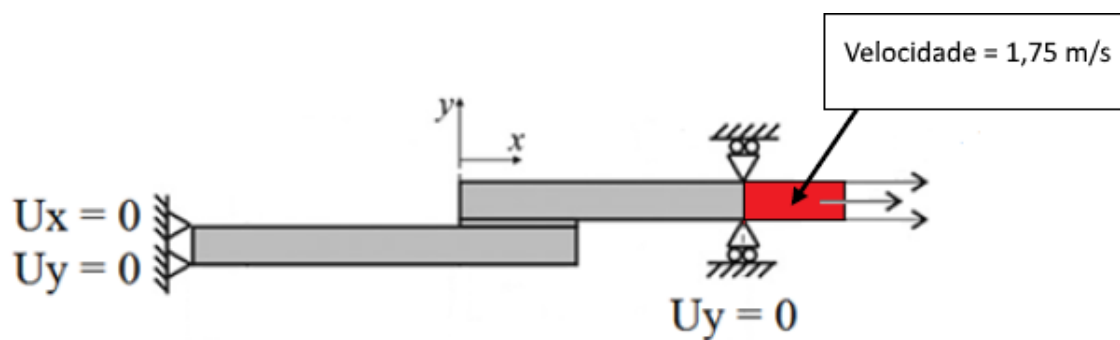


Figura 35 – Condições de fronteira e solicitações aplicadas [1]

Não sendo possível simular o impacto em si, o objetivo passa por solicitar a junta de maneira a esta ser obrigada a absorver a mesma energia do ensaio experimental. Para tal, é aplicado um campo de velocidade uniforme na secção representativa da massa (região destacada na Figura 36), velocidade esta calculada para este efeito, como explicado no capítulo 3.1.3.3.



Figura 36 - Aplicação de velocidade inicial

Como referido, com a finalidade de traçar as curvas $P-\delta$, é necessário um registo quer da força, quer dos deslocamentos a cada instante. Como tal, foi selecionado um ponto do substrato superior, junto ao extremo onde se encontra a secção representativa da massa, em que é registado o deslocamento U_1 , no eixo X . Para o registo da carga a que a junta está sujeita, somou-se todas as forças de reação que ocorrem na aresta do encastramento.

As reações e os deslocamentos registados são requisitados no *history outputs* e este registo ocorreu a cada 100 incrementos, com a finalidade de reduzir o número de pontos dos resultados para um tratamento de dados mais simples e ainda assim obter boa resolução para identificação dos picos de carga. Por sua vez nos *field outputs* foi requisitada uma representação gráfica com uma evolução temporal de períodos de 50 μ s. O tempo da simulação numérica do modelo de validação foi de 5 ms e de geometria não linear, sendo o espaço de tempo correspondente a cada incremento controlado pelo *software*, que garante que esse mesmo intervalo de tempo não excede o comprimento de cada elemento para a velocidade de propagação da onda de impacto aplicado.

3.1.2 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 [42]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [39], linear parabólico [38], exponencial [40], polinomial [41] e trapezoidal [34]. 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 [43]. 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.

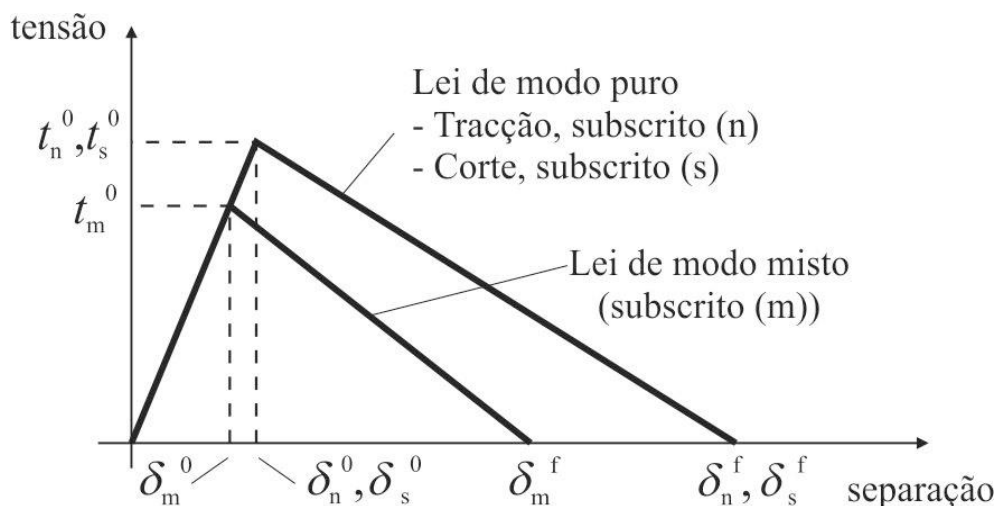


Figura 37 – Lei triangular do modelo de dano coesivo

Nesta lei, distinguem-se dois modos. O modo puro caracteriza-se por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar a tração e corte [46]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente direta de deformação e de uma

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

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

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja uma formulação local, 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 [87]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

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

onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [46]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério de tensão nominal quadrática, expresso pela seguinte expressão:

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

$\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [88]. Quando t_m^0 é atingido (Figura 37), pela igualdade da equação 3, a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos (δ_m^f na Figura 37) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC}

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

3.1.3 Validação da técnica numérica

3.1.3.1 Geometria da junta

Tendo por objetivo a validação do modelo numérico, a geometria e as dimensões da junta são semelhantes às utilizadas nos ensaios experimentais por Silva [1]. Esta modelação contempla uma JSS com dois substratos iguais, com um comprimento de sobreposição de 25 mm, uma camada de adesivo com 0,2 mm de espessura, como já foi referido, e uma largura de todos os constituintes da junta de 25 mm (Figura 38). A geometria da junta usada nos ensaios experimentais tem por base as normas ASTM D1002 [89] e ISO 4587 [90].

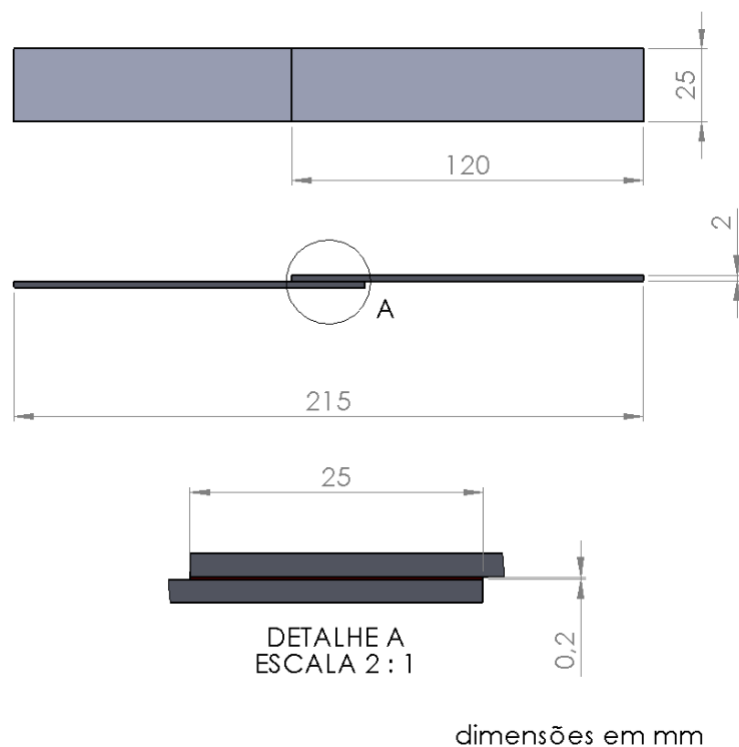


Figura 38 - Geometria da JSS de validação [91]

3.1.3.2 Materiais utilizados

3.1.3.2.1 Aderentes

De modo a que a resistência máxima atingida apenas dependesse do adesivo utilizado, os aderentes foram fabricados no aço DIN 55 Si7. Como referido anteriormente, trata-se de um aço de alta resistência, garantindo que não existe deformação plástica dos aderentes durante o ensaio, pelo que na validação do modelo numérico não foram consideradas propriedades de deformação plástica dos aderentes. A Tabela 3 apresenta as propriedades dos aderentes.

Tabela 3 - Propriedades do aderente [1]

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

3.1.3.2.2 Adesivos

As propriedades de adesivos usadas neste trabalho numérico são as mesmas utilizadas por Silva [1] no seu trabalho experimental. Para isso foram selecionados quatro adesivos com propriedades distintas, sendo que dois dos adesivos têm uma elevada ductilidade, enquanto os dois restantes são adesivos de elevada rigidez.

O primeiro adesivo dúctil é o Mumentive® RTV106. Trata-se de um silicone mono-componente selante e auto-nivelante que vulcaniza à temperatura ambiente. Tem como principais características a sua elevada flexibilidade a baixa temperatura, bom desempenho a temperaturas elevadas, resistência ao meio ambiente e agentes químicos e é também um bom isolante elétrico. Destina-se a selar elementos sujeitos a elevadas temperaturas ou nos quais seja necessário um bom isolamento elétrico [92].

O segundo adesivo dúctil é um adesivo acrílico estrutural bi-componente, 3M® DP8005. É um adesivo de cura muito rápida, atingindo boa resistência mecânica em poucos minutos. O objetivo deste adesivo é substituir ligações mecânicas tais como parafusos e rebites. Devido ao facto de ser possível utilizar este adesivo em polímeros com baixa energia de superfície, este é também indicado para evitar tratamentos de superfície ou ataques químicos que seriam necessários na utilização de outros adesivos. Tem integrado na sua constituição esferas de vidro com um diâmetro de 0,2 mm de modo a controlar a espessura da camada adesiva [93].

Passando para um adesivo frágil produzido pela Huntsman®, o Araldite® AV138 é um adesivo bi-componente. A resina epóxi tem de ser aplicada com o endurecedor HV998 e é capaz de curar a baixas temperaturas. A sua resistência a elevadas temperaturas de trabalho aliada à baixa emissão de gases faz com que seja um adesivo indicado para aplicações em telecomunicações, eletrónica e aeroespacial [94].

Por último, é também utilizado neste trabalho o adesivo epóxi híbrido XNR6852 E-2 produzido pela Nagase Chemtex®. Trata-se de um protótipo de formulação do adesivo XNR6852, aqui na sua terceira formulação. Destina-se em especial à indústria automóvel para ligação entre componentes CFRP ou para ligar CFRP a ligas metálicas assim como para a indústria aeroespacial para aplicação em fibras metálicas. Devido às necessidades específicas destas indústrias, este adesivo está formulado de modo a potenciar a tenacidade para que seja capaz de absorver grandes quantidades de energia quando solicitado ao impacto mantendo uma elevada resistência e rigidez. Possui boa resistência ao arrancamento [1, 33].

Na Tabela 4 encontram-se as propriedades mecânicas para condições de ensaio estático. Foram utilizadas diversas metodologias de ensaio para determinar as propriedades dos adesivos utilizados. Os valores de E e t_n foram determinados experimentalmente através de ensaios de tração e G e t_s através de ensaios de corte (TAST). As energias de fratura G_{Ic} e G_{IIc} foram determinadas através de ensaios DCB e ENF, respetivamente.

Tabela 4 – Propriedades estáticas dos adesivos

Adesivo	RTV106 [95]	DP8005 [42, 96]	AV138 [97]	XNR6852 E-2 [1]
E [MPa]	1,6	590	4890	1742
G [MPa]	0,86	159	1560	645,2
t_n [MPa]	2,3	6,3	41,0	42,9
t_s [MPa]	1,97	8,4	30,2	28,7
G_{Ic} [N/mm ²]	2,73	1,1	0,35	-
G_{IIc} [N/mm ²]	5	6	4,91	18
ρ [g/cm ³]	1,07	1,06	1,7	1,5
ν	-	0,3 ^a	0,35 ^b	0,4 ^c

^a valor estimado [3]; ^b valor do fabricante; ^c valor típico para adesivos epóxicos [98]

As propriedades a diferentes velocidades de ensaio foram determinadas no decorrer do trabalho de Silva [1] e podem ser consultadas na Tabela 5. As propriedades a 1 mm/min e 100 mm/min foram determinadas por resultados de ensaios experimentais. Por sua vez, os resultados a 105000 mm/min – correspondente a 1,75 m/s – resultam de extrapolação logarítmica [74] a partir das propriedades a menor velocidade de ensaio.

Tabela 5 - Propriedades dos adesivos em função da velocidade [1]

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

* entre parêntesis valores estimados

3.1.3.3 Ensaios de impacto

O conceito deste ensaio experimental de impacto é deixar cair um peso, a uma determinada altura, que transfere a energia do seu impacto ao substrato inferior, onde está fixado. O peso é guiado para garantir um correto alinhamento no momento do impacto. Por sua vez o substrato superior está fixado por uma amarra e um parafuso, o que se traduz no encastramento acima referido. Neste sistema de retenção encontra-se também uma célula de carga que permite o registo das reações à solicitação de impacto (Figura 39). Por forma a garantir o alinhamento vertical desejado é utilizado um calço, reduzindo assim a possibilidade de aplicação de cargas excêntricas. O ensaio descrito foi efetuado por Silva [1] com recurso ao equipamento Rosand® Instrumented Falling Weight Impact Tester type 5 HV.



Figura 39 - Sistema de fixação para ensaio ao impacto (adaptado de [99])

Como referido, de forma a replicar as condições do ensaio experimental de impacto, foi adicionada uma secção suplementar para representar uma massa (identificada a vermelho na Figura 35) onde foi aplicado um campo de velocidade constante (Figura 36). Esta solução decorre do facto de não ser possível na simulação numérica ter em conta a altura a que o peso cai. Como tal, para que se consiga simular as condições de ensaio e os resultados sejam fiáveis pretende-se aplicar nos modelos numéricos a mesma energia de impacto. Com vista a reproduzir os ensaios experimentais e modelos numéricos realizados por Silva [1], a energia de impacto desejada é de 40 J.

Utilizando a equação (5) para uma energia de impacto correspondente a 40 J obtém-se um valor de altura de queda correspondente de 15,7 cm.

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

onde E representa a energia de impacto aplicada, m a massa do peso fixado ao aderente inferior, g corresponde à aceleração da gravidade e h_0 representa a altura de queda do peso. Não sendo possível considerar a distância de queda, torna-se necessário a utilização da equação (6) para obter a velocidade no momento do impacto. Para as condições deste ensaio, resulta numa velocidade de 1,75 m/s.

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

onde v corresponde à velocidade do peso no momento do impacto.

A densidade do material atribuído ao peso nas simulações numéricas foi devidamente calculada e ajustada por forma a manter as dimensões parecidas ao substrato para que a solitação ocorra ao longo da totalidade do mesmo. Assim, no modelo de validação

utilizou-se 2 mm de espessura e 25 mm de largura, tendo, então, a densidade sido ajustada para recriar um bloco com cerca de 26 kg usado nos ensaios experimentais.

3.1.3.4 Resultados obtidos

Para validar o modelo numérico utilizado é necessária a comparação com os resultados de referência obtidos por Silva [1]. O primeiro adesivo em estudo é o RTV106, sendo apresentada a sua curva $P-\delta$ na Figura 40.

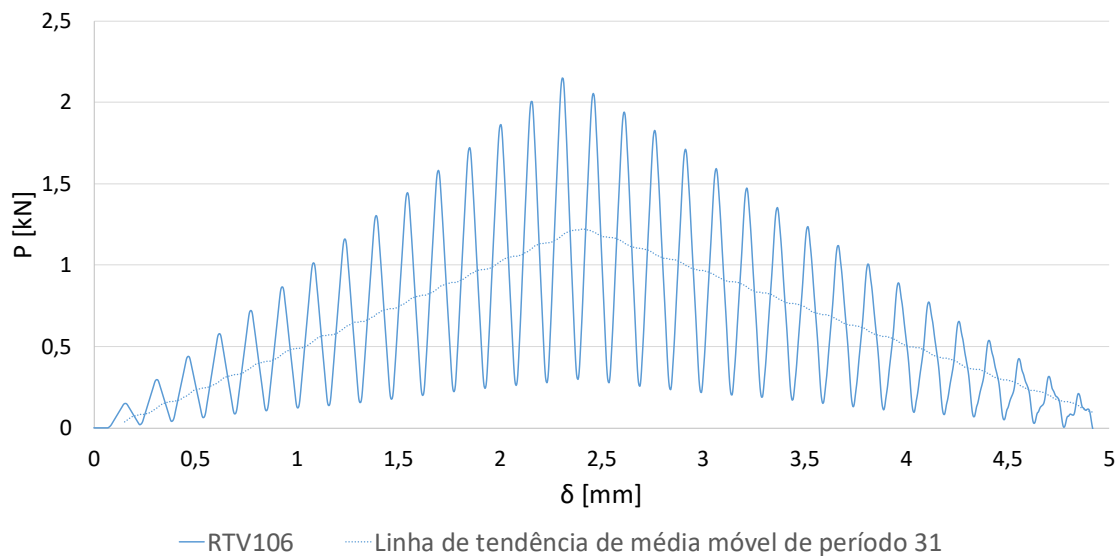


Figura 40 – Curva $P-\delta$ de validação do adesivo RTV106

Com a utilização do adesivo RTV106, ao longo do deslocamento a que o aderente superior foi sujeito, encontra-se uma variação bastante acentuada nos resultados, não se assemelhando esta curva à curva de referência numérica. Para fazer face a esta situação aplicou-se uma linha de tendência de média móvel de período igual a 31, conseguindo assim chegar a um perfil da curva idêntico. Esta semelhança é mostrada com ambos os resultados a apresentarem o mesmo deslocamento máximo e o mesmo deslocamento correspondente à carga máxima. Estes valores encontrados são ainda muito semelhantes aos valores de referência numérica. O deslocamento registado quando ocorre a carga máxima é semelhante nas referências experimental e numérica. No entanto, no que diz respeito ao deslocamento máximo atingido, o resultado numérico é superior em relação ao experimental.

A Figura 41 mostra os resultados das cargas máximas obtidas nas diferentes situações. A primeira conclusão a retirar é que todos os modelos numéricos apresentam valores substancialmente mais baixos do que o resultado experimental. Antes de ser aplicada a linha de tendência à curva $P-\delta$, o resultado numérico é mais elevado, situando-se, ainda assim, 51% abaixo da referência experimental. Após a introdução da linha de tendência, o resultado aproxima-se bastante da referência numérica, estabelecendo-

se uma diferença menor do que 1% entre ambos. No entanto, esta aproximação à referência numérica reflete um afastamento do valor de referência encontrado experimentalmente, aumentando a diferença para os 72%.

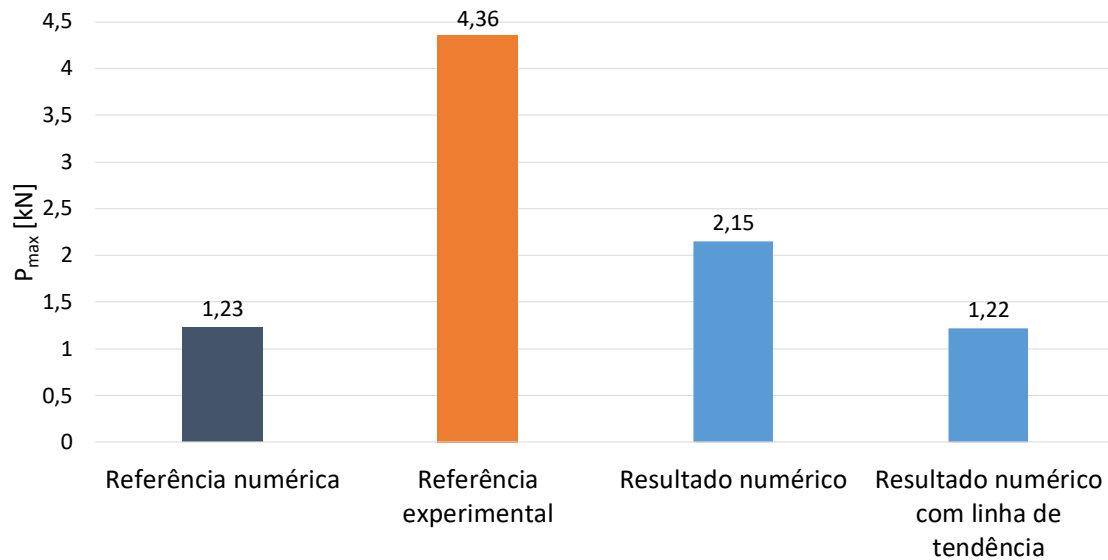


Figura 41 - Comparação dos resultados obtidos com valores de referência para o adesivo RTV106

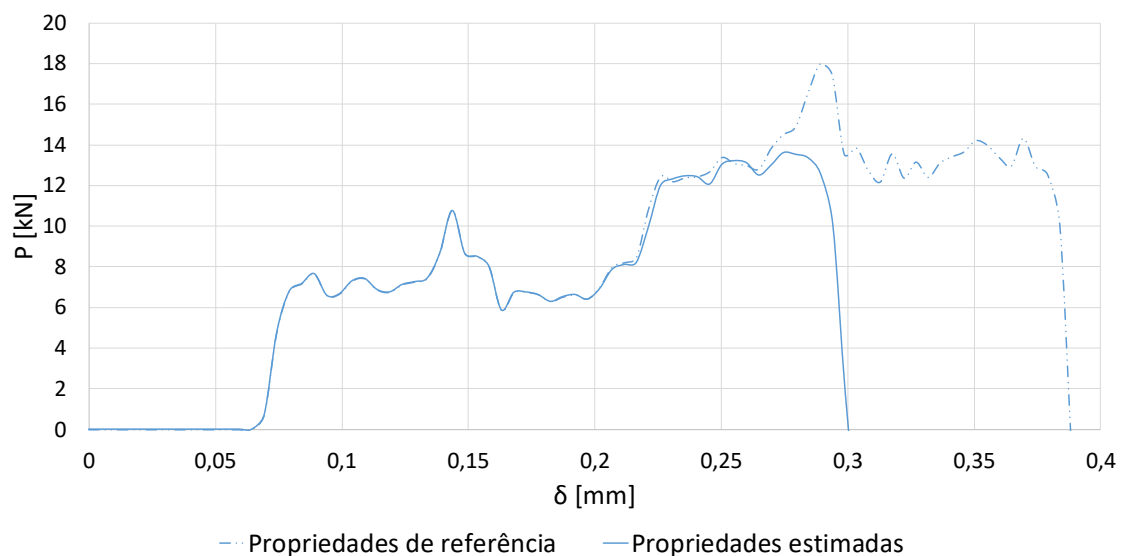


Figura 42 - Curva P - δ de validação do adesivo AV138

A Figura 42 apresenta a curva P - δ para o modelo de validação com as propriedades do adesivo AV138. Nesta figura encontram-se duas curvas, uma obtida com as propriedades de referência e outra obtida com propriedades estimadas. A necessidade de estimar novas propriedades para o adesivo (presentes na Tabela 5 entre parênteses) prendeu-se com o facto de o resultado obtido pelo modelo de validação com propriedades de referência ser bastante diferente da referência numérica. Assim,

t_n foi arbitrado e t_s ajustado para manter a proporcionalidade encontrada para valores obtidos experimentalmente para a velocidade de ensaio mais reduzida. De forma semelhante, mantendo uma proporção obtida por outros autores, o valor de G_{IIC} foi também reduzido por forma a aproximar do valor de G_{Ic} .

A introdução destas propriedades estimadas permitiu a obtenção de resultados do modelo numéricos mais próximos do modelo de referência e dos valores experimentais.

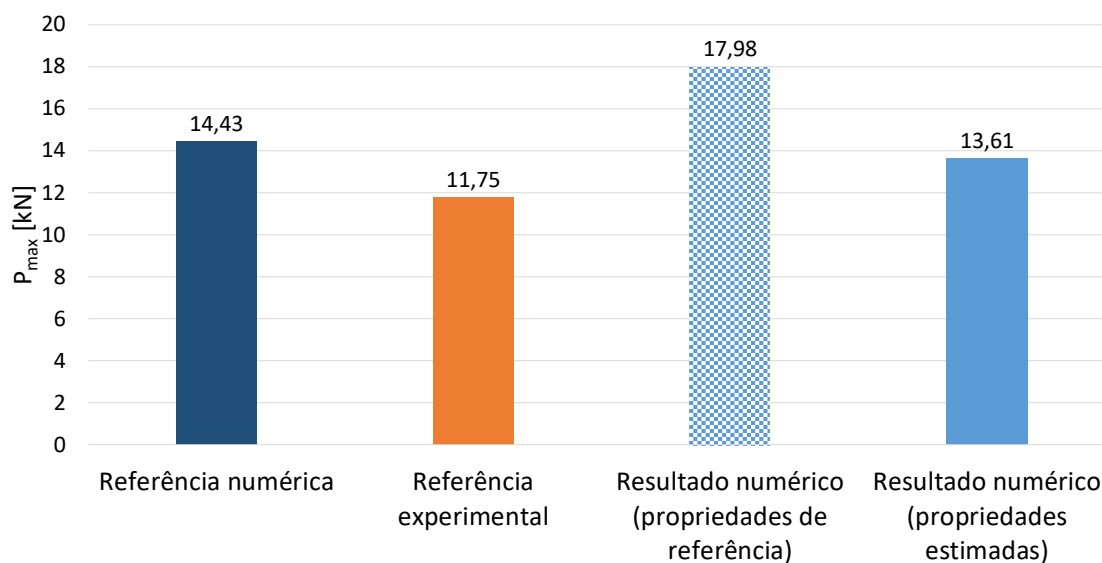


Figura 43 - Comparação do resultado obtido com valores de referência para o adesivo AV138

A Figura 43 apresenta os diversos resultados obtidos nas diferentes abordagens. O resultado numérico obtido inicialmente usando as propriedades de referência mostra uma diferença de cerca de 25% superior em relação ao valor de referência numérica. Após a introdução das propriedades estimadas a diferença encontrada, em relação às propriedades de referência, é também de 25%. É possível observar ainda que os resultados com propriedades estimadas permitiram a aproximação aos valores de carga máxima da referência numérica, ficando com uma diferença de 6%, e aos valores de referência experimental onde a diferença fica nos 16%.

A Figura 44 representa a curva $P-\delta$ quando é utilizado o adesivo DP8005. Embora apresente maior irregularidade, é possível observar uma grande semelhança com a forma da curva de referência [1]. Tal como na referência numérica, esta curva do modelo de validação também apresenta três patamares de recuperação e estes ocorrem para valores de deslocamentos semelhantes. Além disto, também o deslocamento máximo é bastante semelhante. Por outro lado, este deslocamento máximo é muito inferior ao atingido no ensaio experimental.

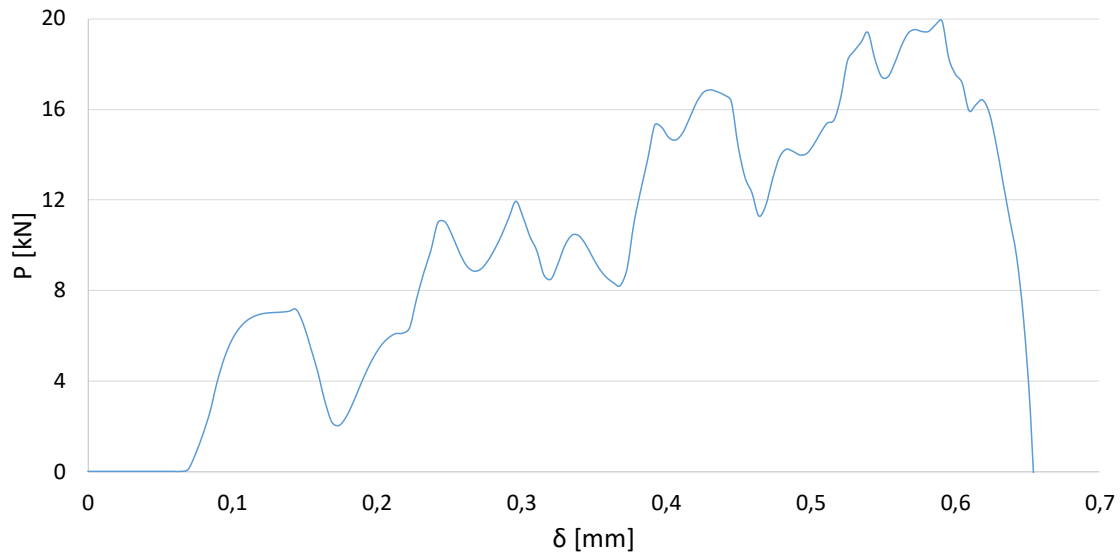
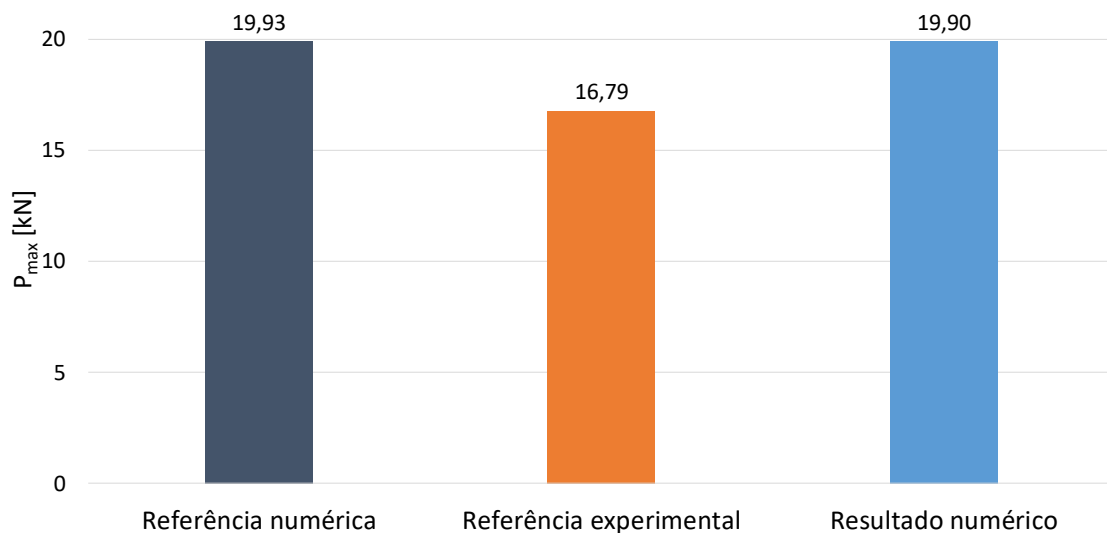
Figura 44 - Curva P - δ de validação do adesivo DP8005

Figura 45 - Comparação do resultado obtido com valores de referência para o adesivo DP8005

Ao nível das cargas máximas apresentadas (Figura 45) pode verificar-se mais uma vez a consonância entre os resultados numéricos, quer do modelo de validação, quer dos valores de referência, sendo a diferença apresentada entre estes dois valores inferior a 1%. À semelhança do que se passa nos deslocamentos, as maiores diferenças encontram-se em relação ao valor experimental. Em relação a estes, ambos os valores numéricos são cerca de 19% superiores.

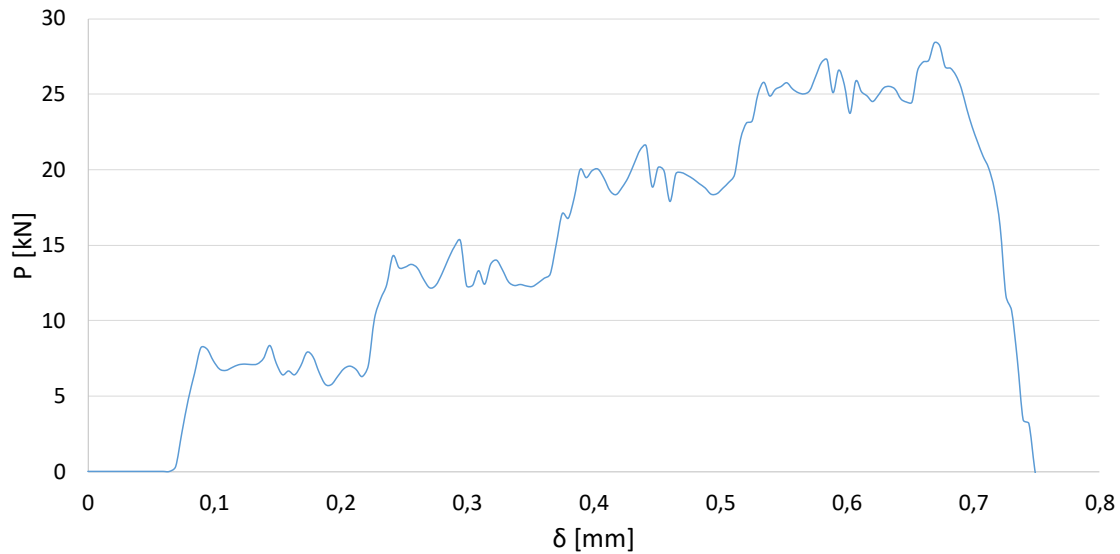


Figura 46 - Curva P - δ de validação do adesivo XNR6852 E-2

A curva P - δ para validação com o adesivo XNR6852 E-2 é mostrada na Figura 46. Este caso apresenta semelhanças com o adesivo anterior. Os valores registados relativamente ao deslocamento máximo e ao deslocamento correspondente à carga máxima no modelo de validação são idênticos aos encontrados na referência numérica. Esta curva apresenta, também, três patamares de recuperação antes de atingir a carga máxima, tal como na referência numérica, e os deslocamentos respetivos são semelhantes. Ainda à semelhança do que acontece no caso anterior, o deslocamento para o qual ocorre a carga máxima e o deslocamento máximo são bastante superiores aos valores de referência experimental.

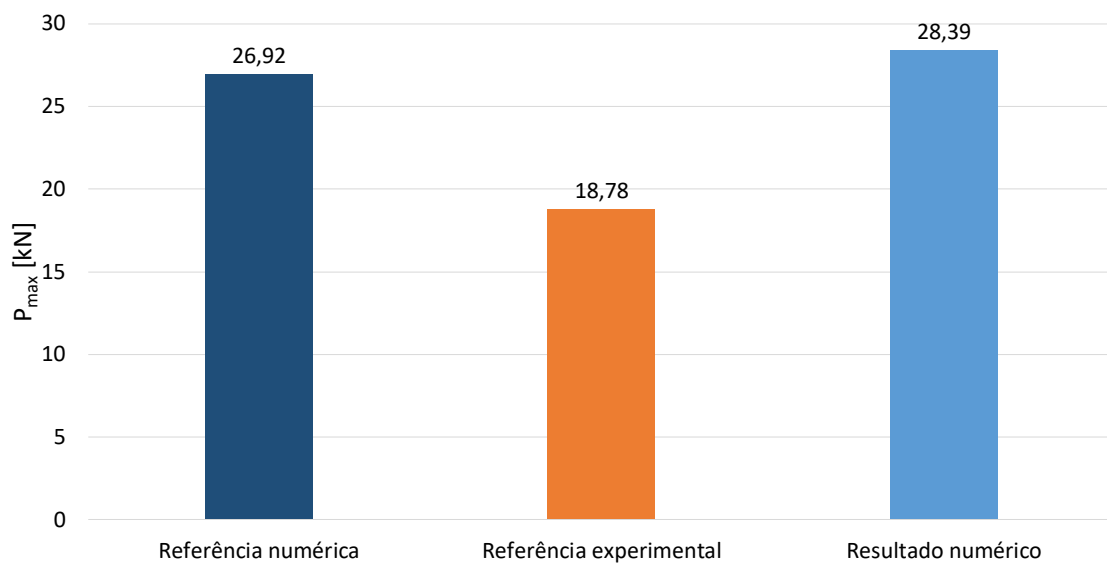


Figura 47 - Comparação do resultado obtido com valores de referência com o adesivo XNR6852 E-2

Na Figura 47 apresentam-se os valores de carga máxima atingidos com o adesivo XNR6852 E-2 para cada situação. Mais uma vez o resultado numérico assemelha-se à referência numérica, apresentando uma diferença de cerca de 5%. Por outro lado, a diferença entre o resultado experimental e o numérico é bastante mais elevada, sendo este 51% mais elevado do que o experimental.

3.1.3.5 Discussão dos resultados

Todas as curvas $P-\delta$ apresentam um fenómeno comum que consiste num deslocamento inicial sem que seja registada qualquer reação no encastramento. Este efeito pode ser constatado em ensaios dinâmicos realizados por Varajão [100] e Araújo et al. [85] recorrendo ao *software* Abaqus®. De forma idêntica, também Liao et al. [83] apresentou resultados onde se verifica este patamar inicial com a carga a 0, recorrendo aos *softwares* Ansys® e LS-Dyna®.

O referido fenómeno tem por base os efeitos de inércia associados a aplicações de cargas dinâmicas. Neste tipo de aplicações, o impacto gera ondas de propagação de tensões. Nos instantes iniciais, onde já se verifica um deslocamento do aderente superior, as ondas de propagação de tensões ainda não atingiram o encastramento, pelo que a reação é 0. O início desta reação dá-se alguns instantes depois, dependendo deste fenómeno, também, da velocidade de propagação das ondas de tensões. Estes acontecimentos estão representados na Figura 48, através da ilustração da propagação de tensões equivalentes de von Mises provocada pelo impacto. Para tal, configurou-se os *field outputs* de forma a registar todos os incrementos e, assim, conseguir visualizar as tensões em diferentes instantes.

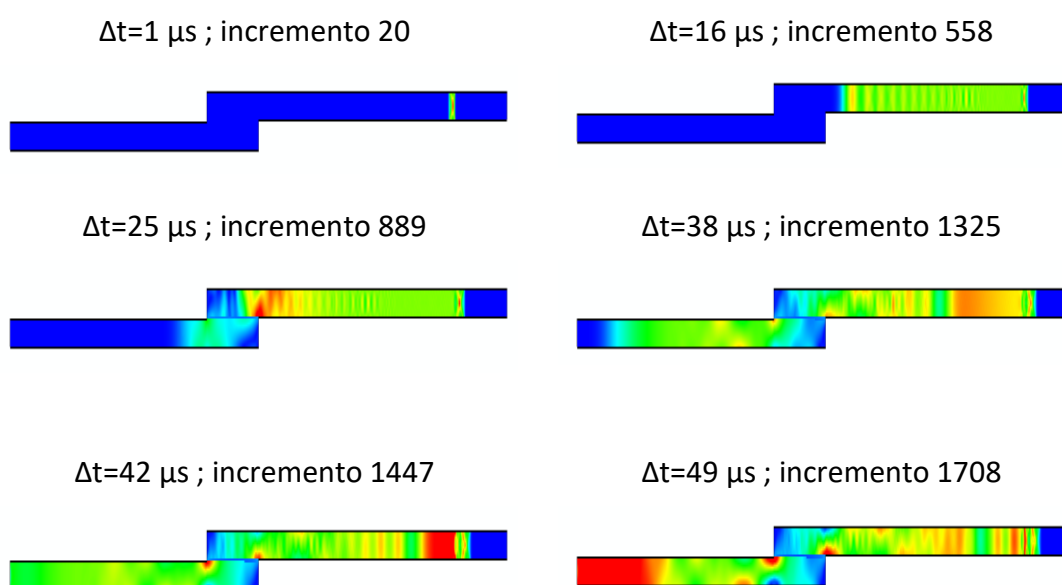


Figura 48 - Propagação de tensões após impacto com o adesivo AV138

Relativamente ao modelo de validação com o adesivo RTV106, todos os resultados numéricos apresentam grandes diferenças em relação aos experimentais, atingindo estes valores superiores de carga máxima, apesar da utilização da linha de tendência no resultado numérico. Nestas condições e para este adesivo, Silva [1] documentou roturas adesivas, que não são possíveis de considerar nos modelos numéricos, sendo apenas consideradas roturas coesivas. Posto isto, seria suposto encontrar valores de carga máxima mais elevados nos resultados numéricos. Estas discrepâncias podem justificar-se devido ao facto de apenas terem sido usadas propriedades válidas para casos estáticos (Tabela 5). Além do mais o modelo coesivo, para as propriedades utilizadas, apresenta instabilidade. Assim, o modelo não é válido para este adesivo.

No que respeita ao adesivo AV138, foi necessário estimar e ajustar propriedades para que o modelo apresentasse resultados mais próximos da referência numérica e dos resultados experimentais obtidos por Silva [1]. Pode concluir-se que a extrapolação das propriedades para uma velocidade de impacto de 1,75m/s não é uma metodologia válida para este adesivo visto que, com estes valores, os resultados foram completamente diferentes dos valores de referência. No entanto, o modelo é válido para este adesivo utilizando as propriedades estimadas (Tabela 5).

Para o adesivo DP8005, o resultado numérico do modelo de validação é praticamente igual à referência numérica, validando assim o uso deste modelo para este adesivo. A ligeira diferença na carga máxima entre os ensaios numéricos pode resultar de uma diferente frequência de registo e/ou do facto de a malha utilizada ser uniforme ao contrário do que sucedeu com Silva [1], que utilizou o efeito *bias* para otimizar a simulação. O valor da carga máxima dos ensaios experimentais foi de menos 19% em relação ao valor obtido numericamente. Estas diferenças consideráveis podem prender-se com o facto de ser complicado reproduzir experimentalmente as condições numéricas. Desde logo, pode haver falhas inerentes à própria produção das juntas nos ensaios experimentais. Os resultados, tanto das reações como dos deslocamentos, podem ainda ser influenciados pela precisão da célula de carga, eventuais folgas, deformação elástica dos componentes do equipamento de ensaio. Além disto, nos modelos numéricos é considerado um perfeito alinhamento dos substratos, uma aplicação de adesivo sem defeitos e com espessura completamente constante e ainda que todos os materiais são completamente homogéneos.

O caso do adesivo XNR6852 E-2, mais uma vez, apresenta semelhanças com o caso anterior, sendo o modelo válido neste caso também. O resultado numérico e a referência numérica apresentam valores de carga máxima semelhantes, com uma diferença de 5%, que pode ser explicada pelos mesmos acontecimentos que a justificam para o adesivo DP8005. A diferença entre os resultados numéricos e experimentais é considerável (51%), tal como no caso anterior, e pode ser explicada pelos mesmos fatores. Os resultados numéricos são superiores, concluindo-se que através da extrapolação dos valores de tensões coesivas se obtêm resultados

demasiado elevados. Por se tratar de uma evolução de um adesivo comercial ainda em estado de protótipo foi decidido não rever os valores de tensões coesivas para a velocidade de ensaio utilizada devido à indisponibilidade de maior número de ensaios experimentais para determinação de propriedades.

3.2 Estudo numérico

Com o objetivo de estudar a influência dos diferentes parâmetros que regem os MDC, e consequentemente o comportamento de juntas solicitadas ao impacto, foram efetuadas várias simulações numéricas fazendo variar precisamente os referidos parâmetros. Em estudo está o módulo de elasticidade à tração (E), o módulo de elasticidade ao corte (G), a resistência coesiva à tração (t_n^0), a resistência coesiva ao corte (t_s^0), e as tenacidades à tração (G_{Ic}) e ao corte (G_{IIc}). A variação foi desde -75% até +100% com intervalos de 25%, para cada propriedade. A lei tração-separação dos MDC utilizada foi a triangular, já explicada anteriormente, na maioria das vezes em modo misto, exceto no capítulo 3.2.4.2.

3.2.1 Condições da análise numérica

As condições da análise numérica neste capítulo são análogas às do modelo de validação do capítulo 3.1. Devido ao elevado número de simulações, com o objetivo de diminuir o esforço computacional, reduzindo o tempo de simulação, foi utilizado o efeito *bias* para refinar a malha, otimizando o modelo. Este refinamento permite igual precisão nas zonas mais críticas, como as extremidades da sobreposição, deixando, nas zonas menos críticas, uma malha menos refinada.

Como explicado anteriormente, o objetivo passa por deixar uma malha com elemento de 0,2 mm de lado na direção da espessura, por esta ser a espessura do adesivo (aproximação contínua). Além disto, como também já foi referido, as zonas mais críticas são as extremidades da sobreposição, pelo que são estas zonas que devem apresentar a malha mais refinada. Como tal, foi utilizado um efeito *bias* ao longo da zona de sobreposição (Figura 49), sendo o maior elemento de 0,5 mm (centro) e o menor de 0,2 (extremidades).

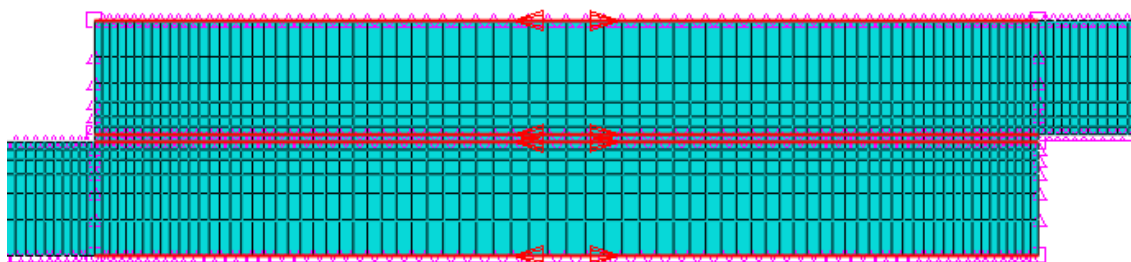


Figura 49 – Sentido do efeito *bias* ao longo da zona de sobreposição

Para uma maior redução do número de elementos presentes nas secções correspondentes aos substratos, o efeito *bias* foi empregue em dois sentidos, nomeadamente na direção da espessura dos aderentes (de 1 mm até 0,2 mm no sentido das setas na Figura 50), uma vez que a zona crítica é junto à ligação, e ao longo do comprimento dos substratos (de 3 mm até 0,2 mm no sentido das setas da Figura 51), visto que a extremidade oposta à ligação pouco contribui para a mesma.

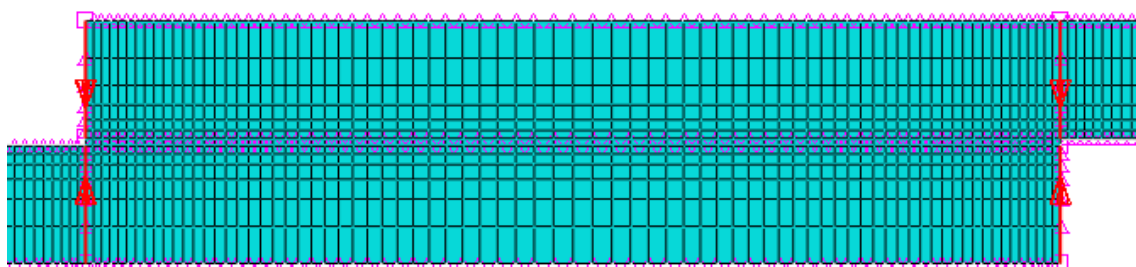


Figura 50 – Sentido do efeito *bias* ao longo de espessura dos aderentes

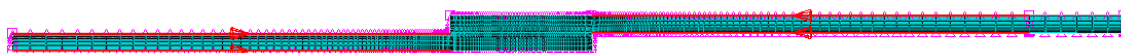


Figura 51 – Sentido do efeito *bias* ao longo do comprimento do substrato fora da zona de sobreposição

3.2.2 Geometria da junta

Em relação ao modelo de validação, a geometria da JSS sofre também algumas alterações, passando os substratos a ter 3 mm de espessura. A outra questão relevante ao nível da geometria é o facto de em cada parâmetro coesivo estudado existirem quatro configurações diferentes de comprimento de sobreposição (L_0), tomando estes os valores de 12,5; 25; 37,5 e 50 mm. A geometria genérica da junta, sem o peso, está mostrada na Figura 52.

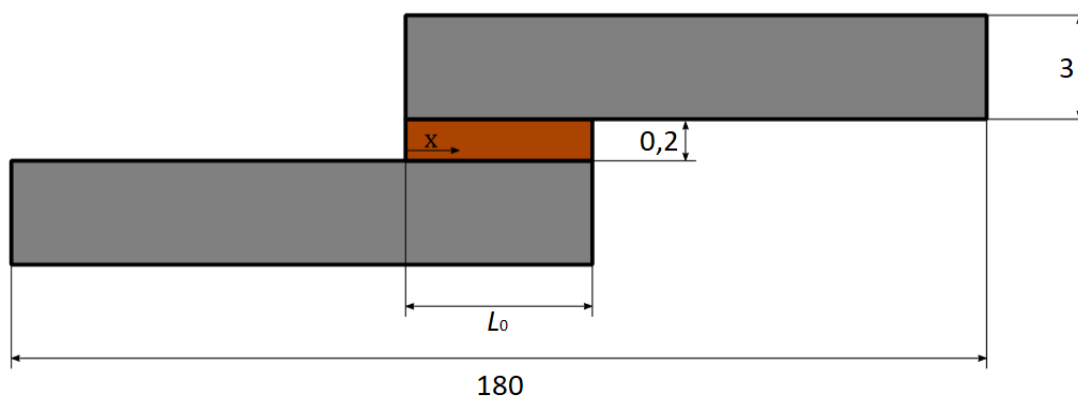


Figura 52 - Ilustração da geometria da junta, sem o peso (aderentes a cinzento e adesivo a castanho)

De referir ainda que também a massa utilizada foi reconstruída, de forma a manter a energia (40 J) e a velocidade de impacto (1,75 m/s). Para manter a massa e a densidade, foi alterado o seu volume por forma a satisfazer a expressão (6). Uma vez que a largura (direção perpendicular ao plano) de todos os componentes da junta é de 25 mm em todas as simulações, foi necessário alterar a área da secção correspondente ao peso (no modelo 2D), tendo em conta que é desejável que apresente uma espessura igual à do substrato, pelo que diminuiu o comprimento.

Devido à utilização do efeito *bias*, o número de elementos foi reduzido em relação ao modelo de validação. Atendendo, também, aos diferentes comprimentos de sobreposição utilizados, o número de elementos em cada um destes, é diferente. A Tabela 6 mostra o número de elementos em função de L_0 .

Tabela 6 - Número de elementos de malha em função de L_0

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Nº elementos	1490	1912	2347	2769

3.2.3 Materiais utilizados

3.2.3.1 Aderentes

Ao contrário dos modelos de validação, os aderentes escolhidos neste estudo são de alumínio. Como tal, nestes modelos que visam estudar a influência dos parâmetros coesivos, às secções correspondentes aos substratos foi atribuído um material com as propriedades da liga AW6082-T651, presentes na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades dos aderentes de alumínio

Aderente	AW6082-T651
E [GPa]	70,07
σ_y [MPa]	261,67
σ_f [MPa]	324
ε_f [%]	21,7
ν	0,33
P [g/cm ³]	2,7

Como referido anteriormente, as propriedades do substrato influenciam bastante o comportamento das juntas. Sendo os aderentes de alumínio, material menos rígido mas dúctil, foi considerada a sua deformação plástica, uma vez que esta é atingida para valores substancialmente mais baixos do que para o aço, como consequência de uma tensão de cedência bastante inferior. Este fenómeno de plasticidade é introduzido nas propriedades do material, sendo fornecidos pontos relativos à curva tensão-deformação do mesmo.

3.2.3.2 Adesivos

Os adesivos escolhidos para este estudo numérico são o AV138, um adesivo frágil, e o XNR6852 E-2, um adesivo tenaz (combina ductilidade e resistência).

O objetivo desta escolha passa por estudar a influência dos parâmetros coesivos utilizando adesivos com comportamentos bastante distintos. As propriedades consideradas para cada um dos adesivos à velocidade considerada estão presentes na Tabela 4 e na Tabela 5.

3.2.4 Estudo da influência dos parâmetros coesivos na resistência ao impacto

Como referido anteriormente, com o objetivo de perceber a influência de cada parâmetro coesivo na resistência e comportamento de juntas solicitadas ao impacto, procedeu-se a uma variação de cada um destes parâmetros numa gama de -75% até +100% em relação aos valores validados nos modelos de validação.

Antes de se proceder a qualquer variação de propriedades foram simuladas todas as oito juntas (dois adesivos com quatro comprimentos de sobreposição cada) com os valores validados para as condições conhecidas. Estes resultados são os que vão servir de termo de comparação em relação aos valores obtidos quando forem variadas as referidas propriedades.

Na Figura 53 são apresentadas as curvas $P-\delta$ do adesivo AV138 em função dos diferentes L_0 . Pode verificar-se um aumento de resistência com o aumento de L_0 , como seria expectável, já que a área do adesivo aumenta conferindo uma maior resistência. Essa resistência crescente é acompanhada de um aumento do deslocamento máximo, sendo esta variação idêntica entre configurações, e do deslocamento correspondente à carga máxima. Pode observar-se ainda que o deslocamento máximo e o deslocamento correspondente à carga máxima são praticamente iguais, o que corrobora a fragilidade do adesivo, já que após atingir a carga máxima este não possui capacidade de continuar a aguentar carga, caindo esta rapidamente para 0.

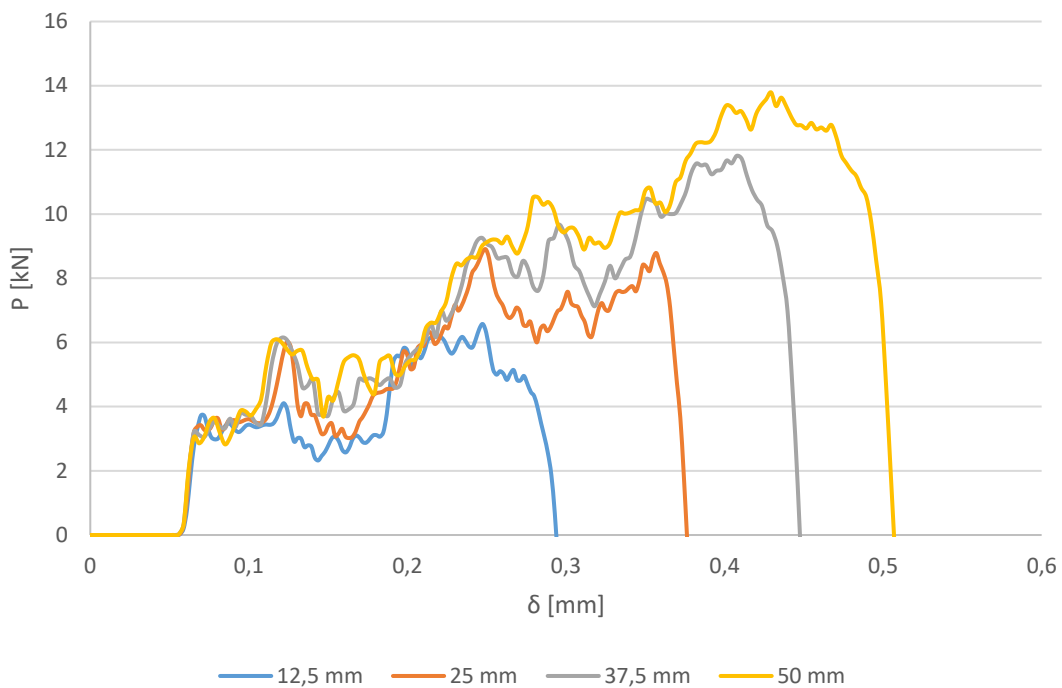


Figura 53 - Curva P - δ com adesivo AV138 em função de L_0

Na Tabela 8 são apresentados os valores de carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$) atingidos para cada L_0 , uma vez que são estes valores que vão servir de referência.

Tabela 8 - Cargas máximas em função dos diferentes L_0

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	6572,4	8903,5	11815,3	13793,6

As curvas P - δ utilizando o adesivo XNR6852 E-2 estão presentes na Figura 54, onde se pode observar a maior ductilidade deste adesivo em relação ao anterior, uma vez que existe uma deformação plástica substancial antes da rotura, caracterizada pela existência de um patamar (para os dois L_0 maiores) no qual, para uma carga semelhante, os deslocamentos continuam a aumentar significativamente. Embora os dois L_0 menores não apresentem este patamar, depois de atingida a carga máxima, a queda não é tão abrupta como no AV138, havendo ainda alguma capacidade de carga e aumentando o deslocamento (efeito mais visível em $L_0=12,5$ mm). De referir que esta ductilidade apresentada pela junta só é possível devido ao uso de aderentes dúcteis que permitem uma dispersão das tensões para o centro, fazendo com que fiquem mais equilibradas ao longo L_0 , como explicado anteriormente. A deformação plástica dos aderentes limita a resistência da junta. Mais uma vez, a carga máxima, deslocamento máximo e deslocamento correspondente à carga máxima aumentam à medida que aumenta L_0 . Contudo, ao contrário da situação anterior, neste caso os incrementos

entre configurações sucessivas são bastante dispares devido às diferenças, entre os dois menores L_0 e os dois maiores L_0 , em relação ao patamar referido. Pode observar-se ainda que as juntas de $L_0=37,5$ mm e de $L_0=50$ mm apresentam perfis muito semelhantes, sendo que os valores de carga máxima (diferença menor do que 1%) e de deslocamento máximo são, em ambos os casos, muito próximos. A maior resistência e tenacidade deste adesivo comparativamente com o anterior estão, também, mostradas nesta figura, onde se observam cargas máximas e deslocamentos muito superiores. Isto pode ser comprovado, sabendo que tendencialmente a resistência e os deslocamentos aumentam com L_0 , comparando o menor L_0 do XNR6852 E-2 com o maior L_0 do AV138, observando que atingem valores de carga máxima muito semelhantes (cerca de 4% de diferença) e que o primeiro atinge mais do dobro do valor de deslocamento.

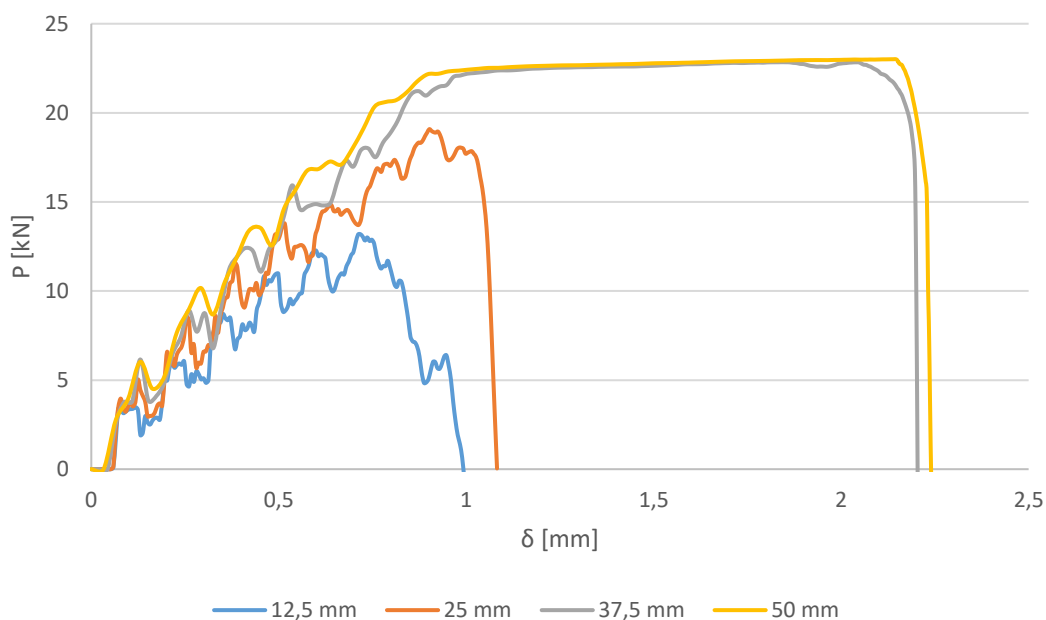


Figura 54 - Curvas P - δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0

Na Tabela 9 são apresentados os valores de carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$) atingidos para cada L_0 , valores estes que vão servir de referência.

Tabela 9 - Cargas máximas em função dos diferentes L_0

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	13189,4	19086,6	22842,2	23013,4

3.2.4.1 Rigidez elástica da lei coesiva

Para estudar a influência da rigidez da lei coesiva, fez-se variar os módulos de elasticidade à tração (E) e ao corte (G), os dois em simultâneo, uma vez que não faz sentido variar individualmente por causa do coeficiente de Poisson (ν), que relaciona estas propriedades, que tem de manter-se.

A Figura 55, Figura 56, Figura 57 e Figura 58 apresentam as diferentes curvas P - δ , correspondentes às variações referidas, para os diferentes L_0 por ordem crescente, respetivamente, com o adesivo AV138. Em termos de perfil de curva, em todos os L_0 , este é mantido em todas as variações. Para $L_0=12,5$ mm nota-se que as reduções possuem maior influência do que os aumentos de rigidez. A diminuição de rigidez provoca deslocamentos máximos mais elevados. Quanto mais baixa a rigidez, maior o deslocamento máximo, o que faz sentido uma vez o adesivo apresenta um comportamento menos rígido (mais dúctil). No entanto, este efeito esbate-se nos L_0 intermédios, até que para $L_0=50$ mm, a redução de rigidez já implica deslocamentos mais baixos do que a curva de referência. O facto de a resistência diminuir faz com que a rotura ocorra mais cedo e, neste caso, é isto que limita os deslocamentos máximos. O aumento de rigidez apresenta menor influência, do que a diminuição, nos deslocamentos para qualquer L_0 .

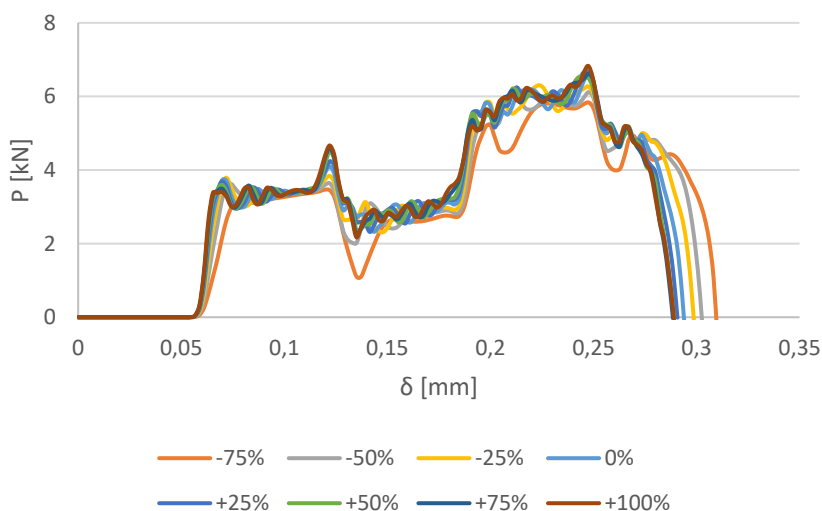


Figura 55 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=12,5$ mm

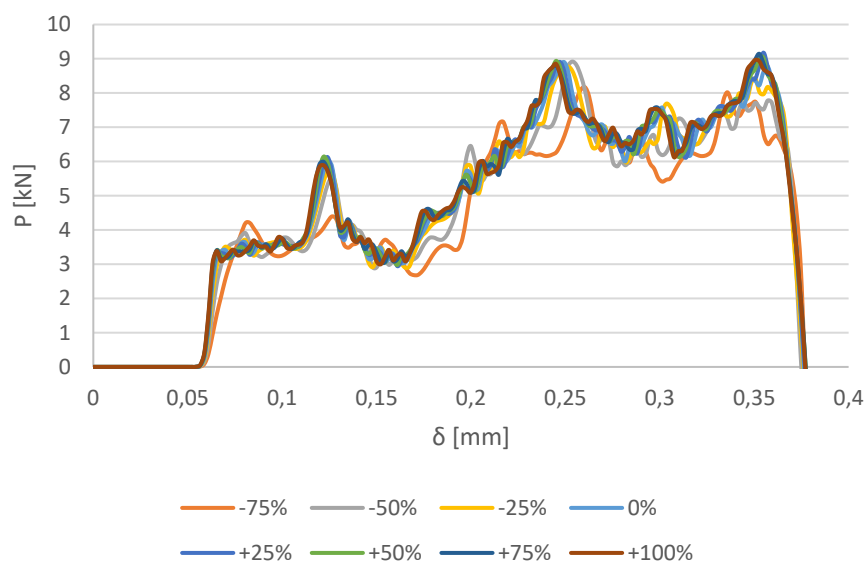


Figura 56 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=25$ mm

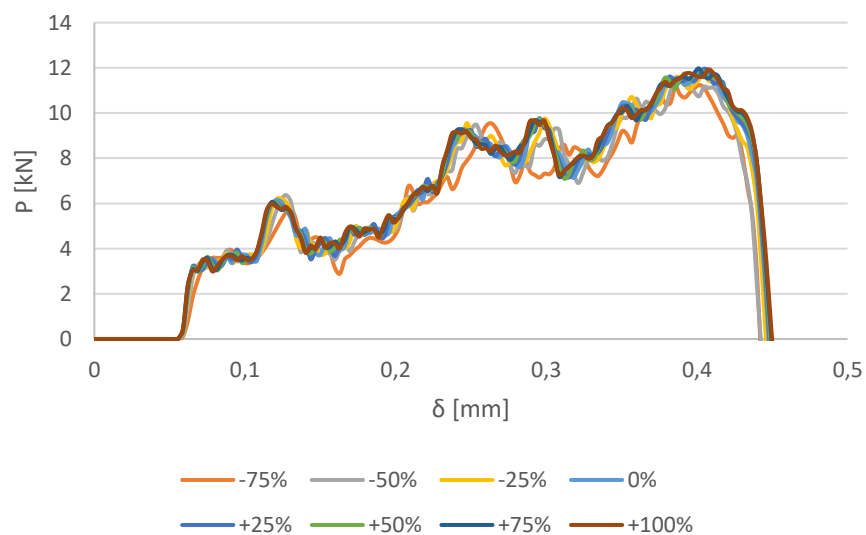


Figura 57 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=37,5$ mm

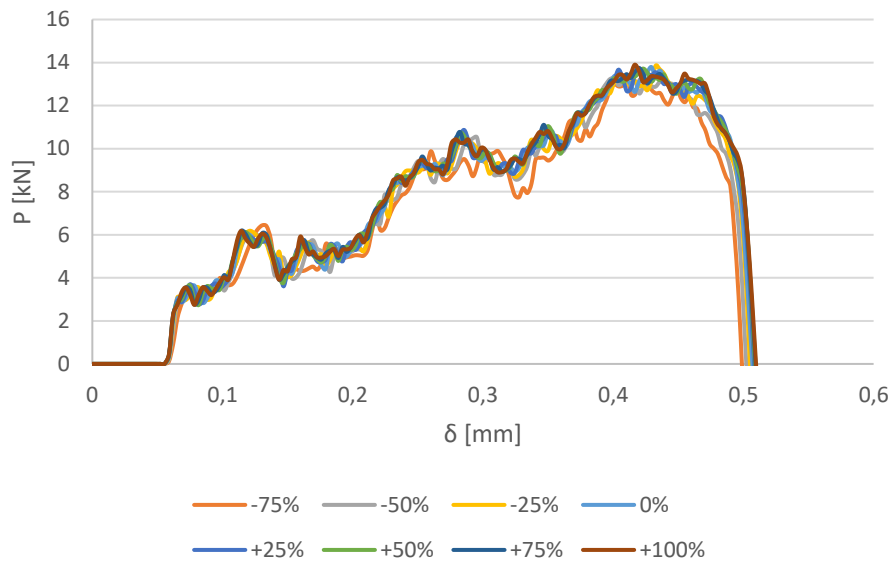


Figura 58 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=50$ mm

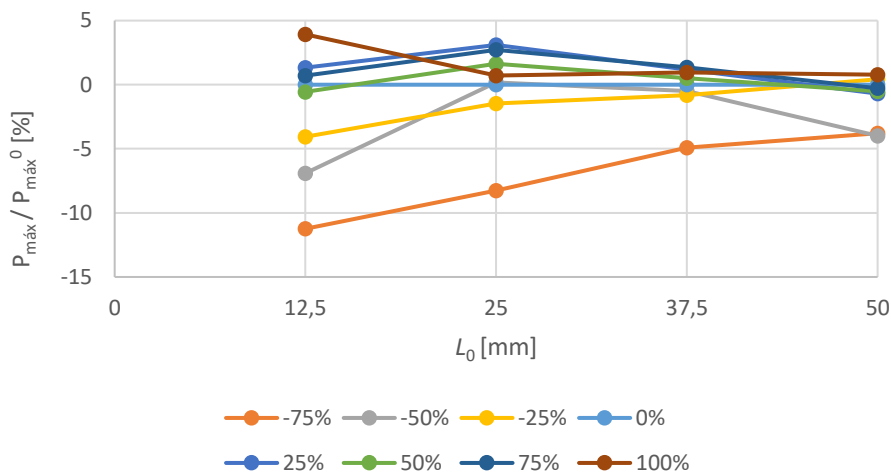


Figura 59 - Variação percentual de $P_{máx}/P_{máx}^0$ com variações de E e G entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo AV138

Na Figura 59 é comparada a resistência das juntas quando variada a rigidez. Esta figura apresenta os valores de carga máxima obtida em função da carga máxima de referência ($P_{máx}/P_{máx}^0$), para cada variação e para todos os L_0 . Tal como nos deslocamentos máximos, também para as cargas máximas se verifica que no geral a redução de rigidez tem maior influência do que o seu aumento. A influência de rigidez não é proporcional à resistência, uma vez que nem sempre a variação de +100% corresponde à maior carga máxima por exemplo. Contudo, mesmo quando isto não se verifica, é necessário referir que as diferenças são mínimas. A maior diferença é de cerca de 11% a menos do que a referência, e encontra-se para uma redução de 75% do

valor de referência, no $L_0=12,5$ mm. É também notória a maior influência da rigidez no menor L_0 , de forma semelhante ao que acontece com os deslocamentos.

Na Figura 60, Figura 61, Figura 62 e Figura 63 são mostradas as curvas $P-\delta$ de todas as variações nos intervalos referidos e de todos os L_0 . Conclusões semelhantes às referidas para o adesivo AV138, podem ser aplicadas também neste caso, com uma evidente maior influência das diminuições de rigidez, do que dos aumentos, nos deslocamentos máximos e também nos deslocamentos respeitantes às cargas máximas. A diferença entre adesivos é que neste caso este efeito não desaparece com o aumento de L_0 , embora seja menos pronunciado no maior L_0 . Esta diferença pode ser explicada pela maior ductilidade do XNR6852 E-2 uma vez que, quanto maior o L_0 , maior a deformação diferencial, efeito a que um adesivo dúctil resiste melhor. Enquanto no caso anterior (adesivo frágil), à medida que este efeito se intensifica, os deslocamentos são influenciados pela resistência máxima da junta, neste caso (adesivo mais dúctil), o mesmo não se verifica, pelo que a diminuição de rigidez imposta (maior ductilidade ainda) é acompanhada de um maior deslocamento máximo.

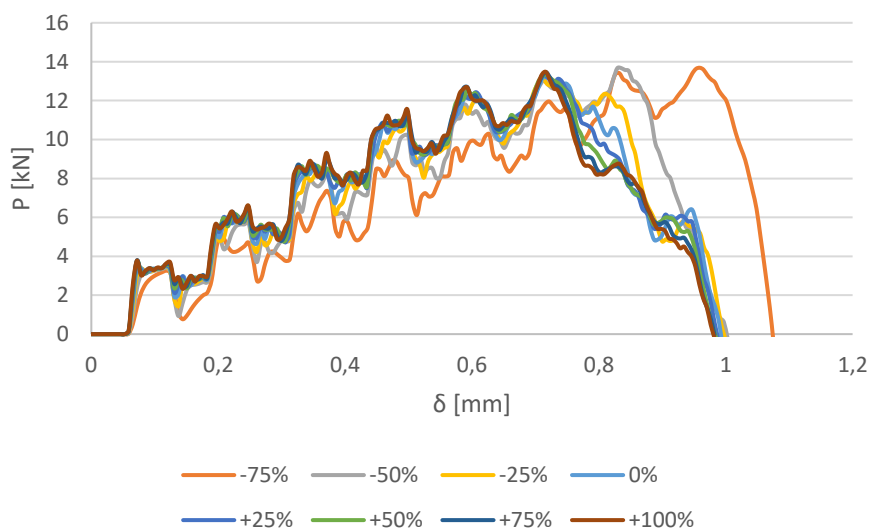


Figura 60 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=12,5$ mm

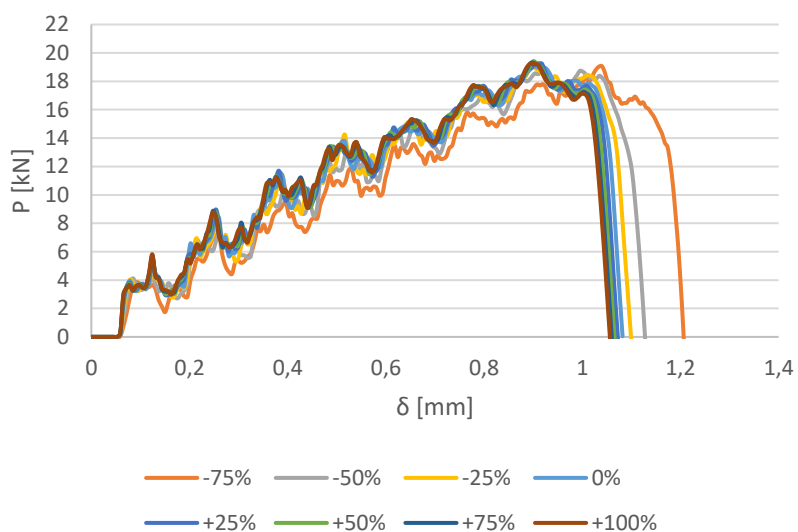


Figura 61 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=25$ mm

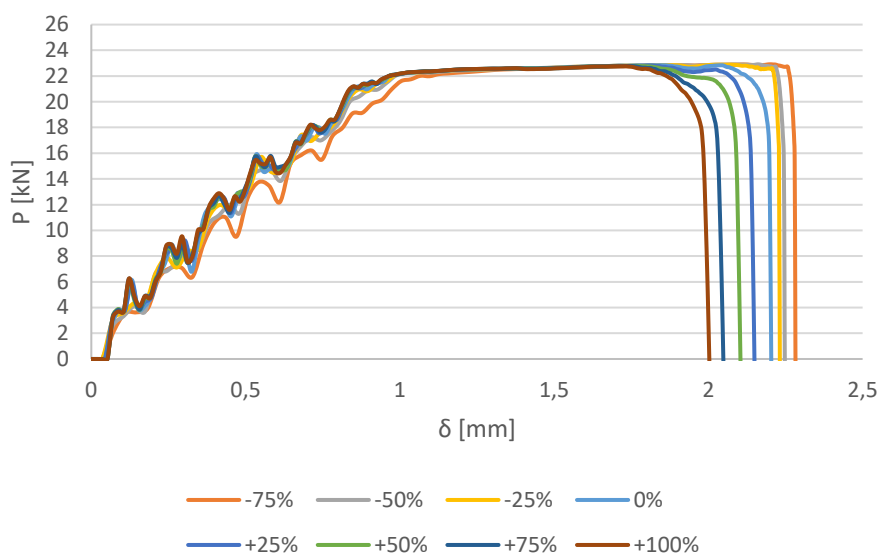


Figura 62 - Curvas P - δ correspondentes a variações de E e G entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=37,5$ mm

desacoplado, mantendo o critério de iniciação de dano igual (equação 3). O processo de amaciamento, em vez de se reger pela equação (4), é agora individual, considerando de forma independente a tenacidade à tração (G_{Ic}) e a tenacidade ao corte (G_{IIc}). Desta maneira, para que haja rotura de uma ligação coesiva, não é necessário satisfazer o critério referido, podendo existir elementos que ainda resistam a um tipo de sollicitação 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 de $\delta_n - \delta_n^0$ (tração) ou $\delta_s - \delta_s^0$ (corte), ou seja, em função do deslocamento efetivo após a iniciação do dano. Esta formulação é descrita nas expressões seguintes, enquanto a Figura 65 permite visualizar o significado de d_n para a lei triangular, que pode ser extrapolado para o cálculo de d_s [101]. Por esta formulação t_n e t_s são definidos como

$$\begin{aligned} t_n &= (1 - d_n) t_n^{\text{und}} \\ t_s &= (1 - d_s) t_s^{\text{und}} \end{aligned} \quad (5)$$

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

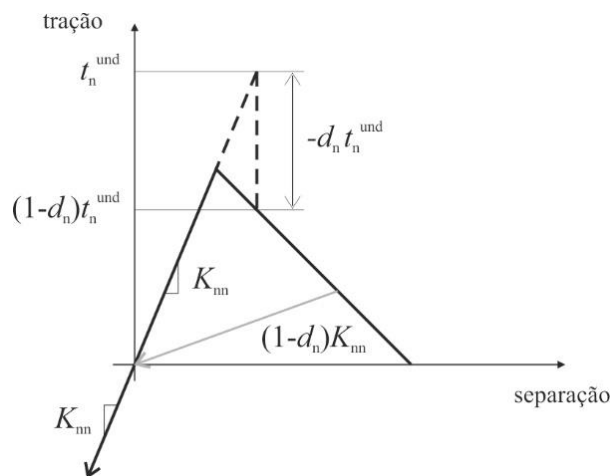


Figura 65 - Definição da variável de dano em tração, d_n , no Abaqus® (que pode ser extrapolada para d_s) [102]

Tendo como base estes pressupostos, a expressão genérica (em tração ou corte) de $d_{n,s}$ para a lei triangular assume a forma [101]

$$d_{n,s} = \frac{\delta_{n,s}^f (\delta_{n,s} - \delta_{n,s}^0)}{\delta_{n,s} (\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^0)} \quad (6)$$

O desacoplamento foi introduzido no *software*, nas propriedades do adesivo em *damage evolution* onde, em vez de ser considerado um amaciamento linear misto,

foram introduzidos pontos, de forma individual para tração e corte, que passam a reger este amaciamento. Estes pontos foram gerados recorrendo ao *software MatLab*, com as expressões 5 e 6.

As curvas P - δ relativas ao modo-misto e ao desacoplado para os diferentes L_0 , por ordem crescente, com o adesivo AV138, estão presentes na Figura 66, Figura 67, Figura 68 e Figura 69. Como seria de esperar, em todos os L_0 se observa uma zona inicial do gráfico igual para modo-misto e desacoplado, uma vez que esta zona corresponde ao domínio elástico, antes do aparecimento do dano (até t_m^0). A partir daqui o comportamento dos dois modos é diferente, pelo exposto anteriormente. Pode verificar-se que, no modo desacoplado e para o adesivo AV138, o deslocamento máximo ($\delta_{m\acute{a}x}$) corresponde, em todos os L_0 , a valores pr\'oximos dos 80% do modo-misto.

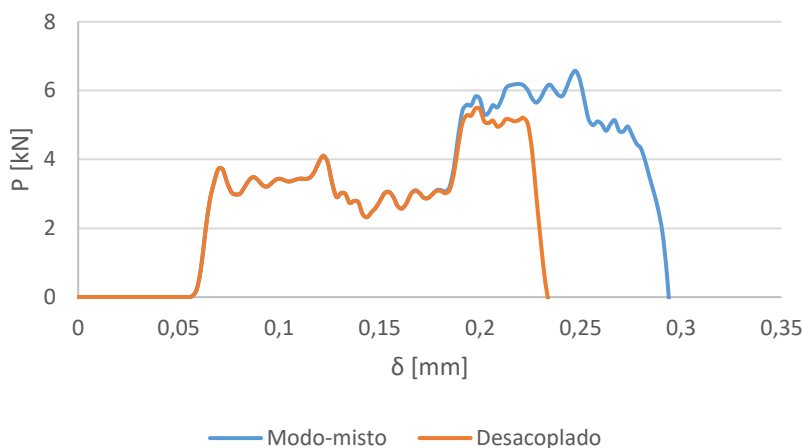


Figura 66 - Curvas P - δ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo AV138, $L_0=12,5$ mm

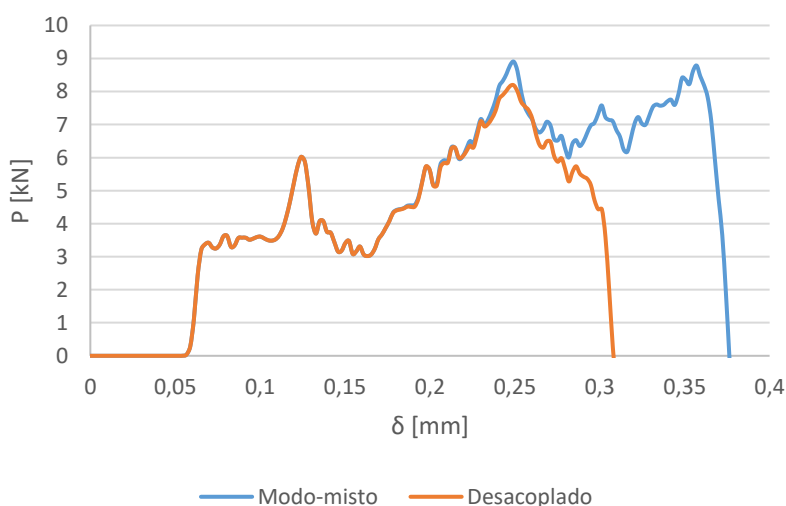


Figura 67 - Curvas P - δ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo AV138, $L_0=25$ mm

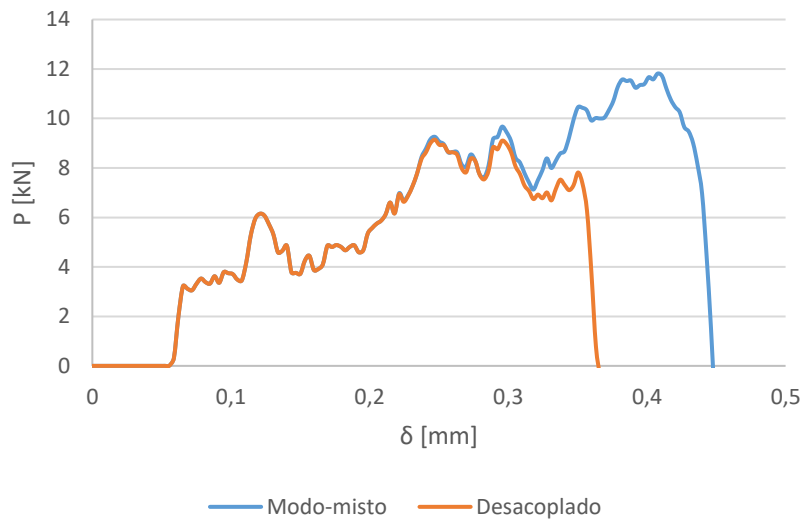


Figura 68 - Curvas P - δ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo AV138, $L_0=37,5$ mm

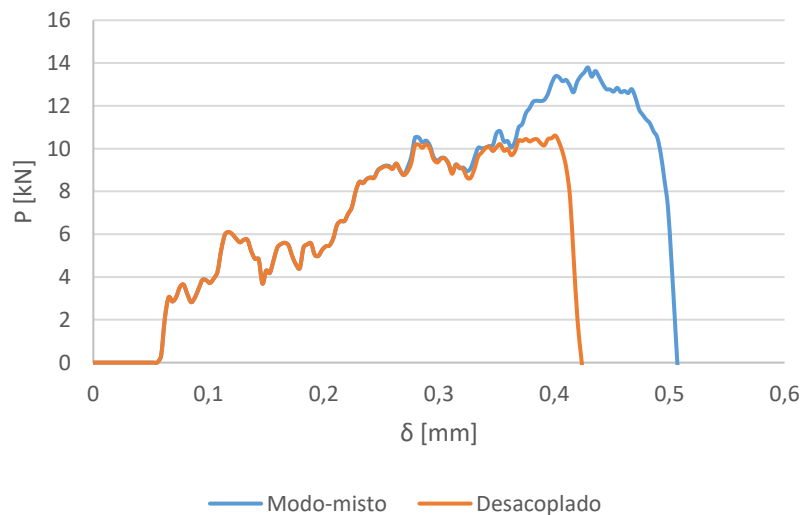


Figura 69 - Curvas P - δ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo AV138, $L_0=50$ mm

Em termos de cargas máximas atingidas, pode-se observar na Figura 70 que o modo desacoplado fica sempre aquém do modo-misto. Estas diferenças são substanciais em todos os L_0 , à exceção de $L_0=25$ mm, onde o valor de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ é menos significativo (8%). Pelos restantes L_0 , poderia concluir-se que o aumento deste se traduziria num aumento de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$, no entanto existe a tal exceção. O valor de $P_{m\acute{a}x} / P_{m\acute{a}x}^0$ mais expressivo é de 23% a menos no modo desacoplado em relação ao modo-misto, apresentado na junta com $L_0=50$ mm.

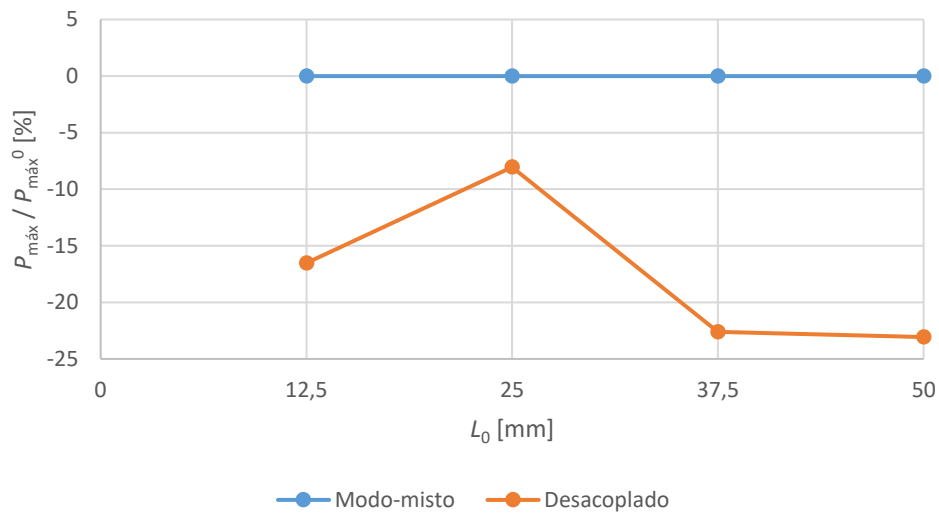


Figura 70 - Variação percentual de $P_{máx}/P_{máx0}$ correspondentes a modo-misto e desacoplado para os diferentes L_0 , com adesivo AV138

A Figura 71, Figura 72, Figura 73 e Figura 74 apresentam as curvas $P-\delta$ em modo-misto e desacoplado para os diferentes L_0 com o adesivo XNR6852 E-2. A observação destas figuras permite concluir que a influência do desacoplamento é semelhante à evidenciada no adesivo AV138, excetuando para o maior L_0 , caso em que esta influência é aproximadamente nula (curvas sobrepostas na Figura 74). Apesar das semelhanças, nos efeitos verificados, entre adesivos, neste caso não existe um valor fixo quanto às diferenças registadas em termos de deslocamentos máximos, apresentando maior influência do L_0 .

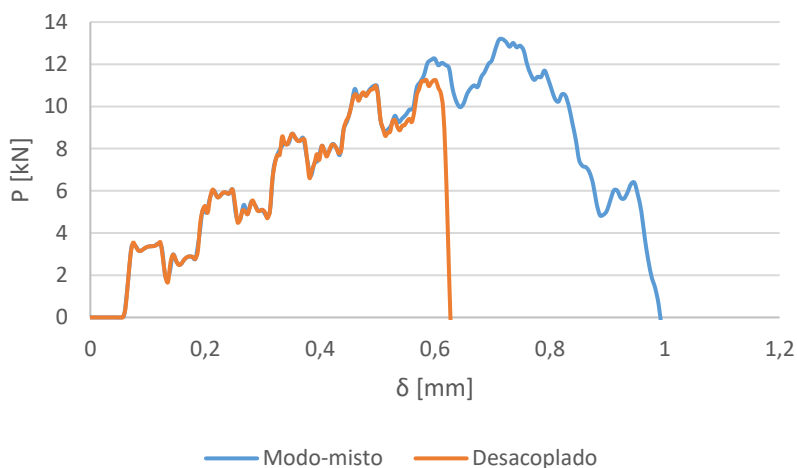


Figura 71 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo XNR6852 E-2, $L_0=12,5$ mm

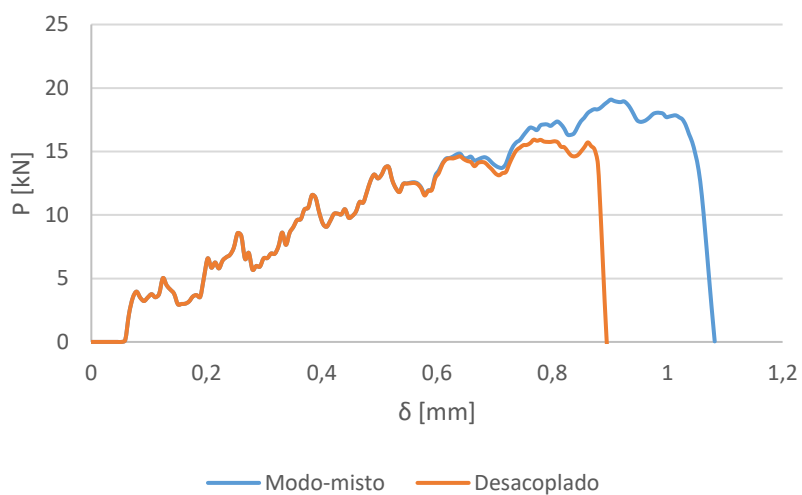


Figura 72 - Curvas P - δ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo XNR6852 E-2, $L_0=25$ mm

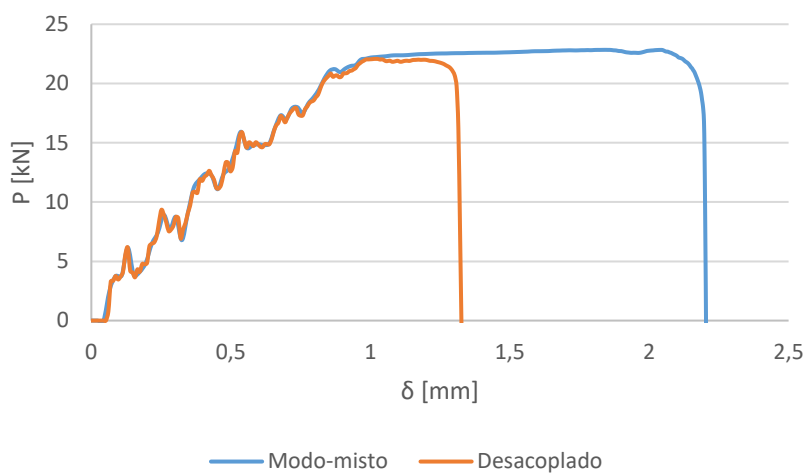


Figura 73 - Curvas P - δ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo XNR6852 E-2, $L_0=37,5$ mm

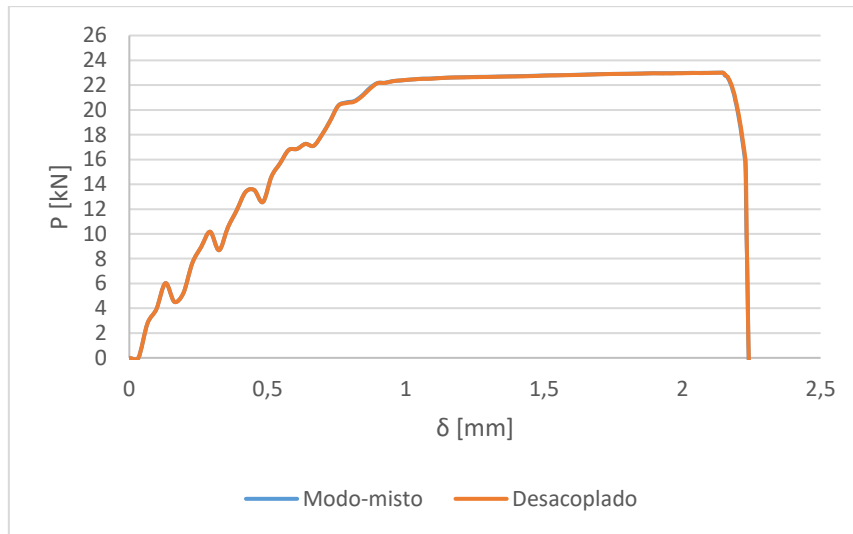


Figura 74 - Curvas P - δ correspondentes a modo-misto e desacoplado, com adesivo XNR6852 E-2, $L_0=50$ mm

A Figura 75 mostra que, em termos de resistência, a influência do modo desacoplado é menor do que quando se utiliza o AV138. Mais uma vez, para o maior L_0 esta influência é nula. Os valores atingidos no modo desacoplado são inferiores, sendo o valor mais expressivo de $P_{m\acute{a}x} / P_{m\acute{a}x}^0$, é apresentado pela junta de $L_0=25$ mm, com cerca de -17% do que o valor de modo-misto. À exceção da pequena diferença entre os dois L_0 menores, esta figura demonstra que o aumento do L_0 diminui a influência do desacoplamento, para o adesivo XNR6852 E-2.

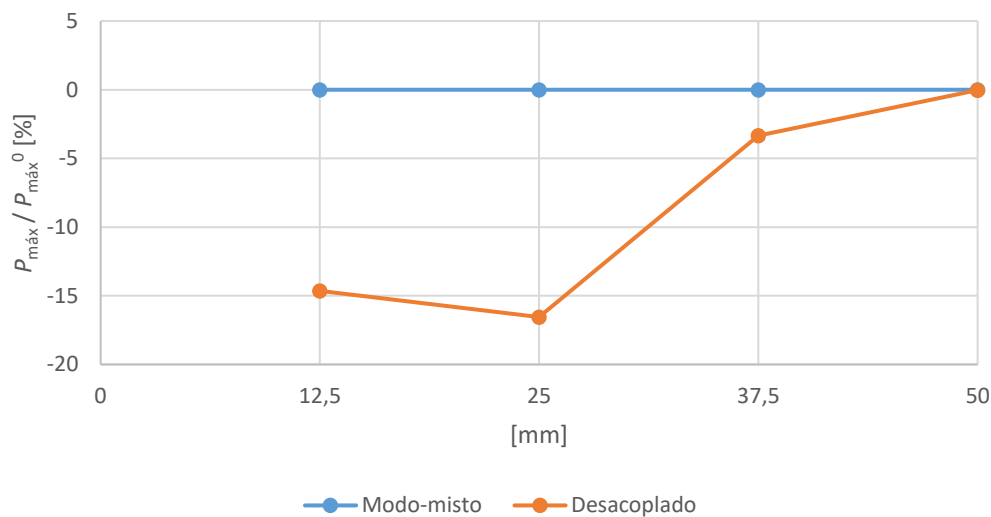


Figura 75 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ correspondentes a modo-misto e desacoplado para os diferentes L_0 , com adesivo XNR6852 E-2

3.2.4.3 Resistências coesivas

Com o objetivo de estudar a influência das resistências coesivas no comportamento e resistência de JSS 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 utilizados anteriormente. A variação destes parâmetros influencia diretamente δ_n^f e δ_s^f , uma vez se mantêm constantes os valores G_{IC} e G_{IIC} .

A Figura 76, Figura 77, Figura 78 e Figura 79 mostram as curvas P - δ correspondentes às variações efetuadas a t_n^0 , para todos os L_0 por ordem crescente. Pode observar-se que, de uma maneira geral, a diminuição de t_n^0 aumenta o deslocamento máximo (δ_m^f). Como referido, mantendo a tenacidade à tração (G_{IC} , que representa área abaixo da curva da lei de tração), é expectável que δ_n^f aumente, repercutindo-se no modo misto. Pelo mesmo motivo, o aumento de t_n^0 promove uma diminuição de δ_m^f . Contudo, estes efeitos não se verificam para o menor L_0 , onde o δ_m^f diminui quando t_n^0 diminui, e aumenta quando este também aumenta. Isto pode dever-se ao facto das tensões de arrancamento nas extremidades, para menores L_0 , apresentarem maior preponderância, uma vez que tem menos área resistente, ficando δ_m^f restringido por falta de resistência da junta. De referir ainda que a diminuição t_n^0 influencia mais os deslocamentos do que o seu aumento.

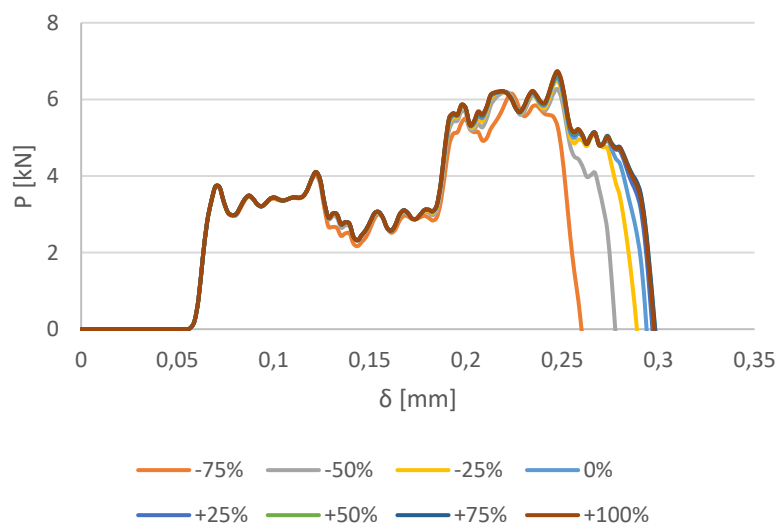


Figura 76 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=12,5$ mm

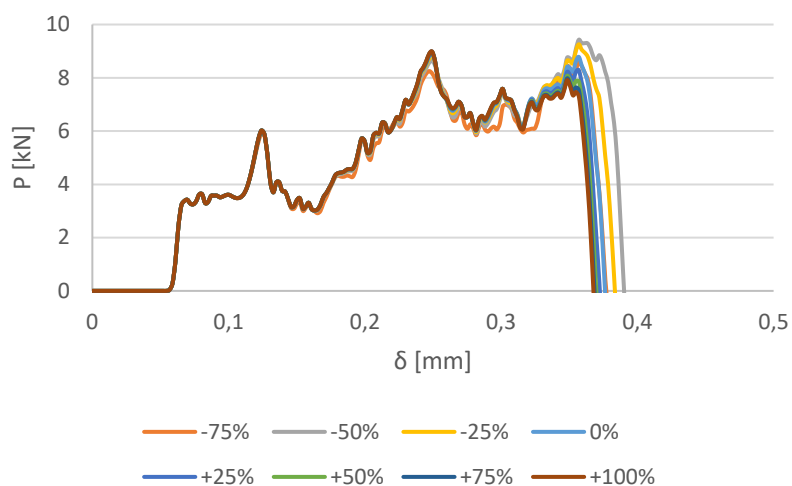


Figura 77 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=25$ mm

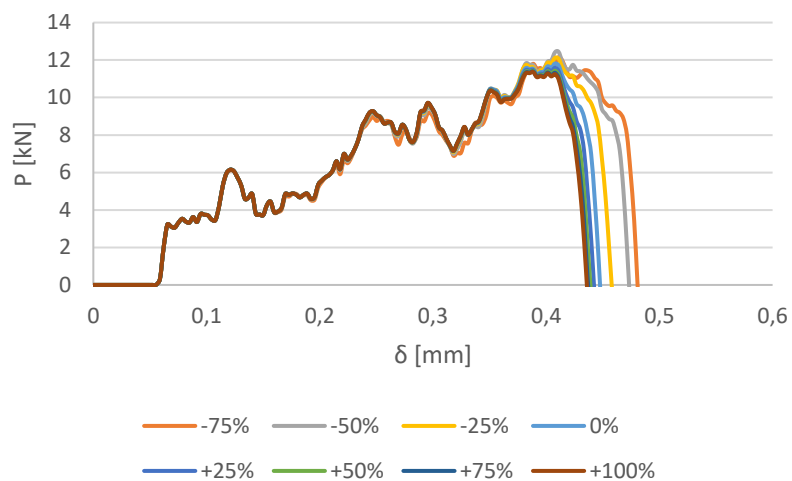


Figura 78 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=37,5$ mm

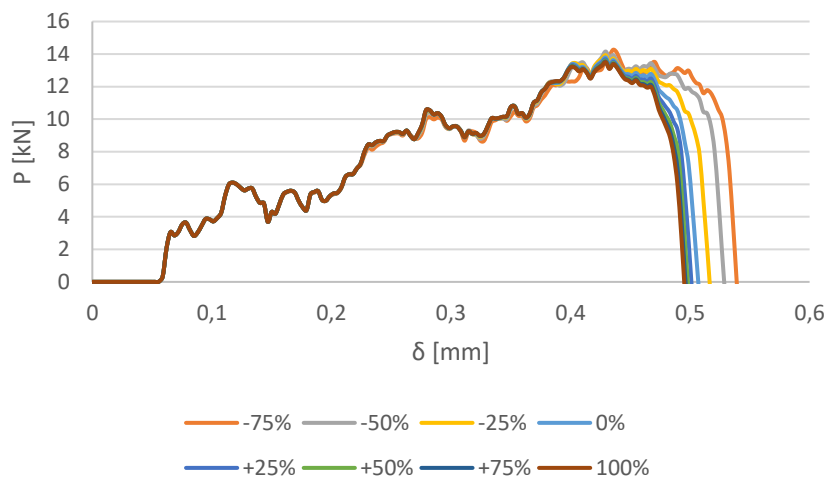


Figura 79 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=50$ mm

A influência de t_n^0 na resistência da junta pode verificar-se na Figura 80. Pelo fenómeno descrito anteriormente para $L_0=12,5$ mm, pode concluir-se que neste L_0 a diminuição de t_n^0 confere uma menor resistência à junta, dando -se uma ocorrência prematura de t_m^0 (equação 3), encontrando-se aqui o valor que reflete maior influência em $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ que é de -6%. Como este valor indica, a influência de t_n^0 na resistência das juntas é muito baixa. Ainda para o mesmo L_0 um aumento de t_n^0 reflete-se num aumento de resistência, ainda que praticamente insignificante. Os L_0 intermédios apresentam comportamentos irregulares (sempre com valores muito baixos), sendo que para o maior L_0 acontece o inverso do acima descrito, correspondendo a maior resistência da junta para a maior diminuição de t_n^0 . Este facto pode dever-se, também, ao fenómeno referido, visto que nesta junta terá maior relevância os esforços de corte.

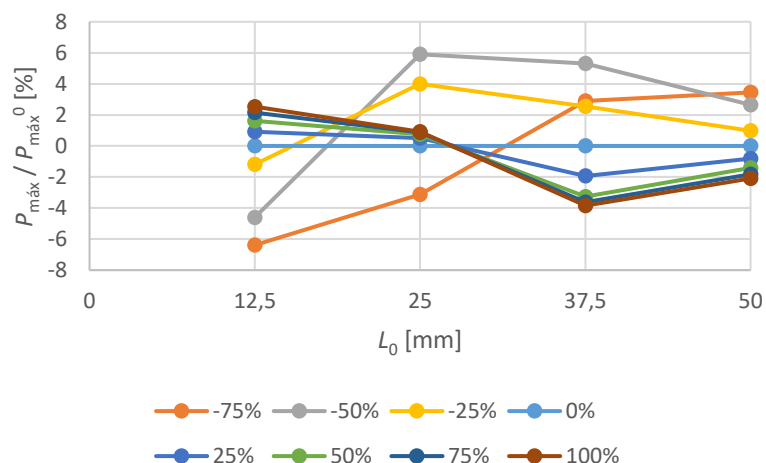


Figura 80 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de t_n^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo AV138

A Figura 81, Figura 82, Figura 83 e Figura 84 apresentam as curvas $P-\delta$ com o adesivo AV138, nas mesmas condições referidas anteriormente, mas variando agora t_s^0 , mantendo as restantes propriedades. Embora a redução de t_s^0 , para igual G_{IIc} , remeta para um aumento de δ_s^f , a verdade é que isto não se traduz no deslocamento máximo em modo misto (δ_m^f), uma vez que precipita bastante a ocorrência de t_m^0 , já que as JSS estão essencialmente sujeitas a corte. Esta redução significativa de resistência, tratando-se de um adesivo frágil (não apresenta capacidade de continuar a aguentar carga após iniciação do dano), limita δ_m^f , podendo ser verificada em todos os L_0 . Esta influência é maior nas reduções de t_s^0 do que nos seus aumentos.

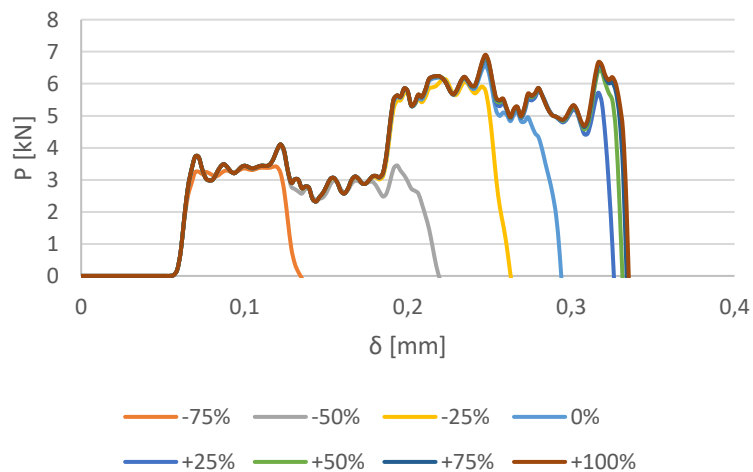


Figura 81 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=12,5$ mm

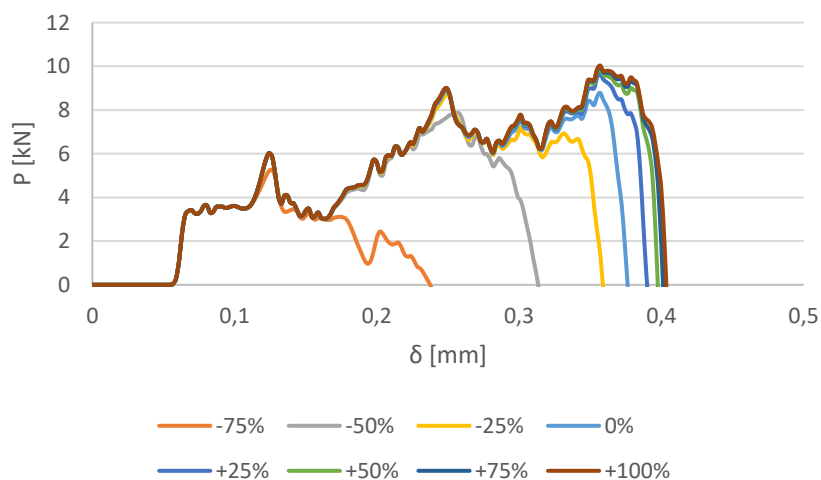


Figura 82 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=25$ mm

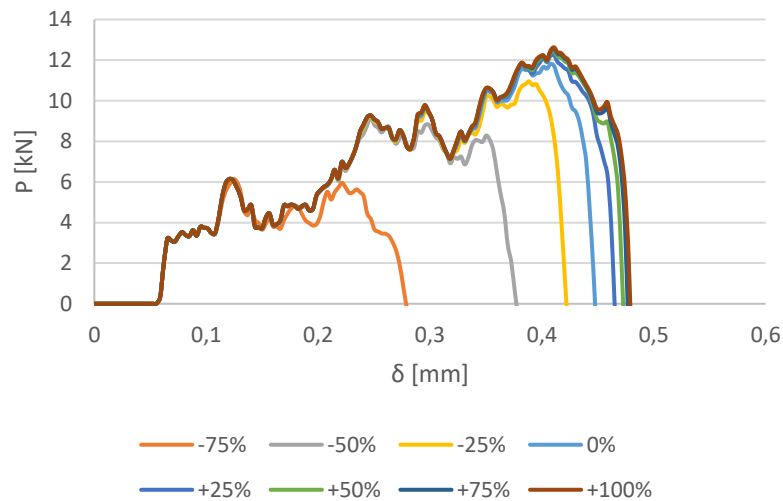


Figura 83 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=37,5$ mm

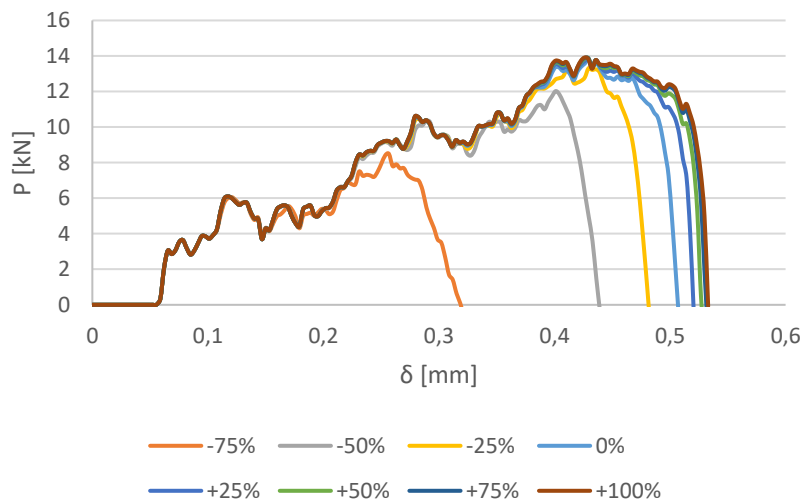


Figura 84 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=50$ mm

Sendo o corte o esforço principal a que as JSS estão sujeitas, é natural que t_s^0 apresente grande influência em todos os L_0 , fazendo com que t_m^0 seja afetado quase na mesma medida (equação 3). Isto pode ser verificado na Figura 85 na qual, quanto mais se varia t_s^0 , mais isso influencia a resistência da junta. É notória uma maior influência nos valores de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ quando se diminui t_s^0 (sendo o valor mais expressivo de -48% para uma diminuição de -75% de t_s^0 no $L_0=12,5$ mm e $L_0=37,5$ mm), em relação a quando se aumenta (maior valor de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ igual a cerca de 13% para uma variação de t_s^0 de +100%, no $L_0=25$ mm). Verifica-se ainda que o aumento de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ é limitado, principalmente nos maiores L_0 , tal como acontece no caso estático [49].

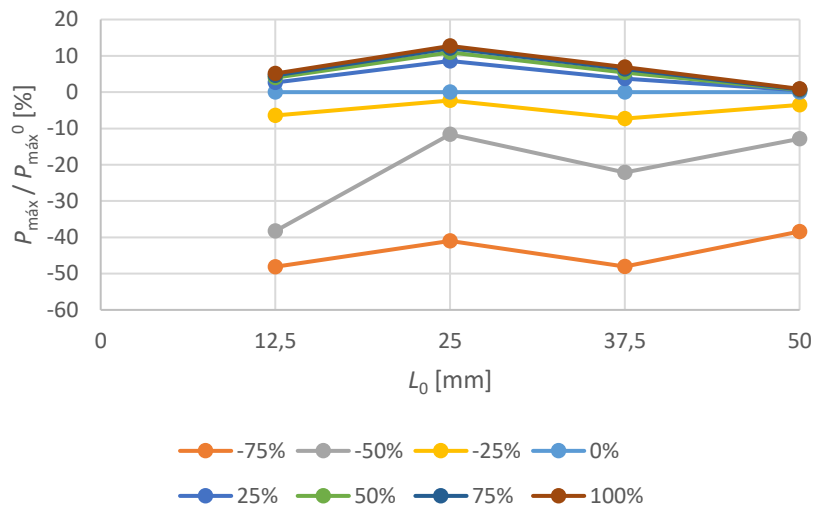


Figura 85 - Variação percentual de P_{\max}/P_{\max}^0 com variações de t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo AV138

Analisando a Figura 86, Figura 87, Figura 88 e Figura 89, pode concluir-se que as curvas P - δ , variando t_n^0 e t_s^0 em simultâneo, são muito semelhantes àquelas em que se faz variar apenas t_s^0 , para todos os L_0 . A variação destes dois parâmetros resulta quase que num somatório das suas influências, sendo que, como foi explicado, t_s^0 apresenta uma influência muito maior do que t_n^0 no comportamento deste tipo de juntas adesivas, pelo que será normal esta semelhança ser encontrada.

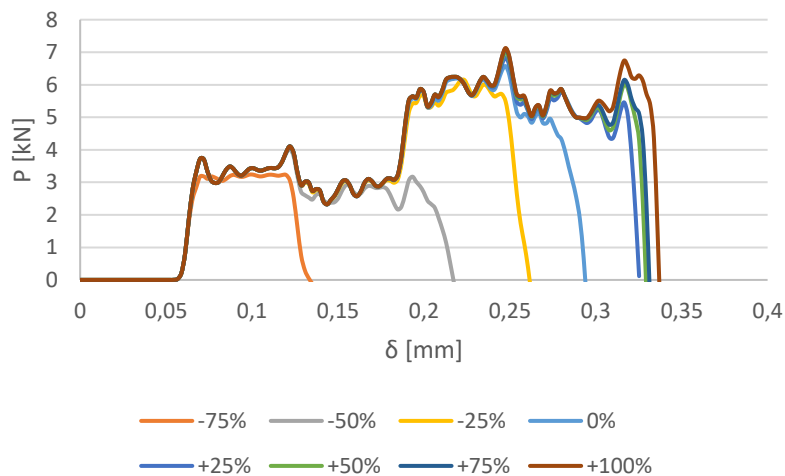


Figura 86 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=12,5$ mm

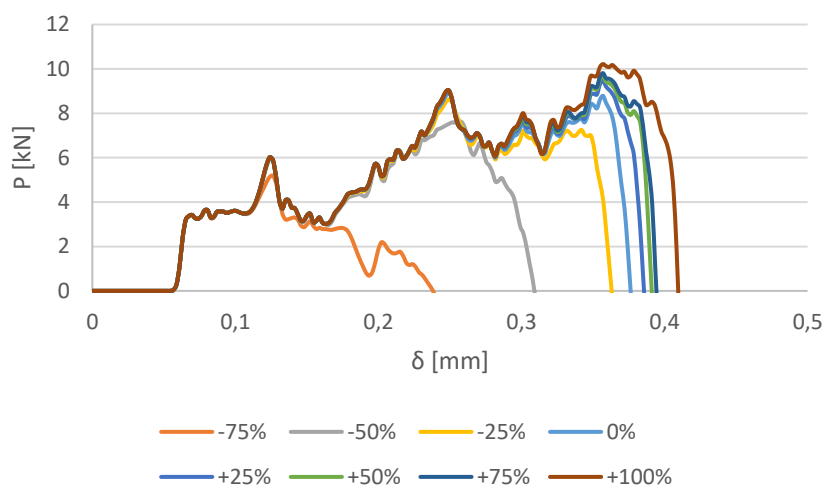


Figura 87 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=25$ mm

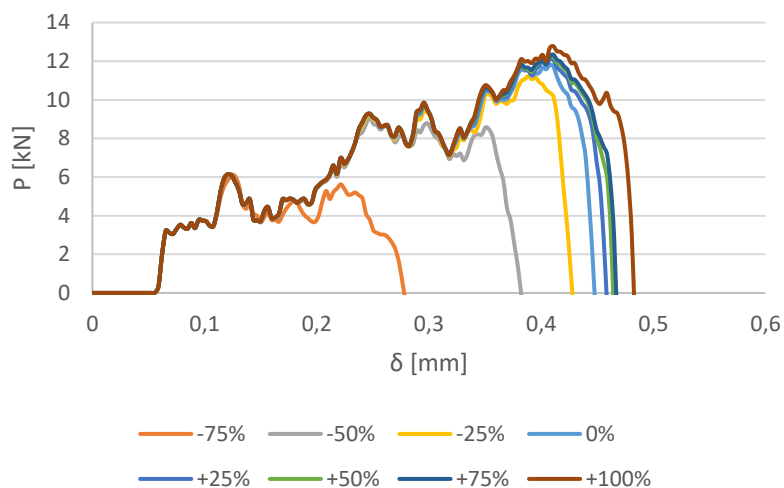


Figura 88 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=37,5$ mm

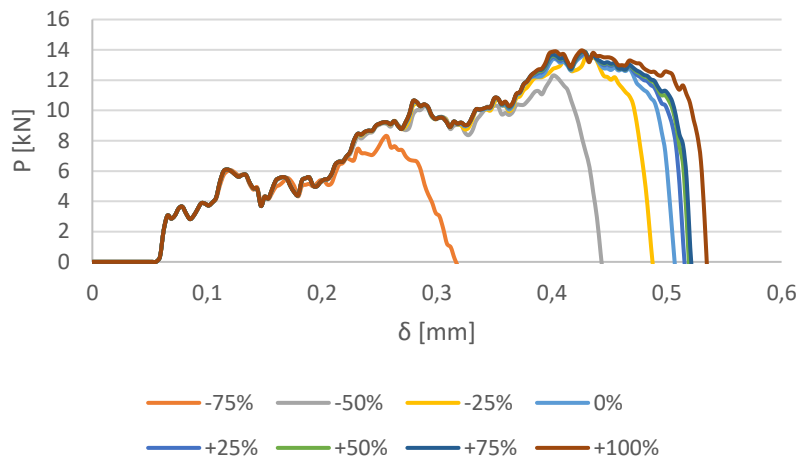


Figura 89 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=50$ mm

A Figura 90 apresenta as variações percentuais de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ quando se faz variar t_n^0 e t_s^0 . Tal como acontece com as curvas P - δ , também aqui se verifica enorme semelhança com a figura que demonstra estes valores quando variado apenas t_s^0 (Figura 85), uma vez que este parâmetro apresenta uma influência muito maior do que t_n^0 . A análise é, portanto, semelhante. No entanto, pode verificar-se um ligeiro aumento de influência (uma vez que são dois parâmetros a variar), sendo agora o valor mais expressivo de aproximadamente -51% (variação de -75%, com $L_0=12,5$ mm) em relação ao valor de referência.

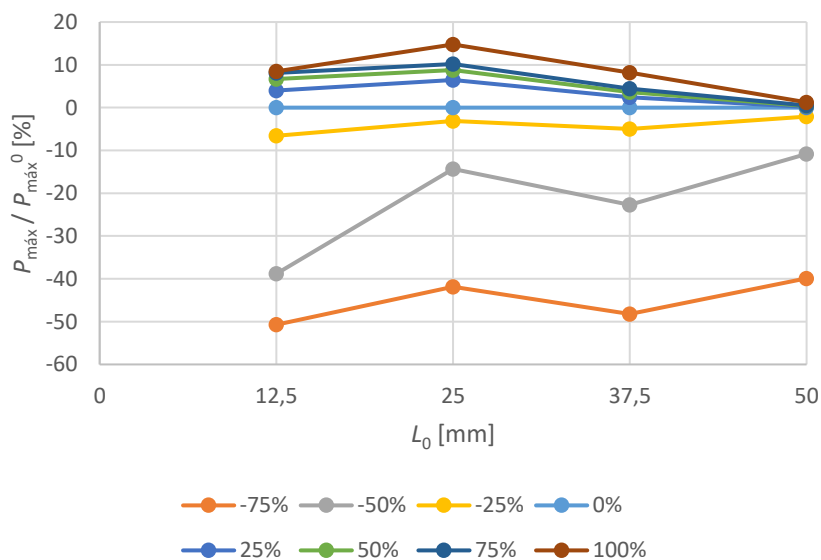


Figura 90 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo AV138

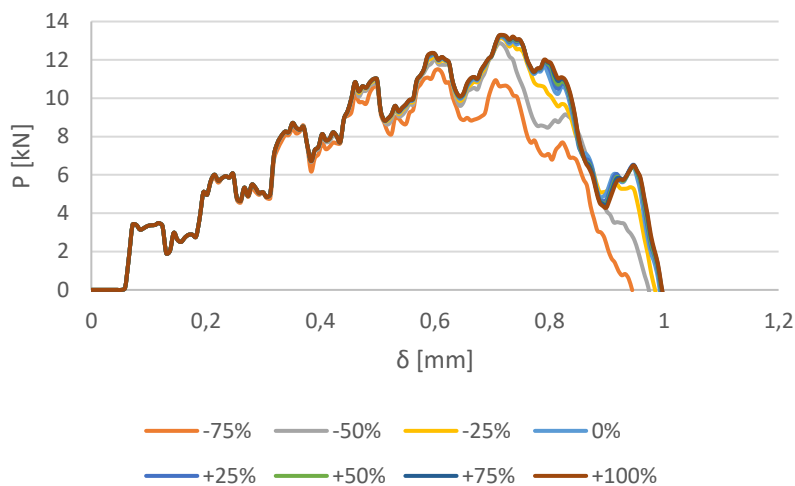


Figura 91 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=12,5$ mm

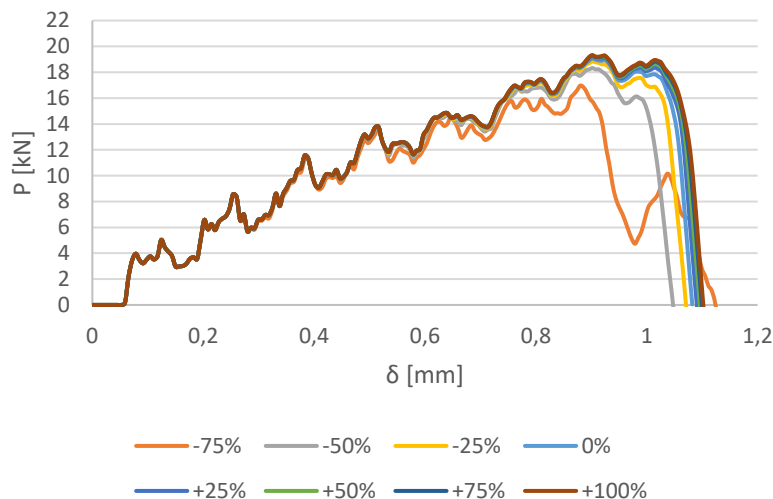


Figura 92 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=25$ mm

A Figura 91, Figura 92, Figura 93 e Figura 94 apresentam as curvas P - δ para as diferentes variações de t_n^0 , para todos os L_0 , com o adesivo XNR6852 E-2. Apesar de referido anteriormente que a diminuição t_n^0 se poderia refletir no aumento de δ_m^f , neste caso isto só acontece para a variação de -75% no $L_0=25$ mm. De uma forma geral isto não se verifica, ao contrário do adesivo anterior, uma vez que este se trata de um adesivo mais dúctil. Como tal, os deslocamentos já são consideráveis, não apresentando grande influência a variação de t_n^0 neste aspeto. Neste adesivo, a ocorrência prematura de t_m^0 é mais relevante, fazendo com que esta redução de resistência se traduza em deslocamentos menores. Para $L_0=37,5$ mm, este fenómeno é bem visível uma vez que, sendo este um adesivo dúctil, tem maior capacidade para resistir a esforços de arrancamento (tração), apresentando valores de carga máxima

semelhantes. No entanto, a redução de t_n^0 precipita a fase de amaciamento. Pode observar-se, mais uma vez, que as reduções de t_n^0 apresentam maior influência do que os seus aumentos. Para $L_0=50$ mm estes fenómenos não se verificam, sendo a influência de t_n^0 praticamente nula.

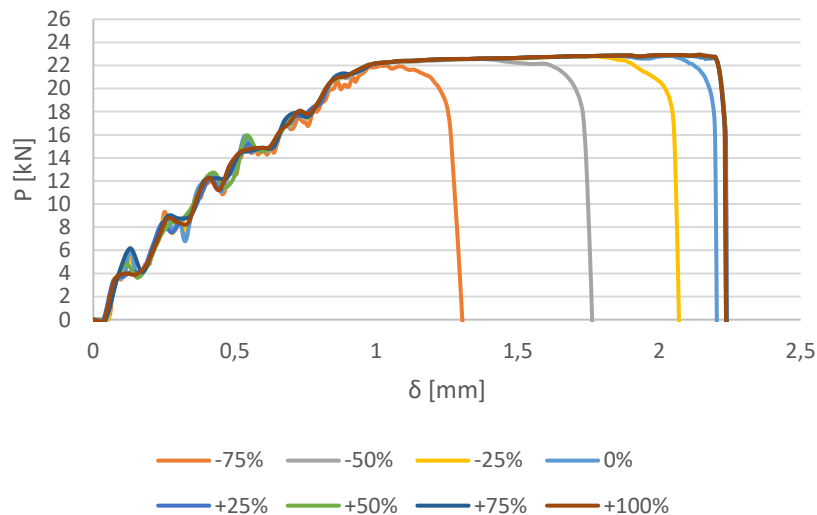


Figura 93 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=37,5$ mm

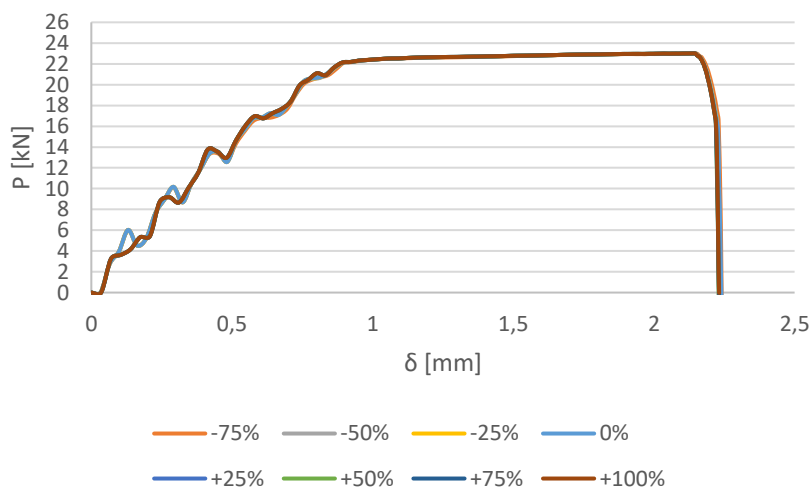


Figura 94 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=50$ mm

Analisando a Figura 95 pode concluir-se que, de uma forma geral, t_n^0 apresenta baixa influência na resistência da junta adesiva. Para L_0 maiores a influência é menor do que para L_0 menores, o que pode ser explicado pelo mesmo fenómeno referido quando t_n^0 foi variado com o adesivo AV138. O valor mais acentuado de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ é de cerca de 13% em relação ao valor de referência, acontecendo precisamente para $L_0=12,5$ mm

na maior redução de t_n^0 (-75%). Confirmando o fenómeno referido está, ainda, o facto de esta influência ser praticamente nula para $L_0=50$ mm.

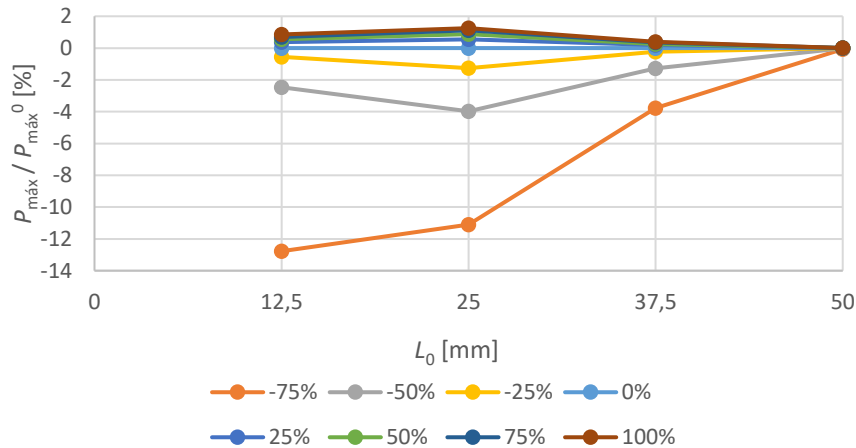


Figura 95 - Variação percentual de $P_{máx}/P_{máx}^0$ com variações de t_n^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo XNR6852 E-2

Como explicado anteriormente, uma redução de t_s^0 , para igual G_{IIC} , remete para um aumento de δ_s^f o que, neste caso, tratando-se de um adesivo dúctil, traduz-se no deslocamento máximo em modo misto (δ_m^f). Embora a redução de t_s^0 precipite bastante a ocorrência de t_m^0 , já que as JSS estão essencialmente sujeitas a corte, este adesivo tem a capacidade de suportar carga depois da iniciação de dano, apresentando δ_m^f muito maiores do que a referência, o que resulta numa resistência muito mais baixa. No caso dos aumentos de t_s^0 , os deslocamentos não diminuem como poderia ser esperado, visto que o retardar de t_m^0 traduz-se em δ_m^f maiores do que a referência, ainda que com diferenças menos expressivas. Na Figura 96, Figura 97, Figura 98 e Figura 99, onde se apresentam as curvas $P-\delta$, pode observar-se que estes fenómenos acontecem tal como descrito para $L_0=12,5$ mm, sendo que $L_0=25$ mm e $L_0=37,5$ mm, apresentam comportamentos intermédios, onde por exemplo a variação de -25% sofre uma redução normal de resistência (precipita t_m^0), mas não é uma redução tal que, para a mesma tenacidade, permita depois um comportamento tao dúctil. Para $L_0=50$ mm, a influência é praticamente nula, só se manifestando para a maior redução de t_s^0 .

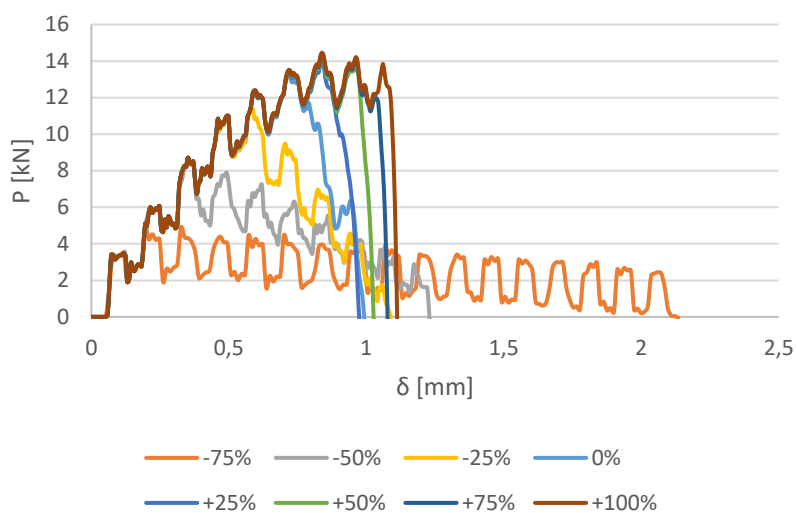


Figura 96 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=12,5$ mm

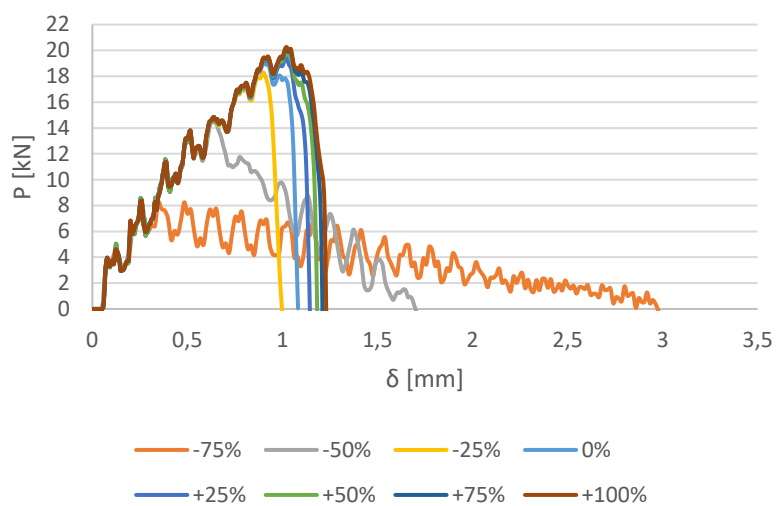


Figura 97 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=25$ mm

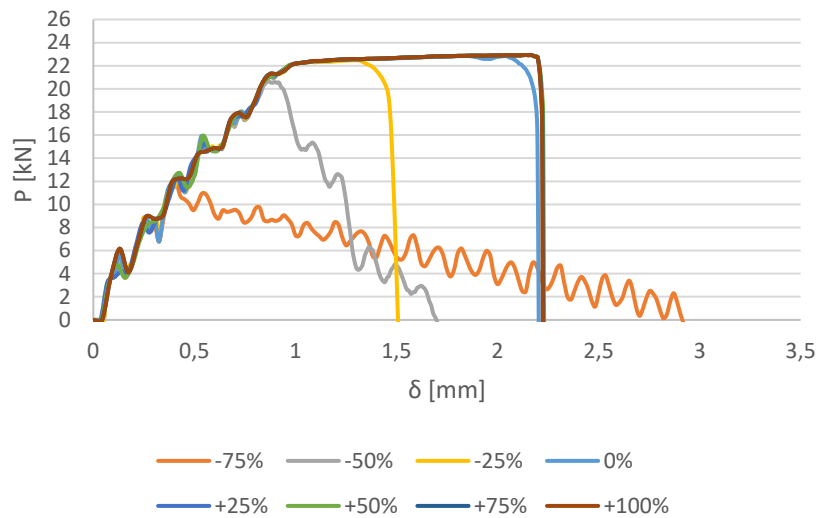


Figura 98 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=37,5$ mm

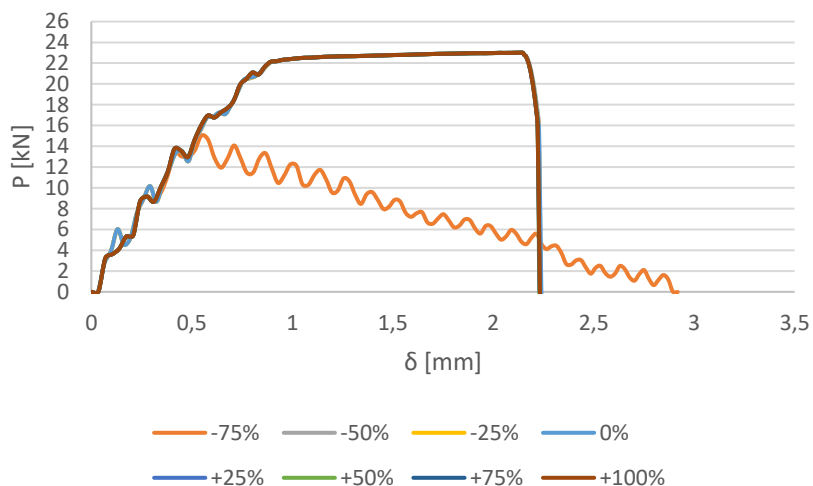


Figura 99 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=50$ mm

A Figura 100 mostra a influência de t_s^0 nos valores de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$. As conclusões são em tudo semelhantes àquelas explicadas quando se fez variar t_s^0 com o AV138. Verifica-se, de novo, o efeito de limitação de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ quando se aumenta t_s^0 , principalmente para maiores L_0 . Para o maior L_0 , à exceção da variação de -75%, a influência é aproximadamente nula. Para este L_0 , este adesivo apresenta uma resistência elevada que parece limitada pela capacidade do substrato, dando origem a deformação plástica considerável (patamar da curva P - δ) pelo que, mesmo sendo o corte a principal sollicitação, a variação de t_s^0 não é expressiva, excetuando a de -75% que apresenta um valor de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ de cerca de -37%. Pode observar-se, mais uma vez, que as reduções são mais expressivas do que os aumentos de t_s^0 , sendo o valor mais contundente de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ igual a -62% em relação ao valor de referência.

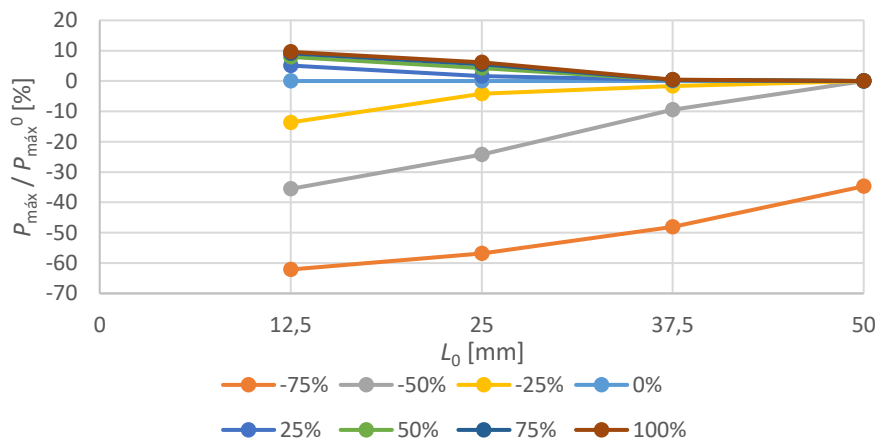


Figura 100 - Variação percentual de $P_{máx}/P_{máx}^0$ com variações de t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo XNR6852 E-2

Variando t_n^0 e t_s^0 em simultâneo verifica-se, também neste adesivo, que os resultados são praticamente iguais aos da variação de t_s^0 individualmente. A Figura 101, Figura 102, Figura 103 e Figura 104 deixam transparecer este facto, onde até as singularidades descritas para os diferentes comprimentos de sobreposição são as mesmas.

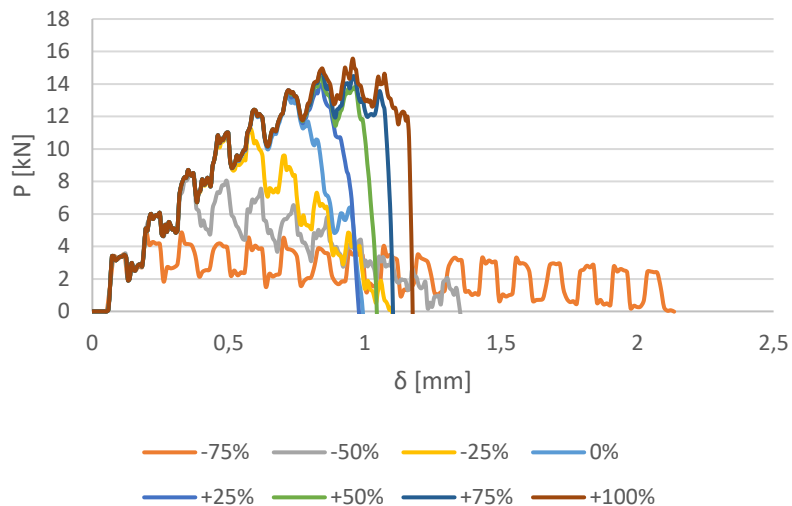


Figura 101 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=12,5$ mm

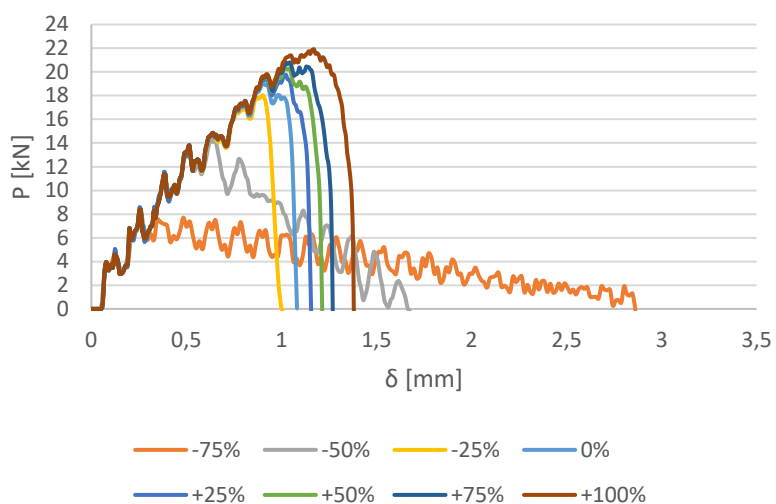


Figura 102 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=25$ mm

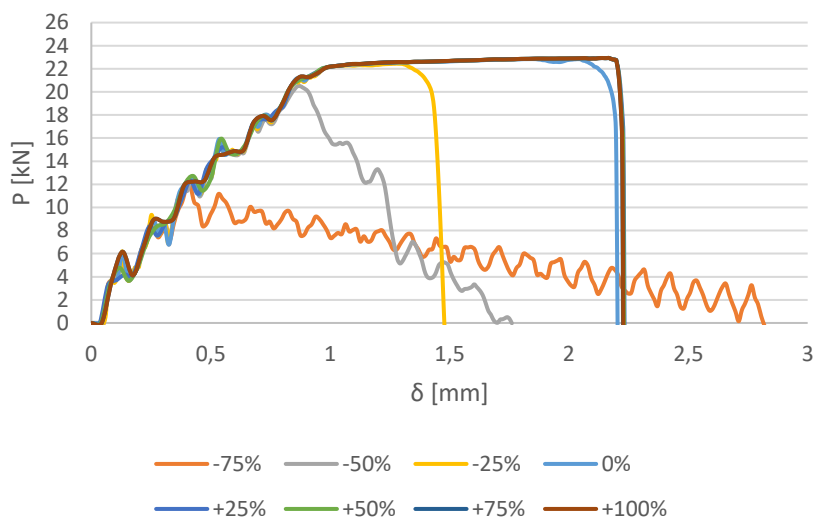


Figura 103 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=37,5$ mm

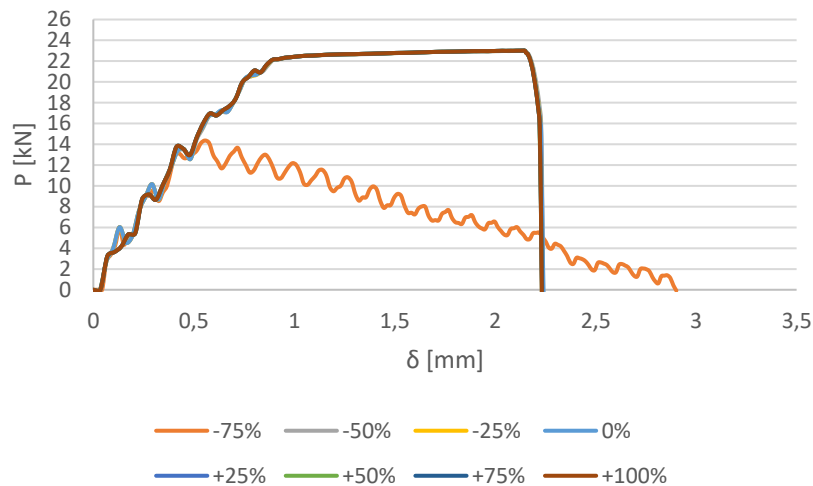


Figura 104 - Curvas P - δ correspondentes a variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=50$ mm

A Figura 105 apresenta os valores de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$, quando variados t_n^0 e t_s^0 . A observação desta figura permite concluir, novamente, que os resultados são muito semelhantes à variação apenas t_s^0 . O valor mais relevante de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ é de aproximadamente -63% para o menor L_0 para a maior redução de t_n^0 e t_s^0 . Mais uma vez se comprova que os L_0 menores são mais influenciados, e que a redução dos parâmetros apresenta maior influência do que o seu aumento. Indo de encontro ao facto de t_n^0 ser mais influente em L_0 menores, nota-se que para $L_0=12,5$ mm o aumento dos parâmetros traduz-se em valores de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ mais expressivos.

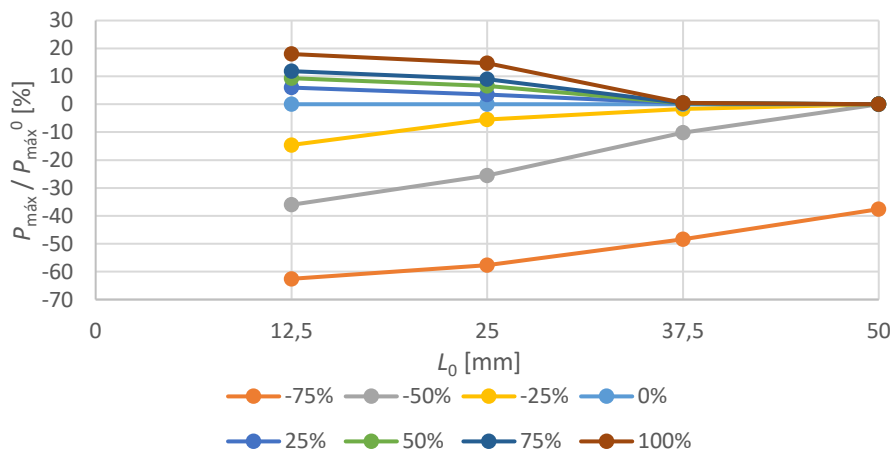


Figura 105 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de t_n^0 e t_s^0 entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo XNR6852 E-2

3.2.4.4 Tenacidades à fratura

Tendo em vista o estudo da influência das tenacidades coesivas no comportamento e resistência de JSS solicitadas ao impacto, fez-se variar a tenacidade coesiva à tração (G_{Ic}) e a tenacidade coesiva ao corte (G_{IIc}), individualmente e em simultâneo, nos mesmos intervalos utilizados anteriormente.

Como explicado anteriormente, a tenacidade à tração (G_{Ic}) e a tenacidade ao corte (G_{IIc}) representam a área abaixo da curva, pelo que permitem definir os deslocamentos máximos relativos à tração (δ_n^f) e ao corte (δ_s^f).

A Figura 106, Figura 107, Figura 108 e Figura 109 apresentam as curvas $P-\delta$ para variações nos intervalos referidos, com o adesivo AV138, para todos os L_0 . Nestas figuras comprova-se que, tanto a redução como o aumento de G_{Ic} , tem o efeito esperado, uma vez que reduz ou aumenta δ_n^f , respetivamente, o que tem repercussão no δ_m^f , como seria de esperar. Nota-se, também, que as reduções de G_{Ic} apresentam maior influência do que os seus aumentos, o que se pode dever a uma falha prematura (δ_n^f reduzido) nas extremidades, onde os esforços de tração são mais acentuados.

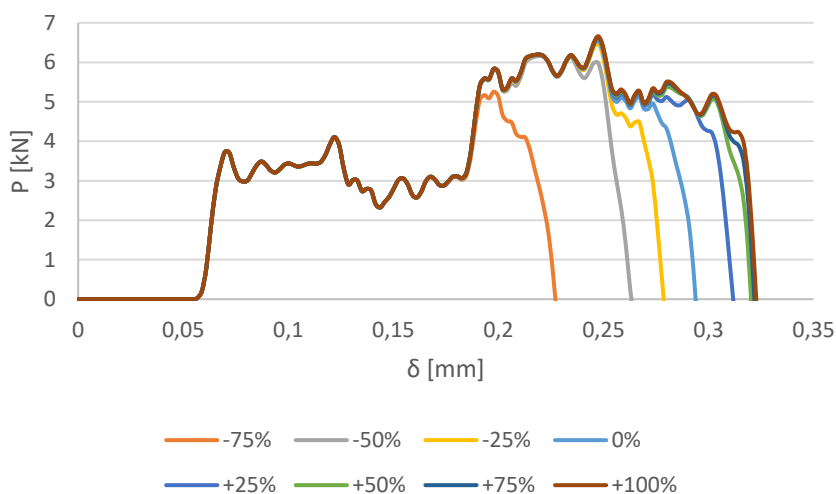


Figura 106 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{Ic} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=12,5$ mm

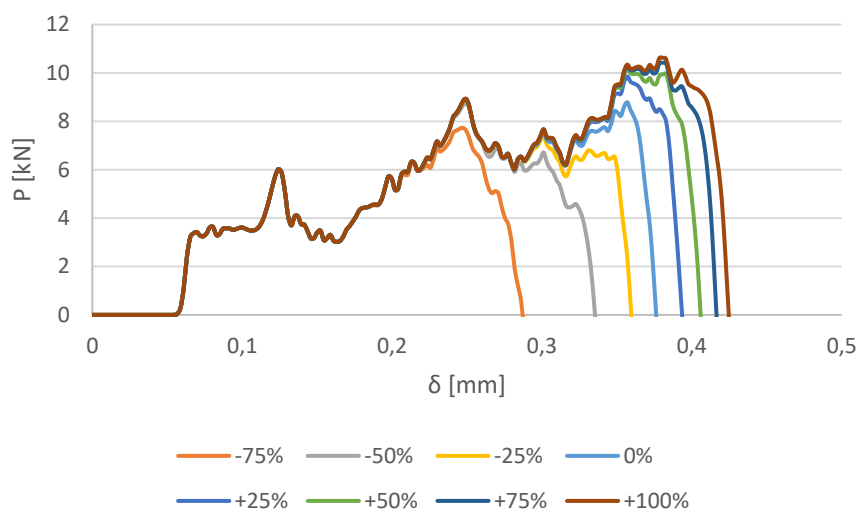


Figura 107 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{ic} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=25$ mm

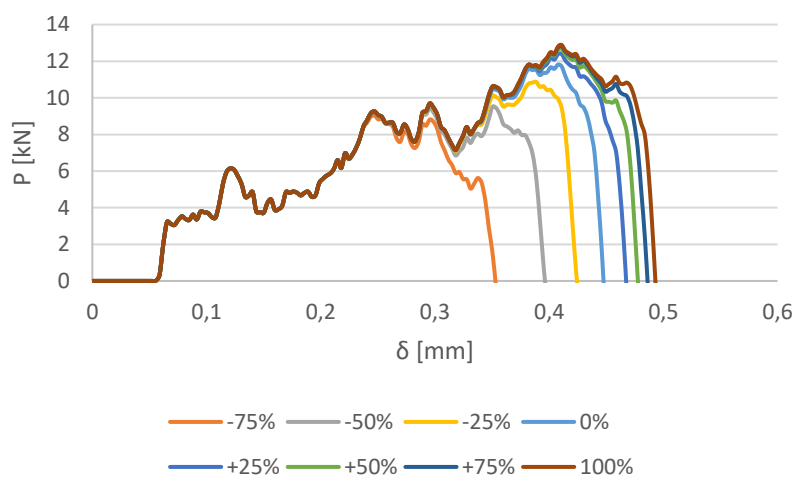


Figura 108 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{ic} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=37,5$ mm

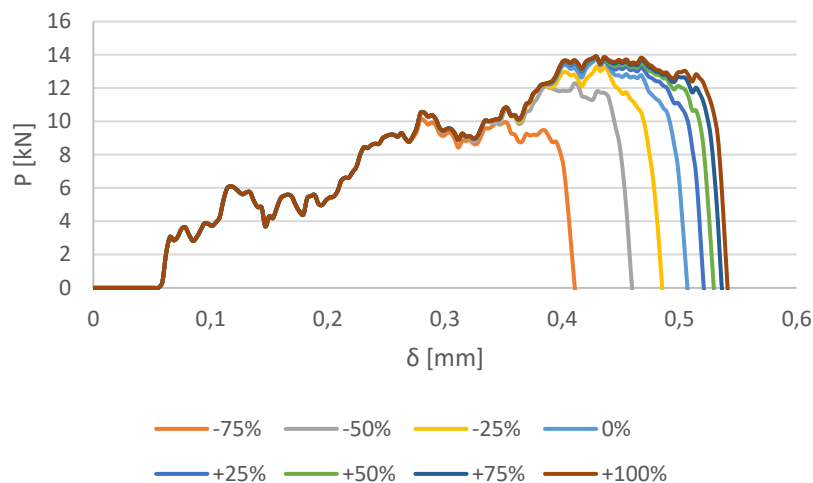


Figura 109 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{1c} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=50$ mm

A Figura 110 mostra os valores de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ quando se varia G_{1c} . De uma forma genérica, as reduções de G_{1c} influenciam mais a resistência da junta. O valor mais expressivo de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ é -26% em relação ao valor de referência e corresponde a $L_0=50$ mm, variando G_{1c} em -75%. Os aumentos de G_{1c} são praticamente insignificantes nos L_0 extremos, uma vez que implicam valores de δ_h bastante elevados, apresentando maior influência em L_0 intermédios, para $L_0=25$ mm principalmente.

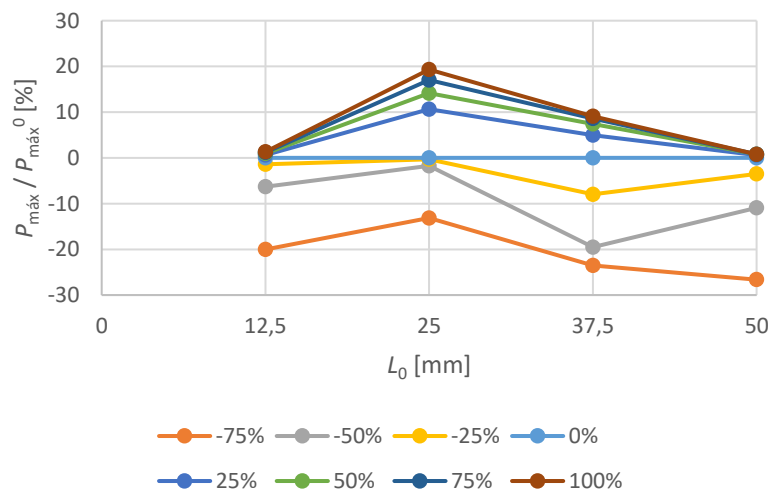


Figura 110 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de G_{1c} entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo AV138

As curvas P - δ para todos os L_0 , variando G_{1c} , com o AV138, estão presentes na Figura 111, Figura 112, Figura 113 e Figura 114. Nestas figuras comprova-se que a variação de G_{1c} , ao influenciar δ_s^f , se traduz em diferentes δ_m^f de forma semelhante ao caso do G_{1c} . Contudo, apesar de se observar que as reduções de G_{1c} se traduzem em δ_m^f

semelhantes às reduções de G_{IC} , o mesmo não acontece com os aumentos de G_{IIc} , que têm ligeiramente mais influência do que os aumentos de G_{IC} .

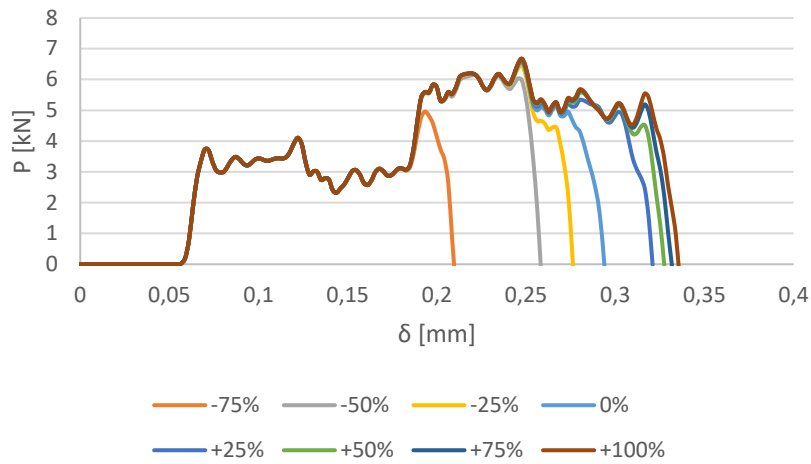


Figura 111 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=12,5$ mm

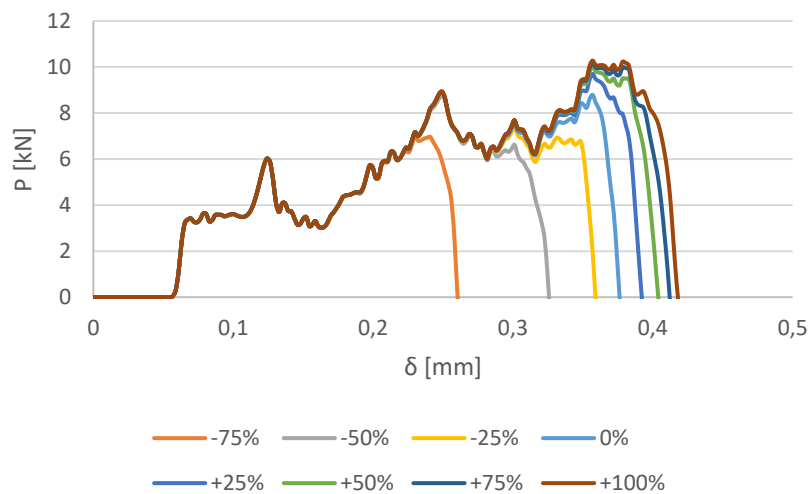


Figura 112 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=25$ mm

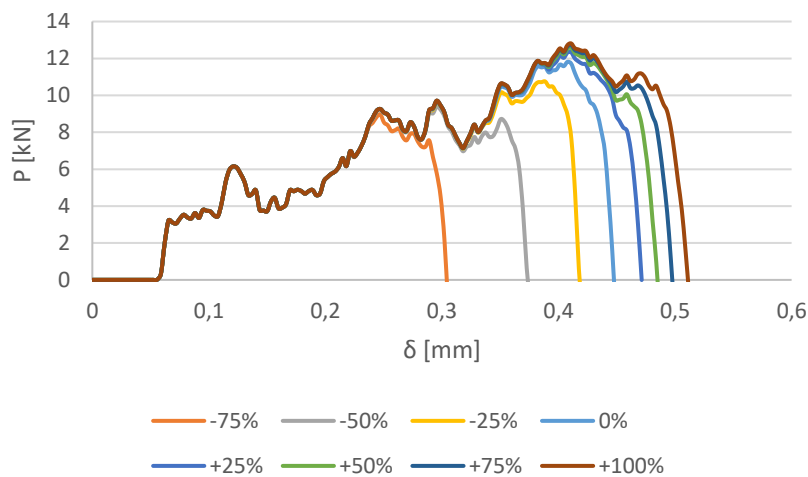


Figura 113 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=37,5$ mm

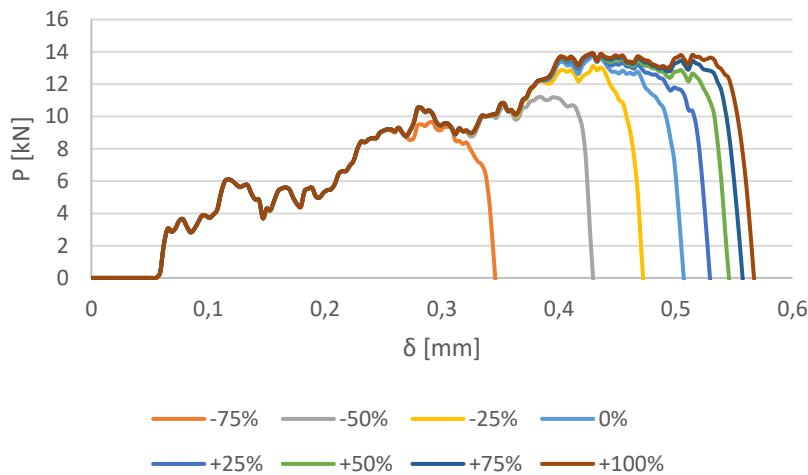


Figura 114 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=50$ mm

A Figura 115 apresenta os valores de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ quando se faz variar G_{IIc} . A análise desta figura permite concluir que a influência de G_{IIc} na resistência da junta é muito semelhante à de G_{Ic} . Como referido, as reduções apresentam maior influência do que os aumentos, sendo que os L_0 extremos são menos influenciados pelos aumentos do que os L_0 intermédios. Os aumentos não incrementam tanto a resistência, pois implicam valores de δ_{ξ} bastante elevados. O valor mais considerável acontece no mesmo caso anteriormente referido ($L_0=50$ mm para a redução de 75%) e é de -30% em relação à referência.

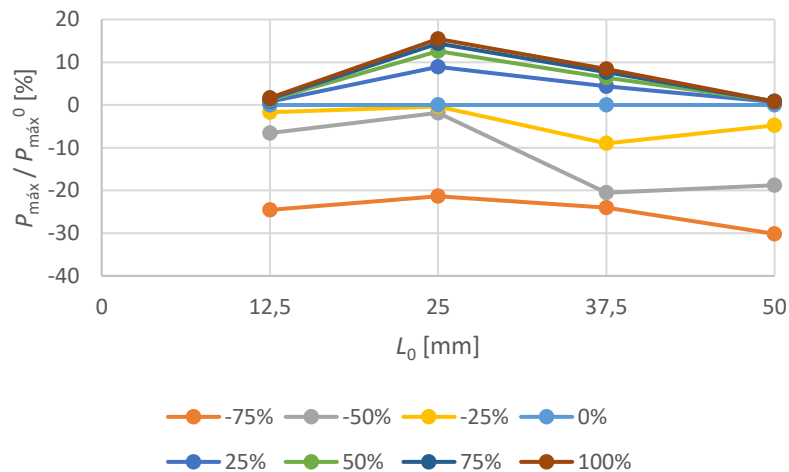


Figura 115 - Variação percentual de $P_{máx}/P_{máx}^0$ com variações de G_{IIc} entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo AV138

Nas Figura 116, Figura 117, Figura 118 e Figura 119 são apresentadas as curvas P - δ resultantes da variação de G_{Ic} e G_{IIc} . Como seria de esperar, mais uma vez, as tenacidades influenciam δ_m^f da mesma forma que G_{Ic} e G_{IIc} o fazem. Contudo, variando os dois em simultâneo é possível observar uma maior influência nos δ_m^f em relação a quando são variados individualmente.

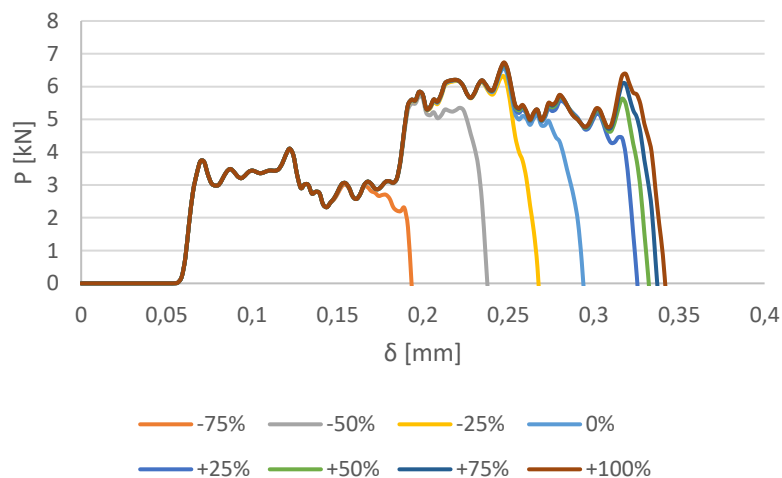


Figura 116 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=12,5$ mm

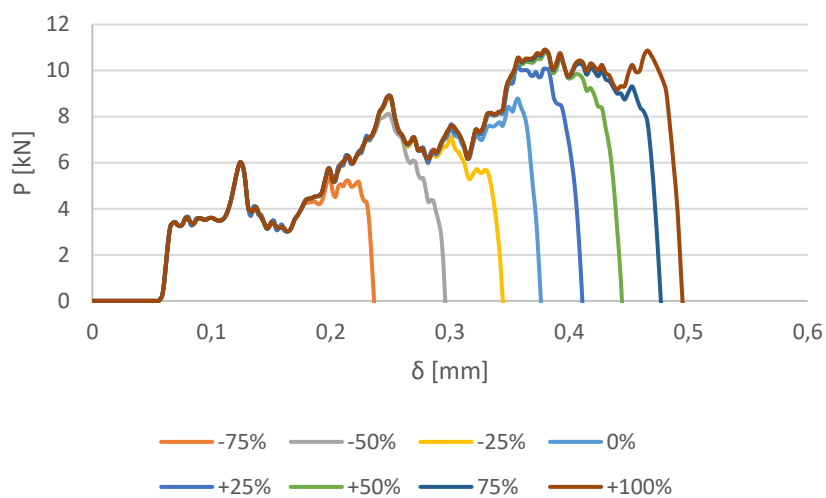


Figura 117 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=25$ mm

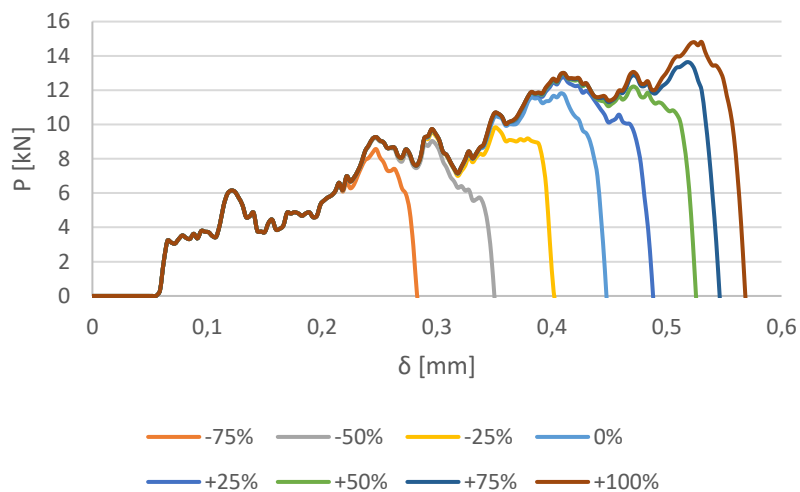


Figura 118 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=37,5$ mm

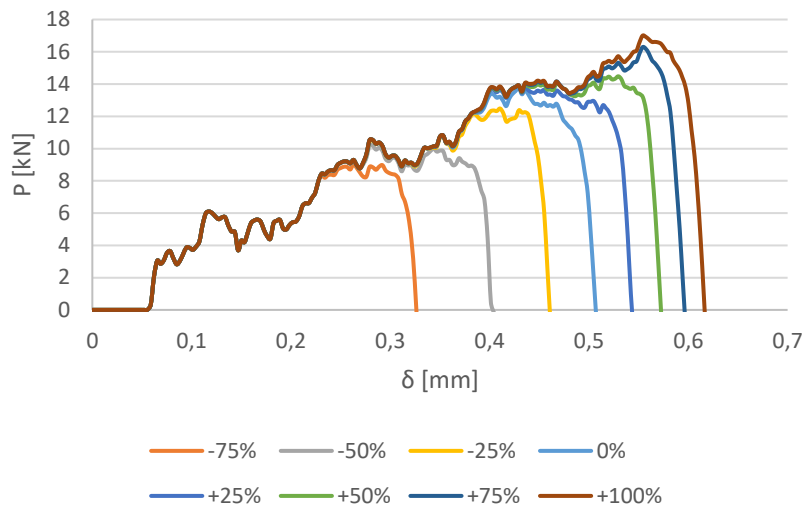


Figura 119 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo AV138, com $L_0=50$ mm

A Figura 120 apresenta os resultados relativos a $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ variando G_{Ic} e G_{IIc} em simultâneo. A influência destes dois parâmetros combinada é maior do que quando os parâmetros são variados individualmente. O valor mais relevante de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ é de cerca de -38% em relação ao valor de referência e observa-se para um $L_0=12,5$ mm quando a variação é de -75%. Pode notar-se que os aumentos de G_{Ic} e G_{IIc} se traduzem em aumentos consideráveis de resistência, à exceção do menor L_0 , contrariamente ao que sucede quando aumentados individualmente, nos maiores L_0 .

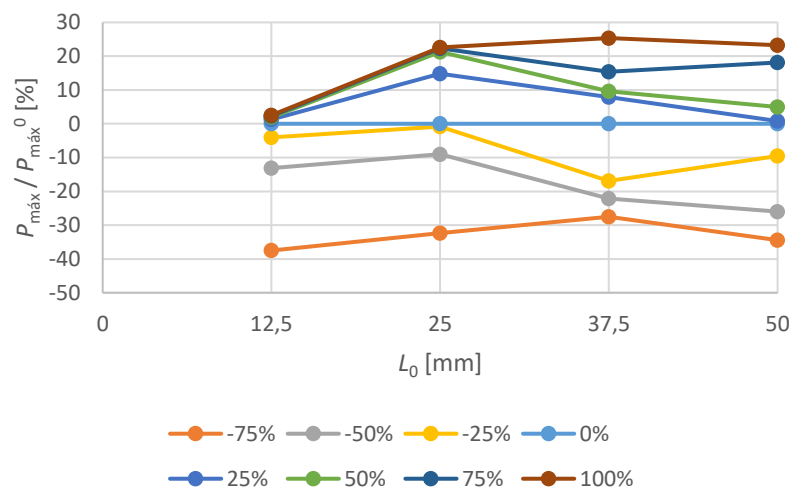


Figura 120 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo AV138

A Figura 121, Figura 122, Figura 123 e Figura 124 mostram as curvas P - δ para variações nos intervalos referidos, com o adesivo XNR6852 E-2, para todos os L_0 . Nestas figuras comprova-se que, de forma semelhante à mesma situação com o AV138, tanto a redução como o aumento de G_{Ic} , reduzem ou aumentam δ_n^f , respetivamente, o que

tem repercussão no δ_m^f , como seria de esperar. Nota-se, também, que as reduções de G_{Ic} apresentam maior influência do que os seus aumentos (bem visível no $L_0=37,5$ mm), o que se pode dever a uma falha prematura (δ_n^f reduzido) nas extremidades, onde os esforços de tração são mais acentuados. No entanto, sendo este um adesivo tenaz, a influência deste parâmetro revela-se mais acentuada do que no outro adesivo. A junta com $L_0=50$ mm apresenta, novamente, um comportamento em que praticamente só a maior redução tem efeitos visíveis. Como referido, com este L_0 , ao possuir mais área resistente, a junta apresenta características suficientes para as solicitações impostas que lhe permitem, mesmo com alguma redução de tenacidade, apresentar um comportamento idêntico.

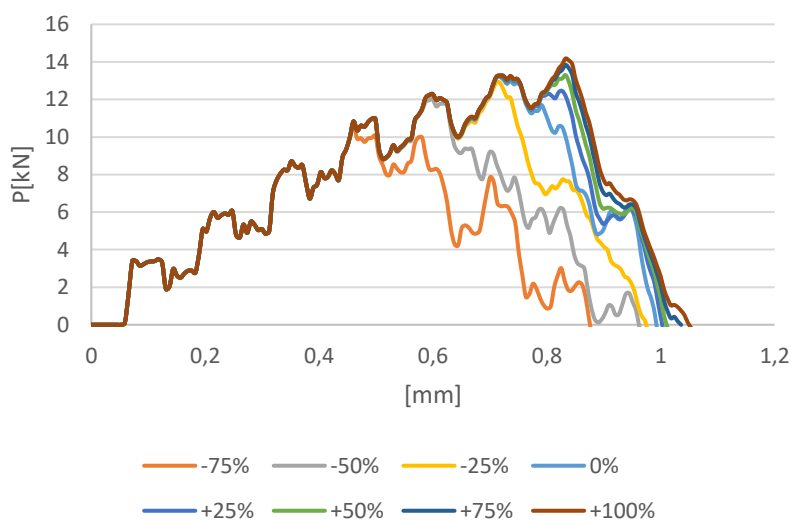


Figura 121 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{Ic} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=12,5$ mm

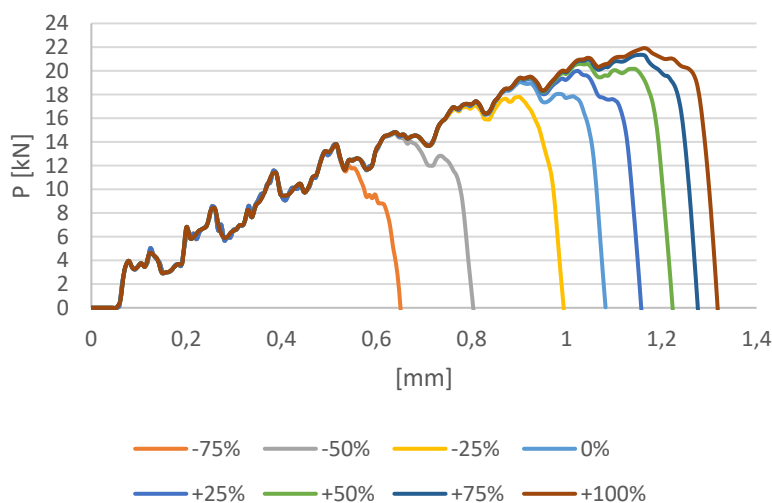


Figura 122 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{Ic} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=25$ mm

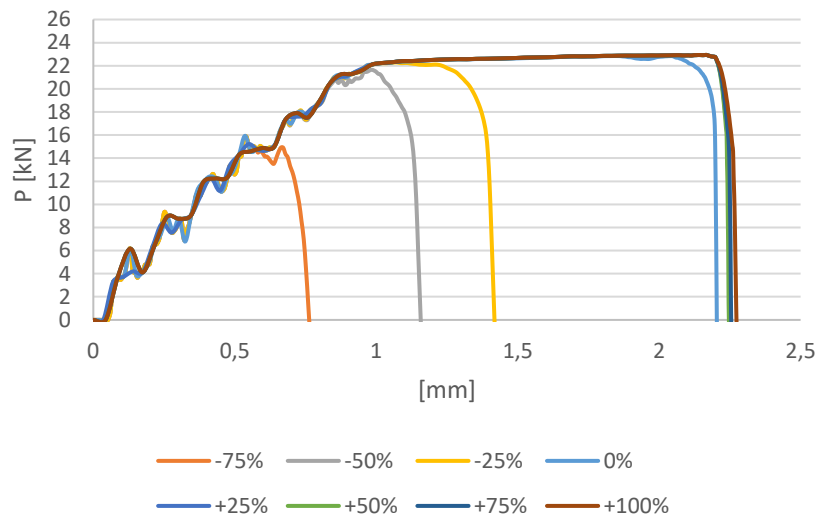


Figura 123 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{1c} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=37,5$ mm

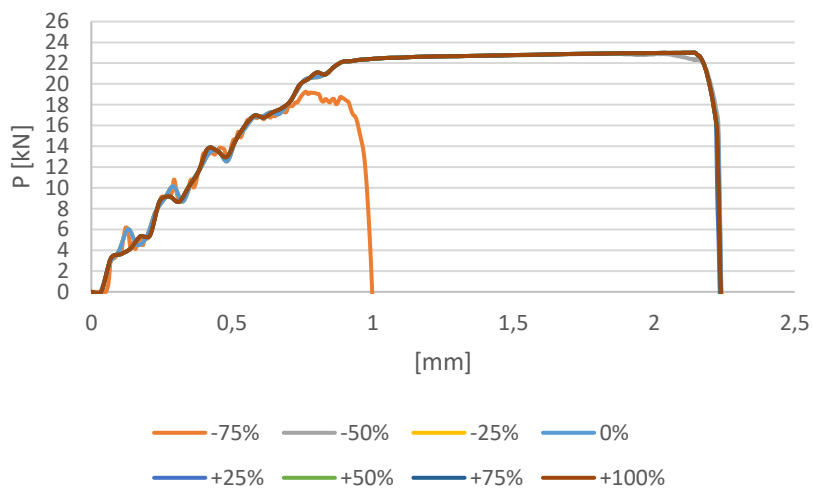


Figura 124 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{1c} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=50$ mm

A Figura 125 mostra os resultados de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ quando se varia G_{1c} , tendo sido encontrado o seu valor mais expressivo, cerca de -30% em relação à refer\ncia, para $L_0=37,5$ mm na maior redução do par\metro. \ semelhança do que sucede com o AV 138 na mesma situação, os aumentos do par\metro t\m maior influ\ncia para $L_0=25$ mm, enquanto para o maior L_0 esta influ\ncia \ diminuta. De forma geral, as reduções apresentam maior influ\ncia do que os aumentos.

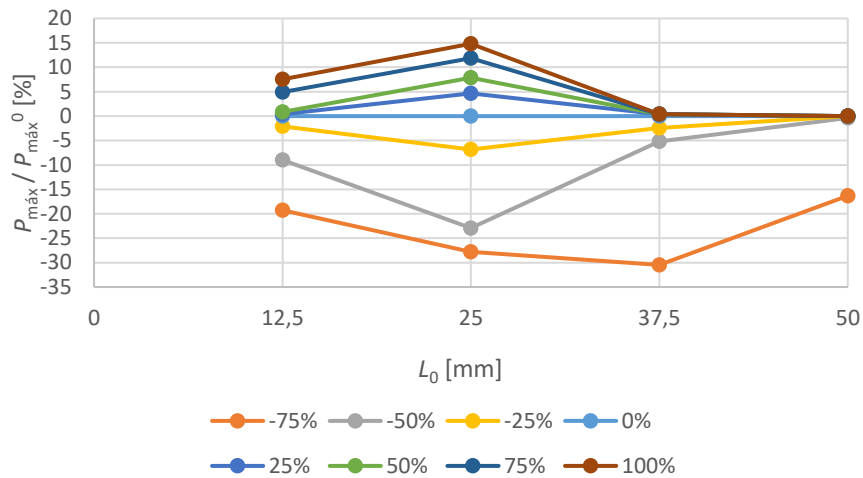


Figura 125 - Variação percentual de P_{\max}/P_{\max}^0 com variações de G_{lic} entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo XNR6852 E-2

A Figura 126, Figura 127, Figura 128 e Figura 129 apresentam as curvas $P-\delta$ com o adesivo XNR6852 E-2, quando se faz variar o parâmetro G_{lic} . Apesar do efeito esperado nos δ_m^f , G_{lic} apresenta maior influência do que G_{lc} para os dois menores L_0 (à exceção da singularidade apresentada pela variação +100% para $L_0=25$ mm). No entanto, o mesmo não se verifica nos dois maiores L_0 . Na junta com maior L_0 a influência é nula. De maneira geral, as reduções são mais influentes do que os aumentos, excetuando a junta com $L_0=12,5$ mm.

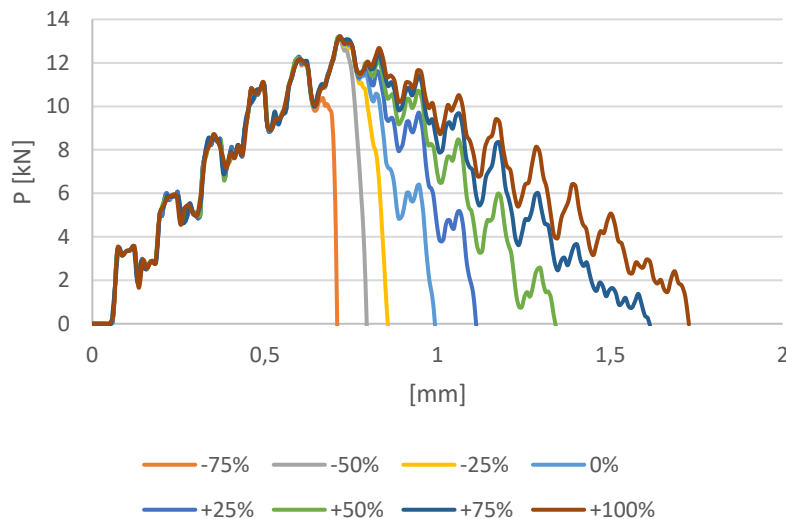


Figura 126 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{lic} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=12,5$ mm

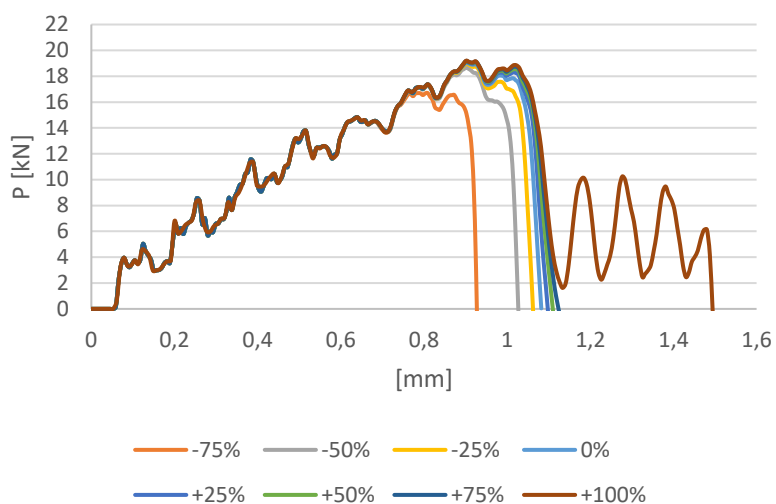


Figura 127 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=25$ mm

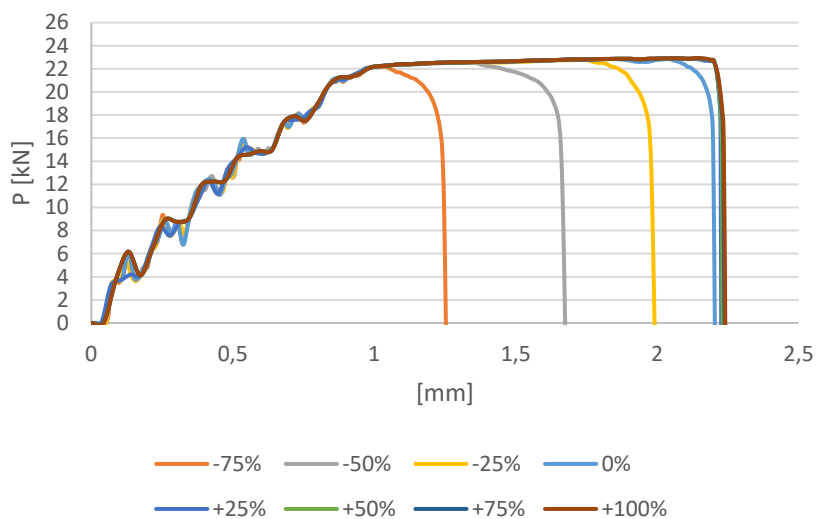


Figura 128 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=37,5$ mm

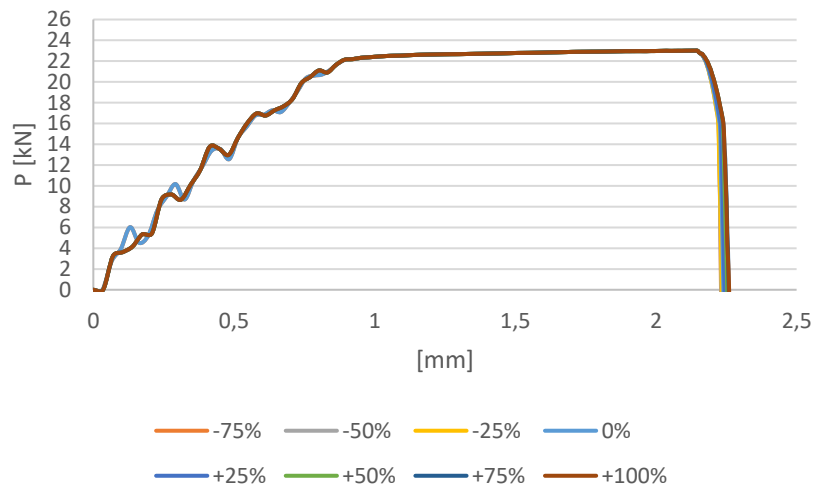


Figura 129 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=50$ mm

Na Figura 130 pode constatar-se uma influência baixa de G_{IIc} na resistência das juntas excetuando a variação de -75% em alguns L_0 . Sendo este um adesivo bastante tenaz, tirando reduções acentuadas de G_{IIc} , estas variações só apresentam influência nos deslocamentos. O valor mais considerável de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ é de -12% em relação ao valor de referência. No entanto, se não se tiver em conta a redução de 75%, o valor mais considerável passa a ser de -2% em relação à referência.

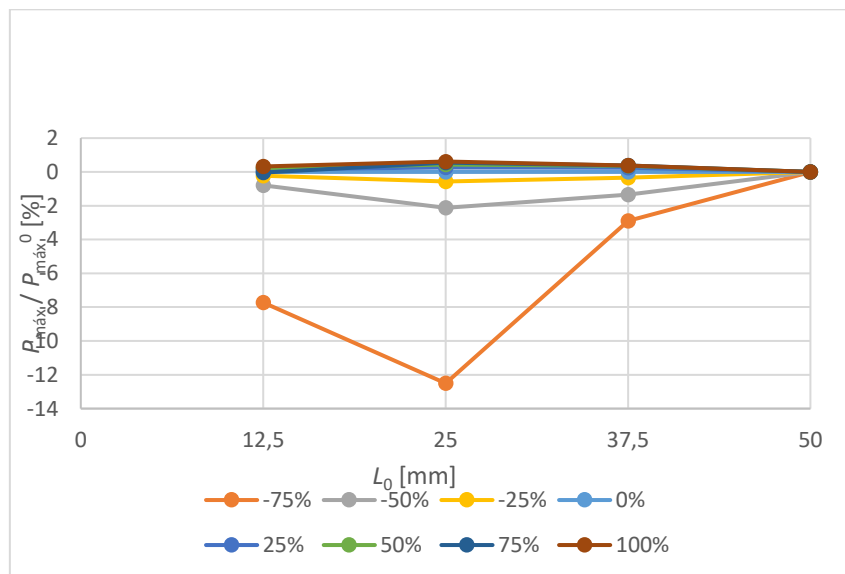


Figura 130 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ com variações de G_{IIc} entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo XNR6852 E-2

A Figura 131, Figura 132, Figura 133 e Figura 134 apresentam as curvas P - δ quando são variadas ambas as tenacidades em simultâneo. A variação de G_{Ic} e G_{IIc} apresenta resultados semelhantes a quando estes parâmetros são variados individualmente, sendo que neste caso estão os dois efeitos presentes, pelo que as diferenças se

intensificam. A singularidade registada para $L_0=25$ mm acontece agora também na variação de +75%. De referir também que, para $L_0=50$ mm, o comportamento é semelhante, conforme já foi explicado. No entanto, com a variação dos dois parâmetros, a curva $P-\delta$ apresenta deslocamentos máximos mais pequenos para as duas maiores reduções.

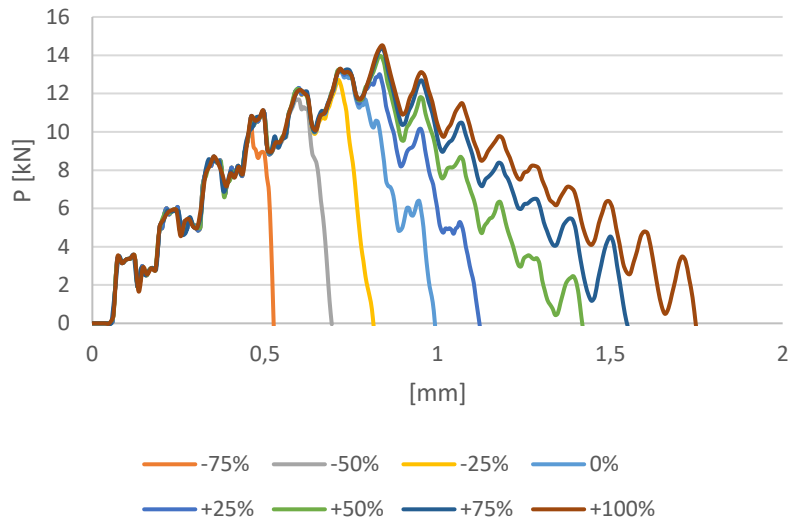


Figura 131 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{ic} e G_{ilc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=12,5$ mm

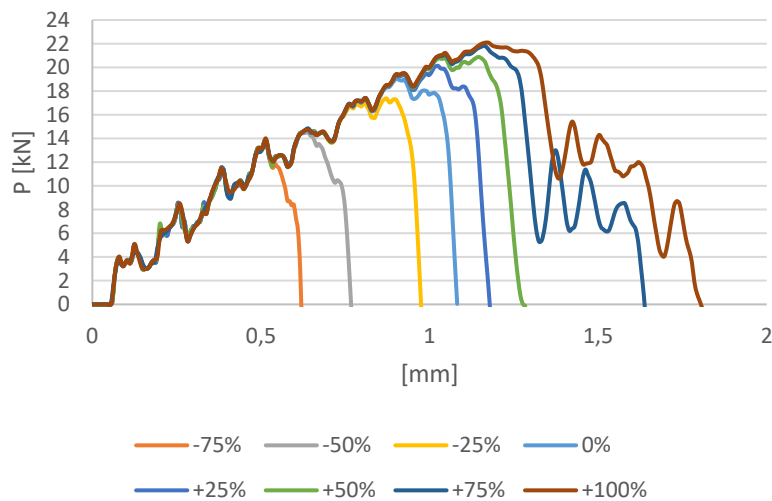


Figura 132 - Curvas $P-\delta$ correspondentes a variações de G_{ic} e G_{ilc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=25$ mm

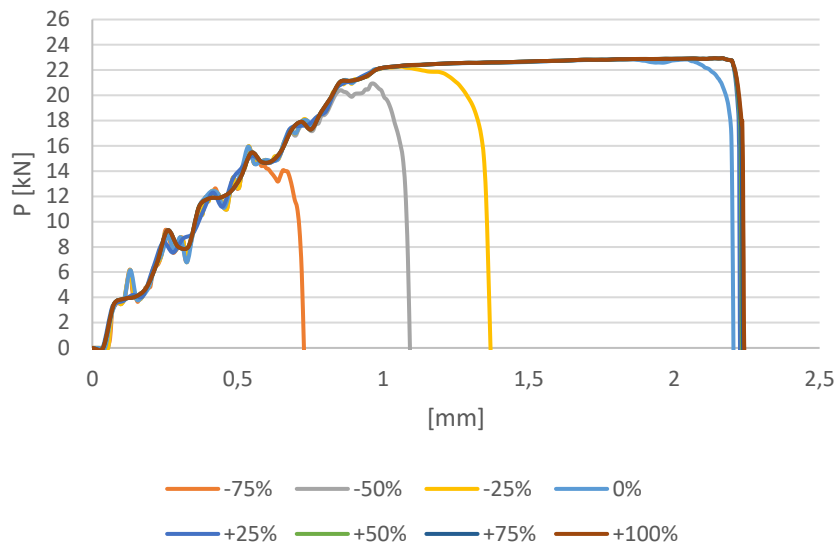


Figura 133 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=37,5$ mm

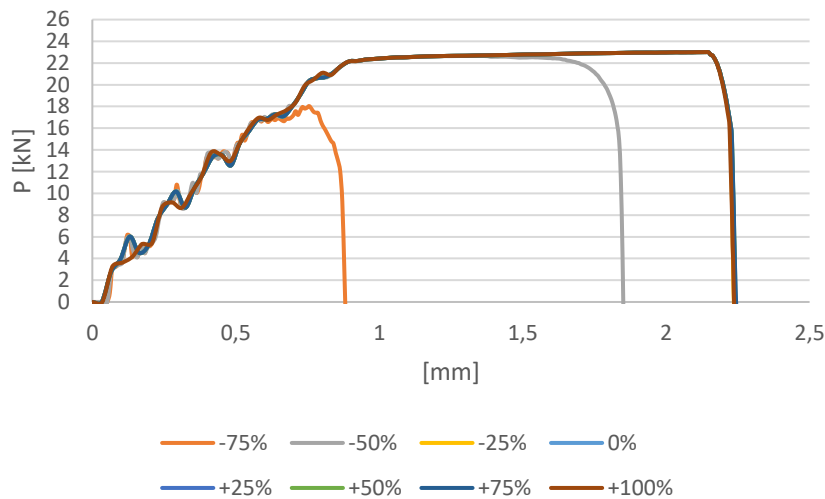


Figura 134 - Curvas P - δ correspondentes a variações de G_{Ic} e G_{IIc} entre -75% a +100%, em intervalos de 25% com adesivo XNR6852 E-2, com $L_0=50$ mm

A Figura 135 apresenta os valores de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ quando se varia G_{Ic} e G_{IIc} em simultâneo. Pode concluir-se que, como esperado, estes valores são muito próximos dos apresentados quando se varia apenas G_{Ic} , já que a influência de G_{IIc} na resistência das juntas é muito baixa. O valor mais expressivo de $P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{a}x}^0$ é de cerca de -30% em relação à referência (para $L_0=37,5$ mm, na maior redução).

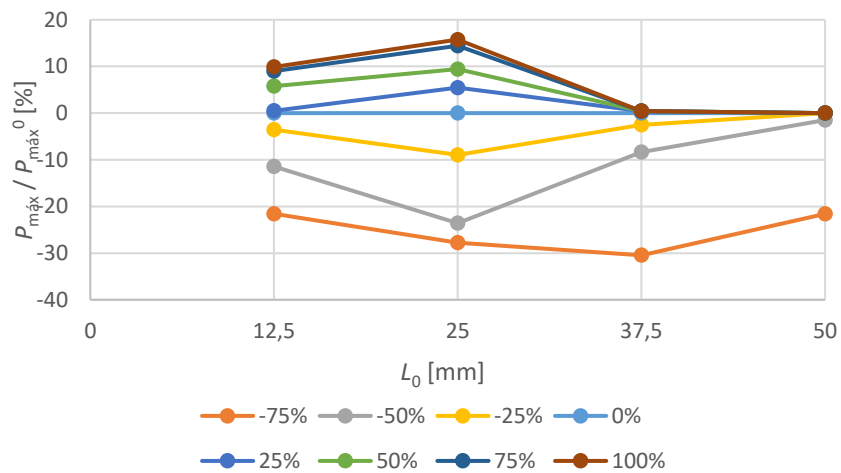


Figura 135 - Variação percentual de $P_{máx} / P_{máx}^0$ com variações de G_{1c} e G_{1lc} entre -75% a +100% para os diferentes L_0 , com adesivo XNR6852 E-2

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação tem como objetivo o estudo da influência dos parâmetros coesivos da lei triangular de tração-separação dos modelos de dano coesivo, no comportamento e resistência de juntas adesivas de sobreposição simples sujeitas a impacto. Estes modelos foram incorporados em modelos numéricos, simulando as propriedades de uma camada fina de material (aproximação contínua), neste caso o adesivo. Depois de validados os modelos e as propriedades dos adesivos, procedeu-se ao estudo referido.

A rigidez da lei coesiva apresenta uma influência distinta nos diferentes adesivos, o que faz sentido, sendo a rigidez uma das principais diferenças entre os mesmos. Em termos de resistência das juntas, a rigidez apresenta uma influência muito baixa em ambos os adesivos. Em termos de deslocamentos máximos, para o XNR6852 E-2, estes aumentam com a diminuição de rigidez. O mesmo sucede para o AV138, mas só em comprimentos de sobreposição baixos, sendo que no comprimento mais elevado a falta de resistência faz com que a rotura se dê mais cedo. Geralmente, a redução de rigidez influencia mais os resultados do que o seu aumento.

O modo desacoplado separa na fase de amaciamento o corte e a tração, ao contrário do que se verifica em modo-misto. No que respeita aos deslocamentos máximos, estes são sempre menores em modo desacoplado, à exceção do maior comprimento de sobreposição, com o adesivo XNR6852 E-2, onde os resultados são semelhantes. Para o AV138, estes deslocamentos máximos em modo desacoplado são sempre de cerca de 80% dos atingidos em modo-misto. Relativamente à resistência, o modo desacoplado apresenta alguma influência em relação ao modo-misto, podendo ainda concluir-se que, para o XNR6852 E-2, o aumento do comprimento de sobreposição diminui a influência.

Como seria de esperar, as resistências coesivas são o que mais influencia a resistência das juntas adesivas. A resistência coesiva ao corte apresenta uma influência muito maior do que a resistência coesiva à tração em ambos os adesivos. Este facto é normal tendo em conta que o corte é o principal esforço a que este tipo de juntas está sujeito. Quando as resistências coesivas são variadas em simultâneo, os resultados são, naturalmente, muito idênticos a quando se varia apenas a resistência coesiva ao corte, uma vez que a resistência coesiva à tração apresenta uma influência muito baixa. Embora a redução de resistência remeta para um aumento do deslocamento máximo, mantendo as tenacidades, nem sempre isto se verifica, uma vez que, em alguns casos, a menor resistência provoca uma rotura prematura para o adesivo AV138. Para o XNR6852 E-2, o comportamento não é sempre o mesmo mas, tratando-se de um

adesivo dúctil, apresenta incrementos consideráveis de deslocamento máximos quando se diminui a resistência coesiva ao corte. Também a nível dos deslocamentos a influência da resistência coesiva à tração é menor.

Relativamente às tenacidades, pode verificar-se que estas influenciam sempre do mesmo modo os deslocamentos máximos, como seria de esperar. De uma maneira geral, a redução das tenacidades influencia mais os deslocamentos do que o aumento, para ambos os adesivos. A tenacidade ao corte apresenta maior influência do que a tenacidade à tração nos deslocamentos máximos para o AV138 e, no XNR6852 E-2, depende do comprimento de sobreposição. No que respeita à resistência da junta, a tenacidade à tração apresenta maior influência do que a tenacidade ao corte no adesivo XNR6852 E-2. No adesivo AV138, a influência de ambas as tenacidades é muito semelhante, registando-se o facto de, quando são variadas em simultâneo, a sua influência é potenciada.

Como sugestões para trabalhos futuros, sugere-se o estudo da influência dos parâmetros coesivos em juntas solicitadas ao impacto, mas utilizando outra lei de tração-separação. Seria também interessante uma determinação de propriedades de adesivos ao impacto num espetro mais alargado de velocidades. Por fim, o estudo da dependência da taxa de deformação dos modelos de dano coesivo apresenta grande relevância em simulações de impacto.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Silva, M.R.G., *Impact Of Mixed Adhesive Joints For The Automotive Industry*. 2015, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
2. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Cambridge: Woodhead Publishing.
3. da Silva, L.F.M., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*. 2011: Springer Berlin Heidelberg.
4. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, New York: McGraw-Hill.
5. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
6. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, and M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto: Publindústria.
7. Cognard, P., *Handbook of adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding*. Vol. 1. 2005, Amsterdam: Elsevier.
8. Su, N., R. Mackie, and W. Harvey, *The effects of ageing and environment on the fatigue life of adhesive joints*. International journal of adhesion and adhesives, 1992. **12**(2): p. 85-93.
9. Pocius, A.V. and D.A. Dillard, *Adhesion science and engineering: surfaces, chemistry and applications*. 2002, Amsterdam: Elsevier.
10. Dow. *Structural Adhesives Enable Lightweight Strength and Durability*. 2018 26/07/2018]; Available from: <http://www.dow.com/en-us/transportation/solutions/adhesives/structural>.
11. Moreira, R.D.F., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência*. 2013, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
12. Yarusso, D., *Adhesion Science and Engineering—The Mechanics of Adhesion, edited by DA Dillard and AV Pocius*. 2002, Elsevier: Amsterdam
13. Vassilopoulos, A., *Fatigue and fracture of adhesively-bonded composite joints*. 2014, Amsterdam: Elsevier.

14. Chaves, F.J., et al., *Fracture mechanics tests in adhesively bonded joints: a literature review*. The Journal of Adhesion, 2014. **90**(12): p. 955-992.
15. Packham, D., *Handbook of Adhesion. 2nd*. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2005.
16. de Moura, M.F.d.S., A.M.B. de Morais, and A.G. de Magalhães, *Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico*. 2005, Porto: Publindústria.
17. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung 15, 1938: p. 41-47.
18. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. **9**(3): p. 185-196.
19. Harris, J.A. and R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
20. Curiel Sosa, J.L. and N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
21. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
22. Panigrahi, S.K. and B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
23. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Vol. Edições Técnicas. 2007, Porto: Publindústria.
24. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
25. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
26. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(5): p. 337-342.
27. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.
28. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
29. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. **23**(3): p. 622-636.

30. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
31. Duan, K., X. Hu, and Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
32. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18–19): p. 2445-2458.
33. Turon, A., et al., *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
34. Kafkalidis, M.S. and M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
35. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011, Berlin Heidelberg: Springer.
36. Yang, Q.D. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
37. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, and R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
38. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
39. Alfano, G. and M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
40. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
41. Chen, J., *Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
42. Pinto, A.M.G., et al., *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
43. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.

44. de Moura, M., et al., *Prediction of compressive strength of carbon–epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. *Composite Structures*, 2000. **50**(2): p. 151-157.
45. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2007. **21**(9): p. 855-870.
46. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. *International Journal of Solids and Structures*, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
47. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. *Composites Science and Technology*, 2008. **68**(10–11): p. 2224-2230.
48. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. *International Journal of Solids and Structures*, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
49. Campilho, R., et al., *Modelling of single-lap joints using cohesive zone models: effect of the cohesive parameters on the output of the simulations*. *The Journal of Adhesion*, 2012. **88**(4-6): p. 513-533.
50. Rocha, R. and R. Campilho, *Evaluation of different modelling conditions in the cohesive zone analysis of single-lap bonded joints*. *The Journal of Adhesion*, 2018. **94**(7): p. 562-582.
51. Daudeville, L. and P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. *Composite Structures*, 1993. **25**(1–4): p. 547-555.
52. Khoramishad, H., et al., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. *International Journal of Fatigue*, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
53. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
54. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. *Mechanics of Materials*, 2005. **37**(9): p. 955-979.
55. Wahab, M.M.A., et al., *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2001. **15**(7): p. 763-781.
56. Imanaka, M., et al., *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2003. **17**(7): p. 981-994.
57. Shenoy, V., et al., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.

58. Hua, Y., et al., *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
59. Chen, Z., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
60. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008, Hoboken, New Jersey: Wiley.
61. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
62. Moës, N., J. Dolbow, and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
63. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
64. Campilho, R.D.S.G., et al., *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
65. Machado, J., E. Marques, and L.F. da Silva, *Adhesives and adhesive joints under impact loadings: An overview*. The Journal of Adhesion, 2018. **94**(6): p. 421-452.
66. Sato, C.a. and K. Ikegami, *Dynamic deformation of lap joints and scarf joints under impact loads*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2000. **20**(1): p. 17-25.
67. Khan, A.S., O. Lopez-Pamies, and R. Kazmi, *Thermo-mechanical large deformation response and constitutive modeling of viscoelastic polymers over a wide range of strain rates and temperatures*. International Journal of Plasticity, 2006. **22**(4): p. 581-601.
68. Iwamoto, T., T. Nagai, and T. Sawa, *Experimental and computational investigations on strain rate sensitivity and deformation behavior of bulk materials made of epoxy resin structural adhesive*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(2): p. 175-185.
69. Cowper, G.R. and P.S. Symonds, *Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams*. 1957, Brown Univ Providence R.I.
70. Goglio, L., et al., *High strain-rate compression and tension behaviour of an epoxy bi-component adhesive*. International journal of adhesion and adhesives, 2008. **28**(7): p. 329-339.
71. Johnson, G.R. and W.H. Cook, *Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures*. Engineering fracture mechanics, 1985. **21**(1): p. 31-48.
72. Morin, D., et al., *Identification of a new failure criterion for toughened epoxy adhesive*. Engineering fracture mechanics, 2010. **77**(17): p. 3481-3500.

73. Chiu, W. and R. Jones, *Unified constitutive model for thermoset adhesive, FM73*. International journal of adhesion and adhesives, 1995. **15**(3): p. 131-136.
74. Zgoul, M. and A. Crocombe, *Numerical modelling of lap joints bonded with a rate-dependent adhesive*. International journal of adhesion and adhesives, 2004. **24**(4): p. 355-366.
75. Crocombe, A., *Modelling and predicting the effects of test speed on the strength of joints made with FM73 adhesive*. International journal of adhesion and adhesives, 1995. **15**(1): p. 21-27.
76. Carlberger, T. and U. Stigh, *An explicit FE-model of impact fracture in an adhesive joint*. Engineering fracture mechanics, 2007. **74**(14): p. 2247-2262.
77. May, M., H. Voß, and S. Hiermaier, *Predictive modeling of damage and failure in adhesively bonded metallic joints using cohesive interface elements*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **49**: p. 7-17.
78. Clarke, M., et al., *Application of the design of experiments procedure to the behaviour of adhesively bonded joints with plastically deformable adherends to enable further understanding of strain rate sensitivity*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 226-231.
79. Avendaño, R., et al., *Impact loading of single lap joints of dissimilar lightweight adherends bonded with a crash-resistant epoxy adhesive*. Journal of Engineering Materials and Technology, 2016. **138**(4): p. 041019.
80. Yokoyama, T., *Determination of impact shear strength of adhesive joints with the split Hopkinson bar*. Key Engineering Materials, 1998: p. 317-322.
81. Al-Zubaidy, H., X. Zhao, and R. Al-Mahaidi, *Effect of impact tensile load on strength of CFRP bonded steel plate joints*. Procedia Engineering, 2011. **14**: p. 1312-1317.
82. Harris, J. and R. Adams, *An assessment of the impact performance of bonded joints for use in high energy absorbing structures*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 1985. **199**(2): p. 121-131.
83. Liao, L., et al., *3-D FEM stress analysis and strength evaluation of single-lap adhesive joints subjected to impact tensile loads*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(7): p. 612-619.
84. Hazimeh, R., et al., *Finite element analysis of adhesively bonded composite joints subjected to impact loadings*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2015. **56**: p. 24-31.
85. Araújo, H.A.M., et al., *Dynamic behaviour of composite adhesive joints for the automotive industry*. Composite Structures, 2017. **171**: p. 549-561.
86. Systèmes, D., *Abaqus Documentation*. 2014.
87. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.

88. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
89. International, A., *ASTM D1002-10, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*. 2010, ASTM International.
90. Standardization, I.O.f., *ISO 4587:2003, Adhesives -- Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies*. 2003.
91. Valente, J.P.A., *Otimização numérica de juntas adesivas sujeitas a impacto*. 2017, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
92. *Momentive RTV100 Series Technical Data Sheet*. 2012.
93. *3M Scotch-Weld Structural Plastic Adhesive Technical Data*. 2016.
94. *Huntsman Araldite AV138/HV998 Technical Data Sheet*. 2014.
95. Marques, E., et al., *Effect of Low Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Energy of a Room Temperature Vulcanizing Silicone Adhesive*. Journal of Testing and Evaluation, 2016. **44**(3): p. 1284-1293.
96. da Silva, L., et al., *Alternative Methods to Measure the Adhesive Shear Displacement in the Thick Adherend Shear Test* Journal of Adhesion Science and Technology. 2008. **22**(1): p. 15-29 (15) 15.
97. da Silva, L.F.M., et al., *Mode II Fracture Toughness of a Brittle and a Ductile Adhesive as a Function of the Adhesive Thickness*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(9): p. 891-905.
98. Reedy Jr, E.D., *Chapter 5 - Strength of butt and sharp-cornered joints A2 - Chaudhury, M*, in *Adhesion Science and Engineering*, A.V. Pocius, Editor. 2002, Elsevier Science B.V.: Amsterdam. p. 145-192.
99. Mata, R.A., *Impact of adhesive joints for the automotive industry at low and high temperatures*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
100. Varajão, J., *Impact of CFRP adhesive joints for the automotive industry*. 2015, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
101. Campilho, R., et al., *Adhesive thickness effects of a ductile adhesive by optical measurement techniques*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2015. **57**: p. 125-132.
102. Campilho, R.D., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International journal of adhesion and adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.