



Estudo numérico e experimental da adesão de SMC e Prepreg

VÍTOR HUGO PINTO LOPES

Setembro de 2018

ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DA ADESÃO DE SMC E PREPREG'S

Vitor Hugo Pinto Lopes

1130662

2017/2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DA ADESÃO DE SMC E PREPREG'S

Vitor Hugo Pinto Lopes

1130662

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 Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Engenheiro Paulo Jorge Roque De Oliveira Nova.

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de engenharia mecânica

JÚRI

Presidente

A definir

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientador

Engenheiro Paulo Jorge Roque De Oliveira Novoa

Assistente convidado, ISEP

Arguente

A definir

AGRADECIMENTOS

Expresso os meus sinceros agradecimentos ao meu orientador e coorientador da dissertação:

- Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho
- Engenheiro Paulo Jorge Roque De Oliveira Nova

À empresa Inapal Plásticos S.A. pelo material e profissionalismo demonstrado.

Expresso ainda um especial agradecimento a todas as pessoas que me incentivaram e me ajudaram na concretização desta grande etapa.

PALAVRAS CHAVE

SMC, Análise de elementos finitos, Modelos de dano coesivo, Análise de tensões, Prepregs, Araldite® AV138, Sikaforce® 7752, Juntas de sobreposição simples, Adesão.

RESUMO

A seleção de materiais representa uma parte importante na engenharia uma vez que o tipo de material escolhido afeta, não só, a *performance*, mas também, o preço final de um componente. Cada vez mais a engenharia tem evoluído no sentido de manipular os materiais para que estes atinjam os requisitos exigidos, a nível de projeto. Desta forma, surgem os materiais compósitos e a necessidade de estudar a adesão entre os diferentes tipos de compósitos. A presente dissertação apresenta um estudo à adesão entre *sheet moulding compound* (SMC) e compósitos reforçados com fibra de carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymers- CFRP*). Para o efeito, foram utilizados dois métodos de ligação: co-curada e adesiva. Foram também utilizados dois tipos de SMC com diferentes formulações e diferentes percentagens de fibra. As ligações adesivas foram obtidas através do uso de dois tipos de adesivo com propriedades distintas, tendo sido utilizado o Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7752. O adesivo AV138 é caracterizado pela sua elevada rigidez e matriz de epóxido enquanto que, o adesivo 7752 é à base de poliuretano e caracteriza-se pela sua elevada ductilidade. A ligação co-curada resulta da combinação das resinas de ambos substratos.

Para determinar as propriedades da ligação foram realizadas juntas sobreposição simples que foram, posteriormente, submetidas a ensaios de tração, resultando num esforço de corte na zona de ligação. Numa fase seguinte foram determinadas as propriedades experimentais e procedeu-se à realização dos modelos numéricos que refletem estas propriedades. O *software* utilizado para a realização desta simulação foi o ABAQUS.

Com este trabalho foi possível concluir que, para os casos apresentados, o melhor método é uma ligação adesiva, com o adesivo Sikaforce® 7752. Para este caso obteve-se as menores concentrações de tensão e valores de resistência bastante satisfatórios.

KEYWORDS

SMC, Finite element analysis, cohesive damage models, tensile distribution analyses, prepregs, Araldite® AV138, Sikaforce® 7752, single lap joints, adhesion.

ABSTRACT

The material selection plays an important part in engineering since the type of the chosen material affects not only performance but also the final price of a component. Engineering has evolved to a point in which is necessary to manipulate the materials to meet the design level requirements. Thus, the composite materials and the need to study the adhesion between different types of composites arise. This dissertation presents a study on adhesion between Sheet Moulding Compound (SMC) and Carbon Fiber Reinforced Composites (CFRP). For this propose two bonding methods were used: co-cured and adhesive. Two types of SMC, with different formulation and different percentage of fiber, were also used. The adhesive bonds were obtained using two types of adhesive, with distinct properties, the Araldite® AV138 and the Sikaforce® 7752. The adhesive AV138 is characterized by its high stiffness and epoxy matrix, whereas, the adhesive in based on polyurethane and its characterized by its high ductility. The co-cured bond results from the combination of resins of both substracts.

To determine the bonding properties single lap joints were made and, subsequently, subjected to tensile tests resulting in a shear stress at the bonding joint. In following phase, the experimental properties were determined and the numerical models that reflect these properties were made. The software used to perform this simulation was ABAQUS.

In this work, it was possible to conclude that, for the cases presented, the best method is an adhesive bond with the Sikaforce® 7752. In these cases, were obtained the lowest tensile concentration and reasonable strength values.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	<i>Duas dimensões</i>
3D	<i>Tres dimensões</i>
4ENF	<i>Four-point End-Notched Flexure</i>
Al ₂ O ₃	<i>Alumina</i>
B ₄ C	<i>Carboneto de boro</i>
BMC	<i>Bulck Moulding Compound</i>
c	<i>coesiva</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
CRM	<i>Continous Random Mat</i>
CSM	<i>Chopped Strand Mat</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
e1	<i>Espessura do substrato 1</i>
e2	<i>Espessura do substrato 2</i>
ELS	<i>End Loaded Split</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
EUA	<i>Estados Unidos da América</i>
FC	<i>Fibra de carbono</i>
FRP	<i>Fiber Reinforced Plastic</i>
G _c	<i>Tenacidade à fratura</i>
GMT	<i>Glass Mat Thermolastic</i>
HRR	<i>Hutchinson Rice Rosengreen</i>

i	<i>interlaminar</i>
it	<i>interlaminar</i>
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
L₀	<i>Comprimento inicial</i>
L_c	<i>Comprimentos dos calços</i>
L_t	<i>Comprimento total da junta</i>
L_u	<i>Comprimento útil da junta</i>
m	<i>mista</i>
MDC	Modelos de dano coesivo
MDC	<i>Modelo de Dano Coesivo</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos eXtendidos
MFLE	<i>Mecânica da fratura Linear Elástico</i>
P	<i>Força</i>
PEEK	<i>Polieteretercetona</i>
P_{máx}	<i>Força máxima</i>
PPS	<i>Sulfureto de Polifenileno</i>
RRIM	<i>Reinforced Reaction Injection Moulding</i>
RTM	<i>Resin Transfer Moulding</i>
s	<i>substrato</i>
SHPB	<i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>
SiC	<i>Carboneto de silício</i>

SMC	<i>Sheet Moulding Compound</i>
SRIM	<i>Structural Reaction Injection Moulding</i>
t	<i>Espessura de adesivo</i>
TAST	<i>Thick Adherent Shear Test</i>
TDCB	<i>Tapered Double Cantilever Beam</i>
TFFV	<i>Técnica do fecho da fenda</i>
δ	<i>Deslocamento</i>

Lista de Unidades

%	Porcentagem
°C	Graus celsius
bar	Unidade de pressão
E	Módulo de Elasticidade
g/cm^3	Massa volúmica
GPa	GigaPascal
J	Joule
kJ	kiloJoule
m^2	Metro quadrado
min	minuto
mm	milímetro
MPa	MegaPascal
N	Newton
Pa.s	Viscosidade

s	segundo
u	Coeficiente de poisson

Lista de Símbolos

σ_{1u}^c	Tensão máxima na direção longitudinal à compressão
σ_{1u}^t	Tensão máxima na direção longitudinal à tração
σ_{2u}^c	Tensão máxima na direção transversal à compressão
σ_{2u}^t	Tensão máxima na direção transversal à tração
τ_{12}	Tensão de corte no plano 1-2
τ_{23}	Tensão de corte no plano 2-3
τ_{23u}	Tensão interlaminar no plano 2-3
τ_{avg}	Tensão média normalizada
τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_{xy}	Tensão de corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte
ϵ_f	Deformação na rotura
σ_1	Tensão na direção 1
σ_2	Tensão na direção 2
σ_a	Tensão de arrancamento
σ_f	Tensão de rotura
σ_y	Tensão de cedência
γ_f	Deformação na rotura ao corte

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre diferentes tipos de materiais, adaptado de [3]	6
Figura 2 - Estrutura dos materiais compósitos [7].....	7
Figura 3 - Tipos de matrizes, adaptado de [6]	10
Figura 4 - Bobine de roving [16]	14
Figura 5 – Manta [1]	14
Figura 6 - Tecido 2D, diferentes tipos de orientação [1]	15
Figura 7 - Tecido 3D [1].....	15
Figura 8 - Boeing 787: exemplo de aplicação de materiais usados [23].....	20
Figura 9 - Esquema de operações para materiais compósitos, adaptado de [14]	21
Figura 10 - Moldação manual – processo [26]	22
Figura 11 - Moldação por projeção – processo [26].....	23
Figura 12 - Enrolamento filamentar – processo [27].....	23
Figura 13 - Esquema de moldação por injeção – convencional [29]	24
Figura 14 - Esquema do processo RTM [30]	25
Figura 15 - Moldação por compressão – esquema adaptado de [31].....	26
Figura 16 - Pultrusão – esquema [33].....	27
Figura 17 - Moldação por centrifugação – Esquema Adaptado de [35]	27
Figura 18 - Exemplo de SMC [36]	28
Figura 19 - Exemplo de peças feitas em SMC a) mala VW eos [37] b) Estribo Volvo [38]	29
Figura 20 - Processo de fabricação por SMC [39, 40]	30
Figura 21 - Esquema de base de um molde de SMC [41]	30
Figura 22 - Elementos fundamentais de um molde para SMC [42].....	31
Figura 23 - Processo de fabrico de <i>prepregs</i> , adaptado de [43].....	33
Figura 24 - Junta de sobreposição simples, adaptado de [1]	36
Figura 25 - Junta de sobreposição dupla, adaptado de [1]	37
Figura 26 - Parâmetros geométricos de uma junta aparafusada, com espessura t [1]	37

Figura 27 - Modos de rotura em junta aparafusadas; a) corte b) tração c) clivagem d) esmagamento, adaptado de [1].....	38
Figura 28 - Excesso de resina em ligações co-curadas e ligações adesivas, adaptado de [47].....	39
Figura 29 - Ensaio em provetes bulk à tração, adaptado de [50].....	42
Figura 30 - Ensaio <i>Arcan</i> , adaptado de [50].....	43
Figura 31 - Juntas em tração topo-a-topo [51, 52].....	43
Figura 32 - Ensaio de <i>Napkin Ring</i> [53].....	44
Figura 33 - Geometria dos provetes TAST (ISO 110003-2), adaptado de [50].....	45
Figura 34 - Geometria do ensaio JSS, segundo a norma ASTM D1002 (dimensões em mm) [55].....	46
Figura 35 - Representação esquemática da flexão dos aderentes: (a) junta antes da deformação, (b) excentricidade da carga, (c) momento fletor, (d) deformação final da junta [1].	46
Figura 36 - Geometria os provetes JSS, segundo Kim et al. [54].....	46
Figura 37 - Modos de crescimento de fenda, em junta adesivas [55].....	47
Figura 38 - Geometria dos provetes DCB, segunda a norma ASTM D 3433 -99, dimensões em mm [50].	47
Figura 39 - Esquema dos provetes TDCB, adaptado de [50].....	48
Figura 40 - Esquema do ensaio ENF, adaptado de [50].....	48
Figura 41 - Ensaio ELS - mecanismo de ensaio (a) e geometria do provete (b) [50].....	49
Figura 42 - Esquema do teste 4 ENF [50].....	49
Figura 43 - Geometria do provete para determinar o modo III, adaptado de [50].....	50
Figura 44 - Equipamento para determinação do módulo elasticidade dinâmico [50].....	51
Figura 45 - Esquema do teste de impacto com pêndulo e geometria, adaptado de [56].....	52
Figura 46 - Funcionamento do ensaio SHPB, adaptado de [11].....	52
Figura 47 - Comparação experimental entre os critérios de Hashin 1973 (a) e Hasing 1980 (b) [63].....	55
Figura 48 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [75]).....	58
Figura 49 - Modelo coesivo triangular [87, 88].....	59
Figura 50 - Geometria do provete DCB [101].....	61
Figura 51 - Geometria do provete ENF [101].....	62
Figura 52 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [117].....	64
Figura 53 - Configuração e geometria da junta com adesivo (a) e co-curadas (b).....	73

Figura 54 - Sequência de empilhamento das placas CFRP	74
Figura 55 - Provetes após lixagem e limpeza.....	76
Figura 56 - Ligações co-curadas SMC-CFRP	79
Figura 57 - Máquina de furação, utilizado no remoção do excesso de adesivo	80
Figura 58 - curvas $P-\delta$ SMC1_SMC1_AV	83
Figura 59 - Curvas $P-\delta$ SMC2_SMC2_AV.....	83
Figura 60 - Curvas $P-\delta$ SMC1_CFRP_AV	84
Figura 61 - Curvas $P-\delta$ SMC2_CFRP_AV	84
Figura 62 - Curvas $P-\delta$ CFRP_CFRP_AV	85
Figura 63 - Curvas $P-\delta$ SMC1_SMC1_7752	85
Figura 64 - Curvas $P-\delta$ SMC2_SMC2_7752	86
Figura 65 - Curvas $P-\delta$ SMC1_CFRP_7752	86
Figura 66 - Curvas $P-\delta$ SMC2_CFRP_7752	87
Figura 67 - Curvas $P-\delta$ CFRP_CFRP_7752.....	87
Figura 68 - Curvas $P-\delta$ CO_SMC1_SMC1.....	88
Figura 69 - Curvas $P-\delta$ CO_SMC2_SMC2.....	88
Figura 70 - Curvas $P-\delta$ CO_SMC1_CFRP.....	89
Figura 71 - Curvas $P-\delta$ CO_SMC2_CFRP	89
Figura 72 - Curvas $P-\delta$ CO_CFRP_CFRP	90
Figura 73 - Resistências da juntas, média e desvio-padrão	93
Figura 74 – Desenho 2D da geometria do provete no <i>software</i> ABAQUS®	95
Figura 75 – Divisão das partições do desenho 2D	96
Figura 76 - Sistema de eixos para os modelos numéricos.....	96
Figura 77 - Parâmetros de simulação – Definição dos incrementos para análise	98
Figura 78 - Pontos de carregamentos.....	98
Figura 79 - Zona dos controladores na operação malha	100
Figura 80 – Lei triangular do modelo de dano coesivo.....	101
Figura 81 - Tensão de corte em juntas com adesivo AV138.....	105
Figura 82 - Tensão de corte em juntas com adesivo 7752	105
Figura 83 - Tensão de corte em juntas co-curadas.....	106

Figura 84 - Tensão de arrancamento em juntas com adesivo AV138	106
Figura 85 - Tensão de arrancamento em juntas com adesivo 7752	107
Figura 86 - Tensão de arrancamento em juntas co-curadas	107
Figura 87 - Comparação entre curvas P - δ SMC1_SMC1_AV, numéricas.....	108
Figura 88 - Comparação entre curvas P - δ SMC2_SMC2_AV, numéricas.....	108
Figura 89 - Comparação entre curvas P - δ SMC1_CFRP_AV, numéricas	109
Figura 90 - Comparação entre curvas P - δ SMC2_CFRP_AV, numéricas	109
Figura 91 - Comparação entre curvas P - δ CFRP_CFRP_AV, numéricas	110
Figura 92 - Comparação entre curvas P - δ SMC1_SMC1_7752, numéricas	110
Figura 93 - Comparação entre curvas P - δ SMC2_SMC2_7752.....	111
Figura 94 - Comparação entre curvas P - δ SMC1_CFRP_7752, numéricas	111
Figura 95 - Comparação entre curvas P - δ SMC2_CFRP_7752, numéricas	112
Figura 96 - Comparação entre curvas P - δ CFRP_CFRP_7752, numéricas.....	112
Figura 97 - Comparação entre curvas P - δ CO_SMC1_SMC1, numéricas	113
Figura 98 - Comparação entre curvas P - δ CO_SMC2_SMC2, numéricas	113
Figura 99 - Comparação entre curvas P - δ CO_SMC1_CFRP, numéricas.....	114
Figura 100 - Comparação entre curvas P - δ CO_SMC2_CFRP, numéricas.....	114
Figura 101 - Comparação entre curvas P - δ CO_CFRP_CFRP, numéricas.....	115
Figura 102 - Modos de rotura, software ABAQUS - a) interlaminar com substratos diferentes, b) interlaminar com substratos iguais e c) coesiva	115

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos materiais compósitos [6]	7
Tabela 2 - Tipos de reforços nos materiais compósitos, adaptado de [1, 5, 8-10].....	8
Tabela 3 - Tipos de reforço [4].....	9
Tabela 4 - Características das matrizes [6]	11
Tabela 5 - Propriedades das fibras de vidro [1, 17]	16
Tabela 6 - Propriedades das fibras de aramida [1, 18]	16
Tabela 7 - Propriedades da fibra de carbono [19, 20]	17
Tabela 8 - Propriedades das matrizes poliméricas [1, 18]	17
Tabela 9 - Propriedades das matrizes cerâmicas [1, 18]	18
Tabela 10 - Propriedades das matrizes metálicas [1, 18]	18
Tabela 11 - Compósitos vs. outros materiais [21]	19
Tabela 12 - Método de aplicação de adesivos [4]	35
Tabela 13 - Vantagens e desvantagens das ligações mecânicas [1]	36
Tabela 14 - Vantagens e desvantagens das ligações por fusão [1].....	40
Tabela 15 - Expressões para o critério de Hashin-Rotem, de 1973 [61].....	54
Tabela 16 - Expressões para o critério de Hashin, de 1980 [62]	55
Tabela 17 - Características do SMC LS 3022 R30 [118].....	68
Tabela 18 - Condições da processamento do material SMC LS 3022 R30 [118]	68
Tabela 19 - Características do SMC LP 6720 LW 9500 [119]	69
Tabela 20 - Condições da processamento do material SMC LP 6720 LW 9500 [119]	69
Tabela 21 - Características do CIT HS 160 REM [120].....	70
Tabela 22 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [122]	71
Tabela 23 - Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752, adaptado de [123].....	72
Tabela 24 - Dimensões das juntas utilizadas	73
Tabela 25 - Processo de fabrico de placas CFRP em ligações adesivas	75
Tabela 26 - Processo de fabrico de placas SMC em ligações adesivas e co-curadas CFRP.....	75
Tabela 27 - Rácio de misturas dos adesivos, em gramas [122, 123]	76

Tabela 28 - Processo ligação em juntas adesivas	77
Tabela 29 - Processo ligação em juntas co-curadas SMC-SMC.....	77
Tabela 30 - Processo ligação em juntas co-curadas SMC-CFRP.....	79
Tabela 31 - Etapas de remoção do excesso de adesivo.....	81
Tabela 32 - Parâmetros do ensaio SSJ	82
Tabela 33 - Tipos de modo de rotura	91
Tabela 34 - Modos de roturas dos ensaios realizados.....	92
Tabela 35 - Codificação utilizada na resistência das juntas.....	94
Tabela 36 - Definição dos tipos de material, comportamento e tipo de secção para os modelos numéricos	97
Tabela 37 - Tipo de malha utilizado.....	99
Tabela 38 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com t_A de 0,2 mm [144].....	103
Tabela 39 - Propriedades ortotrópicas para o laminado CFRP	103
Tabela 40 – Parâmetros coesivos para o CFRP	103
Tabela 41 - Parâmetros coesivos, utilizando o método inverso	104
Tabela 42 - Comparação dos modos de rotura	116
Tabela 43 - Comparação entre resistência das juntas.....	117
Tabela 44 - Tensões geradas na junta vs. Resistência, em ligação adesiva AV138	120
Tabela 45 - Tensões geradas na junta vs. Resistência, em ligação adesiva 7752	120
Tabela 46 - Tensões geradas na junta vs. Resistência, em ligação co-curada	120

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Organização do relatório.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Materiais compósitos.....	5
2.1.1	Princípios fundamentais.....	5
2.1.2	Classes de materiais compósitos.....	12
2.1.3	Caraterísticas.....	15
2.1.4	Aplicações.....	19
2.1.5	Processos de fabrico.....	20
2.1.6	<i>Sheet molding compound</i>	28
2.1.7	<i>Prepregs</i>	32
2.2	Ligação de materiais compósitos	34
2.2.1	Ligações adesivas.....	35
2.2.2	Ligações aparafusadas e rebitadas.....	36
2.2.3	Ligações co-curadas.....	38
2.2.4	Outras ligações	39
2.3	Ensaio para materiais e juntas de material compósito	40
2.3.1	Ensaio estático	40
2.3.2	Ensaio dinâmico	50
2.4	Previsão de resistência para juntas compósitas	53
2.4.1.1	Critério de Hashin	53
2.4.1.2	Mecânica dos meios contínuos.....	56
2.4.1.3	Mecânica da fratura.....	56
2.4.1.4	Modelos de dano coesivo (MDC).....	57

2.4.1.5	Tipos de leis coesivas	59
2.4.1.6	Determinação dos parâmetros coesivos.....	60
2.4.1.7	Mecânica do dano.....	62
2.4.1.8	Método de Elementos Finitos eXtendido	63
3	DESENVOLVIMENTO	67
3.1	Trabalho experimental.....	67
3.1.1	Materiais utilizados	67
3.1.2	Aderentes	67
3.1.2.1	Pré-impregnados	67
3.1.2.1.1	Compostos de Moldação	68
3.1.2.1.2	Prepregs	70
3.1.3	Adesivos	70
3.1.3.1	Araldite® AV138.....	70
3.1.3.2	Sikaforce® 7752	71
3.1.4	Geometria das juntas	72
3.1.5	Processo de fabrico	73
3.1.6	Resultados obtidos	82
3.1.6.1	Ensaio de sobreposição simples.....	82
3.1.6.1.1	Curvas $P-\delta$	82
3.1.6.1.2	Modos de rotura	90
3.1.6.1.3	Resistência das juntas	93
3.1.7	Análise de resultados	94
3.2	Trabalho numérico.....	95
3.2.1	Condições da análise numérica	95
3.2.2	Modelo de dano utilizado	100
3.2.3	Determinação das propriedades de dano	102
3.2.3.1	Ensaio de sobreposição simples.....	104
3.2.3.1.1	Análise de tensões na junta	104
3.2.3.1.2	Curvas $P-\delta$	108

3.2.3.1.3	Modos de rotura	115
3.2.3.1.4	Resistência das juntas	116
3.2.4	Análise de resultados	117
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	123
4.1	CONCLUSÕES.....	123
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	127
6	ANEXOS	139
6.1	ANEXO1	139

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A seleção de materiais representa uma parte importante na engenharia uma vez que o tipo de material escolhido afeta, não só, a performance, mas também, o preço final de um componente. Cada vez mais a engenharia tem evoluído no sentido de manipular os materiais para que estes atinjam os requisitos exigidos, a nível de projeto. Desta forma, surgem os materiais compósitos. Um composto constituído por vários tipos de materiais e que consegue tirar partido das melhores propriedades de cada um dos constituintes. A sua elevada resistência e rigidez, aliada ao baixo peso específico, tem levado a que os materiais compósitos sejam preferidos em relação aos restantes materiais estruturais.

O desenvolvimento deste tipo de materiais requer uma forte intervenção da engenharia, e a garantia da sua eficiência está fortemente dependente da capacidade de adesão entre os materiais que constituem um compósito. Deste modo surge a necessidade de estudar a adesão entre os diferentes tipos de compósitos.

1.2 Objetivos

Face à necessidade de ligar diferentes tipos de matérias compósitos torna-se importante estudar os diferentes tipos de ligação existentes e procurar novas soluções. Nesse sentido a presente dissertação tem como objetivo estudar a adesão entre SMC e CFRP. Este estudo envolve dois métodos de ligação: co-curada e adesiva. Numa primeira fase serão realizados ensaios experimentais, de modo a analisar o resultado mais favorável para estas ligações, e numa segunda fase, serão criados modelos numéricos que traduzam os ensaios experimentais. O objetivo deste estudo será encontrar, dentro das possibilidades, o melhor método de ligação, ou seja, o que oferece maior resistência, maior facilidade de processamento e menos concentração de tensões.

1.3 Organização do relatório

A presente dissertação divide-se em cinco capítulos, cuja descrição é apresentada seguidamente.

No primeiro capítulo, denominado de Introdução, é feito um enquadramento geral do tema em que se baseia a dissertação, dando a conhecer os objetivos que foram delineados para o desenvolvimento deste trabalho.

No segundo capítulo, com o nome Revisão Bibliográfica, são apresentados todos os conceitos teóricos importantes para o desenvolvimento do tema em questão, sendo

depois dada particular importância ao tipo de compósitos no qual se debruça esta dissertação, isto é, os compósitos CFRP e compósitos SMC.

O terceiro capítulo, intitulado de Desenvolvimento, expõe todas as etapas do trabalho. Numa primeira fase serão abordados todos os procedimentos que levaram a realização do trabalho experimental, isto inclui o modo de colagem, preparação da junta, preparação do adesivo, entre outros. No final desta primeira fase será realizada uma análise dos resultados obtidos. A segunda parte deste capítulo diz respeito aos modelos numéricos. Esta fase inicia com a determinação dos dados necessários seguido da elaboração do modelo na software ABAQUS. No final deste capítulo serão tecidas comparações entre os resultados experimentais e os resultados numéricos.

No quarto capítulo, designado Conclusões, descreve-se uma análise aos resultados obtidos no capítulo anterior e são tecidas as últimas considerações sobre o trabalho desenvolvido, apresentando sugestões para futuras propostas de tema para dissertação.

No quinto capítulo, são apresentadas as referências bibliográficas e, por fim, no capítulo seis constam os anexos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais compósitos

2.1.1 Princípios fundamentais

Os materiais compósitos da antiguidade à atualidade

Apesar do termo “materiais compósitos” ter ganho destaque há relativamente pouco tempo, o seu conceito tem sido aplicado desde há milhares de anos. Na verdade, a presença de materiais compósitos já é relatada na antiguidade, em que eram desenvolvidos tijolos à base de argila reforçados com palha. Este tipo de materiais, embora bastante resistentes à compressão, apresentavam alguns entraves, pois eram frágeis e partiam com facilidade quando sujeitos a momentos fletores.

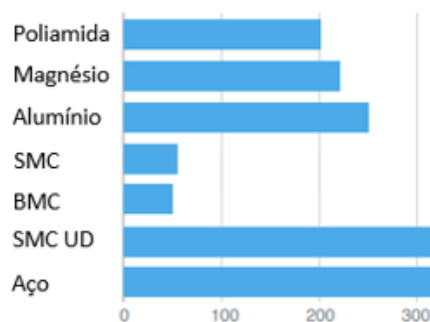
Em meados do século XX, os materiais compósitos começam a ganhar preponderância nas diversas áreas da indústria, sendo atualmente um material com enorme destaque na engenharia [1]. A sua facilidade de processamento, baixa densidade, elevada rigidez e resistência mecânica fazem deste tipo de materiais ser eleito para aplicações que exigem elevada resistência e baixo peso, como é o caso da indústria aeronáutica e aeroespacial [2].

O conceito de material compósito

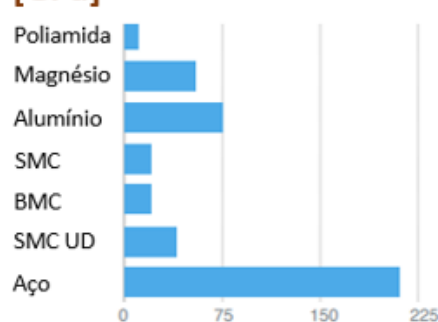
A designação “compósito” refere-se a um material que é constituído por dois ou mais materiais diferentes, resultando dessa combinação um novo composto que reúne as melhores propriedades de cada um dos seus constituintes. Uma associação de materiais diferentes é vantajosa, na medida em que passa a ser possível melhorar algumas propriedades, ou até, por outro lado, ver nascer propriedades que não existiam antes dos materiais serem combinados. No entanto, às vezes acontece algo indesejado e as propriedades entram em conflito, como é o caso do isolamento térmico e a condutividade térmica [3].

A Figura 1 ilustra as vantagens dos materiais compósitos quando comparados a materiais monolíticos, como é o caso do aço e do alumínio. Como é possível verificar, os compósitos colocam-se numa posição de destaque quando comparados a outros materiais estruturais, visto que são manipulados de forma a garantirem alta resistência e rigidez e baixo peso [4]. Os compósitos destacam-se dos metais também pelo facto de apresentarem uma maior resistência à corrosão, o que é essencial para aplicações da indústria aeronáutica, entre outras.

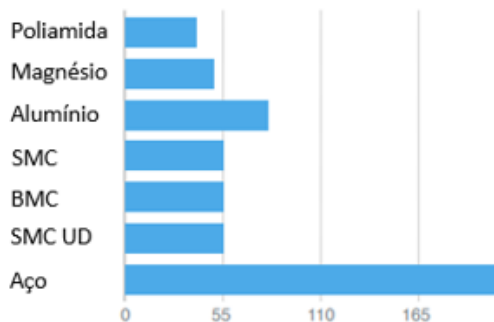
Tensão de rotura [MPa]



Módulo de Elasticidade [GPa]



Densidade [g/cm^3]



Coefficiente de expansão térmica [$10^{-6} m/mK$]

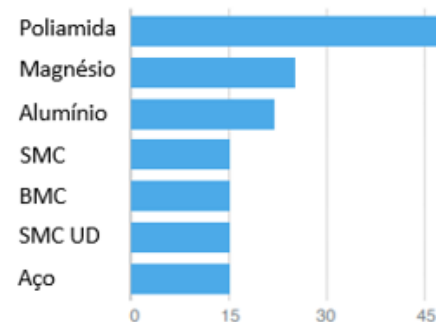


Figura 1 - Comparação entre diferentes tipos de materiais, adaptado de [3]

No entanto, este tipo de materiais também apresenta algumas limitações, como, por exemplo o elevado custo associado não só aos materiais, mas também ao processo de fabrico. A Tabela 1 apresenta as principais vantagens e desvantagens dos materiais compósitos.

De facto, o rácio resistência/ peso dos compósitos consegue ser cinco vezes maior que no caso dos aços, e o rácio rigidez/peso pode ser oito vezes maior nos compósitos do que nos metais estruturais [5].

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos materiais compósitos [6]

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ↑ <i>Permitem uma redução no peso dos componentes;</i> ↑ <i>Diversidade da forma que podem apresentar;</i> ↑ <i>Facilmente coloríveis;</i> ↑ <i>Translúcidos;</i> ↑ <i>Possibilidade de manipular as suas propriedades, tais como a resistência, rigidez, condutibilidade elétrica e térmica;</i> ↑ <i>Baixos custos de manutenção;</i> ↑ <i>Boa durabilidade;</i> ↑ <i>Possibilidade de fabrico automatizado.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ <i>Custo elevado dos materiais;</i> ↓ <i>Por vezes requer o recurso a métodos computacionais sofisticados;</i> ↓ <i>A preservação da cor e do brilho nem sempre é previsível;</i> ↓ <i>Conhecimento do seu comportamento, métodos de ligação e formas de acabamento ainda foram pouco aprofundados (em comparação com outros materiais);</i> ↓ <i>Sensíveis a mudanças de temperatura, fogo e radiação ultravioleta;</i> ↓ <i>Processos de fabrico, por vezes, lentos e dispendiosos.</i>

A constituição dos materiais compósitos

De uma forma geral, pode-se afirmar que os materiais compósitos são compostos por duas fases, os reforços e as matrizes (Figura 2). Os reforços são os principais responsáveis pelas propriedades físicas e mecânicas do material, garantindo rigidez e resistência, enquanto, a matriz tem como principal função envolver estes reforços, dando a forma ao material, garantir alguma ductilidade, manter a estrutura coesa e facilitar a fabricação [1].

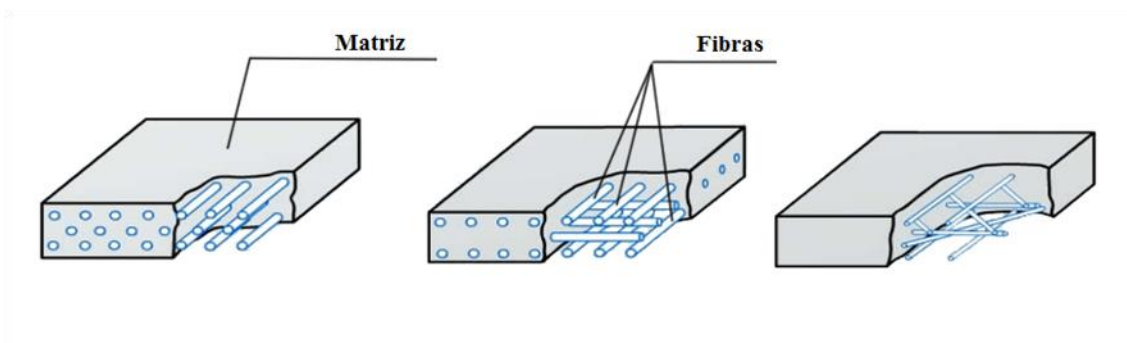


Figura 2 - Estrutura dos materiais compósitos [7]

Os materiais de reforço podem ser apresentados de diversas formas, consoante a finalidade pretendida. Na Tabela 2 estão mencionadas as formas que os reforços podem apresentar.

Tabela 2 - Tipos de reforços nos materiais compósitos, adaptado de [1, 5, 8-10]

Forma do reforço	Descrição
Fibras longas	Fibras longas são usadas em tecidos, podendo ser unidirecionais ou não. Apresentam boa resistência ao impacto, reduzem o empenamento e melhoram a resistência à fluência.
Fibras curtas	As fibras curtas mais utilizadas são as de vidro e de carbono. Adicionar fibras curtas melhora o desempenho do compósito para aplicações leves, e os compósitos são mais baratos e fáceis de produzir, quando comparados a compósitos com fibras longas.
Fibras contínuas	Geralmente apresentadas sob a forma de <i>roving</i> , as fibras contínuas podem ser orientadas numa só direção, ou em duas direções perpendiculares, fazendo com que o material ganhe resistência nas duas direções. Quando a força é aplicada noutra direção, verificar-se-á uma menor resistência. Utilizados para aplicações de alta performance em processos contínuos de fabricação de compósitos.
Fibras orientadas aleatoriamente	As fibras aleatórias têm propriedades uniformes em todas as direções. Apresentam melhores propriedades de isolamento sonoro.
Fibras entrelaçadas	Os compósitos com fibras entrelaçadas são produzidos pelo entrelaçamento de fibras segundo direções perpendiculares, podendo apresentar vários padrões.
Partículas	Também designadas como <i>fillers</i> . Apesar de serem um material de reforço, este tipo de fibras são geralmente acrescentadas para reduzir o custo ou então para garantir determinadas propriedades, como por exemplo, melhorar propriedades elétricas ou melhorar o processamento do material.

Para além da forma como se apresentam as fibras ser importante, a forma como estas estão orientadas no material é, também, um fator de relevo. Esta análise está descrita no capítulo 2.1.2.

Entre os materiais mais usados como reforço podem ser destacados materiais como o vidro, o carbono, o carboneto de silício (SiC), e o *kevlar* (aramida), que contribuem para uma melhoria das propriedades mecânicas do compósito. As fibras retiradas do material de origem são, geralmente, de grande tamanho, facto que tem efeitos benéficos nas propriedades do compósito. De facto, as fibras de menor diâmetro costumam ter valores de resistência à tração superiores ao material de origem. Um dos exemplos mais óbvios é o vidro, que apresenta uma baixa resistência à tração. No entanto, a fibra de vidro apresenta uma resistência à tração muito mais elevada do que o vidro. A Tabela 3 apresenta alguns tipos de reforço, assim como uma breve descrição.

Tabela 3 - Tipos de reforço [4]

Material de reforço	Descrição
Vidro	A fibra de vidro é um dos materiais mais usados nos polímeros. Dos vários tipos de fibras de vidro podem-se destacar o tipo “E” e o tipo “S”. As fibras do tipo “E” caracterizam-se por ser terem bastante resistência e serem baratas. As fibras do tipo S são mais rígidas e são das fibras com maior resistência à tração. Estas fibras são mais dispendiosas do que as do tipo E.
Carbono	Material que resulta da combinação de grafite e carbono amorfo, caracterizado pela sua alta rigidez, baixa densidade e baixa expansão térmica.
Boro	Alto módulo de elasticidade, no entanto, apresenta um custo bastante elevado. É geralmente usado na indústria aeronáutica.
Kevlar®	O Kevlar® é uma aramida altamente cristalina, com excelente rácio resistência/ peso. Boa resistência ao impacto e à fadiga.
Cerâmicos	Elevado módulo de elasticidade.
Metal	Filamentos de aço são bastante usados.

Os reforços apresentados anteriormente são embebidos numa segunda fase, denominada por matriz, que funciona como um adesivo, mantendo as fibras juntas. Quando se enclausura as fibras numa matriz consegue-se que estas absorvam os esforços de compressão, que acabam por ser suportados pela matriz, e assim, há uma

melhor distribuição dos esforços no material [6]. Da mesma forma, também terá de se garantir que a matriz é rígida o suficiente para evitar que as quebras nas fibras se propaguem, fazendo uma redistribuição de esforços caso isso ocorra [11].

O sucesso de um material compósito é também assegurado pela adesão entre a matriz e a fibra. A matriz é a responsável por garantir esta adesão, portanto, deve tratar-se de um material com uma viscosidade adequada, isto é, uma viscosidade por um lado baixa para garantir que as fibras penetrem a matriz e, por outro lado, uma suficiente viscosidade para garantir que as fibras se mantêm na posição correta. A facilidade de processar o material vai também depender muito das propriedades da matriz [12].

A qualidade da matriz vai ditar o comportamento do compósito quando exposto a condições de humidade, químicos e radiação ultravioleta. Para além dos anteriores, a matriz é também responsável pela cor, qualidade superficial, brilho e pelo comportamento perante fogo [6].

A escolha do tipo de matriz deve estar diretamente ligada à escolha do material de reforço, uma vez que a união de materiais com propriedades diferentes pode, por vezes causar efeitos negativos no material final. Por exemplo, numa situação em que fibras serão expostas a uma temperatura alta, o coeficiente de expansão térmica do material da matriz não deve diferir do coeficiente da fibra [11].

Atualmente são usados diversos tipos de materiais nas matrizes, com diferentes origens e propriedades. As matrizes podem ter por base um dos tipos de materiais apresentados na Figura 3.

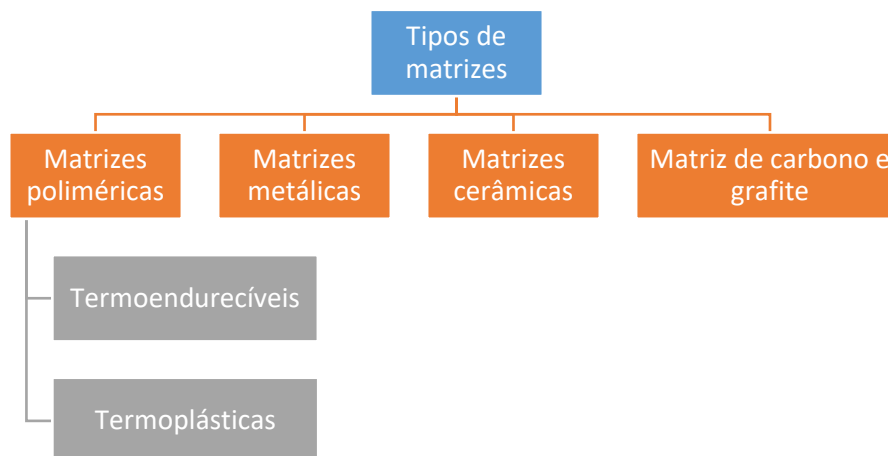


Figura 3 - Tipos de matrizes, adaptado de [6]

As matrizes poliméricas são vantajosas na medida em que permitem obter um material final com elevada resistência e rigidez, baixa densidade, alta resistência à fadiga e excelente resistência a químicos. No entanto, apresentam uma baixa resistência à temperatura. Estes tipos de matrizes podem ser divididos em dois tipos, as

termoendurecíveis e as termoplásticas, consoante o comportamento do material ao ser aquecido.

Os polímeros termoendurecíveis são materiais que, depois de curados (ocorrendo a reticulação das suas moléculas), não podem ser dissolvidos ou amolecidos. Dos materiais termoendurecíveis destaca-se o poliéster, o epóxidos, e as poliimidas [12], cujas características se apresentam na Tabela 4.

Tabela 4 - Características das matrizes [6]

Polímeros termoendurecíveis	Descrição	Aplicações
Poliéster	Baixo preço em relação ao epóxido; absorvem mais água, o que pode ser prejudicial.	Indústria automóvel, tanques e tubagens, pedra artificial.
Epóxido	Melhor resistência à fadiga; menor contração térmica.	Laminas das turbinas eólicas.
Poliimidas	Elevada estabilidade dimensional; resistência a elevadas temperaturas; boa resistência ao impacto; boa capacidade de adesão.	Indústria aeroespacial, microeletrónica, lasers.

As matrizes termoplásticas não precisam de passar pelas reações de cura, uma vez que derretem quando submetidas ao calor e endurecem no arrefecimento. Desta forma, é possível conferir novas formas a estes materiais, que podem ser reciclados. Das matrizes termoplásticas destacam-se o polieteretercetona (PEEK), sulfureto de Polifenileno PPS, nylons (poliamidas), policarbonato (PC), poliestireno (PS) e Policloreto de vinila (PVC).

As matrizes metálicas são aplicadas em casos que se pretende uma boa resistência à temperatura. No entanto, o facto de terem temperaturas de serviço mais altas, leva a que o processo de fabrico também seja realizado a temperaturas elevadas. As matrizes metálicas mais comuns são à base de alumínio, magnésio ou até ligas de titânio. Noutros casos especiais, também se recorre a matrizes de níquel, cobre ou cobalto [3].

As matrizes cerâmicas caracterizam-se por originarem materiais compósitos que podem operar a temperaturas de serviço muito elevadas, desde os 1200°C aos 3500°C. Nestes casos, as fibras de reforço são geralmente de origem metálica, o que garante rigidez e resistência à fratura, uma vez que os cerâmicos podem ser frágeis. De facto, o maior inconveniente deste tipo de materiais é que possui um baixo alongamento na rotura, mesmo quando a tensão aplicada é baixa, o que resulta no aparecimento de fissuras no material. As matrizes cerâmicas destacam-se por apresentar alta rigidez, dureza, resistência a compressão, e uma relativa baixa densidade. No entanto, salienta-se

negativamente a sua fragilidade e suscetibilidade a fissuras. Dos tipos mais comuns, destaca-se a alumina (Al_2O_3), carbonato de boro (B_4C) e o carboneto de silício (SiC) [11].

As matrizes de carbono têm excelentes propriedades, e são resultado da carbonização de uma resina orgânica (fenólica e outra), em que são impregnadas fibras de carbono, ou há a deposição química de vapor de carbono pirolítico de um gás de hidrocarboneto. Numa atmosfera inerte ou no vácuo, os compósitos podem aguentar temperaturas superiores a 3000°C a sua resistência aumenta quando aquecidos a temperaturas superiores a 2200°C , enquanto o seu módulo diminui em temperaturas superiores a 1400°C . O processo de fabrico associado gasta bastante energia e tempo [11].

2.1.2 Classes de materiais compósitos

Os materiais compósitos podem ser classificados essencialmente em três grupos:

- **Tipo de matriz**

A matriz tem como principal função transferir as solicitações mecânicas às fibras e protegê-las do ambiente externo.

As resinas termoendurecíveis são as mais utilizadas em materiais compósitos. Estas são convertidas de uma fase líquida para uma fase sólida por meio de um processo chamado polimerização. Uma vez polimerizadas e curadas, as resinas termoendurecíveis não podem ser convertidas de volta à sua forma líquida original. Dentro deste tipo destacam-se as seguintes:

Poliésteres insaturados [1, 13] – O seu baixo custo, fácil processamento, estabilidade dimensional e bom compromisso entre propriedades mecânicas, físicas e elétricas fazem desta resina a mais utilizada para a fabricação de materiais compósitos, cerca de 75% da indústria.

Epóxidos [1, 13] - Um dos principais benefícios das resinas epóxidas sobre as resinas de poliéster insaturado é a sua menor contração, podendo ser formuladas com diferentes tipos materiais ou misturadas com outras resinas epóxido para obter características específicas de desempenho. Os epóxidos são usados, principalmente, para fabricar compósitos de alto desempenho com propriedades mecânicas superiores, resistência a líquidos e ambientes corrosivos, propriedades elétricas superiores, bom desempenho em temperaturas elevadas, boa adesão a um substrato ou uma combinação desses benefícios. No entanto, as resinas epóxidas não apresentam uma resistência UV particularmente boa. O custo desta resina é cerca de quatro vezes superior, quando comparadas com as de poliéster.

Fenólicos [1, 13] - São resinas que curam através de uma reação de condensação, produzindo água que necessita ser removida durante o seu processamento. Os compostos fenólicos têm muitas qualidades de desempenho desejáveis, incluindo resistência a altas temperaturas, resistência à fluência, excelente isolamento térmico,

propriedades de amortecimento sonoro, resistência à corrosão e excelente comportamento ao fogo. Em contrapartida, a principal desvantagem resulta da libertação de produtos voláteis durante a cura.

Para além deste tipo de resinas pode-se também salientar as resinas de vinilester, bismaleimidas e poliuretano.

- **Tipo de reforço**

O reforço é o elemento constituinte que confere ao material compósito suas características mecânicas como a rigidez, resistência à rotura, densidade, preço, *etc.* Os principais reforços utilizados são as [14]:

Fibra de vidro [1, 15] – As fibras de vidro são produzidas através do estiramento do vidro fundido através de uma fieira com orifícios de dimensões muito precisas. É o reforço mais predominante nos materiais compósitos devido às suas altas propriedades isolantes elétricas, baixa suscetibilidade à humidade, altas propriedades mecânicas e boa resistência ao impacto.

Fibra de carbono [1, 15] – As fibras de carbono são produzidas através da decomposição térmica de vários precursores orgânicos. Os precursores devem possuir características específicas como não volatilizar durante o processo de pirólise, não fundir, ter resistência apropriada e características de manuseamento que permitam manter as fibras unidas.

A fibra de carbono oferece a maior resistência e rigidez de todos os reforços, sendo que o desempenho a alta temperatura é particularmente notável. A principal desvantagem é o seu alto custo relativo, que é resultado do custo do material de base e de um processo de fabricação com uso intensivo de energia. Os compósitos de fibra de carbono são mais frágeis que vidro ou aramida, podendo causar corrosão galvânica quando usados na proximidade de metais. Um material de barreira, como o vidro, ou a resina, é usado para evitar esta ocorrência.

Fibra de aramida [1, 15] – As fibras aramídicas são o tipo mais comum de fibras sintéticas orgânicas. As fibras de aramida oferecem boas propriedades mecânicas e baixa densidade, com a vantagem adicional de apresentarem boa tenacidade e resistência ao impacto. São caracterizadas por terem resistência à tração razoavelmente alta, um módulo de elasticidade médio, excelente resistência química e boa capacidade de amortecimento de vibrações. As fibras de aramida são isolantes da eletricidade e do calor e aumentam a resistência ao impacto dos compósitos. São também resistentes a solventes orgânicos, combustíveis e lubrificantes. Os compósitos de aramida não são tão resistentes à compressão como compósitos de vidro ou carbono, têm baixa resistência à flexão e elevada sensibilidade ao corte interlaminar.

Destacam-se também as fibras de boro, amianto, sisal e poliéster [1].

- **Forma e Orientação**

As formas dizem respeito ao tipo de reforço, que pode ser apresentado como fibras contínuas ou curtas, mantas, tecidos 2D, *roving*, etc., e definidas segundo a sua orientação: unidirecionais, quando orientadas segundo uma mesma direção; bidimensionais, com as fibras orientadas segundo duas direções ortogonais (tecidos) e tridimensionais, quando as fibras são orientadas no espaço tridimensional (tecidos multidimensionais) [1].

Roving, Figura 4 – É um cordão de filamentos contínuos enrolados em bobine. Podem ser processadas para obter fibras curtas, longas, tecidos ou mantas.



Figura 4 - Bobine de roving [16]

Mantas, Figura 5 – São fibras distribuídas aleatoriamente e agregadas com um ligante especial, que deve ser solúvel na impregnação. Podem apresentar-se com filamentos curtos, (*Chopped Strand Mat* - CSM), ou com filamentos contínuos (*Continuous Random Mat* - CRM).

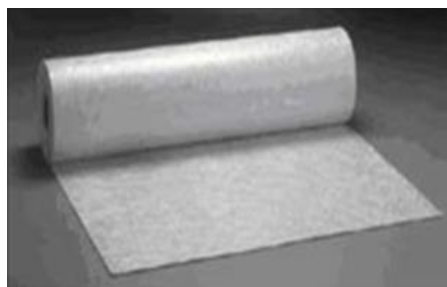


Figura 5 – Manta [1]

Tecidos – Podem-se apresentar em dois tipos, 2D (Figura 6) e 3D (Figura 7). São utilizados quando se exige elevadas propriedades mecânicas.

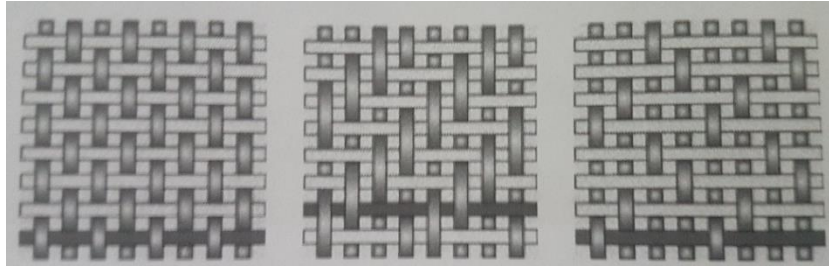


Figura 6 - Tecido 2D, diferentes tipos de orientação [1]

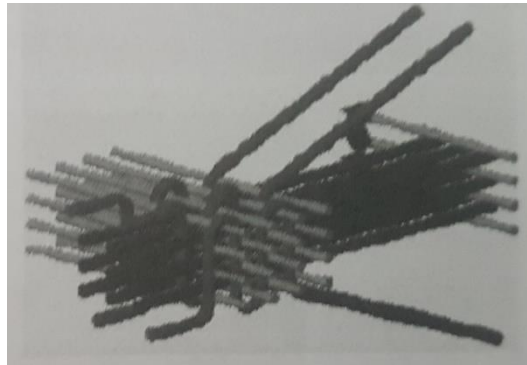


Figura 7 - Tecido 3D [1]

Os tecidos são as formas mais comuns de reforço. No entanto, podem ser feitas várias configurações, podem ser misturadas vários tipos de reforço, tipos de orientação, e tipos de entrelaçamento. Existem ainda pré-formas, que são utilizadas no fabrico de produtos complexos e com baixa reprodutibilidade.

2.1.3 Características

As características dos materiais compósitos variam em função das propriedades das fases constituintes (matriz e reforço), suas respectivas proporções e a geometria da fase dispersa (formato de suas fibras, tamanho, distribuição e orientação). A escolha dos constituintes dos materiais compósitos está diretamente relacionada com a finalidade que se pretende dar ao material. A ponderação dos materiais constituintes requer uma análise a vários fatores, como os que se apresentam seguidamente:

- **Resistência a corrosão;**
- **Rigidez;**
- **Peso;**
- **Resistência à fadiga;**
- **Expansão térmica;**
- **Propriedades eletromagnéticas;**
- **Condutibilidade térmica;**
- **Comportamento acústico;**
- **Aspeto.**

Cada aplicação tem características únicas e específicas, o que demonstra a grande versatilidade deste tipo de materiais. Das características supramencionadas, pode-se afirmar que a resistência e a rigidez específicas retratam a combinação de características mais apreciadas pelos produtores de compósitos estruturais.

As características desejadas são fatores influenciados pelas propriedades mecânicas e físicas de cada material, e, como referido anteriormente, as fibras são as principais influenciadoras das propriedades mecânicas dos materiais compósitos. A Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7 apresentam as propriedades mecânicas de vários tipos de reforços.

Tabela 5 - Propriedades das fibras de vidro [1, 17]

Propriedade	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Tensão de rotura [MPa]	3445	4890	4135
Módulo de elasticidade [GPa]	72,3	86,9	85,5
Densidade [g/cm ³]	2,58	2,46	2,54
Deformação na rotura [%]	4,4	5,3	5,2
Coefficiente de expansão térmico [10 ⁻⁶ /°C]	5,0	2,9	4,0

Tabela 6 - Propriedades das fibras de aramida [1, 18]

Propriedade	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 149
Tensão de rotura [MPa]	2920	3000	3450
Módulo de elasticidade [GPa]	90	124	143
Densidade [g/cm ³]	1,43	1,44	1,47
Deformação na rotura [%]	3,6	1,9	3
Coefficiente de expansão térmico [10 ⁻⁶ /°C]	-2,0	-2,0	-

Conforme se pode verificar as fibras de carbono (Tabela 7) são as que apresentam melhores propriedades em termos de tensão de rotura, módulo de elasticidade e densidade. No entanto, tratam-se de reforços de elevado custo, o que, por vezes, inviabiliza a sua utilização. Desta forma, os reforços à base de fibra de vidro (Tabela 5) são preferidos, uma vez que apresentam propriedades relativamente boas, e um custo

mais baixo que as fibras de carbono. As fibras de aramida (Tabela 6), embora apresentem propriedades mecânicas inferiores às outras fibras, no que diz respeito à tensão de rotura e módulo de elasticidade, são fibras caracterizadas por uma elevada resistência ao impacto e uma boa capacidade de amortecimento de vibrações.

Tabela 7 - Propriedades da fibra de carbono [19, 20]

Propriedade	Carbono T800S HS	Carbono M40J HM	Carbono Hexcel® UHM
Tensão de rotura [MPa]	5880	4400	3730
Módulo de elasticidade [GPa]	294	377	440
Densidade [g/cm ³]	1,8	1,77	1,87
Deformação na rotura [%]	2	1,2	0,8
Coefficiente de expansão térmico [10 ⁻⁶ /°C]	-0,6	-1,1	-

Embora exerçam menor influência, as matrizes também são escolhidas de acordo com as suas propriedades que, naturalmente, irão ter alguma repercussão nas características do material final. A Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10 apresentam algumas das propriedades mecânicas de algumas das matrizes mais utilizadas.

Tabela 8 - Propriedades das matrizes poliméricas [1, 18]

Propriedade	Epóxido	Poliéster	Policarbonato
Tensão de rotura [MPa]	35-100	40-90	45-70
Módulo de elasticidade [GPa]	3-6	2-4,5	2,2-2,4
Densidade [g/cm ³]	1,1-1,4	1,2-1,5	1,06-1,20
Deformação na rotura [%]	1-6	2	50-100
Coefficiente de expansão térmico [10 ⁻⁶ /°C]	60	100-200	70

Tabela 9 - Propriedades das matrizes cerâmicas [1, 18]

Propriedade	Alumina	Silicato de boro	Carbeto de silício
Tensão de rotura [MPa]	300-500	-	-
Módulo de elasticidade [GPa]	380	63	520
Densidade [g/cm ³]	3,9	2,2	2,9
Deformação na rotura [%]	<0,1	<0,1	<0,1
Coefficiente de expansão térmico [10 ⁻⁶ /°C]	6,7	5	4,9

Tabela 10 - Propriedades das matrizes metálicas [1, 18]

Propriedade	Alumínio	Titânio	Magnésio
Tensão de rotura [MPa]	74	238	189
Módulo de elasticidade [GPa]	69	113,8	45,5
Densidade [g/cm ³]	2,71	4,51	1,74
Deformação na rotura [%]	<0,1	<0,1	<0,1
Coefficiente de expansão térmico [10 ⁻⁶ /°C]	23	9,5	26

As matrizes poliméricas (Tabela 8) são, de facto, as mais utilizadas, uma vez que apresentam um bom rácio entre a qualidade das propriedades mecânicas e o custo. Caracterizam-se também por serem de fácil processamento. As matrizes cerâmicas (Tabela 9) são bastante usadas na indústria aeroespacial, dadas as suas excelentes propriedades mecânicas. No entanto, a sua utilização é limitada devido ao elevado custo. As matrizes metálicas (Tabela 10), têm elevada resistência, podendo apresentar resistência superior quando comparadas a algumas matrizes poliméricas, sendo também materiais muito usados na indústria aeronáutica.

Compósitos vs. Outros Materiais

A Tabela 11 apresenta uma comparação entre os materiais compósitos e outros materiais que são amplamente utilizados no fabrico de componentes.

Tabela 11 - Compósitos vs. outros materiais [21]

Material	Vantagens dos compósitos em relação a outros materiais
Aço	<ul style="list-style-type: none"> • Mais leves (conseguem ser 70% mais leves); • Melhor rácio resistência/ peso; • Maior resistência à corrosão; • Menor condutividade elétrica; • Possibilitam a redução de peças num determinado conjunto, devido à sua facilidade de processamento.
Alumínio	<ul style="list-style-type: none"> • Menor sensibilidade às tensões de fadiga; • Possibilitam a redução de peças, devido à sua facilidade de processamento; • Permitem uma melhor distribuição do peso num componente, em comparação com as ligas de alumínio; • Maior flexibilidade e durabilidade; • Maior capacidade de dissipação de energia das vibrações.
Madeira	<ul style="list-style-type: none"> • Maior durabilidade; • Maior estabilidade dimensional; • Baixa manutenção; • Mais fáceis de transportar e mais leves; • Maior resistência a pragas, como térmitas, que no caso da madeira causam bastantes danos.
Granito	<ul style="list-style-type: none"> • Menor porosidade, tornando o compósito um material mais higiénico para aplicações que envolvem alimentos; • Fácil manutenção; • Maior variedade em termos de aspeto, maior customização; • Maior resistência ao calor.

2.1.4 Aplicações

Um exemplo de sucesso de aplicação dos materiais compósitos é o *Boeing 787* (Figura 8), onde metade do seu peso são materiais compósitos à base de fibra de carbono. Segundo o fabricante de aviões, as receitas de 2006 tiveram um aumento de 15% em relação a 2005 e um aumento de 26% no último trimestre do ano. O fabricante garante que este sucesso se deve às excelentes propriedades dos materiais compósitos, que vão além da relação entre o peso e o preço. De facto, o uso destes materiais permitiu a construção de aviões mais robustos, com janelas maiores, melhores condições na

cabine, menos afetados pelos efeitos da corrosão e com intervalos maiores entre manutenções [22]. Por outro lado, as vantagens dos materiais compósitos fazem-se notar também nas questões ambientais, visto que também permitiram uma redução de 20% no consumo de combustível [23].

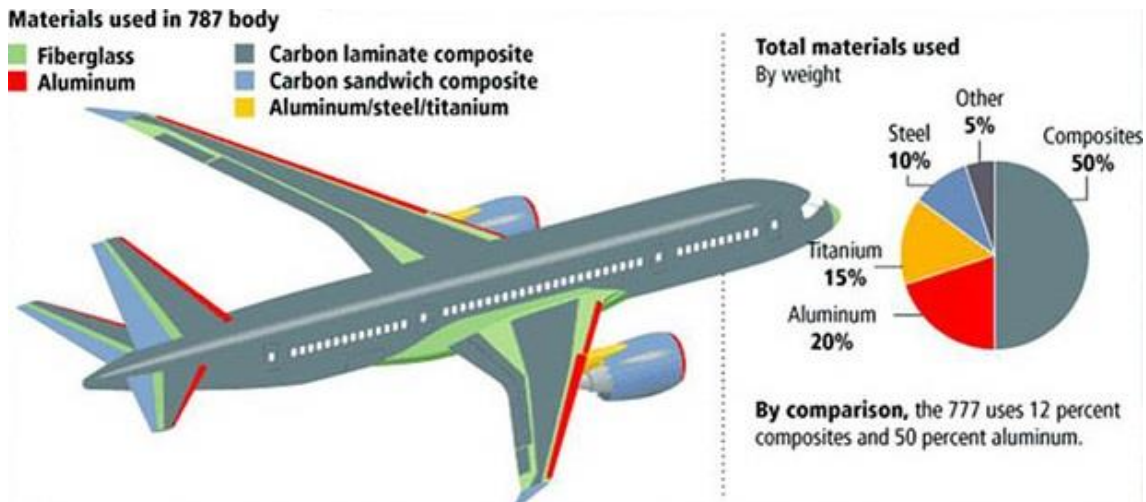


Figura 8 - Boeing 787: exemplo de aplicação de materiais usados [23]

Outro grande impulsionador para o sucesso dos materiais compósitos é a indústria automóvel. Na segunda metade do século XX começaram a ser desenvolvidos os primeiros carros de corridas com alguns componentes em material compósito, substituindo o tradicional alumínio que, embora seja um material com baixa densidade e boa resistência, é bastante suscetível a fraturas o que punha em causa a segurança dos automobilistas. Assim sendo, alguns dos componentes do chassi começaram a ser substituídos por materiais compósitos o que tornam os veículos mais robusto e mais estável [24].

Mais recentemente, devido a questões ambientais e a fatores económicos, definiu-se como meta reduzir ao máximo o peso dos automóveis. Com isto consegue-se, por um lado, diminuir a poluição, e, por outro, aumentar a segurança e conforto ao menor custo possível, tornando o uso deste tipo de material algo imprescindível. Deste modo, destaca-se o *sheet moulding compound* (SMC), em que a relação preço, peso, resistência e facilidade processamento são bastante apreciados pelos construtores de automóveis.

Atualmente os materiais compósitos tem um lugar bem destacado entre os materiais de engenharia.

2.1.5 Processos de fabrico

Para além das excelentes propriedades mecânicas, os materiais compósitos permitem uma grande flexibilidade na sua conceção. As técnicas de fabrico propiciam uma redução substancial no número de peças de fabrico, diminuindo assim os custos associados à montagem. O desenvolvimento tecnológico dos últimos anos tem

permitido automatizar os processos de fabrico convencionais, levando a que estes sejam mais rápidos, com menos desperdícios, e, fundamentalmente, tem tornado os processos economicamente mais competitivos [3].

Os processos de fabrico podem ser divididos essencialmente em dois grupos, os processos de molde fechado e os de molde aberto [1].

Os processos com molde aberto utilizam apenas meio molde, com uma geometria adequada, que cumpra os requisitos dimensionais necessários. Normalmente, trata-se de processos manuais, que originam um bom acabamento apenas numa das superfícies e que apresentam baixa reprodutibilidade. Como se trata de métodos que utilizam baixa pressão, ou até mesmo nenhuma, podem realizar peças de grandes dimensões e de geometria complexa.

Os processos em molde fechado são processos que, de uma forma geral, são automatizados, originando peças com excelente acabamento superficial nas duas faces. Estes processos apresentam uma boa reprodutibilidade e são menos prejudiciais para a saúde, uma vez que, durante o processo são libertados produtos voláteis, como por exemplo, os monómero de estireno, que acabam por ficar retidos dentro do molde [1].

De forma geral, a moldação de um material compósito pode ser descrita pelas operações mencionadas na Figura 9.

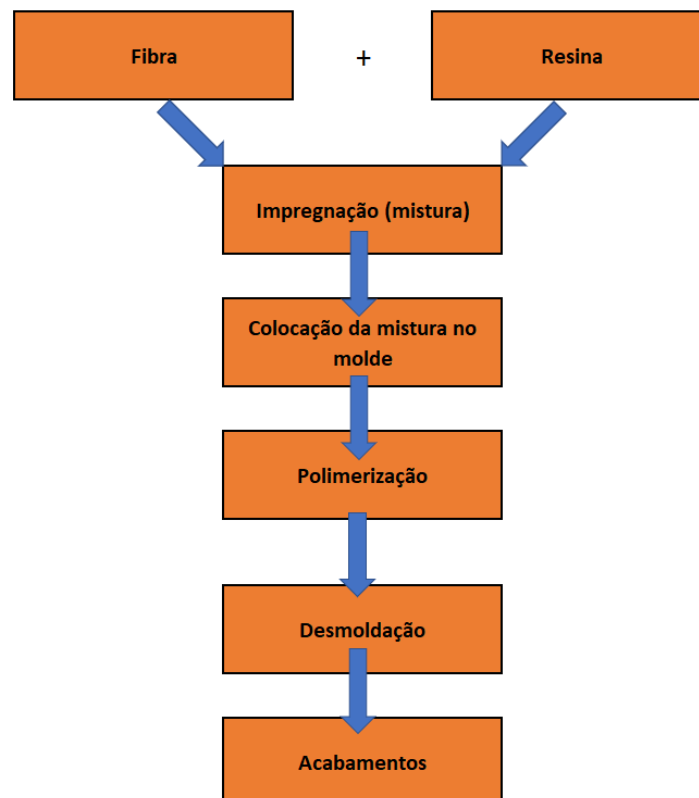


Figura 9 - Esquema de operações para materiais compósitos, adaptado de [14]

Dentro dos processos em molde aberto, destacam-se os seguintes:

- **Moldação manual**

A moldação manual é o método mais simples para a fabricação de compósitos, apresentando um investimento inicial baixo, podendo produzir tanto peças pequenas e simples, como peças grandes e complexas. No entanto, este processo tem baixa produtividade e, como o teor de fibras é heterogêneo, a qualidade das peças, assim como a rapidez do fabrico, vão estar fortemente dependentes da habilidade do operador [25]. Por outro lado, este processo requer uma boa ventilação do espaço envolvente, devido à libertação de produtos voláteis [1].

A Figura 10 exemplifica este método. Neste caso, o método é conseguido através do empilhamento e da impregnação de sucessivas camadas de reforço. Inicialmente, para se garantir um bom acabamento superficial, é aplicada sobre uma das faces do molde, uma resina de poliéster, designada por “*get-coat*”. Em seguida, este gel é curado num forno a uma temperatura de aproximadamente 50°C. Após a cura, o reforço (como por exemplo, a fibra de vidro, a fibra de carbono, etc.) é colocado sobre o molde e, de seguida, é aplicada a resina. Geralmente, são ainda usados rolos de pintura para consolidar o laminado, impregnando completamente o reforço e removendo o ar retido.

De forma a aumentar a espessura do laminado, são adicionadas camadas subsequentes de reforço. Para endurecer o laminado, são introduzidos materiais de núcleo de baixa densidade, espuma ou favo de mel [25].



Figura 10 - Moldação manual – processo [26]

- **Moldação por projeção**

O processo de moldação por projeção, embora seja mais sofisticado e mais produtivo que o processo anterior, depende da habilidade do operador para obter peças com qualidade. As propriedades mecânicas são ligeiramente inferiores.

A Figura 11 ilustra o princípio deste processo. Tal como no processo anterior, primeiramente é aplicado “*get-coat*”, e de seguida, dá-se a sua cura. Numa segunda parte, através de uma pistola de projeção, são aplicadas a resina e a fibra. A fibra, sob forma *rovíng*, é levada até à cabeça da pistola, onde é cortada com o comprimento desejado e, de seguida, é depositada sobre o jato da resina. Homologamente ao processo anterior, é também necessário utilizar rolos para impregnar as fibras com maior eficiência e expulsar o ar retido.

Esse processo usa ferramentas simples e de baixo custo, e tem processamento simples. O equipamento portátil permite a fabricação no local praticamente sem limitações de tamanho de peça. O processo pode ser automatizado.

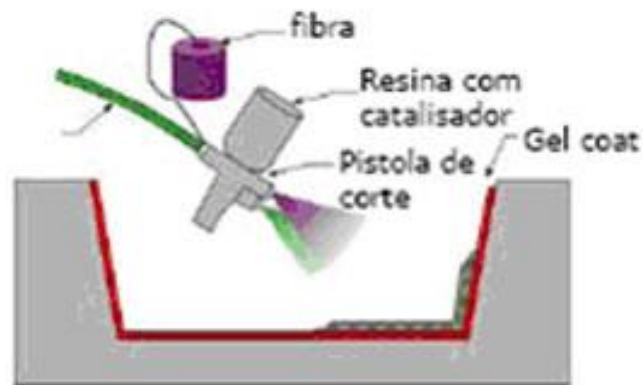


Figura 11 - Moldagem por projeção – processo [26]

- **Enrolamento filamental**

Este método, esquematizado na Figura 12, é utilizado na produção de componentes ocos, tais como reservatórios para armazenagem de combustíveis, motores de foguetões e mísseis, tubos, pilhas, vasos de pressão, entre outros. Uma das principais vantagens é facto de ser automatizado e controlado por computador, diminuindo, assim, erros humanos, e permitindo uma produção contínua. Neste processo, a fibra, em forma de *roving*, é embebida num banho de resina e é enrolada através de um mandril em rotação. Durante a fase de enrolamento, a fibra é orientada em função das condições a que estará sujeita. Após ter sido aplicado o número de camadas necessárias, procede-se à polimerização num forno ou através de luz infravermelhas.

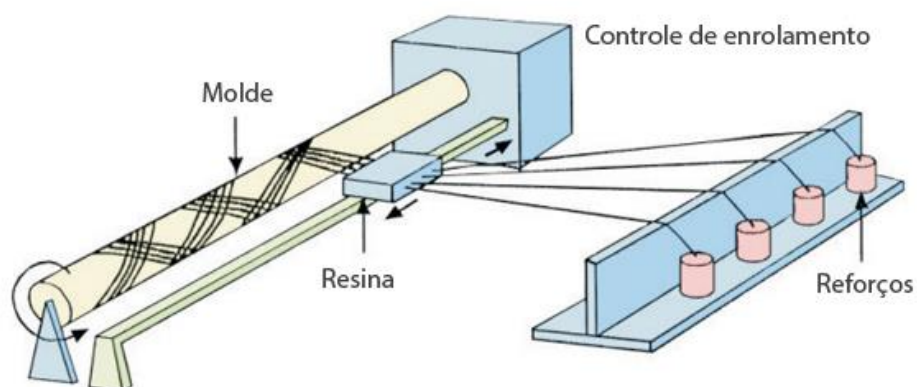


Figura 12 - Enrolamento filamental – processo [27]

Dos processos em molde fechado, realçam-se os seguintes:

- **Moldação por vácuo [1, 28]**

A moldação por vácuo é, normalmente, utilizada na obtenção de peças com acabamento superficial em ambos os lados, sendo este processo aplicado para produções de séries pequenas, de cerca 500 a 5000 peças por ano. O acabamento liso exige um molde composto por um macho (punção) e uma fêmea (cavidade).

Existem dois métodos para a criação de peças por este processo. No método mais simples, a resina e o reforço são introduzidos previamente no molde, e este, numa fase seguinte, fecha e é-lhe aplicado a vácuo. No segundo caso, depois de o molde se encontrar fechado, a resina é injetada a baixa pressão e só depois é aplicado o vácuo.

Este processo garante duas superfícies lisas, com quantidades reduzidas de ar e com percentagens de fibras até 70%. Trata-se de um método comumente utilizado na produção de bandejas, caixas protetoras para máquinas rotativas, caixas de distribuição elétrica e cadeiras escolares.

- **Moldação por injeção**

A moldação por injeção [1] é um processo bastante utilizado para a produção de grandes quantidades de peças. Uma das principais vantagens deste processo é o facto de permitirem comprimentos de reforço da ordem dos 6 a 12 mm, o que permite produzir peças com excelentes propriedades mecânicas. Este processo necessita de um equipamento especial para a injeção (Figura 13), onde o molde está acoplado à unidade de fecho, que assegura os movimentos da parte móvel e a força de fecho.

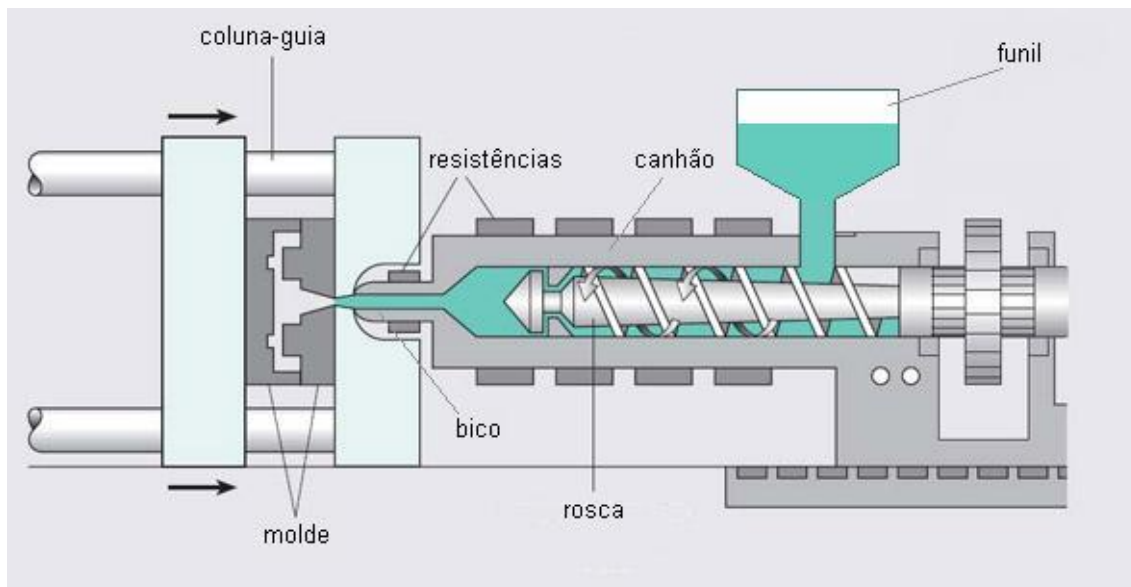


Figura 13 - Esquema de moldação por injeção – convencional [29]

A unidade de injeção recebe o material do funil e, através dos movimentos da rosca, conduz o material até ao bico da injeção. As unidades mais modernas conseguem

controlar todos os movimentos em tempo real, desde a quantidade de matéria prima, temperatura de injeção, velocidade de injeção, pressão, etc. O processo de cura da peça é feito dentro do molde.

Dentro dos processos de injeção, pode-se destacar a moldação por injeção a baixa pressão e por transferência. Estes processos, embora similar ao anterior, são feitos com pressões na ordem dos 1 a 5 bar, o que torna o investimento inicial muito menos dispendioso e equipamentos mais simples.

O *Resin Transfer Moulding* (RTM) é o processo de injeção mais utilizado. A Figura 14 representa o esquema deste processo. Este consiste em preencher a cavidade de um molde, injetando uma resina líquida sob pressão por um, ou vários pontos, dependendo do tamanho do componente. Os reforços são colocados no interior do molde, sendo que depois ele é fechado e travado firmemente. Normalmente, as resinas mais utilizadas são as resinas à base de poliésteres, epóxicos, fenólicos e acrílicos.

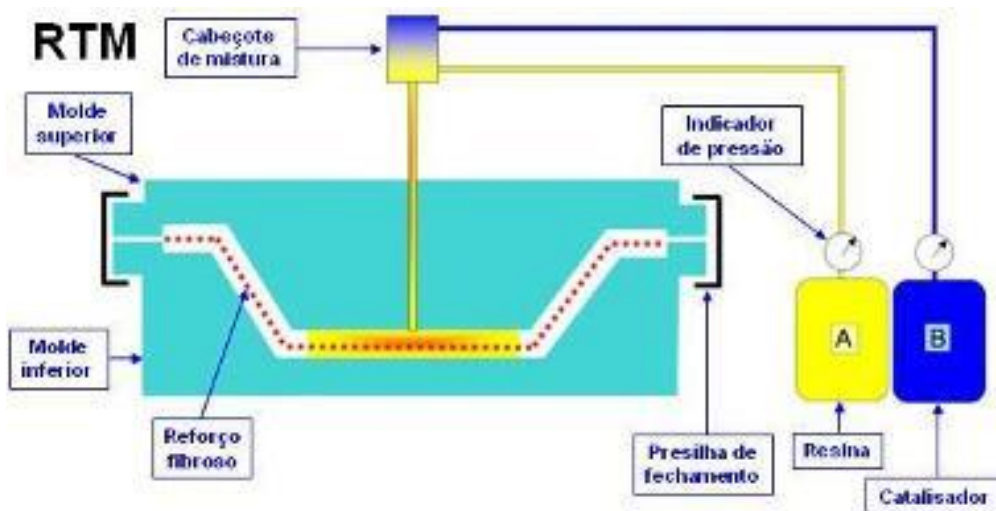


Figura 14 - Esquema do processo RTM [30]

- **Moldação por compressão [1, 31]**

O processo de moldação por compressão pode ser feito com molde quente ou com molde frio, dependendo do tipo de material utilizado. Este processo permite produzir peças com uma variada gama de aplicações e formas como, por exemplo, equipamentos elétricos, banheiras e, até mesmo, carrocerias de automóvel. A Figura 15 representa o esquema deste processo, onde a matéria prima é colocada dentro do molde, e este é posteriormente fechado, fazendo com que a peça ganhe a forma requerida

A moldação a frio é bastante parecida ao processo RTM, onde o reforço (normalmente fibra de vidro) é colocado previamente e depois se deposita resina líquida no molde. As pressões exercidas são baixas, geralmente inferiores a 4 bar, e as temperaturas aplicadas assumem valores de 30° a 45°C. É um processo adequado a produções médias (4 a 12 peças por hora) e com acabamento superficial razoável.

A moldação a quente utiliza moldes pré-aquecidos a temperaturas entre 80°C a 170°C, e pressões de 5 a 150 bar. O investimento inicial é bastante mais elevado que o RTM, uma vez que os moldes são feitos com recurso a materiais metálicos, pois estes permitem suportar, não só, as pressões exercidas, mas também as temperaturas de serviço. As peças resultantes apresentam propriedades mecânicas superiores, e incorporam maiores quantidades de reforço. Com este processo conseguem-se cadências de produção mais elevadas e obtêm-se peças com uma grande qualidade superficial.

Este processo é utilizado para compostos de moldação do tipo SMC, *bulk molding compound* (BMC) e *glass mat thermolastic* (GMT).

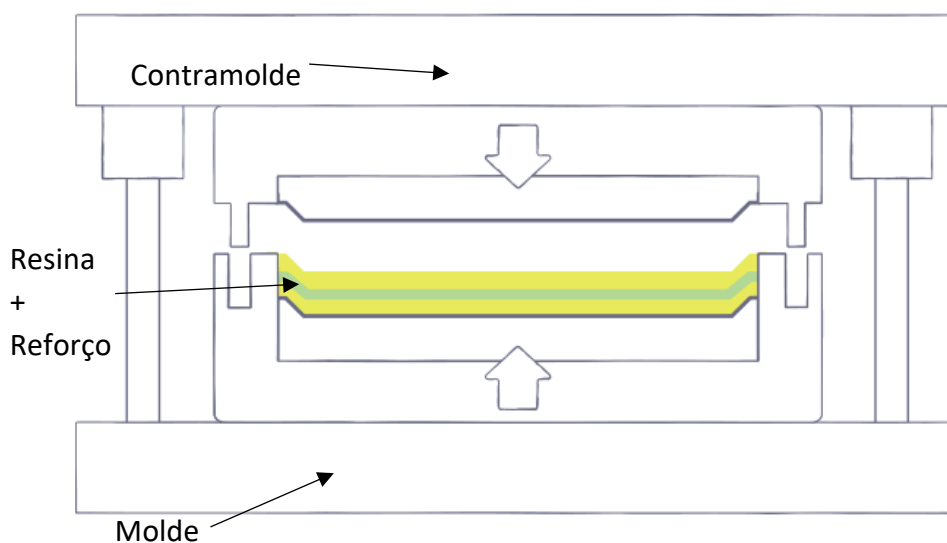


Figura 15 - Moldação por compressão – esquema adaptado de [31]

- **Moldação por pultrusão [1, 32]**

A pultrusão é um processo contínuo, ideal para a produção de peças de secção constante, ocas ou maciças. Os reforços são colocados de modo a resistir ao esforço longitudinal. A Figura 16 representa este processo, onde o reforço (neste caso, a fibra de vidro), é puxado, fazendo-se passar por um tanque com resina, onde se dá a impregnação, e, de seguida, é conduzido através de uma fieira de aço pré aquecida, que dá a forma pretendida ao perfil. A cura é feita imediatamente após a uma temperatura de aproximadamente 60°C, e é cortada ao comprimento desejado. É um processo totalmente automático, que origina peças com excelentes características mecânicas na direção longitudinal. Todavia, é bastante limitado à fabricação de componentes de secção constante e com pouco rigor dimensional.

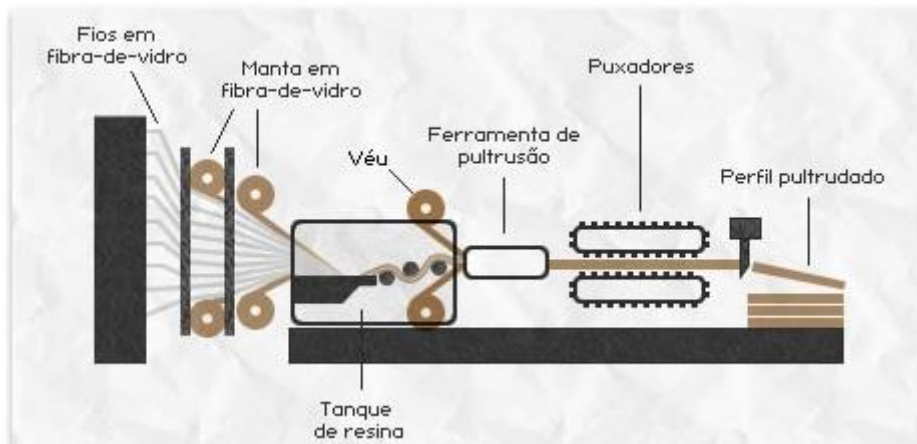


Figura 16 - Pultrusão – esquema [33]

- **Moldação por centrifugação [1, 34]**

Este processo permite obter formas ocas, cilíndricas e de grandes diâmetros, como por exemplo tubos para instalações químicas e petrolífera, depósitos de armazenamento de vinho, leite, entre outros. A Figura 17 esquematiza este processo, que consiste num molde metálico em rotação, onde são introduzidos a resina e o reforço. Por efeito da força centrífuga, a resina impregna o reforço e, após cura, forma a estrutura desejada. A velocidade de rotação do molde depende de vários fatores, tais como, diâmetro, espessura, viscosidade da resina, entre outros.

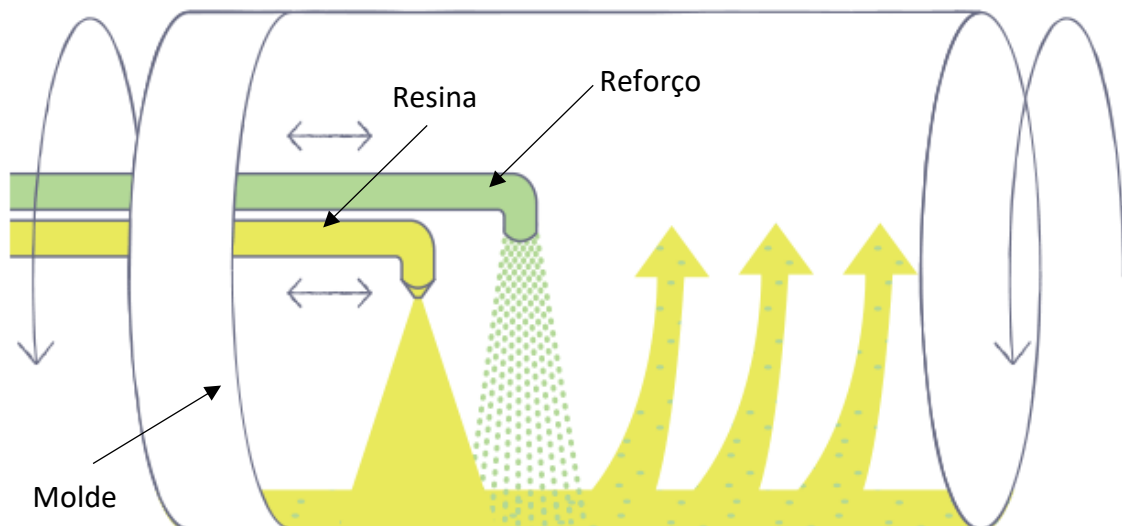


Figura 17 - Moldação por centrifugação – Esquema Adaptado de [35]

Este processo apresenta algumas vantagens, das quais se destacam a boa reprodutibilidade, a obtenção de peças com grandes dimensões, a obtenção de peças com duas faces lisas [2], e a elevada percentagem de reforço. No entanto, o

investimento inicial considerável, a limitação da forma e a necessidade de mão de obra qualificada, limitam este método.

Existem mais processos para a obtenção de materiais compósitos, tais como a moldação em contínuo, moldação em autoclave, *reinforced reaction injection moulding* (RRIM), *structural reaction injection moulding* (SRIM), entre outros.

2.1.6 *Sheet molding compound*

A abreviatura SMC é derivada do inglês "*Sheet Moulding Compound*", isto é, um composto de moldação, na forma de "folha" ou "chapa", também designado por pré-impregnado. A Figura 18 demonstra um exemplo de SMC.



Figura 18 - Exemplo de SMC [36]

O primeiro trabalho publicado sobre SMC foi nos EUA em 1953, mas as primeiras aplicações práticas só apareceram em 1960 [2].

Esta técnica tornou-se importante devido ao fácil manuseamento do material, particularmente em moldações de grandes áreas e onde sejam necessárias resistências mecânicas elevadas.

Áreas significativas de utilização do SMC são as seguintes [2]:

- Indústria de transportes, particularmente no automóvel;
- Indústria elétrica;
- Aplicações domésticas e de escritório;
- Construção civil.

A sua penetração nestes mercados resulta da combinação de um conjunto de propriedades, das quais se podem salientar [2]:

- Flexibilidade de design, permitindo produzir peças complexas numa só operação com a inclusão de nervuras, bossas e elementos de fixação;

- Excelente estabilidade dimensional – esta característica é particularmente responsável pela utilização na conversão de muitas aplicações dos termoplásticos reforçados com fibra de vidro;
- Excelente resistência à corrosão e ao calor, permitindo a sua utilização em muitas aplicações críticas, onde é requerido o contacto com a água, detergentes ou agentes químicos corrosivos;
- Excelentes características isolantes e de resistência ao fogo, possibilitando a satisfação das especificações relativas a utilizações elétricas;
- Características mecânicas elevadas, especialmente a resistência ao impacto, a possibilidade de as incrementar em direções ou áreas particulares;
- Baixa contração durante a moldação;
- Tempos de polimerização baixos;
- Relativa baixa pressão de moldação;
- Baixo custo.

A Figura 19 representa exemplos de peças fabricadas em SMC.



Figura 19 - Exemplo de peças feitas em SMC a) mala VW eos [37] b) Estribo Volvo [38]

Processo de fabrico de SMC

O SMC é especialmente adaptado à fabricação contínua. A Figura 20 demonstra o processo de fabrico de SMC. A sua fabricação pode ser dividida essencialmente em duas fases distintas:

1. Preparação da pasta mãe

É utilizado equipamento de mistura e dispersão, que assegura uma boa mistura de resinas, cargas e aditivos. Na fase final da preparação da pasta mãe é misturado o agente de maturação.

2. Impregnação

É a operação em que a fibra de vidro é associada à pasta mãe, executada numa máquina de impregnação adaptada ao tipo de SMC que se pretende preparar.

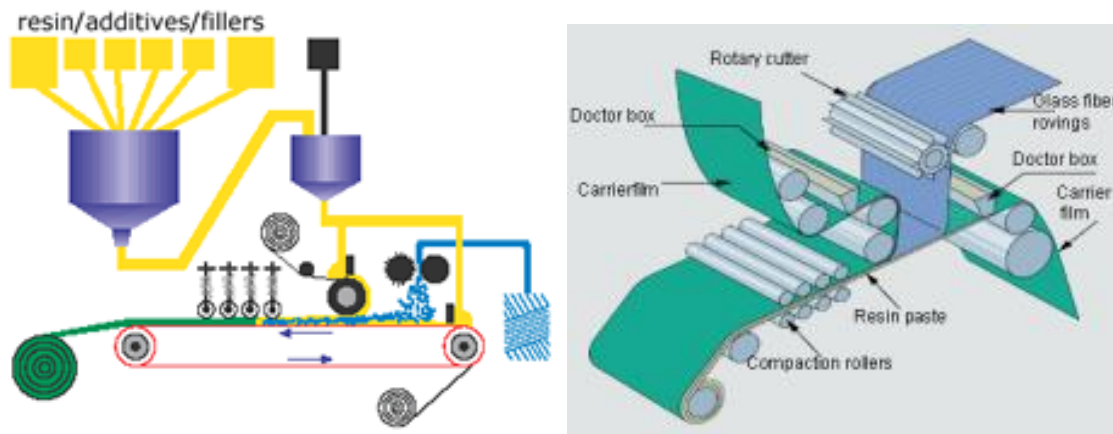


Figura 20 - Processo de fabricação por SMC [39, 40]

Moldação

O esquema base de um molde de compressão (Figura 21) é composto por uma metade “fêmea” ou cavidade e por outra metade “macho” ou punção.

O material é colocado no molde e é adicionada pressão com temperatura sobre o molde, durante um tempo pré-determinado.

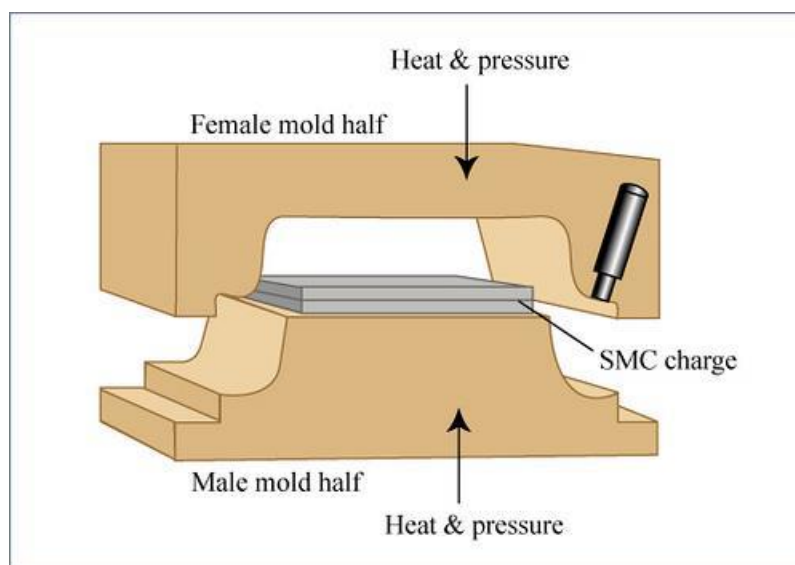


Figura 21 - Esquema de base de um molde de SMC [41]

Um molde para fabrico de peças por SMC é composto por muitos elementos, a Figura 22 ilustra os principais.

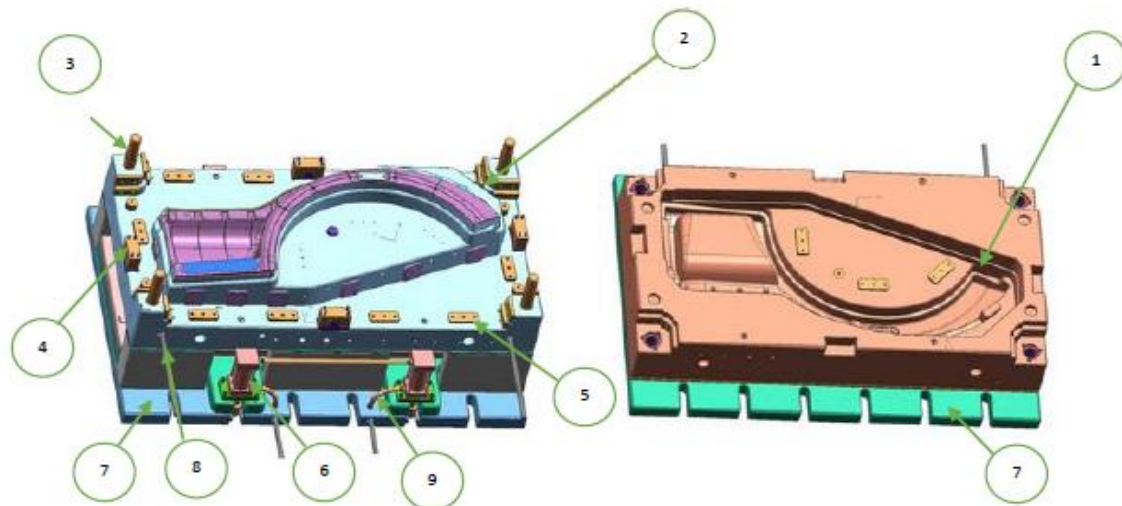


Figura 22 - Elementos fundamentais de um molde para SMC [42]

- ***Cavidade ou “fêmea” (1)***

Bloco de aço maquinado, normalmente modela a superfície exterior da peça.

- ***Punção ou “macho” (2)***

Bloco de aço maquinado, normalmente modela a superfície interna da peça.

- ***Colunas de pré-guiamento (3)***

Colunas circulares que têm a função de pré-guiar a parte superior do molde no movimento de fecho do mesmo.

- ***Guias prismáticas (4)***

Guias maquinadas que têm a função de guiar a parte superior do molde na parte final do movimento do fecho do mesmo. Normalmente são em bronze grafitado.

- ***Batentes de fecho (5)***

Elementos de aço endurecido, colocados normalmente no bloco da cavidade e na placa porta punções, que têm a função de limitar o fecho do molde, evitando que o punção e a matriz entrem em contacto, limitando a espessura mínima possível (diferente da espessura mínima definida para o processo).

- ***Batente antirretorno***

Elementos em aço, ligados à placa de extração, de modo a impedir que no processo de fecho os extratores toquem na outra parte do molde.

- ***Cilindros de extração (6)***

Cilindros hidráulicos ligados ao sistema hidráulico da prensa e à placa de extração. Têm a função de extrair a peça.

- **Placas de fixação à prensa (7)**

Placas em aço, com rasgos maquinados que servem para fixar as partes do molde à prensa.

- **Sistema de aquecimento (8)**

Circuito furado nos blocos de aço do punção e da cavidade para aquecerem essas partes. Podem ter uma ou mais entradas/saídas. O sistema de aquecimento pode ser a vapor ou óleo.

- **Sistema hidráulico (9)**

Circuito hidráulico que liga o sistema hidráulico da prensa aos cilindros do molde ou a outros movimentos hidráulicos.

- **Sopro de ar**

Ligação pneumática que é utilizada para auxiliar a extração/fixação da peça no molde.

- **Placa de extração e extratores**

A placa de extração é uma placa de aço maquinada, ligada aos cilindros hidráulicos e montada com extratores. Estes cilindros, solidários com a placa de extração, fazem a extração da peça.

- **Outros**

Existem mais elementos que compõe um molde, como sistemas auxiliares para a realização de formas que estariam em contra saída e não podem ser desmoldados na forma tradicional; *micro-switch* para informação de fins de curso e limitar/acionar movimentos, e placas de identificação para informação de todo o tipo (molde, cliente, entradas/saídas, e outras informações).

2.1.7 Prepregs

O *prepreg* é um material compósito que serve de base para formular materiais compósitos de maior complexidade. O termo *prepreg* refere-se a um material compósito reforçado com fibras, contínuas e alinhadas, pré-impregnadas numa resina polimérica parcialmente curada. Este tipo de material é fornecido em bobines, apresentando uma utilização bastante prática, sendo, provavelmente, a forma de material compósito mais usada para aplicações estruturais [43].

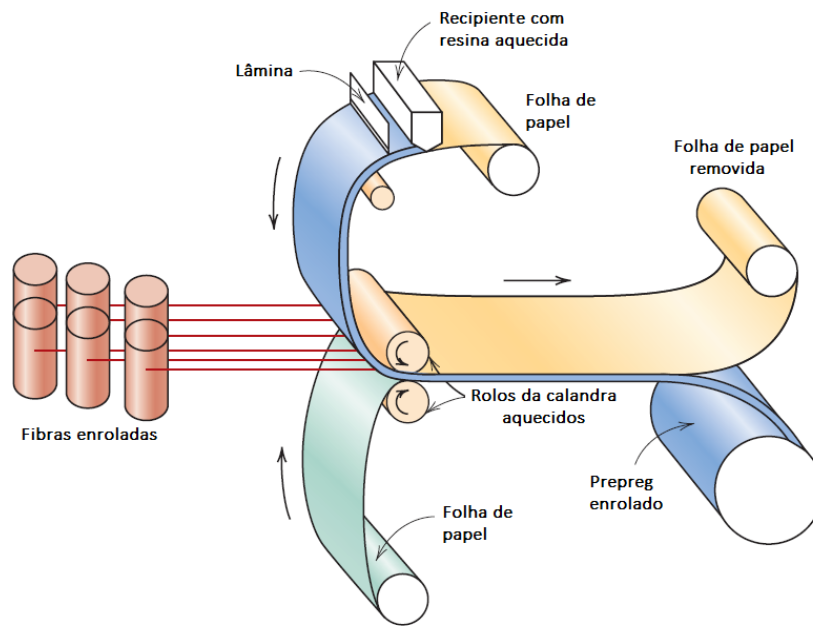


Figura 23 - Processo de fabrico de *preregs*, adaptado de [43]

O processo de fabrico dos *preregs* está esquematizado na Figura 23. Numa primeira fase, são desenroladas as fibras, que são fornecidas em bobines. Depois de desenroladas, as fibras passam por dois rolos aquecidos – num processo designado por calandragem, onde que são pressionadas entre duas folhas de papel.

Uma das folhas de papel é revestida com um filme fino de resina de baixa viscosidade, que embebece as fibras. Uma lâmina encarrega-se de distribuir a resina pela folha de papel, garantindo a uniformidade do filme, em termos de espessura e largura. A folha de papel permite que a resina não fique colada ao rolo, possibilitando assim a continuidade do processo. Esta folha de papel, no fim desta primeira calandragem, é removida. A segunda folha de papel permite que o *prepreg* não fique colado no segundo rolo.

No final deste processo, o material é enrolado num núcleo de cartão, sendo que a segunda folha de papel não é removida, servindo também para ajudar no enrolamento do produto. Os *preregs* podem ser apresentados numa diversa gama de espessuras, podendo estar compreendidas entre 0,08 a 0,25 mm, e percentagens de resina na ordem dos 35 a 45%.

As resinas termoendurecíveis curam à temperatura ambiente, por isso, o *prepreg* tem de ser armazenado a temperaturas iguais ou inferiores a 0°C. Pela mesma razão, também o tempo de manuseamento do *prepreg* é limitado. Quando armazenado corretamente, os *preregs* têm um tempo de vida de seis meses, sendo que, geralmente, pode uma durabilidade superior.

Na produção de *prepregs* são usadas tanto resinas termoendurecíveis como termoplásticas. Dos tipos de fibras mais usadas, destacam-se as fibras de carbono, vidro e de aramida.

A aplicação de um *prepreg* na fabricação de um material compósito de maior complexidade tem por base um processo de empilhamento. Inicialmente, a primeira camada de *prepreg* é estendida na superfície pretendida. De seguida, são empilhadas as várias camadas, de acordo com o número de camadas pretendidas, sendo que, antes do empilhamento, é removida a folha de papel. O empilhamento pode ser feito de várias formas, podendo as camadas ser orientadas numa forma unidirecional, ou então, podem ser orientadas com orientações diferentes. Numa fase final do processamento, termina-se a cura do *prepreg*, com a aplicação de calor e temperatura.

O processo de empilhamento pode ser feito manualmente, sendo que o operador necessita de cortar o *prepreg* de acordo com as dimensões pretendidas, e orientar as várias camadas com determinada orientação. O corte do *prepreg* pode também ser feito com recurso a uma máquina, que o pode recortar com determinado padrão, sendo depois empilhado manualmente. Todo o processo pode ser automatizado, tanto o corte, como o empilhamento, reduzindo assim a intervenção humana no processo. No entanto, esta produção automatizada é destinada a grandes processos, que têm de apresentar uma grande eficiência nos custos.

2.2 Ligação de materiais compósitos

A criação de um produto implica a ligação entre os materiais que o constituem. Nesse sentido, existe muitas vezes a necessidade de ligar os materiais compósitos a outros materiais estruturais, quer sejam do mesmo tipo de material ou de outro tipo. Todavia, as ligações entre compósitos são muitas vezes evitadas, uma vez que este tipo de ligação é mais complexo e mais caro. As ligações entre compósitos, podem levar à interrupção das fibras, o que implica que as tensões na estrutura tenham de ser transferidas pelo tipo de ligação. Desta forma, o tipo de ligação a ser escolhido é um fator de grande importância.

De facto, são vários os métodos de ligação que podem ser aplicados a materiais compósitos, que estão separados por vários critérios, os quais se mencionam seguidamente [6]:

- Se a ligação é permanente ou não;
- O estado em que se encontra o compósito na altura da ligação, curado ou não curado;
- Tipos de materiais envolvidos na ligação;
- Tipo de ligação, mecânica ou adesiva.

Assim, nos subcapítulos seguintes, apresentam-se os principais métodos usados na ligação de materiais compósitos.

2.2.1 Ligações adesivas

A ligação adesiva é, provavelmente, uma das ligações mais antigas. O método consiste na ligação entre dois materiais, cujas faces são dispostas a uma distância muito curta, e um material, geralmente de origem polimérica, é introduzido nesse espaço, unindo permanentemente esses materiais. Os materiais de ligação com maior destaque na engenharia são designados por adesivos estruturais, e têm a capacidade de unir permanentemente materiais rígidos e formar uma forte ligação [4, 44].

Método de aplicação

O uso deste método de ligação requer, de uma forma geral, duas etapas, sendo estas a preparação da superfície e a aplicação do adesivo. A preparação da superfície é uma fase importante, uma vez que o sucesso da ligação adesiva depende da qualidade da adesão entre o adesivo e o aderente, e este fator está fortemente ligado ao estado da superfície do aderente. Por vezes, a garantia de um bom estado superficial vai para além de uma limpeza de superfície, podendo ser necessário conferir alguma rugosidade à superfície através de granalhagem ou escovagem, para os casos de aderentes metálicos. No caso dos aderentes plásticos é, geralmente, realizada uma limpeza com solventes ou é feito um ataque químico para aumentar a rugosidade. A aplicação do adesivo pode ser realizada de várias formas, que se encontram descritas na Tabela 12.

Tabela 12 - Método de aplicação de adesivos [4]

Método de aplicação	Descrição
Espátula	Método manual. As camadas não ficam regulares.
Por pistola	Utilizando uma pistola de pressão manual, mais consistente e controlado que a espátula.
Rolos manuais	Semelhante aos rolos de pintura, onde se aplica sob uma superfície lisa.
Spray	Aplicação rápida para áreas grandes ou para zonas de difícil acesso.
Aplicadores automáticos	Para produções a média ou alta velocidade, recorrendo a <i>dispensers</i> e <i>nozzles</i> .
Aplicação por rolo	Processo mecanizado, em que um rolo em rotação é parcialmente submerso num tanque com um adesivo líquido. Sendo este, posteriormente, transferido para a superfície do aderente. Utilizado para aplicar o adesivo em madeira, compósitos de madeira e materiais similares com grandes áreas de superfície.

2.2.2

2.2.2 Ligações aparafusadas e rebitadas

Este tipo de ligações é bastante utilizado para a união de diferentes componentes. As ligações aparafusadas assemelham-se às ligações utilizadas em estruturas metálicas (parafusos). Os parafusos podem ser metálicos, ou em material plástico reforçado por fibra (*Fibre-reinforced plastic* - FRP). É mais comum a utilização dos parafusos metálicos, por necessidades de montagem e desmontagem e pelas suas melhores características mecânicas [1, 45]. O cálculo de ligações aparafusadas em materiais FRP é mais complexo do que nas estruturas metálicas. O comportamento ortotrópico do material e o maior número de diferentes modos de rotura a que pode estar sujeito são as principais razões para tal [46]. As vantagens e desvantagens deste tipo de ligações encontram-se descritas na Tabela 13.

Tabela 13 - Vantagens e desvantagens das ligações mecânicas [1]

Vantagens	Desvantagens
↑ <i>Fácil montagem e desmontagem;</i>	↓ <i>Interrupção das continuidades das fibras;</i>
↑ <i>Não necessita de preparação;</i>	↓ <i>Diminui a resistência do substrato;</i>
↑ <i>Fácil de inspeção visual;</i>	↓ <i>Aumento da concentração de tensões na zona do furo;</i>
↑ <i>Bom desempenho sob solicitações de tração;</i>	↓ <i>Aumentam o peso da estrutura.</i>
↑ <i>Não são afetados por ambientes húmidos nem ciclos térmicos.</i>	

De modo geral, este tipo de ligação é feito de duas possíveis maneiras: sobreposição simples (Tabela 24) e a sobreposição dupla (Tabela 25).

As primeiras são as mais comuns e caracterizam-se pela sua simplicidade e facilidade de aplicação. As segundas são utilizadas em aplicações em que se requer uma junta com melhor desempenho. De facto, este tipo de juntas pode ser 20% superior em termos de resistência mecânica, devido aos menores efeitos de flexão provocados pela excentricidade da força [1].

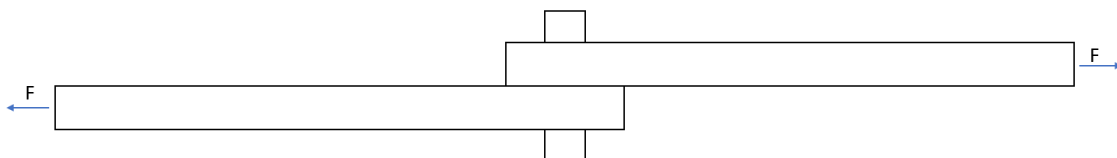


Figura 24 - Junta de sobreposição simples, adaptado de [1]

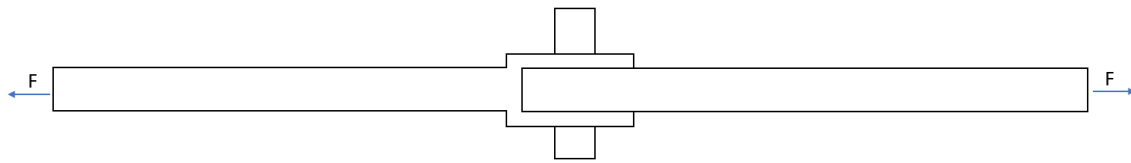


Figura 25 - Junta de sobreposição dupla, adaptado de [1]

Modos de rotura

A resistência de uma junta depende essencialmente de três fatores (Figura 26):

- Fatores geométricos, relações de e/d , w/d e t/d ;
- Tipo de reforço/ matriz e orientação das fibras;
- Parâmetros de fabrico, relacionados com a qualidade do furo (quantidade de fibra circundante, qualidade do corte, entre outros.).

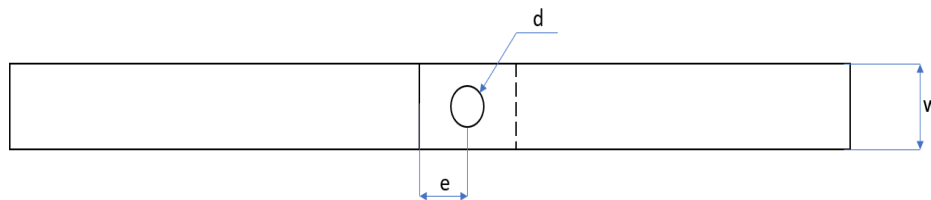


Figura 26 - Parâmetros geométricos de uma junta aparafusada, com espessura t [1]

Sendo “ e ” a distância da extremidade ao centro do furo, “ d ” como diâmetro do furo e “ w ” a largura da junta.

Existem, essencialmente, quatro modos de rotura (Figura 27):

- Tração e corte – São o tipo de rotura que se deve evitar, pois o seu resultado pode ser catastrófico, podendo prejudicar a estrutura de um componente;
- Clivagem – Ocorre quando o compósito tem fibras orientadas unidireccionalmente. Nestes casos, a furação cria uma zona descontínua de fibras, resultando numa zona bastante frágil;
- Esmagamento – A ocorrer rotura, deve-se preferir este tipo, pois o seu resultado não prejudica o propósito da ligação. Cria uma zona de esmagamento na zona do furo, diminuindo a resistência.

Existem alguns fatores que se devem considerar aquando a projeção de uma junta, tais como:

- As relações de e/d e w/d (Figura 26) devem de ser o mais elevadas possível para ocorrer rotura por esmagamento(e/d superior a 3 e w/d superior a 6, já se pode considerar suficiente para não ocorrer rotura por tração ou corte);
- Na zona dos furos, as fibras poderão apresentar diferentes orientações;
- Se possível, utilizar matérias mais tenazes na zona da furação.

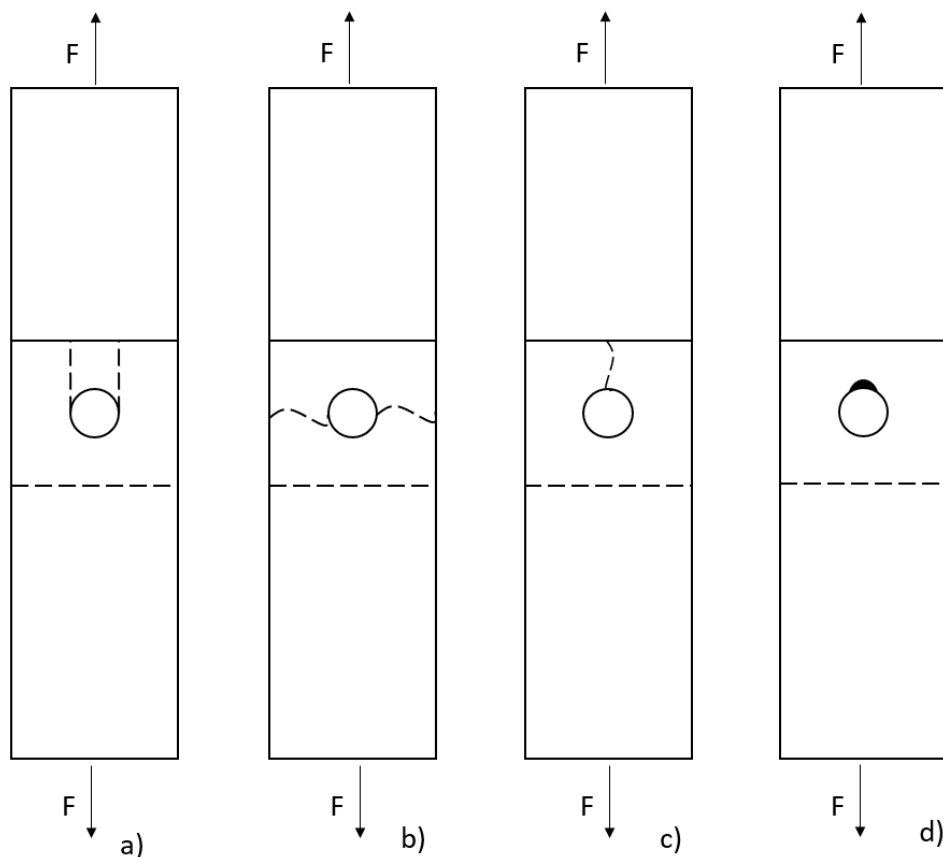


Figura 27 - Modos de rotura em junta aparafusadas; a) corte b) tração c) clivagem d) esmagamento, adaptado de [1]

2.2.3 Ligações co-curadas

O método de co-cura, que pode ser referido com um método de ligação adesiva, é uma técnica bastante eficiente pois o processo de cura e o processo de ligação são feitos ao mesmo tempo e não necessita de qualquer tratamento prévio [47, 48]. De facto, a maioria dos *prepregs* contém mais resina do que é necessário para o produto final, sendo possível assim criar uma camada de adesivo que une os dois substratos durante a cura. Como o adesivo da ligação e o material da matriz são do mesmo tipo, a sua análise e o seu *design* é mais fácil do que quando se trata de um processo de ligação adesiva utilizando um adesivo próprio para o efeito.

Como o processo de fabrico de ligações co-curadas é diferente das ligações adesivas, o excesso de resina resultante no final da junta causa a inter-difusão do adesivo e do compósito, conforme se pode verificar pela Figura 28.

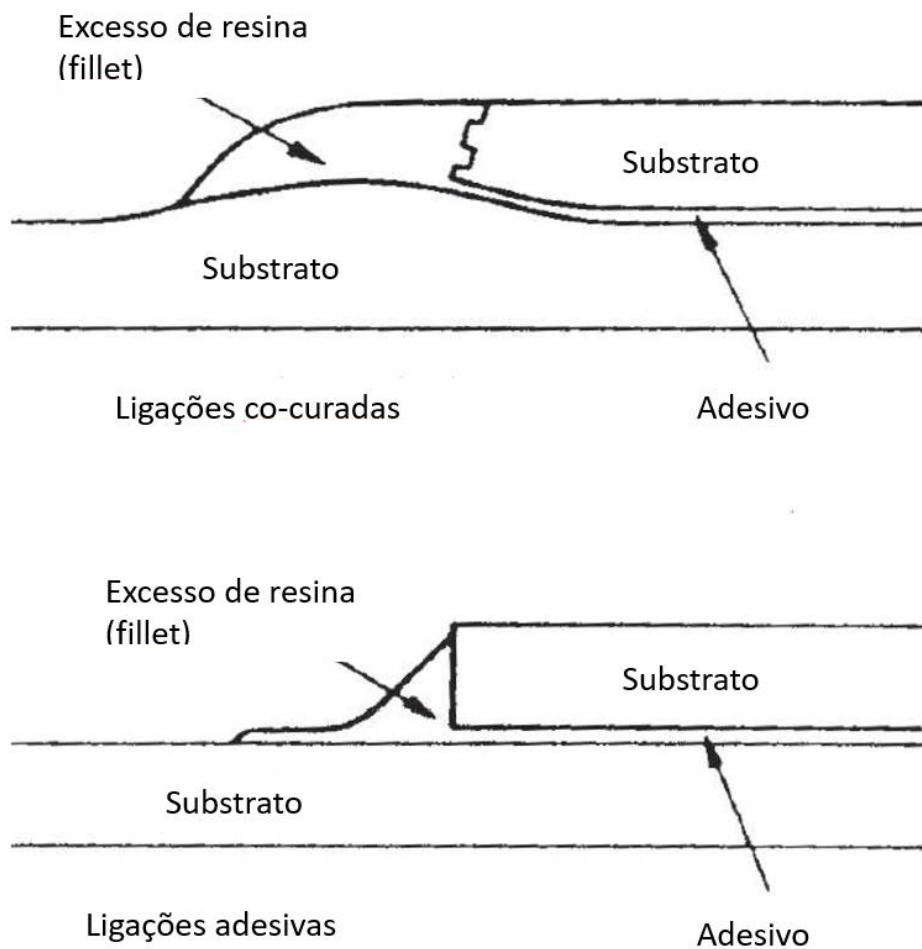


Figura 28 - Excesso de resina em ligações co-curadas e ligações adesivas, adaptado de [47]

Considerações sobre este processo:

- Adequa-se para peças de pequenas dimensões;
- Limitado ao tamanho da prensa/autoclave;
- As juntas não têm reparação;
- Difícil de prever se a resina preencheu todos os espaços.

2.2.4 Outras ligações

Para além das ligações acima mencionadas destacam-se também as ligações híbridas e ligações por fusão. As ligações híbridas [45] resultam da combinação de ligações mecânicas e ligações adesivas.

O recurso às ligações híbridas é feito quando é necessário usar juntas com uma resistência mecânica superior, sendo que não são ligações indicadas para peças de grandes dimensões. Uma das suas limitações é o facto de necessitar de uma preparação prévia. Neste tipo de ligações é comum usarem-se adesivos de cura rápida.

As ligações por fusão [49] apenas se utilizam em compósitos de matriz termoplástica. Como as resinas termoplásticas são de fácil reprocessamento, permite o estabelecimento de ligações perfeitas e com menos concentrações de tensões. A ligação é feita através da aplicação de calor e pressão, de modo a que a difusão do polímero ocorra. As vantagens e desvantagens deste tipo de ligações encontram-se descritas na Tabela 14.

Tabela 14 - Vantagens e desvantagens das ligações por fusão [1]

Vantagens	Desvantagens
↑↑ <i>Junta com propriedades semelhantes ao material do substrato;</i>	↓↓ <i>Necessidade de fornecimento de calor e pressão;</i>
↑↑ <i>Não necessita de tratamento superficial;</i>	↓↓ <i>Exige equipamento adequado;</i>
↑↑ <i>Boa resistência química à humidade e química;</i>	↓↓ <i>Exclusivo para materiais termoplásticos.</i>
↑↑ <i>Baixo custo;</i>	
↑↑ <i>Tempo de processamento inferior aos termoendurecíveis.</i>	

2.3 Ensaios para materiais e juntas de material compósito

A determinação das propriedades mecânicas é um fator essencial no projeto de um material compósito, pois torna-se necessário aferir se, efetivamente, o material cumpre os requisitos iniciais. Para este efeito, recorrem-se a métodos experimentais que permitem testar o comportamento dos materiais. Dentro dos ensaios experimentais podem-se destacar dois tipos, os estáticos e os dinâmicos, que serão descritos nos próximos subcapítulos. Os ensaios experimentais apresentados são referentes aos materiais compósitos e aos adesivos.

2.3.1 Ensaios estáticos

Os ensaios estáticos realizam-se a uma velocidade baixa, com uma baixa taxa de deformação, em condições consideradas quase-estáticas. De seguida, são dados alguns exemplos de ensaios realizados nestas condições:

- ***Ensaios quase-estáticos em provetes bulk à tração [50]***

Condições do ensaio: trata-se de ensaios de tração uniformes e uniaxiais. Para a determinação do módulo de elasticidade são utilizadas velocidades de 1 mm/min, enquanto para o teste da rotura são usadas velocidades superiores. A taxa de deformação no provete deve ser muito semelhante à do adesivo numa junta. No caso de adesivos flexíveis deverão ser realizados testes a taxas de deformação constante. A temperatura e a humidade do teste devem ser controladas, porque têm grande

influência sobre as propriedades, sendo usual o recurso a termopares. Em alguns casos, é necessário usar um provete adicional para realizar a compensação de temperatura.

Provetes: Os provetes usados nestes ensaios apresentam a forma de osso de cão (Figura 29) de acordo com a norma EN ISO 527-2, sendo que também podem ser seguidas a norma ASTM D 638 (para determinar as propriedades à tração de plásticos) ou ASTM D 3039 (propriedades à tração de compósitos fibra-resina).

Para os adesivos rígidos são usados provetes longos, dado que os deslocamentos são menores. No caso de adesivos flexíveis, em que os alongamentos podem exceder as capacidades dos instrumentos, são usados provetes curtos.

A espessura dos provetes é um fator muito importante, visto que disso dependem as propriedades do adesivo, especialmente se os provetes contiverem vazios. Os provetes ideais teriam espessuras muito finas de forma a se conseguir reproduzir a camada fina de adesivo numa junta. No entanto, isto é algo difícil de se conseguir devido à grande flexibilidade dos adesivos. De uma forma geral usam-se espessuras de 2 mm, podendo ser usadas espessuras maiores. No entanto, o risco de o adesivo queimar aumenta devido à intensa reação exotérmica que ocorre durante a cura (em casos particulares).

Amarras: alguns adesivos são difíceis de agarrar, provocando, em alguns casos, uma tensão elevada na zona de aperto. No caso de ensaios em adesivos frágeis, ocorre a rotura na zona de amarração devido a essa sobretensão. Para contornar este efeito é comum usar grampos que permitem que não se crie uma tensão exagerada na zona de aperto.

Dados retirados: nestes ensaios é medida a carga aplicada e o deslocamento de forma a se obter a curva tensão-deformação. O ensaio deve ser realizado com células de carga que estejam na mesma ordem de grandeza da tensão de carga do provete. Para a medição do deslocamento é recomendado o uso de equipamentos que não exijam contacto com o provete, como por exemplo, *lasers* que evitam a interferência do extensómetro no comportamento do material, especialmente, nos casos de adesivos flexíveis e dúcteis.

Determinação das propriedades: as propriedades podem ser determinadas através das curvas tensão-deformação.

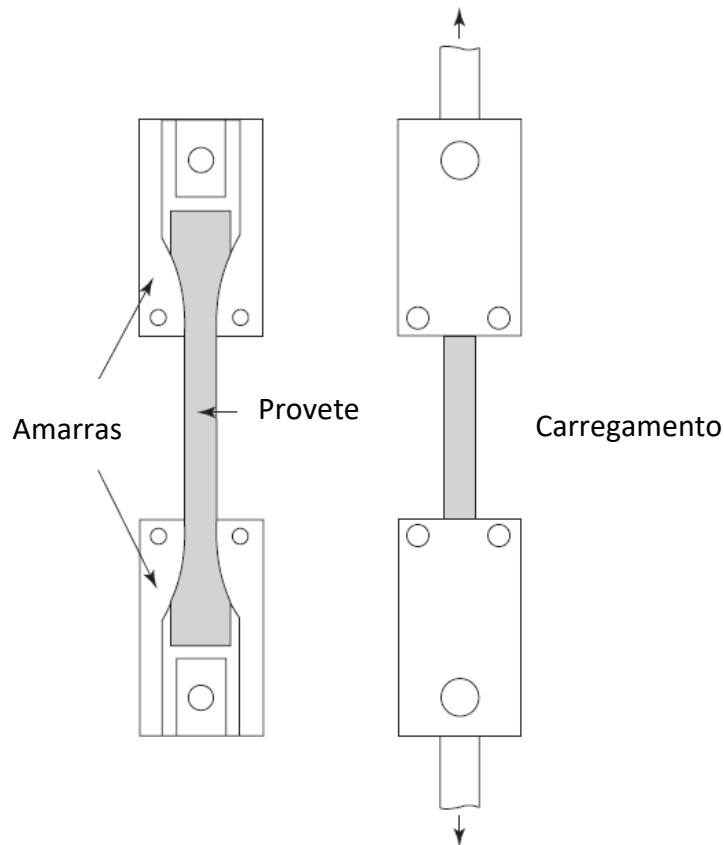


Figura 29 - Ensaio em provetes bulk à tração, adaptado de [50]

- **Ensaio Iosipescu [50]**

Nestes ensaios é aplicada uma carga compressiva assimétrica aos provetes, de forma a que no centro dos provetes se crie um binário nulo. Assim, geram-se tensões de corte que podem ser obtidas através da medição da carga e da deformação originada. O módulo de corte pode também ser determinado.

A geometria dos provetes para estes ensaios caracteriza-se por ter a forma de “viga” retangular, com entalhes em V no centro do provete. Pode ser aplicado a adesivos na forma de provetes *bulk* (maciços) ou juntas adesivas.

- **Ensaio Arcan [50]**

O ensaio Arcan (Figura 30) é caracterizado por permitir uma grande versatilidade de ensaio, sendo usado na determinação das propriedades dos materiais poliméricos, compósitos e adesivos. A sua versatilidade é também visível na constituição dos provetes, pois permite o teste de provetes do tipo *bulk* maciços, assim como o teste de juntas adesivas.

Os provetes usados neste ensaio são semelhantes aos usados no ensaio *Iosipescu*, pois apresentam dois entalhes em V no centro da placa retangular. O termo “borboleta” costuma ser atribuído a estes provetes, devido à forma que apresentam.

O ensaio Arcan é bastante polivalente, uma vez que a sua estrutura permite modificar o tipo de carregamento na peça, desde uma situação de corte puro até à situação de tração, podendo a partir daí retirar-se as respetivas propriedades.

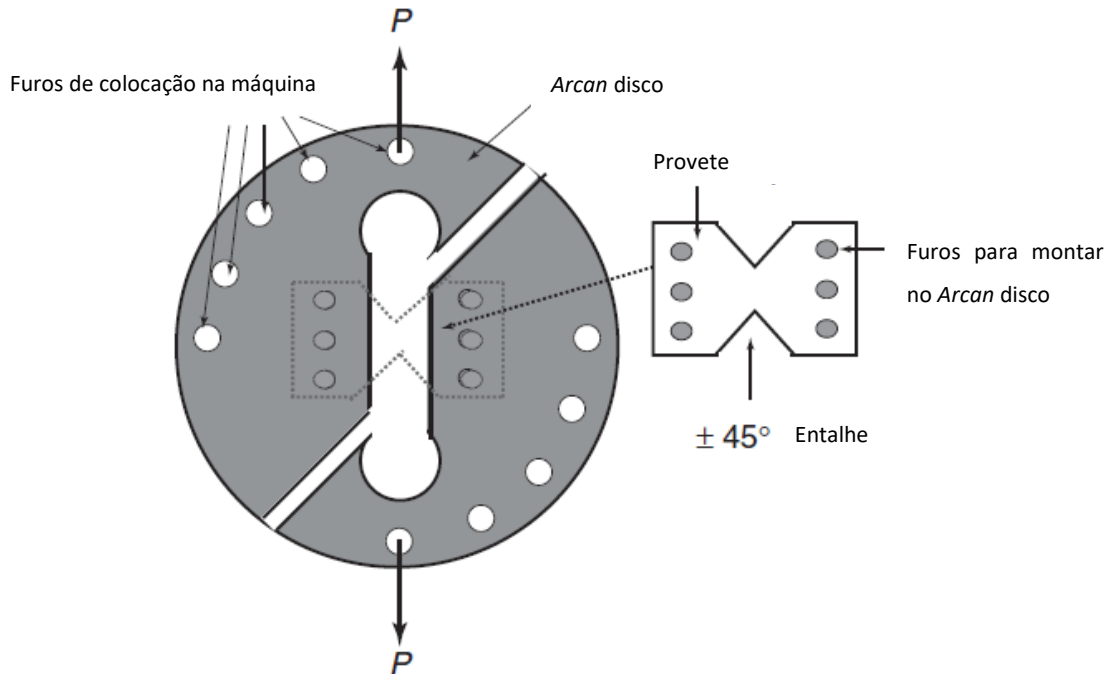


Figura 30 - Ensaio Arcan, adaptado de [50]

- **Tração topo-a-topo [50]**

O ensaio em juntas de topo-a-topo (Figura 31), é o método mais comum para determinar as propriedades à tração. Para tal, é aplicada a norma ASTM D 897. Por outro lado, pode ainda ser utilizado para determinar o módulo de elasticidade *in situ* de adesivos.

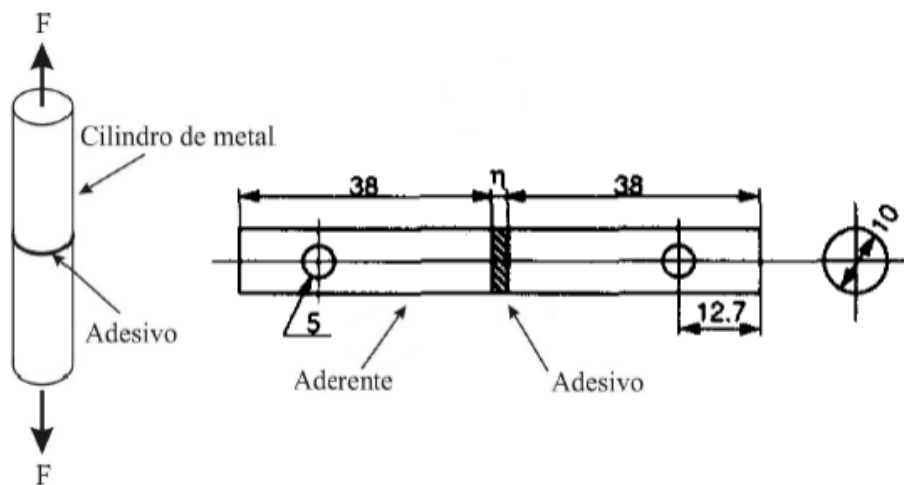


Figura 31 - Juntas em tração topo-a-topo [51, 52]

Embora seja um teste simples de se aplicar, existe a necessidade de se garantir três aspetos fundamentais, nomeadamente: camada de adesivo deve o mínimo de ar contido a carga deve ser aplicada assimetricamente e deve-se evitar a rotura pela segunda camada de adesão. A obtenção de resultados precisos exige uma perfeita concentricidade dos cilindros e paralelismo das superfícies da interface.

- **Ensaio de Napkin Ring**

O ensaio de *Napkin Ring* consiste na aplicação de um momento torsor numa junta adesiva com substratos cilíndricos unidos pelos topos conforme a Figura 32. Deste modo, o adesivo, solicitado ao corte, sofre uma deformação imposta pelo momento torsor aplicado, sendo assim possível extrair as propriedades do adesivo, como por exemplo, o módulo de corte [50].

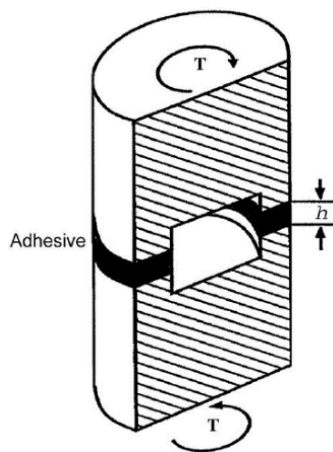


Figura 32 - Ensaio de *Napkin Ring* [53]

- **Ensaio de tração e de corte (Thick Adherend Shear Test (TAST))**

O ensaio TAST é um dos ensaios mais comuns para determinar as propriedades ao corte do adesivo. É um ensaio fácil de se realizar e de conceber. A Figura 33, ilustra a geometria deste ensaio [50].

O ensaio consiste em tracionar o provete através dos furos de carregamento até à rotura. A junta adesiva é submetida a um esforço de corte devido à geometria dos aderentes. Para tal, utiliza-se uma máquina de ensaios universal, sendo neste caso necessário utilizar ou fabricar ferramentas adequadas ao ensaio TAST e de ligação à máquina de ensaios. São utilizados calços ou lâminas para garantir a geometria normalizada dos provetes, evitando a sua sobreposição e que ocorra um filete de adesivo indesejável. Através deste ensaio é possível determinar o módulo e a tensão de corte, tendo a vantagem de o estado de tensão ser relativamente uniforme ao longo da junta adesiva. Torna-se um processo simples e económico, na execução e aquisição de dados.

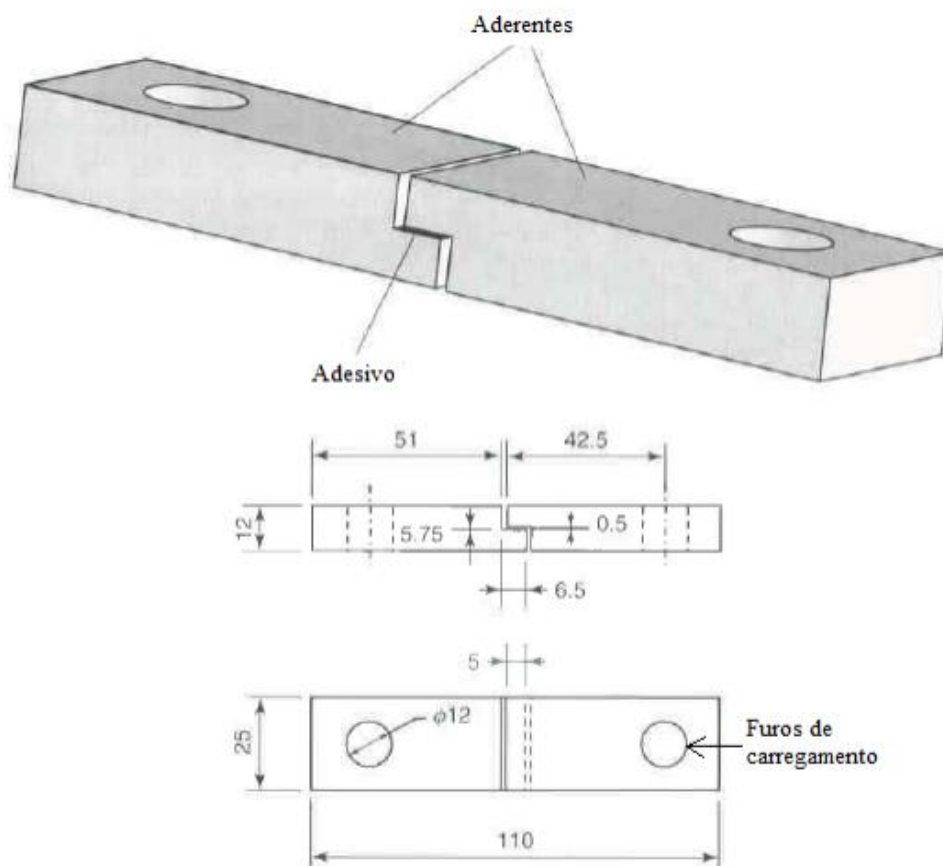


Figura 33 - Geometria dos provetes TAST (ISO 110003-2), adaptado de [50]

- **Ensaio em juntas de sobreposição simples (JSS)**

Os ensaios JSS podem ser descritos segundo as normas ASTM D 1002 e ISO 4587 (Figura 34). É um ensaio bastante utilizado, devido à sua facilidade de concepção e análise dos resultados. No entanto as JSS podem estar sujeitas a um estado de tensão complexo devido ao desalinhamento da carga, que origina um momento fletor que induz outros esforços, os quais podem originar a deformação dos substratos (Figura 35), e não apenas o de corte. Kim et al. [54] propuseram uma das soluções para contornar os efeitos de flexão (Figura 36), que consistem na utilização de calços de alinhamento com espessura igual à de cada um dos substratos. Existem outros métodos para diminuir estes desalinhamentos, como a utilização de juntas de sobreposição simples ou juntas de ressalto [50].

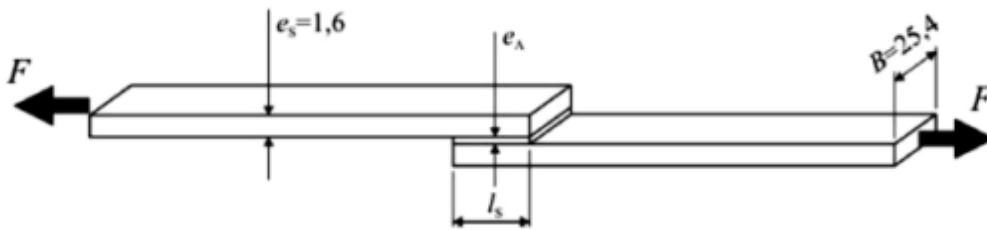


Figura 34 - Geometria do ensaio JSS, segundo a norma ASTM D1002 (dimensões em mm) [55]

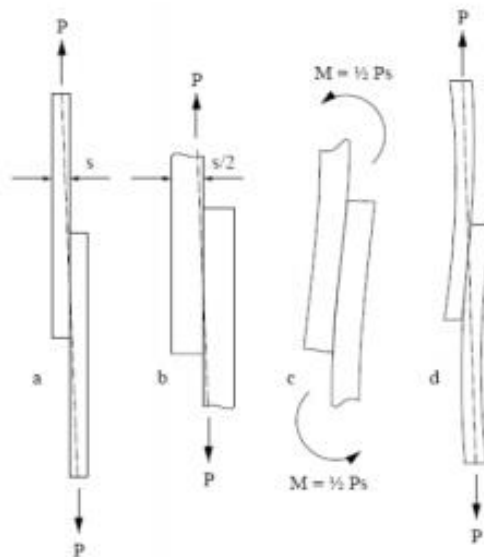


Figura 35 - Representação esquemática da flexão dos aderentes: (a) junta antes da deformação, (b) excentricidade da carga, (c) momento fletor, (d) deformação final da junta [1].

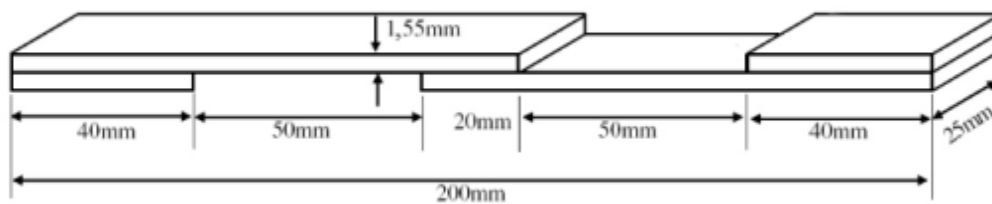


Figura 36 - Geometria os provetes JSS, segundo Kim et al. [54]

O parâmetro principal obtido deste ensaio é tensão média de corte a que o adesivo é submetido quando ocorre a rotura. Contudo, tornou-se consensual que a média da tensão de corte obtida nos resultados dificilmente tem alguma relevância prática, pois não permite determinar nenhuma propriedade intrínseca do adesivo ou da própria junta [1].

Ensaio de fratura

De modo a caracterizar um adesivo à fratura, a taxa crítica de libertação da energia ou tenacidade à fratura, G_c , é um parâmetro essencial a determinar, e também o mais correntemente utilizado [34]. O crescimento da fenda pode desenvolver-se sob três modos diferentes, conforme ilustrado na Figura 41. O modo I representa o modo de abertura e parâmetro retirado desta rotura é o G_{Ic} , enquanto os modos II e III são os modos de corte. Em muitas estruturas, a carga aplicada cria uma combinação de modos no crescimento da fenda, o que implica a utilização de um critério de modo misto para simular a propagação do dano [50].

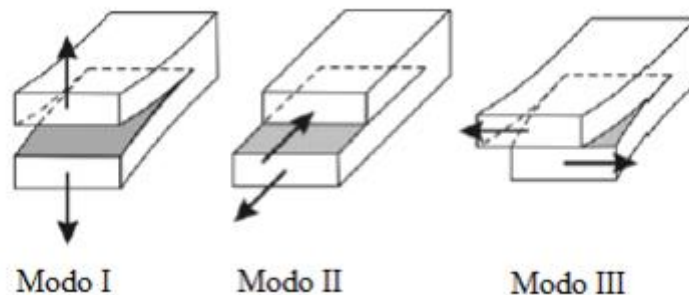


Figura 37 - Modos de crescimento de fenda, em junta adesivas [55].

Os ensaios mais utilizados para a determinação do G_{Ic} são o *Double-Cantilever Beam* (DCB) e o *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB) [17], descritos pela norma ASTM D 3433 – 99 e mais recentemente pela norma ISO 252117:2009 [50].

- **Double-Cantilever Beam**

Este ensaio é realizado através de dois provetes com as mesmas dimensões, onde o adesivo colocado entre eles, promovendo a adesão. O adesivo não é colocado completamente nos substratos, existe uma região inicial sem adesivo, designada por pré-fenda (Figura 38) [50].

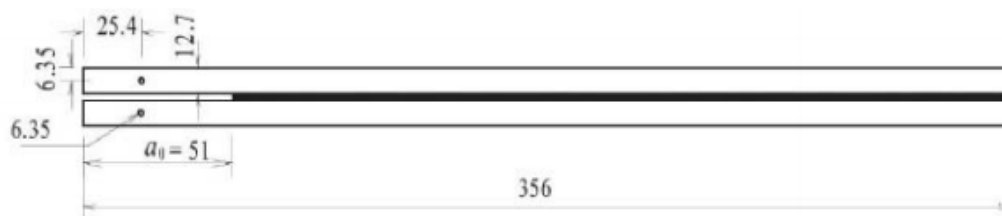


Figura 38 - Geometria dos provetes DCB, segunda a norma ASTM D 3433 -99, dimensões em mm [50]

O provete é solicitado em tração, originando um esforço de corte por clivagem. Durante o ensaio é registada a força P e o deslocamento δ . O ensaio termina quando ocorre a rotura completa do adesivo.

- **Tapered Double Cantilever Beam**

O ensaio TDCB (Figura 39) é realizado pelas mesmas normas o ensaio DCB, no entanto a sua geometria é diferente. Este ensaio foi desenvolvido para determinar G_{Ic} sem a necessidade de registar o comprimento da pré-fenda. A espessura dos aderentes varia ao longo do comprimento, de modo a assegurar uma variação constante da flexão em função do comprimento de fenda. Como o ensaio DCB, o método de aplicação de carga e determinação dos dados é conseguido através do esforço de corte no adesivo [50].

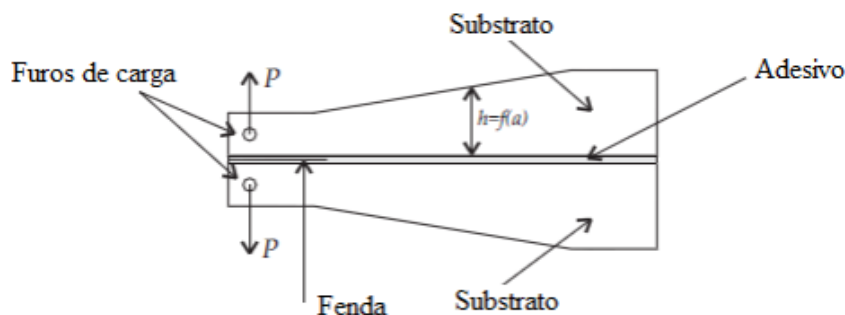


Figura 39 - Esquema dos provetes TDCB, adaptado de [50]

Os ensaios de fratura em modo II são mais complexos que o ensaio anterior e, até à data, ainda não existem ensaios normalizados para este modo. No entanto, existem ensaios baseados na caracterização da fratura interlaminar de compósitos, que foram adaptados para estudar as juntas adesivas.

Existem vários ensaios que permitem determinar a tenacidade à fratura em modo II, sendo os mais importantes o *End-Notched Flexure* (ENF), o *End-Loaded Split* (ELS) e o *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF).

- **End-Notched Flexure (ENF)**

O ensaio ENF permite o teste à flexão pura, em modo II, sendo destinado para materiais compósitos, embora possa também ser aplicado a juntas adesivas. Este ensaio consiste na aplicação de uma carga no centro do provete, sendo este suportado nas suas extremidades (Figura 40) [50]. Apesar de ser um ensaio bastante utilizado na determinação do G_{Ic} , verificam-se alguns problemas ligados à instabilidade no crescimento da fenda.

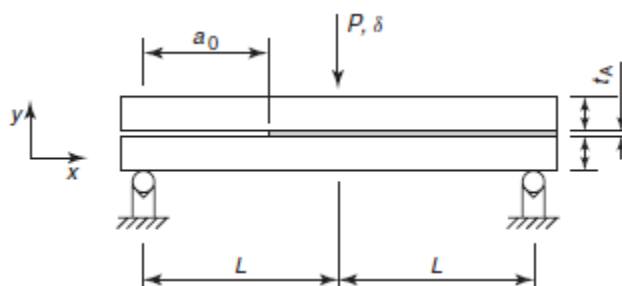


Figura 40 - Esquema do ensaio ENF, adaptado de [50]

- **End-Loaded Split (ELS)**

O ensaio ELS surge como uma boa opção para caracterizar o comportamento de juntas adesivas em modo II. De facto, Blackman et al [50] aplicou o teste ELS em juntas adesivas de carbono, e concluíram que o teste induz uma propagação de fenda mais estável e mais adequada.

Este ensaio é realizado em dois provetes, unidos entre si por adesivo ao longo do comprimento, com a exceção de uma pequena secção, por onde se iniciará a pré-fenda. A força aplicada induz uma tensão de corte na região da pré-fenda. Neste caso, a força aplicada é conseguida através de um cilindro numa das extremidades do provete, estando a outra extremidade bem fixa por dois grampos. A Figura 41 demonstra o processo para a realização do ensaio [50]. Durante o ensaio é registada a carga aplicada e o deslocamento.

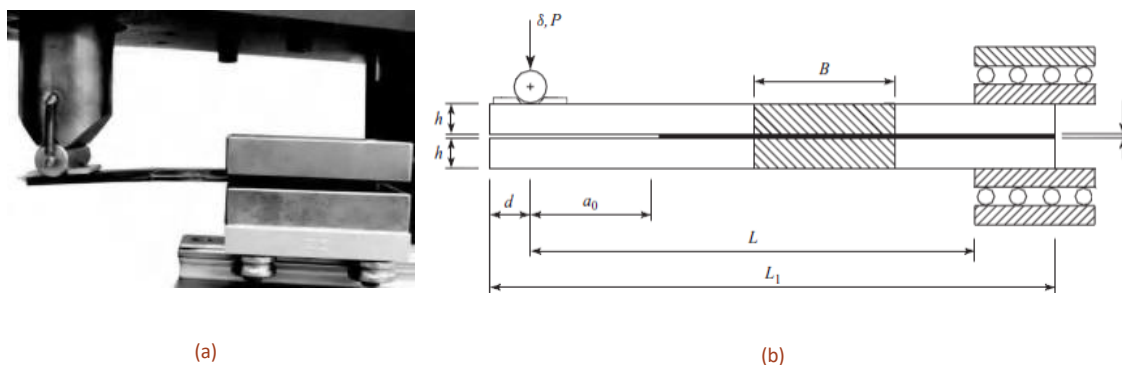


Figura 41 - Ensaio ELS - mecanismo de ensaio (a) e geometria do provete (b) [50]

- **Four Point End-Notched Flexure**

Este ensaio tem por base o ensaio ENF. No entanto, difere na quantidade de apoios no provete. A carga é igualmente aplicada mas, contrariamente ao ENF, esta carga é distribuída ao longo de um substrato, que aplica a força em dois pontos através de cilindros. São conhecidos alguns problemas de fricção na região da pré-fenda, devido ao tipo de carregamento solicitado. A Figura 42 esquematiza o princípio deste ensaio [50].

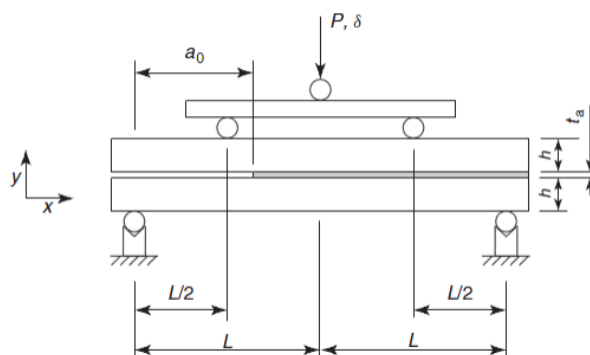


Figura 42 - Esquema do teste 4 ENF [50]

- **Ensaio de torção para determinar o modo III de rotura**

Os ensaios para determinar o modo III são geralmente feito em provetes *bulk*, nos quais os provetes, com entalhes no centro (Figura 43), são submetidos a momentos torsores. Durante o ensaio, é medido o ângulo de torção em função do binário aplicado [50].

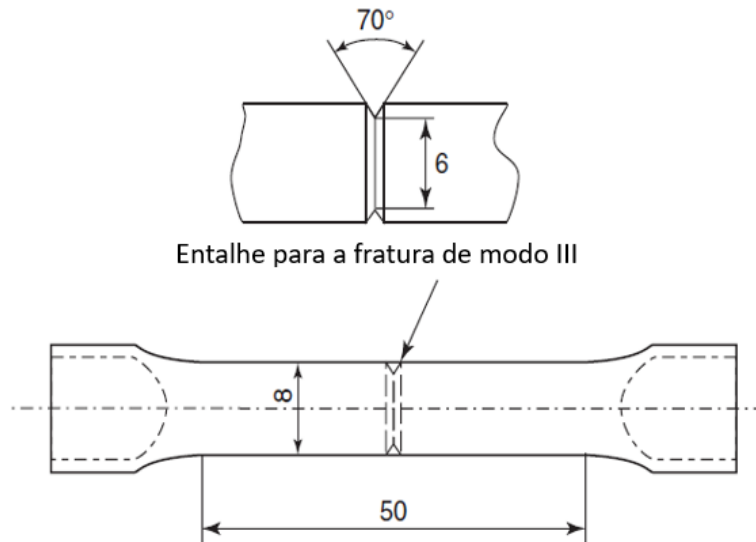


Figura 43 - Geometria do provete para determinar o modo III, adaptado de [50]

2.3.2 Ensaio dinâmicos

- **Teste dinâmico para determinar o módulo de elasticidade**

Os ensaios dinâmicos são testes fiáveis e bastante utilizados para determinar as propriedades elásticas de materiais (módulo de elasticidade e módulo de corte).

O ensaio dinâmico utilizado na determinação do módulo de elasticidade é aplicado a materiais elásticos, homogêneos e isotrópicos, como é o caso dos adesivos. O módulo de elasticidade é obtido através da vibração dos provetes, na sua frequência de ressonância natural. A primeira frequência de ressonância (f_n) é dada pela seguinte expressão [50]:

$$f_n = \frac{1,027t\sqrt{E/\rho}}{l^2}$$

Onde:

t – Espessura do material, mm;

E – Módulo de elasticidade, MPa;

ρ – Densidade, kg/m³;

l – Distância aos apoios, mm.

O equipamento utilizado para determinar a frequência natural e, conseqüentemente, o módulo de elasticidade, é descrito na Figura 44.

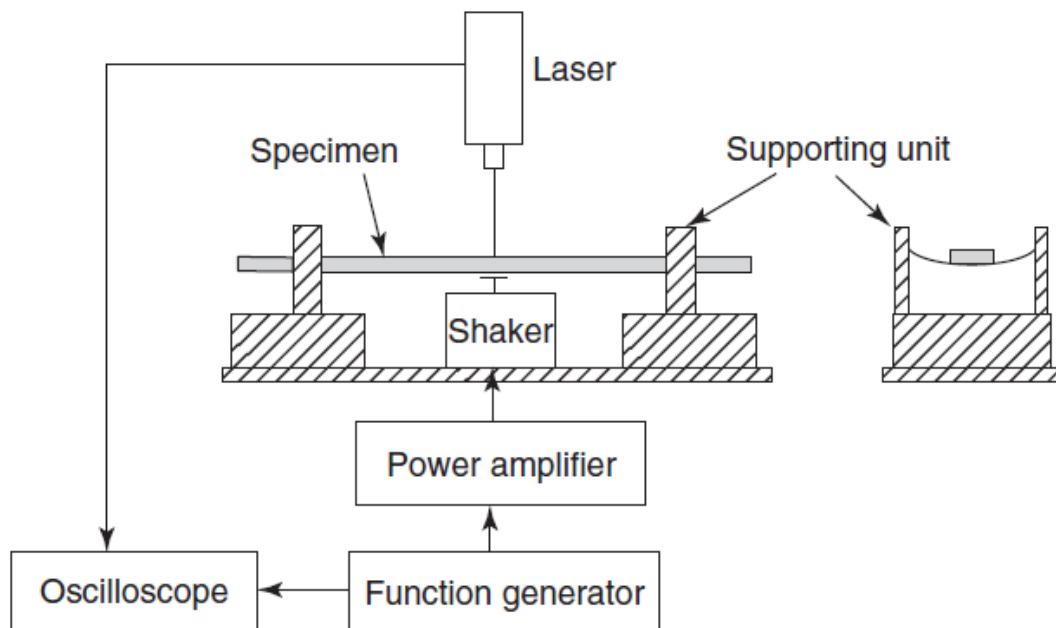


Figura 44 - Equipamento para determinação do módulo de elasticidade dinâmico [50]

- **Teste de impacto com pêndulo**

Os ensaios *Izod* e *Charpy* são utilizados para o teste de provetes em materiais metálicos e termoplásticos. O impacto é aplicado através de um pêndulo, que é largado a uma altura definida. Após o embate, o provete é fraturado, sendo medida a energia absorvida durante o impacto. O provete para o ensaio *Charpy* é ilustrado na Figura 45, sendo caracterizado por apresentar a forma de uma barra retangular com entalhes, que é apoiada pelas duas extremidades durante o ensaio. O ensaio *Izod* difere na forma de aperto do provete, já que este é fixo por uma das extremidades, enquanto a outra fica solta. Através deste ensaio é possível obter a energia absorvida [50].

Os ensaios de impacto em juntas adesivas são caracterizados pela norma ASTM D950, sendo que o teste é realizado através de um pêndulo. A dificuldade que existe em garantir o alinhamento das duas partes da junta faz com que este ensaio seja pouco usado, pois o desalinhamento pode levar a uma má interpretação de dados.

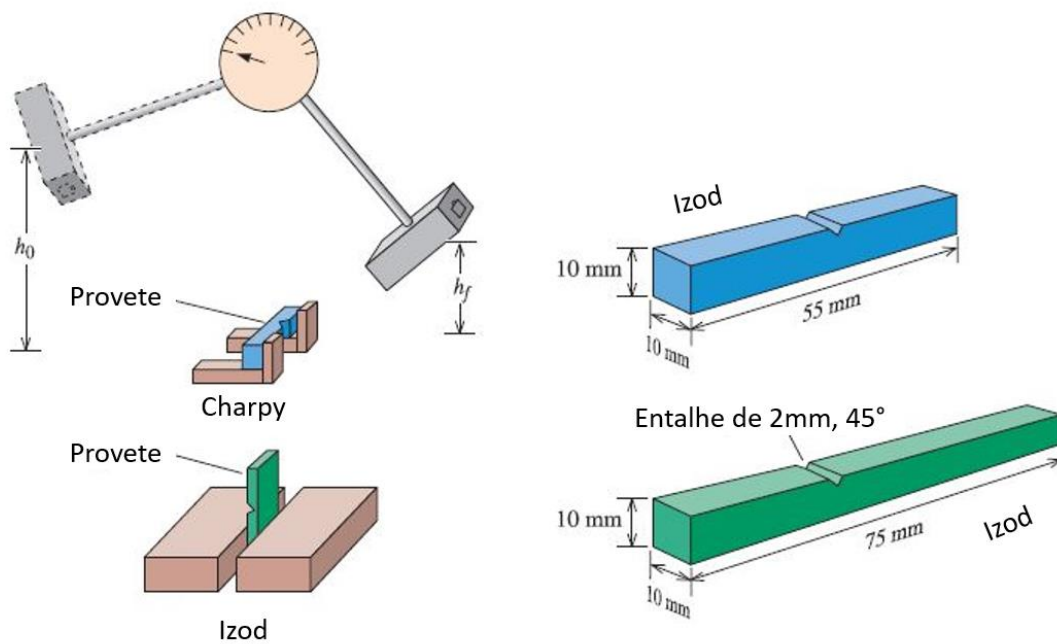


Figura 45 - Esquema do teste de impacto com pêndulo e geometria, adaptado de [56]

- **Técnica da barra de Hopkinson**

Esta técnica é usada para descrever o comportamento dinâmico dos materiais. Dentro das diversas técnicas de *Hopkinson*, destaca-se a *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) (Figura 46) que inicialmente era utilizada em materiais metálicos à compressão, no entanto, atualmente, as diferentes configurações possíveis, permitem realizar outros tipos de ensaios, como tração, torção e flexão. Neste tipo de ensaios, os provetes ficam “presos” entre duas barras, a de entrada e a de saída. No início do ensaio, um projétil é lançado contra a barra de entrada, aplicando uma carga compressiva na extremidade da mesma. Esta carga propaga-se pela barra de entrada, atingindo o provete, sendo que depois, parte da carga é refletida, e outra parte é transmitida para a barra de saída. Com a medição dessas cargas nas duas barras, torna-se possível a obtenção de uma curva tensão-deformação do material [50].

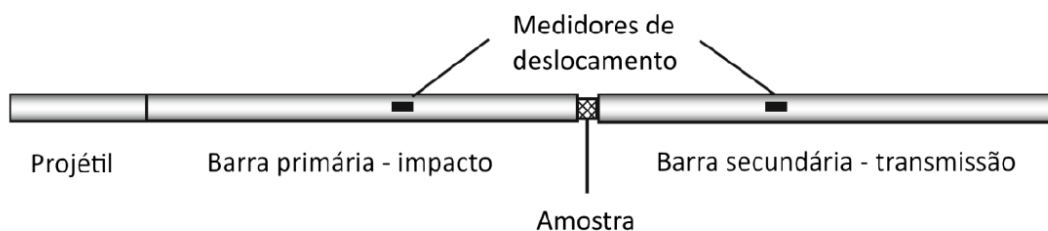


Figura 46 - Funcionamento do ensaio SHPB, adaptado de [11]

2.4 Previsão de resistência para juntas compósitas

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

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [57], que parte do princípio que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade do adesivo se deformar plasticamente, da utilização de substratos de compósito ou de materiais diferentes. O MEF [58] é então a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [59], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Recorreu-se então à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas coladas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [60]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

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

2.4.1.1 Critério de Hashin

O critério de Hashin consiste na previsão de falha de um material compósito baseada nos mecanismos de falha do material, ao contrário do que é fomentado nos outros

critérios, que consistem em extrapolações de critérios existentes para outros materiais. Este critério de falha é usado para prever diferentes modos de falha, como o rompimento de fibras sob tensão, encurvadura da fibra por compressão, fissuração da matriz e rompimento das suas ligações coesivas.

Perante isto, em 1973 [61], Hashin propôs um primeiro critério para roturas num estado biaxial de tensão, e mais tarde, em 1980 [62], propôs um segundo critério para estados de tensão tridimensionais. Para definir os critérios anteriores, Hashin definiu os seguintes pontos:

- Os modos de rotura são analisados separadamente: rotura pela matriz (sob tensão ou compressão) e rotura pela fibra (sob tensão ou compressão);
- Admite-se uma interação quadrática entre os diferentes componentes que estão envolvidos no modo de falha.

Depois de algumas simplificações ($\sigma_3 = \tau_{13} = 0$), as expressões para este critério encontram-se descritas seguidamente (Tabela 15 e Tabela 16), sendo que o dano se inicia quando os índices são superiores a 1. σ_2 é a tensão na direção 2, σ_1 é a tensão na direção 1, σ_{1u}^t é a tensão máxima na direção longitudinal à tração, σ_{1u}^c é a tensão máxima na direção longitudinal à compressão, σ_{2u}^t é a tensão máxima na direção transversal à tração, σ_{2u}^c é a tensão máxima na direção transversal à compressão τ_{12} é a tensão de corte no plano 1-2, τ_{23} é a tensão de corte no plano 2-3 e τ_{23u} é a tensão interlaminar no plano 2-3.

Tabela 15 - Expressões para o critério de Hashin-Rotem, de 1973 [61]

Índices	Expressão
Rotura por tração da fibra (Failure Fiber traction (FFT))	$\frac{\sigma_1}{\sigma_{1u}^t} = 1 \ (\sigma_1 > 0)$
Rotura por compressão da fibra (Failure Fiber compression (FFC))	$\frac{ \sigma_1 }{\sigma_{1u}^c} = 1 \ (\sigma_1 < 0)$
Rotura por tração da matriz (Failure matrix traction (FMT))	$\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2u}^t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12u}^t}\right)^2 = 1 \ (\sigma_2 > 0)$
Rotura por compressão da matriz (Failure matrix compression (FMC))	$\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2u}^c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12u}^c}\right)^2 = 1 \ (\sigma_2 < 0)$

Tabela 16 - Expressões para o critério de Hashin, de 1980 [62]

Índices	Expressão
Rotura por tração da fibra	$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1u}^t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12u}^t}\right)^2 = 1 \ (\sigma_1 > 0)$
Rotura por compressão da fibra	$\frac{ \sigma_1 }{\sigma_{1u}^c} = 1 \ (\sigma_1 < 0)$
Rotura por tração da matriz	$\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2u}^t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12u}^t}\right)^2 = 1 \ (\sigma_2 > 0)$
Rotura por compressão da matriz	$\left(\frac{\sigma_2}{2\tau_{23u}}\right)^2 + \left[\left(\frac{\sigma_{2u}^c}{2\tau_{23u}}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_2}{\sigma_{2u}^c} + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12u}^t}\right)^2 = 1$ $(\sigma_2 < 0)$

No que diz respeito à rotura por tração da fibra, no critério de Hashin de 1980, é incluída a componente de rotura τ_{12} . No entanto, para os restantes índices, as expressões não se alteram em relação ao critério de 1973. Para a previsão de rotura por compressão da matriz, as expressões diferem.

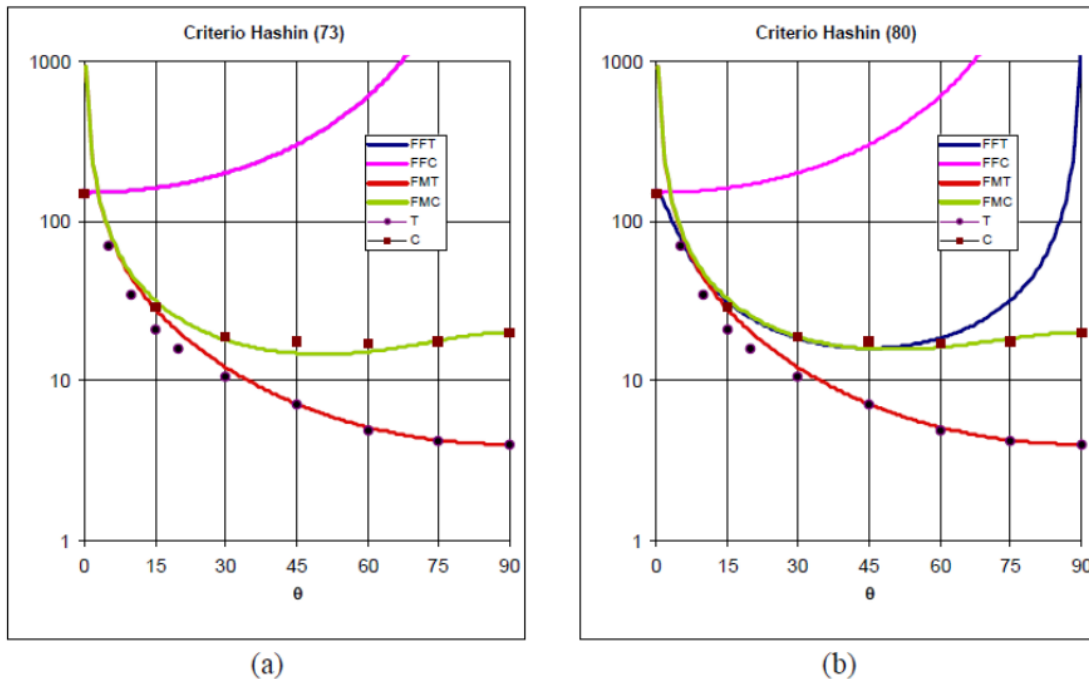


Figura 47 - Comparação experimental entre os critérios de Hashin 1973 (a) e Hasing 1980 (b) [63]

Inicialmente, Hashin assumiu que as componentes de tensão num dado plano são os responsáveis pela rotura. No entanto, dada a dificuldade em determinar o plano de rotura e as tais componentes de tensão, Hashin optou por fazer uma abordagem quadrática. Na Figura 47 os dois critérios são comparados experimentalmente, onde um compósito de epóxido-vidro é testado à tração e à compressão. Os dados para a tração estão representados por círculos e os dados da compressão por quadrados. De facto, verifica-se que ambos os critérios são similares, exceto no FFT, que tem em consideração a tensão de corte na direção 1-2.

2.4.1.2 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [57], que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [64] usaram o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [65]. No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que a as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [59], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

2.4.1.3 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio

contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180° . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, este se mantém com dimensões inferiores às críticas, embora se possa propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fissuras pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [66]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [67] através do estudo de fraturas em fibras de vidro, que lhe permitiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [68]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de Hutchinson-Rice-Rosengreen (HRR) por Hutchinson [69] e por Rice [70] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, G_I ou G_{II} , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [71], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na solitação.

2.4.1.4 Modelos de dano coesivo (MDC)

O conceito de MDC teve início com estudos de Barenblatt [72] e Dugdale [73], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de

compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [74].

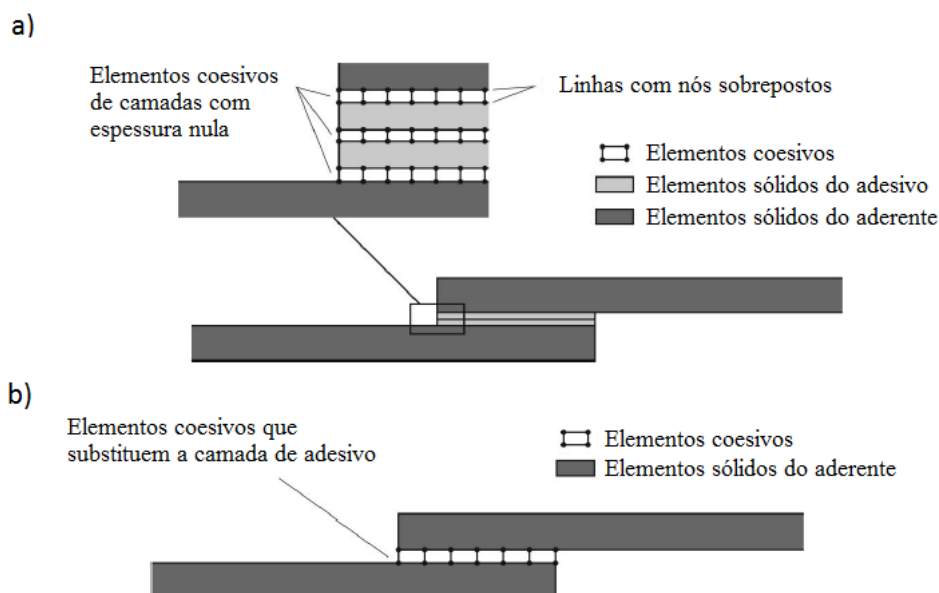


Figura 48 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [75])

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [76]. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 48), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [77], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [78].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [79]. Este modelo está implementado em *softwares*, como o caso do Abaqus®, em duas

dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D apresenta uma componente adicional de corte [80],

2.4.1.5 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [81], triangular [82], exponencial [83], polinomial [84] e trapezoidal [78]. Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [85].

A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [86]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [87] de seis nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do Abaqus®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 49).

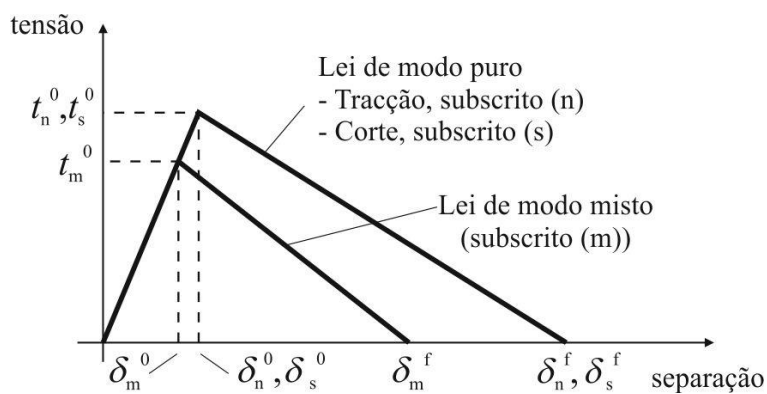


Figura 49 - Modelo coesivo triangular [87, 88]

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte [89].

Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [90] e modo II [91].

2.4.1.6 Determinação dos parâmetros coesivos

As análises por MDC permitem explicar o comportamento do dano em juntas adesivas. Contudo, os parâmetros coesivos devem ser calibrados com ensaios experimentais e respetivamente validados, de forma a simular com maior precisão a rotura da ligação [92]. Vários estudos têm sido publicados sobre a definição dos parâmetros coesivos (t_n^0 , t_s^0 , G_{Ic} e G_{IIc}). Contudo, segundo Jung Lee et al. [93], alguns parâmetros como t_n^0 e t_s^0 , ainda não se encontram devidamente padronizados. Assim surgem algumas técnicas de análise de dados, como por exemplo o método de definição individual de parâmetros, o método direto e o método indireto, sendo que estes apresentam diferentes graus de complexidade e de precisão. Alguns trabalhos realizados para validar ensaios em modo misto, estimando os MDC em modo puro através de ensaios DCB, ENF e JSS, alcançando bons resultados [78, 94].

O método de definição individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. No entanto este método é particularmente crítico devidos desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e a ligação adesiva [95]. Este problema surge causado pelo efeito de restrição às deformações de uma camada fina de adesivos entre dois aderentes, e também devido ao modo misto de propagação de fendas em ligações adesivas. De facto, as fendas em materiais maciços tendem a crescer de forma perpendicular à direção de tensão principal máxima [96]. Em ligações adesivas finas, como o adesivo é tipicamente mais fraco e flexível do que os aderentes, as fendas são obrigadas a propagar do sentido longitudinal da ligação. O método inverso consiste no procedimento iterativo de ajuste entre as previsões numéricas e os dados experimentais, considerando por exemplo a curva $P-\delta$, o que permite a estimativa de leis coesivas simplificadas para as condições específicas em que se está a executar o ajuste de parâmetros. Nos métodos de definição dos parâmetros e inverso é selecionada uma forma parametrizada da lei coesiva (por exemplo, bilinear ou trilinear) para obter o MDC, com base no comportamento do material a ser simulado [97]. Por outro lado, o método direto define a forma exata as leis coesivas, na medida que este método calcula os MDC da ligação adesiva a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura [95], pela diferenciação das curvas $G_I-\delta_n$ ou $G_{II}-\delta_s$ (em que δ_n é deslocamento em tração e δ_s é deslocamento em corte). No entanto, no que respeita aos parâmetros dos MDC, G_{Ic} e G_{IIc} são normalmente os principais parâmetros a determinar, em função do papel preponderante que desempenham nos resultados globais. Para avaliação de G_{Ic} e G_{IIc} , os métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são geralmente mais simples de aplicar, embora só possam ser utilizados em adesivos que não apresentem uma ductilidade muito acentuada. De facto, a MFLE não é viável em adesivos com grande plastificação e, nestas condições, o integral- J surge como alternativa para definição de G_{Ic} e G_{IIc} .

Independentemente da técnica utilizada para avaliação dos parâmetros coesivos, os ensaios tipicamente usados para a determinação de G_{Ic} e G_{IIc} são o ensaio DCB (tração)

e ENF (corte). O ensaio DCB é o mais utilizado para determinar G_{Ic} pois apresenta uma geometria simples e de fácil fabrico dos provetes. Existem vários métodos para obter G_{Ic} , como métodos baseados na teoria de vigas (corrigida ou não), métodos baseados no comprimento equivalente ou integral-J [98]. Rice [70] tornou possível obter uma expressão para o valor de G_{Ic} em provetes DCB através do método de integral-J, que também permite obter a relação entre as tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda, ou seja, a lei coesiva [99]. O ensaio DCB é constituído por dois substratos colados entre si com uma camada fina de adesivo. Durante a fabricação do provete, é provocada uma fenda inicial numa das extremidades do mesmo. Todavia, podem ser sentidas algumas dificuldades quando se determina o valor de G_{Ic} . Por vezes a propagação da fenda pode ser instável e, nesses casos, a medição do comprimento de fenda durante o ensaio torna-se difícil. Em alguns ensaios DCB, a ponta da fenda pode não ser claramente visível, dependendo do adesivo utilizado [91]. A norma referente ao ensaio DCB é a norma ASTM D3433-99 [100], onde está enunciado o método para execução de ensaio. O esquema definido para este ensaio encontra-se representado na Figura 50. Na mesma norma é indicada a forma de determinar a altura mínima do substrato (h), de forma a evitar deformação plástica dos substratos durante o ensaio, pela equação (1) em que T corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda na ligação adesiva, a é o comprimento da fenda, B é a largura do substrato e σ_y corresponde à tensão de cedência do material do substrato.

$$h = \sqrt{\frac{6Ta}{B\sigma_y}}, \quad (1)$$

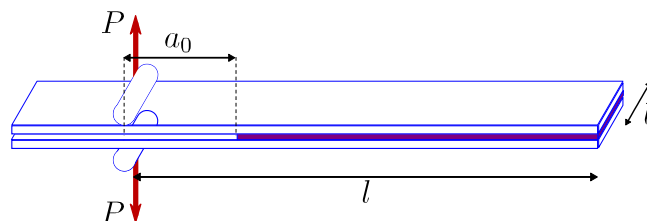


Figura 50 - Geometria do provete DCB [101]

Como já referido anteriormente, o ensaio ENF descreve-se como uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e carregada a meio vão, com um comprimento da pré-fenda inicial (a_0) definido, onde a meio é aplicada uma carga P (Figura 51). A solicitação aplicada origina a propagação da fenda sem haver a separação dos aderentes. Para que a propagação da fenda seja estável, é necessário que o a_0 seja pelo menos igual a 70% do comprimento total do provete ($2L$) [102]. Como os métodos utilizados para determinação dos parâmetros coesivos tipicamente requerem a medição de a durante a propagação, podem-se observar dificuldades na estimativa de G_{Ic} por esta medição [103].

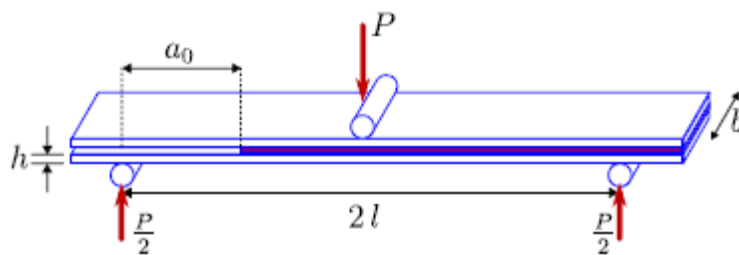


Figura 51 - Geometria do provete ENF [101]

2.4.1.7 Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [104] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. [105] para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [74].

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [106]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [107] ou do número de ciclos para análises de fadiga [108, 109]. Comparativamente aos MDC e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetórias pré-definidas [110].

Hua et al. [111] propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que permitiu obter resultados independentes da malha. As previsões da

resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. [112] usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de E e do coeficiente de Poisson (ν) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

2.4.1.8 Método de Elementos Finitos eXtendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tração e corte correspondentes a $P_{m\acute{a}x}$, respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [113]. Belytschko e Black [114], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [115]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [116].

Campilho et al. [117] utilizaram o MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, coladas com um adesivo dúctil, onde se comparou resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 52). Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

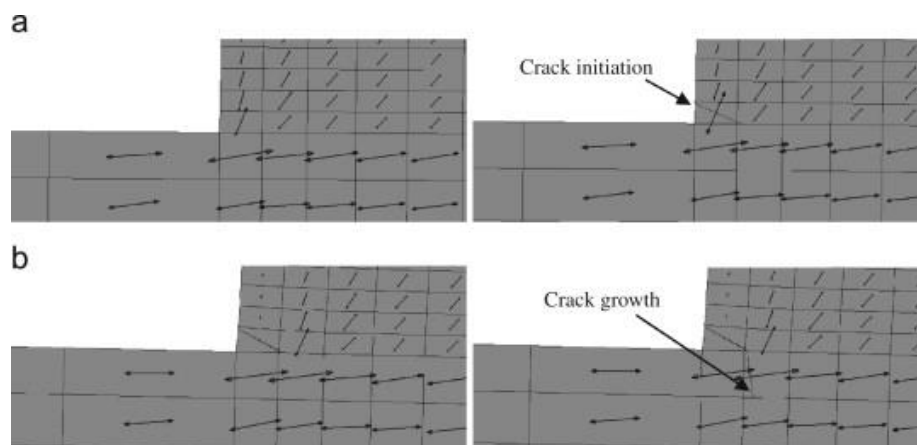


Figura 52 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [117]

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo é dividido em duas partes: trabalho experimental e trabalho numérico. Na primeira parte são desenvolvidas as JSS, todo o seu processo e, conseqüentemente, a análise dos resultados. Enquanto que, na segunda parte são desenvolvidos modelos numéricos, de modo a reproduzir os dados da parte experimental.

3.1 Trabalho experimental

Para execução da parte experimental do caso de estudo foi necessário escolher o material para o substratos, tipo de adesivo e processo de fabrico. Deste modo, este subcapítulo detalha os tipos de materiais utilizados e as suas propriedades, os tipos de adesivos e todo o processo inerente à sua concretização.

Após ter os materiais e adesivos preparados procedeu-se à execução dos dados experimentais. Os resultados extraídos a partir destes dados poderão consultados neste subcapítulo, assim como a sua análise.

3.1.1 Materiais utilizados

Neste subcapítulo são descritos todos os materiais utilizados no trabalho experimental. Neste caso foram utilizados três tipos de aderentes e dois adesivos. É também feita uma análise detalhada das suas propriedades mecânicas mais relevantes, no sentido de facilitar a análise numérica.

3.1.2 Aderentes

Os aderentes, também designados por substratos, trata-se do elemento que se pretende unir através de uma ligação adesiva/co-curada.

3.1.2.1 Pré-impregnados

Para o caso de estudo foram utilizados aderentes à base de pré-impregnados.

3.1.2.1.1 Compostos de Moldação

i) Compostos de moldação de poliéster insaturado

SMC LS 3022 R30 (SMC2)

Este material trata-se de um SMC, desenvolvido para fins estruturais, à base de resina de poliéster insaturada, reforçada com fibra de vidro. Este SMC destaca-se por originar juntas com boas propriedades mecânicas e boa qualidade de superfície. A Tabela 17 apresenta as principais características deste material.

Tabela 17 - Características do SMC LS 3022 R30 [118]

Características	Valor
Quantidade de fibra	30%
Contração linear	0,0%
Densidade	1,75 g/cm ³
Absorção de água	≤ 0,2 %
Resistência à flexão	165 MPa
Módulo à flexão	10000 MPa
Resistência ao impacto (Charpy)	70 kJ/m ²
Temperatura de distorção	>200°C

Este material deverá ser armazenado num local seco, entre 15 a 25°C, não devendo estar em exposição direta à luz solar. As condições de processamento deste material, apresentam-se na Tabela 18.

Tabela 18 - Condições da processamento do material SMC LS 3022 R30 [118]

Condição de processamento	Descrição
Tempo de polimerização	40 s/mm
Pressão de polimerização	70 – 110 bar
Temperatura de polimerização	140 – 160 °C

SMC LP 6720 LW 9500 (SMC1)

Tal como o material apresentado anteriormente, este SMC foi também desenvolvido para aplicações estruturais, sendo um material caracterizado pelo seu baixo peso, sendo também à base de resina de poliéster insaturada, reforçada com fibra de vidro. Este material origina juntas com boas propriedades mecânicas. As suas principais propriedades são destacadas na Tabela 19.

Tabela 19 - Características do SMC LP 6720 LW 9500 [119]

Características	Valor
Quantidade de fibra	37%
Comprimento da fibra	25 mm
Contração linear	0,0%
Densidade	1,3 g/cm ³
Absorção de água	≤ 0,5 %
Resistência à flexão	130 MPa
Módulo à flexão	7500 MPa
Resistência ao impacto (Charpy)	70 kJ/m ²
Temperatura de distorção	>200°C

Este material deverá ser armazenado num local seco, entre 15 a 25°C, não devendo estar em exposição direta à luz solar. As condições de processamento deste material, apresentam-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Condições da processamento do material SMC LP 6720 LW 9500 [119]

Condição de processamento	Descrição
Tempo de polimerização	40 s/mm
Pressão de polimerização	60 – 120 bar
Temperatura de polimerização	140 – 155 °C

3.1.2.1.2 Prepregs

Compósito reforçado com fibra de carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymers- CFRP*)

O CFRP usado foi obtido a partir do prepreg unidirecional de fibra de carbono de alta resistência CIT HS 160 REM [120]. Este prepreg utiliza uma resina de epóxico. As propriedades gerais deste material estão descritas na Tabela 21.

Tabela 21 - Características do CIT HS 160 REM [120]

Características	Valor
Quantidade de fibra	60%
Resistência à tração	2549 MPa
Módulo de elasticidade	136 GPa
Tensão de corte interlaminar	81,5 MPa
Resistência à flexão	2063 MPa
Módulo à flexão	149 GPa
Resistência ao impacto (Charpy)	800 J/m ²
Coefficiente de Possion	0,34

3.1.3 Adesivos

Os adesivos estruturais apresentam-se como um método de ligação muito eficaz, permitindo, de forma simples, obter ligações contínuas e com bastante resistência. No âmbito do presente estudo foram usados dois adesivos, nomeadamente, o Araldite® AV138, que se trata de um adesivo epóxico frágil, e o Sikaforce® 7752, caracterizada pela sua elevada ductilidade e resistência mecânica moderada [121].

3.1.3.1 Araldite® AV138

O Araldite® AV138 é um adesivo bastante versátil, uma vez que pode ligar uma diversa gama de materiais, entre os quais, metais, compósitos e polímeros. Apesar de se tratar de um adesivo de epóxico frágil, o Araldite® AV138 apresenta uma elevada resistência mecânica e uma excelente resistência química [122].

Para além das últimas mencionadas, este tipo de adesivos apresenta outras características de destaque, tais como, uma boa resistência a produtos químicos e a água, o facto de serem excelentes isolantes elétricos e, ainda, o facto de apresentarem uma resistência considerável até temperaturas de 120°C [121].

Estes adesivos permitem a cura à temperatura ambiente, sendo que não são libertados gases durante a mesma, nem há a perda de voláteis, o que representa um grande benefício.

A Tabela 22 destaca as propriedades mecânicas deste adesivo.

Tabela 22 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [122]

Propriedade	Valor
Módulo de Elasticidade, E [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson, ν	0,3
Tensão de cedência, σ_y [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura, σ_f [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura, ϵ_f [%]	1,21±0,10
Módulo de corte, G [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência de corte, τ_y [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura de corte, τ_f [MPa]	30,2±0,30
Deformação de rotura de corte, γ_f [%]	7,8±0,7

3.1.3.2 Sikaforce® 7752

O SikaForce® 7752 trata-se de um adesivo dúctil, à base de poliuretano, composto por resina e por um endurecedor. Embora este adesivo tenha uma resistência ao corte inferior à apresentada pelo Araldite® AV138 [121] o SikaForce® 7752 apresenta uma elevada resistência ao arrancamento e uma boa resistência ao impacto.

Uma das vantagens do uso deste adesivo está relacionada com a cura, pois este adesivo permite a cura à temperatura ambiente, dispensando o uso de equipamentos especiais para o efeito.

Este adesivo destaca-se ainda pelo facto de apresentar uma estrutura estável, uma excelente flexibilidade a baixas temperaturas, e ainda pelo facto de funcionar como retardador de fogo [123].

As principais propriedades deste adesivo estão descritas na Tabela 23.

Tabela 23 - Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752, adaptado de [123]

Propriedade	Valor
Módulo de Elasticidade, E [GPa]	493,81±89,60
Coefficiente de Poisson, ν	0,33
Tensão de cedência, σ_y [MPa]	3,24 ± 0,5
Tensão de rotura, σ_f [MPa]	11,49 ± 0,3
Deformação de rotura, ϵ_f [%]	19,18 ± 1,4
Módulo de elasticidade ao corte, G [GPa]	187,75 ± 16,4
Tensão de cedência de corte, τ_y [MPa]	5,16 ± 1,1
Tensão de rotura de corte, τ_f [MPa]	10,17 ± 0,6
Deformação de rotura de corte, γ_f [%]	54,82 ± 6,4

3.1.4 Geometria das juntas

A Figura 53 ilustra as configurações de juntas utilizadas para os ensaios, para tal, foi adaptada a norma ASTM D1002-02 [124] e a norma ASTM D3163-01 [125]. As dimensões estão apresentadas na Tabela 24. Quer para ensaios em ligações adesivas, quer para as co-curadas, foram usadas juntas de sobreposição simples.

Nestes ensaios, foi necessário colocar calços para garantir o correto alinhamento entre os provetes. Deste modo, o correto alinhamento garante que os provetes não sofram nenhum tipo de deformação (flexão) durante o ensaio.

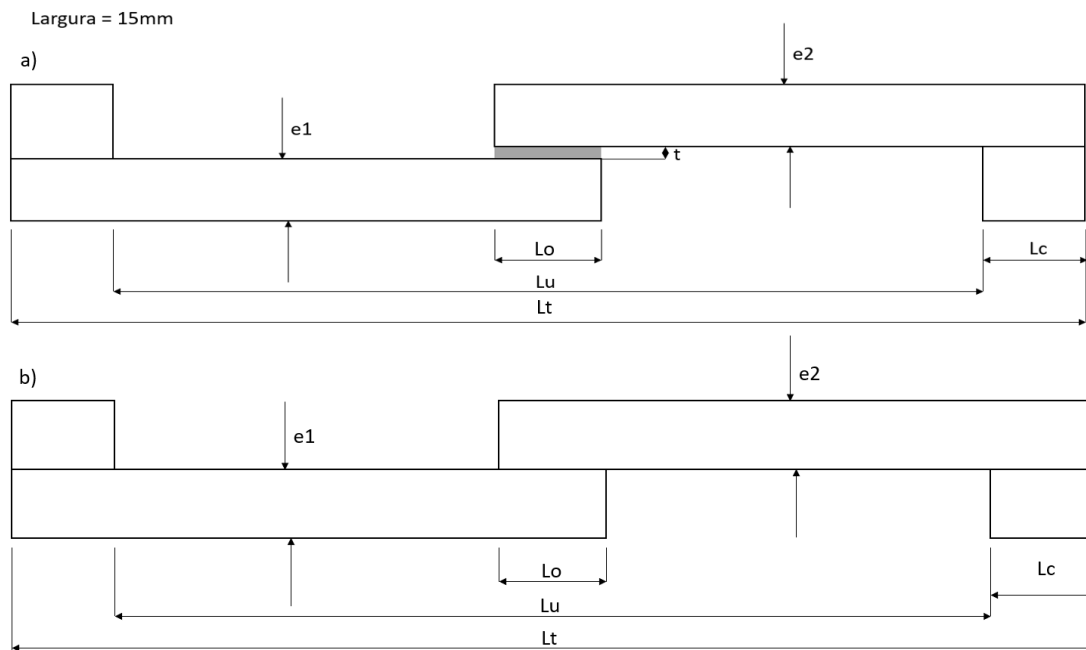


Figura 53 - Configuração e geometria da junta com adesivo (a) e co-curadas (b)

Tabela 24 - Dimensões das juntas utilizadas

Índices	Dimensões (mm)
Espessura do substrato 1 (e_1)	2
Espessura do substrato 2 (e_2)	2
Comprimento de sobreposição (L_o)	15
Comprimento total da junta (L_t)	230
Comprimento útil da junta (L_u)	180
Comprimento dos calços (L_c)	25
Espessura de adesivo (t)	0,20

3.1.5 Processo de fabrico

A análise ao processo de fabrico aplicado pode ser dividida em duas partes, uma referente ao fabrico dos substratos (1), e outra referente à ligação entre os substratos (2).

1. Processo fabrico dos substrato

Em relação ao fabrico dos substratos, é pertinente referir os seguintes casos:

- **Placas de CFRP usadas em ligações adesivas;**
- **Placas de CFRP usadas em ligações co-curadas CFRP-SMC e CFRP-CFRP;**
- **Placas de SMC usadas em ligações SLJ adesivas e ligações co-curadas com CFRP;**
- **Placas de SMC usadas em ligações co-curadas SMC-SMC.**

Numa fase inicial, definiu-se a sequência de empilhamento, o número de camadas e a orientação das mesmas, que viria a ser comum a todos os casos estudados. A Figura 54 ilustra a sequência de empilhamento que foi definida.

FC - 0°
FC - 0°
FC - 90°
FC - 0°
FC - 0°
FC - 90°
FC - 0°
FC - 0°
FC - 0°
FC - 0°
FC - 90°
FC - 0°
FC - 0°
FC - 90°
FC - 0°
FC - 0°

Figura 54 - Sequência de empilhamento das placas CFRP

Placas de CFRP – Para ligações adesivas.

O processo de produção dos provetes dos pré-impregnados CFRP seguiu as etapas descritas na Tabela 25.

Tabela 25 - Processo de fabrico de placas CFRP em ligações adesivas

Etapa	Tarefa
1	Retirou-se o pré-impregnado da câmara frigorífica e colocou-se a descongelar à temperatura ambiente.
2	Cortaram-se 16 camadas de pré-impregnado com dimensões 300X300 mm.
3	Dispôs-se na mesa a primeira camada de pré-impregnado, e aplicou-se calor para que a resina fosse ativada.
4	Removeu-se o cartão protetor da segunda camada, e dispôs-se, segundo a orientação pretendida, sobre a primeira camada. Com o auxílio de uma espátula, fez-se pressão sobre as camadas de pré-impregnado, com o objetivo de remover o ar acumulado e promover a adesão.
5	Repetiu-se o procedimento para as camadas seguintes.

➤ **Obteve-se uma espessura de 2,4 mm para o laminado.**

Placas de CFRP – Para ligações co-curadas CFRP-SMC e CFRP-CFRP

O processo de fabrico para estas ligações é idêntico ao processo anterior. Neste caso, utilizaram-se placas de dimensões 200X300 mm², com a mesma sequência de empilhamento.

Placas de SMC, em ligações SLJ adesivas e ligações co-curadas com CFRP.

O processo de fabrico aplicado para se obter os provetes de SMC foram os descritos na Tabela 26.

Tabela 26 - Processo de fabrico de placas SMC em ligações adesivas e co-curadas CFRP

Etapa	Tarefa
1	Cortou-se a carga SMC, no peso e medidas adequadas;
2	Colocou-se a carga no molde. A carga é colocada no centro molde, de forma a cobrir uma área correspondente a cerca de 85% da superfície.
3	Deu-se a polimerização da peça, através da exerceção de pressão e temperatura adequadas.
4	Retirou-se a placa do molde e removeu-se a rebarba.

➤ **Obtiveram-se placas com 2-2,5 mm de espessura.**

Placas de SMC, em ligações co-curadas SMC-SMC.

Para a realização deste ensaio, seriam necessárias placas com espessura entre os 4 - 4,5 mm, para o efeito, aumentou-se o peso da carga de SMC. O processo de fabrico é igual ao mencionado na Tabela 26.

2. Processo de ligação dos substratos.

Preparação do adesivo

Conforme referido anteriormente, foram utilizados dois tipos de adesivos. Para que os adesivos adquiram as propriedades máximas, é necessário que o rácio dos dois componentes (resina + endurecedor) seja o mais controlado possível. Neste caso, segundo o fabricante, estes adesivos apresentam os rácios apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Rácio de misturas dos adesivos, em gramas [122, 123]

Componente	Araldite® AV138	Sikaforce® 7752
Resina	100	100
Endurecedor	40	20

Após uma medição rigorosa das quantidades pretendidas, procedeu-se à mistura dos dois componentes, com recurso a uma espátula. Depois de preparada a mistura, deu-se início à colagem dos substratos.

Preparação do substratos

Após ter os provetes cortados com a medida pretendida, foi necessário efetuar a limpeza da zona contacto com o adesivo. Numa primeira fase foi feita a preparação da superfície através de uma lixa de grau 220, para eliminar qualquer tipo de óxidos/impurezas que possam ter ocorrido. De seguida foi limpo o pó/gordura com o auxílio de papel de cozinha e acetona. O resultado final pode ser visto na Figura 55.



Figura 55 - Provetes após lixagem e limpeza

Ligação adesiva

O processo de ligação adesiva pode ser resumido nas seguintes etapas (Tabela 28).

Tabela 28 - Processo ligação em juntas adesivas

Etapa	Tarefa
1	Marcação da dimensão da zona de ligação, em ambos os substratos.
2	Colocação do primeiro substrato em cima de uma placa de madeira.
3	Colocação de fio de pesca para limitar a espessura de adesivo.
4	Aplicação do adesivo, com recurso a uma espátula.
5	Colocação do segundo substrato em cima do adesivo, fazendo corresponder as dimensões pré-definidas de adesivo.
6	Alinhar o melhor possível os dois substratos.
7	Colocação de molas de pressão, para eliminar o excesso de adesivo.

Ligação co-curada em substratos SMC-SMC

O procedimento seguido na execução das ligações co-curadas em substratos SMC-SMC, encontram-se descritos na Tabela 29.

Tabela 29 - Processo ligação em juntas co-curadas SMC-SMC

Etapa	Tarefa	Foto
1	Marcação da dimensão da zona de ligação;	
2	Colocação substrato na fresadora manual;	

3 Medição da espessura do substrato;



4 Maquinação do excesso de material;



5 Rotação da peça 180° e maquinação o restante material;



6 Retirar o substrato e confirmar medidas do provete.



Ligação co-curada em substratos SMC-CFRP

Para se obter esta ligação foi necessária uma placa de CFRP de 300x200 mm² e os provetes de SMC, já cortados. De seguida, foi colocada a placa na prensa de pratos quentes e foram dispostos os provetes de SMC em cima da placa. Para garantir a

uniformidade da força e evitar a deformação dos provetes, foram colocadas duas placas de alumínio, conforme Figura 56. De seguida foi iniciado o ciclo de cura da CFRP.



Figura 56 - Ligação co-curada SMC-CFRP

Ligação co-curada em substratos SMC-CFRP

Após ter placas de CFRP empilhadas com as dimensões corretas, procedeu-se à ligação conforme exemplificado na Tabela 30.

Tabela 30 - Processo ligação em juntas co-curadas SMC-CFRP

Etapa	Tarefa	Foto
1	Sobreposição de duas placas de CFRP (300x200), garantindo a dimensão da zona de sobreposição;	
2	Colocação das placas na prensa de pratos quentes e iniciado o ciclo de cura.	

Neste caso, foram utilizadas placas de alumínio para garantir uma distribuição de força uniforme e evitar a deformação, devido à sobreposição.




Remoção do excesso de adesivo

Depois de o processo de cura do adesivo estar completo, procedeu-se à remoção do excesso de adesivo com a finalidade de, posteriormente, submeter todos os provetes a ensaios de tração para se poder determinar algumas propriedades do adesivo utilizado. Para remover este excesso utilizou-se uma máquina de furar manual (Figura 57). O procedimento está descrito na Tabela 31.



Figura 57 - Máquina de furação, utilizado no remoção do excesso de adesivo

Tabela 31 - Etapas de remoção do excesso de adesivo

Etapa	Tarefa	Foto
1	Corte do excesso de adesivo na parte lateral dos provetes, com auxílio de um alicate de corte;	
2	Remoção do material que restou do ponto anterior, na zona lateral;	
3	Remoção do excesso de adesivo na base do substrato.	

3.1.6 Resultados obtidos

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados obtidos experimentalmente e a consequente análise dos resultados.

3.1.6.1 Ensaio de sobreposição simples

Conforme referido anteriormente, o ensaio será feito em juntas de sobreposição simples. Como tal, foram definidos os parâmetros de processo adequado ao tipo de junta e ao tipo de ligação. Os parâmetros do processo estão descritos na Tabela 32.

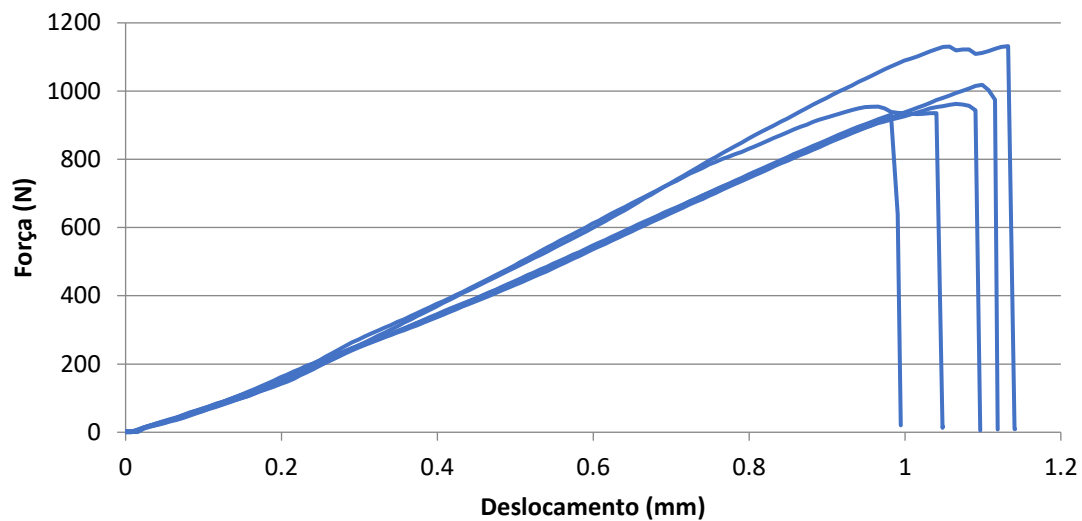
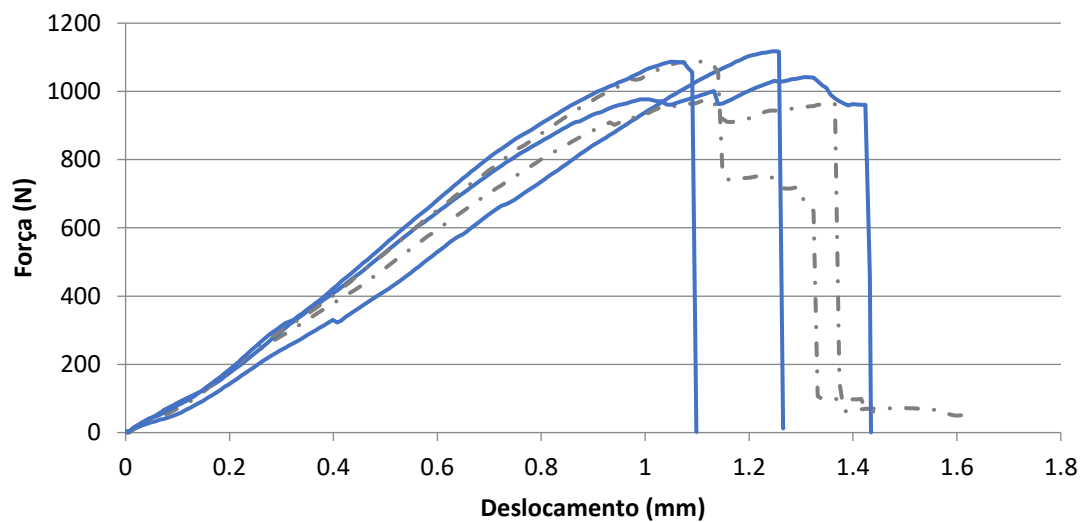
Tabela 32 - Parâmetros do ensaio SSJ

Tipo de junta	Velocidade do ensaio	Tipo de ensaio
Ligações de adesivas com Araldite® AV138	0,5 mm/min	Tração
Ligações de adesivas com Sikaforce® 7752	2 mm/min	Tração
Ligações co-curadas	2 mm/min	Tração

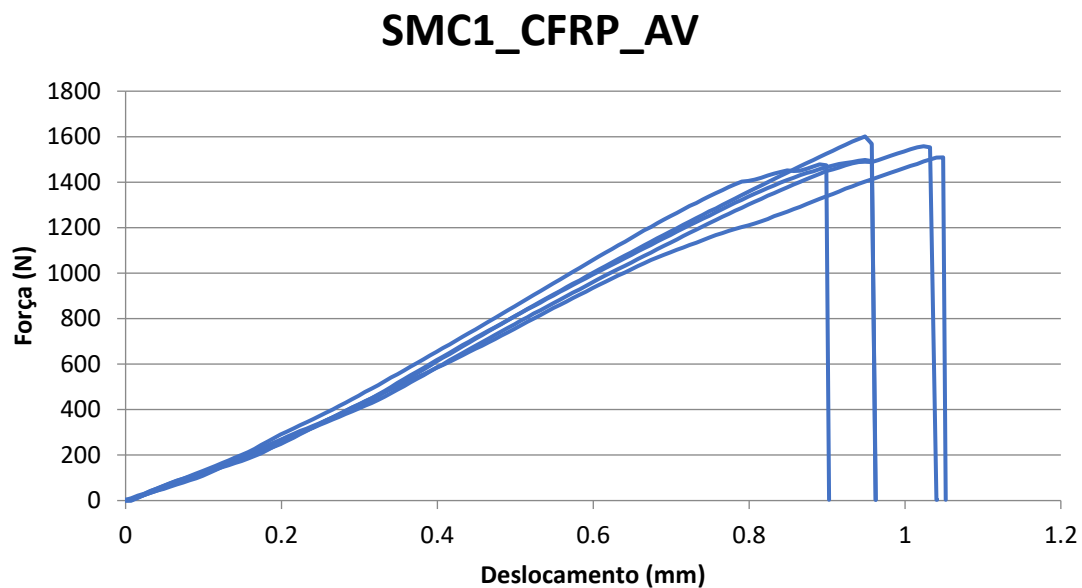
3.1.6.1.1 Curvas $P-\delta$

Após recolhidos e tratados os dados do ensaios de tração, procedeu-se à representação gráfica da força em relação ao deslocamento, denominado de curvas $P-\delta$.

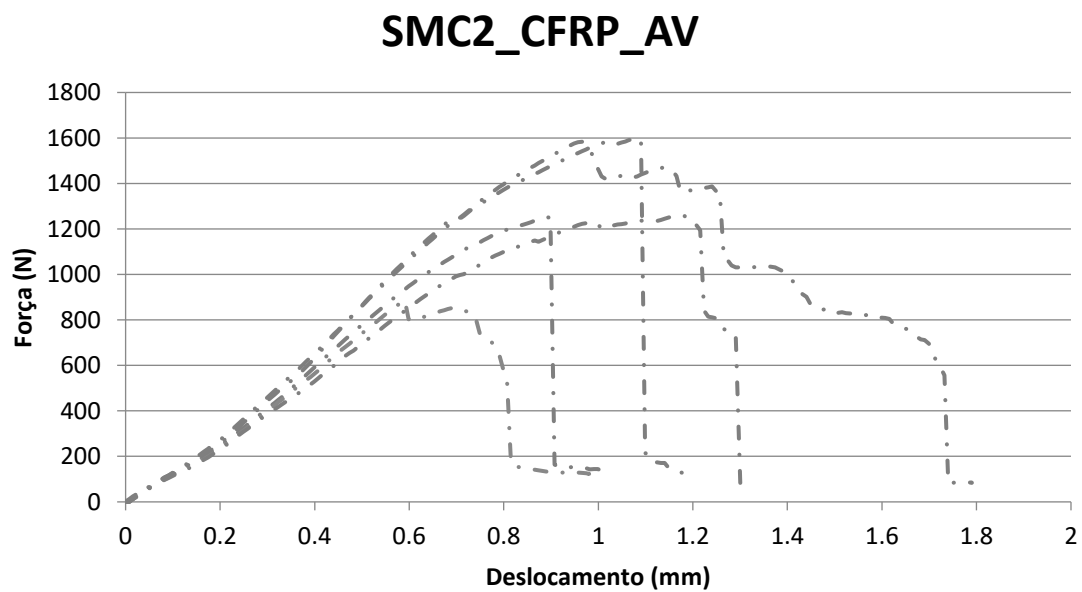
Foi utilizado um código para as linhas do gráficos, neste caso, as linhas a cheio azuis representam os dados válidos para análise, enquanto que, as linhas a tracejado cinzento dizem respeito a valores rejeitados.

Curvas $P-\delta$ em adesivos Araldite® AV138• **SMC1-SMC1****SMC1_SMC1_AV**Figura 58 - curvas $P-\delta$ SMC1_SMC1_AV• **SMC2-SMC2****SMC2_SMC2_AV**Figura 59 - Curvas $P-\delta$ SMC2_SMC2_AV

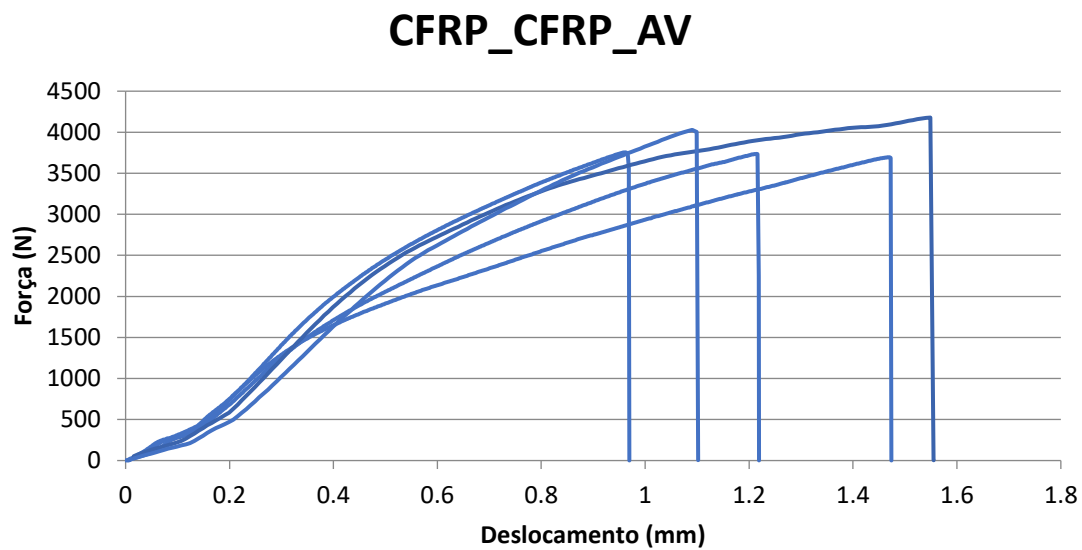
- **SMC1-CFRP**

Figura 60 - Curvas $P-\delta$ SMC1_CFRP_AV

- **SMC2-CFRP**

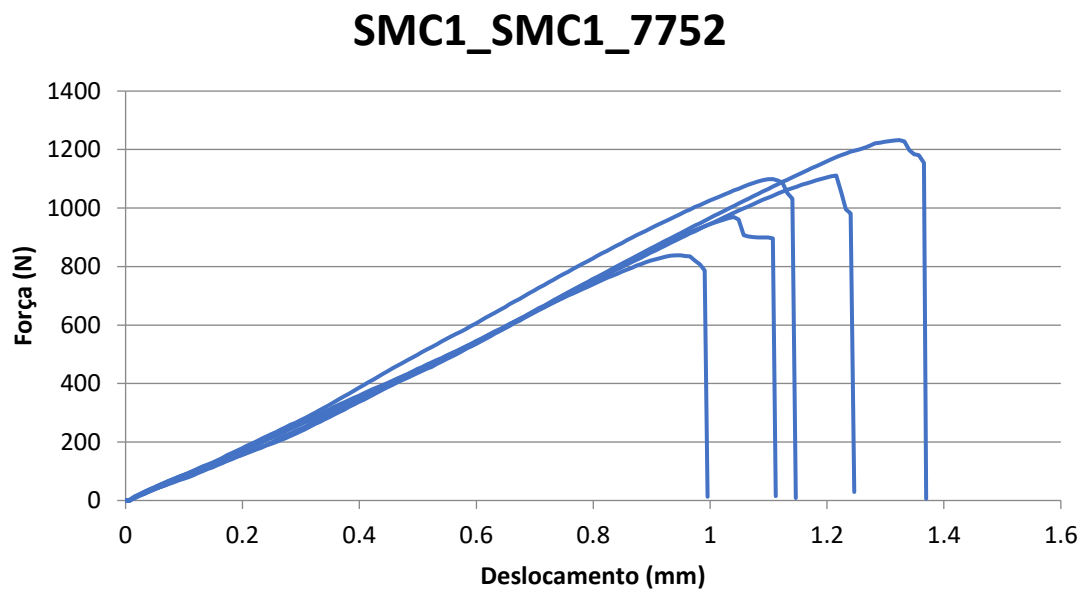
Figura 61 - Curvas $P-\delta$ SMC2_CFRP_AV

- **CFRP-CFRP**

Figura 62 - Curvas $P-\delta$ CFRP_CFRP_AV

Curvas $P-\delta$ em adesivos Sikaforce® 7752

- **SMC1-SMC1**

Figura 63 - Curvas $P-\delta$ SMC1_SMC1_7752

- **SMC2-SMC2**

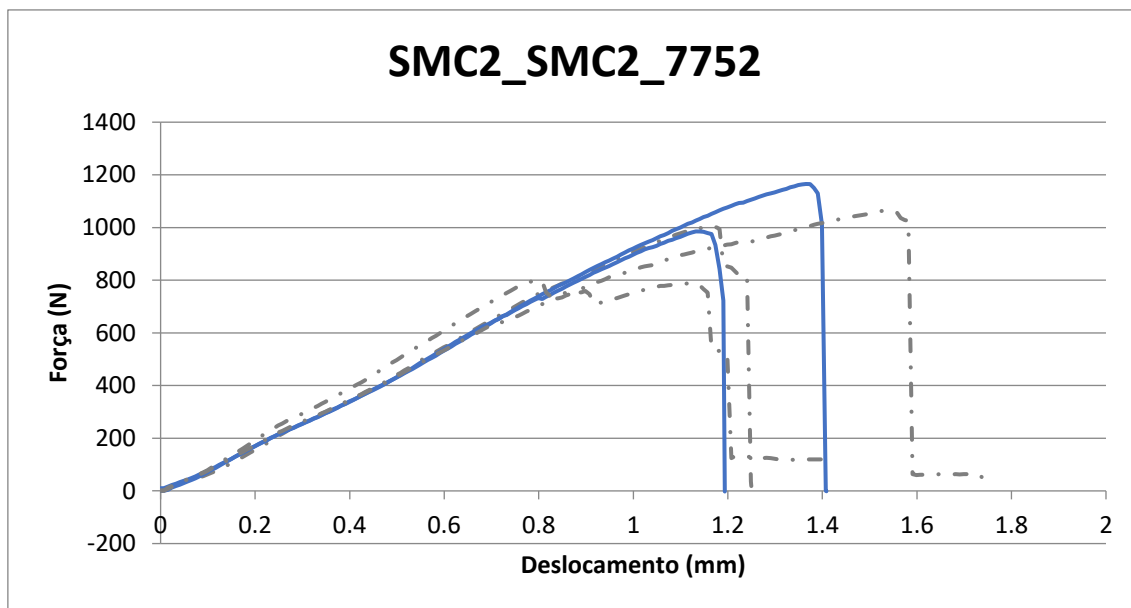


Figura 64 - Curvas $P-\delta$ SMC2_SMC2_7752

- **SMC1-CFRP**

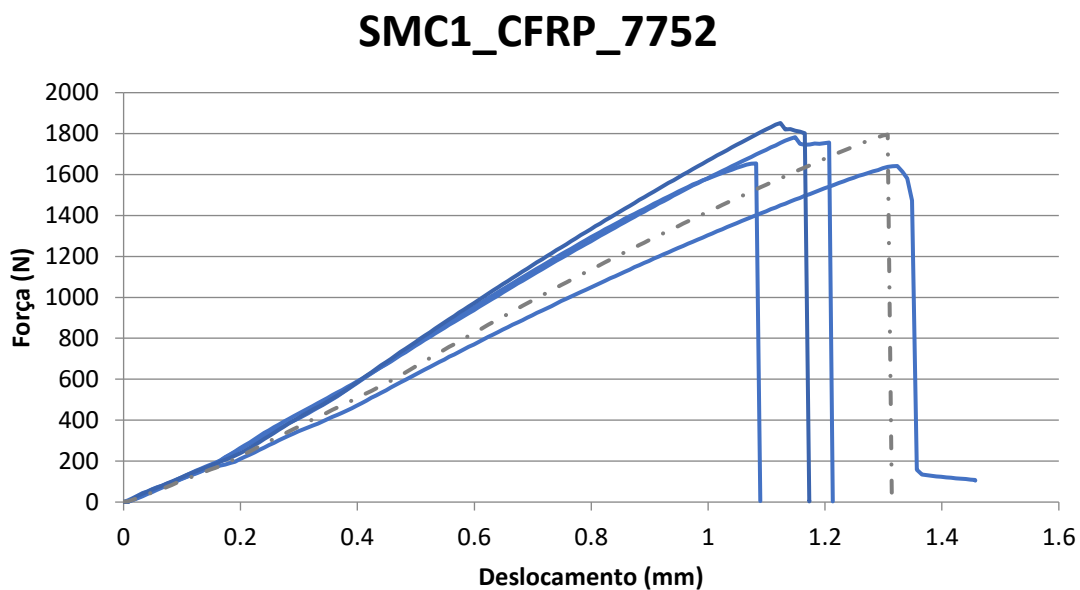


Figura 65 - Curvas $P-\delta$ SMC1_CFRP_7752

- **SMC2-CFRP**

SMC2_CFRP_7752

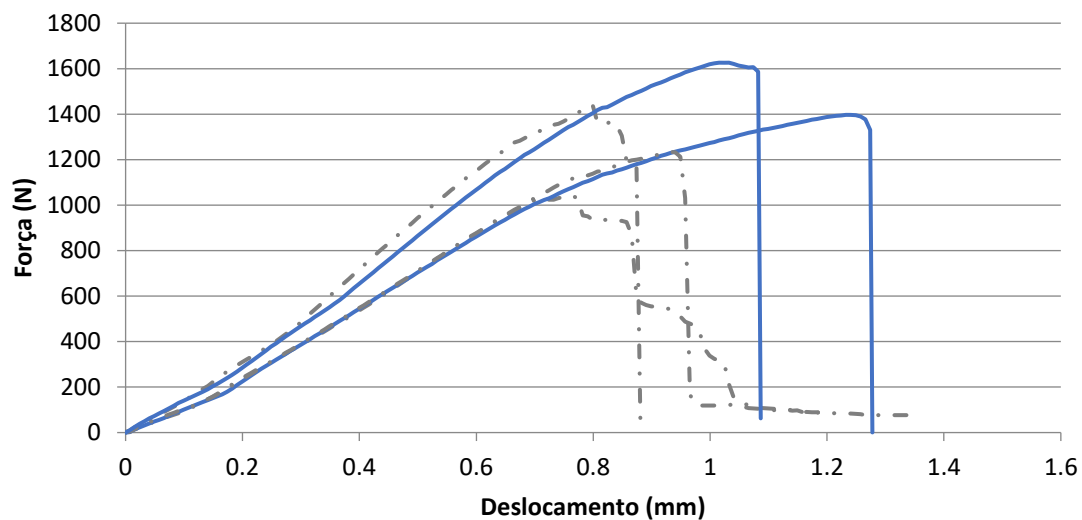


Figura 66 - Curvas $P-\delta$ SMC2_CFRP_7752

- **CFRP-CFRP**

CFRP_CFRP_7752

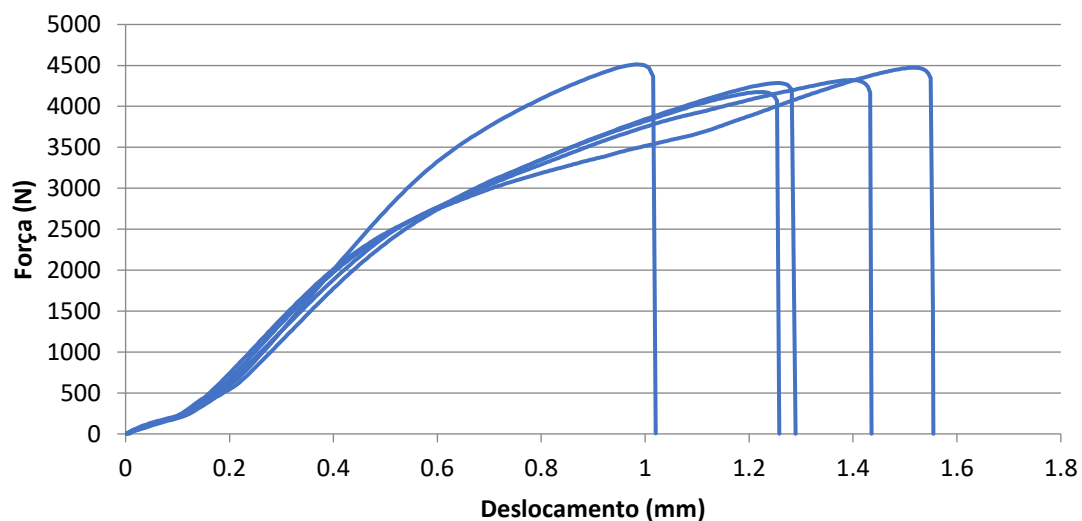
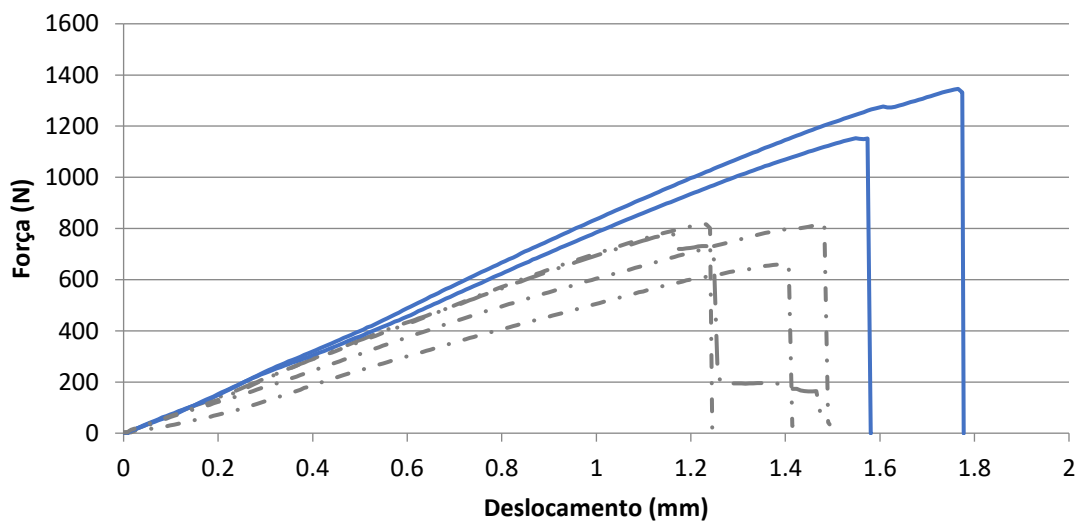
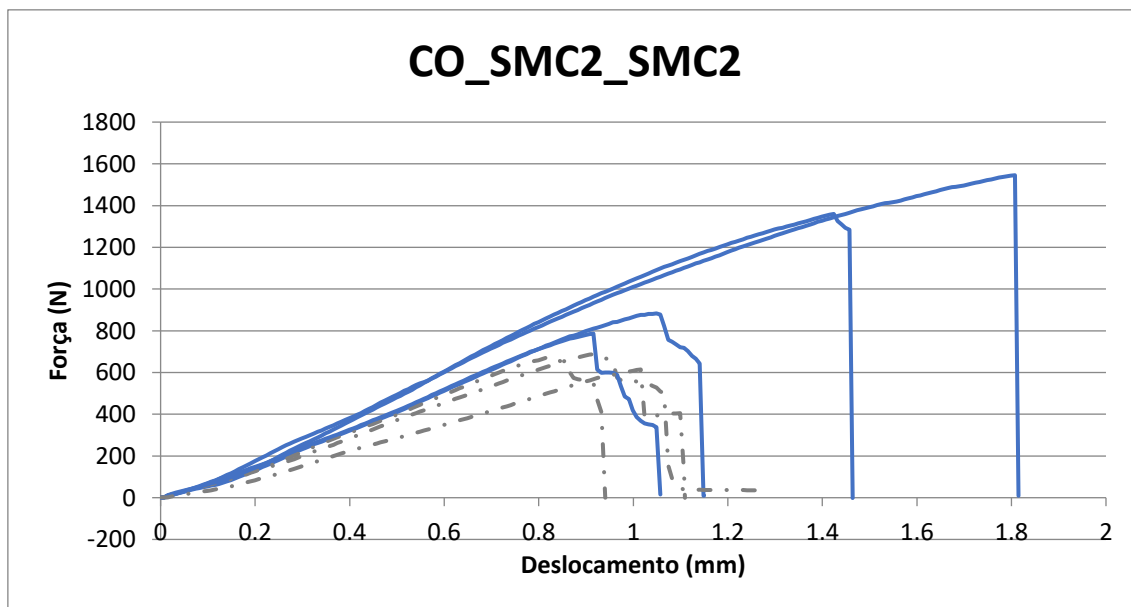
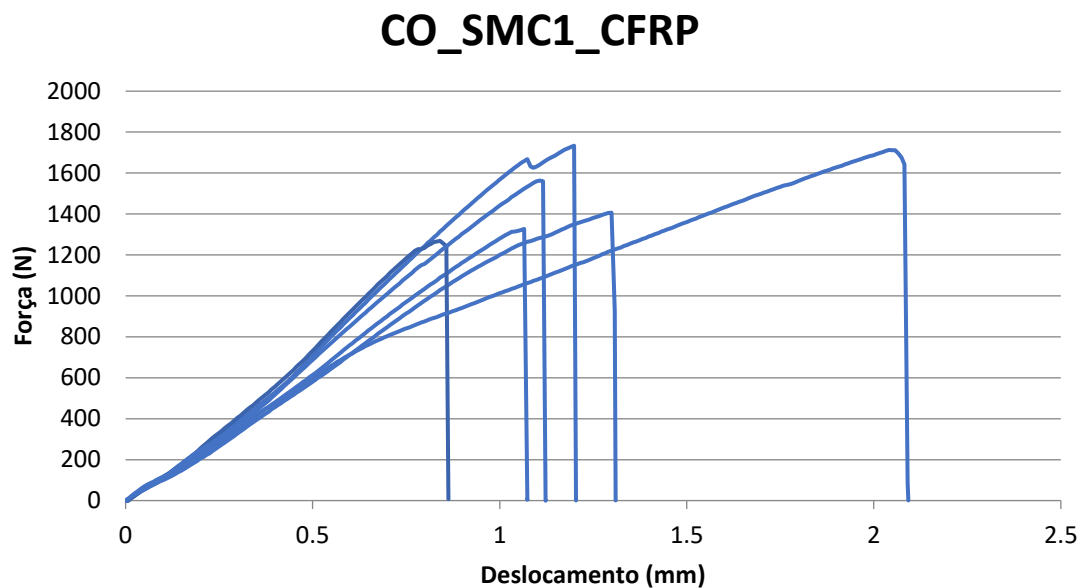


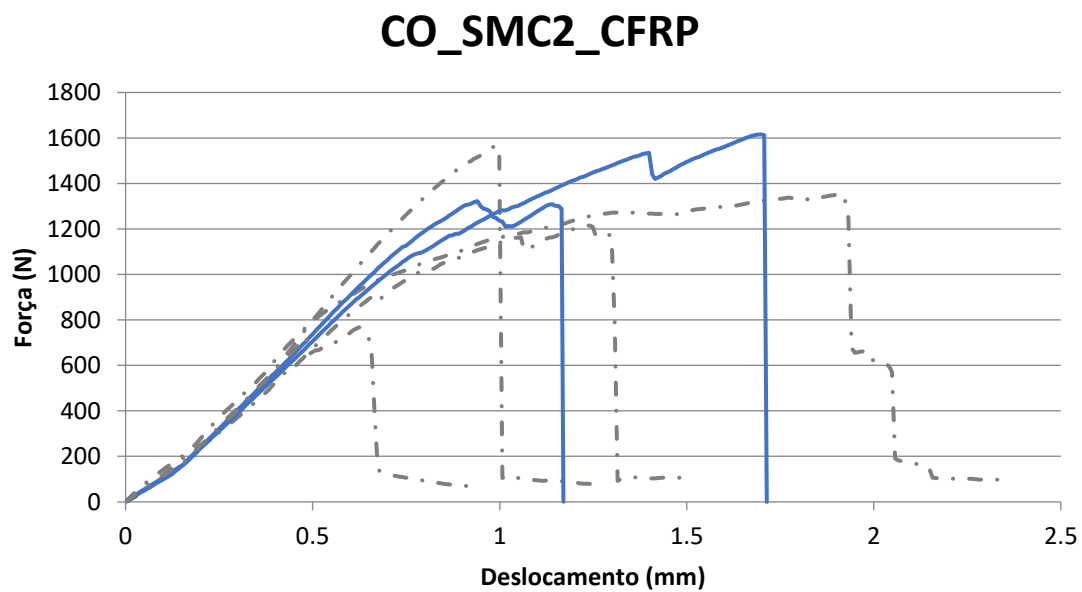
Figura 67 - Curvas $P-\delta$ CFRP_CFRP_7752

Curvas $P-\delta$ em ligações co-curadas• **SMC1-SMC1****CO_SMC1_SMC1**Figura 68 - Curvas $P-\delta$ CO_SMC1_SMC1• **SMC2-SMC2****CO_SMC2_SMC2**Figura 69 - Curvas $P-\delta$ CO_SMC2_SMC2

- **SMC1-CFRP**

Figura 70 - Curvas $P-\delta$ CO_SMC1_CFRP

- **SMC2-CFRP**

Figura 71 - Curvas $P-\delta$ CO_SMC2_CFRP

- **CFRP-CFRP**

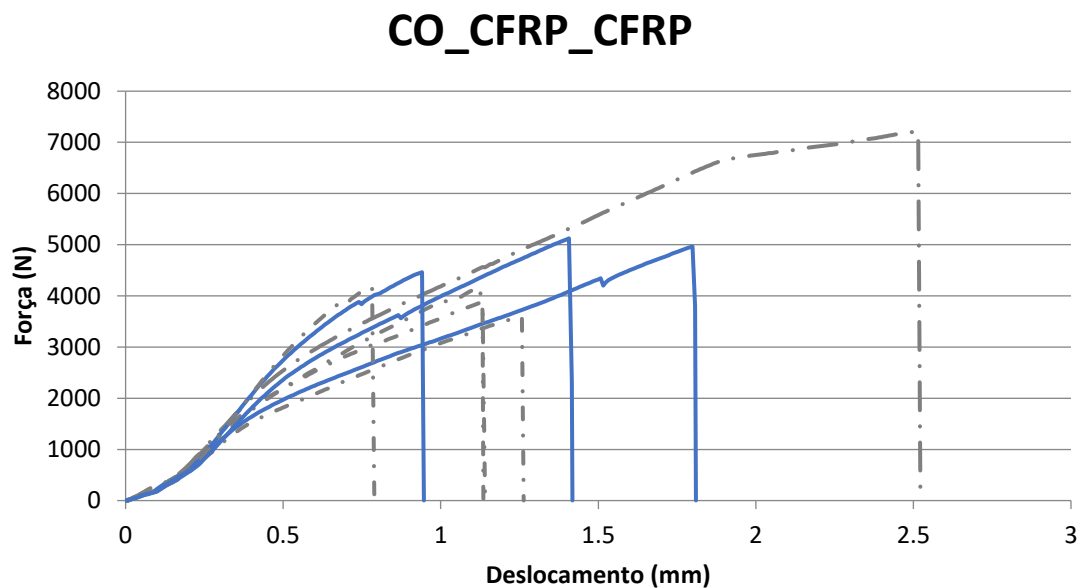


Figura 72 - Curvas $P-\delta$ CO_CFRP_CFRP

3.1.6.1.2 Modos de rotura

Antes de se iniciar a análise da resistência da junta, é necessário analisar os modos de rotura. O modo de rotura indica se a junta foi bem preparada, se a resistência do adesivo foi utilizada na sua totalidade, ou até mesmo, se foi utilizado um adesivo com demasiada resistência. A determinação do modo de rotura pode ser realizada visualmente, como se apresenta na Tabela 33.

Devido ao elevado número de ensaios realizados, os resultados do modo de rotura irão ser apresentados de forma simplificada na Tabela 34. Os resultados detalhados podem ser consultados no anexo 6.1.

Tabela 33 - Tipos de modo de rotura


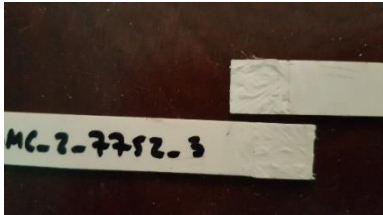
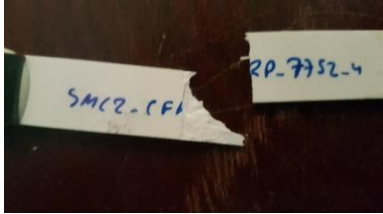


Modo de rotura	Definição	Exemplo ilustrativo
Coesiva (c)	Rotura pelos elementos coesivos do adesivo ou pelos elementos coesivos do co-curado. Este é o modo de rotura ideal, pois significa que se tirou proveito total da resistência do adesivo.	
Interlaminar (i)	Tipo de rotura originado pelo arrancamento das primeiras camadas.	
Substrato (s)	A rotura dá-se pelos substratos. Nestes casos, o adesivo escolhido é mais resistente que o substrato.	
Mista (m)	Este tipo de rotura acontece quando existem zonas com má preparação do material aderente. Nestes casos, não se tira vantagem do adesivo.	
Interface (it)	A rotura é feita na interface entre o adesivo e o material aderente. Existe uma má preparação da superfície. Não se tira proveito das propriedades do substrato nem do adesivo.	

Tabela 34 - Modos de roturas dos ensaios realizados

Ensaio	Modo de rotura (provete)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
SMC1/SMC1 AV138	i	i	i	i	i			
SMC2/SMC2 AV138	i	s	i	s	i			
SMC1/CFRP AV138	i	i	i	i	i			
SMC2/CFRP AV138	s	s	s	s	s			
CFRP/CFRP AV138	c	c	c	c	c			
SMC1/SMC1 7752	i	i	i	i	i			
SMC2/SMC2 7752	s	i	i	s	s			
SMC1/CFRP 7752	s	i	i	i	i			
SMC2/CFRP 7752	s	m	s	s	i			
CFRP/CFRP 7752	c	c	c	c	c			
Co-cura SMC1/CFRP	i	i	i	i	i	i		
Co-cura SMC2/CFRP	s	s	s	it	i	s		
Co-cura CFRP/CFRP	c	c	c	c	c	c	c	c
Co-cura SMC1/SMC1	s	s	s	c	c	s		
Co-cura SMC2/SMC2	c	c	c	c	c	c	c	

Conforme se pode verificar, os modos de rotura diferem muito, no entanto, para efeitos de análise de resistência da junta, apenas serão consideradas as roturas coesivas e interlaminares.

3.1.6.1.3 Resistência das juntas

Neste subcapítulo serão apresentados os dados da resistência das juntas. Para facilitar a análise, dividiram-se os resultados em juntas simples (onde os substratos são os mesmos) e juntas híbridas (onde os substratos são diferentes).

Com a concretização deste estudo, pretende-se estudar a ligação entre substratos, ou seja, quer-se avaliar as propriedades da ligação (adesiva ou co-curada). Para este efeito, apenas podem ser considerados válidos os dados dos ensaios oriundos de provetes cujo modo de rotura foi coesivo e/ou interlaminar, visto tratar-se de casos em que a resistência da junta ficou ao encargo da ligação. Nos casos em que a rotura se dá pelo substrato, significa que o adesivo escolhido apresenta resistência superior aos substratos, portanto, os dados extraídos dos ensaios dizem respeito às propriedades do substrato, sendo por isso excluídos. No desenvolvimento deste estudo, foram também excluídos alguns provetes cujos valores de força eram bastantes discrepantes em relação à média.

A Figura 73 apresenta a média e o desvio padrão de todas as condições utilizadas. De notar que na Figura 73 se apresenta um dado em que a rotura se deu pelo substrato (barra a vermelho), tratando-se de um dado meramente indicativo.

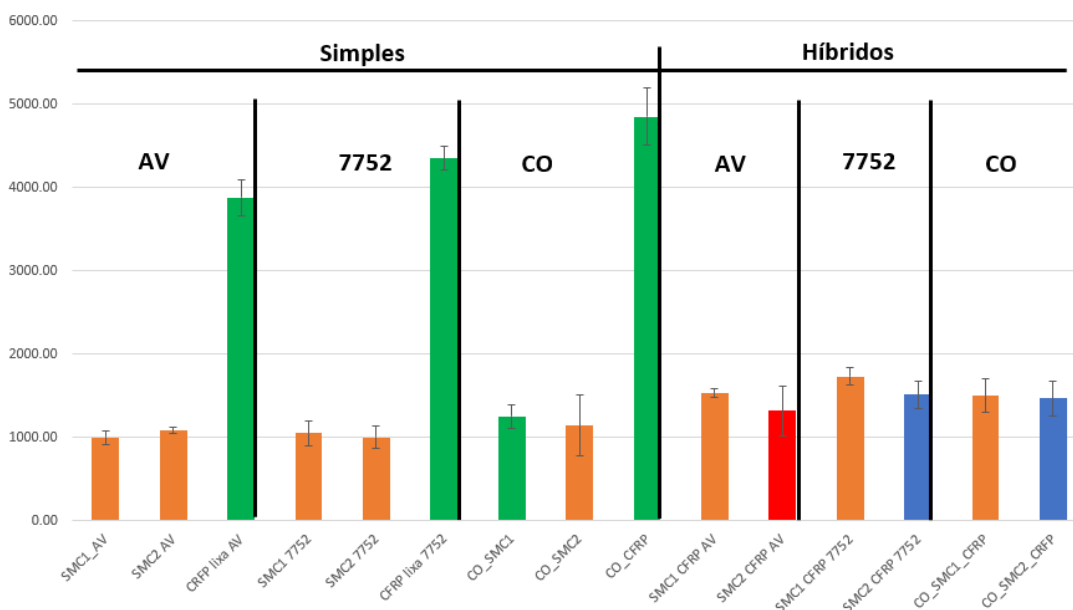


Figura 73 - Resistências da juntas, média e desvio-padrão

Foi também utilizado um código de cores, para ajudar a compreensão dos dados. A Tabela 35 apresenta o código utilizado e o seu significado.

Tabela 35 - Codificação utilizada na resistência das juntas

Cor	Significado
Verde	Modo de rotura coesiva
Laranja	Modo de rotura interlaminar
Azul	Modo de rotura coesiva e interlaminar
Vermelho	Modo de rotura pelo substrato

3.1.7 Análise de resultados

Com a análise dos modos de rotura, curvas $P-\delta$, e resistência das juntas, verifica-se que nos ensaios com aderentes em SMC não se consegue tirar o máximo proveito da ligação realizada, uma vez que na maior parte deste tipo de juntas, a rotura dá-se pela zona interlaminar. Foi possível aumentar ligeiramente a resistência, com a aplicação de um material aderente com melhores propriedades adesivas, como é o caso do CFRP. De facto, as resinas de poliéster apresentam as piores propriedades de adesão, enquanto as resinas de epóxico apresentam as melhores [126, 127]. De um modo geral, o valor médio de resistência para as juntas simples de SMC é praticamente constante. Poderá ser possível aumentar a resistência máxima, através do aumento da sobreposição e/ou mesmo com o aumento da largura dos substratos.

Ao analisar as ligações co-curadas SMC-SMC, verifica-se que há um aumento ligeiro da resistência em relação aos anteriores, inclusive, registaram-se resultados em que a rotura se deu pela zona de ligação. Este aumento de resistência poderia ter sido mais significativo, no entanto, este acontecimento não se verificou, devido ao facto de se ter realizado uma operação de desbaste no substrato, realizada para se conseguir uma zona co-curada, que levou a um enfraquecimento da junta, visto criar-se uma zona de descontinuidade de fibras.

Fazendo a mesma análise para as ligações com substrato em CFRP, verifica-se um aumento bastante significativo da resistência da junta, devido ao poder de adesão da resina de epóxico. Neste caso, é possível afirmar que se utilizou ao máximo as propriedades do adesivo. Contrariamente ao expectável, o adesivo Sikaforce® 7752 foi superior, em termos de resistência média, ao adesivo AV138. Uma das possíveis razões para este efeito ter-se sucedido, prende-se com a maior rigidez do adesivo AV138 e os com picos de tensão criados nas extremidades da junta.

Em resumo, com a ligação co-curada CFRP-CFRP obteve-se o maior valor de resistência, de seguida, com cerca de 89% do valor máximo, foi a ligação CFRP-CFRP com adesivo Sikaforce® 7752. A ligação CFRP-CFRP com adesivo Sikaforce® AV138 representa cerca

de 79% da resistência máxima. De facto, comprova-se que os substratos com resina de epóxido apresentam melhores propriedades de adesão que os substratos com resina de poliéster, que apresentam cerca de 26% do valor máximo.

3.2 Trabalho numérico

Neste capítulo é descrito a análise numérico para os ensaios experimentais. Neste caso recorreu-se ao *software* ABAQUS®, versão 2016 (*Dassault Systèmes*), para determinar as propriedades para cada tipo de ensaio. Numa primeira fase desenhou-se a geometria 2D dos provetes e as respetivas partições. De seguida foram atribuídas propriedades a cada partição da juntas e definido o tipo de malha. E, por fim, foram retirados os dados necessário. Ao longo deste capítulo será discriminado cada fase para a obtenção dos resultados.

3.2.1 Condições da análise numérica

O modelo de dano coesivo utilizado foi o modelo de dano triangular. Este modelo caracteriza o comportamento de camadas finas de adesivo e requer poucos parâmetros para a simulação.

Para a elaboração do modelos numérico são necessários vários passos de forma sequencial. Deste modo, serão descritas as operações realizadas na criação das juntas JSS no *software* Abaqus.

Operação 1 – Desenho 2D

Nesta operação foi efetuado o desenho da junta, tal como demonstra a Figura 74. Para modelar os substratos e o adesivo foi desenhado apenas o contorno exterior, e posteriormente, foi dividido em partições para a atribuição das respetivos materiais (Figura 75). As dimensões indicadas na Figura 75 são definidas especificamente para cada tipo de junta. Estas dimensões variam consoante a medição experimental dos provetes nas roturas interlaminares.

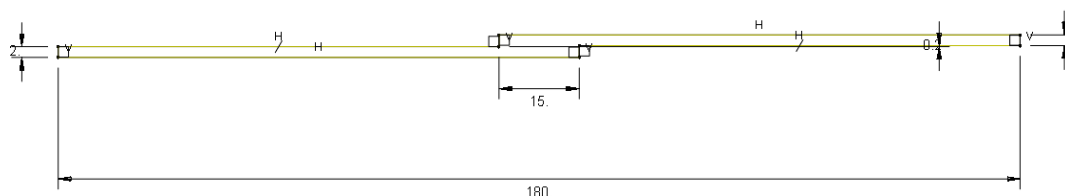


Figura 74 – Desenho 2D da geometria do provete no *software* ABAQUS®

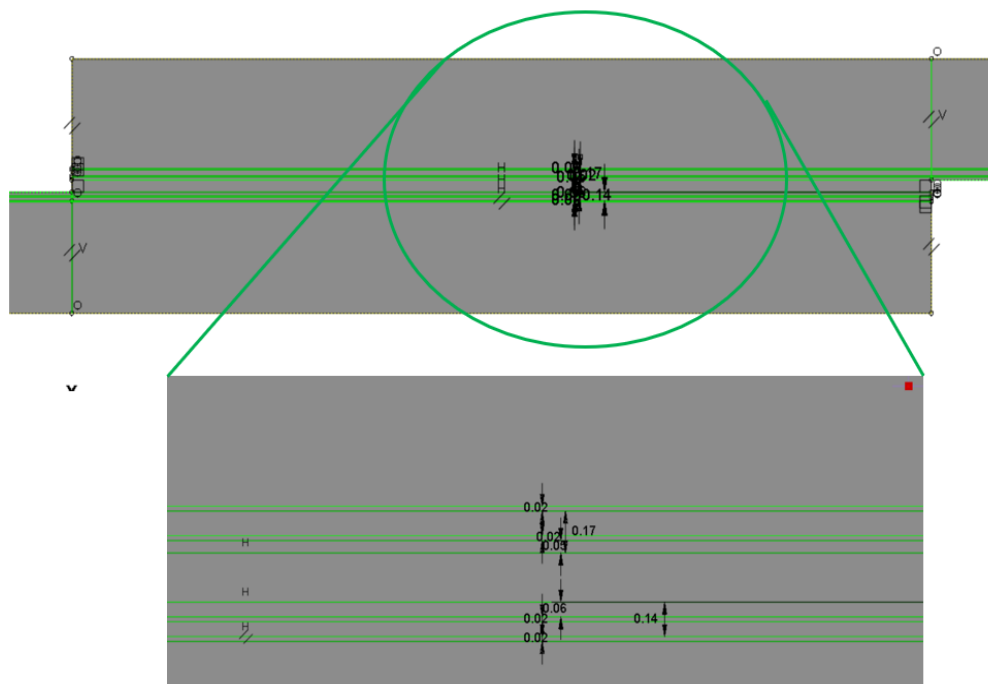


Figura 75 – Divisão das partições do desenho 2D

Para os modelar os materiais ortotrópicos, como é o caso do CFRP, é necessário escolher o sistema de eixos. Para o efeito, o sistema de eixos foi definido conforme ilustra a Figura 76.



Figura 76 - Sistema de eixos para os modelos numéricos

Operação 2 – Propriedades

Nesta operação foram definidas e atribuídas propriedades a cada partição. Neste caso, foram criados dez tipos de material. A Tabela 36 indica os materiais utilizados, assim como, o seu comportamento e tipo de secção.

Tabela 36 - Definição dos tipos de material, comportamento e tipo de secção para os modelos numéricos

Material	Comportamento	Tipo de secção
SMC1	Mecânico – Elástico - Isotrópico	Homogéneo
SMC2	Mecânico – Elástico - Isotrópico	Homogéneo
Adesivo 7752	Mecânico – Elástico – Tração Mecânico – danos por leis de separação de tração - QUADS	Coesivo – Separação por tração
Adesivo AV 138	Mecânico – Elástico – Tração Mecânico – danos por leis de separação de tração - QUADS	Coesivo – Separação por tração
CFRP	Mecânico – Elástico – Constantes de engenharia	Homogéneo
Interlaminar SMC1	Mecânico – Elástico – Tração Mecânico – danos por leis de separação de tração - QUADS	Coesivo – Separação por tração
Interlaminar SMC2	Mecânico – Elástico – Tração Mecânico – danos por leis de separação de tração - QUADS	Coesivo – Separação por tração
Interlaminar CFRP	Mecânico – Elástico – Tração Mecânico – danos por leis de separação de tração - QUADS	Coesivo – Separação por tração
Interlaminar SMC1/CFRP	Mecânico – Elástico – Tração Mecânico – danos por leis de separação de tração - QUADS	Coesivo – Separação por tração
Interlaminar SMC2/CFRP	Mecânico – Elástico – Tração Mecânico – danos por leis de separação de tração - QUADS	Coesivo – Separação por tração

Operação 3 – Step

A operação *step* refere-se aos parâmetros de computação para a simulação. Neste caso, conforme indica a Figura 77, foi considerado como patamar de segurança um valor máximo de 10000 incrementos. Foi definido como tamanho inicial do incremento o valor igual a 1% do deslocamento aplicado ao modelo. De modo a evitar os problemas de convergência resultantes durante a fase de propagação de dano foi fixado um valor mínimo de 1×10^{-20} e um valor máximo igual ao valor de iniciação.

Edit Step

Name: Step-1

Type: Static, General

Basic **Incrementation** Other

Type: Automatic Fixed

Maximum number of increments: 10000

Increment size:	Initial	Minimum	Maximum
	0.01	1E-020	0.01

Figura 77 - Parâmetros de simulação – Definição dos incrementos para análise

Operação 4 – Pontos de carregamento

Neste ponto são definidas as condições de fronteira aplicadas à junta. Para tal, foram definidos pontos de encastramento e pontos de deslocamento. Estes pontos estão representados na Figura 78. Importa referir que foi definido um deslocamento máximo foi de 4 mm na direção X.

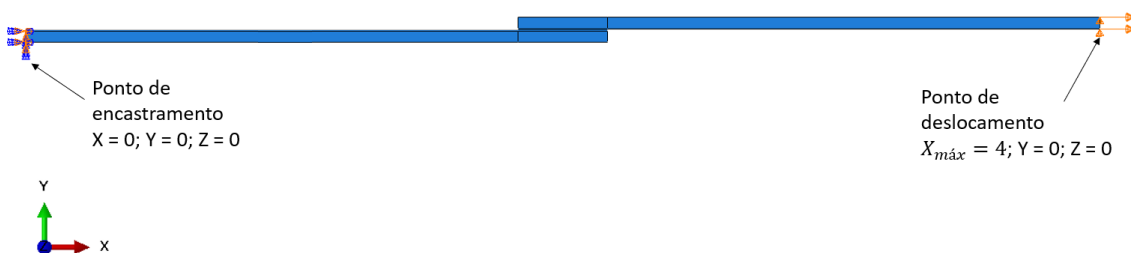






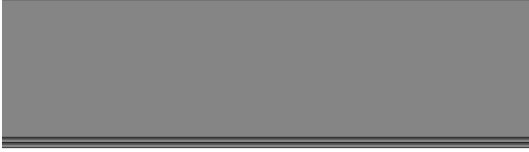

Figura 78 - Pontos de carregamentos

Operação 5 – Definição da malha

Uma das operações mais importantes no desenvolvimento do modelo numérico é a discretização da geometria em elementos finitos. As zonas com maiores gradientes de tensão deverão ser o mais refinadas possível. Para o caso de estudo, a zona mais importante e com o maior refinamento da malha será a zona de ligação, mais concretamente, nas suas extremidades. A Tabela 37 indica para cada zona, assinalado a

vermelho, o tipo de malha utilizado. Foi também utilizado um refinamento mais fino (10%) para determinar as tensões na juntas.

Tabela 37 - Tipo de malha utilizado

Tipo de malha	Zona
<p><i>Double Bias</i> Tamanho mínimo: 0.2 Tamanho máximo: 0.5 Orientação: Do centro para extremidade</p>	
<p><i>Single Bias</i> Tamanho mínimo: 0.2 Tamanho máximo: 0.5 Orientação: Da extremidade para a ligação</p>	
<p><i>Single Bias</i> Tamanho mínimo: 0.2 Tamanho máximo: 0.5 Orientação: Da extremidade para o centro da ligação</p>	
<p><i>Single Bias</i> Tamanho mínimo: 0.2 Tamanho máximo: 0.5 Orientação: Da extremidade para o centro da ligação</p>	
<p><i>Single Bias</i> Tamanho mínimo: 0.2 Tamanho máximo: 0.5 Orientação: Da extremidade para o centro da ligação</p>	
<p><i>By number</i> Número de elementos: 1</p>	

Ainda nesta fase é necessário definir os tipos de elementos e os controladores da malha. Os controladores de malha escolhidos foram os do tipo estrutural (cor verde) e sweep (cor amarela). A Figura 79 mostra as zonas na quais foram aplicados estes controladores.

Para as mesmas zonas foi necessário atribuir os tipos de elementos, neste caso para os controladores *sweep* foi atribuído elementos coesivos com viscosidade de 1×10^{-5} Pa.s e para o controlador estrutural foi atribuído elementos de plano de tensões com viscosidade de 1×10^{-5} Pa.s.

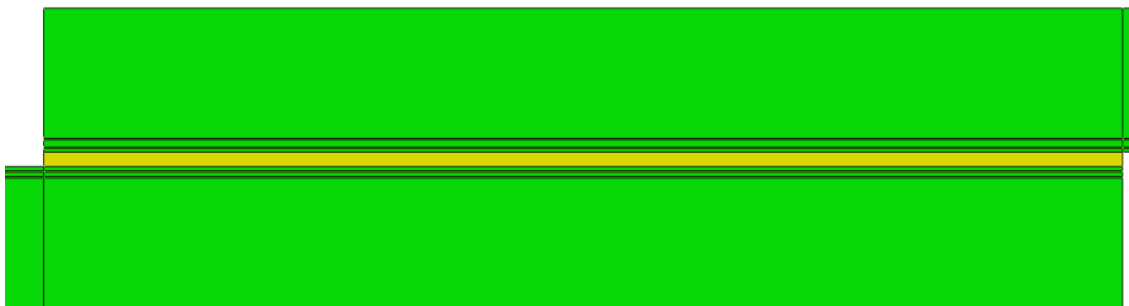


Figura 79 - Zona dos controladores na operação malha

Operação 6 – Simulação

Após ter o modelo de simulação completo, é necessário fazer correr o trabalho. Para tal, foi definido a paralelização e a memória de análise, após isso, basta dar um nome e iniciar a simulação. Para a paralelização foram definidos 4 processadores, utilizando até 90% da memória do computador.

3.2.2 Modelo de dano utilizado

Em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [128]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [129], linear parabólico [130] exponencial [131], polinomial [132] e trapezoidal [133]. Pela sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada [134]. O modelo triangular 2D está representado na Figura 80, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

Nesta lei, distinguem-se dois modos. O modo puro caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar a tensão e corte [135]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente direta de deformação e de uma deformação de corte que são determinados recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas, entre aderentes rígidos, as tensões existentes na membrana são desprezadas.

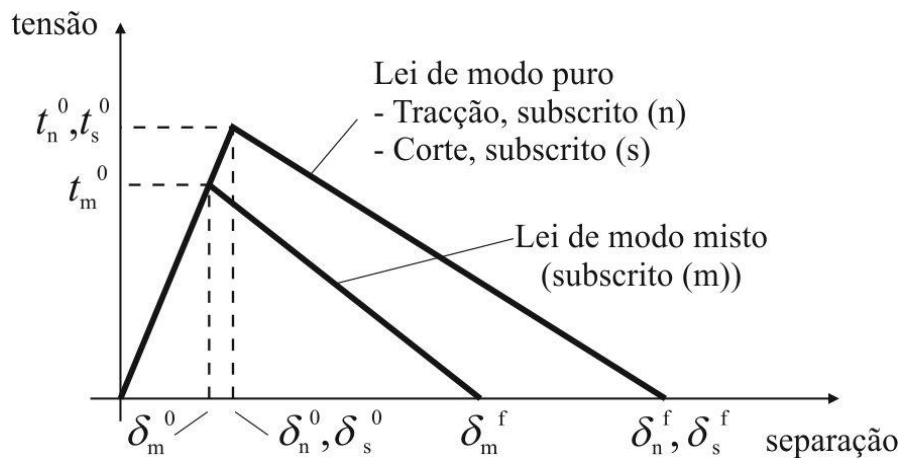


Figura 80 – Lei triangular do modelo de dano coesivo

Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz K_{COH} , a qual relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida da seguinte forma:

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

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja uma formulação local, esta é usada para simular fraturas de espessura nula, em que os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [136]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

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

onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [135]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério de tensão nominal quadrática, expresso pela seguinte expressão:

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

$\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam com uma tensão de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [137]. Quando t_m^0 é atingido (Figura 80), pela igualdade da equação 5, a rigidez do

material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos (δ_m^f na Figura 80) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC}

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

3.2.3 Determinação das propriedades de dano

De modo a caracterizar as leis coesivas em tração e corte é necessário conhecer t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} . No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios de tração [138, 139]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias e propagação de fenda tipicamente em modo misto levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [140-142]. Assim sendo, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

Propriedades obtidas por publicações

Araldite® AV138

Para a determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi utilizado um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [143]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente ao mais indicado, e foi utilizado para o adesivo Araldite® 2015, conforme se exemplificará de seguida. Neste caso, foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios de tração e de corte (*Thick adherend shear test* (TAST)), respetivamente, para a definição de t_n^0 e t_s^0 . Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram então utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a JSS com $L=20$ mm), e as leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais, até obter valores de G_{IC} e G_{IIC} que reproduzam os resultados experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram também determinados experimentalmente com ensaios de tração e ensaios de corte (TAST). No trabalho referido [144] conclui-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades do adesivo. A Tabela 38 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138 numa lei coesiva em modo misto [144].

Tabela 38 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com t_A de 0,2 mm [144]

E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
4890	1560	39,45	30,2	0,2	0,38

CFRP

Para a determinação das propriedades ortotrópicas do CFRP recorreu-se a teoria clássica dos laminados [1] e ao *software Helius* (Autodesk®). Desta forma, utilizando o empilhamento descrito na secção 3.1.5 e com os dados apresentados na Tabela 21, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 - Propriedades ortotrópicas para o laminado CFRP

E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	E_3 [MPa]	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_1 [MPa]	G_2 [MPa]	G_3 [MPa]
94734,5	37136,5	9902,5	$0,67 \times 10^{-2}$	0,417	0,450	4800	4310,5	3331,5

Os parâmetros coesivos do material CFRP foram caracterizados por Campilho et al. 2009^a. Na Tabela 40 apresentam-se esses resultados.

Tabela 40 – Parâmetros coesivos para o CFRP

E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
10^6	10^6	42,6	39,3	0,54	0,93

Propriedades obtidas através do método inverso

Conforme descrito no subcapítulo 2.4.1.6, foi necessário recorrer ao método inverso para determinar as propriedades coesivas dos restantes elementos. Deste modo, e após diversas iterações, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 - Parâmetros coesivos, utilizando o método inverso

Propriedade	Interlaminar SMC1	Interlaminar SMC2	Interlaminar SMC1-CFRP	Interlaminar SMC2-CFRP	Sikaforce® 7752
E [MPa]	10^6	10^6	10^6	10^6	493,81*
G [MPa]	10^6	10^6	10^6	10^6	187*
t_n^0 [MPa]	10	16	35	35	11,49*
t_s^0 [MPa]	6	7	35	30,2	18
G_{IC} [N/mm]	0,8	0,35	0,3	0,3	2,36*
G_{IIC} [N/mm]	0,55	0,3	0,6	0,6	5,41*

* dados retirados da ficha técnica [123]

3.2.3.1 Ensaios de sobreposição simples

Para analisar as JSS é necessário determinar as tensões geradas nas juntas assim como, a determinação das curvas P- δ . Desta forma, este capítulo apresenta os dados extraídos do software ABAQUS®, para cada condição.

3.2.3.1.1 Análise de tensões na junta

Este subcapítulo apresenta as tensões de corte (τ_{xy}) e as tensões de arrancamento (σ_y) em função do comprimento de sobreposição (L_0), tendo em consideração os diferentes tipos de ligação. Estas tensões foram retiradas no plano médio da zona de ligação. Todas as distribuições de tensões estão normalizadas pela média dos valores da tensão de corte, denominado por τ_{avg} .

Tensão de corte

Tensão de corte em juntas com adesivo AV138

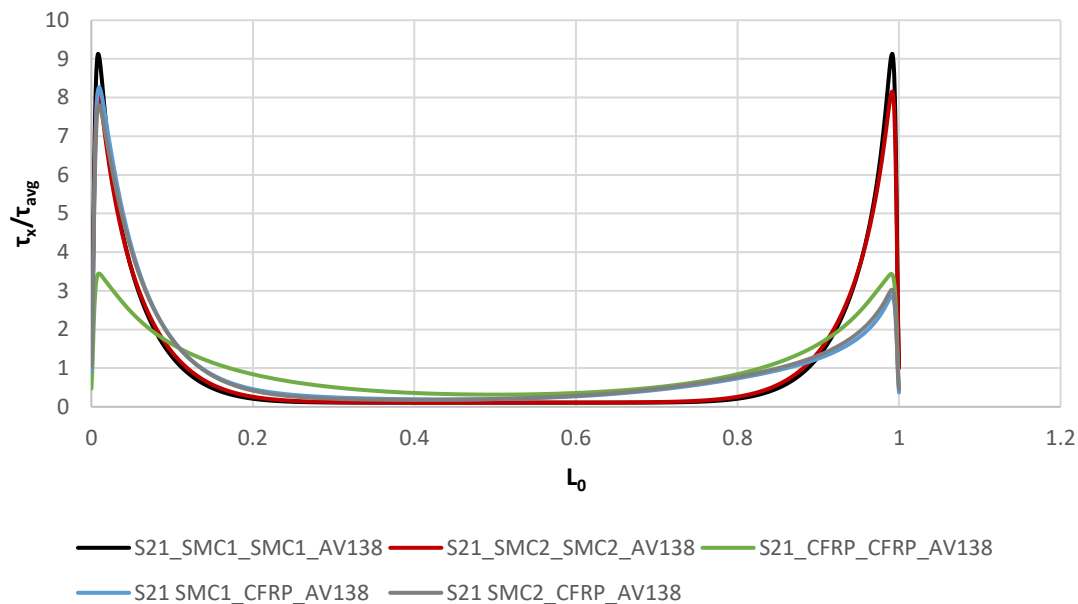


Figura 81 - Tensão de corte em juntas com adesivo AV138

Tensão de corte em juntas com adesivo 7752

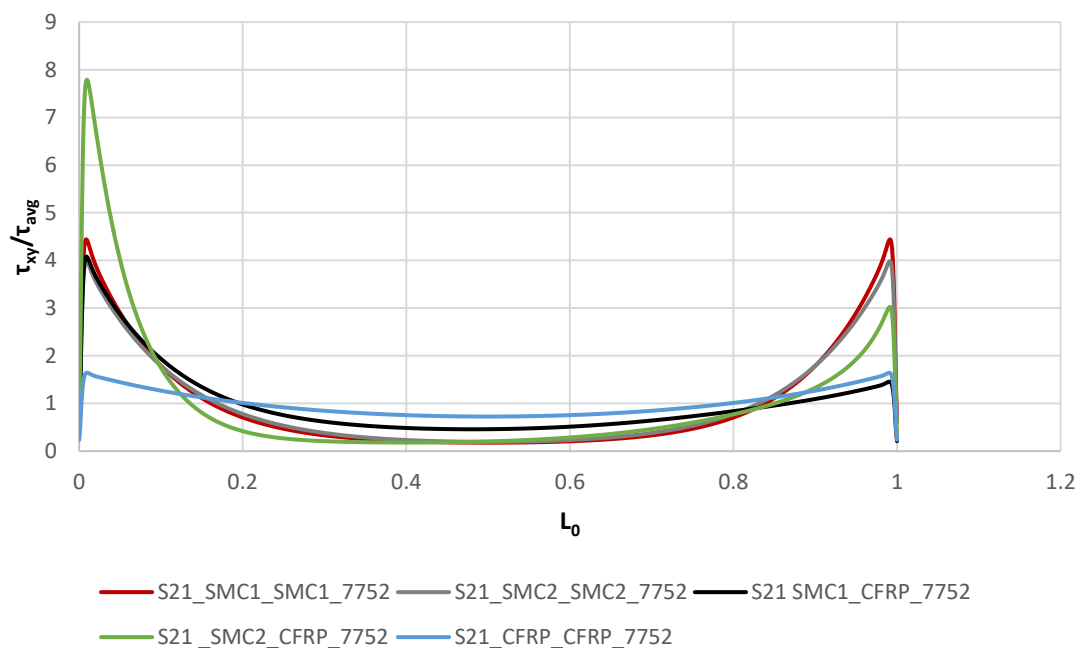


Figura 82 - Tensão de corte em juntas com adesivo 7752

Tensão de corte em juntas co-curadas

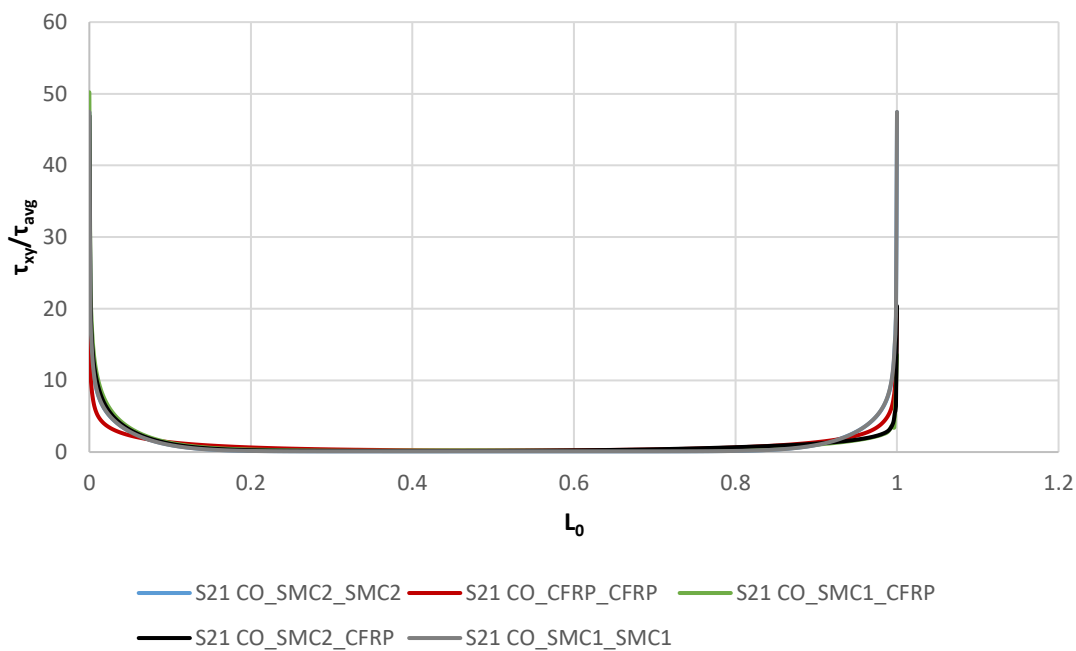


Figura 83 - Tensão de corte em juntas co-curadas

Tensões de arrancamento

Tensão de arrancamento em juntas com adesivo AV138

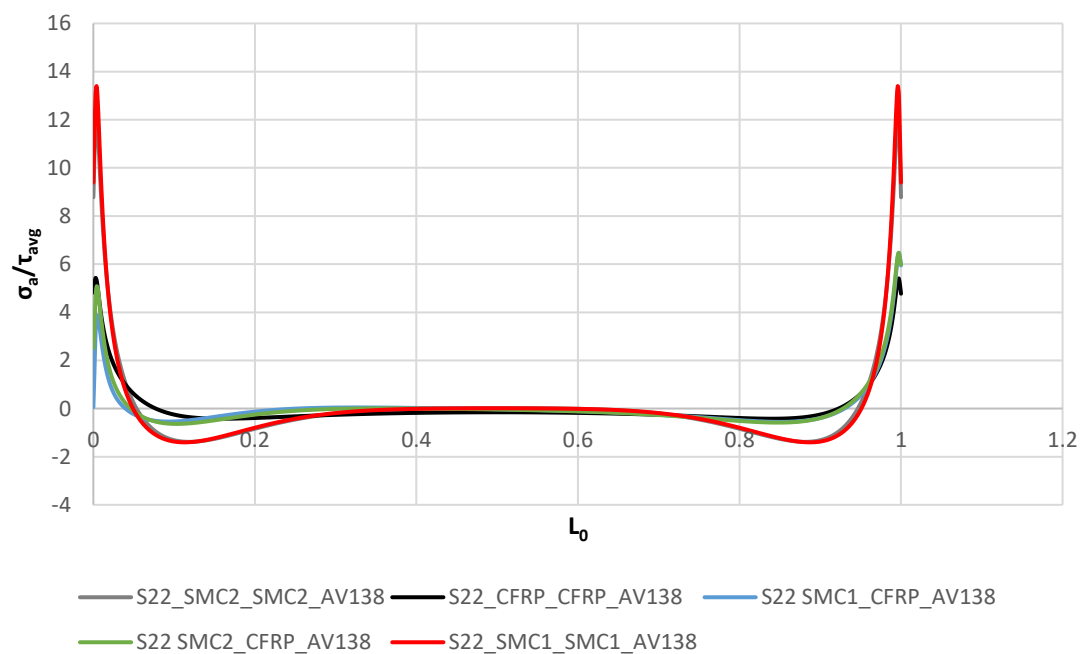


Figura 84 - Tensão de arrancamento em juntas com adesivo AV138

Tensão de arrancamento em juntas com adesivo 7752

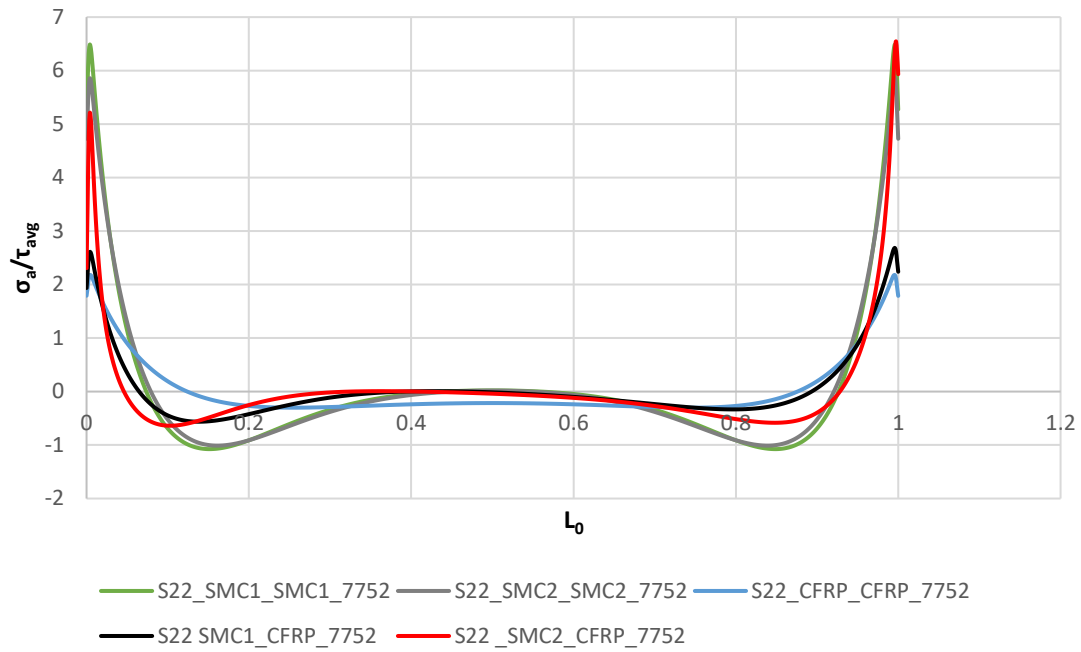


Figura 85 - Tensão de arrancamento em juntas com adesivo 7752

Tensão de arrancamento em juntas co-curadas

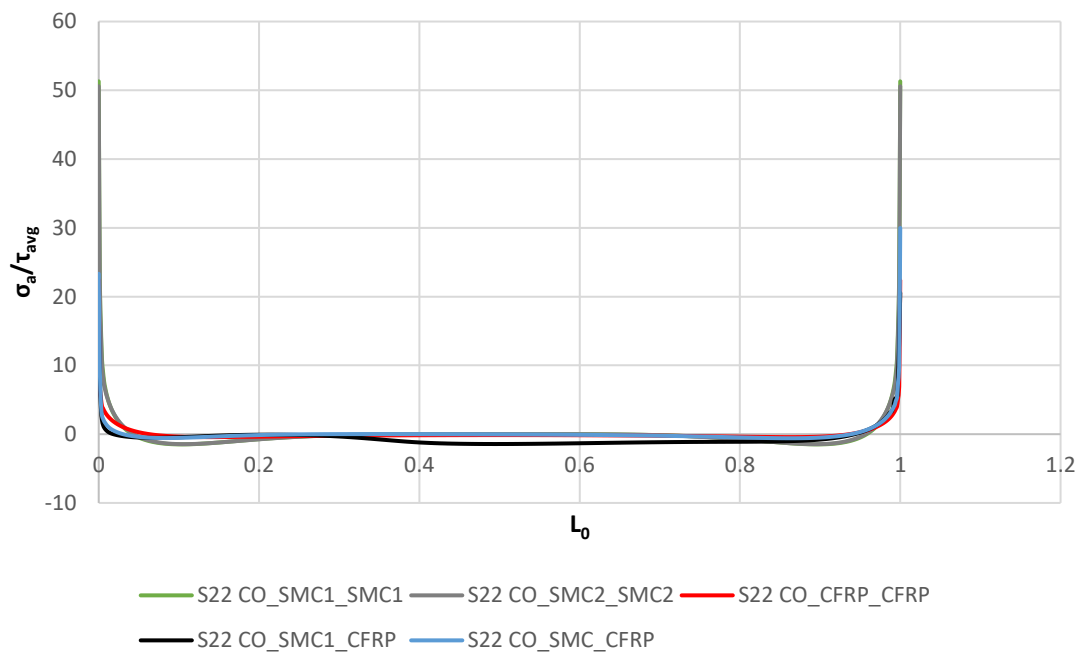


Figura 86 - Tensão de arrancamento em juntas co-curadas

3.2.3.1.2 Curvas P- δ

De forma a comparar os dados obtidos experimentalmente com os obtidos através do modelo numérico, serão elaboradas curvas P- δ para cada condição de ensaio. Importa referir que apenas foram considerados os dados válidos para a realização das curvas.

- **SMC1-SMC1**

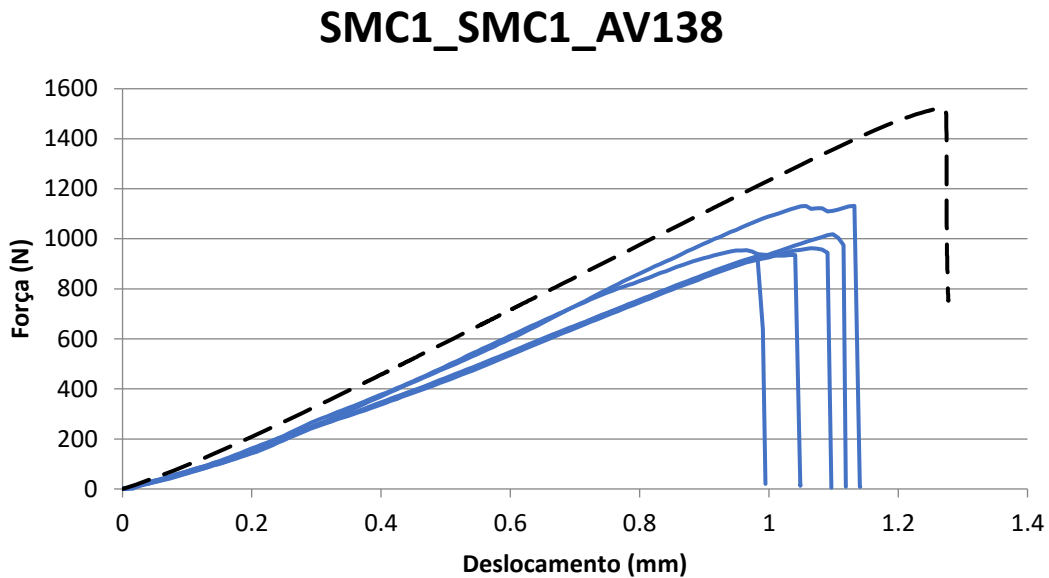


Figura 87 - Comparação entre curvas P- δ SMC1_SMC1_AV, numéricas

- **SMC2-SMC2**

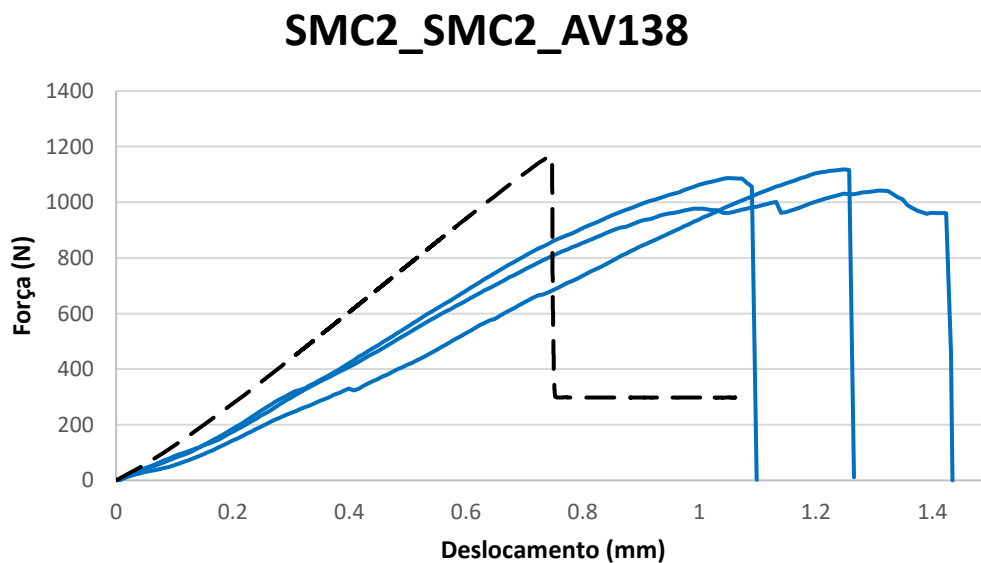


Figura 88 - Comparação entre curvas P- δ SMC2_SMC2_AV, numéricas

- **SMC1-CFRP**

SMC1_CFRP_AV138

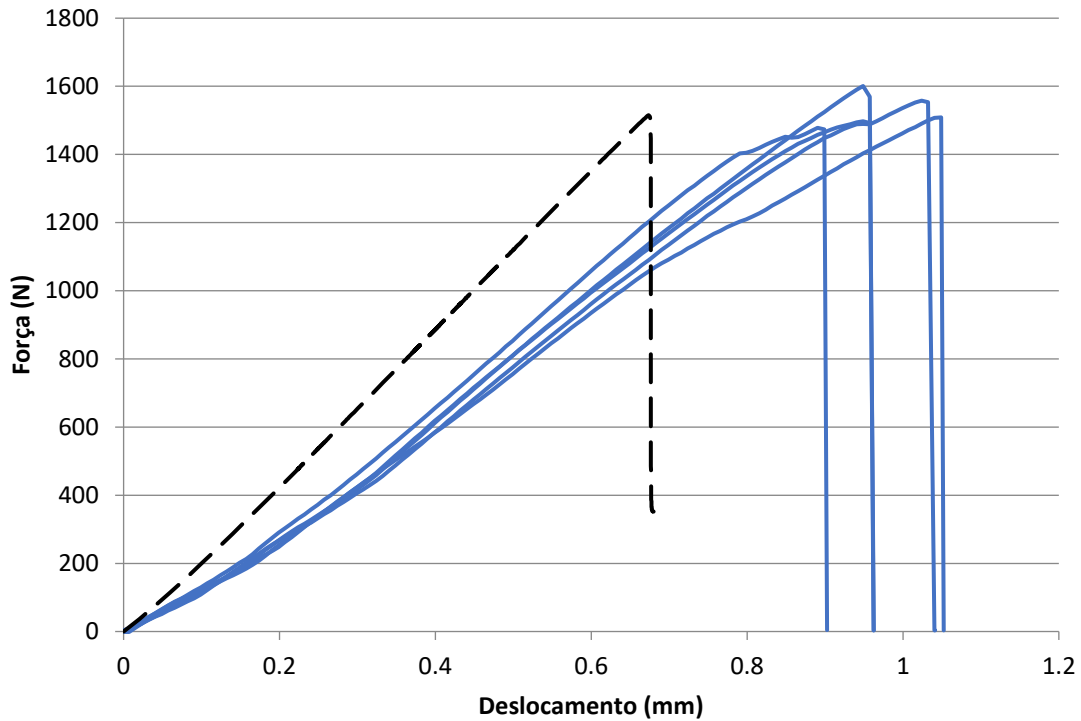


Figura 89 - Comparação entre curvas $P-\delta$ SMC1_CFRP_AV, numéricas

- **SMC2-CFRP**

SMC2_CFRP_AV138

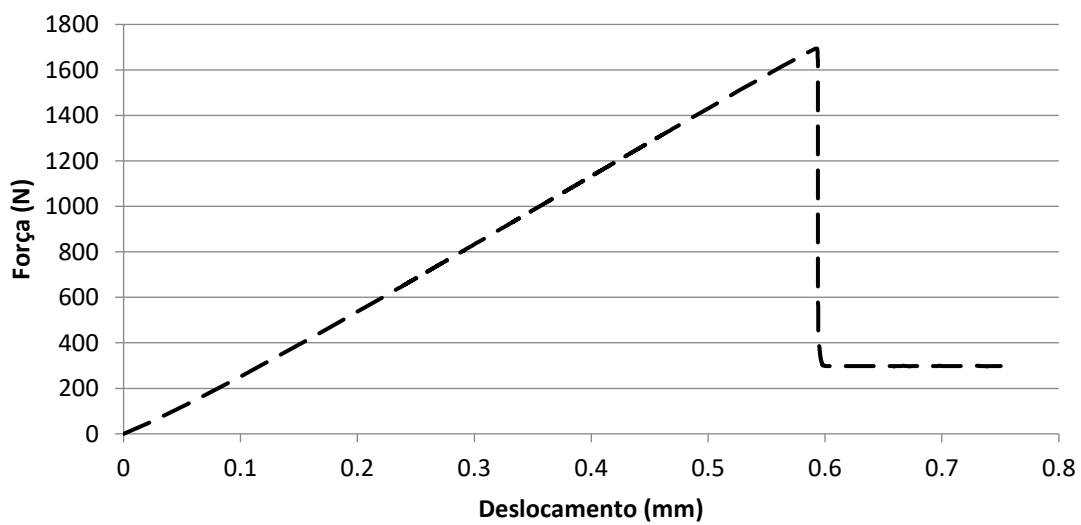


Figura 90 - Comparação entre curvas $P-\delta$ SMC2_CFRP_AV, numéricas

- **CFRP-CFRP**

CFRP_CFRP_AV138

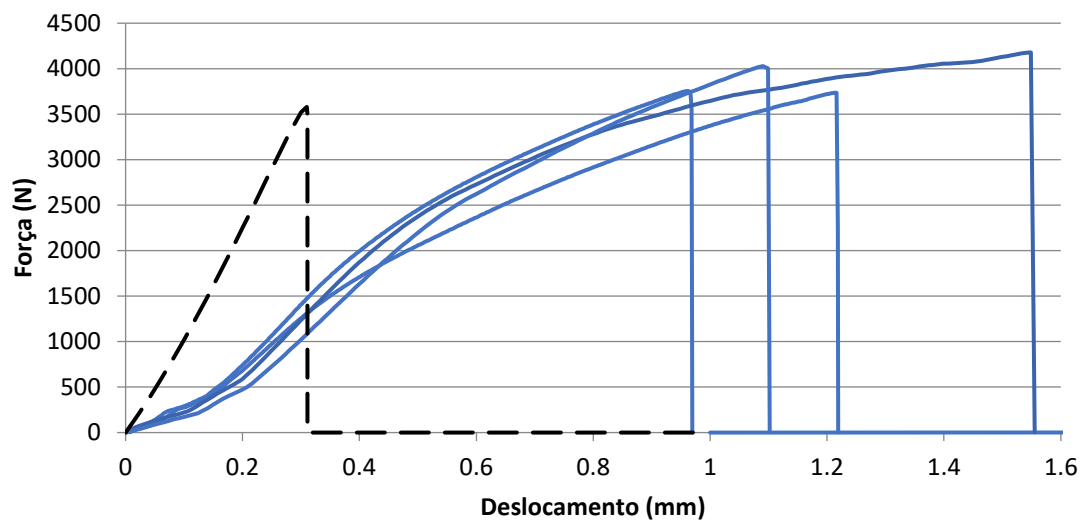


Figura 91 - Comparação entre curvas $P-\delta$ CFRP_CFRP_AV, numéricas

Curvas $P-\delta$ em adesivos Sikaforce® 7752

- **SMC1-SMC1**

SMC1_SMC1_7752

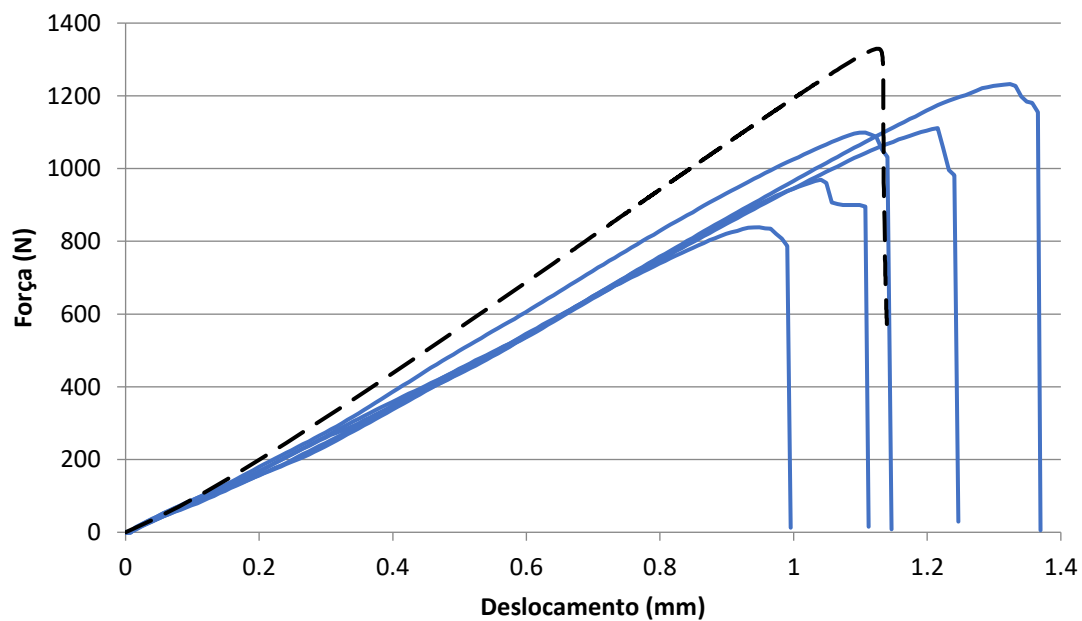


Figura 92 - Comparação entre curvas $P-\delta$ SMC1_SMC1_7752, numéricas

- **SMC2-SMC2**

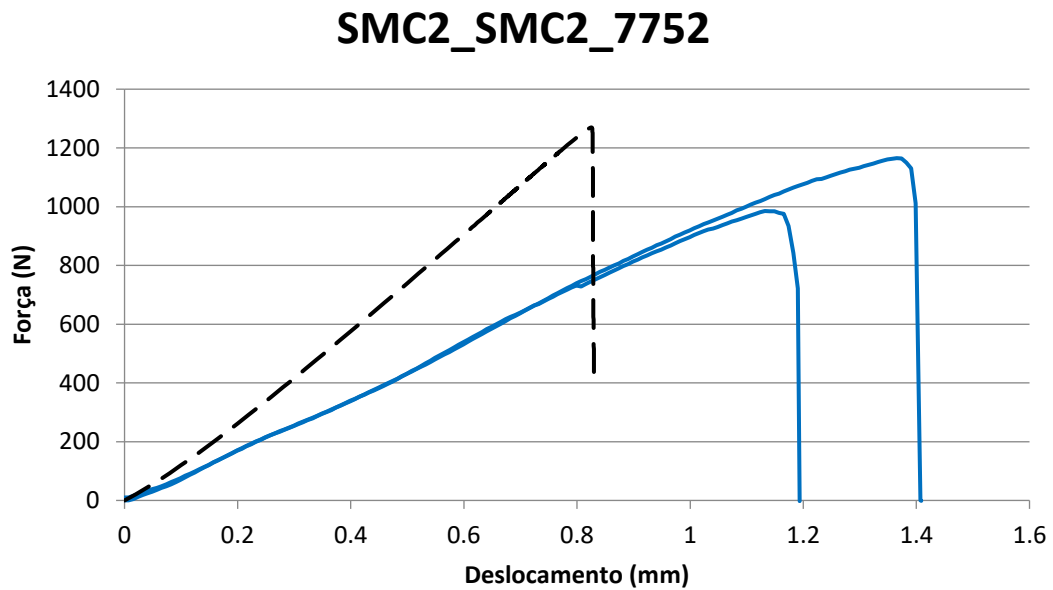


Figura 93 - Comparação entre curvas $P-\delta$ SMC2_SMC2_7752

- **SMC1-CFRP**

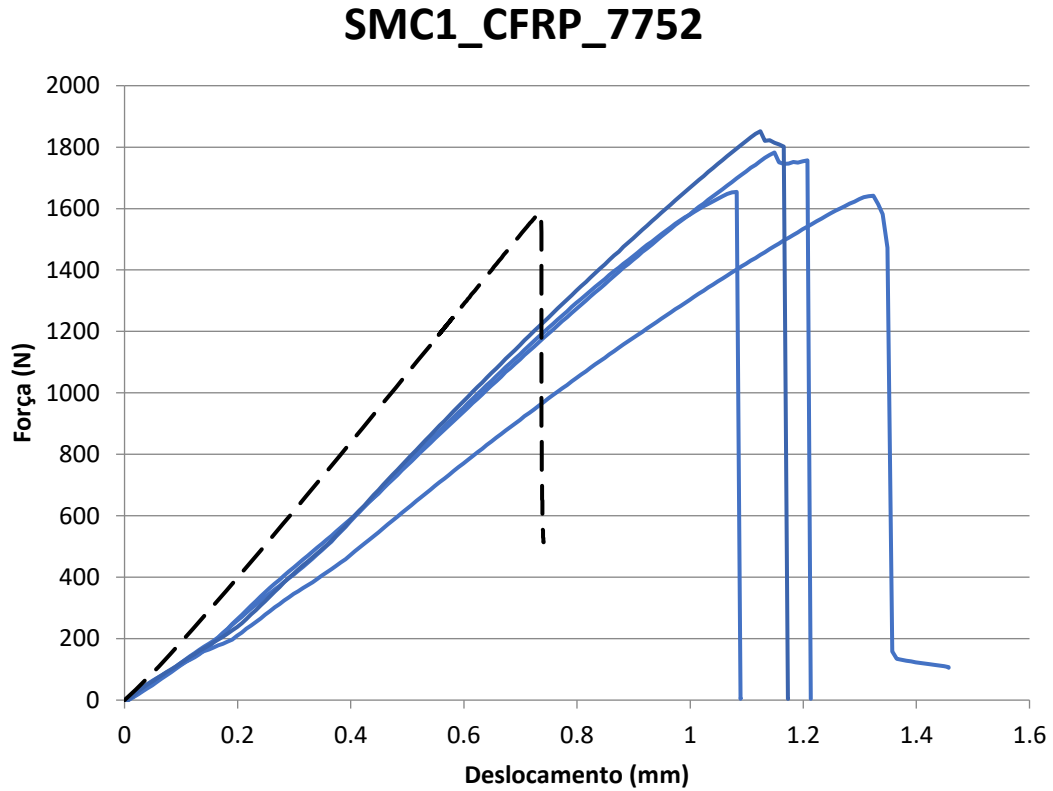


Figura 94 - Comparação entre curvas $P-\delta$ SMC1_CFRP_7752, numéricas

- **SMC2-CFRP**

SMC2_CFRP_7752

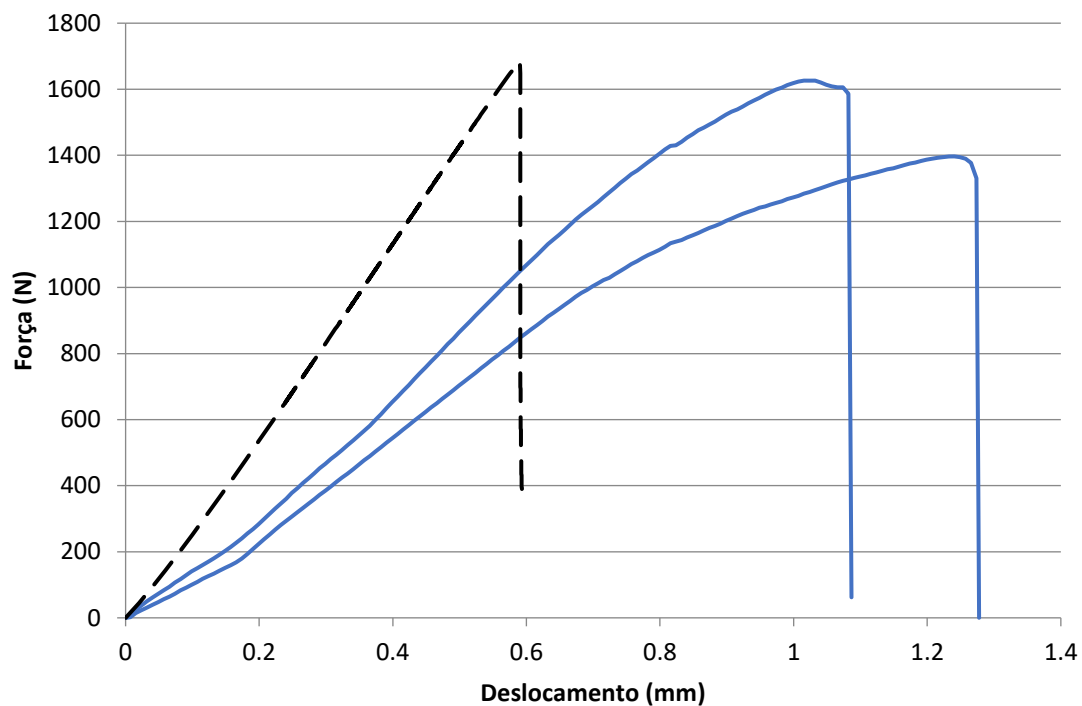


Figura 95 - Comparação entre curvas $P-\delta$ SMC2_CFRP_7752, numéricas

- **CFRP-CFRP**

CFRP_CFRP_7752

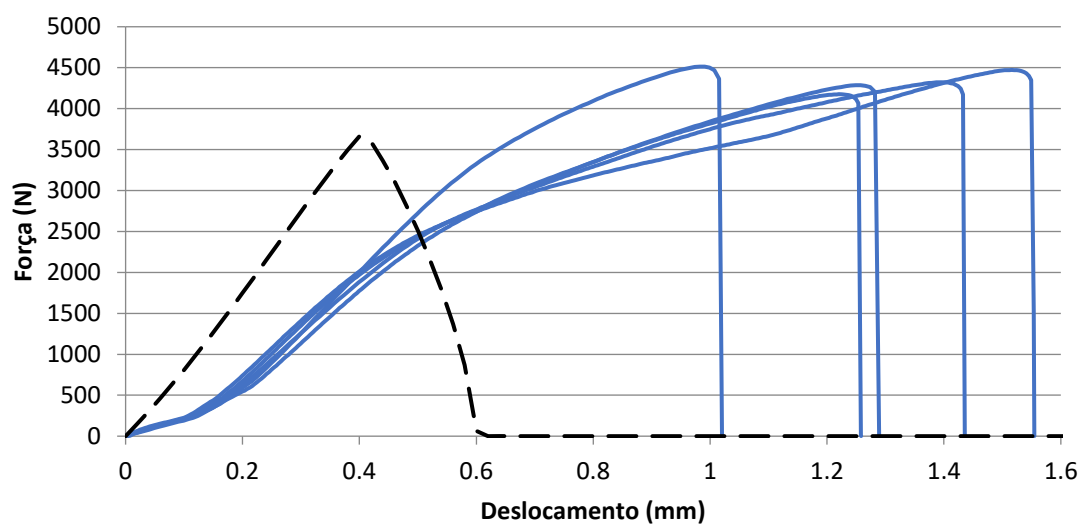
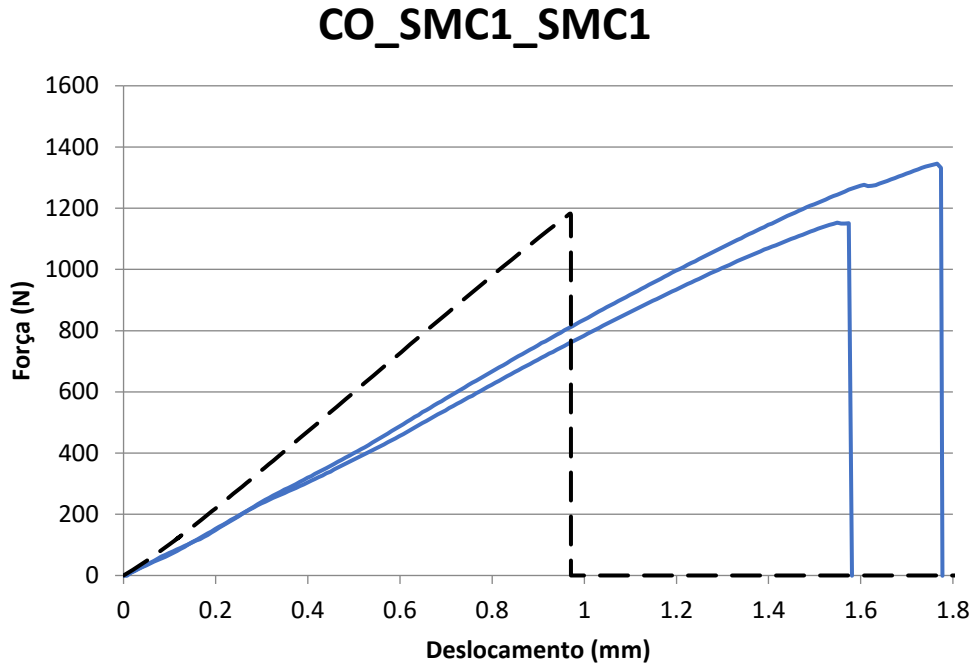
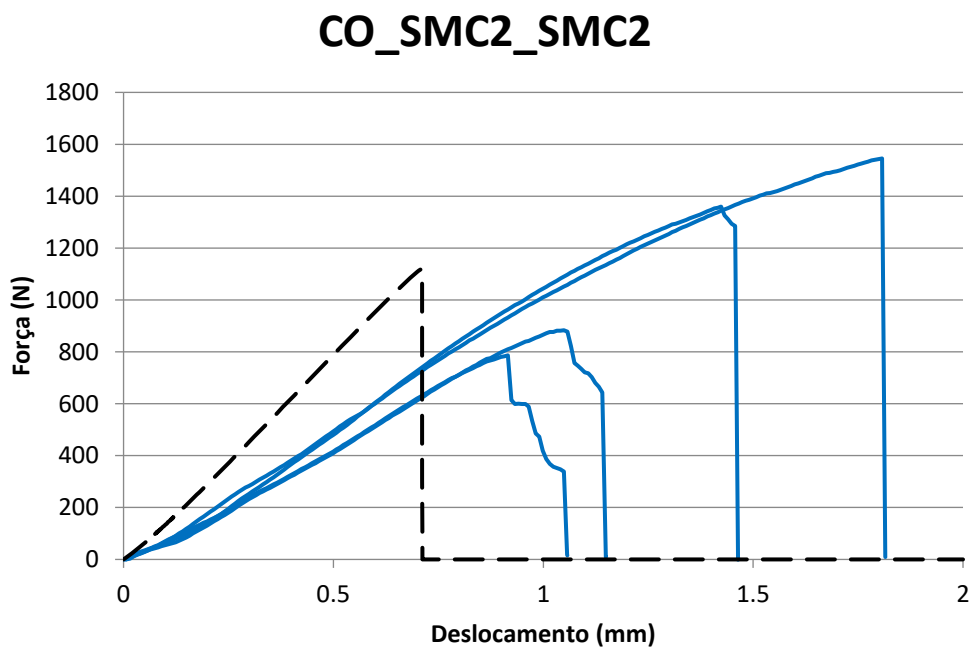


Figura 96 - Comparação entre curvas $P-\delta$ CFRP_CFRP_7752, numéricas

Curvas em ligações co-curadas

• **SMC1-SMC1**Figura 97 - Comparação entre curvas $P-\delta$ CO_SMC1_SMC1, numéricas• **SMC2-SMC2**Figura 98 - Comparação entre curvas $P-\delta$ CO_SMC2_SMC2, numéricas

- **SMC1-CFRP**

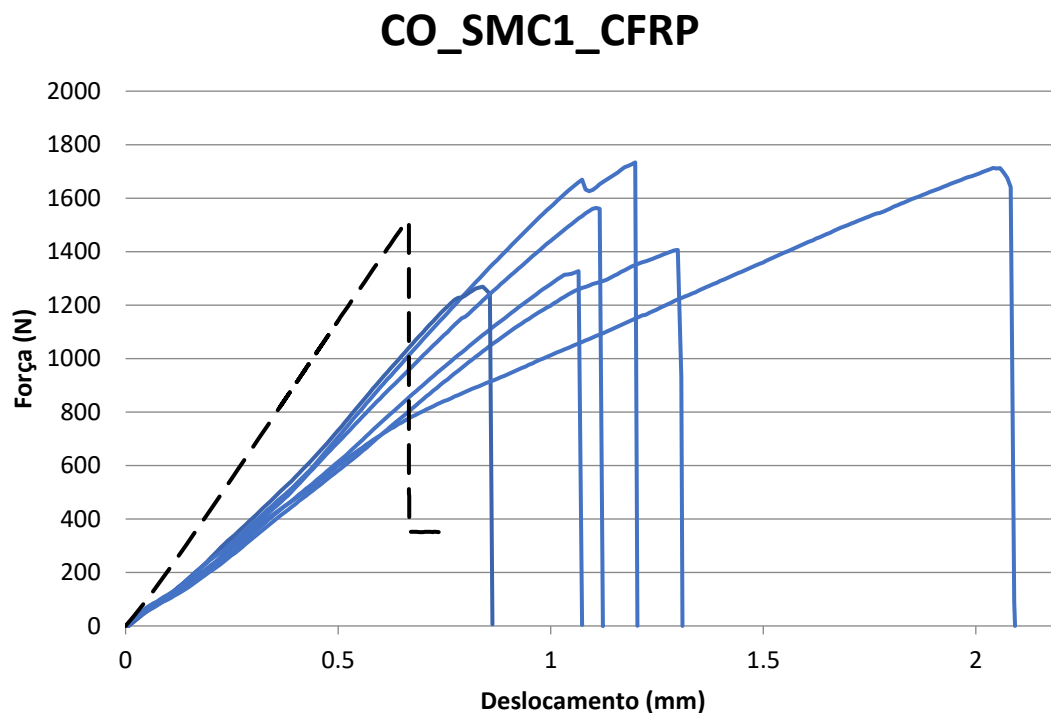


Figura 99 - Comparação entre curvas $P-\delta$ CO_SMC1_CFRP, numéricas

- **SMC2-CFRP**

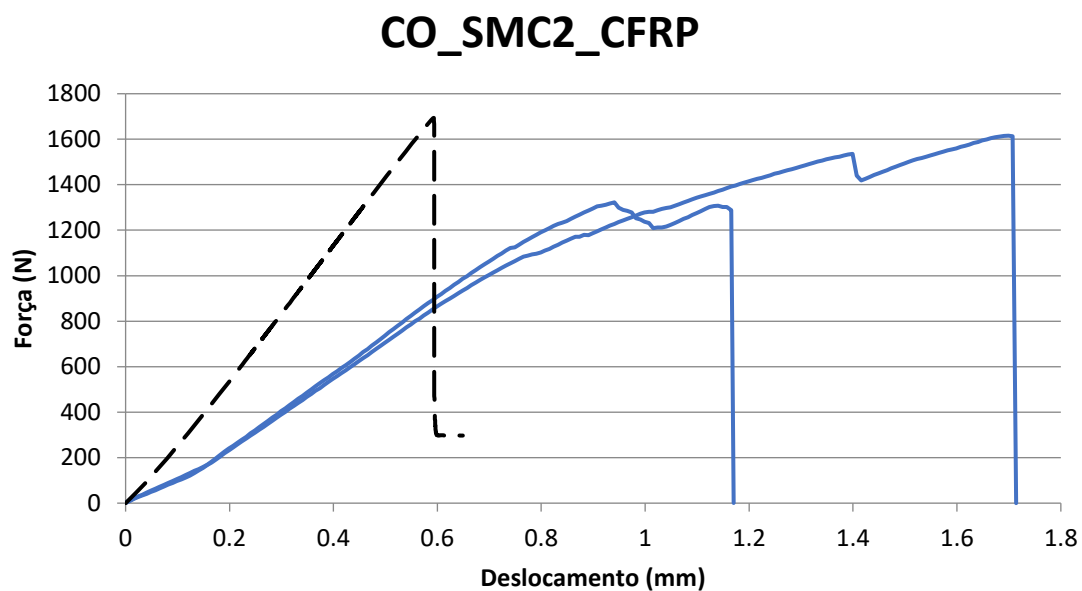


Figura 100 - Comparação entre curvas $P-\delta$ CO_SMC2_CFRP, numéricas

- **CFRP-CFRP**

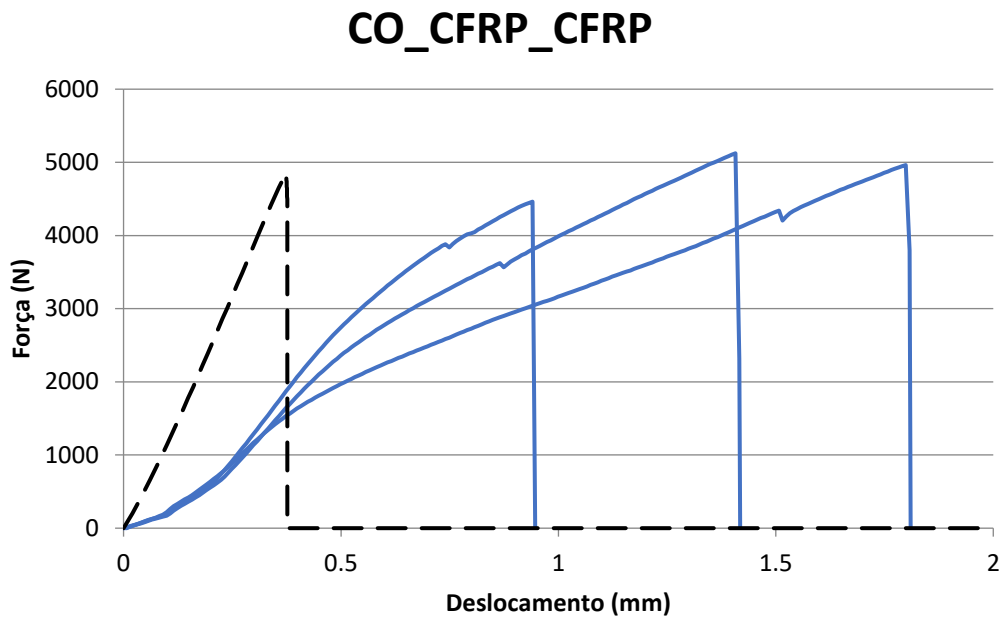


Figura 101 - Comparação entre curvas $P-\delta$ CO_CFRP_CFRP, numéricas

3.2.3.1.3 Modos de rotura

De forma a comparar os modos de rotura foi criada a Tabela 42. A tabela indica o tipo de rotura ocorrido durante o ensaio experimental e os modos de rotura originado pelos modelos numéricos. Conforme é verificável, os modos de rotura são praticamente o mesmo, o que indica que o modelo utilizado se aproxima do resultado experimental. A Figura 102 ilustra os modos de rotura ocorridos na *software* ABAQUS.

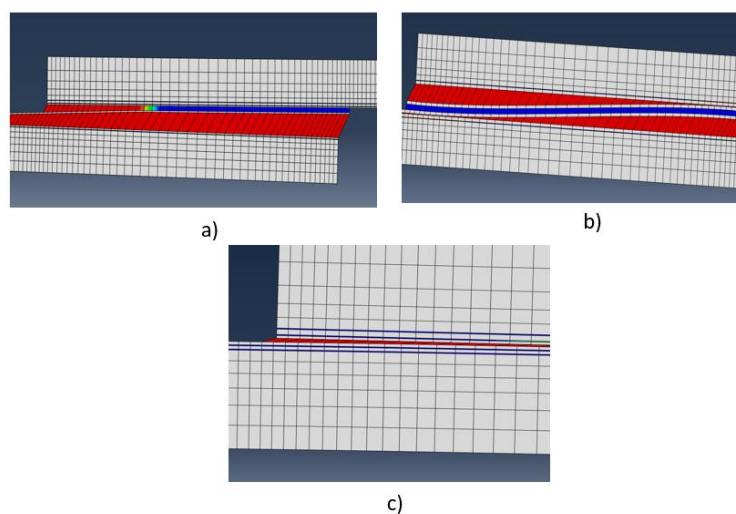


Figura 102 - Modos de rotura, software ABAQUS - a) interlaminar com substratos diferentes, b) interlaminar com substratos iguais e c) coesiva

Tabela 42 - Comparação dos modos de rotura

Tipo de ligação	Tipo de rotura no ensaio experimental	Tipo de rotura no ensaio numérico
SMC1/SMC1 AV138	Interlaminar	Interlaminar
SMC2/SMC2 AV138	Interlaminar	Interlaminar
SMC1/CFRP AV138	Interlaminar	Interlaminar
SMC2/CFRP AV138	Pelo substrato	Interlaminar
CFRP/CFRP AV138	Coesiva	Coesiva
SMC1/SMC1 7752	Interlaminar	Interlaminar
SMC2/SMC2 7752	Interlaminar	Interlaminar
SMC1/CFRP 7752	Interlaminar	Interlaminar
SMC2/CFRP 7752	Interlaminar e coesiva	Interlaminar
CFRP/CFRP 7752	Coesiva	Coesiva
Co-cura SMC1/CFRP	Interlaminar	Interlaminar
Co-cura SMC2/CFRP	Interlaminar e coesiva	Interlaminar
Co-cura CFRP/CFRP	Coesiva	Coesiva
Co-cura SMC1/SMC1	Coesiva	Coesiva
Co-cura SMC2/SMC2	Coesiva	Coesiva

3.2.3.1.4 Resistência das juntas

Neste subcapítulo serão apresentados os dados da resistência das juntas dos modelos numéricos. De forma a facilitar a análise dos resultados será feita criada a Tabela 43, que compara os dados numéricos com os dados experimentais, incluindo o desvio-padrão e o valor relativo dos desvios em relação ao modelo experimental.

Tabela 43 - Comparação entre resistência das juntas

Tipo de ligação	Experimental		Numérico	Percentagem do desvio relativo (%)
	Força média (N)	Desvio-padrão	Força (N)	
SMC1/SMC1 AV138	999,54	80,57	1519,53	52
SMC2/SMC2 AV138	1082,29	38,19	1165,18	8
SMC1/CFRP AV138	1528,63	49,98	1515,30	-1
SMC2/CFRP AV138	1316,71	291,79	1693,72	29
CFRP/CFRP AV138	3878,26	213,33	3579,61	-8
SMC1/SMC1 7752	1050,12	150,55	1329,32	27
SMC2/SMC2 7752	1002,74	134,59	1249,65	27
SMC1/CFRP 7752	1732,52	101,79	1585,45	-8
SMC2/CFRP 7752	1511,36	162,15	1682,85	11
CFRP/CFRP 7752	4353,65	138,56	3660,34	-16
Co-cura SMC1/CFRP	1501,90	198,03	1682,85	1
Co-cura SMC2/CFRP	1468,96	207,21	1693,72	15
Co-cura CFRP/CFRP	4848,55	344,98	4852,95	0
Co-cura SMC1/SMC1	1249,23	136,28	1182,71	-5
Co-cura SMC2/SMC2	1143,78	366,70	1117,84	-2

3.2.4 Análise de resultados

Neste subcapítulo, serão analisados os dados do modelo numérico e será feita uma comparação com os dados experimentais, de forma a validar a qualidade do modelo. Desta forma, iniciando pelo modo de rotura, verifica-se pela Tabela 42 que os modelos criados se aproximam bastante dos resultados experimentais.

No que diz respeito aos modos de rotura, é possível concluir que os modelos criados se aproximam bastante dos resultados experimentais, o que se verifica pela informação da Tabela 42. Importa salientar o caso das ligações SMC2/CFRP 7752 e co-curada SMC2/CFRP em que se observa a rotura pela interface no modelo numérico, enquanto que, nos ensaios experimentais, a rotura se deu pela interface e pelos elementos de coesão do adesivo. Esta incongruência de resultados, pode ser justificada pela má aplicação do adesivo (caso SMC2/CFRP 7752) ou devido às condições de processamento das ligações co-curadas. Conforme se constata pela Tabela 30, as ligações co-curadas são realizadas com chapas para garantir uma distribuição uniforme da pressão ao longo das placas e para minimizar o desnivelamento dos substratos. Porventura, poderá ter existido uma zona em que não se conseguiu obter a distribuição uniforme ou existiu uma espessura de chapas não adequadas para o nivelamento.

Ao conjugar as informações da Tabela 42 com a Tabela 43, é possível constatar que os modelos apresentam resultados bastante satisfatórios, na medida em que os valores de resistências, obtidos pelos modelos numéricos, se aproximam dos valores médios das resistências obtidas experimentalmente. Pela informação da percentagem do desvio relativo, observa-se que SMC1/SMC1 AV138 é o caso em que o desvio é maior. Este facto, pode ser justificado falta de homogeneidade da resistência do SMC.

De facto, durante o processamento dos substratos existe uma fase de escoamento da carga, e, se a carga for demasiado pequena em relação à área do molde, acontece que nas zonas mais afastadas do centro do escoamento, surgem algumas situações que comprometem a resistência do SMC nesses locais. Dessas situações destacam-se a inexistência de fibra, fibra insuficiente, que se traduzem numa diminuição da resistência. Por outro lado, poderá verificar-se nas zonas mais distantes do centro do escoamento, um alinhamento das fibras, o que pode ser prejudicial caso os provetes tenham sido cortados transversalmente às fibras. Durante a preparação dos substratos de SMC, os provetes foram cortados de forma a maximizar o material disponível. Os provetes foram escolhidos de forma aleatória e, eventualmente, pode ter sido escolhido um provete correspondente à área com resistência inferior.

Em análise aos restantes resultados, registam-se dois casos com desvio relativos de 27%, ambos em ligações SMC-SMC, o que enfatiza o pressuposto realçado anteriormente. Nas ligações com CFRP observa-se a melhor caracterização do modelo numérico, onde a ligação co-curada CFRP/CFRP apresenta o desvio relativo quase nulo, inclusive, os restantes resultados apresentam desvios relativos inferiores a 16%. Importante será referir que os dados que apresentam valor negativo indicam que os valores experimentais foram maiores que os valores dos modelos numéricos. Em modo geral, conclui-se que os modelos numéricos traduzem as situações experimentais, quer nos resultados obtidos quer nos modos de rotura. Da Figura 87 até à Figura 101 é ilustrado, de forma gráfica os resultados experimentais e os resultados numéricos.

De forma a caracterizar as tensões geradas na junta foram criadas a Figura 84, Figura 85 e Figura 86, que traduzem as tensões de arrancamento, e a Figura 81, Figura 82 e Figura 83, que representam as tensões de corte. Numa análise preliminar verifica-se que as ligações co-curadas induzem tensões de arrancamento superiores às ligações adesivas. Verifica-se também que nas ligações híbridas as extremidades apresentam valores de tensão diferentes. De facto, este resultado já era expectável, uma vez que, se trata de materiais com características diferentes. Nas tensões de corte, é mais perceptível este fenómeno e verifica-se também que as ligações co-curadas são as que induzem uma maior resistência ao corte.

De forma a analisar mais detalhadamente estes dados foram criadas a Tabela 44, Tabela 45 e Tabela 46. Estas tabelas indicam as tensões geradas nas extremidades da junta, sendo 0 uma extremidade da junta e 1 a outra extremidade, e faz também referência à resistência obtida nos resultados numéricos. Deste modo, em análise à ligação adesiva AV138, constata-se que as ligações com SMC são as que induzem uma maior tensão e o mesmo se verifica para as ligações com adesivo 7752, apesar de o valor ser inferior. De facto, o valor de rigidez que este adesivo apresenta é bastante elevado, o que origina picos mais elevados de tensões, o que pode levar a uma rotura prematura da junta [145]. Comparando os dois métodos de ligação adesiva, em termos de resistência, os valores são praticamente constantes, e as tensões geradas são bastante superiores para o caso do adesivo AV138. Deste modo, o uso de um adesivo mais dúctil, como é o caso do adesivo 7752, traria mais vantagens, uma vez que os valores de resistência são praticamente os mesmos e induzem menores tensões. De forma percentual, os valores de resistência para ambos os adesivos variam, no máximo, 14% (ligação SMC1-SMC1) e um mínimo de 0,65% (ligação CFRP-CFRP). Em termos de tensão de arrancamento atingem-se diferenças de 150% (ligação CFRP-CFRP) e, para as tensões de corte, registam-se um máximo de 110%. Estes dados reforçam que o uso do adesivo AV138 provoca valores de tensão maiores e a resistência da junta não difere muito (difere no máximo 190 N).

As ligações co-curadas apenas se justificam para a ligação CFRP-CFRP, que apresenta um valor de resistência 25 % superior que as restantes ligações. No entanto, tanto em tensões de arrancamento como em tensões de corte, apresentam valores 10 vezes superiores.

Outro ponto a salientar são as ligações híbridas, que apresentam valores de tensão diferentes em cada extremidade da junta. Isto deve-se ao facto de os substratos serem de material diferente. Por outro lado, realça-se que as ligações adesivas apresentam, na posição $L_0=1$, valores superiores de tensão de arrancamento, e tensões de corte superiores na posição $L_0=0$. Nas ligações co-curadas verifica-se exatamente o mesmo cenário, com a particularidade de estas tensões serem as mais elevadas.

Tabela 44 - Tensões geradas na junta vs. Resistência, em ligação adesiva AV138

Ligação	σ_a/τ_{avg}		τ_{xy}/τ_{avg}		Força (N)
	0	1	0	1	Numérico
SMC1-SMC1	13,40	13,40	9,12	9,12	1519,53
SMC2-SMC2	12,23	12,23	8,15	8,15	1165,18
CFRP-CFRP	5,43	5,40	3,45	3,44	3579,61
SMC1-CFRP	3,88	6,47	8,26	2,86	1515,30
SMC2-CFRP	5,07	6,47	7,80	3,02	1693,72

Tabela 45 - Tensões geradas na junta vs. Resistência, em ligação adesiva 7752

Ligação	σ_a/τ_{avg}		τ_{xy}/τ_{avg}		Força (N)
	0	1	0	1	Numérico
SMC1-SMC1	6,49	6,49	4,44	4,44	1329,32
SMC2-SMC2	5,85	5,85	3,98	3,98	1249,65
CFRP-CFRP	2,18	2,18	1,64	1,64	3660,34
SMC1-CFRP	2,61	2,68	4,08	1,46	1585,45
SMC2-CFRP	5,21	6,55	7,79	3,02	1682,85

Tabela 46 - Tensões geradas na junta vs. Resistência, em ligação co-curada

Ligação	σ_a/τ_{avg}		τ_{xy}/τ_{avg}		Força (N)
	0	1	0	1	Numérico
SMC1-SMC1	51,30	51,30	47,47	47,47	1182,71
SMC2-SMC2	50,59	50,59	47,42	47,42	1117,84
CFRP-CFRP	22,41	22,39	19,18	19,38	4852,95
SMC1-CFRP	19,32	20,55	50,21	13,57	1682,85
SMC2-CFRP	23,32	29,99	46,96	20,37	1693,72

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

A concretização da presente dissertação permitiu tirar conclusões sobre a adesão entre os dois diferentes tipos de compósitos. Neste caso, o objetivo principal foi determinar qual dos métodos de ligação melhor se adequa para cada tipo de material. De facto, experimentalmente, ambos os métodos de ligação apresentam valores de resistência similares. No entanto, em alguns casos, a rotura deu-se pelas camadas interlaminares, não permitindo assim tirar as melhores conclusões sobre a adesão. De realçar a ligação CFRP-CFRP que foi o caso em que permitiu tirar as melhores relações sobre a adesão, ou seja, durante os ensaios experimentais a rotura deu-se pelos elementos de coesão da ligação. De notar que a ligação co-curada traduz o melhor valor de resistência, no entanto, devido à dificuldade de processamento este método deverá ser difícil de aplicar em situações reais.

O segundo objetivo desta dissertação foi simular, através de modelos numéricos, os resultados obtidos experimentalmente, e desta forma aferir qual o melhor método de ligação. Esta simulação envolveu replicar os modos de rotura dos ensaios experimentais e, através do método inverso, melhorar as curvas P- δ , como a finalidade de conseguir a resistência o mais aproximada possível da obtida experimentalmente. Isto implica que o modo de rotura seja o mesmo. Para afirmar qual o melhor método de ligação foi necessário determinar as tensões geradas na juntas. Com estes dados, e com os dados de resistência e modo de rotura, concluiu-se que o melhor método de ligação é a ligação adesiva, com o recurso ao adesivo Sikaforce® 7752. De facto, verificou-se que para este método são induzidas as menores concertação de tensão na junta, aliadas a valores de resistência satisfatórios, somente ultrapassada, neste último ponto, pela ligação co-curada CFRP-CFRP. O modo de processamento e aplicação do adesivo, torna este método viável.

Como futuros trabalhos, seria interessante estudar diferentes tipos de tratamento superficial do substrato, estudar a adesão entre os SMC-SMC, se possível com diferentes quantidades de fibra e diferentes tipos de resina e determinar experimentalmente as propriedades coesivas dos substratos de SMC.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Marcelo F.S.F de moura, A.B.d.M., António G. de Magalhães, *Materiais compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2 ed, ed. E.t. Publindústria. Vol. 1. 2011, Porto. 369.
2. smcbmc-europe, *A design & techonology manual for SMC BMC*. 2010: European alliance for SMC/BMC.
3. Jones, R.M., *MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS*, ed. 2. 1999, Great Britain Taylor & Francis Group. 507.
4. Groover, M.P., *Fundamentals of modern manufacturing*. 4 ed, ed. i. John wiley & sons. 2010.
5. Joseph Edward Shigley, C.R.M., Richard Gordon Budynas, *mechanical engineering design*. 7 ed, ed. Bookman. 2005.
6. Nijssen, R.P.L., *Composite Materials*. 1 ed. 2015, Inholland University of Applied Sciences.
7. Biscainho, C.A. *Materiais compósitos: Um dos maiores avanços*. 2017 [cited 2018 20-08]; Available from: <https://betaeq.com.br/index.php/2017/05/19/materiais-compositos/>.
8. Matmach. *Which is stronger - continuous fiber or discontinuous fiber reinforcement composite?* [cited 2018 20-08]; Available from: <https://www.quora.com/Which-is-stronger-continuous-fiber-or-discontinuous-fiber-reinforcement-composite>.
9. Committee, N.R.C.U.S., *The place for thermoplastic composites in structural components*. 1988.
10. smart-material. *Random Fiber Composites*. 2005; Available from: <https://www.smart-material.com/13Crand-product-main.html>.
11. Grote, A., *Handobook of mechanical engineering*, ed. Springer. 2008.
12. Valery V, V.E.V.M., *Mechanics and Analysis of Composite Materials*. 1 ed, ed. E.S. Ltd. 2001, The Boulevard, Langford Lane.
13. Compositeslab. *Resins*. 2018 [cited 2018 31-07]; Available from: <http://compositeslab.com/composite-materials/resins/>.
14. Felipe, R.C.T.S., *Materiais compostos. Unidade curricular de Introdução à manufatura mecânica. Curso Superior em Tecnologia da Fabricação Mecânica. Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte*. 2008: Brasil.
15. compositeslab. *Reinforcements*. 2018 [cited 2018 31-07]; Available from: <http://compositeslab.com/composite-materials/reinforcements/>.
16. *SURFBOARD FIN ROVING*. [cited 2018 22-08]; Available from: <https://www.fibreglassshop.co.nz/products/surfboard-fin-rovings?variant=853213925>.

17. Bagherpour, S. *S Fibre Reinforced Polyester Composites*. 2012; Available from: <https://www.intechopen.com/books/polyester/fibre-reinforced-polyester-composites>.
18. Zweben, C., *COMPOSITE MATERIALS*. Zweben Consulting.
19. Toray, *M40J carbon fiber* T.c. materials, Editor. 2018.
20. Toray, *T800s Intermediate modulu*, T.c. materials, Editor. 2018.
21. compositeslab. *Composites Compared*. 2016 [cited 2018 20-08]; Available from: <http://compositeslab.com/composites-compared/>.
22. BROSIUS, D. *Boeing 787 Update*. 2007 [cited 2018 27/05]; Available from: <https://www.compositesworld.com/articles/boeing-787-update>.
23. airlines, M. *Boeing 787 Dreamliner Specs*. [cited 2018 27/05]; Available from: <http://www.modernairliners.com/boeing-787-dreamliner/boeing-787-dreamliner-specs/>.
24. Faria, S. *Materiais compósitos na engenharia automotiva*. 2013 [cited 2018 27/05]; Available from: <https://pt.slideshare.net/SrgioCostaFaria/materiais-compósitos-na-engenharia-automotiva>.
25. compositeslab. *Hand Lay-Up*. 2016 [cited 2018 30-07]; Available from: <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/open-molding/hand-lay-up/>.
26. compositoskevlar. *Métodos de processamento de compósitos na industria aeronáutica e aeroespacial - Processamento do Kevlar*. 2006 [cited 2018 30-07]; Available from: <http://compositoskevlar.blogspot.com/2006/12/mtodos-de-processamento-de-compósitos-na.html>.
27. Fibermaq. *PROCESSO DE FILAMENT WINDING*. 2018 [cited 2018 07-30]; Available from: <https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/maquinas-e-equipamentos/fibermaq/produtos/instalacoes-e-equipamentos-industriais/processo-de-filament-winding>.
28. Compositeslab. *Vacuum Infusion Processing*. 2016 [cited 2018 20-08]; Available from: <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/closed-molding/vacuum-infusion-processing/>.
29. <http://www.tudosobreplasticos.com/processo/injecao.asp>. 2011; Available from: <http://www.tudosobreplasticos.com/processo/injecao.asp>.
30. Schmidt, T. *moldagem por transferência de resina*. 2009; Available from: http://www.ufrgs.br/lapol/projetos/procad_arquivos/projeto0303054.htm.
31. compositeslab. *Compression Molding*. [cited 2018 20.08]; Available from: <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/closed-molding/compression-molding/>.
32. Compositeslab. *Pultrusion*. 2016 [cited 2018 20-08]; Available from: <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/closed-molding/pultrusion/>.
33. ipr. *PERFIS PULTRUDADOS*. Available from: <http://ipr.ind.br/site/perfis-pultrudados/>.
34. compositeslab, *Centrifugal Casting*. 2016.

35. compositeslab. *Centrifugal Casting*. 2016 [cited 2018 20.08]; Available from: <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/closed-molding/centrifugal-casting/>.
36. idicomposites. *Custom Formulated Sheet & Bulk Molding Compounds*. [cited 2018 03-08]; Available from: <http://www.idicomposites.com/smc-bmc-overview.php>.
37. plásticos, I. *SMC MALA - CLASSE A*. 2015; Available from: <http://www.inapalplasticos.com/?pagina=produtos&nome=smc-mala-classe-a>.
38. plásticos, I. *SMC ESTRIBO*. 2015; Available from: <http://www.inapalplasticos.com/?pagina=produtos&nome=smc-estribo>.
39. wacker. *SHEET MOLDING COMPOUND (SMC)*. 2018 [cited 2018 03-08]; Available from: https://www.wacker.com/cms/en/industries/pl_composites/pl_comp_appl/sheetmoulding.jsp.
40. fibre-reinforced-plastic. *Sheet Moulding Compounds (SMC)*. 2010 [cited 2018 03-08]; Available from: <http://www.fibre-reinforced-plastic.com/2010/09/sheet-moulding-compounds-smc.html>.
41. Enid, S. *2018 Global Sheet Molding Compound (SMC) Market Research Report Forecasts 2025*. 2017 [cited 2018 03-08]; Available from: <http://marketresearche.blogspot.com/2017/12/2018-global-sheet-molding-compound-smc.html>.
42. plásticos, I. *DESIGN & DESENVOLVIMENTO // INAPAL PLÁSTICOS*. 2015; Available from: <http://www.inapalplasticos.com/?pagina=design-desenvolvimento>.
43. William D. Callister, J., *Materials Science and Engineering introduction*. 7 ed. 2007.
44. UK, c., *Adhesive bonding of composites*.
45. Oosten, M.v., *Composite – Metal connections*. 2015.
46. Proença, M.E.C.M., *Comportamento de ligações aparafusadas entre perfis de compósito GFRP*, in *Engenharia Civil*. 2015, Técnico Lisboa.
47. Tan, X., *Co-Cured Composite Joint Strength Investigation Based on Behavior Characterization of the [0/ ± /90]s Family*, in *In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy*. 2008, School of Aerospace Engineering Georgia Institute of Technology.
48. R. Agogué, S.M., D. Gomes, P. Beauchêne, B. Lamboul, *Assessment of a manufacturing process of co-cured hybrid composite/aluminium structures*. 2014.
49. Tierney, J.J., J.W. Gillespie, and P.E. Bourban, 2.31 - *Joining of Composites*, in *Comprehensive Composite Materials*, A. Kelly and C. Zweben, Editors. 2000, Pergamon: Oxford. p. 1029-1047.
50. Lucas F.M. da Silva, D.A.D., Bamber Blackman and Robert D. Adams, *Testing Adhesive Joints*. 2012.
51. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
52. K. Ikegami, T.F., H. Kawagoe, H. Kyogoku, K. Motoie, K. Nohno, T. Sugibayashi e F. Yoshida, *“Bechmark tests on adhesive strenghts in butt, single and double lap*

- joints and double-cantilever beams*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1996. **16**.
53. Chai, H. *The effects of bond thickness, rate and temperature on the deformation and fracture of structural adhesives under shear loading*. 2004; Available from: https://www.researchgate.net/figure/Sectional-view-of-the-Napkin-Ring-test-specimen_fig1_227157556.
54. K.-S. Kim, J.-S.Y., Y.-M. Yi e C.-G. Kim, *Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods*. 2006.
55. Morais, J.F.A., “Desenvolvimento de ferramentas e provetes para o ensaio Thick Adherend Shear Test (TAST), in *Dissertação de Mestrado*. 2013, Instituto superior de Engenharia do Porto
56. [cited 2018 24-08]; Available from: http://esm.rkriz.net/classes/ESM5344/ESM5344_NoteBook/crcd/lectures/fracture/anal/yue/img00007.jpg.
57. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung 15, 1938: p. 41-47.
58. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. **9**(3): p. 185-196.
59. Harris, J.A. and R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
60. Curiel Sosa, J.L. and N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
61. Rotem, Z.H.a.A., *A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials*. Journal of Composite Materials, 1973. **7**: p. 7448-7464.
62. Hashin, Z., *Failure criteria for unidirectional fiber composites*”,. Journal of Applied Mechanics,, 1980. **47**: p. 329-334.
63. López, D.A., *Implementación y verificación de un modelo de degradación de propiedades para la predicción del fallo en materiales compuestos*. 2012, ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA UNIVERSIDAD DE SEVILLA.
64. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
65. Panigrahi, S.K. and B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
66. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Vol. Edições Técnicas. 2007, Porto: Publindústria.
67. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
68. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.

69. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(5): p. 337-342.
70. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.
71. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
72. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. **23**(3): p. 622-636.
73. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
74. Duan, K., X. Hu, and Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
75. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011: Springer.
76. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
77. Turon, A., et al., *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
78. Kafkalidis, M.S. and M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
79. Yang, Q.D. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
80. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, and R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
81. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
82. Alfano, G. and M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
83. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
84. Chen, J., *Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
85. Pinto, A.M.G., et al., *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.

86. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
87. de Moura, M., et al., *Prediction of compressive strength of carbon–epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures, 2000. **50**(2): p. 151-157.
88. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.
89. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
90. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10–11): p. 2224-2230.
91. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
92. Carlberger, T. and U. Stigh, *Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(8): p. 816-835.
93. Jung Lee, M., et al., *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
94. Zhu, Y., K.M. Liechti, and K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(1): p. 31-51.
95. Pandya, K.C. and J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
96. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. Experimental Mechanics, 1992. **32**(4): p. 296-303.
97. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.
98. Campilho, R.D.S.G., et al., *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **53**: p. 15-22.
99. Stigh, U., et al., *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. International Journal of Fracture, 2010. **165**(2): p. 149-162.
100. ASTM D3433-99, *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
101. Gustafson, P.A. and A.M. Waas, *The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(10): p. 2201-2215.
102. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13–14): p. 2065-2077.

103. Blackman, B.R.K., A.J. Brunner, and J.G. Williams, *Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2443-2455.
104. Daudeville, L. and P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
105. Khoramishad, H., et al., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
106. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
107. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
108. Wahab, M.M.A., et al., *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
109. Imanaka, M., et al., *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.
110. Shenoy, V., et al., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
111. Hua, Y., et al., *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
112. Chen, Z., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
113. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008: Wiley.
114. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
115. Moës, N., J. Dolbow, and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
116. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
117. Campilho, R.D.S.G., et al., *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
118. composites, P., *SMC LS 3022 R30*, Polynt, Editor.: Italia.
119. composites, P., *SMC LP 6720 LW 9500*, Polynt, Editor. 2017: Italy.
120. italy, C.m., *Rem epoxy matrix*, CIT, Editor. 2015: Itália.
121. XARÁ, J.T.S., *Previsão da resistência de juntas adesivas em I entre alumínio e material compósito pelo método de elementos finitos extendido*, in

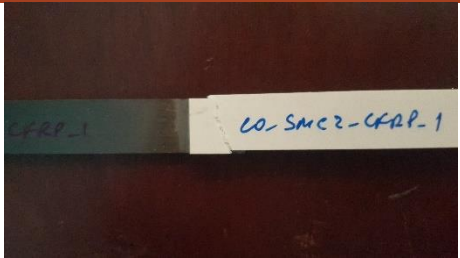
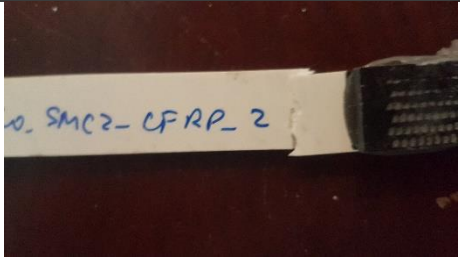


- Departamento de Engenharia Mecânica*. 2016, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
122. SikaForce, *ARALDITE® AV 138 BR / Endurecedor HV 998*, Huntsman, Editor. 2008.
123. SikaForce, *SikaForce®-7752 L06* Sika, Editor. 2015: Itália.
124. Materials, A.S.f.T.a., *Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading*. 2001, ASTM.
125. Materials, A.S.f.T.a., *Standard Test Method for Determining Strength of Adhesively Bonded Rigid Plastic Lap-Shear Joints in Shear by Tension Loading*. 2014.
126. Cripps, D. *Adhesive Properties*. 2016 [cited 2018 05-09]; Available from: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/resin-systems/adhesive-properties/>.
127. Gurit, *Guide to composites*. Gurit. p. 20-25.
128. Pinto AMG, M.A., Campilho RDSG, de Moura MFSF, Baptista APM. , *Single lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. J. Adhes, 2009. **85**: p. 351–376.
129. Alfano G, C.M., *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. Int. J. Numer. Methods Eng. , 2001. **50**: p. 1701–1736.
130. Allix O, C.A., *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. Int. J. Fract. , 1996. **77**: p. 111–140.
131. Chandra N, L.H., Shet C, Ghonem H., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. Int. J. Solids Struct. , 2002. **39**: p. 2827–2855.
132. J., C., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and by decohesion models*. J. Thermopl. Compos. Mater., 2002. **15**: p. 429–441.
133. Kafkalidis MS, T.M., *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. Int. J. Solids Struct. , 2002. **39**: p. 4367–4383.
134. Liljedahl CDM, C.A., Wahab MA, Ashcroft IA., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. . Int. J. Fract., 2006. **141**: p. 147–161.
135. Campilho RDSG, d.M.M., Domingues JJMS., *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. Int. J. Solids Struct. , 2008. **45**: p. 1497–1512.
136. Campilho RDSG, d.M.M., Domingues JJMS., *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. . Compos. Sci. Technol. , 2005. **65**: p. 1948–1958.
137. Campilho RDSG, d.M.M., Domingues JJMS., *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. . Int. J. Adhes. Adhes., 2009. **29**: p. 195–205.
138. RDSG., C., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*. 2005, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
139. AV., P., *Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction, 2nd Edition*. Hanser. , 2002. **83**: p. 311 – 319.
140. Andersson T, S.U., *The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. . Int. J. Solids Struct. , 2004. **41**: p. 413–434.

141. Leffler K, A.K., Stigh U., *Shear behaviour of adhesive layers*. Int. J. Solids Struct., 2007. **44**: p. 530–545.
142. Hogberg JL, S.U., *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. . Eng. Fract. Mech. , 2006. **73**: p. 2541–2556.
143. Campilho RDSG, P.A., Banea MD, Silva RF, da Silva LFM., *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. J. . Adhes. Sci. Technol., 2011. **25**.
144. Campilho RDSG, B.M., Pinto AMG, da Silva LFM, de Jesus AMP. , *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. . Int. J. Adhes. Adhes., 2011. **31**.
145. Santos, T.F., *Aplicação do método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX) para a previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição dupla*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2016, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.

ANEXOS

6 ANEXOS

6.1 ANEXO1

Junta	Provete	Tipo de rotura	Força máx. (N)	Imagem
Co-cura SM2/CRFP	1	Substrato	1565.981	
	2	Substrato	1357.142	
	3	Substrato	1214.949	
	4	Coesiva	1615.477	

5	Delaminar	1322.444
---	-----------	----------





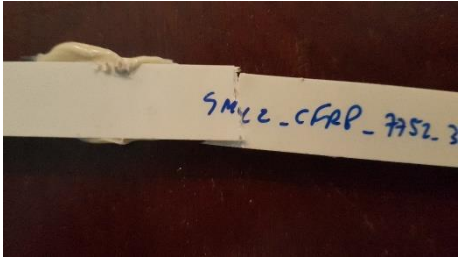
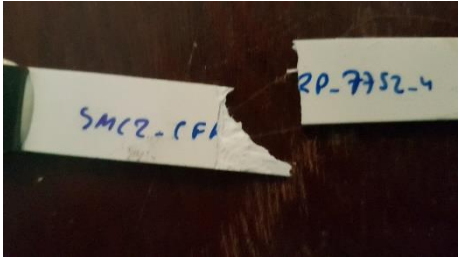

6	Substrato	767.6919
---	-----------	----------



Junta	Provete	Tipo de rotura	Força máx. (N)	Imagem
	1	Pelo Substrato	1253.112	
	2	Pelo Substrato	888.0615	
SMC2/CFRP AV	3	Pelo Substrato	1583.417	
	4	Pelo Substrato	1261.838	
	5	Pelo Substrato	1597.134	

Junta	Provete	Tipo de rotura	Força máx. (N)	Imagem
Co-cura SMC1/ CFRP	1	Delaminar	1406.129	
	2	Delaminar	1326.911	
	3	Delaminar	1733.573	
	4	Delaminar	1268.721	
	5	Delaminar	1712.783	
	6	Delaminar	1563.263	

Junta	Provete	Tipo de rotura	Força máx. (N)	Imagem
SMC1/CFRP AV	1	Delaminar	1508.776	
	2	Delaminar	1557.859	
	3	Delaminar	1600.917	
	4	Delaminar	1497.396	
	5	Delaminar	1478.195	

Junta	Provete	Tipo de rotura	Força máx. (N)	Imagem
	1	Susbrato	1042.032	
	2	Coesiva	1396.704	
SMC2/CFRP 7752	3	Substrato	1234.118	
	4	Substrato	1440	
	5	Delaminar	1626.015	



Junta	Provete	Tipo de rotura	Força máx. (N)	Imagem
	1	Coesiva	4321.496	
	2	Coesiva	4472.479	
CFRP 7752	3	Coesiva	4175.488	
	4	Coesiva	4512.787	
	5	Coesiva	4285.987	


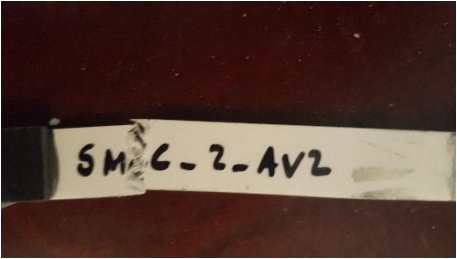


Junta	Provete	Tipo de rotura		Imagem
	1	Coesiva	3694.407	
	2	Coesiva	3735.574	
CFRP AV	3	Coesiva	3754.647	
	4	Coesiva	4178.46	
	5	Coesiva	4028.193	






Junta	Provete	Tipo de rotura		Imagem
	1	Substrato	817.6327	
	2	Substrato	663.5666	
	3	Substrato	781.854	
Co-cura SMC1	4	Coesão	1345.587	
	5	Coesão	1152.865	
	6	Substrato	817.2035	

Junta	Provete	Tipo de rotura	Força máx. (N)	Imagem
	1	Substrato	1641.671	
	2	Delaminar	1782.529	
SMC1/CFRP 7752	3	Delaminar	1654.196	
	4	Delaminar	1851.67	
	5	Delaminar	1795.435	

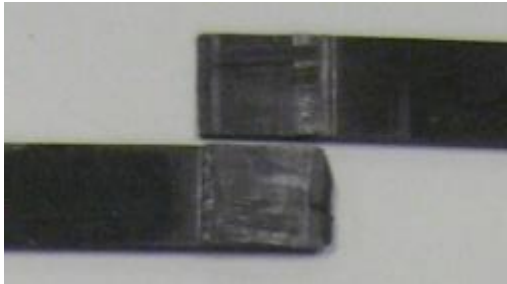
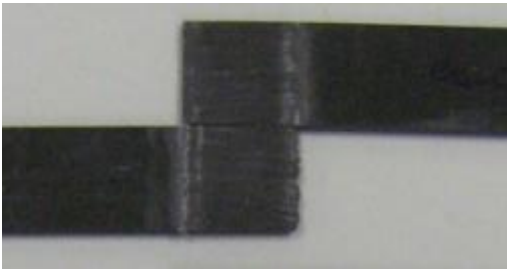
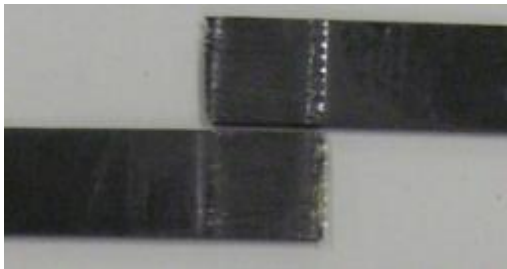
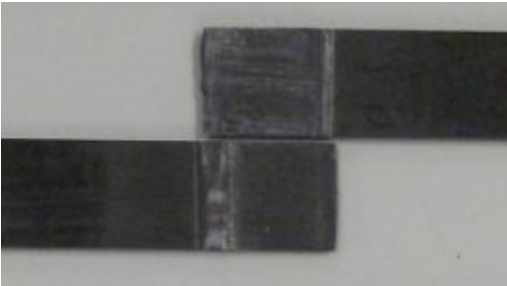
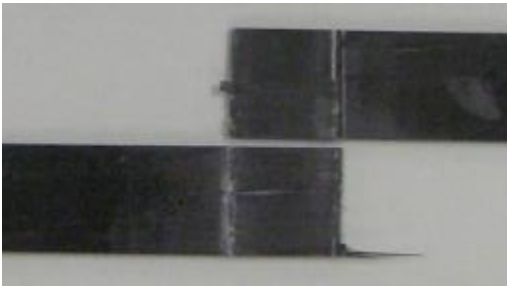
Junta	Provete	Tipo de rotura	Força máx. (N)	Imagem
	1	Delaminar	969.3782	
	2	Delaminar	1098.967	
SMC1 7752	3	Delaminar	1232.433	
	4	Delaminar	838.5181	
	5	Delaminar	1111.285	

Junta	Provete	Tipo de rotura	Força máx. (N)	Imagem
Co-cura SMC2	1	Coesão	883.3091	
	2	Coesão	675.5034	
	3	Coesão	689.1251	
	4	Coesão	786.5746	
	5	Coesão	1359.892	
	6	Coesão	1545.35	
	7	Coesão	614.5159	

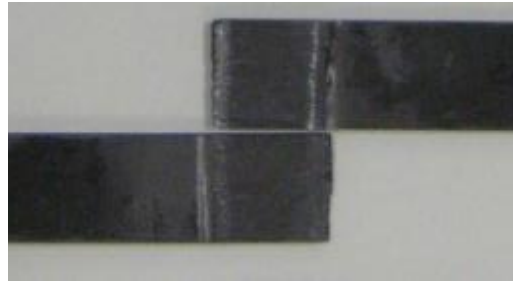
Junta	Provete	Tipo de rotura	Força máx. (N)	Imagem
	1	Delaminar	1117.913	
	2	Substrato	977.2301	
SMC2 AV	3	Delaminar	1041.969	
	4	Substrato	1088.206	
	5	Delaminar	1086.982	

Junta	Provete	Tipo de rotura	Força máx. (N)	Imagem
	1	Delaminar	1131.678	
	2	Delaminar	930.6908	
SMC1 AV	3	Delaminar	954.4849	
	4	Delaminar	962.4322	
	5	Delaminar	1018.413	

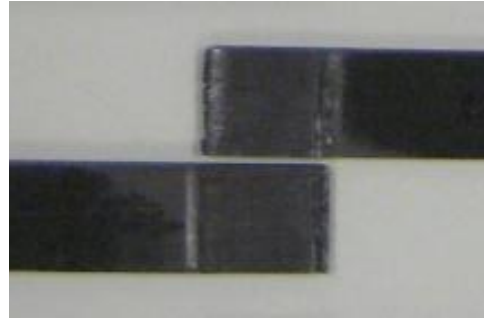
Junta	Provete	Tipo de rotura	Força máx. (N)	Imagem
	1	Substrato	1002.709	
	2	Delaminar	985.1774	
SMC2 7752	3	Delaminar	1165.231	
	4	Substrato	797.5419	
	5	Substrato	1063.045	

Junta	Provete	Tipo de rotura	Força máx. (N)	Imagem
	1	Coesiva	4962.555	
	2	Coesiva	3877.354	
Co-cura CFRP	3	Coesiva	4177.57	
	4	Coesiva	3590.409	
	5	Coesiva	7215.166	

6	Coesiva	4462.242
---	---------	----------



7	Coesiva	4177.157
---	---------	----------



8	Coesiva	5123.854
---	---------	----------

