



Estudo de um adesivo estrutural em juntas de compósito-alumínio utilizando o floating roller peel test

CAIO CANGIRANA RODRIGUES

novembro de 2022

ESTUDO DE UM ADESIVO ESTRUTURAL EM JUNTAS DE COMPÓSITO-ALUMÍNIO UTILIZANDO O FLOATING ROLLER PEEL TEST

Caio Cangirana Rodrigues

1200214

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO DE UM ADESIVO ESTRUTURAL EM JUNTAS DE COMPÓSITO-ALUMÍNIO UTILIZANDO O FLOATING ROLLER PEEL TEST

Caio Cangirana Rodrigues

1200214

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 e coorientação do Doutor Isidro de Jesús Sánchez-Arce.

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes

Professor Coordenador, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientador

Doutor Isidro de Jesús Sánchez-Arce

Investigador, INEGI

Arguente

Doutora Sofia Teixeira de Freitas

Professor Associado, Delft University of Technology

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por estar sempre comigo e a minha família por ser o meu pilar fornecendo todo apoio que precisei durante este percurso académico. Em especial, agradeço imenso ao Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e ao Doutor Isidro de Jesús Sánchez-Arce por todo conhecimento partilhado e por toda ajuda.

Ambos, Orientador e Coorientador, dispuseram de grande dedicação e disponibilidade em auxiliar na elaboração desta dissertação, o que permitiu que esta pudesse ser concluída.

Agradeço aos amigos, que mesmo longe, contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho.

PALAVRAS-CHAVE

Adesivo; Juntas adesivas; Modo de rotura; Previsão da resistência ao arrancamento; *Floating roller peel test*; Modelos de dano coesivo.

RESUMO

Atualmente, as ligações adesivas são muito utilizadas no projeto de estruturas mecânicas, em detrimento das ligações mecânicas clássicas, nomeadamente as ligações aparafusadas ou rebitadas. A escolha das ligações adesivas em projeto dá-se por estas permitirem uma distribuição mais uniforme de tensões e a redução do peso da estrutura, possibilitarem a ligação de materiais diferentes e, atualmente, existirem métodos numéricos fiáveis de previsão da resistência de juntas adesivas, o que diminui os custos associados ao sobredimensionamento antes feito devido à falta de informações sobre as ligações adesivas. O ensaio de arrancamento *T-peel* é muito utilizado, pois possui fácil reprodução, baixo custo e pode ser realizado em máquinas de ensaios universais. O ensaio *floating roller peel* é utilizado na indústria para avaliar a qualidade da adesão de juntas adesivas, pois submete a junta adesiva a condições extremas de solitação.

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar a resistência ao arrancamento do adesivo estrutural Araldite® AV138 aplicado em juntas adesivas fabricadas com aderentes de naturezas diferentes através da modelação numérica do ensaio *floating roller peel*. Foram utilizadas juntas adesivas fabricadas com o polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) e a liga de alumínio (AW 6082-T651). O modelo numérico foi baseado em modelos de dano coesivo (MDC) aplicados no *software* ABAQUS®. Para modelar de forma fiável o contacto entre os aderentes e os roletes de fixação, estes últimos foram incluídos nos ensaios e estabelecidas as condições de contacto e conexões respetivas. Para validar e confirmar a fiabilidade dos resultados obtidos através do ensaio numérico *floating roller peel*, as previsões obtidas foram comparadas com resultados experimentais previamente estabelecidos. Os resultados indicaram que a modelação numérica utilizada permitiu reproduzir o comportamento físicos dos ensaios experimentais e permitiu prever com rigor a resistência ao arrancamento do adesivo estrutural Araldite® AV138.

KEYWORDS

Adhesive; Adhesive joints; Failure mode; Prediction of peel strength; Floating roller peel test; Cohesive zone models.

ABSTRACT

Currently, adhesive joints are widely used in the design of mechanical structures, to the detriment of classical mechanical joints, namely bolted or riveted. The choice of adhesive joints in design is due to the more uniform distribution of stresses and reduction of structural weight, possibility to join different materials and, currently, existence of reliable numerical methods to predict the strength of adhesive joints, the which reduces the costs associated with overdesign, previously an issue due to the lack of information about the adhesive bonds. The T-peel peel test is widely used because it is easy to reproduce, low cost and can be performed in universal testing machines. The floating roller peel test is used in the industry to assess the adhesion quality in adhesive joints, as it subjects the adhesive joint to extreme conditions of application.

The present work aims to characterize the peel strength of the structural adhesive Araldite® AV138 applied to adhesive joints manufactured with adherends of different natures through numerical modelling of the floating roller peel test. Adhesive joints made of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) and aluminium alloy (AW 6082-T651) were used. The numerical model was based on cohesive zone models (CZM) applied in the ABAQUS® software. To reliably model the contact between the adherends and the fixing rollers, the rollers were included in the tests and the respective contact conditions and connections established. To validate and confirm the reliability of the results obtained through the numerical floating roller peel test, the predictions obtained were compared with previously established experimental results. The results indicated that the used numerical technique reproduced the physical behaviour of the tests and enabled to accurately predict the peel strength of the structural adhesive Araldite® AV138.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

4ENF	<i>Four-Point-End-Notched Flexure</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CDCB	<i>Contoured Double-Cantilever Beam</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
ELS	<i>End-Loaded Split</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISSF	<i>Intensity of Singular Stress Field</i>
GY	<i>Global yielding</i>
HB	<i>Hardness Brinell</i>
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelos de danos coesivos
MEF	Método de elementos finitos
MEFE	Método de elementos finitos estendido
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
MMB	<i>Mixed-Mode Bending</i>
PRFC	Polímero reforçado com fibra de carbono
PRFV	Plástico reforçado com fibra de vidro
TAST	<i>Thick-Adherend Shear Test</i>

TDCB	<i>Tapered Double-Cantilever Beam</i>
------	---------------------------------------

VCCT	<i>Virtual Crack Clousure Technique</i>
------	---

Lista de Unidades

min	Minuto
-----	--------

mm	Milímetro
----	-----------

MPa	Mega Pascal
-----	-------------

Lista de Símbolos

B	Largura da junta adesiva
-----	--------------------------

c	Rácio do modo misto
-----	---------------------

E	Módulo de elasticidade longitudinal
-----	-------------------------------------

F	Carregamento aplicado
-----	-----------------------

G	Módulo de corte
-----	-----------------

G_c	Tenacidade à fratura
-------	----------------------

G_{Ic}	Taxa crítica de liberação de energia em modo I
----------	--

G_{IIc}	Taxa crítica de liberação de energia em modo II
-----------	---

G_t	Taxa de liberação de energia de deformação
-------	--

h	Distância entre as extremidades dos dois entalhes
-----	---

I	Momento de inércia dos roletes de fixação
-----	---

l_s	Comprimento de sobreposição
-------	-----------------------------

M_t	Momento torsor
-------	----------------

P	Força de arrancamento
-----	-----------------------

P/b	Resistência de arrancamento
P_1	Força necessária para superar a subida do cilindro rígido
P_2	Força média de arrancamento
r	Distância estabelecida do eixo
r_0	Raio exterior
r_i	Raio interior
t	Espessura do provete
t_f	Espessura dos aderentes flexíveis
t_n^0	Resistência coesiva à tração
t_r	Espessura dos aderentes rígidos
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
α	Propagação da fenda
δ	Deslocamento das amarras
δ_n^0	Deslocamento correspondente à resistência coesiva à tração
δ_s^0	Deslocamento correspondente à resistência coesiva ao corte
ε	Deformação
ε_e	<i>Equivalent strain (von Mises)</i>
ε_m	Alongamento mínimo
ε_r	<i>Tensile failure strain</i>
ϕ	Ângulo de rotação
γ_p	<i>Plastic shear failure strain</i>
γ_s	<i>Shear strain</i>

ν	Coeficiente de Poisson
ν_a	Deslocamento no adesivo
ν_m	Deslocamento total medido
ν_t	Deslocamento nos substratos
σ	Tensão
σ_p	<i>Peel stress</i>
σ_r	<i>Tensile strength</i>
σ_y	<i>Tensão de cedência</i>
τ	Tensão de corte
τ_r	<i>Shear strength</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Disciplinas envolvidas na tecnologia das juntas adesivas [2].	7
Figura 2 - Distribuição das tensões ao longo da junta adesiva (a), rebitada (b) e soldada (c) [7].	8
Figura 3 - Esforço de tração (a) e compressão (b) [11].	9
Figura 4 - Esforço de corte [11].	10
Figura 5 - Distribuição da tensão de corte ao longo da junta adesiva [11].	10
Figura 6 - Esforços de clivagem (a) e arrancamento (b) [11].	10
Figura 7 - Possíveis modos de rotura em juntas adesivas [11].	11
Figura 8 - Provetes maciços para realização de ensaios de tração segundo a norma EN ISO 527-3, onde a) representa as dimensões do provete longo e b) do provete reduzido (dimensões em mm) [7].	13
Figura 9 - Carregamentos, geometria e dimensões (em mm) do provete para o ensaio de corte [2].	13
Figura 10 - Geometria e dimensões (em mm) do provete para ensaios de tração topo a topo [7].	14
Figura 11 - Geometria e dimensões (em mm) da JSS conforme a norma ASTM 1002 [11].	15
Figura 12 - Geometria do provete utilizado no ensaio Arcan [11].	16
Figura 13 - Geometria do provete utilizado no ensaio de torção [2].	16
Figura 14 - Geometria e dimensões (em mm) do provete para ensaio TAST conforme a norma ISO 11003-2.2 [20].	17
Figura 15 - Modos de rotura em juntas adesivas, sendo a) Modo I, b) Modo II e c) Modo III [7].	18
Figura 16 - Geometria do provete utilizado pelo ensaio DCB conforme a norma ASTM D3433-99 [7].	19
Figura 17 - Geometria do provete utilizado no ensaio TDCB conforme a norma ASTM D3433-99 [7].	19
Figura 18 - Geometria do provete utilizado no ensaio ENF [7].	20
Figura 19 - Geometria do provete utilizado no ensaio 4ENF [7].	20
Figura 20 - Geometria do provete utilizado no ensaio ELS [7].	20
Figura 21 - Geometria do provete utilizado no ensaio MMB [27].	21
Figura 22 - Variações existentes do ensaio de arrancamento: a) <i>T-peel test</i> ; b) <i>peel test</i> a 180°; c) <i>climbing drum peel test</i> ; d) <i>floating roller peel test</i> [16].	22
Figura 23 - Geometria e dimensões (em mm) do ensaio de arrancamento <i>T-peel</i> [31].	23

Figura 24 - Divisão das categorias do ensaio de arrancamento <i>T-peel</i> em quatro quadrantes. No eixo horizontal a deformação plástica e elástica e no eixo vertical o arrancamento não simétrico e simétrico, respetivamente [32].	24
Figura 25 - Resultado típico de P do ensaio <i>T-peel</i> [33].	25
Figura 26 - Montagem e geometria do provete para o ensaio de arrancamento a 180° (adaptado de [36]).	26
Figura 27 - Gráfico resultante de um ensaio de arrancamento a 180° [16].	27
Figura 28 - Configuração do ensaio <i>floating roller peel</i> [34].	27
Figura 29 - Gráfico típico obtido após a realização do ensaio <i>floating roller peel</i> [40].	28
Figura 30 - Ensaio <i>climbing drum peel</i> realizado num provete de uma estrutura <i>sandwich</i> [31].	29
Figura 31 - Gráfico característico do ensaio de <i>climbing drum peel</i> [43].	30
Figura 32 - Descontinuidade de tensão na ponta de uma fenda [48].	36
Figura 33 - Elementos coesivos que simulam uma espessura nula de material para a aproximação local [48].	37
Figura 34 - Elementos coesivos que simulam uma espessura nula de material para a aproximação contínua [48].	37
Figura 35 - Exemplo da lei triangular e lei exponencial encontradas na literatura [48].	38
Figura 36 – Exemplo da lei trapezoidal encontrada na literatura [48].	38
Figura 37 - Dimensões em mm dos provetes utilizados [81].	45
Figura 38 - Gráfico σ - ε da liga de alumínio AW 6082-T651 [82].	47
Figura 39 - Gráfico σ - ε de provetes maciços feitos de Araldite® AV138 [88].	48
Figura 40 - Medição e corte das placas de PRFC [81].	50
Figura 41 - Proteção plástica do pré-impregnado [81].	51
Figura 42 - Direção da pressão aplicada nas camadas de pré-impregnado [81].	51
Figura 43 - Filme desmoldante utilizado [81].	52
Figura 44 - Geometria do laminado PRFC após o corte [81].	52
Figura 45 - Resultado do processo de preparação superficial do compósito laminado [81].	53
Figura 46 - Superfície do aderente metálico após a lixagem e limpeza [81].	53
Figura 47 - Apoios de aço inoxidável utilizados nos aderentes [81].	54
Figura 48 - Adesivo estrutural Araldite® AV138 aplicado no aderente [81].	54
Figura 49 - Excessos a serem removidos das extremidades do provete [81].	55

Figura 50 - Configuração inicial do provete para o ensaio de arrancamento.	55
Figura 51 - Configuração final do provete ao fim do ensaio <i>floating roller peel</i> [81].	56
Figura 52 - Modos de rotura do provete A-a [81].	57
Figura 53 - Curvas $P/b-\delta$ dos provetes A-a [81].	58
Figura 54 - Modos de rotura dos provetes A-c-0 [81].	59
Figura 55 - Curvas $P/b-\delta$ dos provetes A-c-0 [81].	60
Figura 56 - Modo de rotura dos provetes A-c-90 [81].	61
Figura 57 - Curvas $P/b-\delta$ dos provetes A-c-90 [81].	62
Figura 58 - Modo de rotura dos provetes C-c-0 [81].	63
Figura 59 - Curvas $P/b-\delta$ dos provetes C-c-0 [81].	64
Figura 60 - Modo de rotura dos provetes C-c-90 [81].	65
Figura 61 - Curvas $P/b-\delta$ dos provetes C-c-90 [81].	66
Figura 62 - Modo de rotura dos provetes C-a [81].	67
Figura 63 - Curvas $P/b-\delta$ dos provetes C-a [81].	68
Figura 64 - $P/b_{\text{médio}}$ e respetivos desvios padrão dos provetes em todas as configurações ensaiadas [81].	69
Figura 65 - Modelação em 2D no módulo <i>part</i> do provete C-a.	73
Figura 66 - Modelação em 2D do rolete de fixação.	74
Figura 67 – Propriedades atribuídas ao adesivo Araldite® AV138 no ABAQUS®: a) indica as resistências coesivas, b) as energias de rotura, c) a densidade e d) as propriedades elásticas.	75
Figura 68 - Definição do tipo e material das secções.	76
Figura 69 - Definição da secção do aderente rígido para o provete de configuração A-a.	76
Figura 70 - Montagem do provete C-a com os roletes de apoio no módulo <i>assembly</i> do ABAQUS®.	77
Figura 71 - Criação do <i>step explicit</i> no ABAQUS®.	78
Figura 72 - curva $P/b-\delta$ obtida com <i>time period</i> de 0,005 para o provete de configuração A-c-0.	78
Figura 73 - Definição das variáveis SDEG e STATUS na instrução <i>field output</i>	79
Figura 74 - Variáveis definidas por defeito na instrução <i>field output</i>	80
Figura 75 - Ponto onde o <i>set</i> para as reações foi definido.	80
Figura 76 - Ponto onde o <i>set</i> para o deslocamento foi definido.	81
Figura 77 - Definição do contacto entre as superfícies do aderente flexível e o rolete de fixação 1 no ABAQUS®.	81

Figura 78 - Definição do contacto entre as superfícies do aderente rígido e o rolete de fixação 2 no ABAQUS®.	82
Figura 79 - Definição do contacto entre as superfícies do aderente flexível e o rolete de fixação 2 no ABAQUS®.	82
Figura 80 - Definição das propriedades do contacto existente entre as superfícies do modelo numérico.	83
Figura 81 - Comportamento do algoritmo <i>hard contact</i> no ABAQUS® [92].	83
Figura 82 - Valores de <i>m</i> e <i>l</i> inseridos no ABAQUS®.	85
Figura 83 - Restrição de acoplamento aplicada na parte inferior do aderente flexível.	85
Figura 84 - Tipo de conexão <i>beam</i> presente no ABAQUS® [96].	86
Figura 85 - Tipo de conexão <i>hinge</i> presente no ABAQUS® [96].	86
Figura 86 - Conexões estabelecidas para a simulação dos provetes no ABAQUS®.	87
Figura 87 - Comparação entre: a) acessório utilizado para realizar o ensaio experimental e b) modelação numérica do acessório criada no ABAQUS®.	87
Figura 88 - Modelação da inicialização dos contactos no ABAQUS®.	88
Figura 89 - Método <i>default</i> de inicialização dos contactos no ABAQUS® [92].	88
Figura 90 - Criação de condição de fronteira no ABAQUS®.	89
Figura 91 - Aplicação da força gravítica na simulação numérica.	89
Figura 92 - Comportamento da simulação numérica do ripo <i>displacement driven</i> para o provete de configuração A-a.	90
Figura 93 - Carregamento aplicado nos modelos numéricos.	90
Figura 94 - Primeira condição fronteira estabelecida para a modelação numérica no ABAQUS®.	91
Figura 95 - Aplicação da condição fronteira <i>pivot</i> no ABAQUS®.	91
Figura 96 - Definição do tipo de elemento e malha para os aderentes do provete.	92
Figura 97 - Definição do tipo de elemento e malha para o adesivo do provete.	92
Figura 98 - Definição da orientação dos elementos coesivos do adesivo.	93
Figura 99 - Elemento do tipo <i>plane stress</i> do ABAQUS® [97].	93
Figura 100 - Definição das sementes na simulação do ABAQUS®.	94
Figura 101 - Malha utilizada na simulação numérica no ABAQUS®.	94
Figura 102 - Sementes utilizadas para a criação da malha em todo o modelo numérico.	95
Figura 103 - Malha aplicada na secção superior do aderente rígido.	95

Figura 104 - Malha aplicada na simulação numérica do ABAQUS®	96
Figura 105 - Definição do módulo <i>job</i> no ABAQUS®	96
Figura 106 - Modelo triangular em 2D para o modelo de dano coesivo [81].....	97
Figura 107 - Fluxograma do estudo e simulações realizadas.	100
Figura 108 - Comparação entre modelos numéricos desenvolvidos para o ensaio <i>floating roller peel</i> : a) modelo desenvolvido neste trabalho e b) modelo desenvolvido por [46]	101
Figura 109 - Variável SDEG utilizada nas simulações numéricas no ABAQUS®.	103
Figura 110 - Relação entre a curva $P/b-\delta$ obtida e o comportamento do provete durante a simulação numérica.	103
Figura 111 - Curva $P/b-\delta$ extraída do ensaio numérico para o provete A-a.	104
Figura 112 - Curva $P/b-\delta$ extraída do ensaio numérico para o provete A-c-0.	105
Figura 113 - Curva $P/b-\delta$ extraída do ensaio numérico para o provete A-c-90.	106
Figura 114 - Curva $P/b-\delta$ extraída do ensaio numérico para o provete C-c-0.	107
Figura 115 - Curva $P/b-\delta$ extraída do ensaio numérico para o provete C-c-90.	108
Figura 116 - Curva $P/b-\delta$ extraída do ensaio numérico para o provete C-a.	109
Figura 117 - Comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para o provete A-a.	110
Figura 118 - Comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para o provete C-a.	111
Figura 119 - Comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para o provete A-c-0.	112
Figura 120 - Comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para o provete C-c-0.	113
Figura 121 - Comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para o provete A-c-90.	114
Figura 122 - Comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para o provete C-c-90.	115
Figura 123 - Resultados obtidos de $P/b_{\text{médio}}$ para os ensaios experimentais e numéricos.....	116
Figura 124 - Comparação entre os ensaios do ensaio <i>floating roller peel</i> : a.1) início do ensaio experimental, a.2) momentos após o início do ensaio, a.3) instantes antes do fim do ensaio, b.1) início do ensaio numérico, b.2) momentos após o início do ensaio e b.3) instantes antes do fim do ensaio.....	117
Figura 125 - Instabilidades no comportamento físico para a configuração C-c-0.	117

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Estado da arte de ensaios de arrancamento.	31
Tabela 2 - Critérios de rotura analisados por da Silva et al. [54].	35
Tabela 3 - Estado da arte de modelação de juntas adesivas.	40
Tabela 4 - Dimensões dos provetes utilizados no ensaio de arrancamento.	46
Tabela 5 - Principais propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651 [83].	46
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do ensaio de tração da liga de alumínio AW 6082-T651 [82].	47
Tabela 7 - Propriedades mecânicas PRFC utilizado[86].	47
Tabela 8 - Propriedades mecânicas do adesivo estrutural Araldite® AV138 [87].	48
Tabela 9 - Características das configurações dos provetes [81].	49
Tabela 10 - Característica do empilhamento do PRFC.	50
Tabela 11 - Modo de rotura predominante nos provetes A-a [81].	57
Tabela 12 - Resultados obtidos do ensaio de arrancamento para os provetes A-a [81].	58
Tabela 13 - Modo de rotura predominante nos provetes A-c-0 [81].	59
Tabela 14 - Resultados obtidos do ensaio de arrancamento para os provetes A-c-0 [81].	60
Tabela 15 - Modo de rotura predominante nos provetes A-c-90 [81].	61
Tabela 16 - Resultados obtidos do ensaio de arrancamento para os provetes A-c-90 [81].	62
Tabela 17 - Modo de rotura predominante nos provetes C-c-0 [81].	63
Tabela 18 - Resultados obtidos do ensaio de arrancamento para os provetes C-c-0 [81].	64
Tabela 19 - Modo de rotura predominante nos provetes C-c-90 [81].	65
Tabela 20 - Resultados obtidos do ensaio de arrancamento para os provetes C-c-90 [81].	66
Tabela 21 - Modo de rotura predominante nos provetes C-a [81].	67
Tabela 22 - Resultados obtidos do ensaio de arrancamento para os provetes C-a [81].	69
Tabela 23 - Resultados obtidos para $P/b_{\text{médio}}$, desvios padrão e coeficiente de variação para cada configuração dos provetes analisados [81].	70
Tabela 24 - Resultado obtido para os modos de rotura presente nas configurações dos provetes [81]. ...	71
Tabela 25 - Módulos de entrada disponíveis no ABAQUS®.	72
Tabela 26 - Propriedades utilizadas no trabalho numérico para os substratos [82, 86, 91].	74

Tabela 27 - Valores da densidade dos materiais utilizados no ABAQUS® [87, 93, 94].	84
Tabela 28 - Propriedades coesivas do adesivo Araldite® AV138 com t_a de 0,2 mm [82].	99
Tabela 29 - Configuração dos provetes utilizados na simulação numérica do ABAQUS®.	102
Tabela 30 - Resultados obtidos do ensaio numérico para o provete A-a.	104
Tabela 31 - Resultados obtidos do ensaio numérico para o provete A-c-0.	105
Tabela 32 - Resultados obtidos do ensaio numérico para o provete A-c-90.	106
Tabela 33 - Resultados obtidos do ensaio numérico para o provete C-c-0.	107
Tabela 34 - Resultados obtidos do ensaio numérico para o provete C-c-90.	108
Tabela 35 - Resultados obtidos do ensaio numérico para o provete C-a.	109

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Estrutura da dissertação.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Ligações adesivas.....	7
2.1.1	Caraterização das ligações adesivas.....	7
2.1.2	Comparação com outras técnicas de ligação	8
2.1.3	Esforços típicos em juntas adesivas	9
2.1.4	Modos de rotura de juntas adesivas	11
2.1.5	Aplicações das juntas adesivas	12
2.2	Determinação das propriedades mecânicas de adesivos	12
2.2.1	Ensaio mecânicos de adesivo maciço	12
2.2.2	Ensaio mecânicos de camadas finas de adesivo	14
2.2.3	Ensaio de fratura.....	18
2.3	Ensaio de caracterização ao arrancamento	22
2.3.1	Ensaio <i>T-peel</i>	22
2.3.1.1	Configurações <i>T-peel</i>	23
2.3.1.2	Fabrico de juntas, ensaio e interpretação de resultados.....	24
2.3.2	Ensaio <i>peel test</i> a 180°	25
2.3.2.1	Fabrico de juntas, ensaio e interpretação de resultados.....	25
2.3.3	Ensaio <i>floating roller peel</i>	27
2.3.3.1	Fabrico de juntas, ensaio e interpretação de resultados.....	27
2.3.4	Ensaio <i>climbing drum peel</i>	29
2.3.4.1	Fabrico de juntas, ensaio e interpretação de resultados.....	30
2.3.5	Estado da arte de ensaios de arrancamento	31

2.4	Previsão de resistência de juntas adesivas.....	33
2.4.1	Mecânica dos meios contínuos	33
2.4.1.1	Modelos analíticos e MEF	34
2.4.1.2	Critérios de rotura.....	34
2.4.2	Mecânica da fratura	36
2.4.3	Modelos de dano coesivo.....	36
2.4.4	Mecânica do dano	39
2.4.5	Método de elementos finitos estendido	39
2.4.6	Estado da arte de modelação de juntas adesivas	40
3	DESENVOLVIMENTO	45
3.1	Trabalho experimental	45
3.1.1	Geometria das juntas	45
3.1.2	Materiais utilizados	46
3.1.2.1	Aderentes.....	46
3.1.2.2	Adesivo	48
3.1.3	Ensaio experimentais.....	49
3.1.3.1	Fabrico dos provetes.....	50
3.1.3.2	Método e ferramenta de ensaio.....	55
3.1.4	Resultados	56
3.1.4.1	Modos de rotura e Curvas	56
3.1.4.1.1	Proвете A-a.....	57
3.1.4.1.2	Proвете A-c-0.....	59
3.1.4.1.3	Proвете A-c-90.....	61
3.1.4.1.4	Proвете C-c-0.....	63
3.1.4.1.5	Proвете C-c-90.....	65
3.1.4.1.6	Proвете C-a.....	67
3.1.4.2	Análise comparativa.....	69
3.2	Trabalho numérico	71
3.2.1	Programa utilizado	72
3.2.2	Construção dos modelos e pré-processamento.....	73

3.2.3	Modelo de dano coesivo	97
3.2.3.1	Modelo coesivo triangular	97
3.2.3.2	Determinação das propriedades coesivas	98
3.2.4	Ensaio preliminares.....	99
3.2.5	Resultados	102
3.2.5.1	Modos de rotura	102
3.2.5.2	Curvas $P/b-\delta$	103
3.2.5.2.1	Provete A-a.....	104
3.2.5.2.2	Provete A-c-0.....	105
3.2.5.2.3	Provete A-c-90.....	106
3.2.5.2.4	Provete C-c-0.....	107
3.2.5.2.5	Provete C-c-90.....	108
3.2.5.2.6	Provete C-a.....	109
3.2.5.3	Análise comparativa.....	110
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	121
4.1	Conclusões.....	121
4.2	Propostas de trabalhos futuros	122
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	125

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Estrutura da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As ligações adesivas estão, cada vez mais, a ser o método de união entre superfícies mais escolhido em projeto mecânico devido à grande variedade de alternativas que podem ser adequadas para os mais diversos projetos e ao imenso avanço nos estudos realizados a fim de caracterizar e prever as características das juntas adesivas para várias situações. As ligações adesivas apresentam vantagens sobre outros tipos de ligações existentes, nomeadamente a distribuição de carga mais uniforme, redução de peso e custo de fabrico, possibilidade de união entre materiais de diferentes famílias e bom comportamento à fadiga. Entretanto, as juntas adesivas também apresentam algumas desvantagens, nomeadamente o processo de cura pode ser bastante lento, desmontagem tipicamente impossível e durabilidade limitada sob condições críticas de serviço.

Existem diversos tipos de ensaios a que uma junta adesiva pode ser submetida, e também diferentes tipos de carregamento, que em conjunto solicitam a camada de adesivo a diferentes esforços. Os ensaios de arrancamento são de extrema importância, pois submetem a junta adesiva a um modo de falha crítico. Entre os ensaios de arrancamento encontram-se na literatura o *T-peel*, *peel test a 180°*, *climbing drum peel test* e *floating roller peel*. O ensaio *floating roller peel* é um ensaio amplamente utilizado na indústria para determinar a qualidade de adesão das juntas adesivas. Para prever a resistência ao arrancamento é necessário utilizar modelos numéricos que seja capaz de simular o comportamento físico do ensaio experimental e se baseiam nos resultados experimentais realizados previamente. Nos dias de hoje, vários estudos desenvolveram modelos numéricos capazes de prever as características das juntas adesivas, e os modelos do dano coesivo (MDC) são um bom exemplo de uma metodologia capaz de obter resultados fiáveis. A utilização de um modelo numérico correto é de extrema importância, principalmente para os ensaios de arrancamento, devido à maior escassez de informação neste modo de carregamento.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo criar um modelo numérico do ensaio *floating roller peel* baseado no modelo de dano coesivo (MDC) para caracterizar a resistência ao

arrancamento do adesivo estrutural Araldite® AV138 aplicado em juntas adesivas fabricadas com aderentes de naturezas diferentes. No qual foram utilizadas juntas adesivas fabricadas com o polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) e a liga de alumínio (AW 6082-T651) e para a modelação numérica foram incluídos os roletes de fixação correspondentes ao acessório utilizado no ensaio experimental com respetivos contactos e conexões. Para validação dos resultados obtidos numericamente, foram comparados com resultados previamente estabelecidos.

1.3 Estrutura da dissertação

Para ajudar na compreensão dos temas abordados nesta dissertação, esta encontra-se dividida em quatro capítulos, onde cada capítulo está dividido por subcapítulos.

No **capítulo um** é feita a contextualização da dissertação, indicados os objetivos a alcançar e apresentada a estrutura do relatório.

No **capítulo dois** é realizada a revisão bibliográfica dos principais conteúdos pertinentes para esta dissertação. O capítulo é dividido em quatro subcapítulos. No primeiro subcapítulo foram estudados os conceitos inerentes às ligações adesivas, desde a caracterização das ligações até os possíveis modos de rotura. Seguidamente foi abordada a determinação das propriedades mecânicas dos adesivos, bem como os principais ensaios de arrancamento utilizados para caracterização das propriedades de arrancamento. Por último, foram detalhados os métodos de previsão de resistência mais relevantes para juntas adesivas.

O **capítulo três** é dedicado para o desenvolvimento do trabalho experimental e numérico realizado neste trabalho. É feita a descrição das etapas de fabrico dos provetes, ensaios realizados, apresentação e análise dos resultados obtidos experimentalmente. Seguidamente é feito o detalhamento da modelação numérica criada, apresentação e análise dos resultados obtidos numericamente e comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

No **capítulo quatro** são apresentadas as conclusões obtidas para os resultados apresentados nesta dissertação e são sugeridos possíveis trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligações adesivas
- 2.2 Determinação das propriedades mecânicas de adesivos
- 2.3 Ensaios de caracterização ao arrancamento
- 2.4 Previsão de resistência de juntas adesivas

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

A ligação entre duas superfícies através de um adesivo é uma técnica muito antiga, porém somente após meados de 1940 que esta técnica passou a ser usada em aplicações de engenharia devido à disponibilidade comercial de adesivos sintéticos poliméricos [1].

2.1.1 Caracterização das ligações adesivas

As ligações adesivas são derivadas da ciência da adesão, que por sua vez é o conjunto de conhecimentos e conceitos provenientes de diversas áreas que são necessários para a correta aplicação do adesivo, manuseio. A Figura 1 ilustra as disciplinas envolvidas na tecnologia das juntas adesivas.

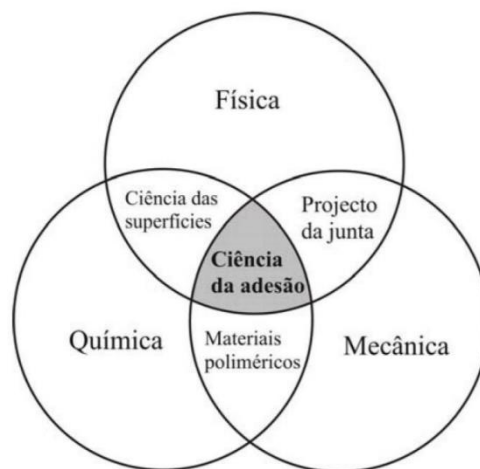


Figura 1 - Disciplinas envolvidas na tecnologia das juntas adesivas [2].

Conforme indicado na norma DIN EN 923, um adesivo é um constituinte não metálico que permite unir materiais à sua superfície, por fixação, cujo fenômeno é conhecido como adesão. A união entre os materiais supõe existência de resistência interna do adesivo, conhecida como coesão [3].

Segundo Santos [4], adesão é a força intermolecular de atração resultante entre duas substâncias e coesão é a força intermolecular dentro de uma substância. Tais forças intermoleculares são majoritariamente forças de van der Waals (ligação secundária).

2.1.2 Comparação com outras técnicas de ligação

Uma das vantagens, que permite que as ligações adesivas se destaquem sobre outros tipos de ligações utilizadas na indústria, tais como juntas rebitadas ou soldadas, é a distribuição uniforme das tensões ao longo da largura da junta adesiva [5]. Tal comparação é exemplificada na Figura 2. Ademais, as ligações adesivas possibilitam [1, 2, 5, 6]:

- Alta resistência à fadiga e carregamentos cíclicos;
- Menor peso estrutural;
- Juntas com contornos lisos;
- Redução do custo de fabricação;
- Elevada capacidade de amortecimento de vibrações;
- Possibilidade de ligar materiais de naturezas diferentes;
- Torna o projeto mais flexível para utilização de novos conceitos e materiais;
- Permite obter boa impermeabilização e isolamento (térmico ou elétrico).

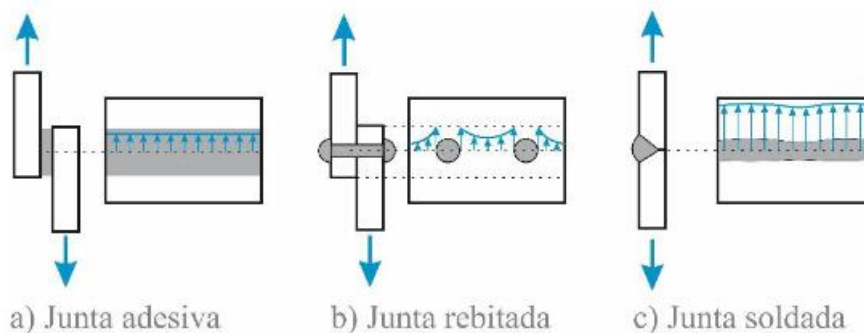


Figura 2 - Distribuição das tensões ao longo da junta adesiva (a), rebitada (b) e soldada (c) [7].

Embora as ligações adesivas apresentem vantagens competitivas sobre as ligações mecânicas, as juntas com adesivos apresentam algumas limitações [2, 8, 9]:

- Apresentam baixo desempenho quando sujeitas aos esforços de arrancamento;
- Requer um tratamento das superfícies a serem unidas;
- Quase impossível promover a desmontagem, após realizada a ligação;
- Em algumas aplicações, a inspeção visual é impossível;
- Não podem ser usados em ambientes de temperatura elevada;
- Pode ser necessário um longo tempo de cura;
- Pode ser necessária temperatura e pressão para cura;
- Durabilidade limitada em condições extremas de serviço.

2.1.3 Esforços típicos em juntas adesivas

Existem fundamentalmente quatro modos de esforços em uma junta adesiva, nomeadamente: tração/compressão, corte, arrancamento e clivagem. Tais carregamentos devem ser analisados, a fim de estabelecer a maior resistência da junta [2].

Esforços de Tração e Compressão

Os esforços de tração acontecem quando as forças atuam perpendicularmente ao plano da junta, conforme visto na Figura 3 (a). É importante salientar que, em ligações adesivas, as tensões não serão uniformes ao longo da área ligada, devido à existência de efeitos de bordo, que conduzem a picos de tensão [10].

Assim como nos esforços de tração, as forças de compressão desenvolvem-se perpendicularmente ao plano da ligação adesiva, como mostra a Figura 3 (b).

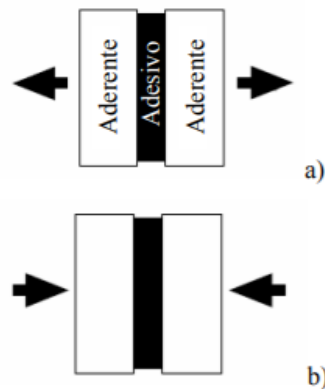


Figura 3 - Esforço de tração (a) e compressão (b) [11].

Esforços de corte

As tensões de corte ocorrem na presença de forças paralelas ao plano do adesivo, que tendem a separar os substratos (material a ser ligado), como mostra a Figura 4. As solicitações de corte são as mais indicadas para juntas adesivas, pois toda a área de sobreposição contribui para a resistência da ligação [2].

É possível observar, consoante a Figura 5, que a tensão de corte é máxima nas extremidades da junta adesiva e mínima no centro da mesma. Tal facto ocorre devido à deformação diferencial de cada aderente ao longo da área fixada. Quando se aumenta o comprimento de sobreposição tal efeito torna-se mais evidente [12], pelo que se deve aumentar antes a largura para incrementar a resistência ao corte da junta adesiva.



Figura 4 - Esforço de corte [11].

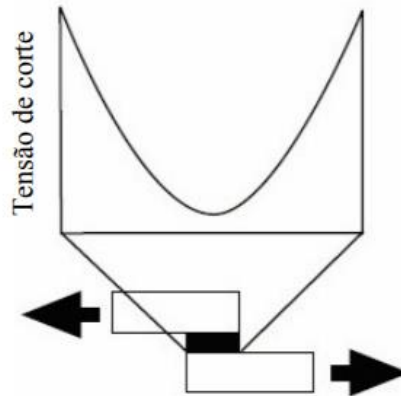


Figura 5 - Distribuição da tensão de corte ao longo da junta adesiva [11].

Esforços de clivagem e arrancamento

Ao contrário dos esforços de corte, os esforços de arrancamento e clivagem devem ser sempre evitados. A clivagem é causada por forças de tração aplicadas na extremidade da junta adesiva, que tendem a separar os substratos, como indica a Figura 6 (a). O esforço de arrancamento segue a mesma definição. Porém, este ocorre quando um ou ambos os substratos são flexíveis, conforme se representa na Figura 6 (b) [2].

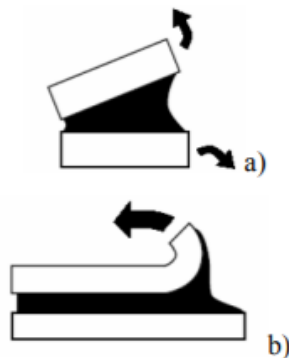


Figura 6 - Esforços de clivagem (a) e arrancamento (b) [11].

2.1.4 Modos de rotura de juntas adesivas

Numa junta adesiva é possível haver quatro modos de rotura [2, 13], cuja diferença é exemplificada na Figura 7.

A) Rotura adesiva

A rotura adesiva se verifica na interface entre o adesivo e um dos aderentes. Este tipo de rotura deve ser evitado, pois indica que não houve uma preparação adequada da superfície a ser ligada ou então devido a incompatibilidade entre o adesivo escolhido e o aderente.

B) Rotura coesiva

A rotura coesiva ocorre no interior do adesivo e acontece quando a resistência da ligação entre o substrato e o adesivo é mais forte do que a resistência do próprio adesivo. Tal falha coesiva é a mais indicada, em virtude de os materiais da junta adesiva terem sido submetidos à resistência máxima, o que possibilita obter a resistência do adesivo.

C) Rotura pelo aderente ou substrato

A rotura pelo aderente acontece quando o substrato rompe antes de ocorrer a rotura do adesivo, como é exemplificado na Figura 7(c). Tal rotura indica que a junta adesiva foi bem projetada, especificamente se a carga de rotura condizer com a resistência nominal do substrato.

D) Rotura mista

A rotura mista é o resultado da conjugação entre a rotura adesiva e coesiva. Uma das causas deste modo de rotura pode estar relacionada à insuficiência no processo de limpeza numa região específica da junta a ser unida.

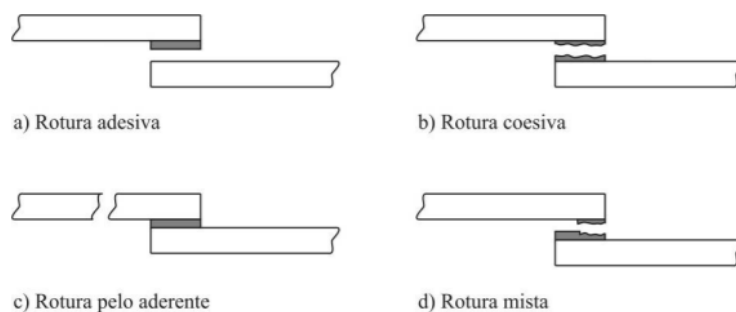


Figura 7 - Possíveis modos de rotura em juntas adesivas [11].

2.1.5 Aplicações das juntas adesivas

As juntas adesivas são amplamente utilizadas na indústria aeronáutica, devido à elevada resistência à fadiga e aos carregamentos cíclicos. Entretanto, com a evolução da tecnologia aplicada nas ligações adesivas, outras indústrias têm agregado o uso das ligações adesivas, como [2, 14]:

- Indústria naval;
- Medicina;
- Construção civil;
- Indústria automóvel;
- Desporto;
- Indústria aeroespacial.

2.2 Determinação das propriedades mecânicas de adesivos

Neste capítulo serão abordados os métodos de caracterização das propriedades mecânicas dos adesivos. Para tal, serão estudados os ensaios mecânicos de provetes maciços, de camadas finas de adesivo e provetes submetidos a ensaios de fratura.

2.2.1 Ensaios mecânicos de adesivo maciço

Para os ensaios mecânicos de adesivos maciços, serão analisados os ensaios de tração e de corte.

Ensaio de tração

De acordo com Norton [15], os melhores dados de propriedades mecânicas do material são obtidos a partir de ensaios destrutivos realizados sob carregamentos de serviço reais em protótipos reais, feitos de materiais reais por processos industriais reais. Neste âmbito, o ensaio de tração é o ensaio mais utilizado.

Para o ensaio à tração realizado em provetes maciços (*bulk*), existem diversos processos de fabrico que melhor se adequam às propriedades físicas do adesivo, conforme estudado por da Silva et al. [16].

O ensaio é regulamentado conforme a norma EN ISO 527-3 [17], onde os provetes são submetidos a um esforço de tração uniaxial, de forma contínua e crescente até a rotura, na direção longitudinal. As deformações sofridas pelo provete durante o ensaio são medidas através de extensómetros aplicados ou não diretamente no provete e como resultado obtém-se a curva σ - ε (tensão x deformação) [2].

Para este ensaio, a norma EN ISO 527-3 indica as dimensões de dois tipos de provetes (Figura 8), sendo (a) utilizado para adesivos mais rígidos e (b) para adesivos mais dúcteis, onde as deformações são maiores [2].

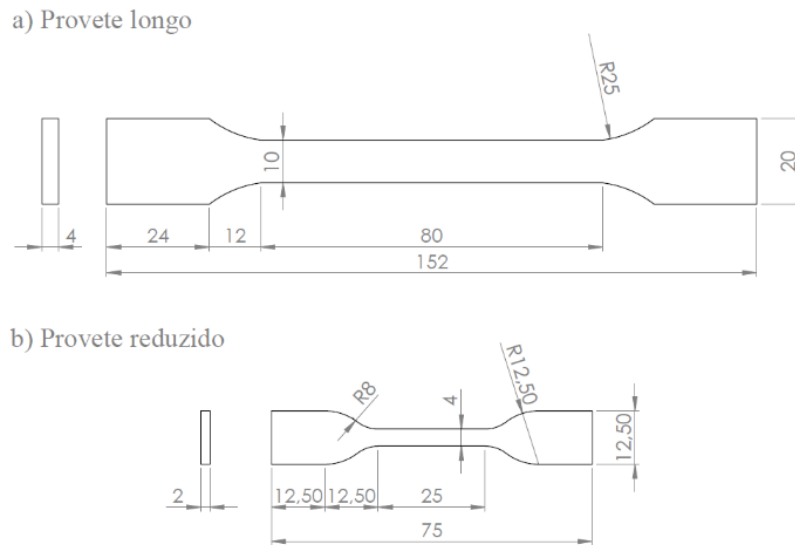


Figura 8 - Provete maciços para realização de ensaios de tração segundo a norma EN ISO 527-3, onde a) representa as dimensões do provete longo e b) do provete reduzido (dimensões em mm) [7].

Ensaio de corte

O ensaio de corte, também conhecido como ensaio losipescu, pode ser executado com provetes maciços. Este ensaio foi inicialmente recomendado para determinar o comportamento ao corte de metais e juntas soldadas [2, 16].

O ensaio losipescu é validado pela norma ASTM D5379 [18]. Na Figura 9 é possível verificar a geometria e as respectivas dimensões do provete. No centro do provete, zona em que existem dois entalhes simétricos, o momento fletor é nulo, o que significa haver somente esforços de corte [2].

Ainda na secção central, antes da realização do ensaio devem ser instalados extensómetros a 45° e a -45° com relação ao eixo do provete. Ao iniciar o ensaio, o provete é solicitado por compressão nos pontos indicados na Figura 9.

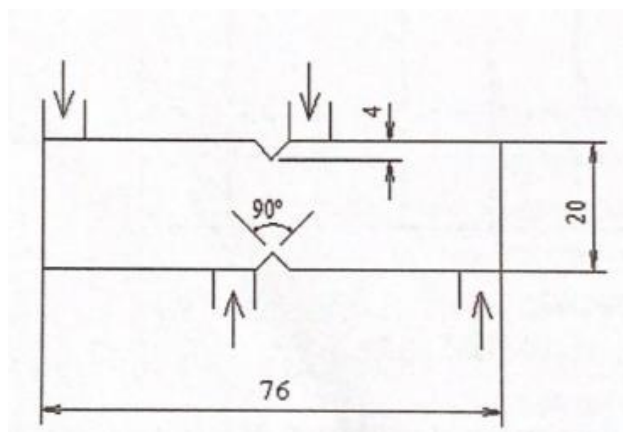


Figura 9 - Carregamentos, geometria e dimensões (em mm) do provete para o ensaio de corte [2].

Após a realização do ensaio é possível calcular o módulo de corte (G) e tensão de corte (τ) indicados pelas equações (1) e (2), respectivamente. Sendo t a espessura do provete, h a distância entre as extremidades dos dois entalhes, F o carregamento aplicado e $\varepsilon_{45} - \varepsilon_{-45}$ a deformação medida pelos extensômetros.

$$G = \frac{F}{t.h.(\varepsilon_{45} - \varepsilon_{-45})}, \quad (1)$$

$$\tau = \frac{F}{t.h}. \quad (2)$$

2.2.2 Ensaios mecânicos de camadas finas de adesivo

Para a análise das propriedades mecânicas de provetes com camadas finas de adesivos serão analisados os ensaios de tração e ensaio de corte, assim como foi abordado para os ensaios de provetes maciços.

Ensaio de tração

Os ensaios de tração realizados com uma camada fina de adesivos são designados por *butt-joint* ou juntas topo a topo. Estes ensaios são considerados mais próximos da realidade quando comparados com o ensaio de provete maciço. A geometria do provete difere do ensaio em *bulk*, como mostra a Figura 10.

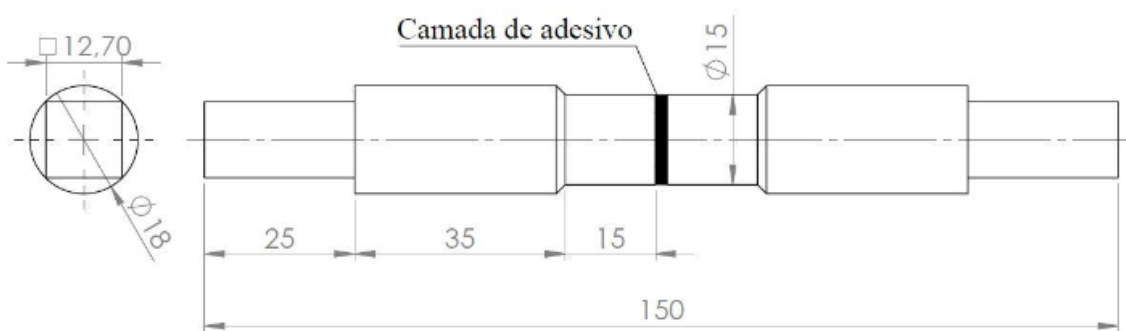


Figura 10 - Geometria e dimensões (em mm) do provete para ensaios de tração topo a topo [7].

Após a realização do ensaio é possível obter o coeficiente de Poisson (ν) e o módulo de elasticidade longitudinal (E) do adesivo. Devido às dificuldades inerentes ao alinhamento e precisão no fabrico do provete, geralmente é necessário utilizar *gabarits* de posicionamento para garantir a qualidade dos resultados obtidos [2].

Ensaio de corte

Como as juntas adesivas são projetadas para serem submetidas maioritariamente a esforço de corte, existem diversos ensaios que avaliam tal esforço [2, 5, 11, 16]:

- Ensaio em junta de sobreposição simples (JSS);
- Ensaio de borboleta ou Arcan;
- Ensaio de juntas topo a topo em torção;
- Ensaio *Thick Adherend Shear Test* (TAST).

- Ensaio em junta de sobreposição simples (JSS)

Este método é um dos mais difundidos para a análise dos esforços de corte, porque é um ensaio simples, de fácil fabrico e de baixo custo. Os substratos (material) estão sujeitos a tração e flexão, enquanto o adesivo está sujeito maioritariamente ao corte.

O ensaio é regido pelas normas ASTM D1002 [19] ou outras correspondentes e a Figura 11 exhibe a geometria e dimensões do provete conforme a norma ASTM D1002. Ao fim do ensaio a tensão de corte média (τ) é obtida através da equação (3), onde F é o carregamento imposto, l_s o comprimento de sobreposição e B a largura da junta adesiva.

$$\tau = \frac{F}{l_s \cdot B} \quad (3)$$

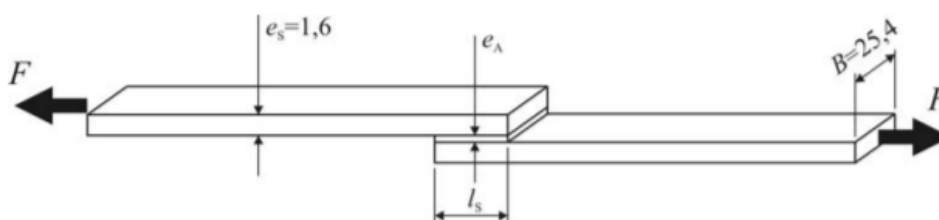


Figura 11 - Geometria e dimensões (em mm) da JSS conforme a norma ASTM 1002 [11].

- Ensaio de Borboleta ou Arcan

O ensaio Arcan, igualmente designado por ensaio *Notched plate shear method*, é um ensaio especialmente apropriado para espessuras de adesivo reduzidas. Também é chamado de ensaio borboleta devido à forma geométrica atribuída ao provete (Figura 12).

Por utilizar espessuras reduzidas, este ensaio consegue obter melhores resultados em todos os tipos de adesivos. O provete Arcan dispõe de dois entalhes a 90° e um raio de concordância de 1,5 mm, a fim de reduzir a concentração de tensões durante a realização do ensaio.

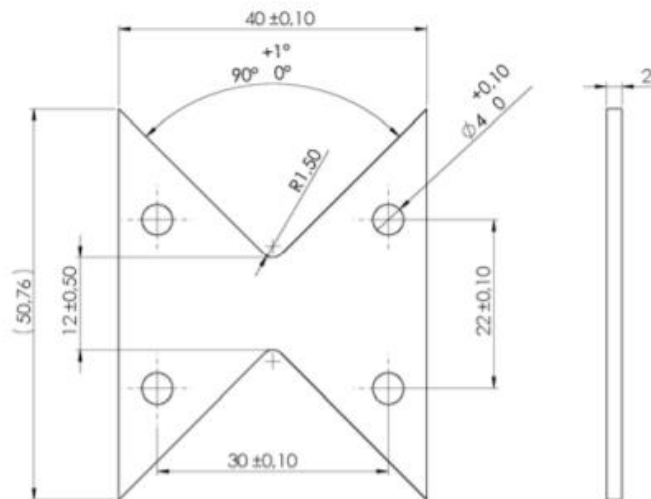


Figura 12 - Geometria do provete utilizado no ensaio Arcan [11].

Igualmente ao ensaio losipescu, na secção central o ensaio borboleta conta com dois extensómetros a 45° e a -45° e o cálculo de G e τ também segue as equações (1) e (2), respetivamente.

- Ensaio de juntas topo a topo em torção

Este ensaio, também designado por *Napkin-ring test*, é utilizado quando as deformações são mínimas o que diminui a variação das tensões de corte ao longo do adesivo. O provete é submetido a momentos torsores de mesmo valor, mas com sentido oposto, pelo que a maior deformação ocorrerá no raio exterior do adesivo. A Figura 13 exemplifica a geometria do provete.

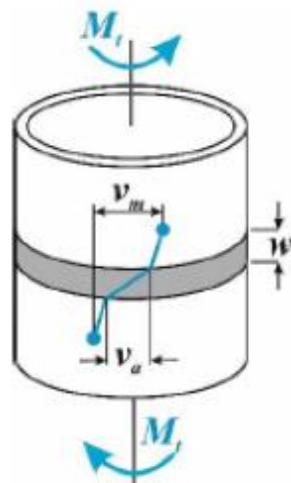


Figura 13 - Geometria do provete utilizado no ensaio de torção [2].

O processo de fabrico do provete é muito dispendioso e complexo e há dificuldades em relação aos equipamentos para realização do ensaio e obtenção dos resultados.

A tensão de corte (τ) é dada pela equação (4), onde M_t é o momento torsor aplicado, r uma distância estabelecida do eixo em que será aplicado M_t , t a espessura da camada do adesivo, r_i e r_o os raios interior e exterior, respetivamente.

$$\tau = \frac{2M_t r}{\pi(r_o^4 - r_i^4)}. \quad (4)$$

O módulo de corte (G), é dado pela equação (5), onde ϕ indica o ângulo de rotação medido.

$$G = \frac{2t}{\pi(r_o^4 - r_i^4)} \left(\frac{M_t}{\phi} \right). \quad (5)$$

Da mesma forma, G pode ser o produto da razão:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}; \quad (6)$$

em que γ é dado por:

$$\gamma = \frac{v_m - v_t}{t}, \quad (7)$$

sendo $v_m = v_a + v_t$, indicadas na Figura 13, em que v_m é o deslocamento total medido no provete, v_a é o deslocamento no adesivo e v_t é o deslocamento nos substratos.

- Ensaio TAST

O ensaio TAST é um ensaio regulamentado pela norma ISO 11003-2.2 [20], que normaliza a geometria e dimensões do provete, conforme são exemplificadas na Figura 14.

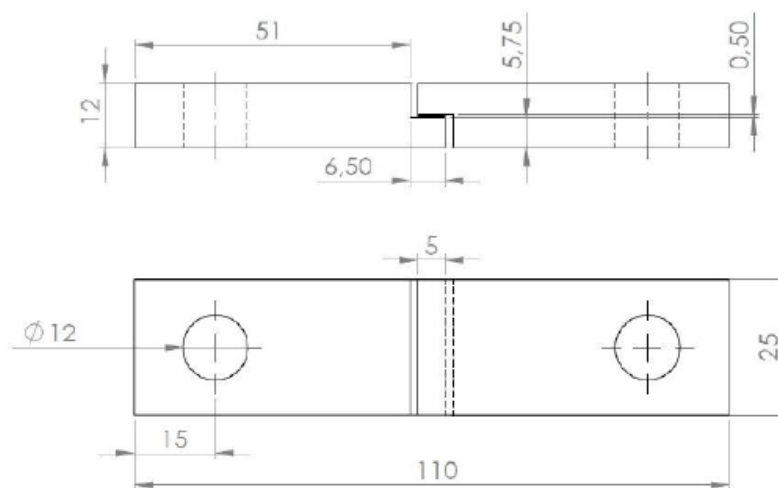


Figura 14 - Geometria e dimensões (em mm) do provete para ensaio TAST conforme a norma ISO 11003-2.2 [20].

O ensaio TAST é o mais popular entre os ensaios de corte indicados, devido à fácil fabricação do provete e por utilizar a máquina de ensaios de tração convencional para execução do ensaio. Os substratos são fabricados em aço e devem ter uma espessura elevada, de forma a garantir uma rigidez elevada e evitar a flexão. Tal configuração é aplicada para garantir que ocorra somente tensões de corte (puro).

Se o material a ser submetido ao ensaio for isotrópico, é possível efetuar uma combinação entre os resultados obtidos no ensaio de tração de provetes maciços com os resultados do ensaio TAST, obtendo assim G dada pela equação (8).

$$G = \frac{E}{2(1-\nu)}. \quad (8)$$

2.2.3 Ensaios de fratura

Existem três modos fundamentais de propagação de fendas: Modo I, Modo II e Modo III, de acordo com Irwin, Kies e Westergaard. Neste âmbito, o Modo I é de tração e os outros dois modos são de corte, de forma que no Modo II ocorre o corte no plano e no Modo III o corte é fora do plano, conforme indica a Figura 15 [2].

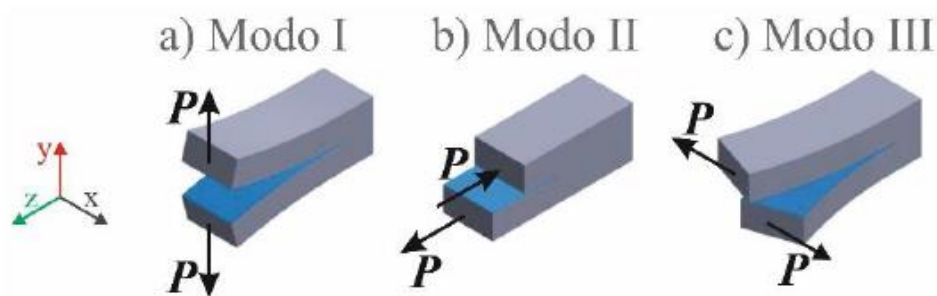


Figura 15 - Modos de rotura em juntas adesivas, sendo a) Modo I, b) Modo II e c) Modo III [7].

- Modo I (tração)

O *Double Cantilever Beam* (DCB), é o ensaio mais utilizado quando se pretende caracterizar a G_{Ic} (taxa crítica de liberação de energia do modo I) [2]. Este ensaio encontra-se regulamentado pela norma ASTM D3433-99 [21] que especifica que os provetes são compostos por dois substratos metálicos de comprimento igual e espessura constante, unidos por uma fina camada de adesivo, conforme pode ser observado na Figura 16.

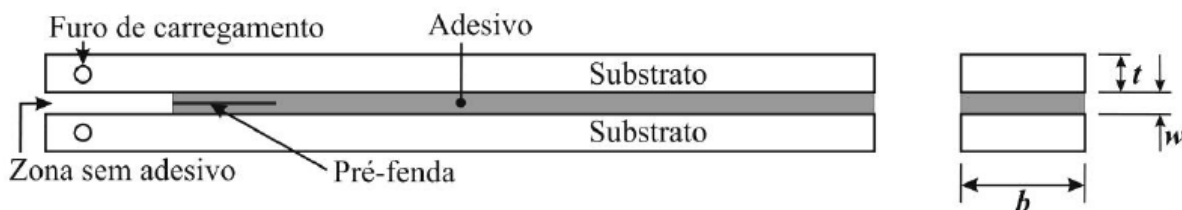


Figura 16 - Geometria do provete utilizado pelo ensaio DCB conforme a norma ASTM D3433-99 [7].

O ensaio DCB consiste na aplicação de uma carga de separação normal utilizando a máquina de ensaios universal com as adaptações corretas para o ensaio. Segundo a norma ASTM D3433-99 [21], o ensaio é feito até a rotura do provete e com uma velocidade que varia entre $0,1$ e $5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ [16].

Ainda no âmbito dos ensaios de fratura em Modo I, existem os ensaios *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB), conforme ilustra a Figura 17 e *Contoured Double-Cantilever Beam* (CDCB) [2], que também utilizam substratos metálicos para o fabrico dos provetes. Porém, conforme referido por Campilho et al. [22] o ensaio DCB é o mais adequado para caracterização da G_{Ic} devido à precisão e simplicidade do ensaio. Outro estudo conduzido por Lopes et al. [23] compararam o ensaio DCB e o ensaio TDCB e foi possível observar que o segundo não é o mais indicado para estimativa da G_{Ic} para adesivos dúcteis quando não há uma consistência com os princípios da mecânica da fratura linear elástica (MFLE).

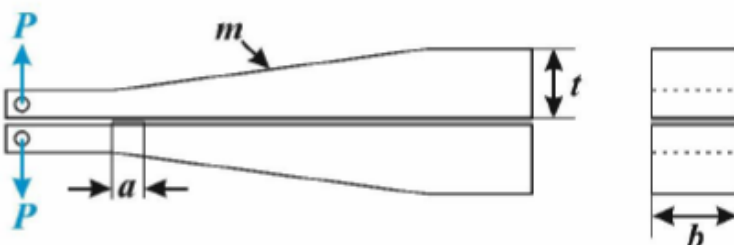


Figura 17 - Geometria do provete utilizado no ensaio TDCB conforme a norma ASTM D3433-99 [7].

- Modo II (corte)

Para caracterização de G_{IIc} (taxa crítica de liberação de energia em modo II) recorre-se aos ensaios *End Notched Flexure* (ENF), *Four Point End Notched Flexure* (4ENF) e *End Loaded Split* (ELS), cujas geometrias dos provetes se encontram indicadas pela Figura 18, Figura 19 e Figura 20, respetivamente.

O ensaio ENF é o mais utilizado, em função da simplicidade, e consiste na aplicação de uma carga ao meio do vão a um deslocamento constante, com ambos os substratos com mesma espessura t bi apoiados nas extremidades [2].

O ensaio 4ENF é bem similar com o ensaio ENF, visto que segue o mesmo princípio, mas utiliza dois pontos extras de carregamento, o que cria um ensaio de flexão em quatro pontos.

O ensaio ELS é mais aprimorado do que os ensaios ENF e 4ENF, pois utiliza um cilindro para aplicação da carga e uma das suas extremidades é encastrada restringindo o movimento na vertical [2].

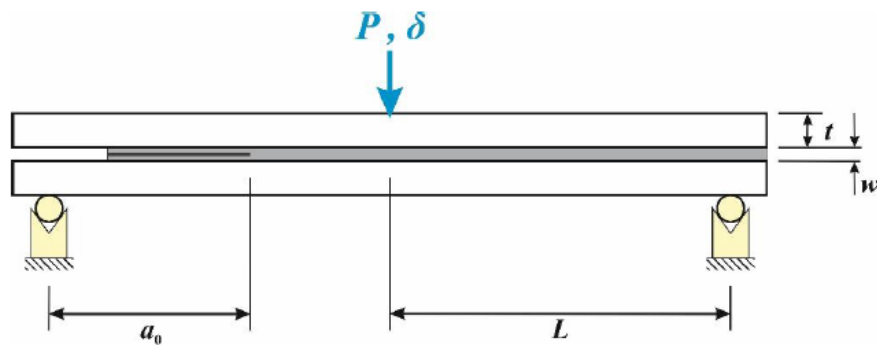


Figura 18 - Geometria do provete utilizado no ensaio ENF [7].

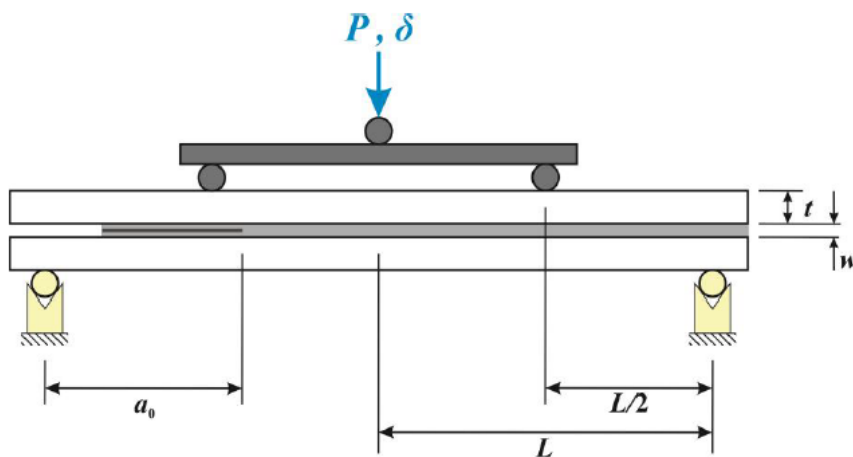


Figura 19 - Geometria do provete utilizado no ensaio 4ENF [7].

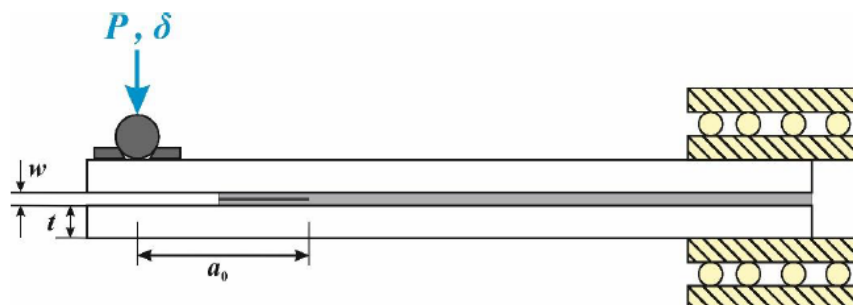


Figura 20 - Geometria do provete utilizado no ensaio ELS [7].

Igualmente ao ensaio DCB, o ensaio ENF pode ser realizado na máquina de ensaios universais. Porém, durante o ensaio, deve-se fotografar o provete a cada 5 segundos, por exemplo, para que, posteriormente, seja possível ser feita a análise da propagação da fenda (a) [2, 16].

Por não haver uma norma específica com o objetivo de unificar os ensaios de adesivos em modo II, então, é utilizada a norma JIS K 7086 [24] que normaliza G_{IIC} em materiais compósitos [2].

O estudo feito por de Oliveira et al. [25] compararam os resultados da caracterização de G_{IIC} obtidos através dos ensaios ENF e 4ENF e foi concluído que, embora o ensaio ENF seja mais simples, tal ensaio ENF foi o que obteve resultados mais fiáveis para a estimativa de G_{IIC} .

- Modo misto

O modo misto é a combinação do Modo I e Modo II, ou seja, a junta adesiva é submetida tanto ao esforço de tração quanto ao esforço de corte. O ensaio é regulamentado pela norma ASTM D6671 [26] que utiliza o ensaio *Mixed-Mode Bending* (MMB) A Figura 21 ilustra a geometria do ensaio.

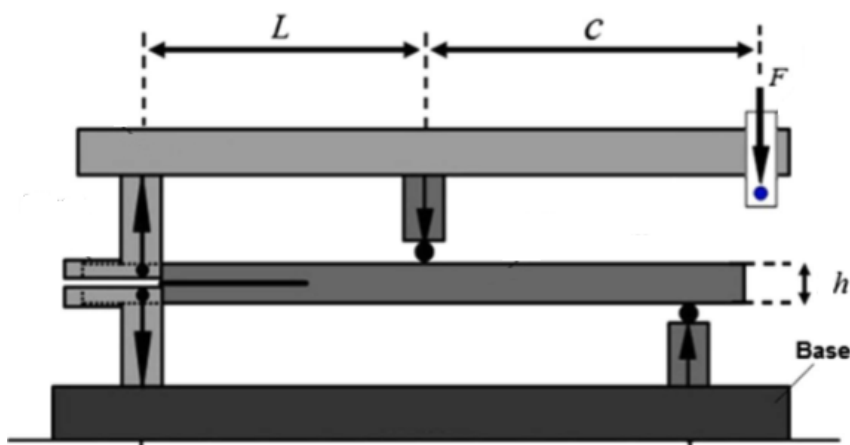


Figura 21 - Geometria do provete utilizado no ensaio MMB [27].

O ensaio MMB é uma junção de características do ensaio DCB (Modo I) e do ensaio ENF (Modo II), com uma fenda inicial que será solicitada para que haja a propagação durante o ensaio. A distância c indica o rácio do modo misto e consequentemente o valor das solicitações aplicadas ao provete. A espessura h do provete varia entre 20 a 25 mm e o comprimento total de aproximadamente 140 mm [2, 16].

2.3 Ensaios de caracterização ao arrancamento

Os ensaios de arrancamento ou *peel tests* são utilizados, nas indústrias, para determinar a qualidade e desempenho ao arrancamento da junta adesiva e caracterizar o adesivo como frágil ou dúctil [2, 16]. As juntas adesivas podem ser submetidas a esforços de arrancamento através de diversos ensaios de arrancamento existentes: *T-peel test*, *peel test a 180°*, *floating roller peel test* e *climbing drum peel test*. A Figura 22 ilustra os ensaios de arrancamento citados.

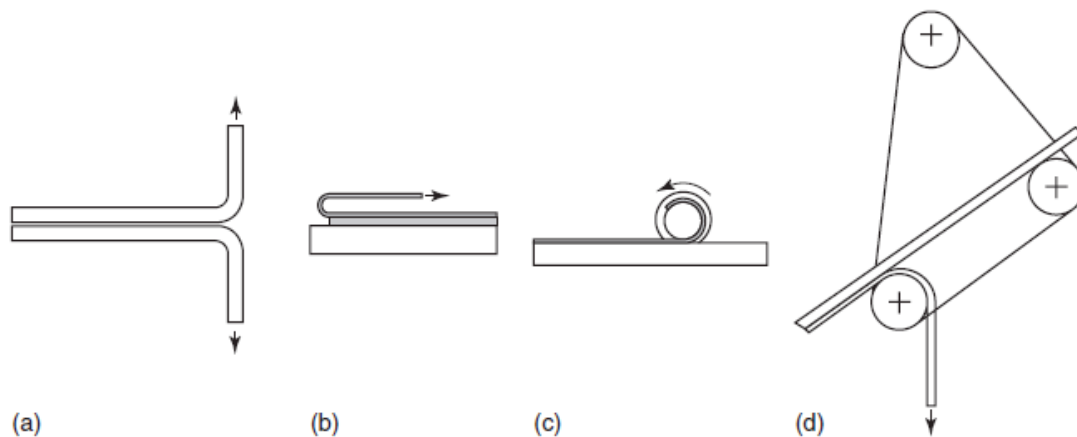


Figura 22 - Variações existentes do ensaio de arrancamento: a) *T-peel test*; b) *peel test a 180°*; c) *climbing drum peel test*; d) *floating roller peel test* [16].

Durante a realização do ensaio, é gerado um momento no ponto da dobragem do substrato que, por ser uma área muito pequena, causa uma grande concentração de tensão. Tal concentração de tensão produz o efeito localizado de arrancamento (esforço que deve ser evitado, conforme indicado no capítulo 2.1.3). Portanto, os ensaios de arrancamento são importantes pois caracterizam o comportamento das juntas adesivas sob condições extremas de sollicitação.

2.3.1 Ensaio *T-peel*

O ensaio de arrancamento *T-peel* é um ensaio amplamente utilizado e é normalizado conforme as normas ASTM D1876-08 [28], DIN 1720:1998 [29] e ISO 11339 [30]. É um ensaio que gera grande deflexão dos aderentes. O ensaio é realizado numa máquina de ensaios universal e o provete, antes da realização do ensaio, tem geometria similar a um T [2, 16], conforme ilustra a Figura 23.

A ligação adesiva é feita em dois substratos flexíveis com a aplicação de um adesivo entre eles. As extremidades do substrato serão submetidas a forças em sentidos opostos. O rácio entre a força média e a área de sobreposição da junta adesiva resultam na resistência de arrancamento do adesivo [2, 16].

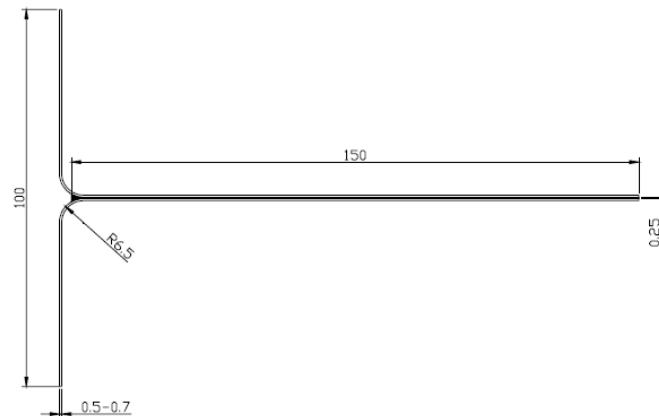


Figura 23 - Geometria e dimensões (em mm) do ensaio de arrancamento T-peel [31].

2.3.1.1 Configurações T-peel

Segundo Broughton e Gower [31], o ensaio de arrancamento T-peel tem como vantagens a fácil caracterização da força de arrancamento, como resultado do ensaio; provete e ensaio economicamente viável e realização do ensaio numa máquina de ensaios universal. Como desvantagens referem-se à limitação a substratos finos e flexíveis; impossibilidade de grandes deformações do substrato e sensibilidade dos resultados à geometria do provete.

O ensaio possui quatro categorias de configurações diferentes. Neste âmbito, cada categoria é caracterizada e examinada individualmente. Estas são divididas em [16]:

- Categoria I: Os substratos são deformados elasticamente e ocorre um arrancamento simétrico;
- Categoria II: Os substratos são deformados plasticamente e ocorre um arrancamento simétrico;
- Categoria III: Os substratos são deformados plasticamente e não ocorre um arrancamento simétrico;
- Categoria IV: Os substratos são deformados elasticamente e não ocorre um arrancamento simétrico.

A Figura 24 divide as categorias em quadro quadrantes, onde no eixo horizontal mostra as deformações plásticas e elásticas e no eixo vertical ilustra o arrancamento não simétrico e simétrico, respetivamente.

A categoria I é a configuração mais simples do ensaio T-peel. A categoria é resultado da combinação de uma camada suficientemente fina de adesivo, alta resistência do aderente e uma suficiente adesão do adesivo [16].

As categorias II e III, por terem uma deformação plástica, implicam que os provetes não voltem a ter as mesmas dimensões do estado inicial após o fim do ensaio [16].

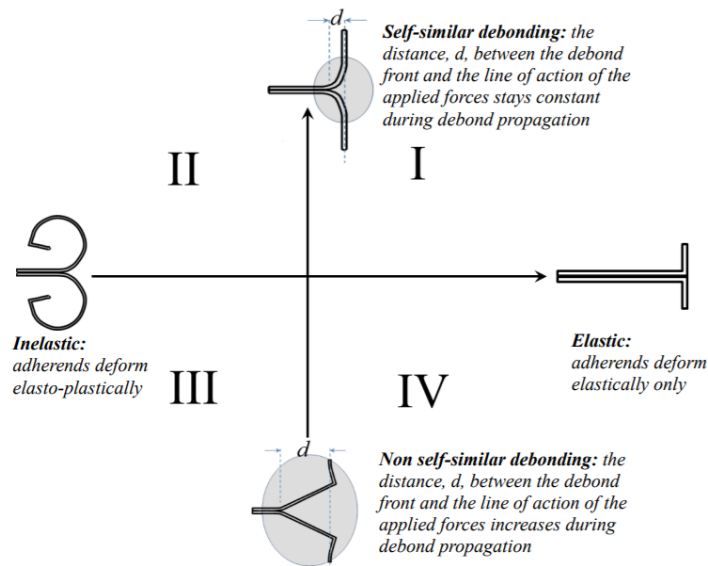


Figura 24 - Divisão das categorias do ensaio de arrancamento T-peel em quatro quadrantes. No eixo horizontal a deformação plástica e elástica e no eixo vertical o arrancamento não simétrico e simétrico, respectivamente [32].

A categoria IV, assim como a categoria I, volta ao estado original no fim do ensaio, pois ambos os substratos foram submetidos somente ao limite elástico de tensão [16].

2.3.1.2 Fabrico de juntas, ensaio e interpretação de resultados

Segundo a norma ASTM D1876-08 [28], o comprimento da junta adesiva deve ser de 241 mm e a largura de 25 mm. Entretanto, a norma ISO 11339 [30] indica que os provetes devem ter no mínimo 100 mm de comprimento e que se devem desprezar os primeiros e os últimos 25 mm do ensaio. Assim, o comprimento mínimo necessário para a realização do ensaio é de 150 mm [32].

Os provetes do ensaio T-peel são preparados através do corte das chapas nas dimensões necessárias, seguido da união das duas tiras com o adesivo. Alternativamente, realiza-se primeiro a união de duas chapas e, somente após a cura do adesivo, o corte é feito nas dimensões necessárias. O segundo método é o mais indicado, pois resulta em provetes de maior qualidade, embora seja menos conveniente [16].

A força de arrancamento, mencionada no subcapítulo 2.3.1.1, é calculada através da equação (9).

$$\text{Força de arrancamento} = \frac{P}{b}, \quad (9)$$

onde, P é a força aplicada nas extremidades do provete e b a largura do provete. Um exemplo do gráfico da P obtido para o ensaio T-peel é indicado na Figura 25.

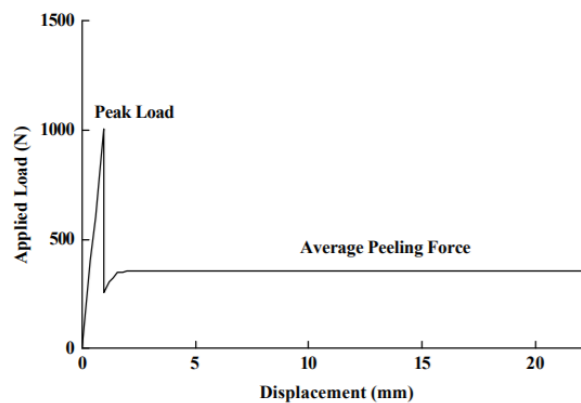


Figura 25 - Resultado típico de P do ensaio T-peel [33].

Na Figura 25 é possível observar que o carregamento no valor do pico é muito superior à média da P , o que pode ser devido a alta e uniforme força de aperto utilizada durante a cura do provete [33].

2.3.2 Ensaio *peel test* a 180°

O ensaio de arrancamento a 180° ou *peel test* a 180° é mais adaptável para adesivos não estrutural, é um ensaio estudado e normalizado há bastante tempo, que segue os princípios das normas ASTM D903 [34] e ASTM C794 [35]. A P é calculada conforme a equação (9), assim como no ensaio T-peel. O ensaio é utilizado quando se pretende caracterizar a resistência ao arrancamento entre um aderente flexível e outro rígido [2, 16].

2.3.2.1 Fabrico de juntas, ensaio e interpretação de resultados

O ensaio de arrancamento a 180° pode ser realizado numa máquina de ensaios universal. A velocidade do ensaio deve ser constante e estar entre 1 e 500 mm.min⁻¹. Normalmente, não são necessárias peças de fixação extra, a menos que o substrato seja muito fino e a máquina não consiga prendê-lo corretamente [16].

O substrato rígido, geralmente, é feito plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV), alumínio ou aço. O substrato flexível é feito de chapas finas de aço ou alumínio [16].

O substrato flexível deve ter um ângulo de 180°, ou seja, deve dobrar para que seja preso a outra amarra, oposta à amarra que está a extremidade do substrato rígido. A Figura 26 exhibe a montagem e a geometria do provete.

A norma ASTM D903 [34] aconselha que sejam excluídos os primeiros 25 mm do gráfico resultante do ensaio. De seguida, é calculada a resistência de arrancamento com a média de 100 mm restantes. A força de arrancamento é dada em N/mm [16].

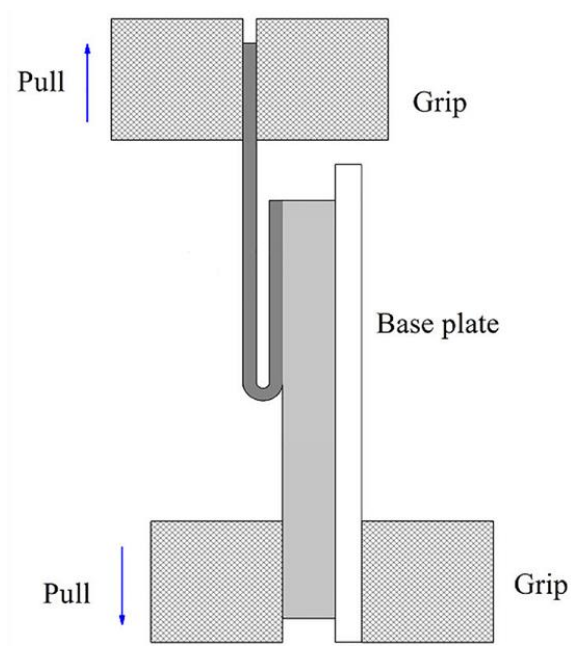
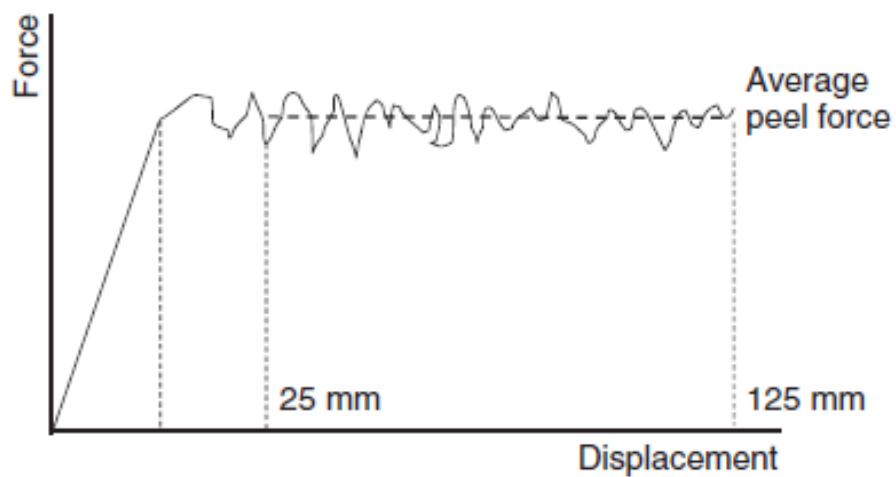


Figura 26 - Montagem e geometria do provete para o ensaio de arrancamento a 180° (adaptado de [36]).



A

Figura 27 ilustra um gráfico resultante do ensaio de arrancamento a 180° e indica a P , bem como os primeiros 25 mm que devem ser desconsiderados.

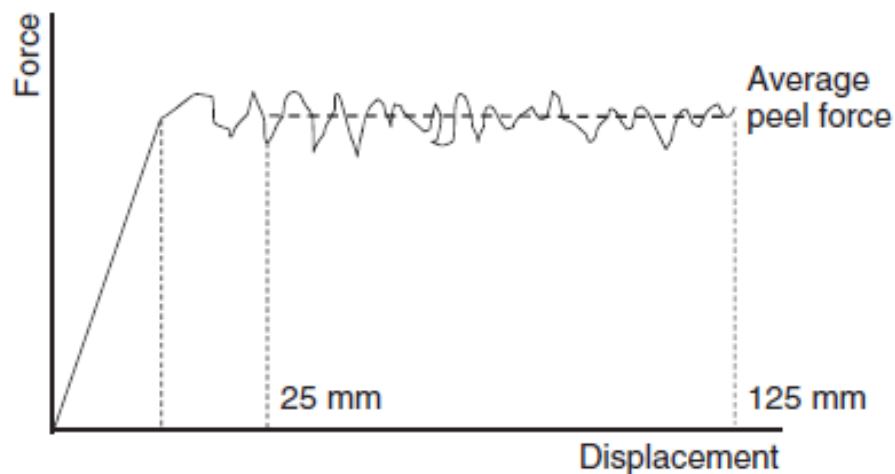


Figura 27 - Gráfico resultante de um ensaio de arrancamento a 180° [16].

2.3.3 Ensaio *floating roller peel*

O ensaio *floating roller peel* ou ensaio de rolete flutuante é regulamentado pela norma ASTM 3167 [34]. O equipamento desenvolvido para a execução do ensaio permite alterar o ângulo de arrancamento e que, uma vez definido para um ensaio, se mantém inalterado durante todo o ensaio [2].

A Figura 28 exemplifica o ensaio *floating roller peel* e a peça desenvolvida para o ensaio.

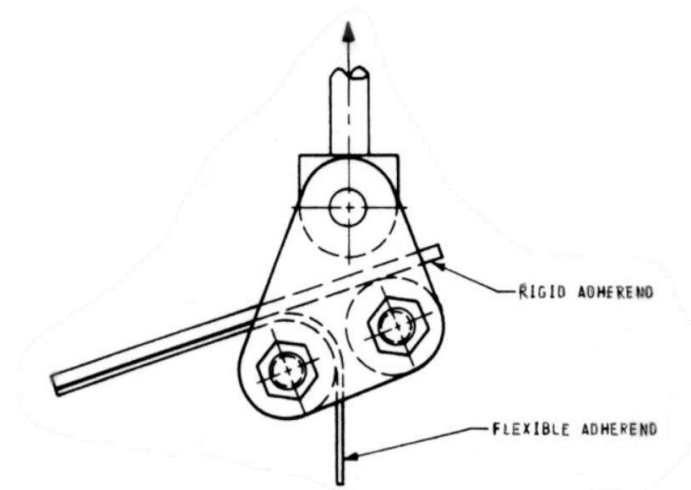


Figura 28 - Configuração do ensaio *floating roller peel* [34].

2.3.3.1 Fabrico de juntas, ensaio e interpretação de resultados

Assim como no ensaio de arrancamento a 180°, o ensaio *floating roller peel* é realizado com um aderente rígido e outro flexível. Para o substrato flexível, normalmente são utilizados o alumínio ou aço, e para o substrato rígido também é utilizado um material metálico, como o aço [16]. Embora materiais metálicos sejam maioritariamente

utilizados neste tipo de ensaio, estudos realizados [37-39] utilizam materiais compósitos para o fabrico de aderentes utilizados em ensaios *floating roller peel*.

É preciso ter atenção na escolha do material para o fabrico do substrato flexível, pois as propriedades mecânicas do material flexível, nomeadamente tensão de cedência e dureza, influenciam drasticamente nos resultados obtidos da resistência ao arrancamento [16].

O dispositivo utilizado para realização deste ensaio, exemplificado na Figura 28, é facilmente encontrado em diversos fornecedores. A chumaceira inferior deve ser livre para realizar movimentos laterais e para que o aderente flexível possa movimentar lateralmente durante a progressão da rotura do adesivo [16]. Com o dispositivo devidamente instalado, o ensaio pode ser executado na máquina universal de ensaios de tração.

Segundo a norma ASTM 3167 [34], o ensaio deve ser realizado a uma velocidade constante de 152 mm/min e devem-se desconsiderar os primeiros 25 mm dos dados obtidos. Para o cálculo da resistência de arrancamento é feita a média dos resultados obtidos no gráfico, no entanto, deve-se garantir, no mínimo, 76,2 mm de propagação de fenda.

A Figura 29 apresenta um gráfico típico obtido através do ensaio *floating roller peel*, com três provetes feitos de compósito polimérico reforçado com fibra de carbono e aço ao carbono.

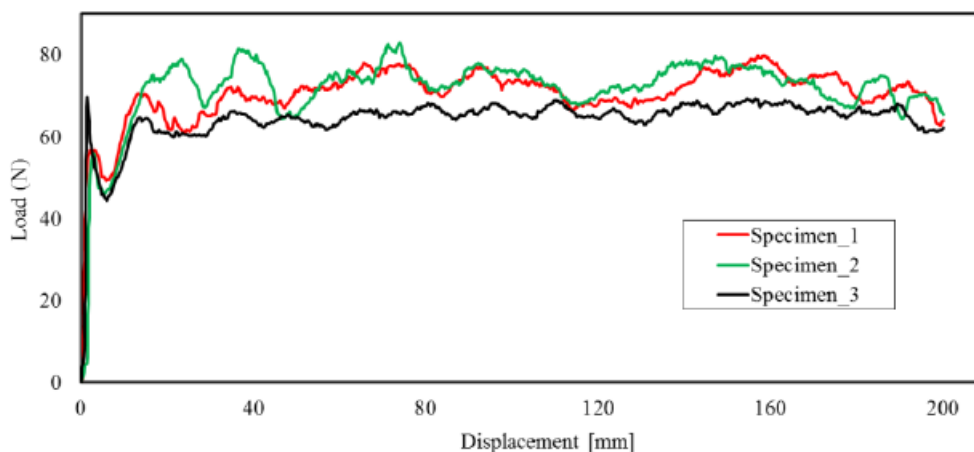


Figura 29 - Gráfico típico obtido após a realização do ensaio *floating roller peel* [40].

A P também é calculada através da equação (9). O modo de rotura, adesivo utilizado, tempo de cura, pressão e temperatura, material dos substratos, método de preparação superficial, temperatura da realização do ensaio, valores máximos, mínimos e média de força de arrancamento, devem ser indicados para cada provete durante análise dos resultados obtidos [34].

O modo de rotura é um dado extremamente importante para o ensaio *floating roller peel*, pois só é possível comparar a resistência de arrancamento obtida com substratos flexíveis iguais [38].

Como principais vantagens, o ensaio *floating roller peel* destaca-se pela compatibilidade com metais e materiais compósitos, tem ensaio simples e económico, e o custo de fabrico dos provetes não é elevado. Assim como todos os ensaios possuem pontos positivos e negativos, o mesmo acontece com o ensaio *floating roller peel*, cujas desvantagens observadas envolvem a necessidade do rolete para realização do ensaio e o ensaio não é adequado para testes de fadiga [31].

2.3.4 Ensaio *climbing drum peel*

O *climbing drum peel test* é um ensaio que também utiliza substratos rígidos e flexíveis, porém é empregue em estrutura *sandwich* ou somente quando o substrato flexível não é flexível o suficiente para ser testado em outro ensaio de arrancamento menos complexo [2, 16]. A Figura 30 ilustra o ensaio a ser realizado num provete feito com estrutura *sandwich*.

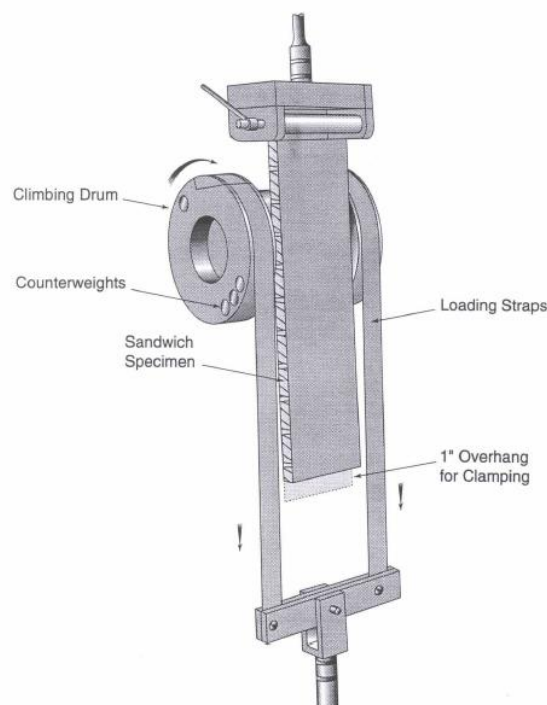


Figura 30 - Ensaio *climbing drum peel* realizado num provete de uma estrutura *sandwich* [31].

O ensaio segue as normas ASTM D1781 [41] e BS 5350 [42] que caracteriza a resistência ao arrancamento de um substrato relativamente flexível e outro rígido e uma ligação do núcleo e as peles de estrutura *sandwich* [16].

2.3.4.1 Fabrico de juntas, ensaio e interpretação de resultados

O adesivo usado para unir a estrutura *sandwich* e a pele deve ser escolhido apropriadamente para evitar problemas relacionados à viscosidade do adesivo. Caso seja feita uma escolha incorreta, a resina pode escorrer pelas paredes da estrutura e restar somente uma camada muito fina de adesivo disponível para ligar a junta adesiva. Alguns adesivos são especificamente adequados para juntas adesivas de materiais específicos, já outros são indicados somente para juntas de chapas metálicas. A informação sobre quais os tipos de materiais indicados para união são encontrados na folha do produto, disponibilizada por cada fabricante [16].

O cilindro rígido (*climbing drum*) é usado para arrancar o aderente flexível do aderente rígido. A P é obtida através da subtração da força total resultante do ensaio e a força requerida para que o arrancamento ocorra. Caso se observe um valor da P muito reduzido será um indicativo que a cura do adesivo foi insuficiente [2, 16].

A Figura 31 indica um resultado característico do ensaio *climbing drum peel*, em que é possível observar a força P_1 , necessária para superar a subida do cilindro rígido ao longo do provete, e a força P_2 , correspondendo à força média de arrancamento [43].

O padrão observado ao longo do ensaio ocorre devido ao comportamento “*stick-slip*” da estrutura *sandwich* à medida que o cilindro rígido arranca a pele da estrutura [43].

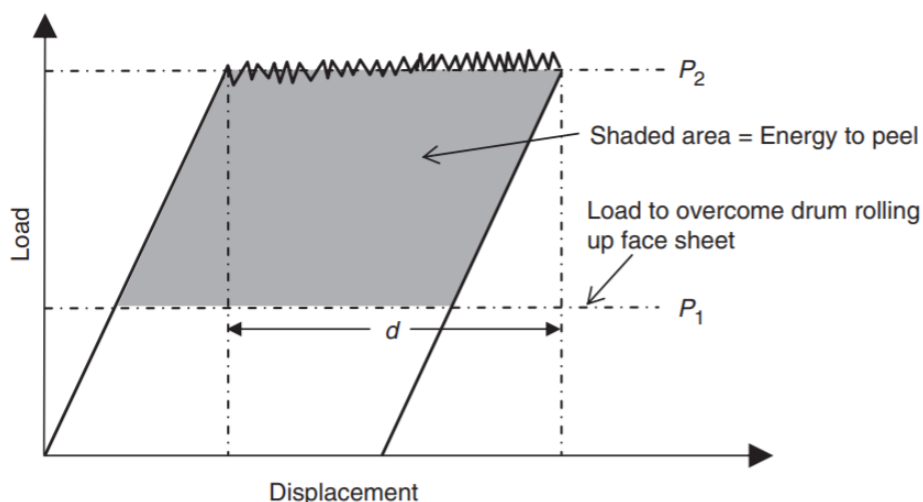


Figura 31 - Gráfico característico do ensaio de *climbing drum peel* [43].

Assim como nos ensaios anteriores, as indicações das normas do ensaio devem ser seguidas, principalmente para o ensaio *climbing drum peel* devido à complexidade deste ensaio [16]. De acordo com as normas ASTM D1781 [41] e BS 5350 [42], o ensaio deve ser realizado à temperatura ambiente para garantir o padrão das dimensões e peso do provete.

A P é calculada através da equação (9). Após calcular P , o valor deve ser subtraído da força necessária para mover o cilindro rígido ao longo do provete. Assim como nos outros ensaios, não se devem considerar os primeiros 25 mm de deslocamento e o cálculo deve ser feito entre o intervalo restante, até 152 mm de deslocamento [16].

2.3.5 Estado da arte de ensaios de arrancamento

Com a atual constata evolução da tecnologia, diversos procedimentos e processos são atualizados e melhorados com o passar do tempo. O mesmo acontece com os ensaios de arrancamento que, embora sejam regulamentados por normas, também se beneficiam com tal evolução, seja no processo de fabrico dos aderentes ou na análise dos resultados obtidos por meio de modelos numéricos cada vez mais precisos.

A Tabela 1 apresenta o estado da arte para ensaios de arrancamento.

Tabela 1 - Estado da arte de ensaios de arrancamento.

Referência bibliográfica	Descrição do trabalho
Padhye et al. [44]	Este trabalho consiste na melhoria da análise do ensaio <i>T-peel</i> para provetes finos e flexíveis testados em máquinas de deslocamento vertical. Foram fabricados diversos tipos de provetes diferentes, onde três provetes com geometrias diferentes foram fabricados com Hydroxypropyl Methylcellulose classe E15 e Polietinelo glycol PEG 400, dois provetes de Teflon unidos com adesivo a base de silicone e outros sete produzidos com diferentes fitas colas comerciais. Foi desenvolvida um mecanismo que suporta a parte não arrancada do provete e como resultado obtido, foi possível, através do equipamento utilizado, melhorar o desempenho do ensaio e, consequentemente, aumentar a precisão da estimativa de G_{IC} .
Kubit et al. [45]	Este artigo analisa a influência que determinado tipo de adesivo causa nas propriedades do compósito de matriz éster vinílica reforçada com fibra de vidro unidos por quatro diferentes tipos de adesivos: Enguard BP72A, Enguard BP06AW, a resina de éster vinil e CAB-O-SIL TS-720. A análise é feita pelo ensaio de arrancamento <i>T-peel</i> . Os resultados obtidos indicam que os provetes fabricados com o adesivo Enguard BP72A apresentaram dados mais precisos, o que implica maior repetibilidade; os provetes fabricados com a resina de éster vinil tiveram uma rotura coesiva e o adesivo Enguard BP06AW garantiram ao provete um modo de rotura coesivo.

Dicosta et al.
[46]

Este trabalho teve como objetivo analisar a resistência de juntas adesivas com aderentes compósitos rígidos e flexíveis. Os substratos foram feitos a partir do pré impregnado HexPly® M77 e foram unidos pelo adesivo termoplástico SUSTAMID® 6, onde foi utilizado o ensaio *floating roller peel*. Com os resultados obtidos do ensaio de arrancamento foi possível refinar o modelo do método de elementos finitos (MEF) utilizado, visto que anteriormente o método foi alimentado com resultados pseudo-experimentais. Também foi possível concluir que os resultados obtidos foram ruidosos e que um modelo mais robusto é necessário para compensar tais discrepâncias.

de Barros et al.
[40]

Este trabalho tem como objetivo analisar a qualidade da adesão entre aço ao carbono e um compósito polimérico reforçado com fibra de carbono unidos com o adesivo NVT201E®. Para a análise das propriedades do provete foi utilizado o ensaio *floating roller peel*. O foco principal foi avaliar a qualidade de adesão das juntas novas e a envelhecidas. Os resultados indicam que P não foi substancialmente afetada pelo envelhecimento. Ambas as juntas apresentaram uma rotura coesiva, o que indica uma boa adesão entre os substratos utilizados.

de Freitas e
Sinke [37]

O objetivo principal do trabalho foi caracterizar a qualidade de adesão em provetes feitos de materiais compósitos e adesivos através do ensaio *floating roller peel*. Foram fabricados substratos em compósito polimérico reforçado com fibra de carbono e a junta foi unida através de nove diferentes tipos de resina epóxida (adesivos termoendurecível). Como resultado, foi possível verificar que o ensaio de arrancamento para compósitos é apropriado para caracterizar a qualidade da adesão em substratos compósitos, visto que foi possível facilmente identificar os modos de rotura dos provetes. Foram comparadas as diferentes resistências ao arrancamento de cada adesivo ensaiado, em que quanto mais dúctil era o adesivo maior era a resistência ao arrancamento. Tal conclusão foi suportada pela análise da superfície de fratura realizada através de um microscópio eletrónico de varrimento.

2.4 Previsão de resistência de juntas adesivas

Com o passar dos anos, as juntas adesivas estão a ganhar notoriedade durante o processo de escolha do método de ligação em projetos devido às vantagens inerentes ao tipo de ligação e à evolução de metodologias de previsão de resistência de juntas adesivas.

Num passado recente, as juntas adesivas eram projetadas através das metodologias experimentais e de tentativa e erro devido à ausência de modelos de otimização, o que tornava o processo dispendioso e lento [47].

Atualmente, existem duas metodologias utilizadas para previsão das características de juntas adesivas, nomeadamente os métodos analíticos, que analisam as tensões em juntas adesivas por expressões de forma fechada, e os métodos numéricos (por exemplo método de elementos finitos (MEF)) [48]. O primeiro modelo analítico foi desenvolvido por Volkersen [49], cujo modelo considerava um comportamento elástico para o provete e uma deformação apenas em corte para o adesivo. Entretanto, quando o material deforma plasticamente, se for uma junta híbrida ou os aderentes forem feitos em compósitos, o método analítico torna-se mais complexo.

O MEF desenvolvido no trabalho realizado por Adams e Peppiatt [50] é o método mais utilizado para a caracterização das juntas adesivas. No trabalho desenvolvido por Harris e Adams [51], que aplicaram o MEF desenvolvido por Adams e Peppiatt [50], permitiu que fossem os primeiros a obter a análise da rotação da junta adesiva, da plasticidade dos aderentes e adesivo e a influência do filete de adesivo presente na junta adesiva.

A mecânica da fratura e a análise de MEF podem ser combinadas a fim de obter a previsão da resistência das juntas adesivas. Para tal, pode-se utilizar o fator da intensidade da tensão ou a *Virtual Crack Closure Technique* (VCCT). Porém, estas abordagens podem conduzir a um elevado custo computacional devido à necessidade de criar uma nova malha durante o processo de propagação da fenda [52].

A modelação por método de elementos finitos estendido (MEFE), criada recentemente, é um aperfeiçoamento do MEF para analisar o desenvolvimento de fendas em estruturas. O MEFE representa um campo de deslocamento descontínuo através de funções de forma enriquecidas [47].

2.4.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos utiliza modelos analíticos ou numéricos a fim de prever as propriedades das juntas adesivas. Inicialmente, os valores de tensão máxima de deformação ou energia de deformação são previamente encontrados através de MEF e, posteriormente, é feita a comparação com os valores admissíveis dos materiais, o que permite efetuar a estimativa da resistência da junta adesiva [48].

2.4.1.1 Modelos analíticos e MEF

A partir do modelo desenvolvido por Volkersen [49], diversos outros modelos analíticos foram desenvolvidos com o objetivo de prever a distribuição de tensão e deformação das juntas adesivas [47].

As modificações efetuadas nos modelos de forma fechada incluem fatores de plasticidade, efeitos térmicos, utilização de materiais compósitos e variação da tensão ao longo da espessura de adesivo [53, 54].

O estudo conduzido por Hart-Smith [55] indica os diversos métodos analíticos desenvolvidos para prever a resistência das juntas adesivas, que foram desenvolvidos em linguagem de programação Fortran e foram amplamente utilizado pela indústria aeroespacial.

Embora os modelos analíticos se tenham tornado mais complexos e eficientes, tais modelos foram substituídos pelo MEF, que considera a não linearidade dos aderentes ou da geometria da junta adesiva [47, 56].

O MEF é um método que permite obter uma solução aproximada em diversas áreas da engenharia, seja na área estrutural, mecânica dos fluidos ou transferência de calor [48]. Pela mecânica dos meios contínuos, é possível prever a resistência de juntas adesivas através da utilização de um critério de rotura, como por exemplo o critério da tensão normal máxima ou o critério da tensão de corte máxima [51].

O MEF permite estudar qualquer tipo de geometria, qualquer variação na forma dos substratos, espessura dos adesivos e presença de filetes. Tal análise é muito difícil ou impossível através da análise analítica [48]. Outro ponto importante do MEF é permitir a análise com ou sem pré-fenda inicial sob uma carga arbitrária.

As juntas adesivas são passíveis de ter tensões na extremidade da área de sobreposição, o que gera um aumento da tensão com o refinamento da malha do MEF, pelo não é possível obter uma convergência dos valores, tornando o método dependente do refinamento da malha [56].

2.4.1.2 Critérios de rotura

Os critérios de rotura utilizados na mecânica dos meios contínuos apresentam bons resultados e são relativamente simples [54]. Como no estudo de Volkersen [49] o adesivo apenas sofre deformação de corte, o critério de rotura utilizado é a tensão máxima ao corte. Já o estudo de Greenwood et al. [57], que utiliza o modelo de Goland e Reissner [58], indica que a tensão máxima ao corte ocorre a 45° ao longo da área de sobreposição. O estudo conduzido por Hart-Smith [55] indica que a deformação máxima ao corte pode ser utilizada como critério de rotura, contanto que haja uma deformação plástica. O estudo desenvolvido por da Silva et al. [54] analisa diversos critérios de rotura

para JSS em diferentes modelos analíticos. A Tabela 2 indica o resultado dos critérios de rotura analisados.

Embora os critérios de rotura aplicados aos modelos analíticos possam ser simples e fácil de obter bons resultados, estes podem vir a ser complexos em alguns casos, visto que não consideram possíveis descontinuidades do material ou concentração de tensões em entalhes [54].

Tabela 2 - Critérios de rotura analisados por da Silva et al. [54].

Modelos	Tipo de Análise	Critério de rotura
Volkersen [49]	Análise elástica	$\tau > \tau_r$
Goland e Reissner [58]	Análise elástica	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma_p > \sigma_r$
Hart-Smith [55]	Análise linear	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma_p > \sigma_r$
	Análise não linear	$\gamma_s > \gamma_p$ ou GY
Bigwood e Crocombe [59]	Análise linear	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma_p > \sigma_r$
	Análise não linear	$\varepsilon_e > \varepsilon_r$ ou GY
Frostig et al. [60]	Análise linear	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma_p > \sigma_r$
Adams e Mallick [61]	Análise linear	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma_p > \sigma_r$
	Análise não linear	$\varepsilon_e > \varepsilon_r$ ou GY
	Módulo efetivo	$e_e > e_r$
	Rotura transversal do compósito	$\sigma_{comp} > \sigma_{rcomp}$
Wang et al. [62]	Análise não linear total	$\varepsilon_e > \varepsilon_r$ ou GY
Adams et al. [63]	Aderente elástico e adesivo dúctil	GY
	Aderente elasto-plástico	Cedência do aderente

2.4.2 Mecânica da fratura

A mecânica da fratura interpreta que as estruturas podem ter fendas, que consistem nas imperfeições mais comuns numa estrutura. Tal ideia é contrária à aproximação da mecânica dos meios contínuos, que considera todos os elementos da estrutura como um meio contínuo [48]. A Figura 32 ilustra a descontinuidade de tensão numa fenda.

A previsão feita através deste método possibilita analisar as fendas e indicar se estas podem gerar uma rotura grave ou se elas propagam sem comprometer a segurança da estrutura [2].

O estudo realizado por Williams [64] concluiu que haverá singularidade de tensão quando o ângulo da imperfeição (fenda) for inferior a 180° . A análise resultante do estudo também pode ser utilizada para o estudo das juntas adesivas.

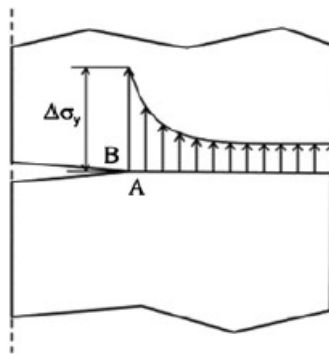


Figura 32 - Descontinuidade de tensão na ponta de uma fenda [48].

Diversos estudos dedicados à previsão da resistência de juntas adesivas consideram a taxa de liberação de energia de deformação (G_t) e a tenacidade à fratura G_c ao invés de fatores de intensidade de tensão, devido ao facto de tais fatores serem complexos de serem determinados quando a fenda se desenvolve na interface dos substratos ou perto deles. Contudo, dada a diferença de materiais (substrato e adesivo) e aos esforços aplicados na estrutura, verifica-se tipicamente fratura de modo misto em provetes de juntas adesiva. Para este tipo de fratura, utiliza-se o conceito de envelope de fratura, de modo que os critérios de rotura podem ser similares aos critérios clássicos de rotura [48].

2.4.3 Modelos de dano coesivo

Os modelos de dano coesivo permitem caracterizar o crescimento do dano na interface entre o adesivo e o aderente ou em regiões maciças de adesivo. Quando comparados com o MEF convencional torna-se mais eficaz e preciso para prever a resistência da junta adesiva, dado o facto de ser possível desenvolver diferentes leis coesivas para o modelo [48, 65].

O primeiro estudo sobre MDC foi elaborado por Barenblatt [66] e Dugdale [67], que determina o dano na zona de processo coesivo, sob cargas estáticas, permitindo caracterizar o crescimento da fenda ou começo.

Os MDC podem caracterizar facilmente juntas adesivas ou diversos materiais, pois são fundamentados pela ideia de ser possível incorporar interfaces de fratura fictícias, onde o crescimento do dano é causado pela descontinuidade no campo dos deslocamentos [48].

O método utilizado pelos MDC corresponde na aplicação de leis de tração-separação para modelar áreas finitas ou interfaces. Existem duas aproximações utilizadas para a modelação, sendo a primeira a aproximação local e a segunda a aproximação contínua [48]. A Figura 33 indica a aproximação local e a Figura 34 representa a aproximação contínua.

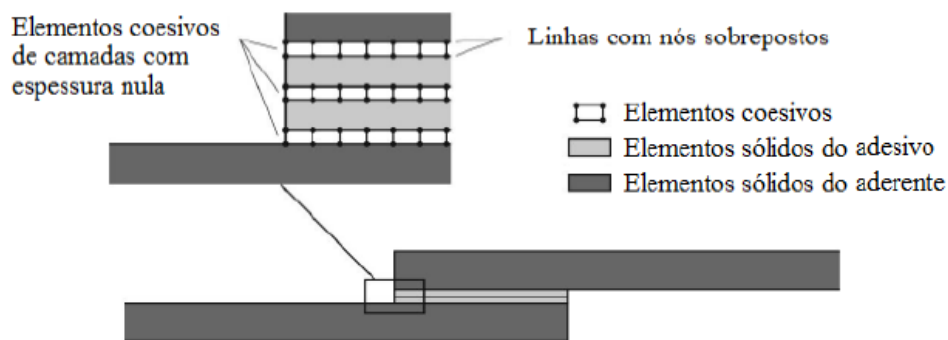


Figura 33 - Elementos coesivos que simulam uma espessura nula de material para a aproximação local [48].

Na aproximação local, indicada pela Figura 33, os elementos coesivos são utilizados para conectar os nós dos elementos sólidos para simular um plano de rotura de espessura nula. Assim, os elementos finitos simulam as dissipações plásticas, enquanto os elementos coesivos apenas simulam a propagação do dano [48].

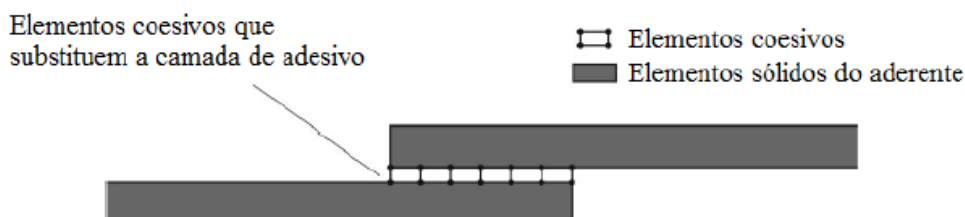


Figura 34 - Elementos coesivos que simulam uma espessura nula de material para a aproximação contínua [48].

Na aproximação contínua, conforme ilustra a Figura 34, as leis coesivas são aplicadas diretamente nos substratos, que não se encontram em contacto, para que seja possível simular a existência de um outro material, por exemplo o adesivo, de espessura definida

[48]. Esta aproximação, mesmo que simples, permite alcançar resultados satisfatórios e precisos, o que a torna muito utilizada para estudos de juntas adesivas [48].

Com o passar dos anos, foram desenvolvidas diversas leis coesivas com o objetivo de encontrar resultados precisos para prever a resistência das mais diversas juntas adesivas. As leis triangular, exponencial e trapezoidal são as leis mais utilizadas para este efeito [48, 68]. A Figura 35 ilustra as leis triangular e exponencial e a Figura 36 apresenta a lei trapezoidal, onde t_n^0 corresponde a resistência coesiva à tração, t_s^0 é a resistência coesiva ao corte, δ_n^0 é o deslocamento para a resistência coesiva à tração e δ_s^0 indica o deslocamento para a resistência coesiva ao corte.

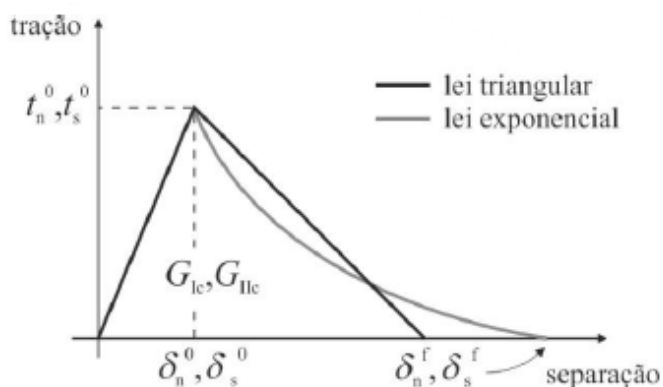


Figura 35 - Exemplo da lei triangular e lei exponencial encontradas na literatura [48].

A lei triangular, quando comparada com a lei exponencial, é mais utilizada devido à sua simplicidade, por ter poucas variáveis a serem definidas e, na maioria das condições reais, apresentar resultados precisos [69].

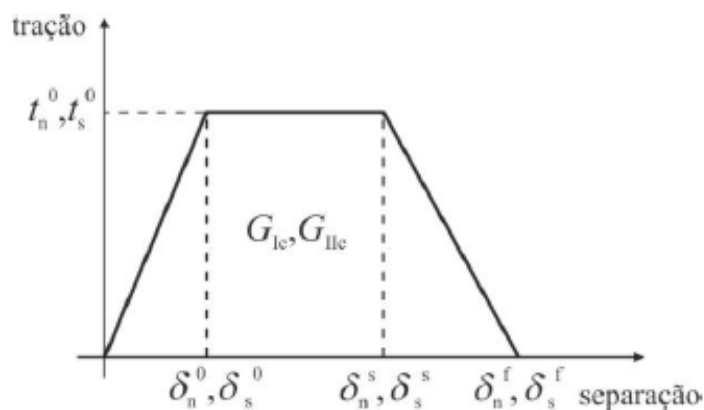


Figura 36 – Exemplo da lei trapezoidal encontrada na literatura [48].

A lei trapezoidal caracteriza satisfatoriamente o comportamento de adesivos dúcteis com uma fina camada, pelo que esta lei também é largamente empregue em estudos que visam prever de resistência de juntas adesivas.

2.4.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano define um parâmetro de dano de tal forma que, quando o material atingir o critério definido, haverá uma redução da rigidez ou resistência do material em relação a estrutura. Desta forma, consegue-se simular a evolução gradual do dano e fratura, com um a pré-fenda definida ou não, numa área finita de adesivo [70]. A utilização da mecânica do dano para previsão da resistência de estruturas híbridas foi somente usada há pouco tempo. Porém, esta técnica já está difundida em estudos de juntas adesivas [69].

Estes parâmetros podem ser classificados duas formas, conforme indica o estudo realizado por Voyiadjis e Kattan [71]:

- Variáveis que acrescentam dano pela redefinição das propriedades dos materiais, apesar de não estarem propriamente relacionadas com o mecanismo de dano;
- Variáveis relacionadas com a definição física de um gênero de dano específico.

A propagação da fenda através da mecânica do dano pode ocorrer de duas formas, de acordo com o carregamento aplicado ou em função do número de ciclos de fadiga.

Quando comparado com os MDC, a mecânica do dano é indicada nos casos onde o crescimento da fenda não é conhecido ou no caso de o dano ser generalizado, visto que através dos MDC o crescimento da fenda é restringido a um caminho pré-definido [72].

2.4.5 Método de elementos finitos estendido

O MEFE é baseado no MEF, e busca aperfeiçoar os resultados da propagação do dano numa estrutura através da utilização das leis de dano fundamentadas na resistência dos materiais e em deformações para a iniciação do crescimento do dano, ao contrário da utilização dos parâmetros t_n^0 , t_s^0 , δ_n^0 e δ_s^0 aplicados nos MDC. Como o MEFE não depende da criação de uma malha para definir o caminho de propagação de fenda, o método torna-se mais vantajoso quando comparado com os MDC. As fendas conseguem crescer de forma livre dentro do material, uma vez que a malha não necessita seguir a geometria das descontinuidades, ou ser refeita na zona da fenda enquanto esta se propaga [48].

O estudo realizado por Belytschko e Black [73] determina particularidades fundamentais do MEFE, o qual baseia no conceito de partição de unidade e na implementação em MEF através de funções de enriquecimento específico para os deslocamentos dos nós que estão próximos da fenda, possibilitando a propagação e separação dentre as faces da fenda.

O MEFE primeiramente pondera o comportamento linear elástico dos materiais, o qual corresponde a uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações de corte e normal. Os critérios de iniciação de dano utilizados no MEFE dependem das tensões ou deformações principais máximas, enquanto as leis de tração-separação podem ser linear ou exponencial [48, 74].

2.4.6 Estado da arte de modelação de juntas adesivas

Dado os diversos métodos encontrados na literatura para a previsão de resistência de juntas adesivas, é possível verificar a existência de diferentes abordagens. Na Tabela 3 são apresentados os estudos atuais e representativos relacionados com a modelação de juntas adesivas.

Tabela 3 - Estado da arte de modelação de juntas adesivas.

Referência bibliográfica	Descrição do trabalho
Marques et al. [75]	Este trabalho teve como objetivo simular o carregamento sobre um escudo térmico, utilizado na indústria aeroespacial, e prever a resistência da junta adesiva. Foi utilizada uma abordagem numérica a fim de prever a resistência da junta adesiva, baseada nos MDC com a mecânica da fratura. Os provetes foram fabricados com substratos de diferentes materiais. Para o aderente metálico foi utilizada uma liga de alumínio Al6063 T6, e cordierite como material cerâmico que resiste a altas temperaturas. Para união dos substratos foi utilizado o adesivo XN1244, rígido, frágil e resistente a altas temperaturas, e o adesivo RTV106, definido como dúctil e flexível. As propriedades do aderente cerâmico foram obtidas através de um método inverso. Foi possível concluir que houve uma boa relação entre os resultados numéricos e experimentais obtidos, o que indica que a abordagem pode ser utilizada para otimização e previsão das propriedades da junta adesiva.

Dionísio et al.
[76]

Este trabalho utiliza os princípios da mecânica da fratura para avaliar um novo método para caracterizar as singularidades de tensão em materiais compósitos, o *Intensity of Singular Stress Field* (ISSF). Foram analisadas juntas de sobreposição simples, cujos substratos foram fabricados do compósito polimérico reforçado com fibra de carbono e utilizado o adesivo Araldite® AV138 para fabricar provetes com diferentes comprimentos de sobreposição L_s . Foi concluído que o método utilizado para caracterizar a junta adesiva de materiais compósitos foi bem-sucedido. Porém, deve-se referir que os melhores resultados foram obtidos com os provetes com $L_s=20$ mm que tiveram um desvio máximo de 28,22%.

Katsivalis et al.
[77]

Este estudo refere-se ao desenvolvimento dos MDC para previsão do dano e fratura de juntas adesivas fabricadas com vidro/aço. Para os aderentes foram utilizados vidro recozido com um tratamento térmico para aumentar a resistência, e para o substrato metálico foi utilizado um aço macio com tensão de cedência de 400 MPa. Alguns provetes foram fabricados com o adesivo Araldite® 2020 e outros com o Araldite® 2047-1A. A lei coesiva triangular utilizada foi validada através da aplicação de quatro carregamentos. Foi possível observar que a metodologia dos MDC garante uma melhora na eficiência e tempo computacional e que pode ser utilizado para determinar as propriedades de interface de juntas adesivas que sofreram degradação de temperatura ou humidade.

Mubashar et al.
[78]

Neste trabalho foi estudada a modelação do dano e fratura de juntas adesivas utilizando uma metodologia combinada de MDC e MEFE. A fratura ao longo da área do filete foi modelada pelo MEFE, onde a progressão da fenda é desconhecida, e os MDC para modelar o crescimento do dano e da fenda ao longo da interface. Foram utilizados substratos feitos da liga de alumínio Al2024 T3 e unidos pelo adesivo epóxico FM73-M. A modelação foi feita através do *software* ABAQUS®. Inicialmente foi desenhada a geometria da JSS, seguidamente o elemento coesivo e MEFE foram definidos e por fim a modelação da JSS foi carregada para obter o dano e a fratura. Como resultado do estudo, foi possível provar que a metodologia híbrida utilizada é efetiva e precisa para modelar o dano e a fratura de juntas adesivas. Porém, a metodologia possui algumas limitações, como uma potencial descontinuidade da fenda quando é feita a transição entre MEFE para os MDC.

Chen et al. [79]

Neste estudo foi feita uma previsão do início e do crescimento do dano baseada na energia de deformação plástica através da mecânica do dano. Foi utilizada a geometria de JSS, de modo que os provetes foram fabricados com substratos de aço macio 2024TB e a liga de alumínio 2L73. Foi utilizado o adesivo Ciba-Geigy com endurecedores diferentes. A metodologia consiste em verificar, após ocorrer a convergência de um incremento de carga estabelecido, se a condição de rotura foi alcançada na estrutura. Caso a tenha ocorrido a condição de rotura em um elemento o ν e E são alterados para valores nulos. O resultado obtido indica que a técnica foi eficaz.

Hua et al. [80]

Este trabalho utiliza a mecânica do dano para caracterização das propriedades de juntas adesivas unidas com o adesivo Hysol EA932 sob a degradação ambiental. Foi utilizada liga de alumínio 7075-T6 para o fabrico dos substratos metálicos e IM7-8552 para os substratos compósitos. Para a modelação numérica, a degradação ambiental (variação da humidade) foi atingida através da utilização de um parâmetro de dano baseado no deslocamento na equação constitutiva dos materiais. A calibração do parâmetro foi feita por meio dos valores obtidos do ensaio à fratura em provetes à flexão em modo misto. Tal metodologia permitiu obter resultados independentes da malha. Como resultado obtido, é possível constatar que as previsões tiveram resultados satisfatórios quando comparadas com os resultados experimentais e a iniciação e propagação do dano também foram previstas corretamente.

DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

3.2 Trabalho numérico

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são abordados os ensaios experimentais e numéricos realizados, com respectivos pormenores, nomeadamente fabrico dos provetes utilizados no ensaio experimental e modelação da simulação aplicada no ensaio numérico, assim como o software escolhido.

3.1 Trabalho experimental

Este capítulo apresenta os detalhes necessários para o fabrico das juntas adesivas, realização do ensaio *floating roller peel* e análise pertinente dos resultados obtidos. A componente experimental utilizada neste trabalho foi realizada no trabalho de Pereira [81]. Assim, este trabalho concentra-se na parte numérica.

3.1.1 Geometria das juntas

Os provetes utilizados no ensaio *floating roller peel* são fabricados com dois aderentes, um deles rígido e o outro flexível, e unidos por um adesivo estrutural com uma espessura definida. Neste trabalho foram fabricados seis tipos de juntas adesivas com diferentes configurações e materiais de modo a analisar a resistência da junta adesiva com cada aderente.

A Figura 37 indica as dimensões gerais em mm e a geometria utilizada para os provetes.

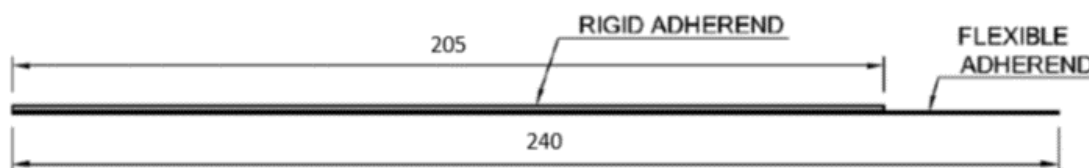


Figura 37 - Dimensões em mm dos provetes utilizados [81].

As dimensões e a nomenclatura utilizadas nos provetes do ensaio de arrancamento são indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Dimensões dos provetes utilizados no ensaio de arrancamento.

Nomenclatura	Valor (mm)
Comprimento total (L_t)	240
Comprimento de sobreposição (L_0)	205
Largura (b)	25
Espessura do adesivo (t_a)	0,2

3.1.2 Materiais utilizados

Este subcapítulo visa descrever os materiais que foram necessários para o fabrico das juntas adesivas utilizados no ensaio *floating roller peel*, nomeadamente os aderentes e adesivo, bem como as propriedades mecânicas.

3.1.2.1 Aderentes

Neste trabalho foram analisados dois materiais diferentes para o substrato da junta adesiva, nomeadamente uma liga de alumínio (AW 6082-T651) e o polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC), materiais que são amplamente utilizados em diversas aplicações industriais [82]. A Tabela 5 indica as principais propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651, de acordo com o fabricante [83].

Tabela 5 - Principais propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651 [83].

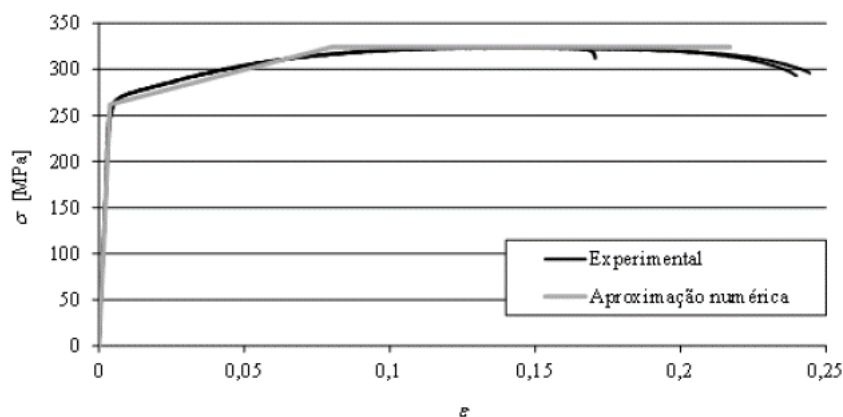
Tensão de rotura, σ_r [MPa]	Tensão de cedência, σ_y [MPa]	Alongamento mínimo, ε_m [%]	Dureza Brinell, HB	Modulo de elasticidade longitudinal, E [GPa]
350	305	11	105	70

Um estudo realizado por Campilho et al. [82] caracteriza a liga de alumínio AW 6082-T651 através de ensaio de tração, segundo a norma [84]. As propriedades mecânicas resultantes do ensaio são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do ensaio de tração da liga de alumínio AW 6082-T651 [82].

Tensão de rotura, σ_r [MPa]	Tensão de cedência, σ_y [MPa]	Deformação de rotura, ϵ_f [%]	Modulo de elasticidade longitudinal, E [GPa]
324±0,16	261,67±7,65	21,70±4,24	70,07±0,83

Através do ensaio realizado, também foi possível gerar o gráfico das curvas σ - ϵ dos três provetes, como ilustra a Figura 38.

Figura 38 - Gráfico σ - ϵ da liga de alumínio AW 6082-T651 [82].

Em cor cinza é possível observar a curva σ - ϵ para aproximar o comportamento dos materiais em análises de MEF.

O PRFC é um compósito muito utilizado no sector aeronáutico, devido à sua alta resistência mecânica e ótima relação entre resistência, rigidez e o peso [85]. O pré-impregnado unidirecional da Hexcel® foi utilizado para obter o compósito estudado, com matriz epóxida de resina HexPly® 8552 e reforço de fibra de carbono produzido por fibras HexTow® AS4. A Tabela 7 exhibe as propriedades mecânicas do PRFC utilizado, nomeadamente a tensão de cedência σ_y e o módulo de elasticidade E nas direções 0° e 90° das fibras com a direção longitudinal do provete, à temperatura ambiente.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas PRFC utilizado[86].

Tensão de cedência, σ_y [MPa]		Modulo de elasticidade, E [GPa]	
0°	90°	0°	90°
2207	81	141	10

3.1.2.2 Adesivo

O adesivo selecionado foi o Araldite® AV138, um adesivo estrutural composto por dois componentes, a resina AV138 e o endurecedor HV998. A mistura dos dois componentes é feita com uma proporção de 100 g de resina AV138 para 40 g de endurecedor HV998 com uma precisão de, aproximadamente, 5%. É indicada a utilização de uma espátula para o processo de mistura e aplicação do adesivo. Após a cura, o adesivo estrutural apresenta alta rigidez e resistência mecânica mesmo em ambientes agressivos ou submetido a elevadas temperaturas. As principais características deste adesivo são [87]:

- Elevada resistência química e baixa emissão de gases;
- Pasta tixotrópica, que permite excelente preenchimento e pouco escorrimento da mistura;
- Cura a temperatura acima de 5°C.

Campilho et al. [88] caracterizaram experimentalmente o adesivo Araldite® AV138 por ensaios de adesivos maciço que conduziu às curvas σ - ε apresentadas na Figura 39. A Tabela 8 apresenta as propriedades mecânicas do adesivo segundo o fabricante [87].

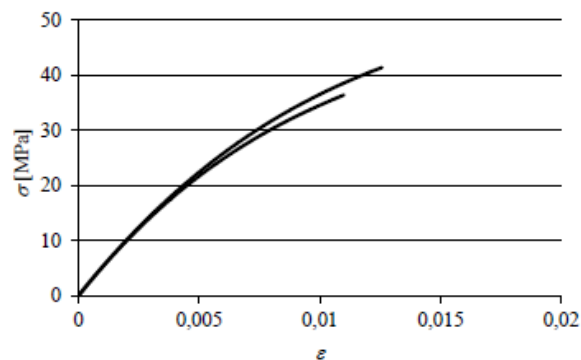


Figura 39 - Gráfico σ - ε de provetes maciços feitos de Araldite® AV138 [88].

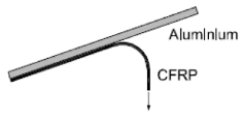
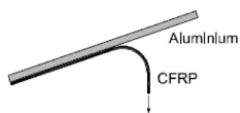
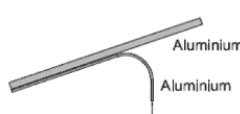
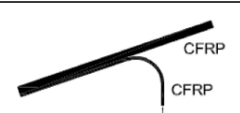


Tabela 8 - Propriedades mecânicas do adesivo estrutural Araldite® AV138 [87].

Propriedade	Valor
Resistência à tração [MPa]	40-45
Resistência ao corte por tração em JSS [MPa]	13
Modulo de elasticidade, E [GPa]	4,7
Deformação de rotura, ε [%]	1,2
Coeficiente de Poisson, ν	0,35

3.1.3 Ensaios experimentais

Foram utilizadas seis configurações diferentes de provetes fabricados com a liga de alumínio AW 6082-T651 e PRFC de forma que, para cada configuração, foram fabricados três provetes. Desta forma foram ensaiados dezoito provetes. A Tabela 9 indica as características de cada configuração e as respectivas nomenclaturas designadas.

Tabela 9 - Características das configurações dos provetes [81].

Nomenclatura	Aderente rígido	Aderente flexível	Representação
A-c-0	Alumínio $t_r=3$ mm	PRFC $t_f=0,3$ mm	
A-c-90	Alumínio $t_r=3$ mm	PRFC $t_f=0,3$ mm	
A-a	Alumínio $t_r=3$ mm	Alumínio $t_f=0,6$ mm	
C-c-0	PRFC $t_r=1,8$ mm	PRFC $t_f=0,3$ mm	
C-c-90	PRFC $t_r=1,8$ mm	PRFC $t_f=0,3$ mm	
C-a	PRFC $t_r=1,8$ mm	Alumínio $t_f=0,6$ mm	

Todas as juntas adesivas foram fabricadas com o adesivo estrutural indicado no capítulo anterior. A espessura do aderente rígido (t_r) e a espessura do aderente flexível (t_f) aplicadas para o PRFC foram de 1,8 mm e 0,3 mm, respectivamente. Para o alumínio foram considerados os valores de 3 mm para t_r e 0,6 mm para t_f .

3.1.3.1 Fabrico dos provetes

Para realizar a união dos provetes, primeiramente foi necessário fabricar o material compósito PRFC. Uma vez que é utilizado o PRFC como aderente rígido e flexível, foi necessário fabricar duas placas quadradas do compósito com 240 mm^2 , com espessuras diferentes. A Tabela 10 indica a configuração do empilhamento adotado para cada espessura.

Tabela 10 - Característica do empilhamento do PRFC.

Substrato	Número de camadas	Espessura (mm)	Empilhamento
Flexível a 0°	4	0,3	$[0/90]_s$
Flexível a 90°	4	0,3	$[90/0]_s$
Rígido	24	1,8	$[0_3/90/0_3/90/0_3/90]_s$

Inicialmente, foi feita a medição e o corte das placas do pré impregnado em quantidade suficiente para o fabrico dos aderentes rígidos e flexíveis. Consideram-se um total de 28 camadas, em que cada camada de pré-impregnado mede 0,075 mm de espessura. A Figura 40 indica o processo de medição e corte das camadas do material compósito.

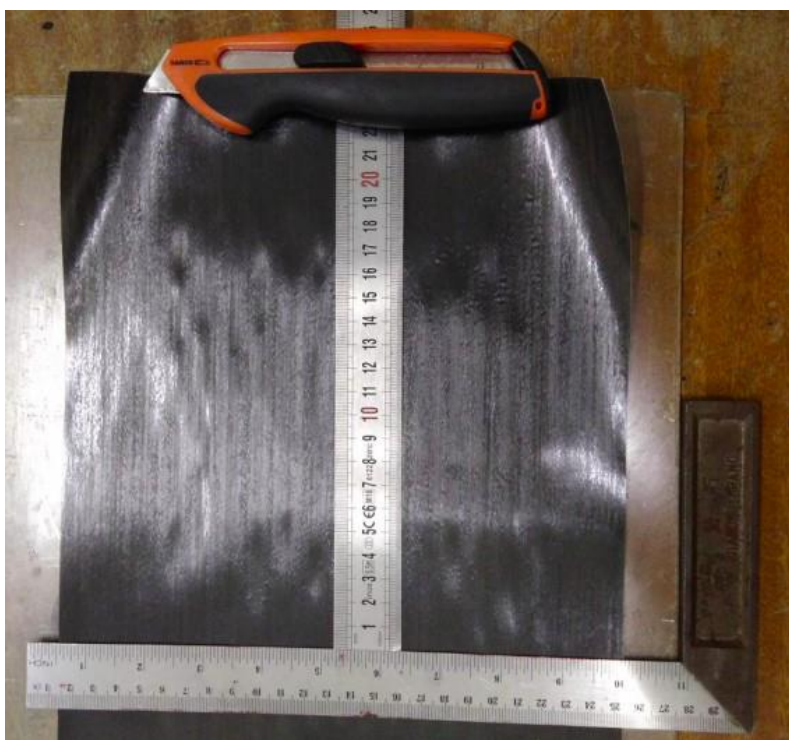


Figura 40 - Medição e corte das placas de PRFC [81]

Após o corte das placas, foi feito o empilhamento das camadas, conforme as características mencionadas na Tabela 10. Durante o processo de empilhamento, foi utilizado um soprador de ar quente para aquecer a camada adesiva existente no pré-impregnado, de forma a garantir uma boa adesão em todo o compósito. A camada adesiva é protegida por um plástico, como mostra a Figura 41.



Figura 41 - Proteção plástica do pré-impregnado [81].

Em cada camada unida, foi utilizada uma espátula para aplicar uma pressão uniforme ao longo do pré-impregnado, como indicado na Figura 42, a fim de garantir que não existem bolhas de ar entre as camadas e certificar a uniformidade da adesão em todas as camadas do pré-impregnado.



Figura 42 - Direção da pressão aplicada nas camadas de pré-impregnado [81].

Para o fabrico do laminado, foi utilizada uma prensa de pratos quentes, com a aplicação de um filme desmoldante entre os pratos quentes e o pré-impregnado. O filme desmoldante escolhido foi o Wrightlon® 5200, fabricado pela empresa Airtech Int. Co. E representado na Figura 43. O desmoldante resiste a temperaturas de até 260°C e permite que o laminado tenha um bom acabamento superficial.

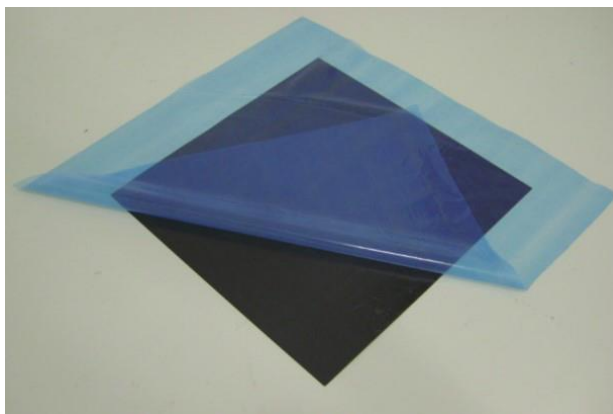


Figura 43 - Filme desmoldante utilizado [81].

Com o filme desmoldante devidamente posicionado, foi iniciado o processo de cura como indicado pelo fabricante do compósito [86]. Foram feitos dois ciclos de temperatura. No primeiro ciclo foi aplicada uma temperatura de 110°C e no segundo ciclo uma temperatura de 180°C. Para ambos os ciclos, foi aplicada uma pressão de 7 bar durante o processo.

Com o laminado fabricado, foi realizado o corte dos provetes conforme as dimensões indicadas previamente na Tabela 4 e Tabela 9. O corte do compósito PRFC foi feito nas direções 0° e 90° conforme indicado na norma ASTM D3167 [34]. A Figura 44 mostra o laminado após o corte.



Figura 44 - Geometria do laminado PRFC após o corte [81].

Antes da aplicação do adesivo, foi feita a preparação superficial dos aderentes através da lixagem, processo passivo mecânico que aumenta a rugosidade da superfície e remove a camada de óxido dos aderentes para garantir que a adesão entre o substrato e o adesivo seja adequada. Para o alumínio, foi escolhida uma lixa número 60. Porém para o laminado PRFC foi escolhida uma lixa número 360, pois as fibras do compósito não podiam ser afetadas durante o processo de preparação superficial. A Figura 45 mostra o compósito laminado logo após o processo.



Figura 45 - Resultado do processo de preparação superficial do compósito laminado [81].

Ao fim do processo de tratamento superficial, é necessário que seja efetuada a limpeza dos aderentes, antes da aplicação do adesivo, para remover toda a sujeira, óleos e lubrificantes da superfície. Para esta etapa foi aplicada acetona, manualmente, nos aderentes. A Figura 46 ilustra o aderente metálico após o processo de lixagem e limpeza.



Figura 46 - Superfície do aderente metálico após a lixagem e limpeza [81].

Com a superfície dos aderentes preparada, foi iniciado o processo de aplicação do adesivo. Para garantir que a espessura de 0,2 mm fosse uniforme ao longo de todo o provete, foram aplicados apoios de aço inoxidável nas extremidades dos aderentes, como mostra a Figura 47.

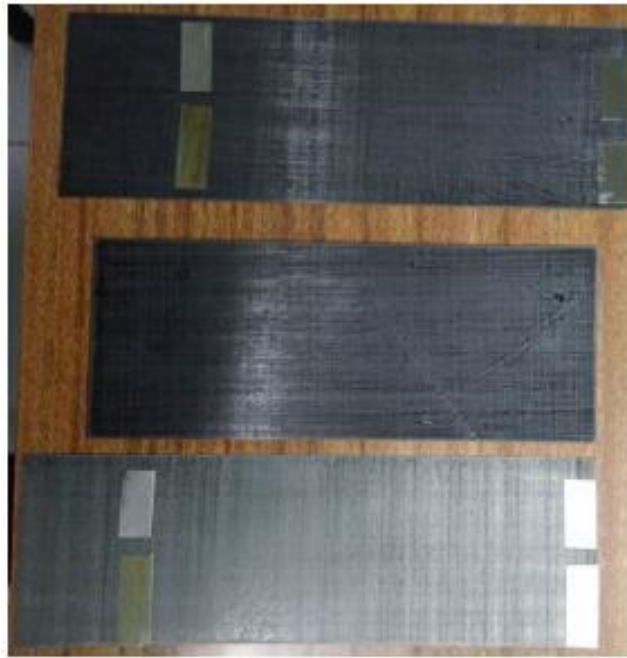


Figura 47 - Apoios de aço inoxidável utilizados nos aderentes [81].

Após o posicionamento dos apoios, foi feita a mistura manual do adesivo estrutural Araldite® AV138 com o respectivo endurecedor HV998 na razão anteriormente referida. Logo que a mistura foi totalmente homogeneizada, foi efetuada a sua aplicação com uma espátula. O resultado pode ser visualizado na Figura 48.



Figura 48 - Adesivo estrutural Araldite® AV138 aplicado no aderente [81].

O processo de cura foi feito à temperatura ambiente e levou sete dias para ser concluído. Após a cura do provete, foi feita a remoção cuidadosa dos excessos de adesivo ao longo das extremidades da geometria da junta adesiva. A Figura 49 ilustra os provetes durante o processo de remoção.

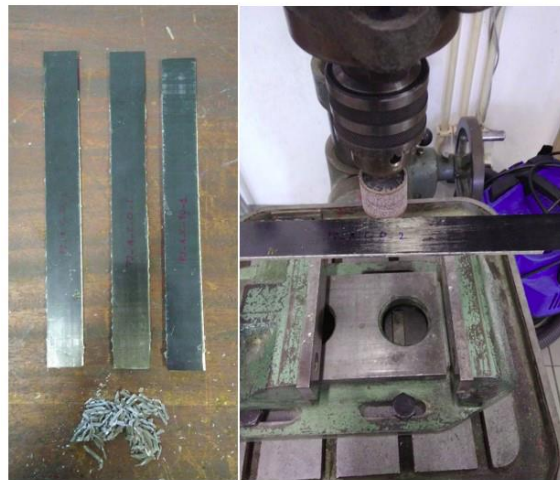


Figura 49 - Excessos a serem removidos das extremidades do provete [81].

3.1.3.2 Método e ferramenta de ensaio

O ensaio *floating roller peel* foi realizado na máquina Shimadzu AG-1 equipada com uma célula de carga de 10 kN. O ensaio realizado após a instalação da peça própria para ensaios de arrancamento, conforme referido anteriormente no subcapítulo 2.3.3. A Figura 50 indica a configuração inicial do provete na máquina Shimadzu AG-1, antes de começar o ensaio.



Figura 50 - Configuração inicial do provete para o ensaio de arrancamento.

Os ensaios foram executados a uma velocidade de 125 mm/min, à temperatura ambiente e com fim somente após rotura total do adesivo. Foram tomadas todas as medidas de precaução para garantir o correto posicionamento dos provetes na peça de

fixação própria para o ensaio *floating roller peel*. A Figura 51 ilustra a configuração final do provete após a realização do ensaio de arrancamento.



Figura 51 - Configuração final do provete ao fim do ensaio *floating roller peel* [81].

3.1.4 Resultados

Neste subcapítulo são abordados os resultados obtidos dos ensaios experimentais realizados por Pereira [81], indicando os modos de rotura de cada provete ensaiado, as curvas $P/b-\delta$ e por fim a análise comparativa dos resultados experimentais.

Ao fim do ensaio de arrancamento, foram registados todos os dados indicados pela norma ASTM D3167 [34], dentro do intervalo de propagação definido. Foram rejeitados os dados dos deslocamentos obtidos até os primeiros 25,4 mm e analisados os deslocamentos até 105 mm de propagação.

3.1.4.1 Modos de rotura e Curvas

Para determinar o modo de rotura predominante em cada ensaio realizado, foi utilizado o programa de imagem Measure, que indica a percentagem de cada modo de rotura ocorrido no provete.

A curva $P/b-\delta$ foi definida pelo gráfico da resistência de arrancamento (P/b) em função do deslocamento das amarras (δ). Para o cálculo de P/b foi considerada a média dos resultados da força de arrancamento (P) por unidade de largura dentro do intervalo de medição de deslocamento entre 25,4 e 105 mm.

3.1.4.1.1 Provete A-a

O modo de rotura preponderante nos três provetes ensaiados foi a rotura coesiva, como pode ser observado na Figura 52.

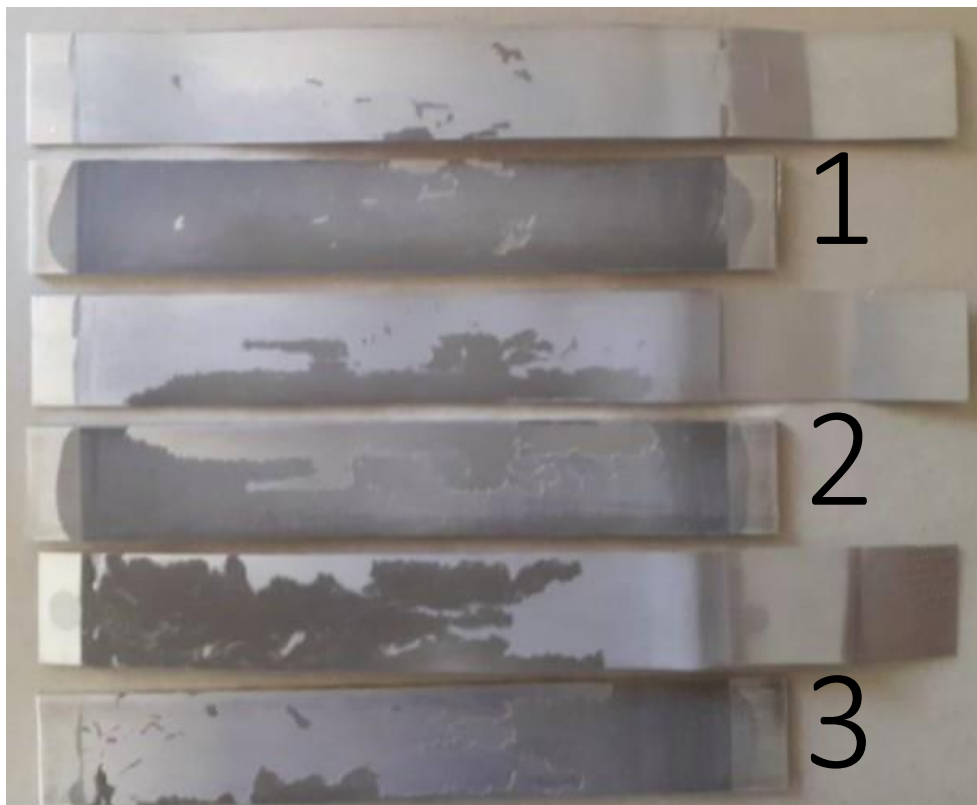


Figura 52 - Modos de rotura do provete A-a [81].

É possível verificar a presença do adesivo em ambos os substratos, o que indica uma boa adesão do adesivo nos aderentes. A Tabela 11 indica o resultado obtido pelo *software* Meazure, em que é corroborada a predominância da rotura coesiva, embora também indique a presença de rotura adesiva em alguns pontos dos aderentes.

Tabela 11 - Modo de rotura predominante nos provetes A-a [81].

Configuração	Coesiva (%)	Adesiva (%)	Interlaminar (%)
A-a-1	81	19	--
A-a-2	63	37	--
A-a-3	65	35	--
Média	70	30	--

Através da análise das curvas $P/b-\delta$ dos três provetes para a configuração A-a (Figura 53) é possível notar um padrão comum entre os provetes analisados até 93 mm.

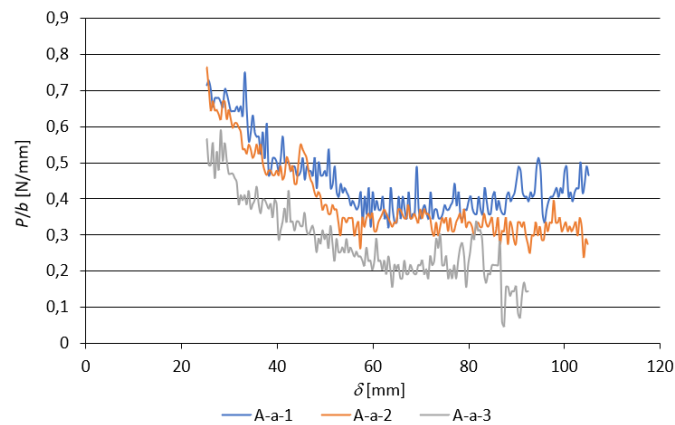


Figura 53 - Curvas $P/b-\delta$ dos provetes A-a [81].

Após 93 mm apenas os dois primeiros provetes são ensaiados até 105 mm, devido ao facto de o provete 3 ter sofrido uma rotura prematura em 93 mm. Observa-se que as curvas $P/b-\delta$ possuem uma tendência decrescente, em que tal comportamento pode estar relacionado com a presença de rotura adesiva e o facto das roturas coesivas terem ocorrido muito próximas de somente um aderente. A Tabela 12 resume os resultados obtidos para os provetes A-a, em que é possível quantificar e verificar a semelhança dos resultados obtidos entre os provetes analisados. O provete 3 teve o menor valor de $P_{\text{médio}}$, devido à rotura anormal mencionada.

Tabela 12 - Resultados obtidos do ensaio de arrancamento para os provetes A-a [81].

Parâmetro	A-a-1	A-a-2	A-a-3
$P_{\text{médio}}$ (N)	11,8	10,3	7,35
$P_{\text{máximo}}$ (N)	19,7	20	15,3
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	8,44	6,25	1,25
P/b (N/mm)	0,451	0,393	0,283
$P/b_{\text{médio}}$ (N/mm)		0,375	
Desvio padrão		0,04	
Coef. de variação (%)		10,7	

3.1.4.1.2 Provete A-c-0

O modo de rotura preponderante nos três provetes ensaiados foi a rotura coesiva, como pode ser observado na Figura 54.

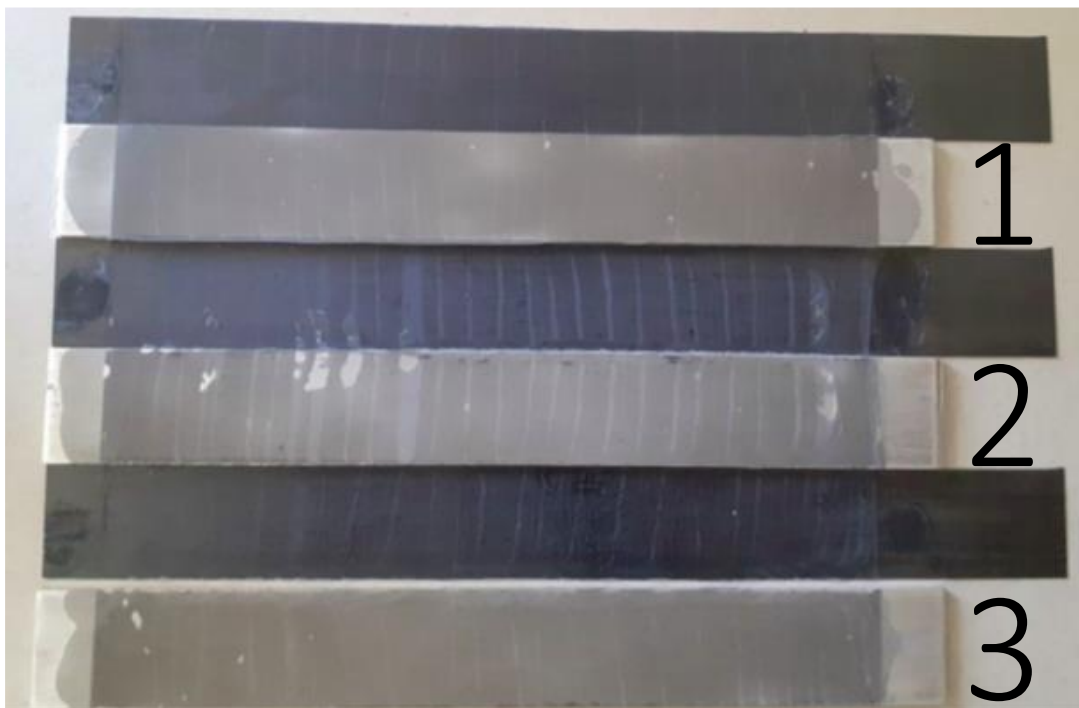


Figura 54 - Modos de rotura dos provetes A-c-0 [81].

Assim como nos provetes A-a, devido à rotura coesiva, é possível verificar que há presença de adesivo em ambos os substratos, o que indica a boa adesão do adesivo, mesmo com substratos fabricados com materiais diferentes. O resultado da análise através do *software* Meazure (Tabela 13) também indica que o modo de rotura que prevaleceu foi a rotura coesiva.

Tabela 13 - Modo de rotura predominante nos provetes A-c-0 [81].

Configuração	Coesiva (%)	Adesiva (%)	Interlaminar (%)
A-c-0-1	100	--	--
A-c-0-2	98	2	--
A-c-0-3	100	--	--
Média	99	1	--

Através da análise das curvas $P/b-\delta$ dos três provetes para a configuração A-c-0 (Figura 55) é possível notar que existe um padrão comum entre os provetes analisados durante a totalidade do ensaio.

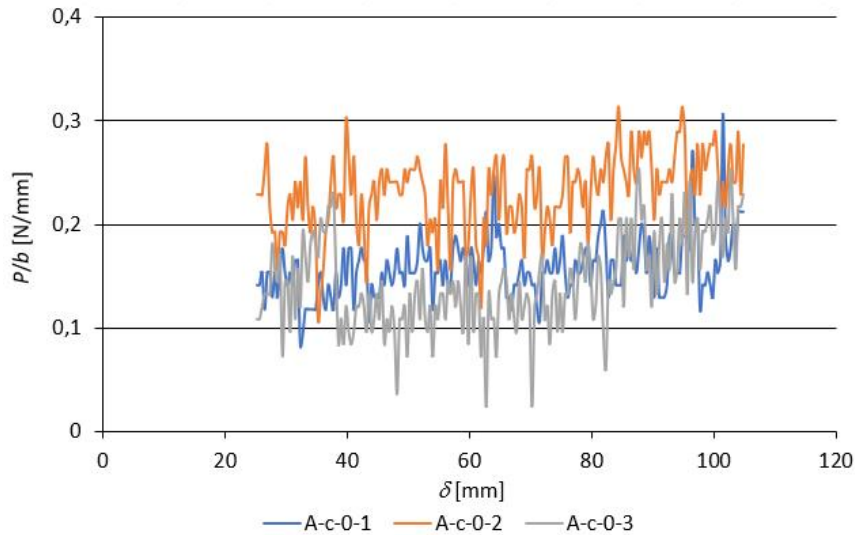


Figura 55 - Curvas $P/b-\delta$ dos provetes A-c-0 [81].

Com os resultados obtidos do ensaio *floating roller peel* para o provete A-c-0 (Tabela 14) observa-se que os resultados de P são bem semelhantes entre os provetes ensaiados, o que resulta da semelhança das curvas $P/b-\delta$.

Tabela 14 - Resultados obtidos do ensaio de arrancamento para os provetes A-c-0 [81].

Parâmetro	A-c-0-1	A-c-0-2	A-c-0-3
$P_{\text{médio}}$ (N)	4,2	6,01	3,74
$P_{\text{máximo}}$ (N)	8,13	8,13	6,56
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	2,19	2,81	0,625
P/b (N/mm)	0,158	0,232	0,144
$P/b_{\text{médio}}$ (N/mm)		0,178	
Desvio padrão		0,022	
Coef. de variação (%)		12,5	

3.1.4.1.3 Provetes A-c-90

O modo de rotura preponderante nos dois primeiros provetes ensaiados foi a rotura interlaminar, o que indica que houve uma delaminação na segunda camada do substrato flexível. Porém, para o provete três houve uma rotura coesiva como indica a Figura 56.

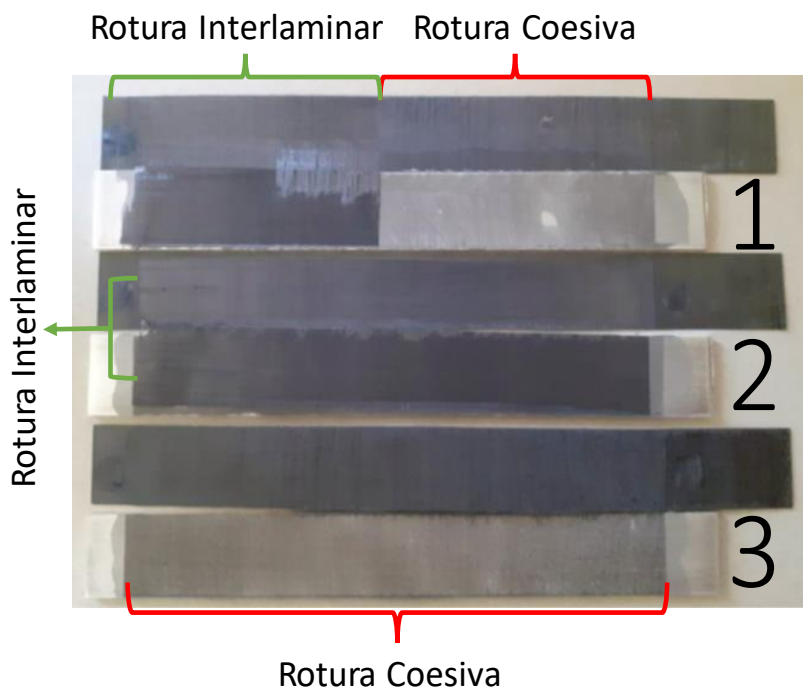


Figura 56 - Modo de rotura dos provetes A-c-90 [81].

A rotura interlaminar que ocorreu nos provetes 1 e 2 indica que a resistência da ligação entre o adesivo e o aderente foi maior do que a adesão entre as camadas do compósito utilizado. No provete 3 verifica-se que a resistência da ligação entre as camadas do compósito foi superior à resistência da ligação do adesivo com os aderentes, e corresponde a rotura coesiva do adesivo. A Tabela 15 resume o resultado obtido através do *software* Measure e corrobora as constatações visuais realizadas.

Tabela 15 - Modo de rotura predominante nos provetes A-c-90 [81].

Configuração	Coesiva (%)	Adesiva (%)	Interlaminar (%)
A-c-90-1	53	--	47
A-c-90-2	-	-	100
A-c-90-3	100	--	--
Média	51	--	49

Através da análise das curvas $P/b-\delta$ dos três provetes para a configuração A-c-90 (Figura 57) nota-se que há um pico elevado no fim do ensaio do provete 1, referente à transição entre o modo de rotura coesivo para o modo de rotura interlaminar.

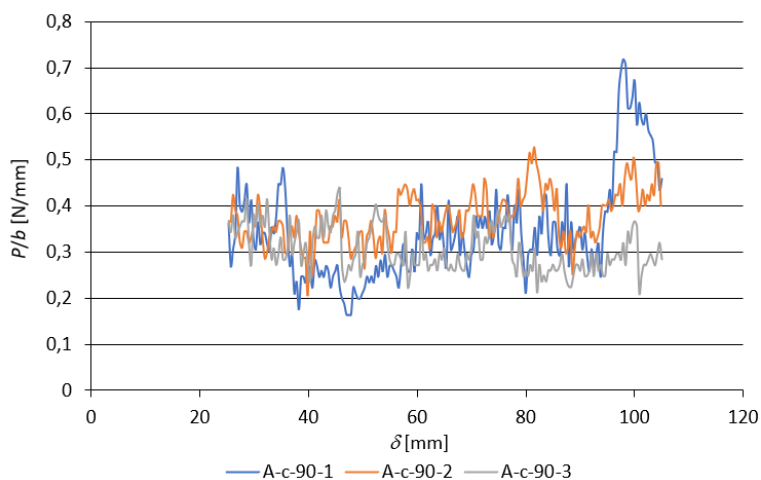


Figura 57 - Curvas $P/b-\delta$ dos provetes A-c-90 [81].

Ao efetuar o tratamento dos dados, foi considerado o valor elevado de P/b do provete 1, visto que este não apresentava muita variação nos resultados de $P/b_{\text{médio}}$ e tal pico registado estava dentro do intervalo estabelecido para o registo dos resultados obtidos para o ensaio *floating roller peel*. A Tabela 16 resume os resultados obtidos para os provetes A-c-90, em que é possível quantificar e verificar a semelhança dos resultados.

Tabela 16 - Resultados obtidos do ensaio de arrancamento para os provetes A-c-90 [81].

Parâmetro	A-c-90-1	A-c-90-2	A-c-90-3
$P_{\text{médio}}$ (N)	9,13	10,2	8,03
$P_{\text{máximo}}$ (N)	19,1	14,4	11,6
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	4,38	5,63	5,63
P/b (N/mm)	0,344	0,373	0,305
$P/b_{\text{médio}}$ (N/mm)		0,341	
Desvio padrão		0,016	
Coef. de variação (%)		4,78	

3.1.4.1.4 Provete C-c-0

O modo de rotura preponderante nos três provetes ensaiados foi a rotura coesiva, como pode ser observado na Figura 58.

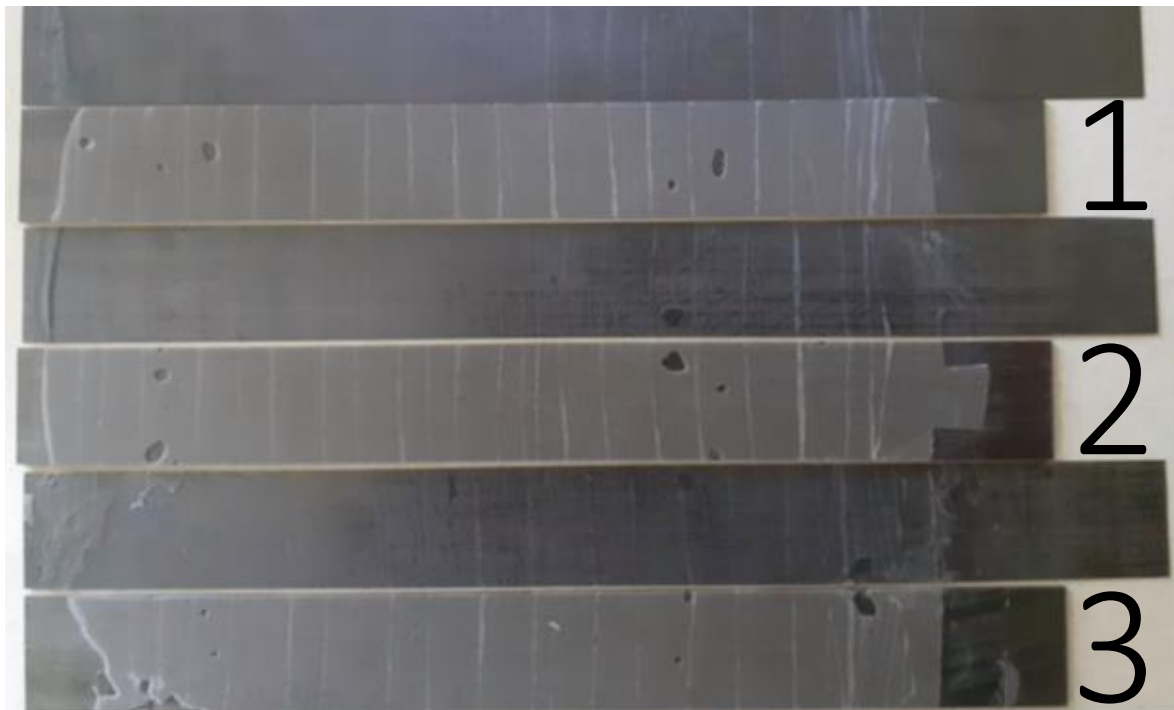


Figura 58 - Modo de rotura dos provetes C-c-0 [81].

Assim como nos provetes com configuração A-c-0, dada a rotura coesiva, é possível verificar que há presença de adesivo em ambos os aderentes, o que indica a boa adesão do adesivo com os substratos. O resultado da análise através do *software* Measure (Tabela 17) confirma a análise visual previamente realizada.

Tabela 17 - Modo de rotura predominante nos provetes C-c-0 [81].

Configuração	Coesiva (%)	Adesiva (%)	Interlaminar (%)
C-c-0-1	99	1	--
C-c-0-2	99	1	--
C-c-0-3	94	6	--
Média	97	3	--

A Figura 59 indica as curvas $P/b-\delta$ dos três provetes para a configuração C-c-0.

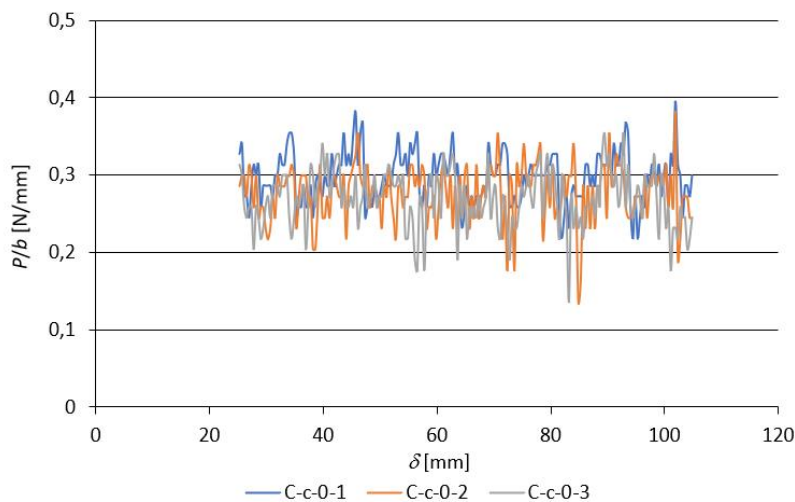


Figura 59 - Curvas $P/b-\delta$ dos provetes C-c-0 [81].

Através da análise das curvas $P/b-\delta$ é possível notar que existe um padrão comum entre os provetes analisados durante a totalidade do ensaio. A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos para o provete C-c-0. Observa-se que os resultados de P são semelhantes entre os provetes ensaiados.

Tabela 18 - Resultados obtidos do ensaio de arrancamento para os provetes C-c-0 [81].

Parâmetro	C-c-0-1	C-c-0-2	C-c-0-3
$P_{\text{médio}}$ (N)	6,81	6,36	6,17
$P_{\text{máximo}}$ (N)	9,06	8,75	8,13
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	5,00	3,13	3,13
P/b (N/mm)	0,297	0,277	0,269
$P/b_{\text{médio}}$ (N/mm)		0,281	
Desvio padrão		0,007	
Coef. de variação (%)		2,47	

3.1.4.1.5 Provete C-c-90

O modo de rotura preponderante nos três provetes ensaiados foi a rotura interlaminar, como pode ser observado na Figura 60.

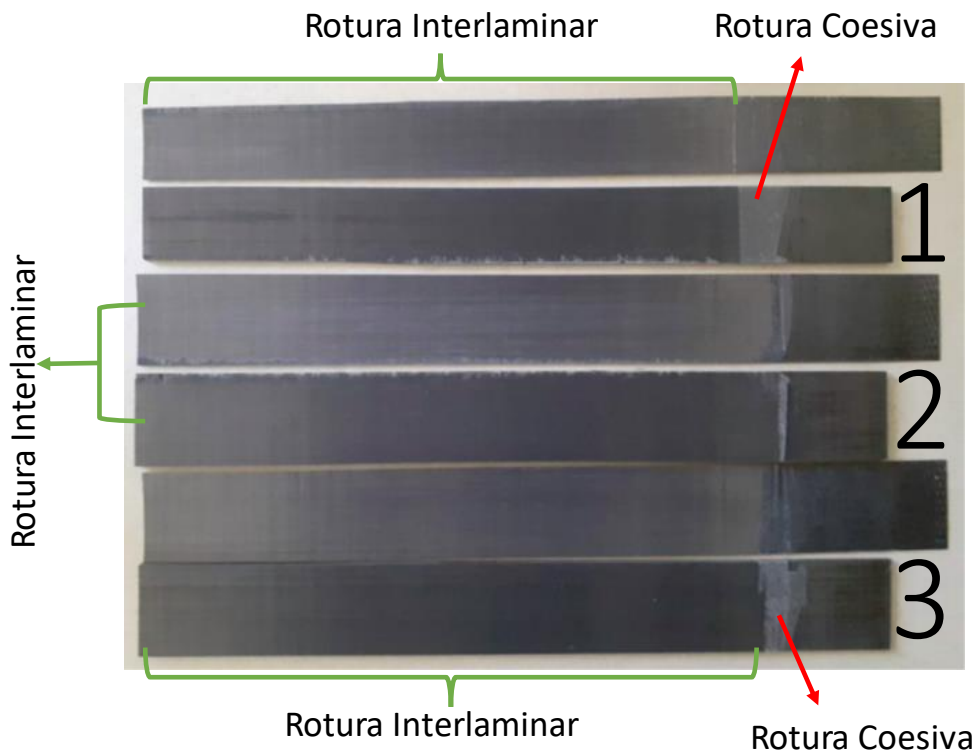


Figura 60 - Modo de rotura dos provetes C-c-90 [81].

Assim como nos provetes 1 e 2 de configuração A-c-90, os três provetes de configuração C-c-90 também sofreram rotura interlaminar, indicando uma delaminação nas camadas do compósito devido à resistência da ligação entre o adesivo e o aderente ser maior do que a resistência entre as camadas do compósito. A Tabela 19 indica os resultados da análise obtida através do programa Meazure.

Tabela 19 - Modo de rotura predominante nos provetes C-c-90 [81].

Configuração	Coesiva (%)	Adesiva (%)	Interlaminar (%)
C-c-90-1	8	--	92
C-c-90-2	--	--	100
C-c-90-3	4	--	96
Média	4	--	96

A Figura 61 indica as curvas $P/b-\delta$ dos três provetes para a configuração C-c-90.

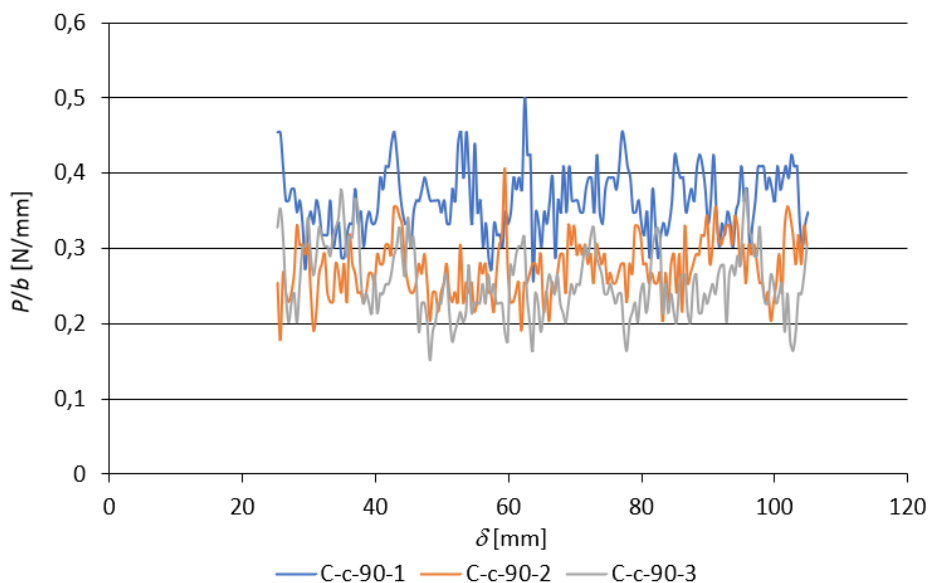


Figura 61 - Curvas $P/b-\delta$ dos provetes C-c-90 [81].

Através da análise das curvas $P/b-\delta$ nota-se que existe um padrão comum entre os provetes analisados ao longo de todo o deslocamento, porém o provete 1 apresenta resultados de P/b mais elevados comparativamente aos provetes 2 e 3. Para os provetes C-c-90 (Tabela 20) observa-se que os resultados de P são semelhantes entre os provetes ensaiados.

Tabela 20 - Resultados obtidos do ensaio de arrancamento para os provetes C-c-90 [81].

Parâmetro	C-c-90-1	C-c-90-2	C-c-90-3
$P_{\text{médio}}$ (N)	7,49	6,72	6,31
$P_{\text{máximo}}$ (N)	10,3	10	9,38
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	5,31	4,38	3,75
P/b (N/mm)	0,363	0,273	0,255
$P/b_{\text{médio}}$ (N/mm)		0,297	
Desvio padrão		0,027	
Coef. de variação (%)		9,22	

3.1.4.1.6 Provete C-a

O modo de rotura preponderante nos três provetes ensaiados foi a rotura coesiva, como pode ser observado na Figura 62.

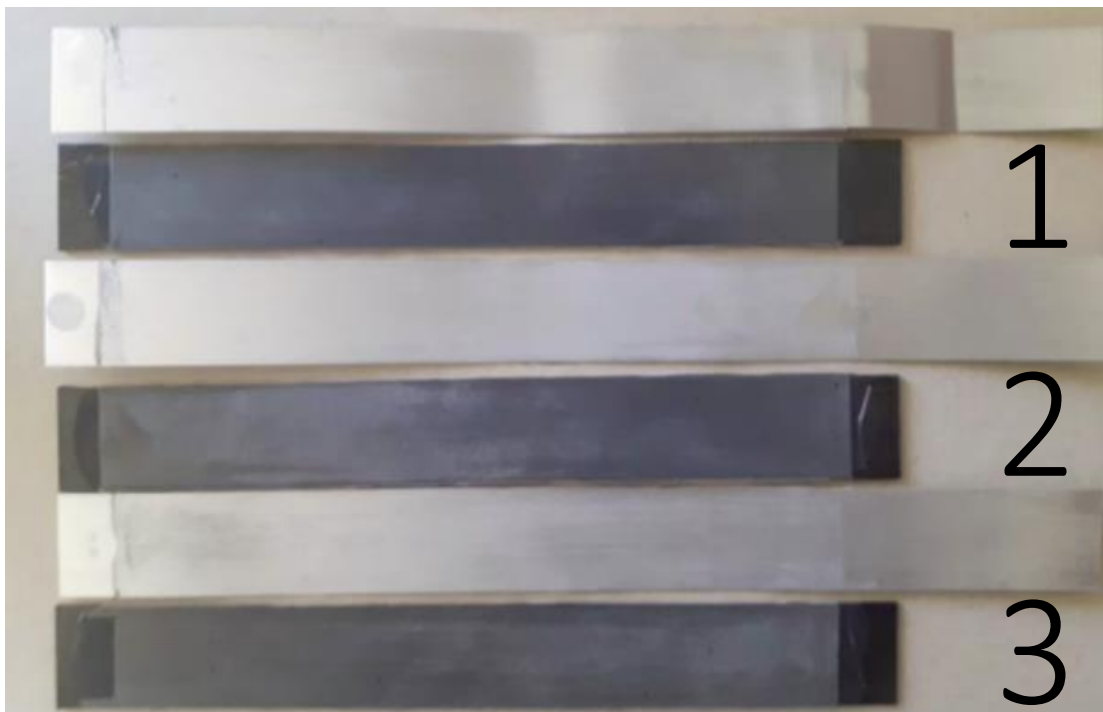


Figura 62 - Modo de rotura dos provetes C-a [81].

Embora visualmente os provetes aparentem uma rotura adesiva, com um microscópio ótico foi possível constatar que houve rotura coesiva. A análise através do programa Measure (Tabela 21) também confirma tal conclusão.

Tabela 21 - Modo de rotura predominante nos provetes C-a [81].

Configuração	Coesiva (%)	Adesiva (%)	Interlaminar (%)
C-a-1	100	--	--
C-a-2	100	--	--
C-a-3	100	--	--
Média	100	--	--

A Figura 63 indica as curvas $P/b-\delta$ dos três provetes para a configuração C-a.

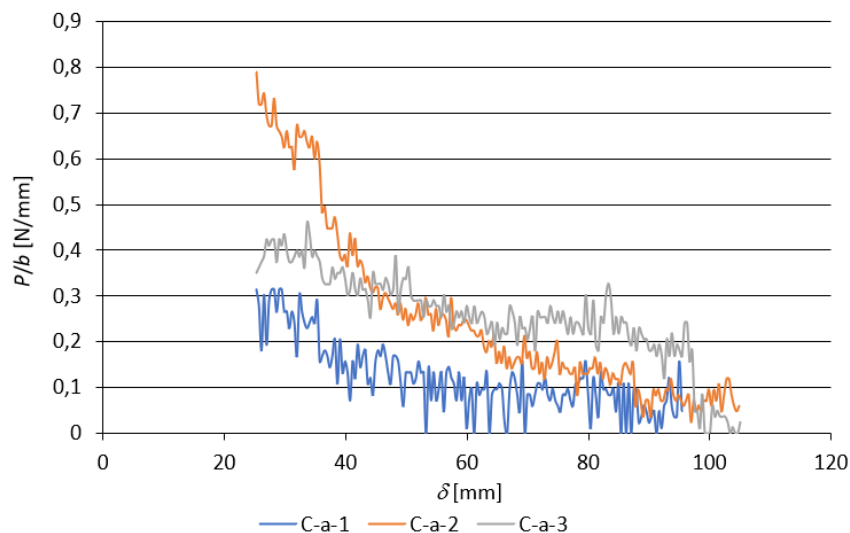


Figura 63 - Curvas $P/b-\delta$ dos provetes C-a [81].

Através da análise das curvas $P/b-\delta$ é possível notar que o provete 1 foi ensaiado somente até os 96mm de deslocamento devido a uma ruptura anormal que ocorreu. Também se verifica um pico nos resultados iniciais de P/b para o provete 2. Tais oscilações podem estar relacionadas com a natureza frágil do adesivo Araldite® AV138. Também é possível observar que as curvas $P/b-\delta$ possuem uma tendência decrescente, em que tal comportamento pode estar relacionado com o facto da ruptura coesiva ter ocorrido muito próxima da interface do aderente flexível, sendo quase confundível com uma ruptura adesiva.

Com os resultados obtidos para os provetes C-a (Tabela 22), nota-se que houve uma variação de quase 17% de P , que pode ter ocorrido devido o facto de o provete 2 ter registado no início do ensaio, entre 25,4 mm a 40 mm de δ , valores mais elevados de P/b , comparativamente aos provetes 2 e 3. Outro fator que pode ter contribuído para tal variação é o provete 1 ter sofrido a ruptura anormal ao fim do ensaio, com 96 mm de deslocamento.

Embora durante o ensaio tenham sido registados valores negativos de P , para o cálculo de $P_{\text{mínimo}}$ não foram considerados valores negativos. Portanto, foram considerados nulos os valores de $P_{\text{mínimo}}$ para os provetes 1 e 3.

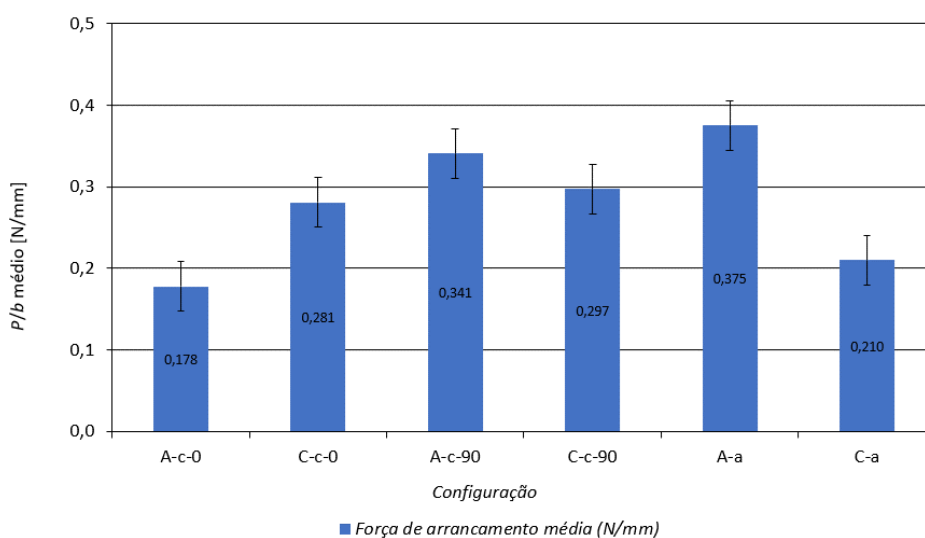
Tabela 22 - Resultados obtidos do ensaio de arrancamento para os provetes C-a [81].

Parâmetro	C-a-1	C-a-2	C-a-3
$P_{\text{médio}}$ (N)	3,18	6,73	6,58
$P_{\text{máximo}}$ (N)	8,13	20,9	11,9
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	0	0,625	0
P/b (N/mm)	0,123	0,254	0,255
$P/b_{\text{médio}}$ (N/mm)		0,210	
Desvio padrão		0,036	
Coef. de variação (%)		16,9	

3.1.4.2 Análise comparativa

De forma a comparar melhor os resultados obtidos para cada configuração ensaiada, a Figura 64 apresenta um gráfico com os valores de $P/b_{\text{médio}}$ de todos os provetes submetidos ao ensaio de arrancamento, e os desvios padrão correspondentes.

Pode-se observar pelo gráfico que os valores de $P/b_{\text{médio}}$ para as configurações A-c-0 e C-a são os menores valores obtidos 0,178 N/mm e 0,210 N/mm, respetivamente, enquanto a configuração A-a teve 0,375 N/mm, o maior valor para $P/b_{\text{médio}}$.

Figura 64 - $P/b_{\text{médio}}$ e respetivos desvios padrão dos provetes em todas as configurações ensaiadas [81].

Ao comparar os provetes de configuração A-c-90 com C-c-90 e A-a com C-a, observa-se que as juntas adesivas que possuem o aderente rígido fabricado em alumínio obtiveram um resultado superior para $P/b_{\text{médio}}$. Este resultado é esperado devido às juntas adesivas fabricadas somente PRFC apresentarem resistência ao arrancamento inferior quando utilizados adesivos frágeis para adesão. Porém, o mesmo padrão não ocorre ao comparar os provetes A-c-0 com C-c-0, devido ao facto de ambas juntas adesivas terem apresentado pontos com rotura adesiva.

A Tabela 23 apresenta a comparação dos resultados obtidos para $P/b_{\text{médio}}$, desvios padrão e coeficiente de variação para cada configuração dos provetes ensaiados.

Tabela 23 - Resultados obtidos para $P/b_{\text{médio}}$, desvios padrão e coeficiente de variação para cada configuração dos provetes analisados [81].

	$P/b_{\text{médio}}$ (N/mm)	Desvio padrão	Coef. de variação (%)
A-c-0	0,178	0,022	12,5
A-c-90	0,341	0,016	4,8
A-a	0,375	0,040	10,7
C-c-0	0,281	0,007	2,5
C-c-90	0,297	0,027	9,2
C-a	0,210	0,036	16,9

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 23, nota-se que a menor variação dos resultados obtidos teve lugar na configuração dos provetes C-c-0, com apenas 2,5% de variação, o que pode ser justificado pela semelhança do modo de rotura obtido nos provetes e os valores similares para P/b . Entretanto, os provetes de configuração C-a, obtiveram a variação mais elevada, com 16,9%, o que pode estar relacionado com a rotura anormal que ocorreu com o provete 1 e com os valores muito elevados de P/b para os primeiros 40 mm registados, visto que os três provetes ensaiados tiveram uma rotura coesiva.

A Tabela 24 resume os resultados obtidos para os modos de rotura das configurações dos provetes analisados.

Tabela 24 - Resultado obtido para os modos de rotura presente nas configurações dos provetes [81].

	Coesiva (%)	Adesiva (%)	Interlaminar (%)
A-c-0	99	1	--
A-c-90	51	--	49
A-a	70	30	--
C-c-0	97	3	--
C-c-90	4	--	96
C-a	100	--	--

Com os dados da Tabela 24, é possível constatar que a rotura coesiva foi predominante em todas as configurações ensaiadas, exceto nos provetes C-c-90, que apresentaram uma rotura interlaminar, o que indica que a adesão e a resistência entre o adesivo e os substratos foram ótimas. Tal conclusão implica que a preparação superficial foi adequada para todos os provetes e que a resistência da adesão entre os aderentes e o adesivo foi superior à ligação do próprio adesivo.

Devido ao facto de os resultados obtidos terem tido o coeficiente de variação inferior a 25%, o que significa que tais resultados são relativamente homogêneos, e o modo de rotura predominante ter sido coesiva, é possível afirmar que o ensaio *floating roller peel* é indicado para avaliar as propriedades de adesão de juntas adesivas fabricadas com materiais compósitos, e que o adesivo estrutural Araldite® AV138 utilizado apresenta excelentes propriedades de adesão tanto para aderentes metálicos quanto para aderentes compósitos.

3.2 Trabalho numérico

Neste capítulo são abordados os trabalhos numéricos realizados. Refere-se o *software* utilizado para executar as simulações, a construção dos modelos, o MDC utilizado, as condições aplicadas ao ensaio numérico e os resultados obtidos. De seguida, é feita uma análise das curvas $P/b-\delta$ e dos modos de rotura, com base nos dados obtidos, e é definida a capacidade dos MDC em se reproduzir os ensaios experimentais.

3.2.1 Programa utilizado

Para os ensaios numéricos realizados, foi escolhido o *software* ABAQUS® por permitir que seja possível utilizar um módulo integrado de MDC que possibilita simular o dano e prever a resistência ao arrancamento dos provetes no ensaio *floating roller peel*. O ABAQUS® utiliza o MEF que permite delimitar uma determinada área ou geometria e definir elementos em 2D ou 3D com formas geométricas triangulares, quadriláteros, octaedros e outros. A entrada dos dados iniciais para o trabalho numérico podem ser realizadas através do módulo gráfico ou módulo de análise para que, posteriormente, seja possível que seja feita a análise com respostas estática linear ou não-linear [89, 90]. Para criação de um modelo numérico no ABAQUS® é imprescindível que sejam fornecidos dados suficientes para análise, pelo que se torna necessário seguir quase todos os módulos de entrada dados disponíveis no *software*. A Tabela 25 indica os módulos de entrada disponíveis no ABAQUS® e a respetiva função de cada módulo.

Tabela 25 - Módulos de entrada disponíveis no ABAQUS®.

Módulo de entrada	Função
<i>Part</i>	Permite criar o desenho 2D de cada peça a ser analisada
<i>Property</i>	Possibilita criar os materiais, criar seções e atribuir os materiais
<i>Assembly</i>	Permite efetuar a montagem das peças criadas no módulo <i>part</i>
<i>Step</i>	Define o tipo de análise e os pontos para recolha de dados durante o ensaio
<i>Interaction</i>	Cria ou especifica as interações entre as superfícies em contacto
<i>Load</i>	Permite aplicar carregamentos, deslocamentos e definir as condições de fronteira.
<i>Mesh</i>	Cria a malha do modelo e respetivas especificações
<i>Optimization</i>	Possibilita criar uma tarefa para aperfeiçoar a simulação (não utilizado nesta tese)
<i>Job</i>	Permite confirmar e correr a simulação numérica
<i>Visualization</i>	Permite visualizar os resultados obtidos para a simulação
<i>Sketch</i>	Criar esboços 2D (não utilizado nesta tese)

3.2.2 Construção dos modelos e pré-processamento

Para construção dos modelos a serem analisados, é necessário introduzir dados em quase todos os módulos de entrada do ABAQUS®, pelo que se recomenda seguir a ordem disposta no *software*, conforme indicado no subcapítulo 3.2.1, pois esta segue uma sequência lógica.

- *Part*

No primeiro módulo, *part*, foram feitos os desenhos em 2D de todas as configurações dos provetes analisados no trabalho experimental e dos roletes de apoio, em *sketches* diferentes. Para os provetes foi definida uma peça o tipo deformável e para os roletes de fixação do tipo rígido. A Figura 65 apresenta o desenho utilizado para a configuração do provete C-a e a Figura 66 indica o desenho para os roletes de fixação.

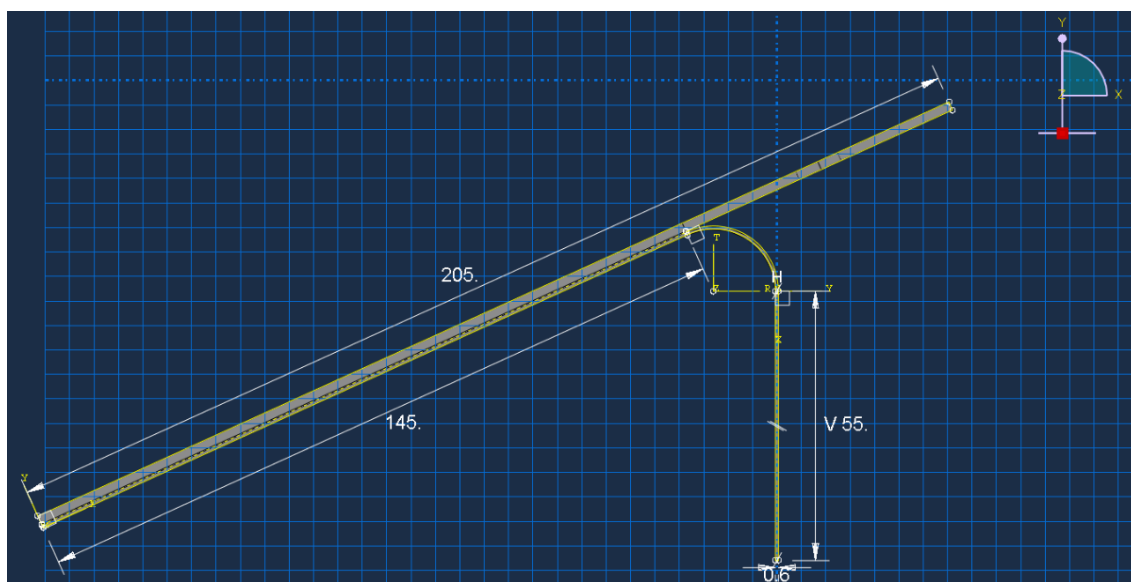


Figura 65 - Modelação em 2D no módulo *part* do provete C-a.

Os roletes de fixação que compõem o acessório utilizado no ensaio *floating roller peel* foram modelados conforme as dimensões previstas na norma D3167 [34].

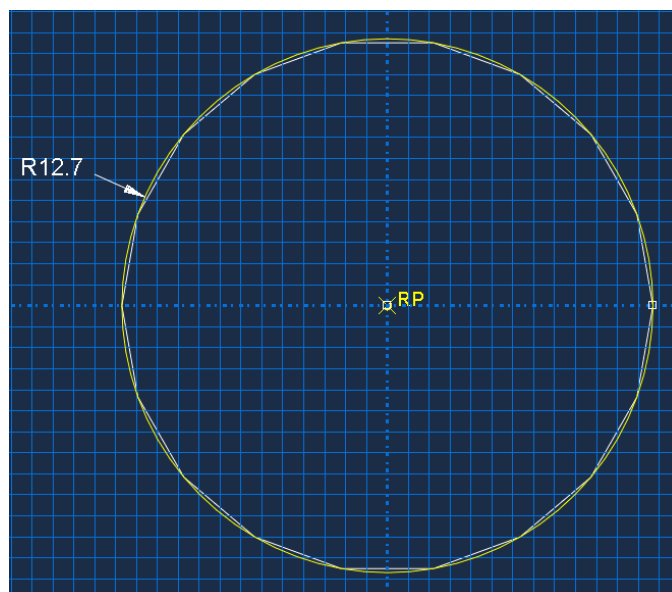


Figura 66 - Modelação em 2D do rolete de fixação.

Ainda neste módulo, foi feita a divisão do provete em partições para que fosse possível aplicar os respetivos materiais, elementos e malhas individualmente por cada partição. Foi definida a dimensão de 0,2 mm de espessura para a partição do adesivo, em todas as configurações, conforme utilizado nos provetes experimentais.

- *Property*

No módulo seguinte, *property*, foram criados os materiais para os substratos e adesivo. A Tabela 26 indica as propriedades mecânicas adotadas. Para efeitos de simplificação, em ambas as configurações o PRFC foi considerado como material isotrópico elástico. A liga de alumínio foi modelada como material isotrópico com plasticidade. σ_y representa a tensão máxima até início do dano.

Tabela 26 - Propriedades utilizadas no trabalho numérico para os substratos [82, 86, 91].

Substrato	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_f (MPa)
Liga AW 6082-T651	70	0,3	261,67	325
PRFC (0°)	109	0,3	--	--
PRFC (90°)	10	0,3	--	--

Através do separador *create material* é possível realizar a parametrização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados no fabrico das juntas adesivas. A Figura 67 apresenta a definição das propriedades adotadas para o adesivo Araldite® AV138.

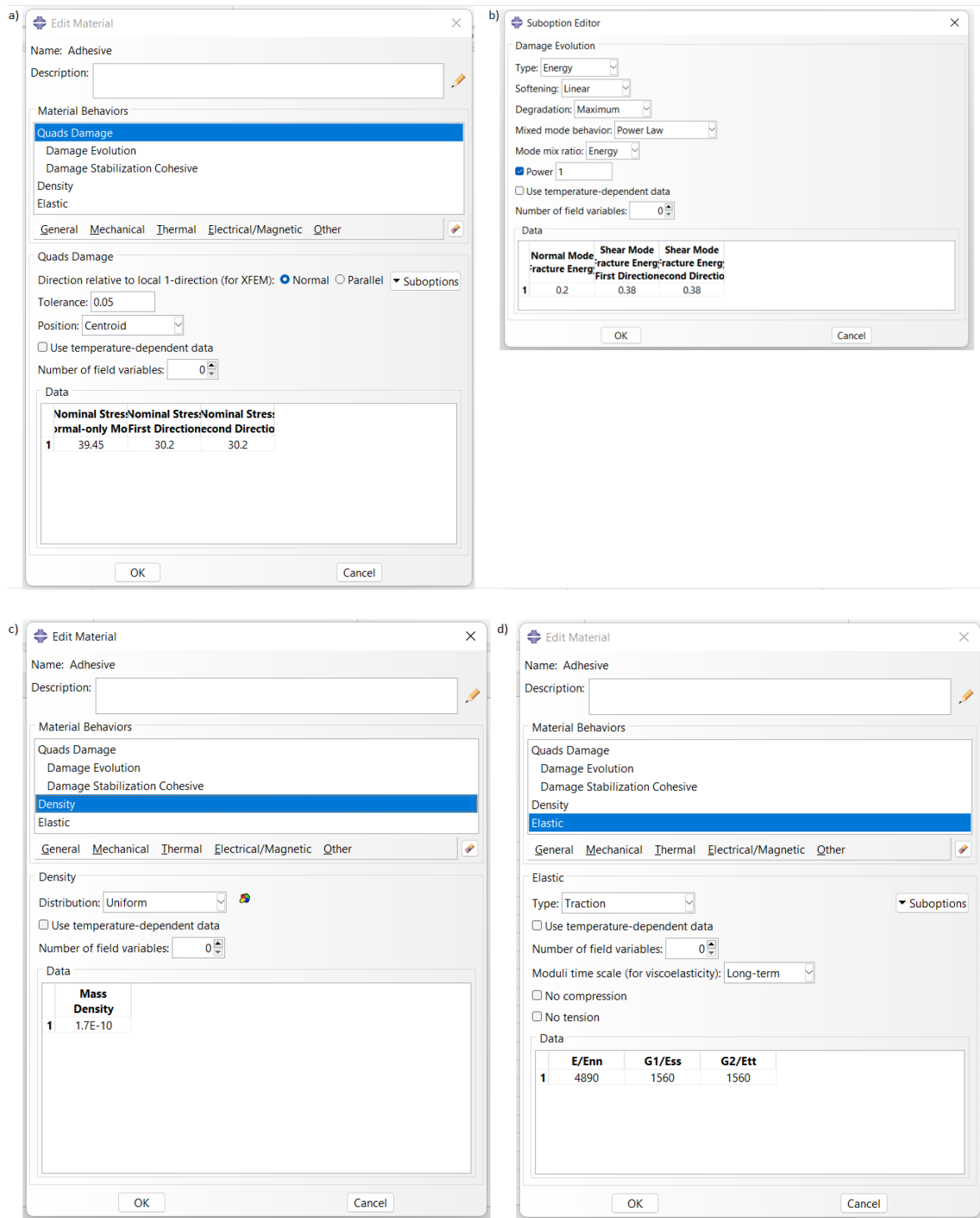


Figura 67 – Propriedades atribuídas ao adesivo Araldite® AV138 no ABAQUS®: a) indica as resistências coesivas, b) as energias de rotura, c) a densidade e d) as propriedades elásticas.

No separador *create section* foram criadas as secções para os substratos rígido, flexível e adesivo. Como indicado na Figura 68, as secções dos substratos rígido e flexível são tipo sólido homogéneo, enquanto a secção de adesivo é do tipo coesivo, para posteriormente possibilitar a atribuição de elementos coesivos.

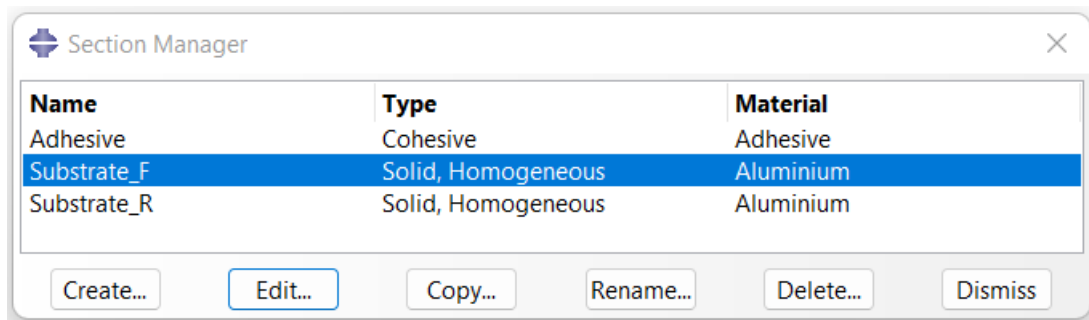


Figura 68 - Definição do tipo e material das secções.

No separador seguinte, *assign section*, é definida para cada partição uma secção previamente criada. A Figura 69 indica a definição da secção para o aderente rígido (partição a vermelho).

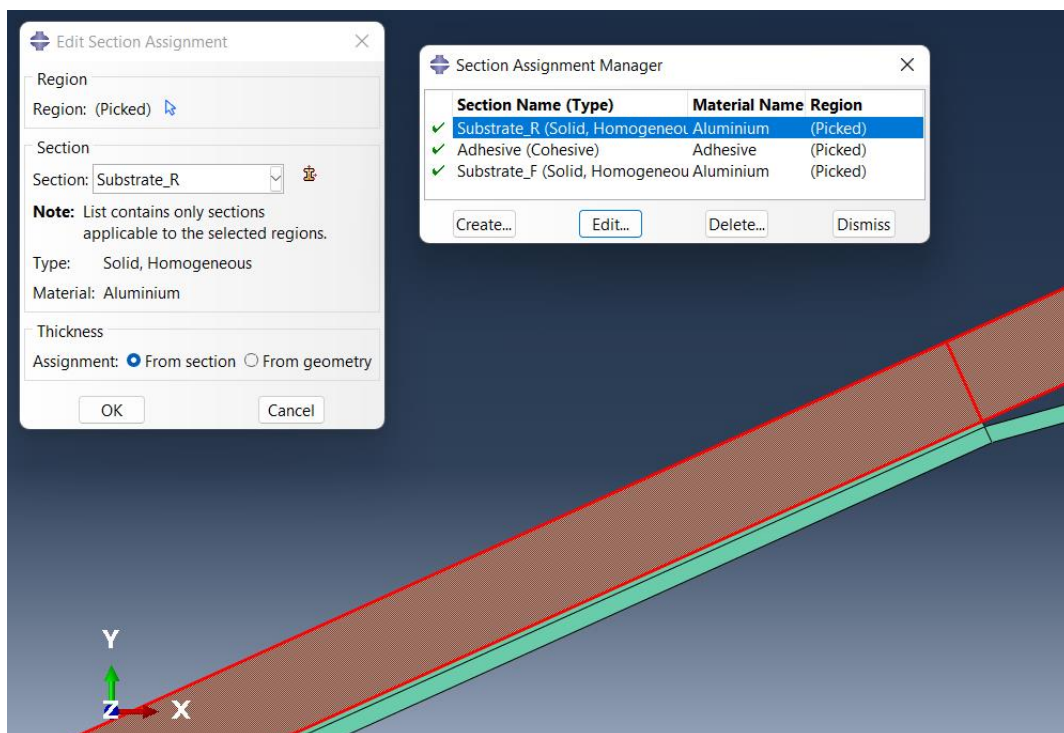


Figura 69 - Definição da secção do aderente rígido para o provete de configuração A-a.

Como os provetes possuem uma largura constante de 25 mm, as simulações numéricas foram feitas em 2D para diminuir o tempo computacional sem prejudicar a autenticidade dos resultados obtidos.

- *Assembly*

No módulo *assembly* foi realizada a montagem do provete e dos dois roletes de apoio, componentes previamente criados no módulo *part*. Considerou-se que o raio da

curvatura do aderente flexível tem a mesma dimensão do raio externo do rolete. A Figura 70 mostra a montagem dos diferentes componentes.

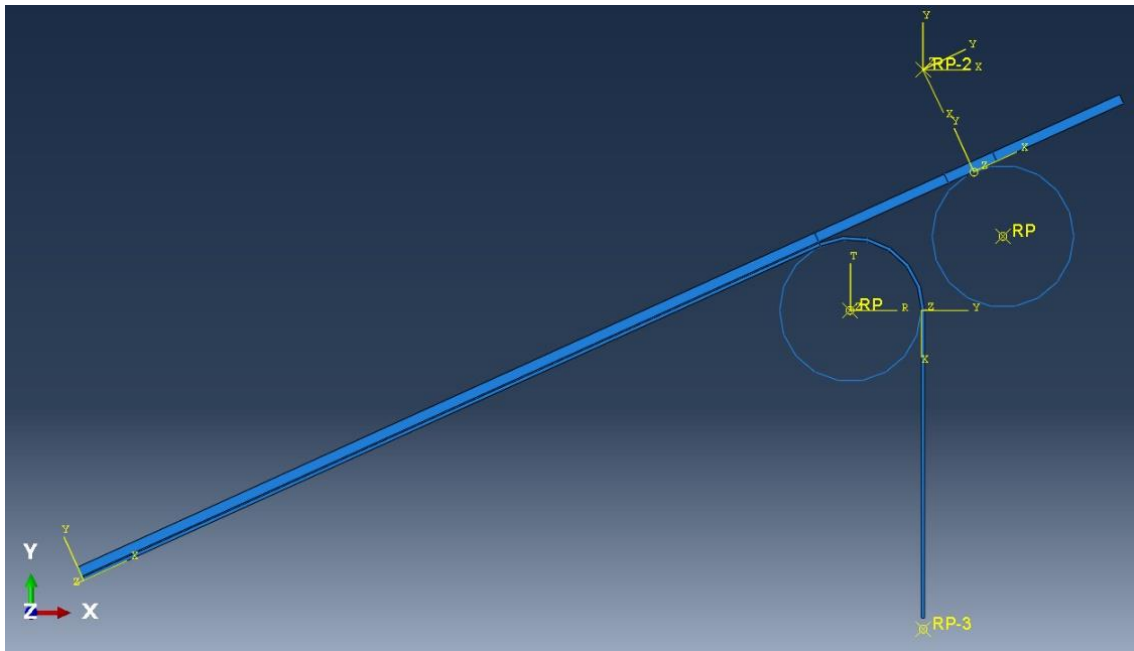


Figura 70 - Montagem do provete C-a com os roletes de apoio no módulo *assembly* do ABAQUS®.

Neste módulo também foram criados os pontos de referência RP. Os pontos RP correspondem aos centros dos roletes, o RP-2 indica o ponto de fixação do acessório utilizado no ensaio de arrancamento e RP-3 indica o ponto estabelecido imediatamente abaixo do aderente flexível. Na Figura 70 é possível verificar os pontos de referência RP indicados.

- *Step*

A seguir, no módulo *step*, foi definido o tipo de procedimento a ser seguido pelo ABAQUS®. Para as simulações deste trabalho foi utilizado o procedimento *Dynamic, Explicit* (Figura 71) que é indicado para simulações dinâmicas e simula melhor os contactos existentes no modelo. Para o procedimento *Dynamic, Explicit* é necessário introduzir a densidade de cada material, que esta estará associada à força nodal utilizada para calcular a aceleração nodal. O procedimento *Standard*, por não considerar a massa dos materiais necessita de diversas iterações para cada *step*, causando assim um maior custo computacional.

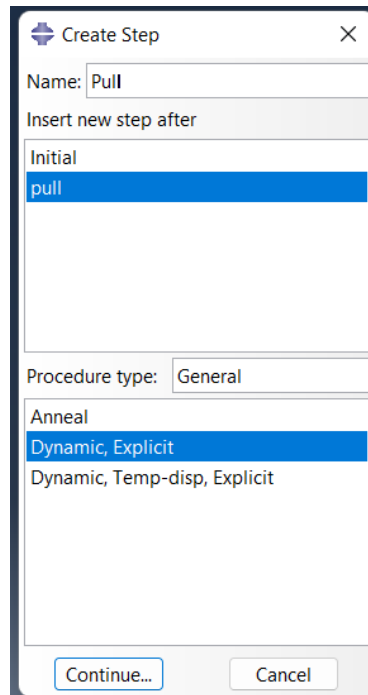


Figura 71 - Criação do *step explicit* no ABAQUS®

Na janela seguinte foi ativada a opção de não linearidade geométrica (Nlgeom) e foram definidos os parâmetros de incrementação. Após inúmeras simulações e tentativas realizadas, foi estabelecido um *time period* ideal de 0,01. A escolha do parâmetro de incrementação é indispensável para que a simulação numérica funcione corretamente e não ocorram problemas de convergência.

A Figura 72 indica a curva $P/b-\delta$ obtida para o provete de configuração A-c-0 e *time period* 0,005, em que é possível verificar que os valores de P/b estão sempre a aumentar até o fim do ensaio e não há uma estabilização da curva $P/b-\delta$.

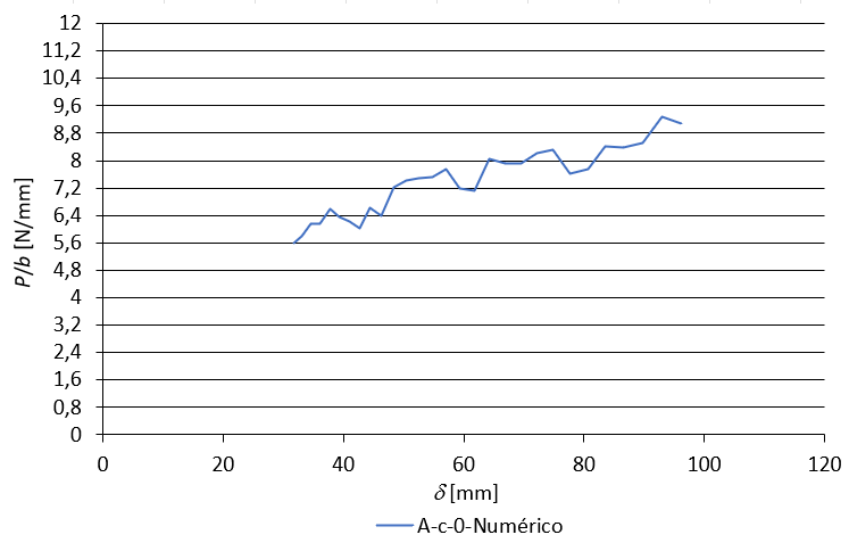


Figura 72 - curva $P/b-\delta$ obtida com *time period* de 0,005 para o provete de configuração A-c-0.

O passo a seguir foi editar o *field output* existente. Esta instrução permite alterar as opções dos dados extraídos ao fim da simulação em termos gráficos no módulo *visualization*. Foram acrescentadas as variáveis SDEG e STATUS, que permitem controlar e visualizar melhor a degradação dos elementos coesivos do adesivo (Figura 73). Também foi definida a frequência de registo de dados de 0,00005. Esta variável é definida através da divisão do *time period* pela quantidade pretendida de dados registados.

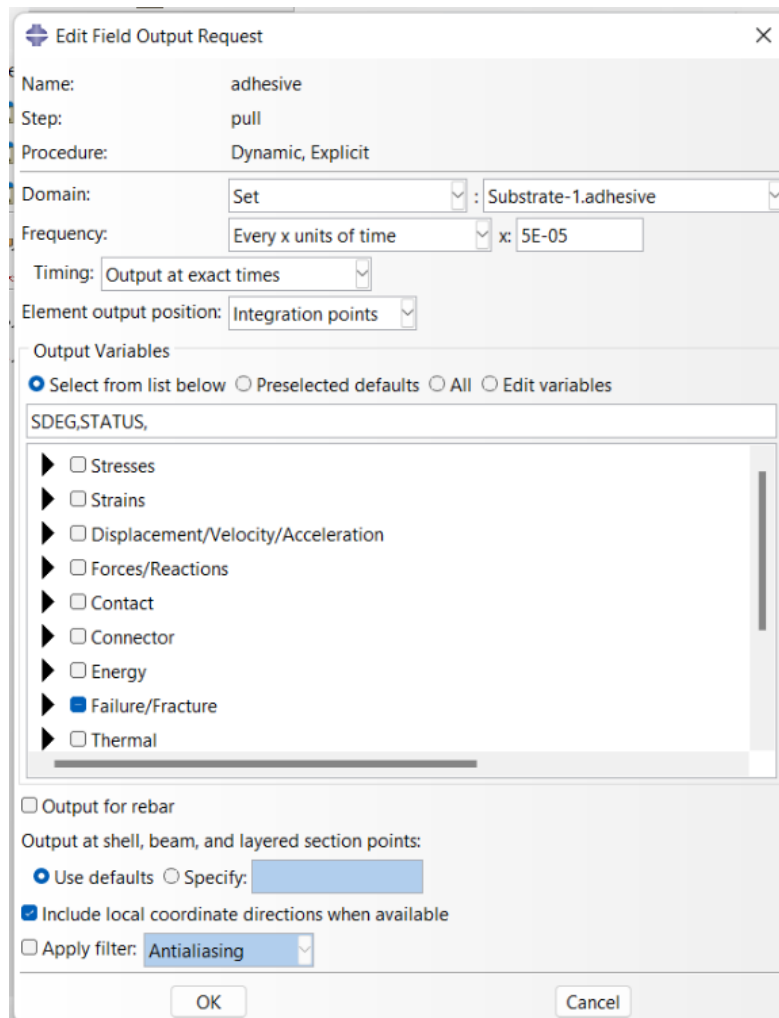


Figura 73 - Definição das variáveis SDEG e STATUS na instrução *field output*.

Por defeito, o *software* retira outros dados, como tensão, deformação, tensão de corte, forças de reações, momentos, tensões de contacto, força de contacto, rotação, entre outros, como indica a Figura 74.

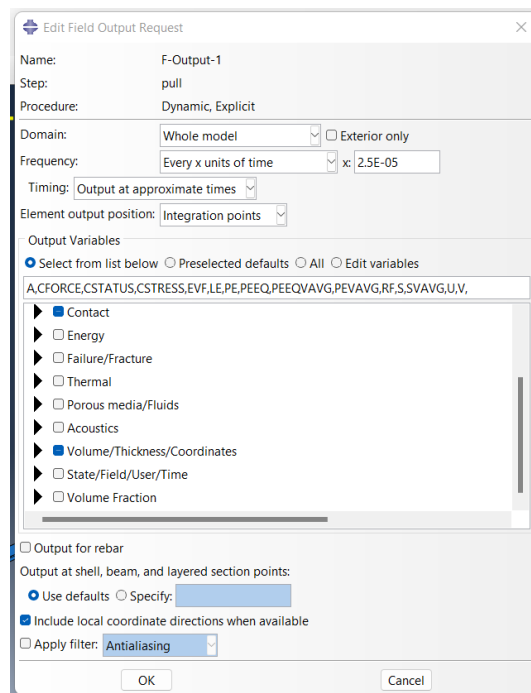


Figura 74 - Variáveis definidas por defeito na instrução *field output*.

Antes de finalizar este módulo, foram criados os *sets* equivalentes para as reações (Figura 75) e deslocamento (Figura 76) na instrução *history output*, instrução que permite gerar a curva $P/b-\delta$ ao fim da simulação numérica. Também foi estabelecida a frequência de registo de dados com 0,00005, a mesma frequência indicada no *field output*. O *set* para as reações foi definido no RP-2, referente ao ponto de fixação do acessório utilizado no ensaio de arrancamento, indicado na Figura 75.

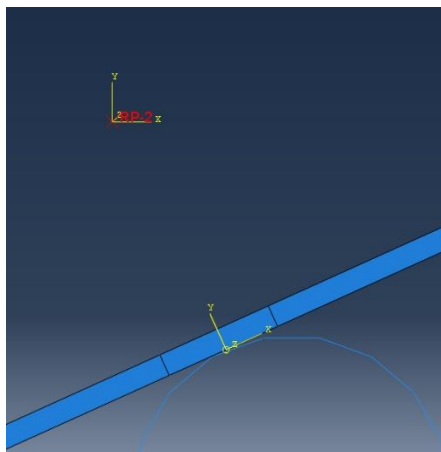


Figura 75 - Ponto onde o *set* para as reações foi definido.

O *set* para o deslocamento foi aplicado no nó inferior direito do aderente flexível, como indica a Figura 76.

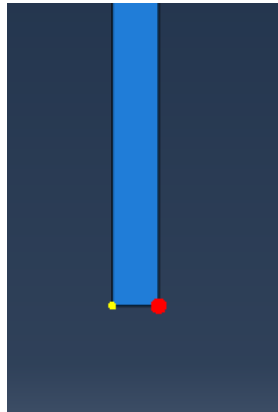


Figura 76 - Ponto onde o set para o deslocamento foi definido.

- **Interaction**

A seguir a lógica do *software*, o próximo módulo é o *interaction*, no qual é definido o contacto entre as superfícies das peças existentes na modelação numérica, previamente montadas no módulo *assembly*. A configuração correta deste módulo é muito importante para garantir as condições físicas reais de contacto existente entre os aderentes rígido e flexível e os roletes de fixação.

Na janela *create interaction* foram definidas as configurações do contacto entre as superfícies principais (*main*) de cor vermelha e as superfícies secundárias (*secondary*) de cor magenta. O contacto entre o aderente flexível e o rolete de fixação 1 foi definido como *surface to surface contact* (Figura 77) com a aproximação *finite sliding* e formulação *penalty contact method*. De referir que, sempre que uma das superfícies rígidas, esta deve ser definida como *master*.

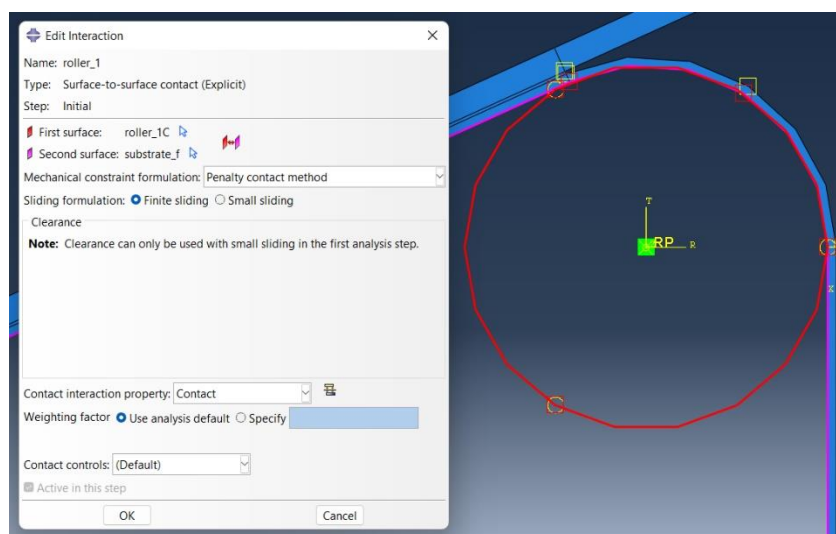


Figura 77 - Definição do contacto entre as superfícies do aderente flexível e o rolete de fixação 1 no ABAQUS®.

A aproximação *finite sliding* é indicada quando há grandes deslocamentos entre as superfícies em contacto, o que significa que durante a simulação serão calculados todos os nós presentes neste contacto.

Seguidamente foram definidos os contactos entre a superfície do aderente rígido e o rolete de fixação 2 (Figura 78), para os quais foi igualmente utilizado o contacto *surface to surface contact* com a aproximação *finite sliding* e formulação *penalty contact method*.

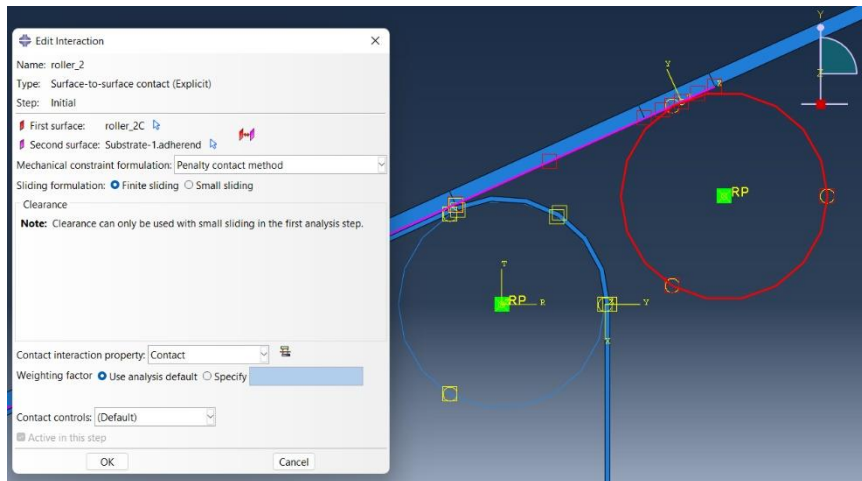


Figura 78 - Definição do contacto entre as superfícies do aderente rígido e o rolete de fixação 2 no ABAQUS®.

Devido ao comportamento físico do aderente flexível durante algumas modelações numéricas, optou-se por criar um contacto entre tal aderente e o rolete de fixação 2 (Figura 79) para evitar que o aderente flexível penetrasse na superfície do segundo rolete de fixação caso houvesse um deslocamento axial significativo do aderente flexível.

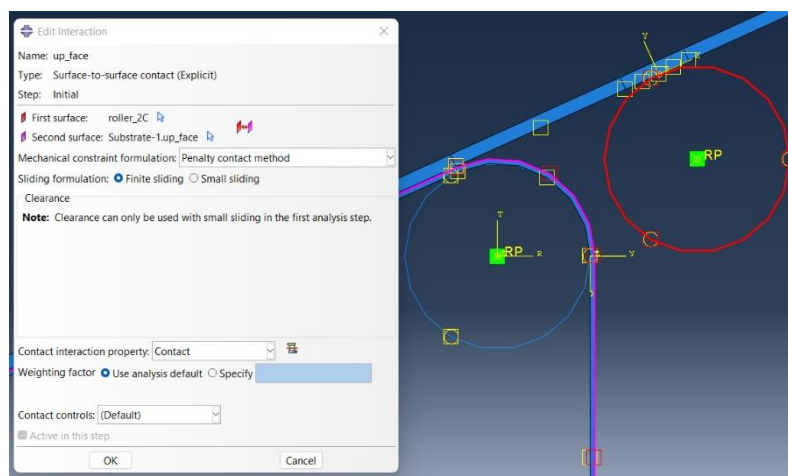


Figura 79 - Definição do contacto entre as superfícies do aderente flexível e o rolete de fixação 2 no ABAQUS®.

No separador seguinte, *interaction property* (Figura 80), foram definidas as propriedades das interações entre as superfícies. Foi criada uma interação do tipo *contact*, cuja opção *tangential behavior* foi definida com uma formulação *frictionless*, enquanto na propriedade *normal behavior* o *pressure-overclosure* foi definido como *hard contact* e para *constraint enforcement method* foi definido como *default* com a opção *allow separation after contact* ativada. No separador *geometric properties* foi indicada a espessura de 25 mm do provete.

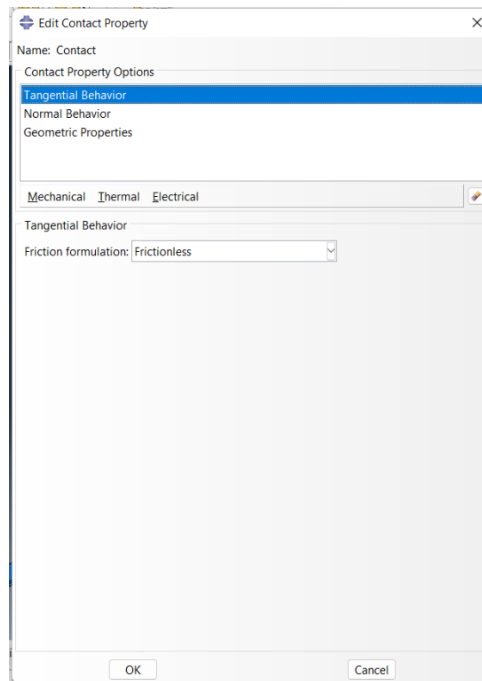


Figura 80 - Definição das propriedades do contacto existente entre as superfícies do modelo numérico.

Segundo o manual do ABAQUS® [92], a inclusão de fricção na modelação numérica torna-se necessária apenas quando a inclusão dos dados gera uma grande diferença nos resultados obtidos, visto que a simulação da fricção é um fenómeno muito complexo para a modelação numérica. Portanto, não foi considerada a fricção entre o contacto das superfícies. A escolha da utilização do algoritmo *hard contact* nas propriedades do contacto entre as superfícies indica que haverá uma pressão constante aplicada sobre a superfície secundária, como indica a Figura 81.

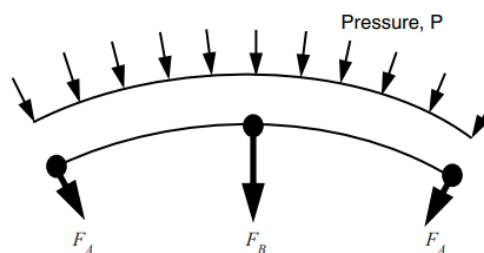


Figura 81 - Comportamento do algoritmo *hard contact* no ABAQUS® [92].

A utilização do algoritmo *default* na opção *constraint enforcement method* diminui a complexidade do contacto entre as superfícies, visto que tal algoritmo utiliza uma definição simplificada com menos restrições entre as superfícies indicadas [92].

Como foi utilizada uma análise dinâmica para a modelação numérica, foi necessário definir a densidade dos materiais que compõem a junta adesiva e definir o momento de inércia dos roletes de fixação. A Tabela 27 indica os valores da densidade utilizados para cada material, para os quais se atribuíram, após diversas tentativas, um valor 10 vezes mais baixo que os encontrados na literatura. O valor foi definido com o objetivo de reduzir o tempo computacional para cada simulação, mas sem alterar a precisão dos resultados obtidos.

Tabela 27 - Valores da densidade dos materiais utilizados no ABAQUS®[87, 93, 94].

Material	Densidade (x10 ⁻¹⁰)
Alumínio (ton/mm ³)	0,27
AV 138 (ton/mm ³)	0,17
PRFC (ton/mm ³)	0,18

Tal abordagem funciona como um tipo de *mass scaling* que serve para reduzir os efeitos causados pela inércia na simulação numérica [95]. Ao reduzir demasiado a densidade o provete comporta-se de uma forma diferente do esperado e o tempo computacional aumenta drasticamente.

Para determinar o momento de inércia do roletes de fixação (I), foi necessário determinar a massa do rolete através da densidade (equação (10)), em que m representa a massa e v o volume.

$$\rho = \frac{m}{v}. \quad (10)$$

Os roletes de fixação são feitos de aço e a densidade do aço é 7860 kg/m³. Com as medidas do diâmetro do rolete indicadas pela norma ASTM 3167 [34] foi possível calcular o volume do rolete, de $v=12870,3699$ mm³. Assim, através da equação (10) foi possível determinar uma massa de $m=0,1011$ kg para os roletes.

O momento de inércia do rolete pode ser calculado através da equação do momento de inércia de um cilindro (equação (11)), em que m é a massa e R é o raio do rolete de fixação. A Figura 82 indica os valores calculados de m em ton e I em ton/mm² inseridos no ABAQUS®.

$$I = \frac{1}{2} m \times R^2 \quad (11)$$

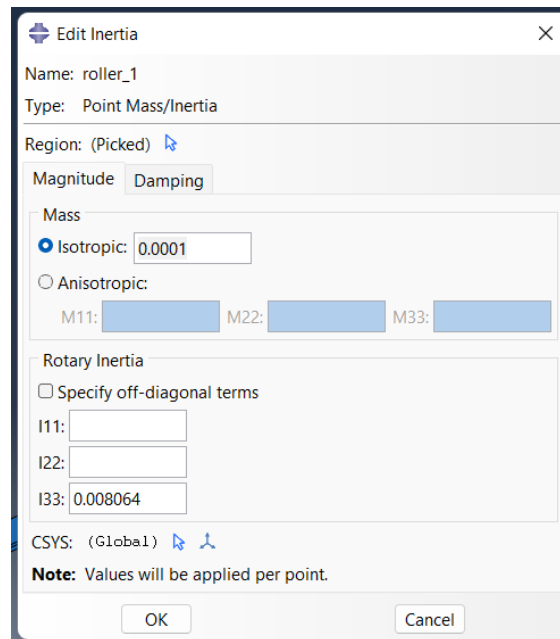


Figura 82 - Valores de m e I inseridos no ABAQUS®.

A seguir foram definidas restrições impostas no modelo numérico através do separador *create constraint*. A restrição *pull* (Figura 83) cria o acoplamento dos nós existentes na aresta inferior do aderente flexível com o ponto de referência RP-3 criado anteriormente. No ponto RP-3 será aplicado um deslocamento para simular o deslocamento feito pelas amarras durante o ensaio experimental.

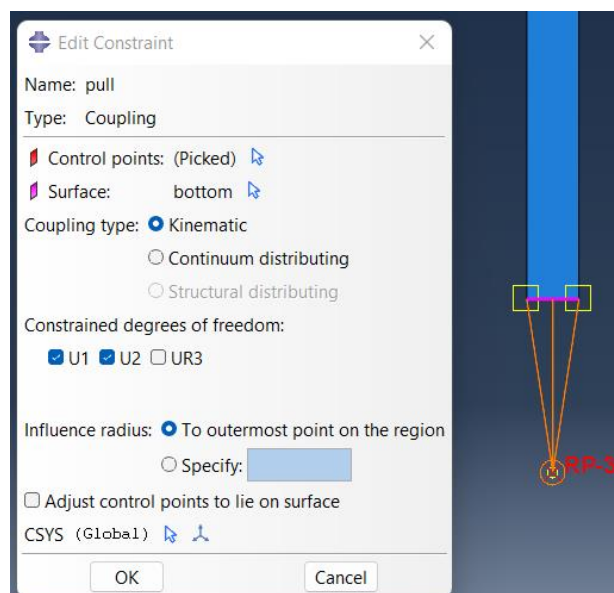


Figura 83 - Restrição de acoplamento aplicada na parte inferior do aderente flexível.

Seguidamente foram criados elementos rígidos de conexão entre os roletes de fixação e o apoio superior RP-2, para simular o apoio de fixação do acessório utilizado no ensaio de arrancamento. Após criados os elementos rígidos de conexão, foram criados os tipos de ligações *beam* e *hinge* para serem atribuídos aos elementos rígidos.

A conexão do tipo *beam* (Figura 84) cria uma conexão rígida entre dois pontos previamente estabelecidos.

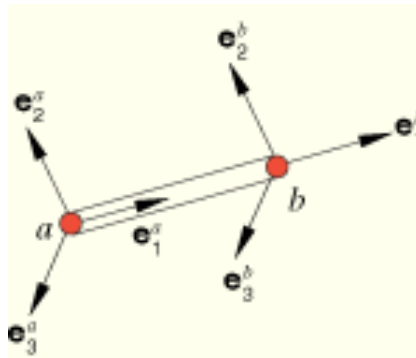


Figura 84 - Tipo de conexão *beam* presente no ABAQUS®[96].

A conexão do tipo *hinge* (Figura 85) permite a rotação entre os dois pontos previamente selecionados.

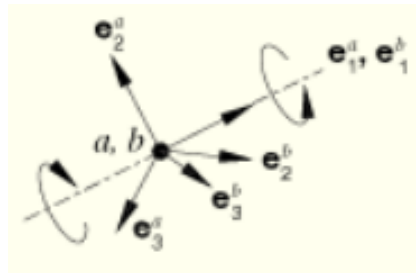


Figura 85 - Tipo de conexão *hinge* presente no ABAQUS®[96].

A seguir foi atribuída a conexão do tipo *beam* para o elemento rígido estabelecido entre os roletes de fixação simulados, assim como para o elemento rígido existente entre rolete de fixação 1 e o ponto de apoio superior RP-2. Para a conexão do tipo *hinge*, esta foi definida somente para o elemento rígido existente entre o rolete de fixação 2 e o ponto de apoio superior RP-2, como ilustra a Figura 86.

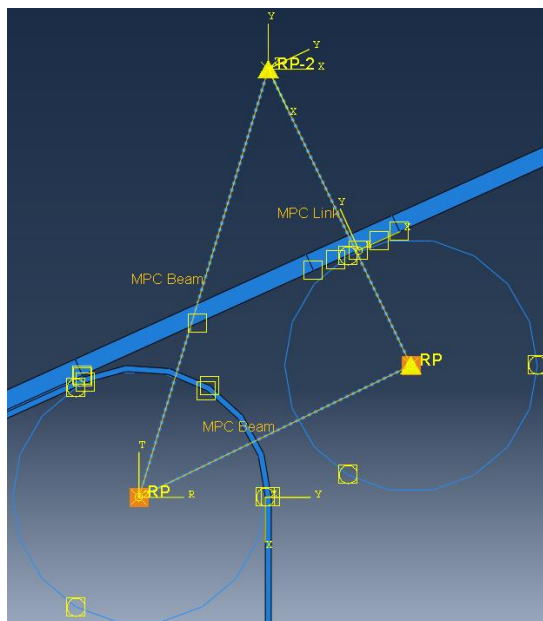


Figura 86 - Conexões estabelecidas para a simulação dos provetes no ABAQUS®.

A Figura 87 permite constatar a equivalência geométrica entre o acessório utilizado no ensaio experimental e o modelo numérico criado no ABAQUS®.

a)



b)

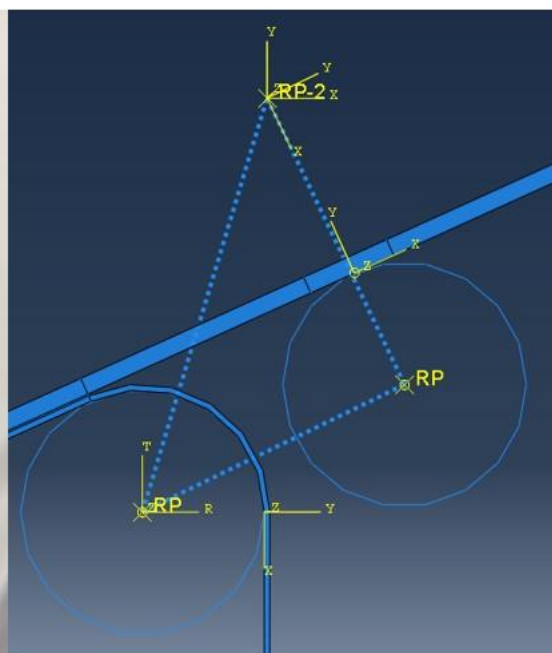


Figura 87 - Comparação entre: a) acessório utilizado para realizar o ensaio experimental e b) modelação numérica do acessório criada no ABAQUS®.

Neste módulo também se encontra a janela de a inicialização dos contactos, cuja inicialização foi mantida como *default* (Figura 88).

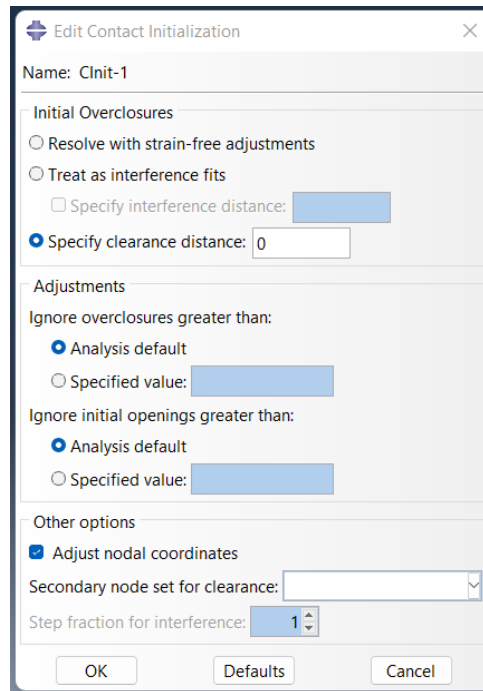


Figura 88 - Modelação da inicialização dos contactos no ABAQUS®.

O método *default* de inicialização ajusta a posição dos nós das superfícies sem causar tensões ou deformações no modelo. Este procedimento ocorre durante o pré processamento [92]. A Figura 89 ilustra a inicialização através do método *default* no ABAQUS®.

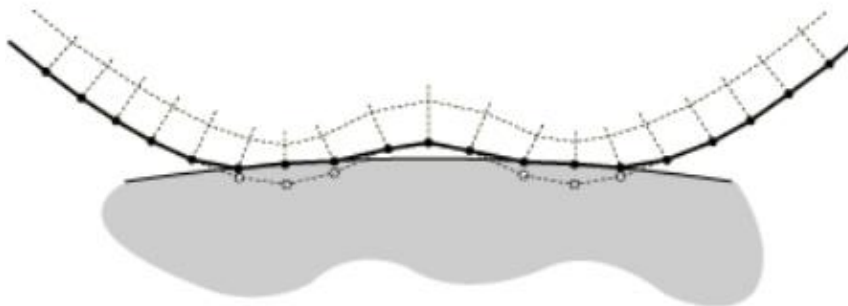


Figura 89 - Método *default* de inicialização dos contactos no ABAQUS® [92].

- *Load*

Após concluir a inserção de dados no módulo *interaction*, foi configurado o módulo *load*. Este módulo permite definir os carregamentos que são aplicadas nos ensaios (*create load*) e definir as condições fronteira impostas ao modelo (*create boundry condition*), conforme indica a Figura 90.

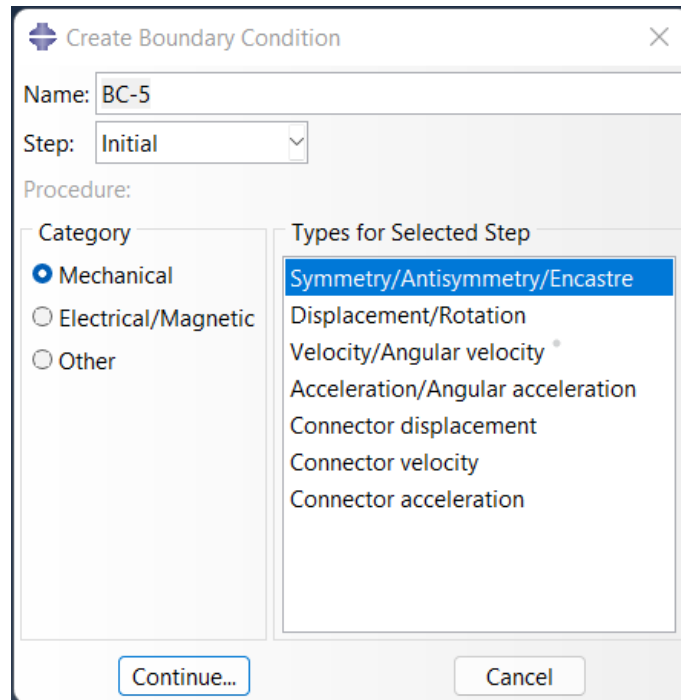


Figura 90 - Criação de condição de fronteira no ABAQUS®.

Foi considerada a força gravítica na modelação numérica, que foi aplicada em todo o modelo (Figura 91) através do separador *create load*.

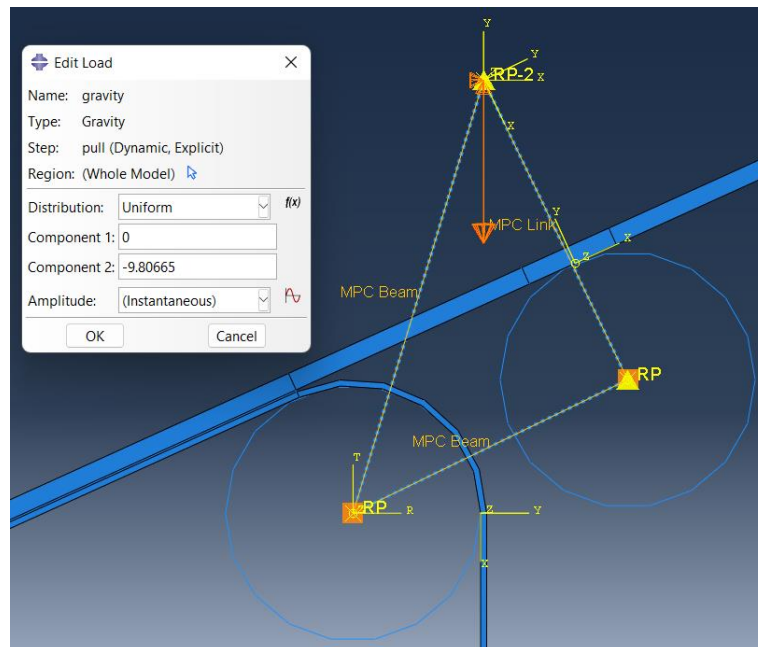


Figura 91 - Aplicação da força gravítica na simulação numérica.

Após diversas simulações realizadas, observou-se que uma abordagem do tipo *force driven* seria o mais indicado para a modelação dos provetes, dado que nas simulações

do tipo *displacement driven* o substrato flexível comportava-se de forma anormal (Figura 92).

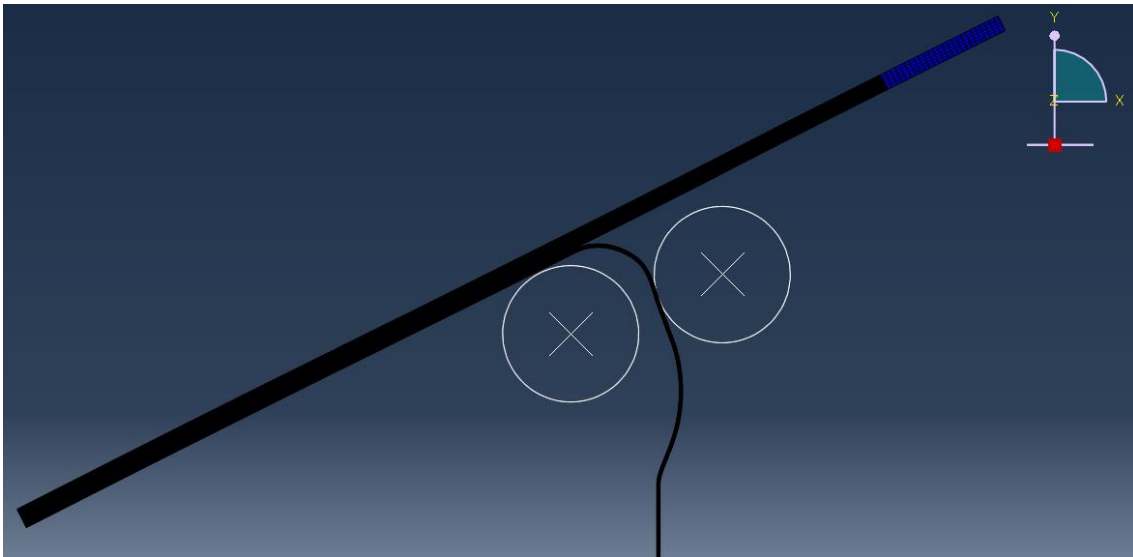


Figura 92 - Comportamento da simulação numérica do ripo *displacement driven* para o provete de configuração A-a.

Pode-se observar pela figura que o aderente flexível tocou o segundo rolete de fixação e não houve o contacto do aderente rígido com o segundo rolete de fixação, comportamento que normalmente não é observado durante os ensaios experimentais. Assim, foi imposta uma força de -250 N segundo o eixo y no ponto RP-3 previamente criado (Figura 93), de forma a simular o comportamento físico do modelo até o limite da ocorrência da rotura, e obter dados suficientes para serem analisados, conforme indica a norma D3167 [34].

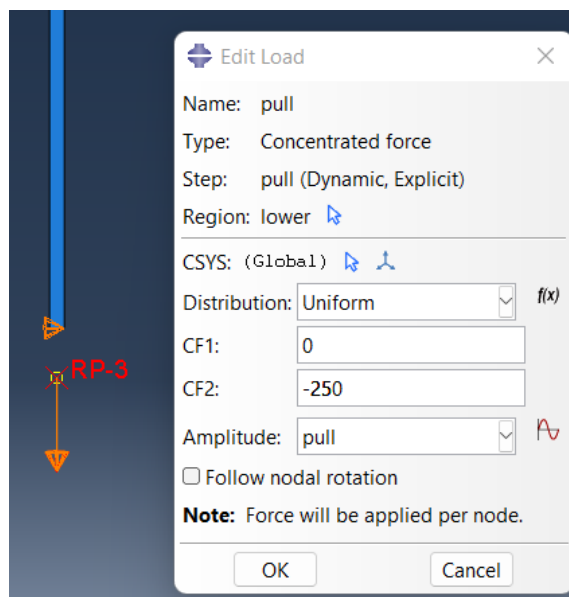


Figura 93 - Carregamento aplicado nos modelos numéricos.

Durante a modelação numérica optou-se por utilizar o menor número de condições fronteira possível, de forma a garantir a maior similaridade física presente no ensaio experimental através dos roletes de fixação. A primeira condição fronteira estabelecida foi a *guide*. Para o efeito, o deslocamento do aderente flexível foi restringido na direcção negativa do eixo x (Figura 94).

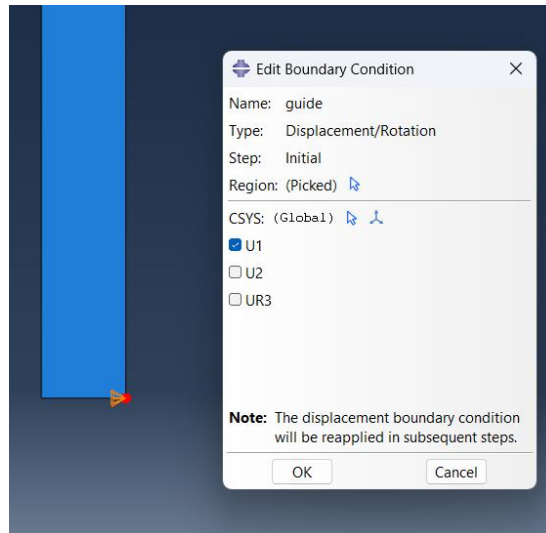


Figura 94 - Primeira condição fronteira estabelecida para a modelação numérica no ABAQUS®.

Esta condição fronteira simula o comportamento das amarras, que por sua vez tem apenas deslocamentos na direcção vertical.

A condição fronteira *pivot* (Figura 95) restringe o movimento no eixo x e eixo y do suporte de apoio dos roletes de fixação, que se encontra ligado aos dois roletes de fixação, como mencionado anteriormente.

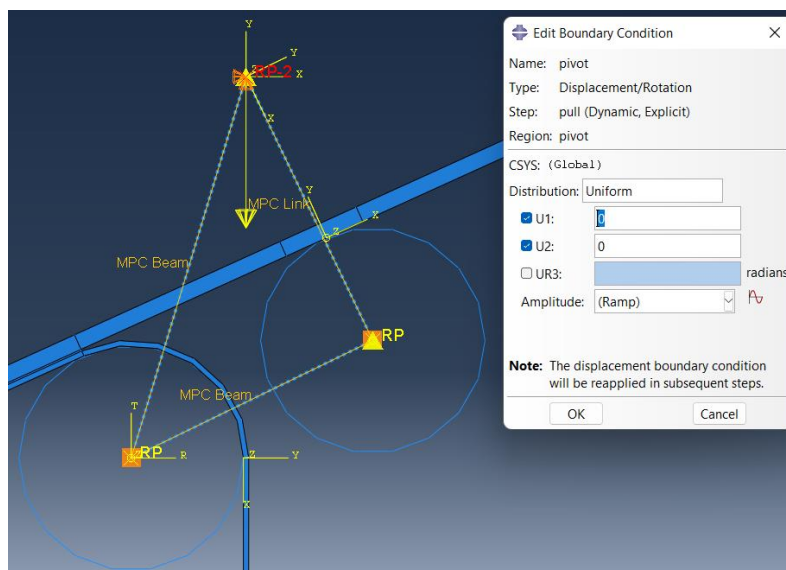


Figura 95 - Aplicação da condição fronteira *pivot* no ABAQUS®.

- *Mesh*

Neste módulo foi definida e criada a malha utilizada para as modelações numéricas. Primeiro foram criados os *mesh controls*, que definem a forma do elemento para cada secção escolhida e o tipo de malha. Para o aderente rígido e para a secção inferior do aderente flexível foi definida uma malha estruturada com elementos quadriláteros (Figura 96) do tipo *structured*.

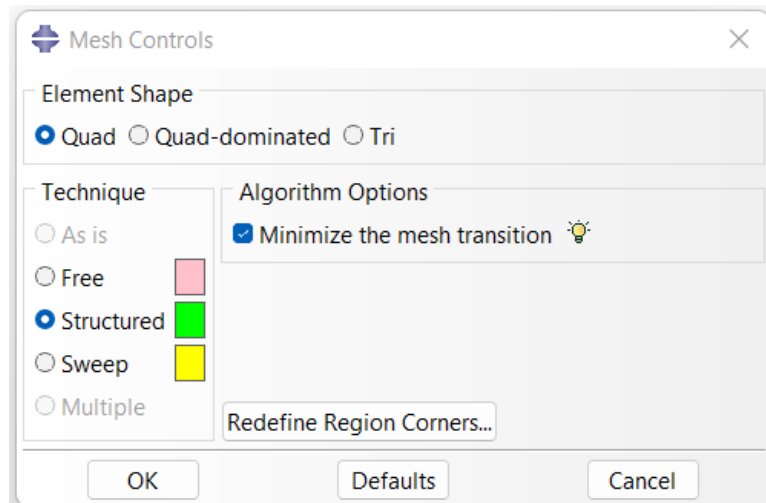


Figura 96 - Definição do tipo de elemento e malha para os aderentes do provete.

Para o adesivo, foi definida uma malha do tipo *sweep* (Figura 97), e foram atribuídos elementos quadriláteros e coesivos para propagação do dano.

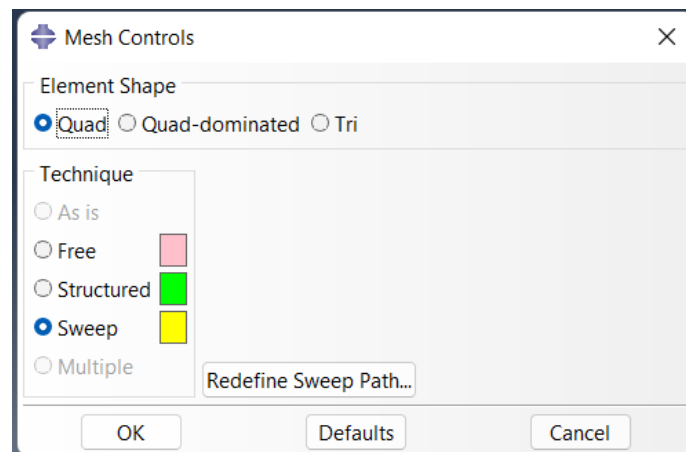


Figura 97 - Definição do tipo de elemento e malha para o adesivo do provete.

Neste tipo de malha é necessário indicar a orientação dos elementos coesivos. Foi definido que os elementos coesivos estão orientados desde a aresta do aderente flexível para a aresta do adente rígido, como mostra a Figura 98. Esta orientação certifica o emparelhamento correto dos nós homólogos dos elementos coesivos entre as duas arestas a ligar.

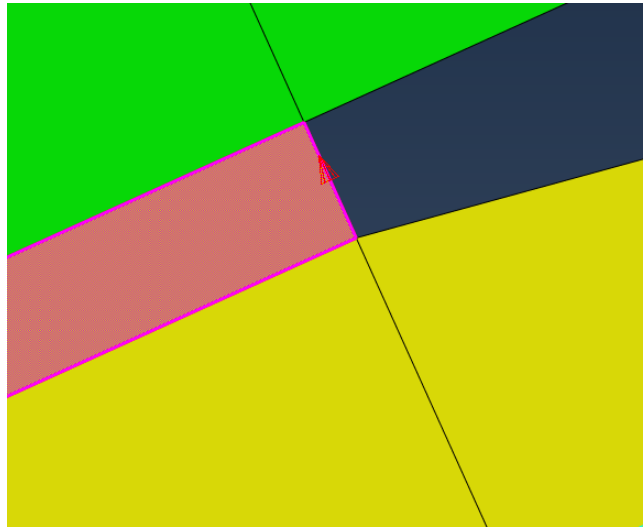


Figura 98 - Definição da orientação dos elementos coesivos do adesivo.

Para a fração do aderente flexível em contacto com o rolete de fixação, assim como para o adesivo, foram atribuídos elementos quadriláteros com uma malha do tipo *sweep*.

Seguidamente, foi definido o tipo de elemento para cada secção no separador *assign element type*. Para os aderentes rígidos e flexíveis foram utilizados elementos do tipo *plane stress* com código CPS4R no ABAQUS® (Figura 99).

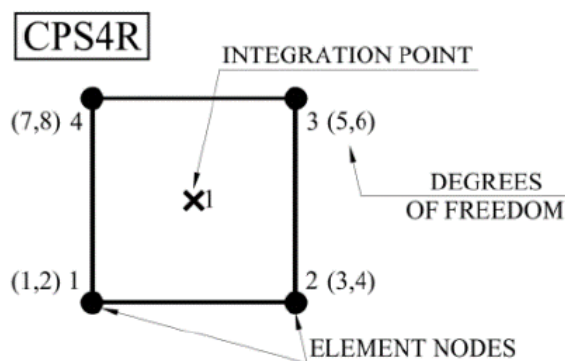


Figura 99 - Elemento do tipo *plane stress* do ABAQUS®[97].

Para o adesivo foram atribuídos elementos do tipo coesivo com código COH2D4 no ABAQUS®. Ambos os elementos CPE4R e COH2D4 possuem 4 nós, logo são compatíveis entre si.

No separador *seed edges* foram estabelecidas as sementes nas arestas que indicam o tamanho da malha a ser criada, em que neste comando pode-se escolher entre o método, tamanho e tipo de *bias* a ser utilizado (Figura 100). Finalmente, no comando *mesh part* foi criada a malha conforme as definições prévias das sementes.

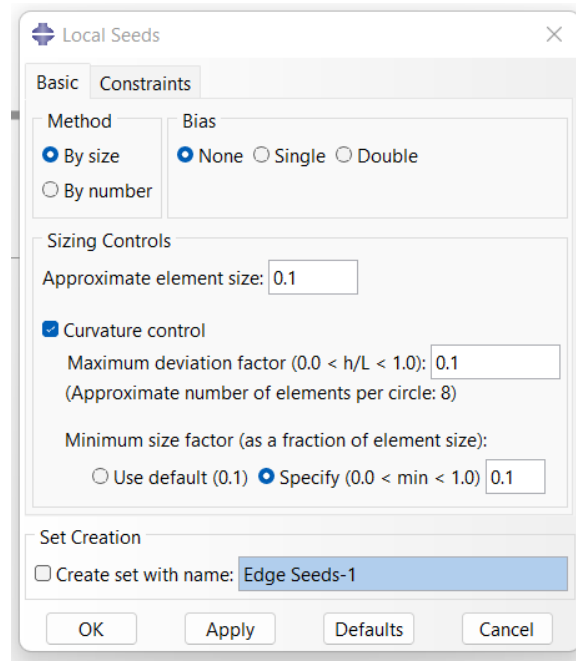


Figura 100 - Definição das sementes na simulação do ABAQUS®.

No processo de refinamento das malhas, feito através da modelação das sementes, foi definido um maior refinamento nas áreas do aderente rígido em contacto com o adesivo e o rolete de fixação 2, e nas secções do aderente flexível em contacto com o adesivo e com os roletes de fixação (Figura 101). Não foi atribuída uma malha refinada para as demais secções, visto que tal não significaria uma melhora nos resultados e aumentaria o tempo computacional da simulação numérica.

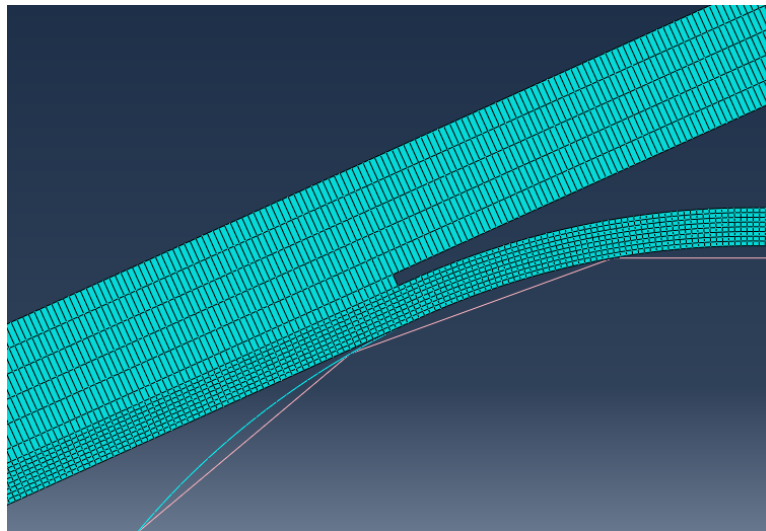


Figura 101 - Malha utilizada na simulação numérica no ABAQUS®.

Nas secções do aderente flexível e aderente rígido sujeitas a qualquer contacto foi estabelecida uma malha com elementos finitos com comprimento de aresta de 0,1 mm.

Para as arestas laterais do aderente rígido foram estabelecidos 5 elementos e 8 elementos para as arestas laterais do aderente flexível. Os roletes de fixação foram modelados com elementos com tamanho de aresta de 0,2 mm, visto que tais elementos devem ter dimensão superior aos elementos dos aderentes, pois os roletes de fixação representam a *main surface*. A Figura 102 indica as sementes utilizadas para a criação da malha indicada, resultantes da aplicação do comando *seed edges*.

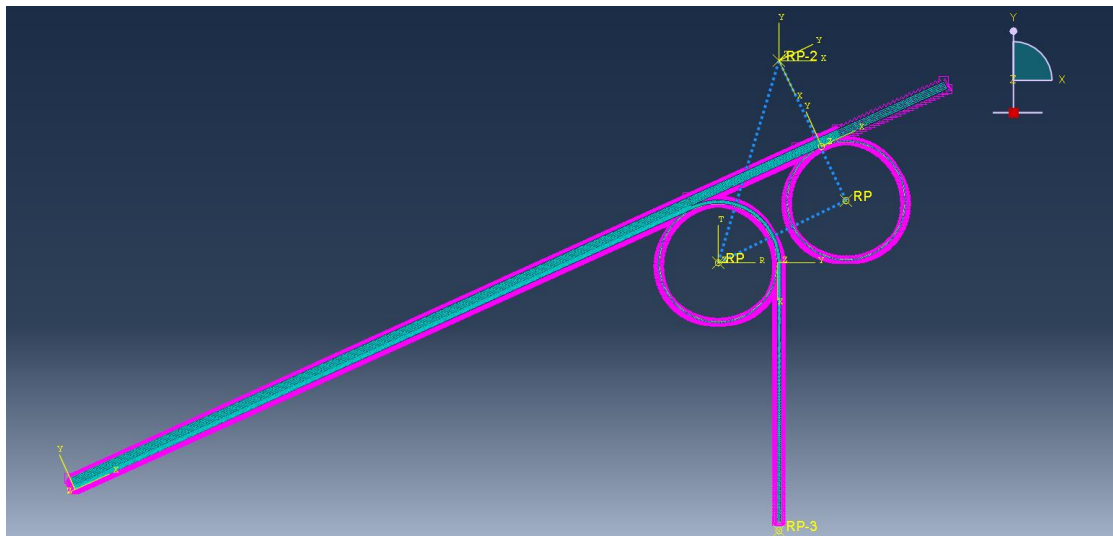


Figura 102 - Sementes utilizadas para a criação da malha em todo o modelo numérico.

A parte superior direita do aderente rígido foi modelada com elementos de 1 mm de tamanho de aresta (Figura 103), pois tal dimensão não irá influenciar na análise efetuada, pelo que é possível manter a fiabilidade dos resultados obtidos e diminuir o poder computacional exigido durante a simulação numérica.

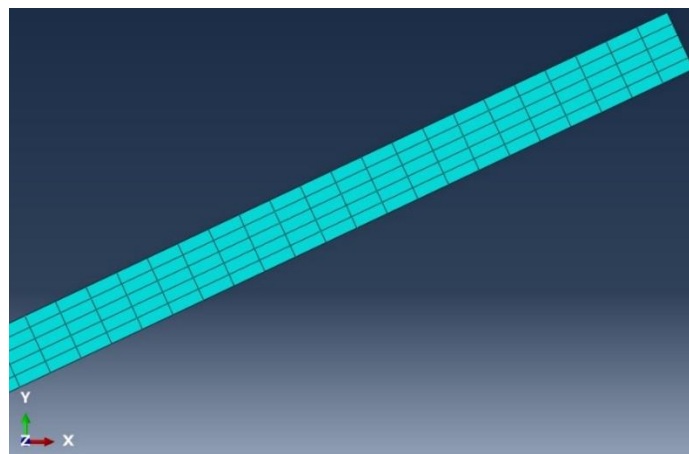


Figura 103 - Malha aplicada na secção superior do aderente rígido.

A Figura 104 indica a malha final aplicada ao provete e os roletes de fixação.

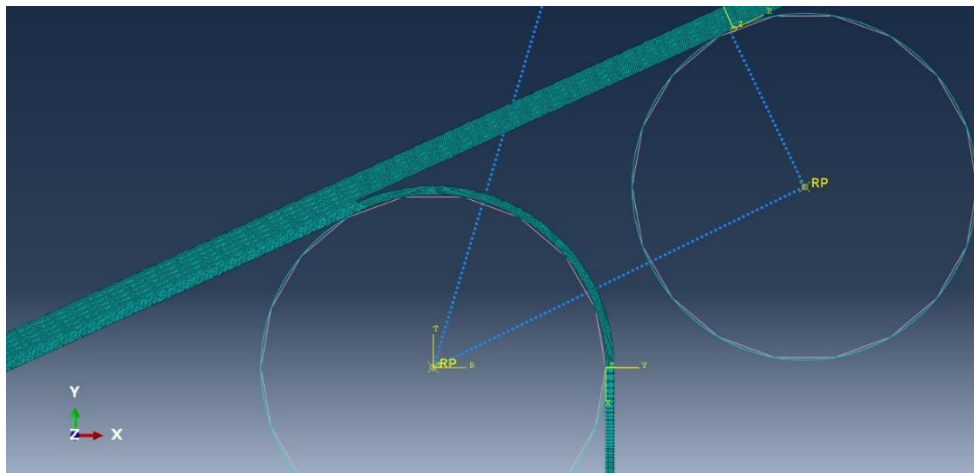


Figura 104 - Malha aplicada na simulação numérica do ABAQUS®.

- *Job*

O módulo *job* permite submeter o modelo numérico para análise. Através da janela *create job* é definido o nome da análise e podem ser alterados os parâmetros computacionais. A Figura 105 indica a configuração computacional utilizada para simular os ensaios numéricos, em que no comando *memory* é indicada a percentagem de memória a ser alocada para as simulações numéricas e no comando *parallelization* é indicado a quantidade de processadores a serem utilizados para a simulação.

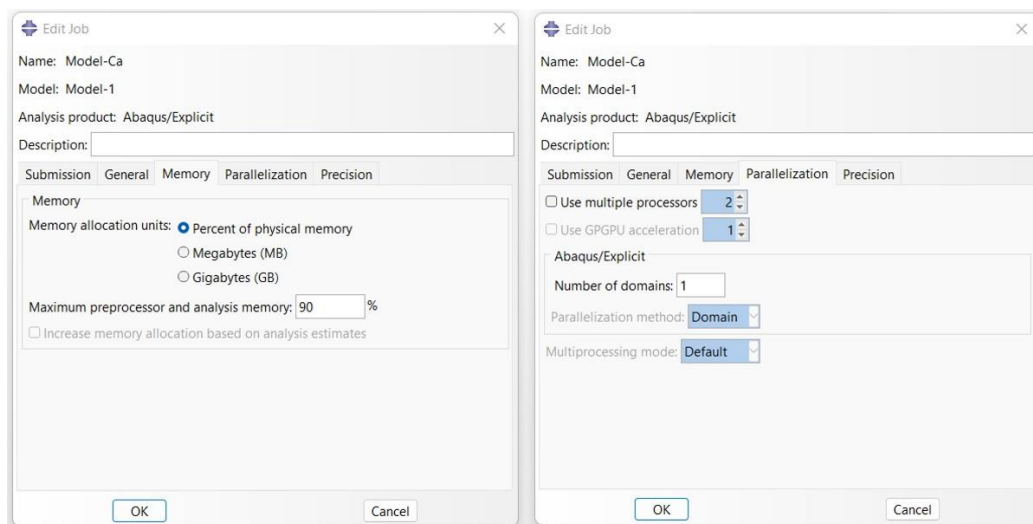


Figura 105 - Definição do módulo *job* no ABAQUS®.

As simulações foram realizadas num computador da marca MSI, modelo GF63 8RC com processador Intel® I7 oitava geração e 8 GB de memória RAM. Como mencionado anteriormente, não foram utilizados os módulos *optimization* e *sketch* na modelação numérica desenvolvida nesta tese.

3.2.3 Modelo de dano coesivo

Os modelos de dano coesivo permitem caracterizar o crescimento do dano na interface entre o adesivo e o aderente ou em regiões maciças de adesivo. Devido à relação entre tensões e deslocamentos referente aos nós dos elementos coesivos é possível simular o comportamento elástico do adesivo até a sua resistência máxima e conseqüentemente a degradação das suas propriedades até a rotura. Desta forma, é replicado o ensaio com rotura gradual do adesivo até a separação dos aderentes, e torna-o possível também obter a curva $P/b-\delta$ do ensaio, cuja comparação com a curva experimental permite aferir o dano da modelação [48].

3.2.3.1 Modelo coesivo triangular

Conforme mencionado no subcapítulo 2.4.3, a lei triangular, quando comparada com a lei exponencial, é mais utilizada devido à sua simplicidade, por ter poucas variáveis a serem definidas e, na maioria das condições reais, apresentar resultados precisos [69]. A Figura 106 apresenta o modelo triangular em 2D. A lei de modo puro é a lei de maiores dimensões e a lei de modo misto a de menores dimensões.

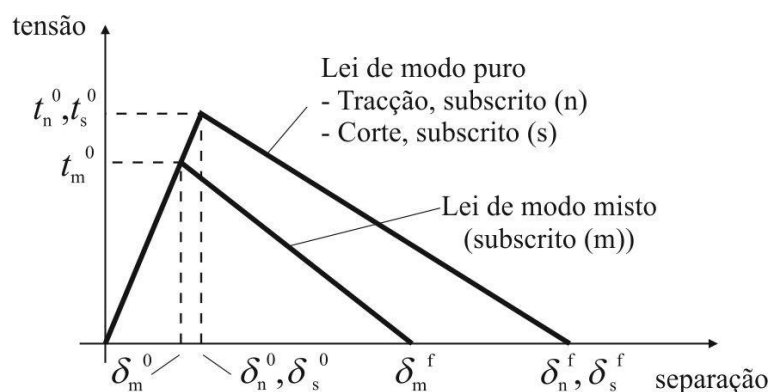


Figura 106 - Modelo triangular em 2D para o modelo de dano coesivo [81].

Para a lei de modo misto aplicam-se os critérios de tensão e energéticos para combinar a tração e corte, a fim de caracterizar o início e crescimento do dano. Já para a lei de modo puro o crescimento do dano acontece num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva respetiva [98]. Através da cinemática do elemento é possível caracterizar a deformação de tração e de corte dos elementos coesivos.

A matriz K (equação (12)) define a relação entre trações e deformação no regime linear elástico.

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_n \\ \boldsymbol{\varepsilon}_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}\boldsymbol{\varepsilon}. \quad (12)$$

A matriz \mathbf{K} (12) inclui parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. No caso de uma formulação local, esta pode ser usada para simular as fraturas de espessura nula, em que os parâmetros da matriz possuem valores demasiado elevados, a fim de não haver deformações na estrutura induzida pela presença de elementos coesivos [82]. Segundo o estudo de Campilho et al. [98], é adequado utilizar a aproximação $K_m=E$, $K_{ss}=G$, $K_{ns}=0$ para formulação de camadas finas.

Em modo misto, é recomendado utilizar o critério da tensão nominal quadrática (equação (13)) para definir o início da propagação do dano [98].

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_m^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (13)$$

Ao alcançar a resistência coesiva em modo misto (t_m^0), ao atingir a igualdade da equação (13), a rigidez do material começa a sofrer uma perda de rigidez progressiva (amaciamento). A separação completa do par de nós homólogos (δ_m^f na Figura 106) é prevista por um critério linear energético, de acordo com os valores de G_{Ic} e G_{IIc} (equação (14))

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} = 1. \quad (14)$$

3.2.3.2 Determinação das propriedades coesivas

Atualmente, para determinar as propriedades coesivas de um adesivo são utilizados os ensaios DCB, ENF ou JSS, que permitem obter resultados fiáveis [47]. Existem três métodos para identificar as propriedades coesivas, o método direto, o método inverso ou a técnica de identificação das propriedades. No método direto os parâmetros da lei coesiva são calculados separadamente com o respetivo ensaio mais adequado, e são determinados pela diferenciação de G_{Ic} ou G_{IIc} com a respetiva iniciação da fratura. No método inverso os parâmetros são estimados através da aproximação entre as curvas $P/b-\delta$ do ensaio numérico com o ensaio experimental, enquanto na técnica de identificação das propriedades é feito o calculo para cada um dos parâmetros individualmente [47].

Neste trabalho, as propriedades coesivas utilizadas para o adesivo Araldite® AV138 foram determinadas no estudo feito por Campilho et al. [82]. O estudo utilizou o método inverso para obter os resultados, que se mostrou eficaz para obtenção dos parâmetros. A Tabela 28 indica os parâmetros coesivos utilizados neste trabalho para o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 28 - Propriedades coesivas do adesivo Araldite® AV138 com t_a de 0,2 mm [82].

E (GPa)	G (GPa)	t_n^0 (MPa)	t_s^0 (MPa)	G_{Ic} (MPa)	G_{IIc} (N/mm)
4,890	1,560	39,45	30,2	0,2	0,38

3.2.4 Ensaios preliminares

Durante a realização desta tese, foram realizadas diversas modelações numéricas na tentativa de alcançar os melhores resultados possíveis, conforme se descreve no presente capítulo.

Iniciou-se o estudo com a ideia de simular o ensaio numérico do *floating roller peel* com ambos os roletes de fixação devido ao facto de, até o presente momento, não serem encontrados estudos numéricos similares, apesar de se considerar que esta é a melhor aproximação ao ensaio real. O estudo desenvolvido por Dicosta et al. [46] utiliza somente um rolete e aplica uma condição fronteira sobre a face superior do aderente rígido, o que limita o comportamento do rolete existente e inibe a presença do segundo rolete. Portanto, dada a escassez de informação disponível, optou-se por desenvolver uma nova modelação numérica que incluía os dois roletes do acessório de fixação utilizado no ensaio experimental.

As primeiras simulações foram testadas utilizando uma análise implícita (Abaqus *standard*), por ser mais simples e comum para carregamentos estáticos. No entanto, não foi possível obter convergência na fase de propagação da fenda dos modelos com substrato de materiais compósitos, pelo que se utilizou o procedimento *explicit*, que também pode ser utilizado para simulações quasi-estáticas. Desta forma foi possível simular os provetes em todas as configurações.

Foi analisado o comportamento dos provetes sob a ação de um deslocamento. No entanto, como dito anteriormente, em alguns provetes o aderente flexível comportava-se de uma forma inesperada, já que este tocava o segundo rolete de fixação e o provete tendia a subir, assim o contacto entre o aderente rígido e o segundo rolete de fixação também era perdido (Figura 92). Portanto, foram simulados os provetes sob ação de uma força, inicialmente definida como -1000 N. Após diversas simulações e análises de resultados constatou-se que a força ideal a ser aplicada para todas as configurações simuladas seria de -250 N. A Figura 107 mostra o procedimento seguido para a definição do modelo base do ensaio *floating roller peel* desde o início do estudo, e mostra que, para a abordagem utilizada, a força de -250 N é a mais indicada.

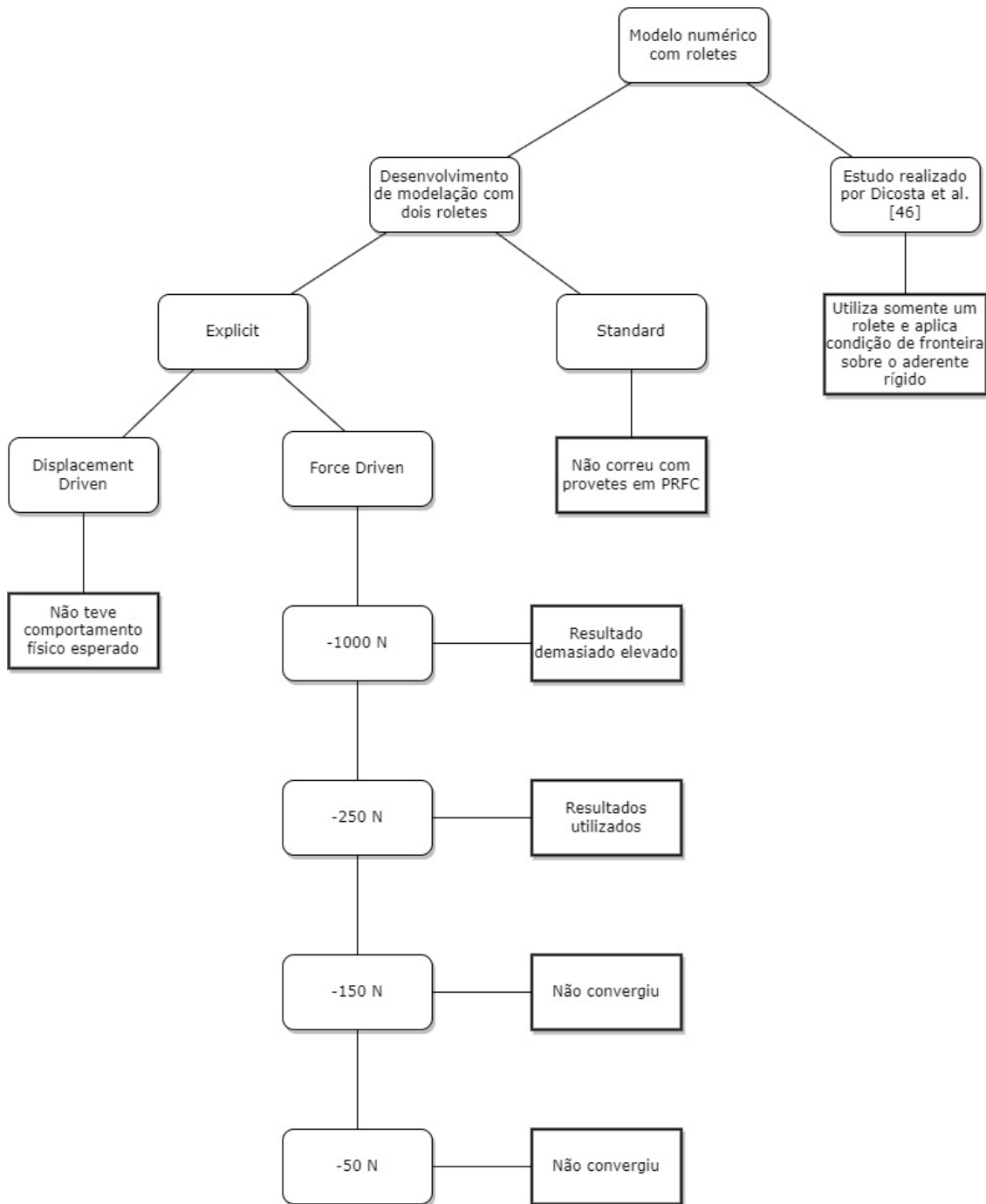


Figura 107 - Fluxograma do estudo e simulações realizadas.

Após estabelecidos todos os parâmetros da simulação numérica, foi feita uma comparação entre o modelo numérico desenvolvido nesta dissertação e o modelo desenvolvido no estudo de Dicosta et al. [46]. A Figura 108 permite efetuar esta comparação: a) representa o modelo desenvolvido nesta dissertação e b) o modelo desenvolvido por Dicosta et al. [46].

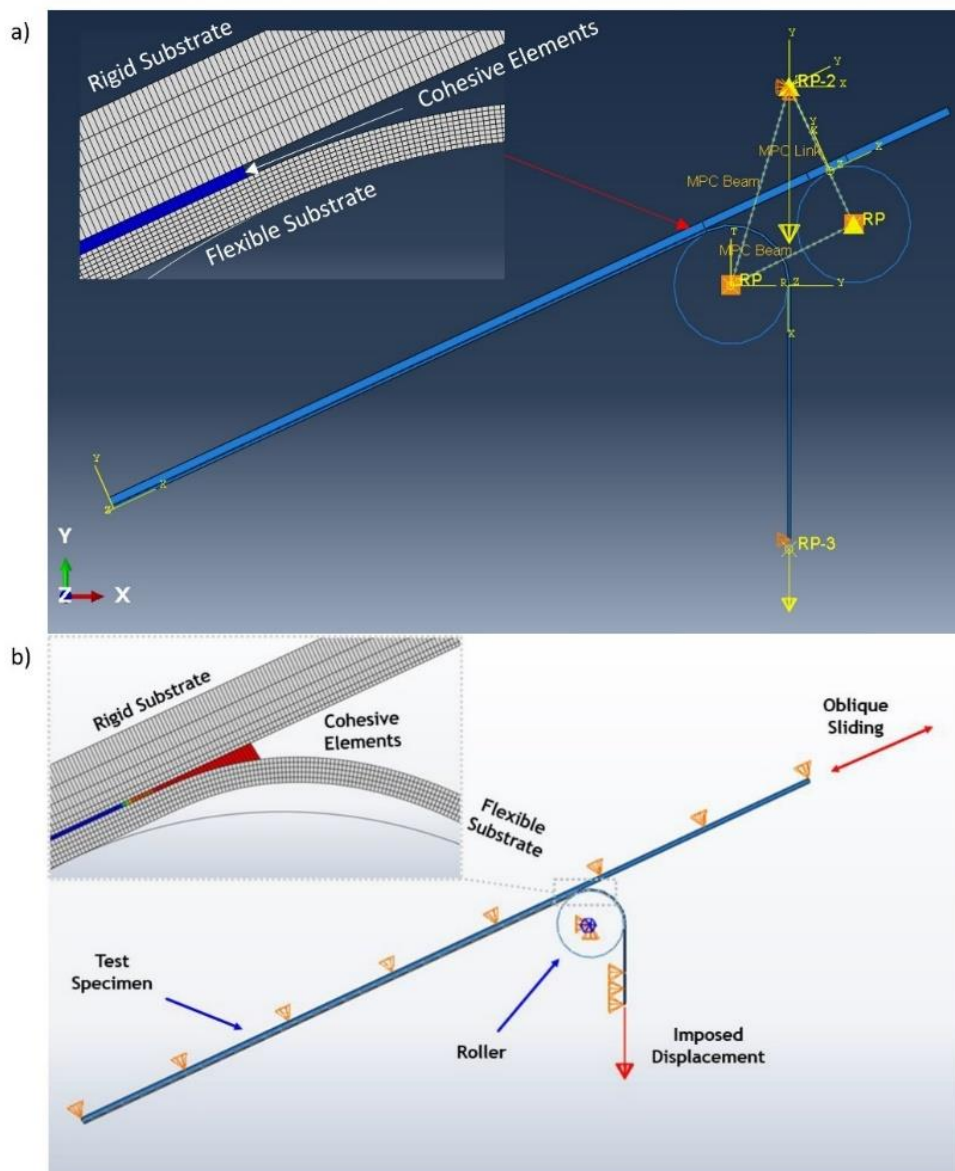


Figura 108 - Comparação entre modelos numéricos desenvolvidos para o ensaio *floating roller peel*: a) modelo desenvolvido neste trabalho e b) modelo desenvolvido por [46].

Ao analisar a figura observa-se que o modelo desenvolvido por Dicosta et al. [46] possui algumas simplificações, tais como a utilização de somente um rolete de fixação, a aplicação da condição fronteira na face superior do aderente rígido e a não consideração do acessório utilizado no ensaio experimental. Em contraste, o modelo desenvolvido nesta dissertação inclui os dois roletes de fixação e respectiva ferramenta de ligação, aplicação da gravidade, inércia dos roletes, massa de cada material e condições fronteira somente no ponto de apoio do acessório e na base do aderente flexível, para que o comportamento físico do provete seja o mais próximo possível ao comportamento físico do ensaio experimental. Em resumo, a Tabela 29 indica as configurações aplicadas para a simulação numérica criada nesta tese.

Tabela 29 - Configuração dos provetes utilizados na simulação numérica do ABAQUS®.

Configuração	Modelo
Procedimento	<i>Dynamic Explicit</i>
Time Step	0,01
Frequência de dados	0,00005
Contactos	<i>Penalty com finite sliding, Frictionless, Hard Contact</i>
Conexões	<i>Beam e hinge</i>
Carregamento	-250 N
Malha	Tamanho das arestas de 0,1 mm
Tipo de elemento	<i>Plane stress</i>

3.2.5 Resultados

Neste subcapítulo são abordados os resultados obtidos dos ensaios numéricos realizados, que incluem o modo de rotura, as curvas $P/b-\delta$ e por fim a análise comparativa das simulações numéricas com os resultados experimentais.

Ao fim do ensaio *floating roller peel* numérico, foram rejeitados os dados dos deslocamentos obtidos antes dos primeiros 25,4 mm e analisados os dados contidos num intervalo superior a 76,2 mm, conforme indicado pela norma ASTM D3167 [34].

3.2.5.1 Modos de rotura

Nas simulações numéricas realizadas no ABAQUS®, observou-se uma rotura coesiva do adesivo em todas as configurações dos provetes ensaiados, o que é condição necessária para retratar o comportamento ao arrancamento real do adesivo. A Figura 109 mostra a fase inicial de rotura do adesivo ao longo do ensaio numérico. A variável de dano SDEG avalia a degradação dos elementos coesivos, sendo igual a 1 quando ocorre a rotura total do elemento e igual a 0 quando os elementos do adesivo não sofreram dano. Em todos os modelos numéricos desenvolvidos considerou-se que, quando um determinado elemento coesivo atingisse a rotura, este seria removido da simulação.

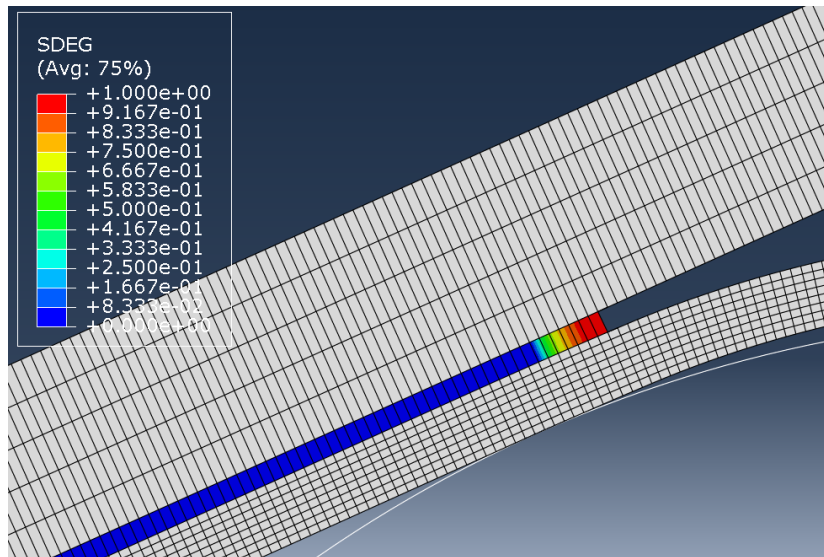


Figura 109 - Variável SDEG utilizada nas simulações numéricas no ABAQUS®.

3.2.5.2 Curvas $P/b-\delta$

As curvas $P/b-\delta$ foram utilizadas para traçar o gráfico da resistência de arrancamento (P/b) em função do deslocamento (δ), em que P/b é calculado através da divisão da força de arrancamento (P) pela largura do provete.

Todas as curvas $P/b-\delta$ obtidas para cada configuração de provete foram analisadas em simultâneo com o comportamento físico do provete (Figura 110) durante todo o ensaio numérico, a fim de verificar possíveis comportamentos anormais e consequentemente evitar a obtenção de resultados imprecisos. De seguida, apresentam-se os resultados obtidos divididos por configuração de junta.

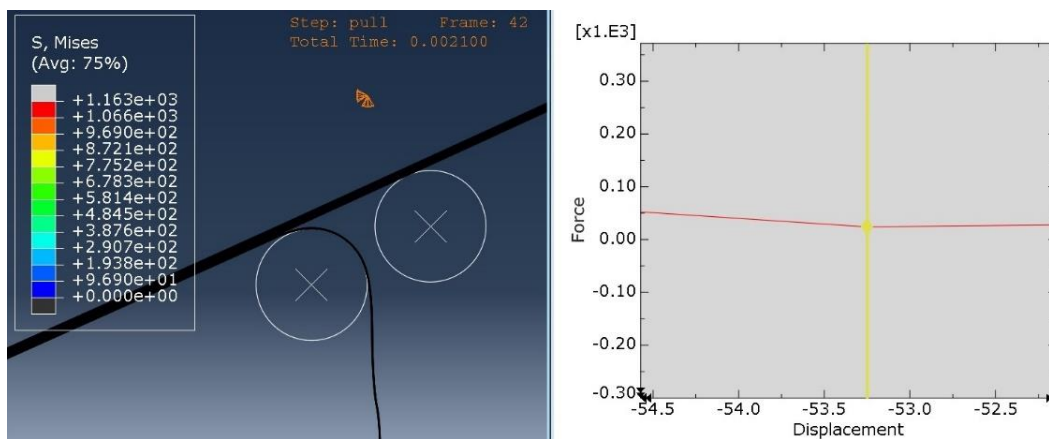


Figura 110 - Relação entre a curva $P/b-\delta$ obtida e o comportamento do provete durante a simulação numérica.

3.2.5.2.1 Provete A-a

A Figura 111 mostra a curva $P/b-\delta$ obtida por meio do ensaio numérico para o provete de configuração A-a. Ao analisar a curva $P/b-\delta$, nota-se que esta apresenta pouca variação ao longo do ensaio e para aproximadamente 59 mm de deslocamento o valor de P/b aumenta até atingir o valor máximo de 2,20 N/mm. A curva $P/b-\delta$ numérica teve uma média de P/b de 1,90 N/mm. Os valores registados nos dois primeiros valores mais baixos da curva $P/b-\delta$, entre 28 e 55 mm de deslocamento, com P/b de 1,79 N/mm e P/b de 1,76 N/mm, respetivamente referem-se ao movimento do aderente rígido em relação ao aderente flexível durante o arrancamento do adesivo.

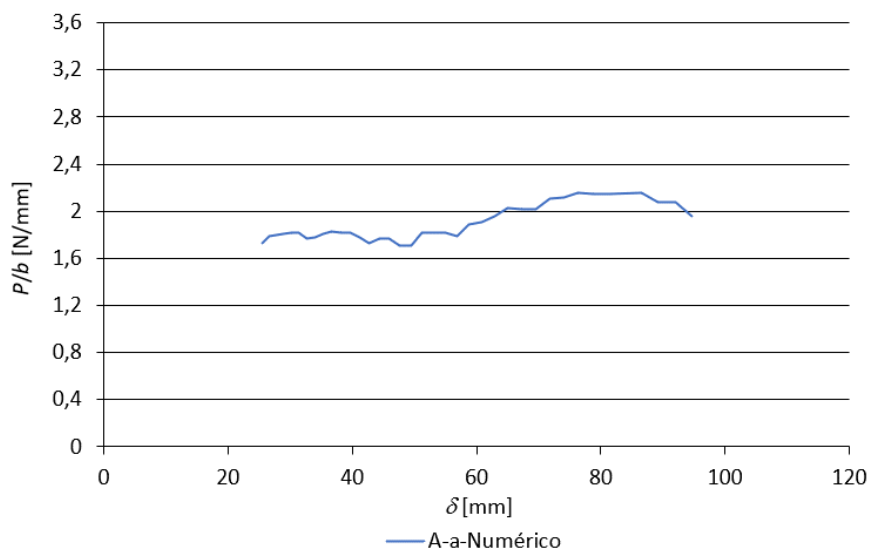


Figura 111 - Curva $P/b-\delta$ extraída do ensaio numérico para o provete A-a.

A Tabela 30 resume os resultados obtidos do ensaio *floating roller peel* numérico para o provete A-a.

Tabela 30 - Resultados obtidos do ensaio numérico para o provete A-a.

Parâmetro	Resultado obtido
$P_{\text{médio}}$ (N)	47,49
$P_{\text{máximo}}$ (N)	55,20
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	44,76
P/b (N/mm)	1,90

3.2.5.2.2 Provete A-c-0

A Figura 112 apresenta a curva $P/b-\delta$ numérica para a configuração A-c-0. Depreende-se que esta inicia com $P/b=1,27$ N/mm, o valor mais reduzido de todo o ensaio. Com o aumento do deslocamento os valores de P/b tendem a aumentar até aproximadamente 57 mm de deslocamento, ponto o qual é atingido o pico mais elevado com P/b de 1,7 N/mm. O pico seguinte, para aproximadamente 66 mm de deslocamento, também corresponde ao mesmo valor de P/b obtido ao pico mais elevado. Após este ponto, os valores de P/b tendem a reduzir até aproximadamente 87 mm de deslocamento. Este comportamento ocorre devido à alteração do ângulo de arrancamento, causado pelo movimento do aderente flexível sobre o primeiro rolete de fixação.

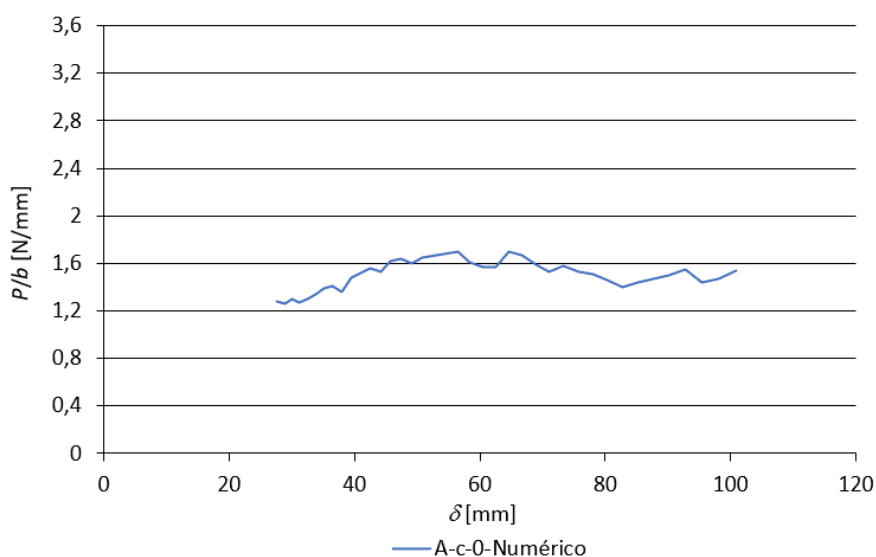


Figura 112 - Curva $P/b-\delta$ extraída do ensaio numérico para o provete A-c-0.

O resultado médio obtido para P/b referente à curva $P/b-\delta$ do ensaio numérico para o provete de configuração A-c-0 foi de 1,56 N/mm. A Tabela 31 resume os resultados obtidos do ensaio *floating roller peel* numérico para o provete A-c-0.

Tabela 31 - Resultados obtidos do ensaio numérico para o provete A-c-0.

Parâmetro	Resultado obtido
$P_{\text{médio}}$ (N)	38,98
$P_{\text{máximo}}$ (N)	42,50
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	31,73
P/b (N/mm)	1,56

3.2.5.2.3 Provete A-c-90

A Figura 113 diz respeito à curva $P/b-\delta$ obtida por meio do ensaio numérico para a configuração A-c-90. Ao analisar a curva $P/b-\delta$ pode-se constatar que esta se mantém estável até aproximadamente 70 mm de deslocamento. Após este ponto o valor de P/b atinge o pico mais elevado, com 1,89 N/mm para aproximadamente 86 mm de deslocamento. O valor de $P/b_{\text{médio}}$ obtido para a curva $P/b-\delta$ foi de 1,68 N/mm. É também possível observar que os picos mais elevados de P/b ocorrem à medida que o ensaio se aproxima do fim. Tal variação pode estar relacionada com o aumento do ângulo de arrancamento entre o aderente flexível e o adesivo.

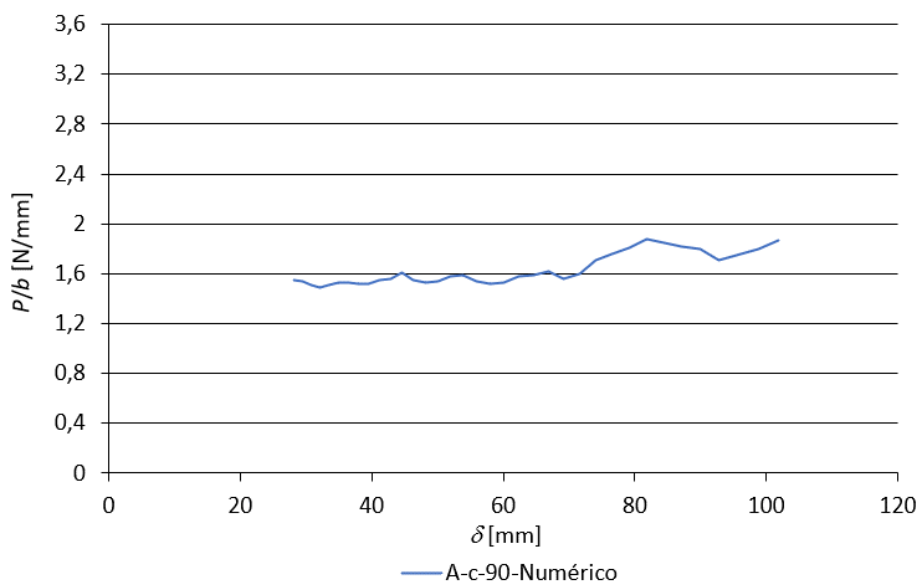


Figura 113 - Curva $P/b-\delta$ extraída do ensaio numérico para o provete A-c-90.

A Tabela 32 indica os resultados obtidos do ensaio *floating roller peel* numérico para o provete A-c-90.

Tabela 32 - Resultados obtidos do ensaio numérico para o provete A-c-90.

Parâmetro	Resultado obtido
$P_{\text{médio}}$ (N)	42,00
$P_{\text{máximo}}$ (N)	47,42
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	38,69
P/b (N/mm)	1,68

3.2.5.2.4 Provete C-c-0

A Figura 114 apresenta a curva $P/b-\delta$ obtida por meio do ensaio numérico para a configuração C-c-0. Ao analisar a curva $P/b-\delta$ pode-se constatar que esta segue um padrão constante até aproximadamente 57 mm de deslocamento. O valor médio de P/b foi de 0,98 N/mm e observa-se que, após 57 mm de deslocamento, os valores de P/b são reduzidos até atingir um valor mínimo de 0,77 N/mm para aproximadamente 79 mm de deslocamento. Após valor mínimo indicado os valores de P/b tendem a subir novamente até aproximadamente o fim do ensaio. Pelo facto de tal configuração ser elaborada com dois substratos de rigidez muito elevada, este provete teve um comportamento mais instável ao contacto, quando comparado com provetes com substrato de rigidez inferior, ao contacto entre os roletes e os substratos.

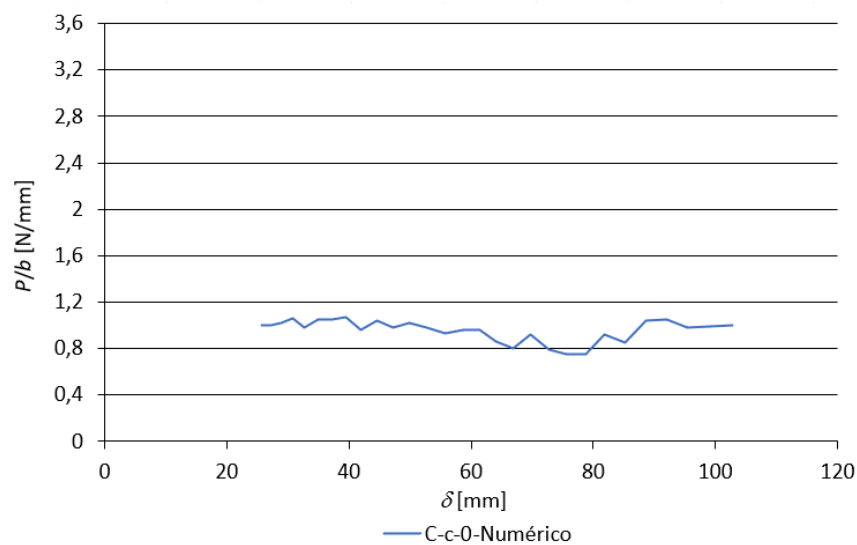


Figura 114 - Curva $P/b-\delta$ extraída do ensaio numérico para o provete C-c-0.

A Tabela 33 resume os resultados obtidos do ensaio *floating roller peel* numérico para o provete C-c-0.

Tabela 33 - Resultados obtidos do ensaio numérico para o provete C-c-0.

Parâmetro	Resultado obtido
$P_{\text{médio}}$ (N)	24,50
$P_{\text{máximo}}$ (N)	26,61
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	19,43
P/b (N/mm)	0,98

3.2.5.2.5 Provete C-c-90

A Figura 115 mostra a curva $P/b-\delta$ obtida numericamente para a configuração C-c-90. É de realçar que a curva $P/b-\delta$ inicia com valores de P/b menores aos obtidos ao fim do ensaio numérico. O valor mais inferior registado para P/b de 0,95 N/mm ocorreu para aproximadamente 69 mm de deslocamento. No entanto, o último ponto registado no ensaio teve um valor de 1,59 N/mm. Tal diferença entre o valor mais elevado e o mais baixo pode estar associada à rigidez do aderente flexível, visto que durante todo o ensaio numérico houve sempre o contacto dos aderentes a ambos os roletes de fixação. O valor de $P/b_{\text{médio}}$ obtido através da curva $P/b-\delta$ do provete C-c-90 foi de 1,26 N/mm.

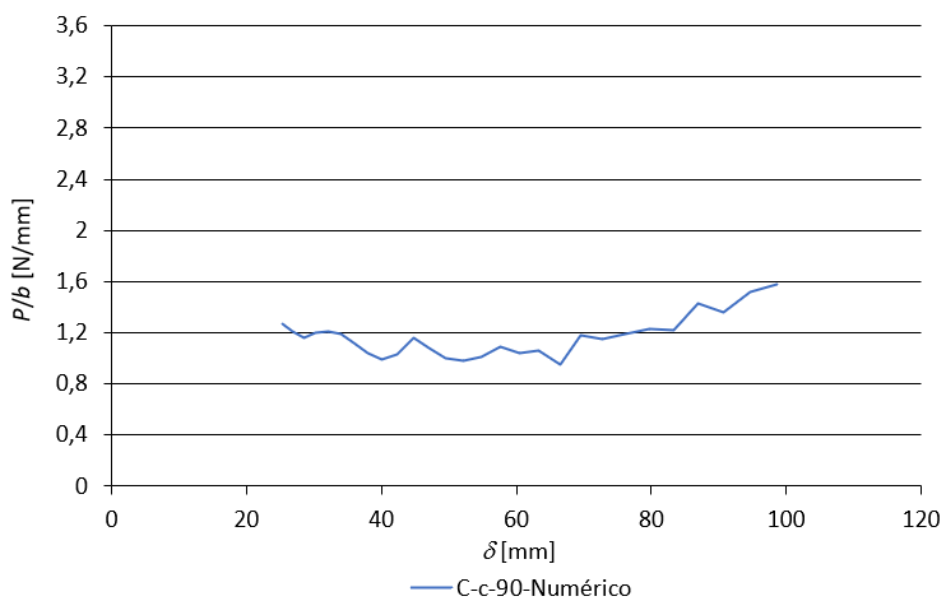


Figura 115 - Curva $P/b-\delta$ extraída do ensaio numérico para o provete C-c-90.

A Tabela 34 resume os resultados obtidos do ensaio *floating roller peel* numérico para o provete C-c-90.

Tabela 34 - Resultados obtidos do ensaio numérico para o provete C-c-90.

Parâmetro	Resultado obtido
$P_{\text{médio}}$ (N)	31,49
$P_{\text{máximo}}$ (N)	39,76
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	23,74
P/b (N/mm)	1,26

3.2.5.2.6 Provete C-a

A Figura 116 apresenta a curva $P/b-\delta$ obtida por meio do ensaio numérico para a configuração C-a. Ao analisar a curva $P/b-\delta$ pode-se verificar que esta tende a estabilizar entre aproximadamente 70 mm de deslocamento até o fim do ensaio numérico. Os valores de P/b obtidos no início do ensaio são mais elevados do que os resultados obtidos após a estabilização. No entanto, a diferença de P/b entre o valor mais elevado e o inferior não é muito acentuada. O valor médio obtido para P/b através da curva $P/b-\delta$ foi de 1,38 N/mm. O valor máximo ocorreu no início da curva $P/b-\delta$, para aproximadamente 39 mm de deslocamento, com P/b de 1,67 N/mm e o valor de P/b mais reduzido corresponde a aproximadamente 83 mm de deslocamento, com P/b de 1,25 N/mm.

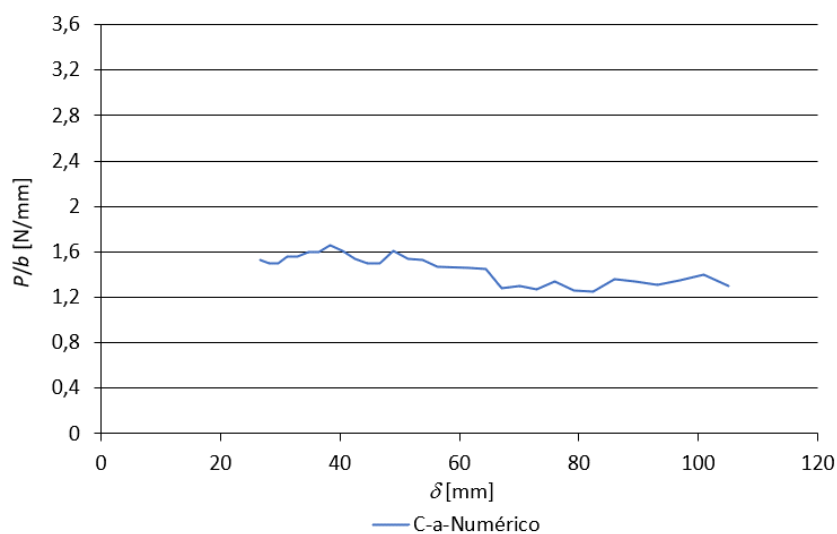


Figura 116 - Curva $P/b-\delta$ extraída do ensaio numérico para o provete C-a.

A Tabela 35 indica os resultados obtidos do ensaio *floating roller peel* numérico para o provete C-a.

Tabela 35 - Resultados obtidos do ensaio numérico para o provete C-a.

Parâmetro	Resultado obtido
$P_{\text{médio}}$ (N)	34,49
$P_{\text{máximo}}$ (N)	41,78
$P_{\text{mínimo}}$ (N)	31,42
P/b (N/mm)	1,38

3.2.5.3 Análise comparativa

Primeiramente é feita uma comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através ensaio experimental e numérico e seguidamente é feita uma comparação entre os valores de $P/b_{\text{médio}}$. A Figura 117 apresenta a comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para os provetes de configuração A-a.

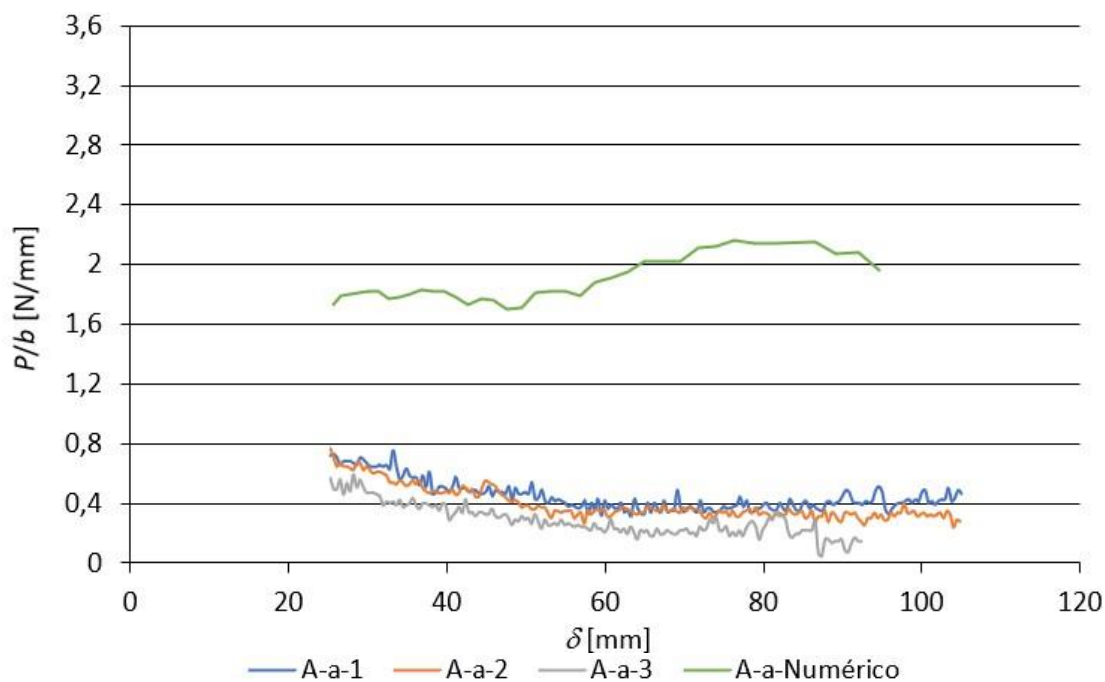


Figura 117 - Comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para o provete A-a.

Ao analisar o gráfico é possível notar que nos ensaios experimentais as curvas $P/b-\delta$ tendem a estabilizar para aproximadamente 60 mm de deslocamento. No entanto, no ensaio numérico a curva $P/b-\delta$ mantém-se estável até aproximadamente 60 mm e seguidamente os valores de P/b tendem a subir, comportamento também observado no provete A-a-1 do ensaio experimental. O provete A-a-2 e A-a-3 podem não ter seguido o mesmo padrão do provete A-a-1 e do ensaio numérico devido à presença de rotura adesiva para o provete A-a-2 e a ocorrência de uma rotura precoce, que apresentou apenas 93 mm de deslocamento para o provete A-a-3.

Para o ensaio experimental de configuração A-a o valor médio de P/b foi 0,375 N/mm, enquanto para o ensaio numérico o resultado obtido foi de 1,9 N/mm, o que representa uma variação percentual de 406,6%. Apesar de os resultados terem sido diferentes, ambos os resultados foram os mais elevados entre as configurações de juntas adesivas analisadas. Uma justificação para a variação entre os resultados seria a presença de 30% de rotura adesiva nos ensaios experimentais, o que reduz os valores de força de arrancamento obtidos [38]. Por outro lado, o resultado numérico obtido é bastante similar ao indicado na ficha técnica do adesivo Araldite® AV138 com endurecedor HV

998 [99] que refere um $P/b_{\text{médio}}$ de 1,80 N/mm para rotura coesiva do adesivo, o que sugere a correção dos resultados numéricos.

A Figura 118 apresenta a comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para os provetes de configuração C-a.

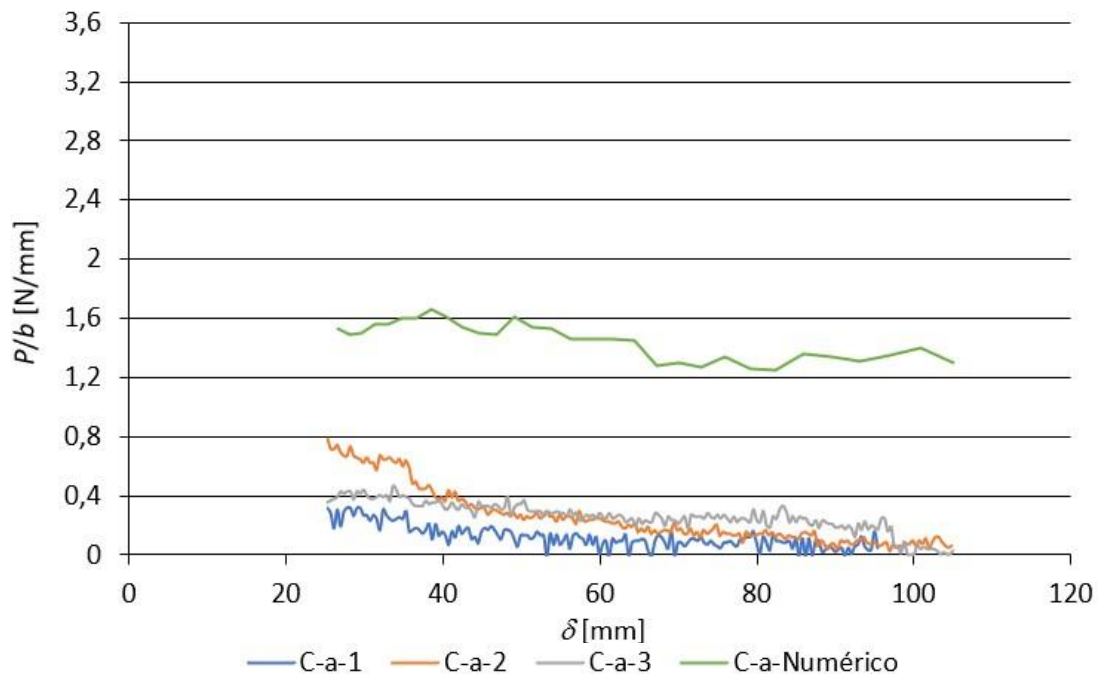


Figura 118 - Comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para o provete C-a.

Ao analisar as curvas $P/b-\delta$ dos provetes C-a, pode-se verificar que a curva $P/b-\delta$ numérica segue o mesmo padrão das curvas $P/b-\delta$ experimentais, sendo valores de P/b ligeiramente superiores no início do ensaio e o início da estabilização para aproximadamente para 70 mm de deslocamento.

Ao analisar os resultados experimentais obtidos para o provete de configuração C-a, verifica-se que o valor médio de P/b de 0,210 N/mm, em contraste com o resultado numérico de 1,38 N/mm, o que representa uma variação percentual de 557,14%. Tal diferença pode ser justificada pelo facto de a rotura ter ocorrido muito próxima da interface entre o adesivo e o substrato flexível, o que pode influenciar na resistência ao arrancamento obtida e a outra razão seria a presença de força de arrancamento nula nos provetes C-a-1 e C-a-3.

A Figura 119 apresenta a comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para os provetes de configuração A-c-0.

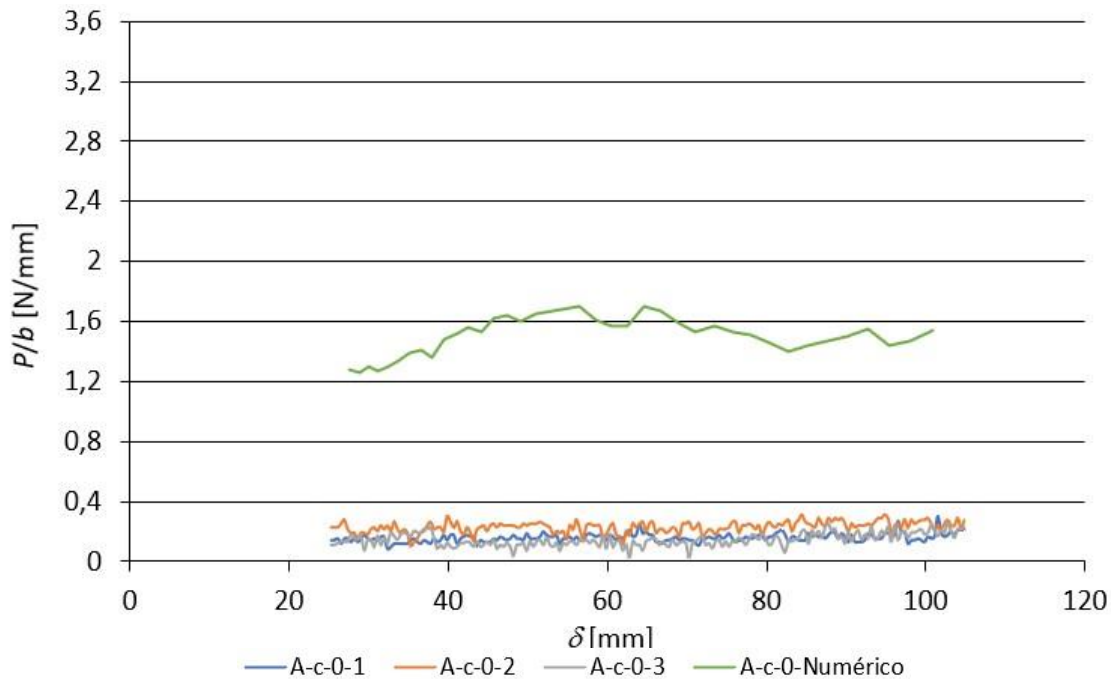


Figura 119 - Comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para o provete A-c-0.

Quando é analisado o gráfico para a configuração A-c-0 é possível notar que, nos ensaios experimentais, as curvas $P/b-\delta$ se mantêm estáveis durante todo o ensaio. Porém o mesmo não ocorre durante o ensaio numérico, uma vez que os valores medidos de P/b tendem a aumentar até atingir os valores mais elevados entre 50 e 70 mm de deslocamento.

Ao comparar os resultados de A-c-0 experimental e numérico, nota-se que no resultado experimental se obteve um valor inferior de $P/b_{\text{médio}}$ de 0,178 N/mm, e no resultado numérico um valor mais elevado de 1,56 N/mm, o que representa uma variação percentual de 776,40%. Tal diferença entre o $P/b_{\text{médio}}$ pode ser justificada pela presença de rotura adesiva no provete A-c-0-2, para além desta, outra justificação seria a oscilação entre os resultados máximos e mínimos para os provetes experimentais, o que altera a média obtida

A Figura 120 apresenta a comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para os provetes de configuração C-c-0.

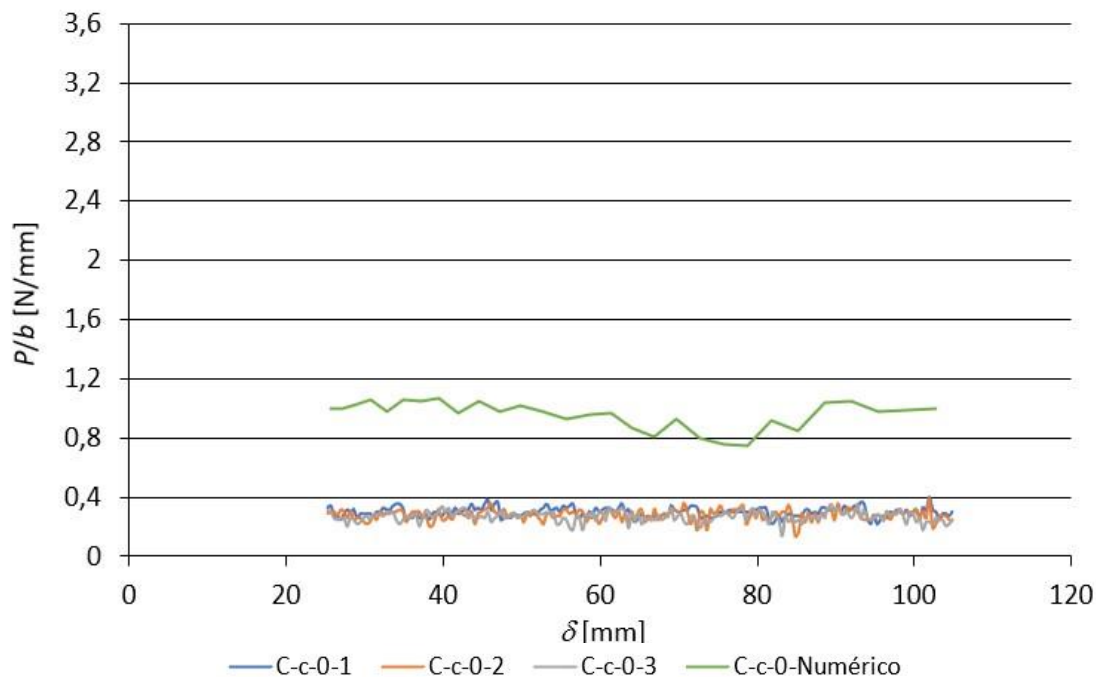


Figura 120 - Comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para o provete C-c-0.

Para o gráfico dos provetes de configuração C-c-0, é possível constatar que as curvas $P/b-\delta$ experimentais e numérica partilham do mesmo padrão de comportamento, já que iniciam estáveis e se mantêm estáveis até a medição do valor mais baixo em aproximadamente 80 mm de deslocamento. Também se nota que, na configuração C-c-0, a curva $P/b-\delta$ numérica aproxima-se mais das curvas $P/b-\delta$ experimental, quando comparada com os outros provetes, em que o valor de $P/b_{\text{médio}}$ experimental obtido foi de 0,281 N/mm e o $P/b_{\text{médio}}$ numérico de 0,98 N/mm, o que representa uma variação percentual de 248,75%.

A diferença entre os resultados $P/b_{\text{médio}}$ experimental e numérico para o provete C-c-0 foi a menor registada entre todas as configurações analisadas, cuja variação pode ser justificado pela presença, mesmo que mínima, de rotura adesiva nos ensaios experimentais, principalmente para o provete C-c-0-3 com 6% de rotura adesiva.

A Figura 121 mostra a comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para os provetes de configuração A-c-90.

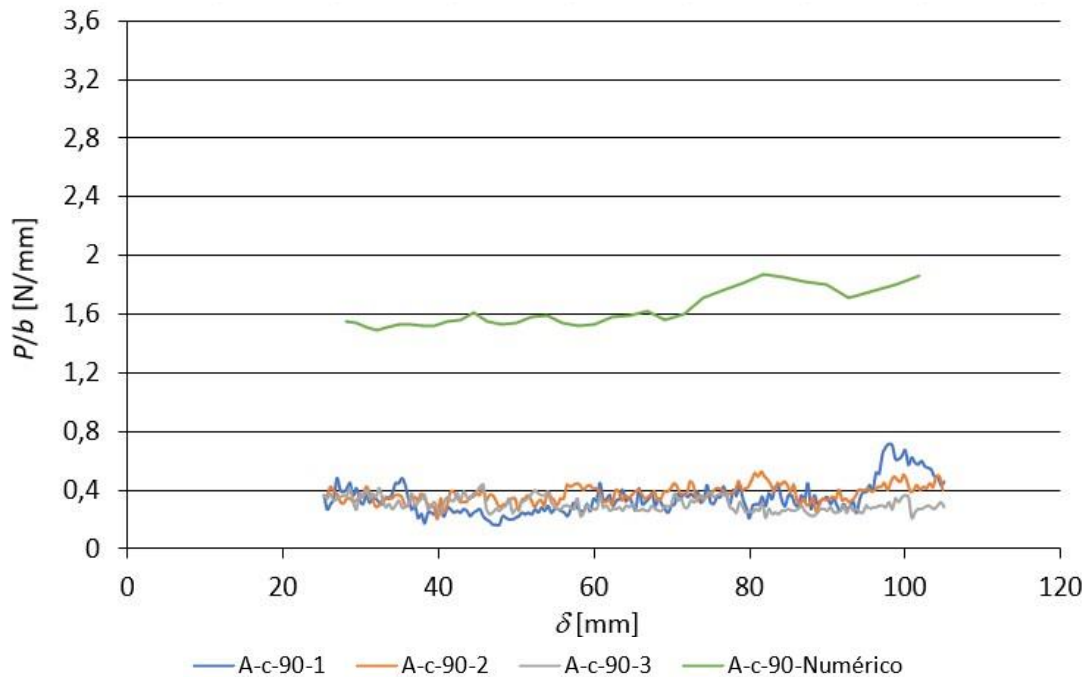


Figura 121 - Comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para o provete A-c-90.

Ao comparar as curvas $P/b-\delta$ obtidas é possível observar que estas iniciam com valores mais estáveis, embora a diferença tenha tendência para aumentar à medida que o ensaio se aproxima do fim. Para o provete A-c-90 numérico é possível notar que, para aproximadamente 86 mm de deslocamento, ocorre o pico mais elevado, similar ao ponto onde ocorre o pico mais elevado para o provete experimental A-c-90-2 para aproximadamente 83 mm de deslocamento. O pico mais elevado para o provete A-c-90-1 ocorre ao fim do ensaio causado pela transição entre a rotura coesiva e a rotura interlaminar ocorrida no adesivo.

Ao comparar os resultados de A-c-90 experimental e numérico, nota-se que no resultado experimental se obteve um valor inferior de $P/b_{\text{médio}}$ de 0,341 N/mm, e no resultado numérico um valor mais elevado de 1,68 N/mm, o que representa uma variação percentual de 392,66%. Tal diferença pode ser explicada devido à presença de uma média de somente 51% de rotura coesiva nos provetes experimentais, em que no provete A-c-90-2 ocorreu 100% de rotura interlaminar.

A Figura 122 mostra a comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para os provetes de configuração C-c-90.

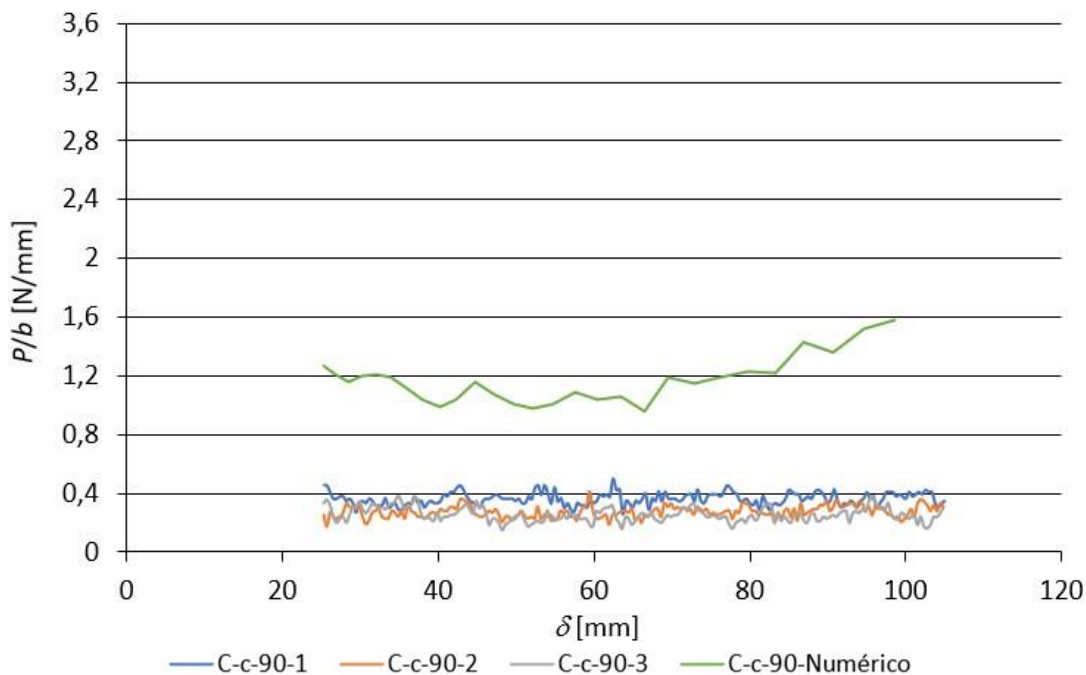


Figura 122 - Comparação entre as curvas $P/b-\delta$ obtidas através do ensaio experimental e numérico para o provete C-c-90.

Ao comparar as curvas $P/b-\delta$ obtidas para os ensaios experimental e numérico nos provetes de configuração C-c-90 é possível notar que, nas curvas $P/b-\delta$ experimentais, é seguido um padrão constante ao longo de todo o ensaio. Por outro lado, no ensaio numérico para aproximadamente 69 mm de deslocamento é registado o valor mais baixo de P/b , que é seguido do aumento gradual de P/b até o fim do ensaio.

Quando comparado os resultados de C-c-90 experimental e numérico, nota-se que no resultado experimental se obteve um valor de $P/b_{\text{médio}}$ de 0,297 N/mm, e no resultado numérico um valor de 1,26 N/mm, o que representa uma variação percentual de 324,24%. Tal diferença pode ser justificada com a presença de somente 4% de rotura coesiva entre os provetes experimentais.

De forma a obter uma melhor comparação entre os resultados numéricos e experimentais para o ensaio *floating roller peel* em todas as configurações simuladas foi criado um gráfico, apresentado na Figura 123, com os respetivos valores de $P/b_{\text{médio}}$. Pode-se observar pelo gráfico que o resultado numérico para a configuração A-a de 1,90 N/mm é o mais elevado, quando comparado com as outras configurações. Já o segundo resultado mais elevado foi obtido para o provete de configuração A-c-90 com 1,68 N/mm. Tal padrão também é observado nos resultados experimentais obtidos por Pereira [81], embora os valores de $P/b_{\text{médio}}$ não terem sido os mesmos.

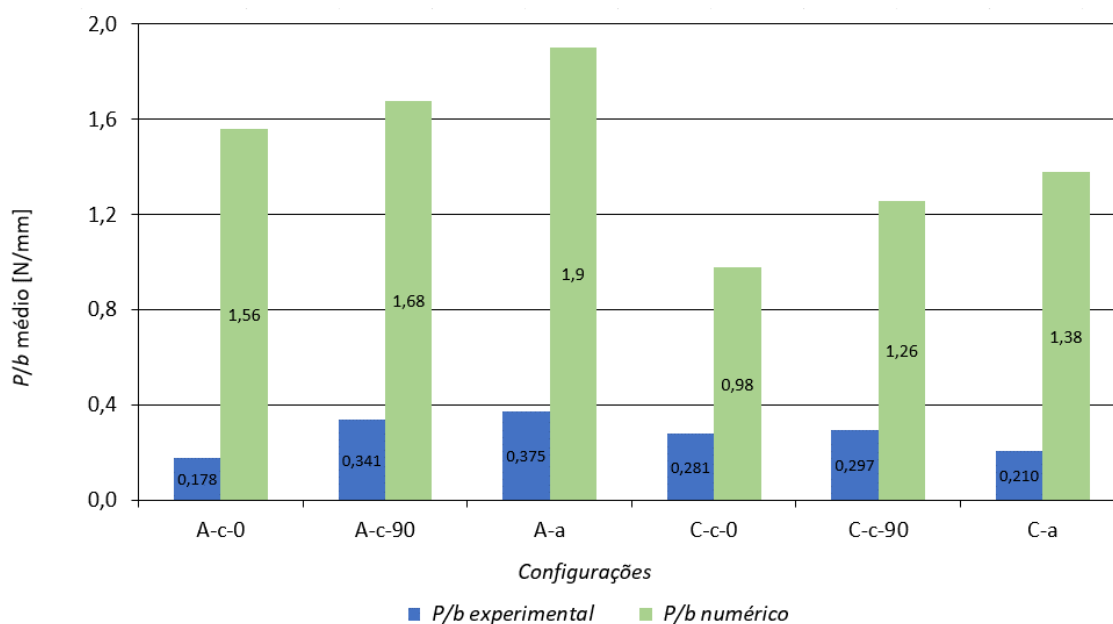


Figura 123 - Resultados obtidos de $P/b_{\text{médio}}$ para os ensaios experimentais e numéricos.

Para perceber quantitativamente a similaridade entre os resultados experimental e numérico foi feita a normalização dos resultados experimental e numérico em função do provete A-a, em que o $P/b_{\text{médio}}$ experimental de 0,375 N/mm corresponde a 100% com relação aos outros resultados experimentais e o $P/b_{\text{médio}}$ numérico de 1,90 N/mm corresponde a 100% com relação aos outros resultados numéricos.

Para o provete de configuração C-c-90 experimental, ao normalizar, obteve-se 79,21% e para o numérico foi obtido 66,31%. O resultado é ainda mais similar para a configuração A-c-90 com 90,93% para o resultado experimental e 88,42% para o resultado numérico.

Ao normalizar os resultados dos provetes C-a experimentais obteve-se 56% e para o numérico de 72,63%. Já para os provetes de configuração A-c-0 experimentais a diferença foi de 47,46% e para o numérico de 82,14%. Para os provetes de configuração C-c-0 experimentais observou-se uma variação de 74,93% e para o numérico de 51,57%.

Através da normalização dos resultados também é possível notar que, nos ensaios numéricos, nas configurações fabricadas com alumínio, a resistência ao arrancamento é superior. Tal resultado era esperado, visto que para o adesivo Araldite® AV138 as juntas fabricadas com PRFC possuem resistência ao arrancamento inferior [100].

Ainda ao analisar o gráfico apresentado na Figura 123, nota-se que os valores de $P/b_{\text{médio}}$ são superiores nas configurações dos provetes A-a, A-c-90 e C-c-90 já que o aderente flexível é menos rígido e permite uma rotura mais gradual e com menos gradientes de tensão na zona de arrancamento. Tais resultados eram esperados devido à diminuição da resistência ao arrancamento causada aumento da rigidez do material utilizado para o aderente flexível [16].

A Figura 124 mostra uma comparação entre o comportamento físico do ensaio *floating roller peel* experimental e numérico para a configuração A-a, em que a.1 indica o início do ensaio experimental, a.2 o ensaio após alguns milímetros de arrancamento e a.3 momentos antes do fim do ensaio, o mesmo instante é indicado nas imagens b.1, b.2 e b.3 para o ensaio numérico.

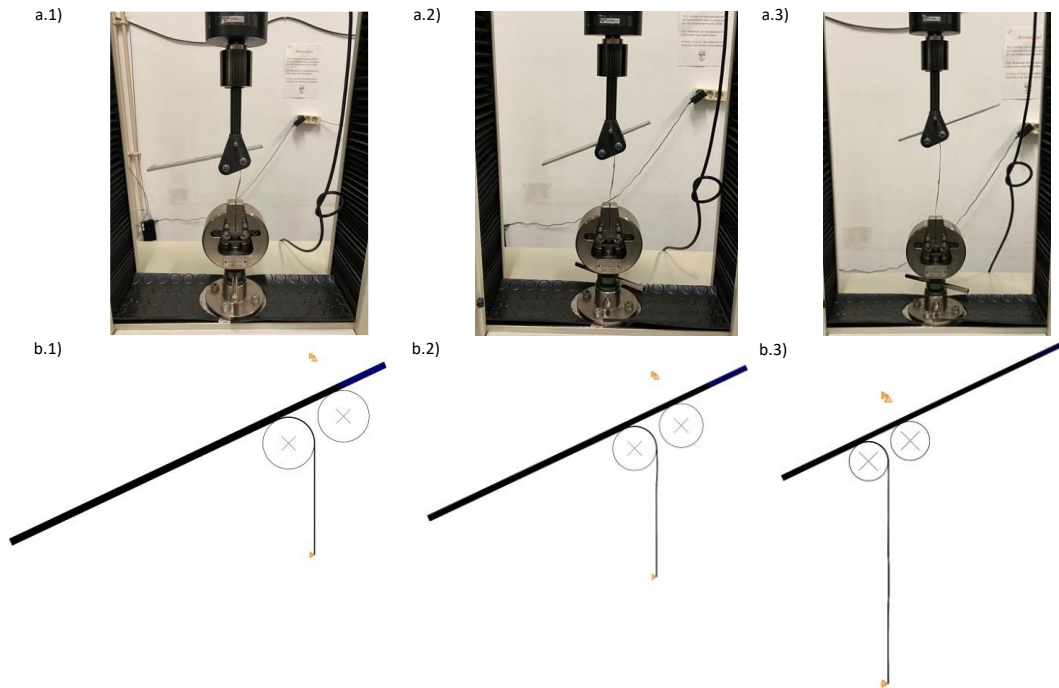


Figura 124 - Comparação entre os ensaios do ensaio *floating roller peel*: a.1) início do ensaio experimental, a.2) momentos após o início do ensaio, a.3) instantes antes do fim do ensaio, b.1) início do ensaio numérico, b.2) momentos após o início do ensaio e b.3) instantes antes do fim do ensaio.

Nota-se na Figura 124 a eficácia da simulação dos contactos entre os aderentes e os roletes de fixação durante todo o ensaio numérico, que permite obter uma similaridade ao comportamento físico do ensaio experimental. Assim como nos ensaios experimentais, o ensaio numérico para o provete de configuração C-c-0 apresentou instabilidades durante o ensaio, conforme indicado na Figura 125.

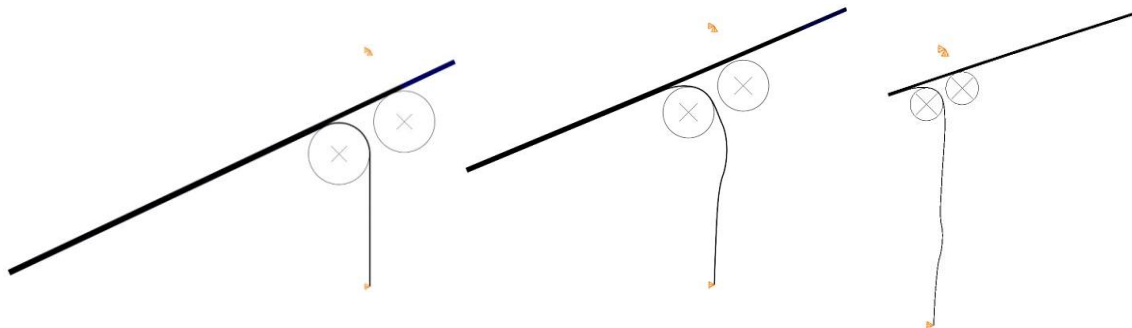


Figura 125 - Instabilidades no comportamento físico para a configuração C-c-0.

Tal instabilidade presente no comportamento físico do provete de configuração C-c-0 pode estar relacionada com a elevada rigidez do aderente rígido e flexível da junta adesiva.

As diferenças entre o modelo numérico desenvolvido nesta dissertação e o modelo desenvolvido por Dicosta et al. [46] evidenciam que, como dito anteriormente, foram criadas diversas variáveis e componentes que, por sua vez, aumentam a complexidade do modelo. Como indicado anteriormente, a modelação numérica foi iniciada com uma abordagem mais simples. No entanto, devido à complexidade necessária para simular o comportamento físico dos provetes fabricados em PRFC quando em contacto com os roletes de fixação, foi necessário alterar para uma abordagem diferente, em que foi utilizada a formulação *Explicit*.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

4.2 Propostas de trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo criar um modelo numérico do ensaio *floating roller peel* baseado no modelo de dano coesivo (MDC) para caracterizar a resistência ao arrancamento do adesivo estrutural Araldite® AV138. As juntas adesivas foram fabricadas com polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) e a liga de alumínio (AW 6082-T651), unidos pelo adesivo Araldite® AV138, considerando seis configurações de junta. Foram modelados os roletes de fixação correspondentes ao acessório utilizado no ensaio experimental, com a respetiva atribuição de contactos e conexões de forma a simular as mesmas condições físicas impostas ao ensaio experimental. Os resultados obtidos por meio do ensaio numérico foram comparados com os resultados experimentais realizados com provetes de mesma configuração e materiais.

Como resultado do ensaio experimental os modos de rotura predominantes foram rotura interlaminar para os provetes A-c-90 e C-c-90 e rotura coesiva para os demais provetes, embora tenha ocorrido, em pouca proporção, rotura adesiva nos provetes de A-a, A-c-0 e C-c-0. Como mencionado no subcapítulo 3.1.4.1, a presença do modo de rotura interlaminar indica uma delaminação nas camadas do compósito laminado devido à resistência da adesão entre o adesivo e o aderente ser superior à resistência entre as camadas do próprio compósito. No entanto, quando ocorre uma rotura coesiva é possível constatar que a ligação entre os aderentes e o adesivo foi superior à resistência do adesivo. Em ambos os modos de rotura, é possível constatar que a superfície da junta adesiva foi preparada corretamente antes da aplicação do adesivo.

Os resultados das curvas $P/b-\delta$ experimentais indicam uma variação de $P/b_{\text{médio}}$ entre 0,178 N/mm e 0,375 N/mm. O valor mais elevado é referente ao provete de configuração A-a (mesmo com ocorrência de 30% de rotura adesiva) e o menor valor é correspondente ao provete de configuração A-c-0. O provete de configuração A-c-90 obteve 0,341 N/mm como resultado para a curva $P/b-\delta$, o provete C-c-0 obteve 0,281 N/mm, o provete C-c-90 obteve 0,297 N/mm e o provete C-a obteve 0,210 N/mm.

Os resultados das curvas $P/b-\delta$ numéricas permitem verificar que $P/b_{\text{médio}}$ varia entre 0,98 N/mm e 1,90 N/mm. O valor mais elevado refere-se ao provete de configuração A-a, assim como se observou no ensaio experimental, e o menor valor foi obtido para o provete de configuração C-c-0. O provete de configuração A-c-90 teve um resultado próximo ao resultado obtido para a configuração A-a, com $P/b=1,68$ N/mm, e o mesmo

comportamento foi observado nos resultados experimentais. O provete C-a obteve 1,38 N/mm, o provete A-c-0 1,56 N/mm e o provete C-c-90 1,26 N/mm.

Embora os resultados numéricos obtidos não serem exatamente iguais aos resultados experimentais, ao comparar qualitativamente e quantitativamente, através da normalização, ambos resultados apresentam o mesmo padrão entre si. A semelhança do comportamento físico dos provetes durante o ensaio experimental também é observada na modelação numérica e o resultado da força de arrancamento encontrado na literatura é muito semelhante aos resultados numérico do provete de configuração A-a. Tais semelhanças indicam que o modelo numérico desenvolvido foi capaz de prever a resistência ao arrancamento do adesivo estrutural Araldite® AV138, e que as condições de contacto impostas permitiram simular com eficácia o comportamento físico do ensaio experimental. Por outro lado, concluiu-se que os resultados experimentais foram afetados por rotura adesiva do adesivo e rotura interlaminar do compósito, cujos efeitos não foram considerados na modelação numérica.

Até o momento da conclusão desta dissertação não foi possível encontrar outros trabalhos, para além dos já citados, que abordassem de forma numérica o ensaio *floating roller peel* com destaque na modelação dos roletes e respetivos contactos, pelo que é sugerida a continuação do estudo de outras metodologias e abordagens a fim de serem obtidas mais informações sobre o ensaio numérico do *floating roller peel*.

4.2 Propostas de trabalhos futuros

Como proposta de trabalhos futuros no âmbito de melhorar e diminuir as limitações do modelo numérico do ensaio *floating roller peel*, sugerem-se a:

- Realização de novos ensaios experimentais para tentar obter uma rotura coesiva em todas as configurações dos provetes em que observou preponderância de rotura adesiva, a fim de obter um bom acordo de modos de rotura com a modelação numérica;
- Construção de modelos numéricos com possibilidade de rotura interlaminar, para incluir este efeito nas roturas observadas;
- Criação de um compósito laminado com camadas que contenham fibras a 45° para avaliar a influência desta camada nos ensaios experimentais e numéricos;
- Utilização de um adesivo dúctil na simulação numérica para avaliar a fiabilidade dos resultados numéricos com adesivos de diferentes propriedades mecânicas e naturezas.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Cotter, J. e M. Hockney, *Metal joining with adhesives*. International Metallurgical Reviews, 1974. **19**(1): p. 103-115.
2. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, M.F.S.F. de Moura, e Publindustria, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto, Portugal: Publindustria.
3. Norma, *DIN923 Adhesives - Terms and definitions*, D.I.F. Normung, Editor. 2016: Berlim, Alemanha.
4. Santos, A.F., *Avaliação do comportamento mecânico de um adesivo estrutural epóxi utilizado na indústria automobilística*. 2005, Tese de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade de São Paulo: São Paulo, Brasil.
5. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, A.M.G. Pinto, L.F.M. da Silva, e A.M.P. de Jesus, *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
6. Banea, M.D., F.S.M. de Sousa, L.F.M. da Silva, R.D.S.G. Campilho, e A.M.B. de Pereira, *Effects of Temperature and Loading Rate on the Mechanical Properties of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(18): p. 2461-2474.
7. Monteiro, J.P.R., *Caraterização das propriedades mecânicas e de fratura de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2015, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
8. Khalackar, P. e E. Chairman, *Welding handbook 8th American Welding Society*. Adhesives Bonding Metals. 1991, Miami, EUA. 840-862.
9. Ebnesajjad, S., *1 - Introduction and Adhesion Theories*, in *Handbook of Adhesives and Surface Preparation*, S. Ebnesajjad, Editor. 2011, William Andrew Publishing: Oxford. p. 3-13.
10. Cognard, J.Y., L. Sohier, R. Créac'Hcadec, F. Lavelle, e N. Lidon, *Influence of the geometry of coaxial adhesive joints on the transmitted load under tensile and compression loads*. International journal of adhesion & adhesives, 2012. **37**: p. 37-49.
11. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Tese para a obtenção do grau de doutor em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.: Porto, Portugal.
12. Moulds, R.J., *Chapter 3 - Design and Stress Calculations for Bonded Joints*, in *Handbook of Adhesives and Sealants*, P. Cognard, Editor. 2006, Elsevier Science Ltd. p. 197-231.
13. Goncalves, J., M. De Moura, e P. De Castro, *A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints*. International journal of adhesion & adhesives, 2002. **22**(5): p. 357-365.

14. Chaves, F., *Técnicas avançadas nos processos de ligação e consolidação*. 2013: Coimbra, Portugal.
15. Norton, R.L., *Projeto de máquinas*. 2013, Porto Alegre, Brasil: bookman editora.
16. da Silva, L.F., D.A. Dillard, B. Blackman, e R.D. Adams, *Testing adhesive joints: best practices*. 2012, Weinheim, Alemanha: John Wiley & Sons.
17. Norma, *ISO 527-2: Determination of tensile properties—Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*. 1993, ISO International Organization for Standardization: Bruxelas, Bélgica.
18. Norma, *ASTM D5379 / D5379M-12, Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*. 2012, ASTM International: West Conshohocken, EUA.
19. Norma, *ASTM D1002-10(2019), Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*. 2019, ASTM International: West Conshohocken, EUA.
20. Norma, *ISO 11003-2: Determination of Shear Behaviour; Part 2: Thickadherend shear test method*. 2005, ISO Interational Organization for Standardization: Bruxelas, Bélgica.
21. Norma, *ASTM D3433-99, Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2020, ASTM International: West Conshohocken, EUA.
22. Campilho, R., M. Banea, e L. da Silva, *Advanced techniques for estimation of the tensile fracture toughness of adhesive joints*. *Frattura ed Integritá Strutturale*, 2015. **9**(31): p. 1-12.
23. Lopes, R., R. Campilho, F. Da Silva, e T. Faneco, *Comparative evaluation of the Double-Cantilever Beam and Tapered Double-Cantilever Beam tests for estimation of the tensile fracture toughness of adhesive joints*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2016. **67**: p. 103-111.
24. Norma, *K 7086: Testing methods for interlaminar fracture toughness of carbon fiber reinforced plastics*. 1993, Jis Japanese Standards Association.
25. de Oliveira, B., R. Campilho, F. Silva, e R. Rocha, *Comparison between the ENF and 4ENF fracture characterization tests to evaluate G IIC of bonded aluminium joints*. *The Journal of Adhesion*, 2018. **94**(11): p. 910-931.
26. Norma, *ASTM D6671 Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites*. 2001, ASTM International: PA, EUA.
27. Daneshjoo, Z., M. Shokrieh, e M. Fakoor, *A micromechanical model for prediction of mixed mode I/II delamination of laminated composites considering fiber bridging effects*. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2018. **94**: p. 46-56.
28. Norma, *ASTM D1876-08: standard test method for peel resistance of adhesives (t-peel test)*, A.S.f.T. Materials, Editor. 2008, ASTM International: West Conshohocken, EUA.
29. Norma, *EN 1720:1998 Adhesives for paper and board, packaging and disposable sanitary products-Determination of dispersability*. 1998, DIN Deutsches Institut für Normung: Alemanha.
30. Norma, *ISO 11339 Adhesives - T-peel test for flexible-toflexible bonded assemblies*, B. Standard, Editor. 2005, ISO International Organization for Standardization: Bruxelas, Bélgica.

31. Broughton, B. e M. Gower, *Measurement good practice guide No. 47 preparation and testing of adhesive joints*. 2001, Teddington, Reino Unido.
32. Li, Q., *Finite Deformations of Fiber-Reinforced Rubberlike Solids, and of Adhesively Bonded T-peel Joints*. 2018, Virginia Tech: Blacksburg, EUA.
33. Broughton, W., R. Mera, e G. Hinopoulos, *Creep testing of adhesive joints T-peel test*, in *NPL - National Metrology Institute*. 1999, Centre for Materials Measurement & Technology National Physical Laboratory: Teddington, Reino Unido.
34. Norma, *ASTM D3167 Standard Test Method for Floating Roller Peel Resistance of Adhesives*. 2004, ASTM International Pensilvânia, EUA.
35. Norma, *ASTM C794 Standard Test Method for Adhesion-in-Peel of Elastomeric Joint Sealants*. 2018, ASTM International: Pensilvânia, EUA.
36. Song, Z., F. Chen, J. Guo, Y. Pei, B. Xing, N. Xiang, e K. Song, *Influence of the Anisotropy on the Microstructure and Mechanical Properties of Ti/Al Laminated Composites*. *Materials*, 2020. **13**: p. 3556.
37. de Freitas, S.T. e J. Sinke, *Test method to assess interface adhesion in composite bonding*. *Applied Adhesion Science* 3.1, 2015. **3**(1): p. 1-13.
38. de Freitas, S.T. e J. Sinke, *Adhesion Properties of Bonded Composite-to-Aluminium Joints Using Peel Tests*. *The Journal of Adhesion*, 2014. **90**(5-6): p. 511-525.
39. Dinnebier, H. e J. von Czarnecki, *Floating Roller Peel Test Indicates Excellent Current Condition*. *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, 2008. **52**(4): p. 20-23.
40. de Barros, S., S.T. De Freitas, M. Banea, S. Budhe, M. Arouche, e B. dos Santos. *Adhesion quality of steel-CFRP interface bonding*. in *Brazilian Conference on Composite Materials*. 2016.
41. Norma, *ASTM D1781 Standard Test Method for Climbing Drum Peel for Adhesives*. 2021, ASTM International: Pensilvânia, EUA.
42. Norma, *BS 5350 Methods of test for adhesives. Determination of bond strength in direct tension in sandwich panels*. 1981, British Standards Institution: Reino Unido.
43. Nettles, A.T., E.D. Gregory, e J.R. Jackson, *Using the climbing drum peel (CDP) test to obtain a GIC value for core/face sheet bonds*. *Journal of composite materials*, 2007. **41**(24): p. 2863-2876.
44. Padhye, N., D.M. Parks, A.H. Slocum, e B.L. Trout, *Enhancing the performance of the T-peel test for thin and flexible adhered laminates*. 2016. **87**(8): p. 085111.
45. Kubit, A., T. Katrňák, e T.J.A.i.M.S. Pytlowany, *Influence of the Type of Adhesive on the Properties of the GFRP Composite Adhesive Joint, Determined on the Basis of the Static T-Peel Test*. 2021. **21**(3): p. 63-74.
46. Dicosta, F., C. Morano, M. Alfano, e F. Furguele. *Analysis of the resistance of adhesively bonded joints with rigid-flexible substrates*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. IOP Publishing.
47. Campilho, R.D., *Strength Prediction of Adhesively-bonded Joints*. 2017: CRC Press.
48. Da Silva, L.F. e R.D. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. *Advances in numerical modeling of adhesive joints*. 2012: Springer. 1-93.

49. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**: p. 41-47.
50. Adams, R. e N. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of strain analysis, 1974. **9**(3): p. 185-196.
51. Harris, J. e R. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International journal of adhesion & adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
52. Sosa, J.C. e N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
53. da Silva, L.F., P.J. das Neves, R. Adams, e J. Spelt, *Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: Literature survey*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009. **29**(3): p. 319-330.
54. da Silva, L.F., P.J. das Neves, R. Adams, A. Wang, e J. Spelt, *Analytical models of adhesively bonded joints—Part II: Comparative study*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009. **29**(3): p. 331-341.
55. Hart-Smith, *Adhesive-bonded double-lap joints*. NASA contract report, 1973.
56. Penado, F.E., *A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1998. **11**(3): p. 272-287.
57. Greenwood, L., T. Boag, e A. McLaren, *Stress distribution in lap joints*. Adhes. Fundam. Pract, 1969. **10**: p. 273-279.
58. Goland, M. e E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. 1944(Research Papers): p. A17-A21.
59. Bigwood, D. e A.D. Crocombe, *Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints*. International journal of Adhesion & Adhesives, 1989. **9**(4): p. 229-242.
60. Frostig, Y., O.T. Thomsen, e F. Mortensen, *Analysis of adhesive-bonded joints, square-end, and spew-fillet—High-order theory approach*. Journal of Engineering Mechanics, 1999. **125**(11): p. 1298-1307.
61. Adams, R. e V. Mallick, *A method for the stress analysis of lap joints*. The Journal of Adhesion, 1992. **38**(3-4): p. 199-217.
62. Wang, R., J. Cui, A. Sinclair, e J. Spelt, *Strength of adhesive joints with adherend yielding: I. analytical model*. The Journal of Adhesion, 2003. **79**(1): p. 23-48.
63. Adams, R.D., R.D. Adams, J. Comyn, W.C. Wake, e W. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 1997: Springer Science & Business Media.
64. Williams, M., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the seismological society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
65. Feraren, P. e H.M. Jensen, *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(15): p. 2125-2142.
66. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of applied mathematics mechanics, 1959. **23**(3): p. 622-636.
67. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.

68. Pinto, A.M.G., A. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M. De Moura, e A. Baptista, *Single-lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
69. Liljedahl, C., A. Crocombe, M. Wahab, e I. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International journal of fracture, 2006. **141**(1): p. 147-161.
70. Duan, K., X. Hu, e Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
71. Voyiadjis, G.Z. e P.I. Kattan, *Damage mechanics*. 2005: CRC Press.
72. Khoramishad, H., A. Crocombe, K. Katnam, e I. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
73. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
74. Karlsson, H. e S.A. Documentation, *Dassault Systèmes: Vélizy-Villacoublay*. 2013, France.
75. Marques, E., L.F. da Silva, e M. Flaviani, *Testing and simulation of mixed adhesive joints for aerospace applications*. Composites Part B: Engineering, 2015. **74**: p. 123-130.
76. Dionísio, J., L. Ramalho, I. Sánchez-Arce, R. Campilho, e J. Belinha, *Fracture mechanics approach to stress singularities in composite adhesive joints*. Composite Structures, 2021. **276**: p. 114507.
77. Katsivalis, I., O.T. Thomsen, S. Feih, e M. Achintha, *Development of cohesive zone models for the prediction of damage and failure of glass/steel adhesive joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2020. **97**: p. 102479.
78. Mubashar, A., I. Ashcroft, e A. Crocombe, *Modelling damage and failure in adhesive joints using a combined XFEM-cohesive element methodology*. The Journal of Adhesion, 2014. **90**(8): p. 682-697.
79. Chen, Z., R. Adams, e L.F. 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.
80. Hua, Y., A. Crocombe, M. Wahab, e I. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
81. Pereira, J.P.O., *Estudo de um adesivo estrutural em juntas de compósito-alumínio utilizando o floating roller peel test*. 2020, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
82. Campilho, R.D., M.D. Banea, A.M. Pinto, L.F. da Silva, e A. De Jesus, *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
83. Kolarik, L., K. Kovanda, M. Valova, P. Vondrous, e J. Dunovsky, *Weldability test of precipitation hardenable aluminium alloy EN AW 6082 T6*. MM Science Journal, 2011: p. 242-247.

84. Norma, *ASTM E8M-04. Standard test methods for tension testing of metallic materials*. 2004, ASTM International: West Conshohocken, EUA.
85. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
86. Corporation, H., *HexPly® 8552 Epoxy matrix product data sheet*. 2013.
87. Khoo, T.T. e H. Kim, *Effect of Bondline Thickness on Mixed-Mode Fracture of Adhesively Bonded Joints*. The Journal of Adhesion, 2011. **87**(10): p. 989-1019.
88. Campilho, R.D., M.D. Banea, J. Neto, e L.F. da Silva, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
89. Gomes de Pinho, A., *Modelação e otimização de ferramentas de conformação plástica de chapa*. 2013, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro: Aveiro, Portugal.
90. Pião, P.S.P., *Modelação e Simulação Numérica de Processos de Conformação Plástica de Metais*. 2010, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro: Aveiro, Portugal.
91. Abdelfattah, I., F. Ferreira, M. Nasr Saleh, P.N.B. Reis, e S. Teixeira De Freitas, *Flexural performance of squared one-sided CFRP patches: modelling and experimental study*. The Journal of Adhesion, 2022: p. 1-19.
92. Systemes, D., *Getting started with ABAQUS: Interactive Edition*. 2008, Londres, Reino Unido.
93. Kalhor, R., H. Akbarshahi, e S.W. Case, *Numerical modeling of the effects of FRP thickness and stacking sequence on energy absorption of metal-FRP square tubes*. Composite Structures, 2016. **147**: p. 231-246.
94. Limited, A.M., *Aluminium Alloy 6082 - T6~T651 Plate - Ficha Técnica*. 2019.
95. Ye, W., A. Bel-Brunon, S. Catheline, M. Rochette, e A. Combescure, *A selective mass scaling method for shear wave propagation analyses in nearly incompressible materials*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2017. **109**(2): p. 155-173.
96. ABAQUS Inc., U., *CAE: User's Manual, version 6.6*. 2006.
97. Kawecki, B. e P. Jerzy, *Numerical results quality in dependence on abaqus plane stress elements type in big displacements compression test*. Applied Computer Science, 2017. **13**.
98. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e 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.
99. Huntsman, *Araldite AV138M with hardener HV 998*. 2004.
100. Carbas, R.J.C., E.A.S. Marques, e L.F.M. da Silva, *The influence of epoxy adhesive toughness on the strength of hybrid laminate adhesive joints*. Applied Adhesion Science, 2021. **9**(1): p. 1.