

## Caracterização das propriedades mecânicas e de tenacidade à fratura do SMC

PEDRO MIGUEL MOREIRA DA SILVA

novembro de 2020

# CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE TENACIDADE À FRATURA DO SMC

Pedro Miguel Moreira da Silva

1130435

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# **CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE TENACIDADE À FRATURA DO SMC**

Pedro Miguel Moreira da Silva

1130435

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Doutor Isidro de Jesús Sánchez-Arce e Doutor Francisco José Gomes da Silva.

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# JÚRI

## **Presidente**

Doutora Elza Maria Morais Fonseca

Professor Adjunto, ISEP

## **Orientador**

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

## **Coorientadores**

Doutor Isidro de Jesús Sánchez-Arce

Investigador, INEGI

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, ISEP

## **Arguente**

Doutor Rui Jorge Sousa Costa de Miranda Guedes

Professor Associado, FEUP



## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Raúl Duarte Salgueiral Campilho, Orientador Científico da presente dissertação, pela sua dedicação, partilha de conhecimento, disponibilidade e incentivo, revelando-se fundamental para a conclusão da mesma.

Ao Professor Doutor Isidro de Jesus Sánchez Arce, pela sua disponibilidade e encorajamento, bem como pela ajuda na execução dos ensaios e apoio na realização das modelações numéricas.

À empresa Inapal Plásticos S.A. pelo material de ensaio, disponibilidade e cooperação na realização da presente dissertação.

Aos meus pais e irmãos, por todo o apoio e compreensão, bem como pela privação de convívio que lhes causei.

À Vera Pinto, por todo o apoio, paciência e compreensão, suportando, por vezes, a minha falta de disponibilidade e mau humor.

À Eng. Diana Garcês e amigos, pela ajuda e incentivo durante a realização da presente dissertação.



## PALAVRAS CHAVE

SMC, Tenacidade, *Bulk*, *Block Shear* (BS), *Double-Cantilever Beam* (DCB), *End-Notched Flexure* (ENF), Modelos de dano coesivo, Análise de tensões, Análise de elementos finitos.

## RESUMO

No desenvolvimento de projetos de engenharia, a seleção dos materiais é cada vez mais um critério decisivo e de elevada importância no resultado final dos mesmos. A correta ou errada escolha do material a utilizar tem influência direta na eficácia e eficiência do produto, bem como no preço final do mesmo. De modo a ser possível proceder à sua escolha, é necessário ter todas as informações sobre o comportamento do mesmo. Assim sendo, é necessário caracterizar e documentar cada uma das propriedades dos materiais disponíveis no mercado.

A presente dissertação estuda o comportamento mecânico de várias concentrações de fibra de vidro no *Sheet Moulding Compound* (SMC), quando sujeito a ensaios *Bulk* (ensaio de tração) e *Block Shear* (ensaio de corte). Nestes ensaios obtêm-se dados como os módulos de elasticidade à tração ( $E$ ) e ao corte ( $G$ ). Além dos anteriores, ainda é possível determinar a tensão máxima, tensão cedência e tensão de rotura, novamente, para cada uma das concentrações de fibra. Através de ensaios *Double-Cantilever Beam* (ensaio de fratura à tração) e *End-Notched Flexure* (ensaio de fratura ao corte) é possível determinar a tenacidade à fratura, ou seja, a resistência à propagação de fendas do material. Com estes ensaios são obtidos valores como a taxa de libertação de energia de deformação à tração ( $G_{Ic}$ ) e ao corte ( $G_{IIc}$ ). Terminada a fase experimental, os ensaios descritos anteriormente foram simulados num *software* de modelação numérico, ABAQUS®, com o objetivo de comparar valores.

Em conclusão, com os ensaios realizados foi possível determinar que as propriedades do material no sentido da direção das fibras são tanto melhores quanto maior a concentração das mesmas.



## KEYWORDS

SMC, Fracture toughness, Bulk, Block Shear, Double-Cantilever Beam, End-Notched Flexure, cohesive damage models, tensile distribution analyses Finite element analysis

## ABSTRACT

During project engineering development, the material's choice is one of the most decisive and with the highest importance criteria to achieve the best final product. The correct or wrong material's choice has a direct impact on the efficiency and product performance, and even on its final price. To choose, it is necessary to have all the information regarding the material behavior. For this, it is necessary to determine and record all the material properties.

This thesis studies the material's mechanical behavior in different amount of fiber glass present on the Sheet Moulding Compound (SMC), when subjected to Bulk (tensile test) and Block Shear (shear test). In these tests, it is possible to obtain the tensile modulus ( $E$ ) and shear modulus ( $G$ ). Even more, it is possible to determine the maximum stress, the yield stress and the strength, for all the different fiber concentrations. By Double-Cantilever Beam (tensile fracture test) and End-Notched Flexure (shear fracture test), it is possible to determine the fracture toughness, i.e., the material resistance to crack propagation. With these tests, the tensile strain energy release rate ( $G_{Ic}$ ) and shear deformation energy release rate ( $G_{IIc}$ ) can be obtained. With the experimental stage finished, the described tests were simulated in a numerical modeling software, ABAQUS®, with the goal to compare results.

In conclusion, it was possible to determine that the material's properties according with the fiber's orientation can be improved with the increase of the amount of fiber.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

BS	<i>Block Shear</i>
CV	Coeficiente de variação
CBBM	<i>Compliance based Beam Method</i>
CBT	<i>Corrected beam Theory</i>
CCM	<i>Compliance Calibration Method</i>
CMC	Compósito Matriz Cerâmica
CMM	Compósito Matriz Metálica
CMP	Compósito Matriz Polimérica
CRF	Compósito Reforço por Fibras
CRP	Compósito Reforço por Partículas
CSP	<i>Continental Structural Plastics</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
ECT	<i>Edge Crack Torsion</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
GMT	<i>Glass Mat Thermoplastic</i>
IP	Inapal Plásticos SA
LFT	<i>Long Fiber Thermoplastic</i>
MCCM	<i>Modified Compliance Calibration Method</i>
MDC	Modelo de Dano Coesivo
PCM	<i>Pre-preg Compression Molding</i>
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i>
SMC	<i>Sheet Moulding Compound</i>
ZPF	Zona de processo de fratura
2D	Bidimensional

### Lista de Unidades

°C	Graus Celcius
bar	Unidade de pressão
g/cm <sup>3</sup>	Massa volúmica
GPa	GigaPascal
min	Minuto
mm	Milímetro
MPa	MegaPascal
N	Newton

## Lista de Símbolos

$a$	Comprimento de fenda
$a_0$	Comprimento de fenda inicial
$B$	Largura do provete
$C$	Flexibilidade
$C_0$	Flexibilidade inicial
$E$	Módulo de Young ou Módulo de elasticidade longitudinal
$E_f$	Módulo de flexão
$G$	Módulo de corte
$G_c$	Taxa crítica de libertação de energia
$\bar{G}_{Ic}$	Taxa crítica de libertação de energia em modo I
$G_{IIc}$	Taxa crítica de libertação de energia em modo II
$I$	Momento estático de segunda ordem
$L_0$	Comprimento inicial
$P$	Força
$S_0$	Área de Secção
$U$	Energia de deformação
$\delta$	Deslocamento
$\Delta$	Fator de correção para rotação e deslocamento
$\Delta L$	Variação do comprimento
$\varepsilon$	Deformação
$\varepsilon_0$	Deformação inicial
$\sigma$	Tensão
$\sigma_0$	Tensão inicial
$\sigma_{0,2}$	Tensão limite de proporcionalidade de 0,2%
$\sigma_{ced}$	Tensão de cedência
$\sigma_r$	Tensão de rotura
$\sigma_y$	Tensão limite de elasticidade
$\tau_{máx}$	Tensão ao corte máxima

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura organizacional da empresa Fonte: Elaborada pelo autor .....	5
Figura 2 - Portas em SMC para sistema AVAC [2].....	7
Figura 3 - Painel exterior de carroçaria SMC - classe A [1] .....	7
Figura 4 - Tijolos de Argila reforçados com palha [4] .....	11
Figura 5 - Pilar em betão armado [5].....	11
Figura 6 - Aplicação e definição dos compósitos. Adaptado de [3] .....	13
Figura 7 - Esquematização da classificação dos compósitos [9].....	14
Figura 8 - Aplicação CMP - Cadeira (Termoplástico)[14] .....	15
Figura 9 - Aplicação CMP - Painéis exteriores em SMC (Termoendurecível) [1] .....	15
Figura 10 - Aplicação CMM - Rotor para motores elétricos [17].....	15
Figura 11 - Aplicação CMM - Biela [18] .....	15
Figura 12 - Aplicação CMC - Ventilador para gases quentes [20].....	16
Figura 13 - Aplicação CMC - Rolamentos - Fonte: Catálogo SKF [21] .....	16
Figura 14 - Manta de fibras de vidro contínuas - Fonte: Elaborada pelo autor .....	17
Figura 15 - Fibras de vidros impregnadas com 20 a 25 mm de comprimento no SMC - Fonte: Elaborada pelo autor .....	17
Figura 16 - Pré-forma em fibra de carbono - Fonte: Elaborada pelo autor .....	18
Figura 17 - Pré-forma em fibra de aramida - Fonte: Elaborada pelo autor .....	18
Figura 18 - "Folhas" de SMC com pigmentos à cor [29] .....	20
Figura 19 - Processo de fabrico do SMC [29].....	21
Figura 20 - Cavidade molde de compressão - Fonte: Elaborada pelo autor.....	22
Figura 21 - Punção molde de compressão - Fonte: Elaborada pelo autor .....	22
Figura 22 - Esquema 3D de um molde de compressão - Fonte: Elaborada pelo autor .....	24
Figura 23 - Molde de compressão aberto - Fonte: Elaborada pelo autor .....	24
Figura 24 - Aplicação de peças em SMC em tabuleiros de cantina - Fonte: Elaborada pelo autor .....	25
Figura 25 - Evolução da aplicação de peças em SMC na indústria automóvel [32].....	26
Figura 26 - Evolução da aplicação de peças em SMC na indústria dos camiões e transportes públicos [32] .....	27

Figura 27 - Provete maciço segundo a norma EN ISO 527-4 [34].....	29
Figura 28 - Representação esquemática da junta de topo a topo [35] .....	29
Figura 29 - Amarra de fixação dos provetes à máquina de ensaio - Fonte: Elaborada pelo autor.....	30
Figura 30 - Extensómetro mecânico [36] .....	31
Figura 31 - Extensómetro ótico [36] .....	31
Figura 32 - Curvas típicas de $\sigma$ - $\epsilon$ - Fonte: Elaborada pelo autor .....	32
Figura 33 - Gráfico $\sigma$ - $\epsilon$ - Fonte: Elaborada pelo autor .....	33
Figura 34 - Traçados dos módulos de elasticidade tangentes e secante - Fonte: Elaborada pelo autor ...	33
Figura 35 - Gráfico $\sigma$ - $\epsilon$ - Regime elástico vs. Regime plástico - Fonte: Elaborada pelo autor .....	34
Figura 36 - Gráfico $\sigma$ - $\epsilon$ com patamar de cedência - Fonte: Elaborada pelo autor .....	34
Figura 37 - Métodos para determinação da $\sigma_y$ - Fonte: Elaborada pelo autor.....	35
Figura 38 - Representação do provete e do princípio de aplicação de força da norma ASTM D905 [42]..	36
Figura 39 - Representação do provete e princípio de aplicação de força da norma ASTM D4501 [44].....	37
Figura 40 - Dispositivo de teste para ASTM D4501 [45].....	37
Figura 41 - Representação da deformação angular de corte - Adaptada de [48] .....	38
Figura 42 - Modos de solitação das fendas [51] .....	39
Figura 43 - Provetes de ensaio DCB segundo a norma ASTM D5528-13 [55] .....	39
Figura 44 - Esquema do ensaio DCB - Fonte: Elaborada pelo autor .....	40
Figura 45 - Curva $R$ de um compósito - Fonte: Elaborada pelo autor .....	40
Figura 46 - Representação do fenómeno ponte de fibras num compósito - Fonte: Elaborada pelo autor	41
Figura 47 - Simulação da Curvatura da fenda - Fonte: Elaborada pelo autor .....	41
Figura 48 - Exemplificação do cálculo de $\Delta$ segundo a metodologia CBT - Fonte: Elaborada pelo autor ..	43
Figura 49 - Determinação do valor de $d(C)/d(a)$ para o método CCM - Fonte: Elaborada pelo autor ...	44
Figura 50 - Determinação do valor de $A1$ para o método MCCM - Fonte: Elaborada pelo autor.....	44
Figura 51 - Representação esquemática da ZPF e do conceito $aeq$ [57].....	45
Figura 52 - Métodos para introdução da carga de tração nos provetes DCB [55] .....	46
Figura 53 - Representação do ensaio <i>End-Loaded Split</i> (ELS) - Fonte: Elaborada pelo autor.....	47
Figura 54 - Representação do ensaio <i>Four-Point End-Notched Flexure</i> (4ENF) - Fonte: Elaborada pelo autor .....	48
Figura 55 - Representação do ensaio ENF - Fonte: Elaborada pelo autor .....	48
Figura 56 - Modelo coesivo triangular [82, 86]. .....	53

Figura 57 - a) Medição da temperatura das figuras moldantes e b) Manómetros da prensa.....	61
Figura 58 - Banca de preparação de carga - Corte e pesagem da carga.....	62
Figura 59 - Tabuleiro na máquina de corte, <i>Belotti</i> , durante a maquinação dos provetes .....	62
Figura 60 - Provetes após corte, respetivamente catalogados pelo material e espessura .....	63
Figura 61 - Dimensão do provete do ensaio à tração segundo a norma ISO 527-04 [34] .....	63
Figura 62 - Fresadora manual utilizada para o corte dos provetes do ensaio de corte .....	63
Figura 63 - Esquema representativo da maquinação na fresadora manual – a) perpendicular à fibra e b) paralelo à fibra .....	64
Figura 64 - Provelte do ensaio de corte .....	64
Figura 65 - Dimensão do provete DCB baseado a norma ASTM D5528-01 [55] .....	65
Figura 66 - Provetes com as dobradiças piano coladas .....	65
Figura 67 - Provelte DCB com a escala milimétrica colada na face lateral.....	66
Figura 68 - Dimensões do provete ENF .....	66
Figura 69 - Provelte ENF com a escala milimétrica colada na face lateral .....	66
Figura 70 - a) Máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100; b) <i>setup</i> de montagem do provete à tração .....	67
Figura 71 - Curvas $P-\delta$ para o SMC 15%.....	68
Figura 72 - Curvas $\sigma-\varepsilon$ para o SMC 15%.....	68
Figura 73 - Curvas $P-\delta$ para o SMC 20%.....	69
Figura 74 - Curvas $\sigma-\varepsilon$ para o SMC 20%.....	69
Figura 75 - Curvas $P-\delta$ para o SMC 30%.....	70
Figura 76 - Curvas $\sigma-\varepsilon$ para o SMC 30%.....	70
Figura 77 - Curvas $P-\delta$ para o SMC 45%.....	71
Figura 78 - Curvas $\sigma-\varepsilon$ para o SMC 45%.....	71
Figura 79 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ do ensaio experimental à tração.....	72
Figura 80 - Valores de $\sigma_{m\acute{a}x}$ do ensaio experimental à tração.....	73
Figura 81 - Valores de $\sigma_{rot}$ do ensaio experimental à tração .....	73
Figura 82- Valores de $E$ do ensaio experimental à tração .....	73
Figura 83 - Curvas $P-\delta$ do ensaio BS com SMC 15%.....	74
Figura 84 - Curvas $P-\delta$ do ensaio BS com SMC 20%.....	74
Figura 85 - Curvas $P-\delta$ do ensaio BS com SMC 30%.....	75
Figura 86 - Curvas $P-\delta$ do ensaio BS com SMC 45%.....	75

Figura 87 - Valores médios de $P_{máx}$ do ensaio experimental em BS .....	76
Figura 88 - Curvas $\tau$ - $\gamma$ do ensaio BS com SMC 15% .....	76
Figura 89 - Curvas $\tau$ - $\gamma$ do ensaio BS com SMC 20% .....	77
Figura 90 - Curvas $\tau$ - $\gamma$ do ensaio BS com SMC 30% .....	77
Figura 91 - Curvas $\tau$ - $\gamma$ do ensaio BS com SMC 45% .....	77
Figura 92 - Valores médios de $G$ do ensaio experimental em BS .....	78
Figura 93 - Montagem do equipamento fotográfico para medição de comprimento de fenda no ensaio DCB, e b) montagem do provete nas amarras do equipamento de ensaio .....	79
Figura 94 - Curvas $P$ - $\delta$ para o SMC 15%.....	80
Figura 95 - Curvas $P$ - $\delta$ para o SMC 20%.....	80
Figura 96 - Curvas $P$ - $\delta$ para o SMC 30%.....	80
Figura 97 - Curvas $P$ - $\delta$ para o SMC 45%.....	81
Figura 98 - Curva R do provete P4 do SMC 15% .....	81
Figura 99 - Curvas R do provete P6 do SMC 20% .....	82
Figura 100 - Curvas R do provete P6 do SMC 30% .....	83
Figura 101 - Curvas R do provete P2 do SMC 45% .....	84
Figura 102 - Valores médios de $G_{ic}$ segundo o método CBBM com curva de tendência logarítmica.....	85
Figura 103 - a) Montagem do equipamento fotográfico para medição de comprimento de fenda no ensaio ENF, e b) montagem do provete nas amarras do equipamento de ensaio .....	86
Figura 104 - Curvas $P$ - $\delta$ para o SMC 15%.....	87
Figura 105 - Curvas $P$ - $\delta$ para o SMC 20%.....	88
Figura 106 - Curvas $P$ - $\delta$ para o SMC 30%.....	88
Figura 107 - Curvas $P$ - $\delta$ para o SMC 45%.....	88
Figura 108 - Curva R do provete P7 do ensaio ENF para SMC 15% .....	89
Figura 109 - Curva R do provete P8 do ensaio ENF para SMC 20% .....	90
Figura 110 - Curvas R do provete P7 do ensaio ENF para SMC 30%.....	91
Figura 111 - Curvas R do provete P5 do ensaio ENF para SMC 45%.....	92
Figura 112 - Gráfico de valores de $G_{ic}$ segundo o CBBM.....	93
Figura 113 - Exemplo de geometria definida no ABAQUS® para o provete DCB .....	94
Figura 114 - Definição das secções sólidas homogéneas e coesivas para o provete DCB.....	95
Figura 115 - Definição das secções sólidas homogéneas e coesivas para o provete ENF .....	95

---

Figura 116 - Parâmetros de simulação - condições fronteira do provete DCB.....	95
Figura 117 - Parâmetros de simulação - condições fronteira do provete ENF .....	95
Figura 118 - Parâmetros de simulação - Definição dos incrementos para análise numérica.....	96
Figura 119 - Modelo numérico do provete DCB com detalhe do tipo da malha de MEF em cada uma das zonas .....	96
Figura 120 - Modelo numérico do provete ENF com detalhe do tipo da malha de MEF em cada uma das zonas .....	96
Figura 121 - Exemplo da interface do ABAQUS® CAE com a monitorização da simulação .....	97
Figura 122 - Exemplo das linhas de comando para executar várias simulações sequencialmente .....	97
Figura 123 - Comparação das curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas para o ensaio DCB do SMC 15% ....	98
Figura 124 - Comparação das curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas para o ensaio DCB do SMC 20% ....	99
Figura 125 - Comparação das curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas para o ensaio DCB do SMC 30% ....	99
Figura 126 - Comparação das curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas para o ensaio DCB do SMC 45% ..	100
Figura 127 - Comparação das curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas para o ensaio ENF do SMC 15% ..	101
Figura 128 - Comparação das curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas para o ensaio ENF do SMC 20% ..	101
Figura 129 - Comparação das curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas para o ensaio ENF do SMC 30% ..	101
Figura 130 - Comparação das curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas para o ensaio ENF do SMC 45% ..	102



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos materiais compósitos [8, 9] .....	12
Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos materiais na forma maciça - Adaptada de [23] e [24].....	17
Tabela 3 - Propriedades mecânicas das fibras - Adaptada de [23] e [24] .....	17
Tabela 4 - Quantidade de fibra dos materiais escolhidos .....	59
Tabela 5 - Características do SMC LP 2502 R15.....	60
Tabela 6 - Características do SMC LS 3123 R20 BIANCO .....	60
Tabela 7 - Características do SMC HUP 12/30 LE RN-9500/39406 .....	60
Tabela 8 - Características do SMC VERKID PG45 H330.LE .....	60
Tabela 9 - Peso das cargas de moldação dos tabuleiros de ensaio .....	61
Tabela 10 - Propriedades mecânicas do SMC 15% obtidas à tração .....	68
Tabela 11 - Propriedades mecânicas do SMC 20% obtidas à tração .....	69
Tabela 12 - Propriedades mecânicas do SMC 30% obtidas à tração .....	70
Tabela 13 - Propriedades mecânicas do SMC 45% obtidas à tração .....	71
Tabela 14 - Propriedades experimentais determinados no ensaio de tração.....	72
Tabela 15 – Valores médios de $\tau_{m\acute{a}x}$ determinados experimentalmente no ensaio BS .....	75
Tabela 16 - Valores de médios de $G$ calculados do ensaio experimental BS.....	78
Tabela 17 - Valores obtidos na medição de $\alpha_0$ para os provetes DCB.....	79
Tabela 18 - Resultados de $G_{Ic}$ para o SMC 15% .....	82
Tabela 19 - Resultados de $G_{Ic}$ para o SMC 20% .....	83
Tabela 20 - Resultados de $G_{Ic}$ para o SMC 30% .....	84
Tabela 21 - Resultados de $G_{Ic}$ para o SMC 45% .....	85
Tabela 22 - Resumo valores experimentais de $G_{Ic}$ médios para todos os materiais .....	86
Tabela 23 - Valores obtidos na medição de $\alpha_0$ para os provetes ENF .....	87
Tabela 24 - Resultados de $G_{IIc}$ para o SMC 15%.....	89
Tabela 25 - Resultados de $G_{IIc}$ para o SMC 20%.....	90
Tabela 26 - Resultados de $G_{IIc}$ para o SMC 30%.....	91
Tabela 27 - Resultados de $G_{IIc}$ para o SMC 45%.....	92

---

Tabela 28 - Resumo valores experimentais de $G_{IIc}$ médios para todos os materiais.....	93
Tabela 29 - Comparação de $P_{máx}$ experimental com $P_{máx}$ numérico dos ensaios DCB para cada um dos materiais .....	100
Tabela 30 - Comparação de $P_{máx}$ experimental com $P_{máx}$ numérico dos ensaios ENF para cada um dos materiais .....	102

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1</b>	<b>Enquadramento</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura da dissertação</b> .....	<b>4</b>
<b>1.4</b>	<b>Empresa de acolhimento</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Materiais compósitos</b> .....	<b>11</b>
2.1.1	Noções fundamentais.....	11
2.1.2	Aplicações.....	12
2.1.3	Caracterização e classificação de materiais compósitos .....	13
2.1.3.1	Tipos de matriz .....	14
2.1.3.2	Tipos de reforços .....	16
2.1.4	“Sheet Mould Compound” (SMC) .....	19
2.1.4.1	Processo de fabrico.....	21
2.1.4.2	Processo de moldação .....	21
2.1.4.3	Aplicações .....	25
<b>2.2</b>	<b>Caracterização dos materiais</b> .....	<b>28</b>
2.2.1	Propriedades de resistência mecânica – Ensaio de tração.....	28
2.2.1.1	Procedimento de ensaio .....	28
2.2.1.2	Propriedades do material – Curva tensão-deformação.....	31
2.2.2	Propriedades de resistência mecânica – Ensaio de corte .....	35
2.2.2.1	Procedimento de ensaio .....	37
2.2.2.2	Propriedades do material .....	37
2.2.3	Propriedades de tenacidade à fratura.....	38
2.2.3.1	Ensaio de fratura à tração – Modo I – <i>Double-Cantilever Beam</i> (DCB).....	39

2.2.3.1.1	Procedimento do ensaio “ <i>Double-Cantilever Beam</i> ” (DCB) .....	41
2.2.3.1.2	Propriedades do material – Taxa crítica de libertação de energia.....	42
2.2.3.2	Ensaio de fratura ao corte – Modo II .....	46
2.2.3.2.1	Procedimento de ensaio “ <i>End-Notched Flexure</i> ” (ENF) .....	48
2.2.3.2.2	Propriedades do material – Taxa crítica de libertação de energia.....	49
<b>2.3</b>	<b>Modelos de dano coesivo .....</b>	<b>51</b>
2.3.1	Fundamentos da técnica .....	51
2.3.2	Tipos de leis coesivas.....	51
2.3.3	Métodos de obtenção das leis coesivas .....	52
2.3.4	Revisão da literatura da caracterização dos compósitos .....	54
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>59</b>
<b>3.1</b>	<b>Trabalho experimental .....</b>	<b>59</b>
3.1.1	Seleção dos materiais .....	59
3.1.2	Fabrico dos provetes .....	60
3.1.2.1	Provetes do ensaio de tração .....	62
3.1.2.2	Provetes do ensaio <i>block shear</i> .....	63
3.1.2.3	Provetes do ensaio DCB .....	64
3.1.2.4	Provetes do ensaio ENF .....	66
3.1.3	Ensaio à tração .....	67
3.1.3.1	Análise de resultados.....	67
3.1.4	Ensaio ao corte .....	74
3.1.4.1	Análise de resultados.....	74
3.1.5	Ensaio à fratura – modo I .....	78
3.1.5.1	Análise de resultados.....	79
3.1.6	Ensaio à fratura – modo II .....	86
3.1.6.1	Análise de resultados.....	87
<b>3.2</b>	<b>Modelação numérica .....</b>	<b>94</b>
3.2.1	Condições da análise numérica .....	94
3.2.2	Previsão do comportamento.....	98

---

3.2.2.1	Análise das curvas $P-\delta$ para o ensaio DCB .....	98
3.2.2.2	Análise das curvas $P-\delta$ para o ensaio ENF.....	100
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	105
5	REFERÊNCIAS.....	109



# INTRODUÇÃO



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

O Homem, nos seus primórdios, aproveitou o que a natureza tinha a oferecer, de um modo simplista, como utilização das cavernas e grutas para abrigo, utilização de pedras para o fabrico de material de caça utilização das peles dos animais para vestuário.

Mas com a modificação dos solos e do clima, a necessidade de proteção face aos perigos externos, e as descobertas que foi realizando ao longo dos anos, como a descoberta do fogo, a invenção da roda, a descoberta da fiação de fibras, o Homem acabou por evoluir.

Desta evolução, foram descobertos novos materiais, como os trabalhar e aplicar, e eventualmente na história como tirar partido da combinação das propriedades individuais em prol de algo melhor. Estas fases da história foram marcadas pelas várias Eras (do Ferro, do Bronze, do Ouro, dos Compósitos).

Os primeiros compósitos são tão antigos como as primeiras habitações, onde as paredes de lama eram reforçadas com feixes de palha para promover estabilidade estrutural, e os primeiros arcos de caça, nos quais se uniam paus com ossos de animais. Com o aparecimento de novos materiais, estes materiais foram substituídos. Para as habitações apareceu o cimento reforçado com vigas de ferro, e para a caça os primeiros arcos de madeira e fibra de vidro.

Durante a revolução industrial surgiram grandes descobertas nos compósitos metálicos, devido ao surgimento dos primeiros grandes fornos de fusão. Até àquela data os materiais eram reforçados maioritariamente com fibras naturais, como o papiro e a palha, mas durante esta Era, começaram a surgir os reforços minerais, como as areias e a fibra de vidro.

Já na década de 80 e 90, os compósitos começaram a ganhar importância devido às preocupações ambientais e à redução de custos. Nos dias de hoje, os compósitos podem ser encontrados em praticamente todas as indústrias, como a do mobiliário como o material IKEA (união de MDF e *honeycomb*), na automóvel como o *Sheet Moulding Compound* (SMC), na aeronáutica pelos compósitos reforçados com fibra de carbono, entre outras.

Os compósitos, como qualquer material, têm as suas desvantagens e possibilidades de evolução, mas atualmente cada vez mais ganham mercado pelo excelente desempenho em forma, massa, resistência, durabilidade, rigidez e custos.

## 1.2 Objetivos

Todas as propriedades mecânicas, químicas, entre outras, de um determinado material têm de ser validadas antes de o mesmo ser introduzido em qualquer indústria, e é desta necessidade que surge a presente dissertação. O *Sheet Moulding Compound*, também conhecido por SMC, é atualmente um dos materiais mais utilizados na indústria automóvel pelo facto de possuir excelentes propriedades de resistência mecânica, pela facilidade em design, e acabamento superficial. Apesar desta noção, poucos são os estudos realizados sobre o mesmo. Assim sendo, com esta dissertação pretende-se caracterizar o SMC nas suas propriedades mecânicas e tenacidade à fratura.

Nesse sentido serão realizados vários ensaios mecânicos ao SMC, sendo que este terá quatro percentagens de fibra de vidro diferentes. Numa primeira fase serão realizados ensaios experimentais de tração, corte, DCB e ENF de modo a obter as propriedades mecânicas do SMC e analisar o comportamento do mesmo com as diferentes % de fibra. Numa segunda fase serão criados modelos numéricos dos ensaios DCB e ENF através do *software* ABAQUS®. O objetivo é comparar os resultados numéricos com os resultados experimentais de forma a verificar a eficácia dos modelos de dano coesivo (MDC) para o SMC.

## 1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em diferentes capítulos para melhor interpretação e análise do trabalho realizado.

No capítulo 1 é feito um enquadramento geral do tema em que se baseia a dissertação e em que âmbito esta foi realizada. São também referidos os objetivos delineados para o desenvolvimento deste trabalho.

O capítulo 2 está dividido em três partes. Na primeira parte é descrita a evolução dos materiais compósitos ao longo da História, o que é um material compósito, quais as suas vantagens e desvantagens, e aplicações. Bem como os vários tipos de materiais compósitos, desde os tipos de matrizes que o compõem até aos tipos de reforços. Após o enquadramento dos materiais compósitos, é apresentada uma descrição detalhada do que é o SMC e como se produz o material em si. É também descrito o processo de produção de peças neste material. Por fim, é apresentada uma noção cronológica da utilização de peças em SMC ao longo dos anos nas mais diversas indústrias. Já na segunda parte é apresentada uma descrição detalhada do ensaio de tração, corte, DCB e ENF. Nesta descrição são apresentadas as propriedades que podem ser estudadas com estes ensaios, o procedimento para a sua realização e todo o tratamento matemático a realizar aos dados obtidos durante os ensaios experimentais. Na terceira parte é abordado o MDC referindo os seus fundamentos teóricos, bem como os tipos de leis coesivas e obtenção das mesmas.

Em relação ao capítulo 3, este está dividido em duas fases. A primeira fase diz respeito a todas as etapas do trabalho experimental, as quais passam pela seleção, produção e ensaio dos materiais em estudo. No fim desta primeira fase serão apresentados os resultados experimentais e respetivas análises. A segunda fase expõe a parte numérica do trabalho, no qual é descrito o procedimento para a elaboração das modelações, seguido dos modelos realizados. No final do capítulo serão tecidas as comparações entre os resultados experimentais e os resultados numéricos.

Todos os pontos descritos anteriormente, resultam na apresentação das conclusões deste estudo, com realce em possíveis estudos ainda a efetuar, seja para melhor caracterizar o SMC, seja para esclarecer pontos que de algum modo não foram conclusivos durante esta dissertação. Esta análise é apresentada no capítulo quatro.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as referências bibliográficas que ajudaram a compor esta dissertação.

#### 1.4 Empresa de acolhimento

A presente dissertação foi realizada em parceria com a Inapal Plásticos S.A., em ambiente laboral. Atualmente, a empresa pertence a um grupo internacional, liderado pela Teijin Group Company em parceria com a Continental Structural Plastics (CSP), como se pode ver na Figura 1.

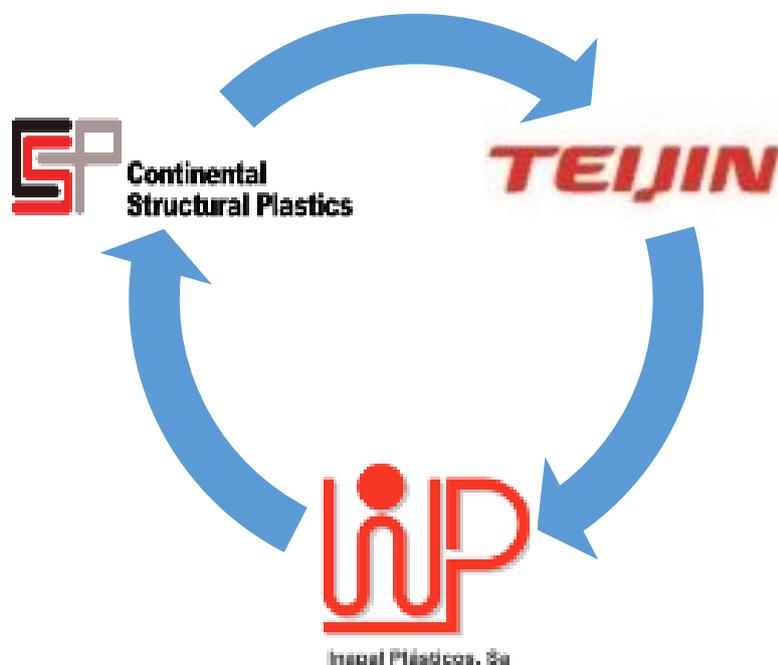


Figura 1 - Estrutura organizacional da empresa  
Fonte: Elaborada pelo autor

A Teijin, enquanto casa-mãe, é produtora de matéria-prima e tem como missão o desenvolvimento e produção de materiais compósitos avançados, tais como [1]:

- Award winning TCA Ultra Lite®;
- Structural Ultra Lite™;
- Sereebo®;
- UV Stable and Flame retardant SMC;
- Carbon Fiber and Carbon Fiber SMC;
- Long Fiber Thermoplastic – Direct (LFT-D);
- Glass Mat Thermoplastic (GMT);
- Resin Transfer Molding (RTM);
- Pre-preg Compression Molding (PCM).

Atualmente fabrica para o mercado asiático, e por meio da CSP já produz para o mercado americano. No decorrer do presente ano projeta o arranque de uma fábrica de produção de matéria-prima na europa, localizada na França.

Por sua vez, a CSP é a compilação entre a Teijin e a Inapal Plásticos, não só é produtora de SMC como de peças neste compósito. É empresa líder de produção de SMC na América do Norte, produzindo anualmente mais de 85 000 toneladas. Dedicar-se ainda ao fabrico de peças para as mais diversas áreas, como o setor automóvel (ligeiros e pesados), AVAC, aeronáutico, entre outros. São alguns exemplos:

- Painéis exteriores de carroçaria Classe A;
- Componentes estruturais;
- Componentes da parte inferior da carroçaria;
- Painéis interiores da carroçaria;
- Caixas/suportes para baterias.

A Inapal Plásticos foi fundada para o fabrico de peças em metal, há 40 anos. Numa evolução de mercado, há 30 anos, começou a produzir peças em SMC para a indústria dos camiões. Desde então, tornou-se especialista no fabrico de peças neste compósito. Faz parte da sua carteira de cliente, empresas como:

- Valeo e Carrier (Figura 2) – Ramo do AVAC;
- Jaguar, BMW, Aston Martin, Porsche – Ramo Automóvel;
- Renault Truck e Nissan – Ramo dos Camiões;
- Monte Meão e Compin – Ramo de Ferroviário;
- Irizar – Ramo dos Transportes Públicos.



Figura 2 - Portas em SMC para sistema AVAC [2]

A Inapal Plásticos tem diversas parcerias para auxiliar no desenvolvimento de novos compósitos, numa vertente de testes e validação dos mesmos. Atualmente, já fabrica peças em grandes séries de *Long Fiber Thermoplastic* (LFT), grandes séries de *Glass Mat Thermoplastic* (GMT), pequena e médias séries em *Resin Transfer Molding* (RTM), e pequenas séries em *Carbon Fiber* (CF), para além do SMC (Figura 3).



Figura 3 - Painel exterior de carroçaria SMC - classe A [1]

Possui equipas multidisciplinares dedicadas ao desenvolvimento do design, com auxílio de ferramentas CAE (*Computer Aided Engineering*) e CAD (*Computer Aided Design*). Assim como ao desenvolvimento dos vários processos produtivos, tais como a moldação, corte, colagem e pintura.



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Materiais compósitos

#### 2.1.1 Noções fundamentais

##### Evolução na história

Em meados do século XX, os materiais compósitos foram um conceito que ganhou importância na composição dos objetos usados no dia a dia. Existem relatos, da antiguidade, que referem materiais deste conceito e a sua utilização, é exemplo disso, os tijolos de argila reforçados com fibras de palha usados na construção de casas pelos Israelitas. A madeira devidamente orientada, para obter maior resistência aquando da expansão térmica, bem como pela expansão causada pela humidade, era utilizada pelos antigos egípcios, igualmente, para a construção civil [3]. Desde então, os materiais compósitos têm vindo a ter um peso ascendente na indústria dos materiais e uma constante evolução. Um simples caso, pode ser dado pela Figura 4 e pela Figura 5, onde se verifica a evolução dos materiais usados na construção civil.



Figura 4 - Tijolos de Argila reforçados com palha [4]



Figura 5 - Pilar em betão armado [5]

Atualmente, são inúmeras as combinações de materiais que formam compósitos. Estão presentes nas mais variadas áreas de atividade, sendo que têm maior destaque na engenharia. O facto de serem de fácil processamento, elevada rigidez e baixa densidade, torna-os apelativos na área dos transportes. Como por exemplo, na indústria aeronáutica, aeroespacial e automóvel.

##### Conceito base do material compósito

O significado de material compósito tem como base a combinação de dois ou mais materiais distintos numa dimensão macroscópica, onde a distinção dos diferentes materiais é clara. Pelo contrário, quando se trata da fusão de elementos para o fabrico dos aços, não é considerado um compósito, uma vez que não é possível distinguir

macroscopicamente os diferentes componentes [6]. Esta combinação dos diferentes materiais tem como objetivo criar um composto que reúna as melhores propriedades de cada um dos seus constituintes, e desta forma, obter materiais capazes de cumprir com os mais variados requisitos.

Contudo, a junção dos diferentes materiais requer algum cuidado e critério. Existem determinadas propriedades que são opostas nos diferentes materiais, como por exemplo a condutividade térmica e o isolamento térmico. A combinação de materiais com estas respetivas propriedades pode comprometer o objetivo final. Assim como, materiais com coeficientes térmicos diferentes, quando existem variações de temperatura, os mesmo podem apresentar problemas [3].

Os materiais compósitos possuem as suas vantagens e desvantagens, em relação aos materiais monolíticos. E com o decorrer dos anos, tem se vindo a testar e documentar novos compósitos com uma panóplia de propriedades diferentes. Informação esta, que desenvolve a capacidade de inovação e melhoria dos engenheiros projetistas na fase de seleção dos materiais dos projetos [7]. A Tabela 1 apresenta alguns dos principais prós e contras num modo geral.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos materiais compósitos [8, 9]

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Permitem a redução de peso; Possibilidade de ajustar as propriedades (rigidez, resistência, inflamabilidade, condutibilidade elétrica e térmica); Baixos custos de manutenção; Resistente à corrosão; Resistência química; Boa durabilidade; Possibilidade de automatização do processo.	Elevados custos dos materiais e da matéria prima; Processos de fabrico dispendiosos e por vezes lentos; Sensíveis às radiações UV; Falta de controlo e conhecimento no acabamento superficial; Falta de controlo e conhecimento nos métodos de ligação;

### 2.1.2 Aplicações

A Figura 6 descreve os três grandes tipos de compósitos:

- Reforçados com partículas;
- Reforçado com fibras;
- Estrutural.

Cada um destes subdivide-se em dois segmentos dependendo do tipo de reforço ou estrutura. Na Figura 6 são apresentados múltiplos exemplos e uma descrição clara de como identificar cada um dos mesmos.

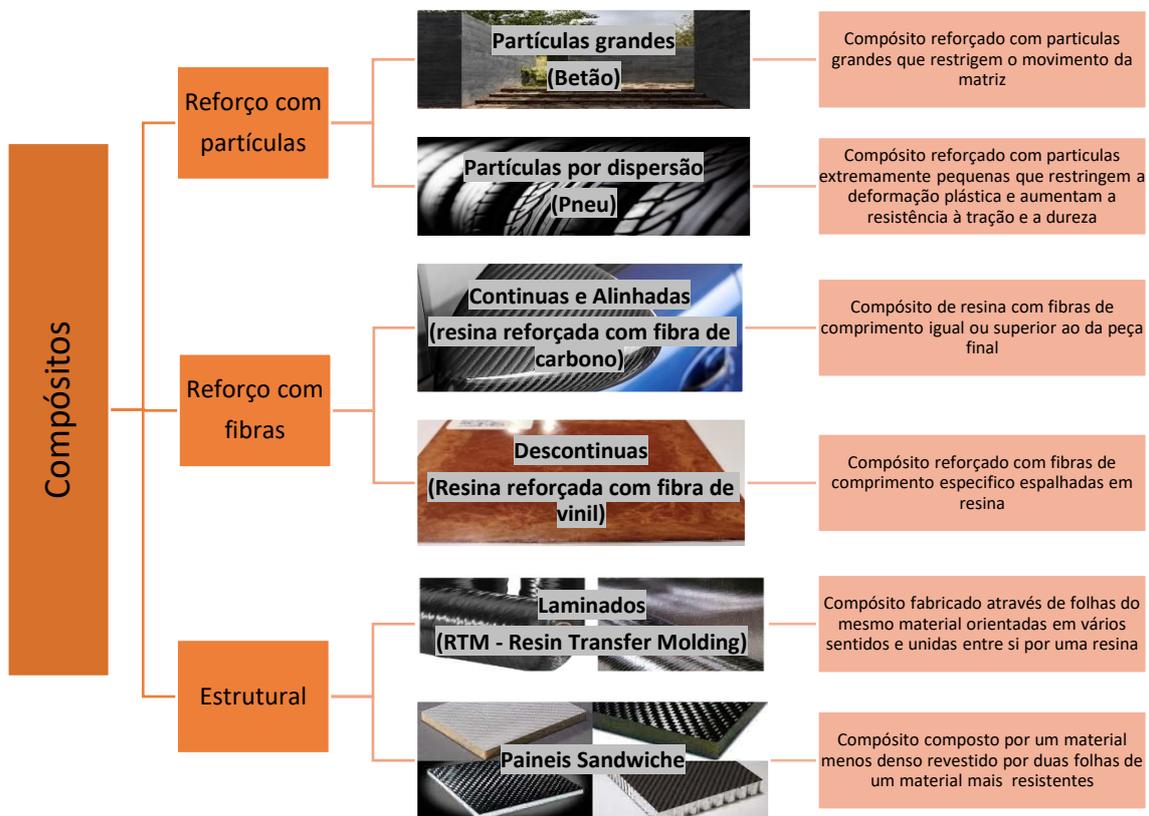


Figura 6 - Aplicação e definição dos compositos. Adaptado de [3]

### 2.1.3 Caracterização e classificação de materiais compositos

Conforme abordado no capítulo anterior, os materiais compositos compõem-se por duas ou mais partes. Geralmente, são constituídos pela matriz e pelo respetivo reforço. Quanto à matriz, tem como principais características [10]:

- Dar a forma e estrutura final do composto;
- Absorver os esforços de compressão;
- Evitar a propagação de fendas nas fibras através de uma boa ligação entre elas;
- Conferir resistência à humidade;
- Promover resistência química e à radiação ultravioleta;
- Aumentar a resistência à deformação térmica;
- Aumentar a resistência ao fogo;
- Conferir cor, brilho e qualidade superficial;
- Distribuir os esforços externos sobre os reforços.

Com isto, a classificação dos compositos será feita em função do tipo de matriz e em função do tipo de reforço. No entanto, esta classificação pode ser feita de diferentes formas. Como por exemplo, de acordo com o tipo função e finalidade, ou ainda, segundo a disposição e/ou orientação dos reforços [11]. Na Figura 7 está esquematizada a classificação dos compositos quanto ao tipo de matriz e quanto ao tipo de reforço.

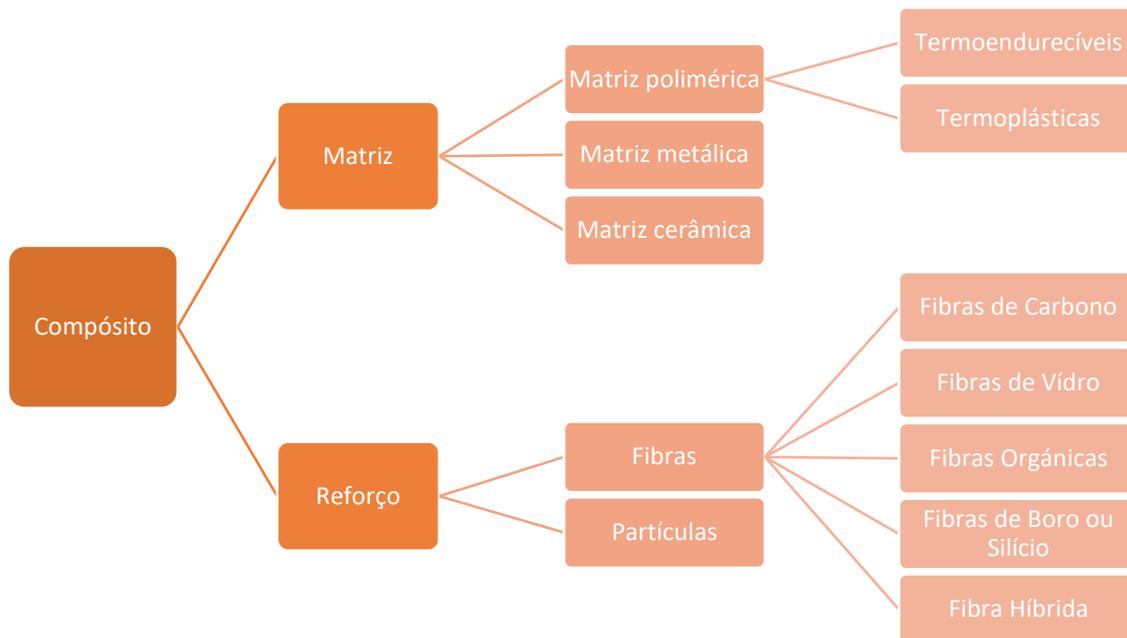


Figura 7 - Esquemática da classificação dos compósitos [9]

### 2.1.3.1 Tipos de matriz

#### Matriz polimérica

Os compósitos com matriz polimérica, CMP, usam polímeros orgânicos como matriz e fibras como reforço. Existem quatro definições para este tipo de matriz:

- Termoendurecíveis;
- Termoplásticos;
- Uni-reforço;
- Multi-reforços.

Este tipo de matrizes poliméricas têm uma elevada performance em baixa densidade, com alta resistência à fadiga e resistência química. Porém, tem como desvantagem o processo de fabrico, o qual é principalmente manual. Por conseguinte, existe uma dificuldade acrescida na repetibilidade do processo [11].

Os polímeros termoendurecíveis são os mais utilizados, tais como poliéster, epóxido, poliamida, entre outros. Uma matriz termoendurecível não pode ser redefinida, dissolvida ou mesmo voltar a ser fundida. Inclusive múltiplos ciclos de temperatura ou temperaturas elevadas, podem levar à perda de resistência e rigidez, assim como à sua deterioração.

A grande vantagem deste tipo de polímero são as elevadas propriedades mecânicas, inclusive em temperaturas onde os termoplásticos começam a fundir, os termoendurecíveis mantêm a forma e resistência. Normalmente, estes são produzidos através de moldação por compressão a quente, pultrusão reativa, injeção e RTM [12].

Nos polímeros termoplásticos destaca-se o polietileno, o polipropileno, o poliestireno, o teflon, o nylon, o poliéster, entre outros. As peças neste polímero são obtidas através de moldação por aquecimento, fusão e arrefecimento. Em baixas temperaturas têm excelente resistência química e mecânica, mas em altas temperaturas tendencialmente amolecem e perdem a forma. Esta propriedade é tanto uma desvantagem como uma vantagem, uma vez que o polímero perde a forma permite que este seja reciclado. Outra vantagem é o baixo custo da matéria-prima [13]. Dois exemplos de cada um são apresentados na Figura 8 e Figura 9.



Figura 8 - Aplicação CMP - Cadeira (Termoplástico)[14]



Figura 9 - Aplicação CMP - Painéis exteriores em SMC (Termoendurecível) [1]

#### Matriz metálica

Os materiais compósitos com matriz metálica (CMM) têm ganho aceitação no mercado como materiais estruturais. Geralmente, estes são compostos por um metal de baixa densidade, como alumínio e/ou magnésio, reforçado com partículas, como fibras cerâmicas, areia, pós ou similares.

Estes reforços conferem resistência ao desgaste, rigidez, dureza, entre outras propriedades. Para além de aumentar a resistência a maiores temperaturas de trabalho, onde a matriz protege as fibras. Tendencialmente, a união entre os elementos da matriz metálica com os reforços, é feita por fusão e fundição [15].

Os compósitos de matriz metálica podem ser utilizados na indústria automóvel, ferroviária, aeroespacial, aeronáutica, desportiva, bélica e eletrónica. Na Figura 10 e Figura 11 é possível verificar 2 exemplos para além dos discos de freio dos comboios alemães compostos por matrizes de alumínio reforçadas com carboneto de silício [16].



Figura 10 - Aplicação CMM - Rotor para motores elétricos [17]



Figura 11 - Aplicação CMM - Biela [18]

### Matriz cerâmica

Os compósitos com matriz cerâmica (CMC) possuem uma elevada resistência ao calor, a químicos, abrasão e desgaste. Embora estas propriedades sejam a razão pela qual eles são selecionados para um produto, também é a razão que os torna difíceis de fabricar e que lhes confere um custo elevado. As grandes desvantagens deste material é a fraca resistência a cargas de tensão e impacto, devido à própria sensibilidade do material.

Tendencialmente estas matrizes são reforçadas com carbonetos, boretos, nitretos e óxidos, devido ao seu elevado ponto de fusão, baixa densidade e elevada resistência. Na Figura 12 e Figura 13 estão representados dois exemplos de aplicações para este tipo de material [19].

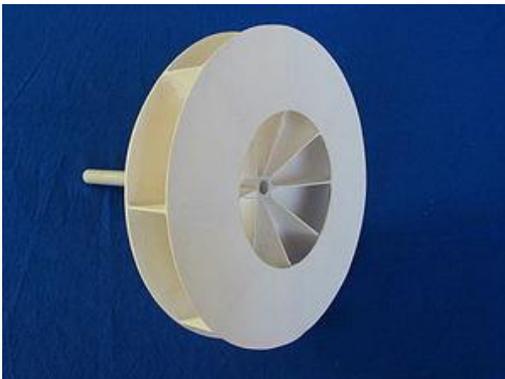


Figura 12 - Aplicação CMC - Ventilador para gases quentes [20]



Figura 13 - Aplicação CMC - Rolamentos - Fonte: Catálogo SKF [21]

#### 2.1.3.2 Tipos de reforços

Existem vários tipos de reforços para os compósitos:

- Partículas;
- Fibras descontínuas;
- Fibras contínuas;
- Flocos;
- Agulhas ou “Whiskers”;
- Folha ou “Sheet”.

Tendencialmente os mais conhecidos são as fibras e as partículas, uma vez que as propriedades são melhores e os custos são mais reduzidos, respetivamente [22].

#### Reforços em fibras

Os reforços em forma de fibra são os mais comuns e mais abundantes no mercado dos compósitos. Isto deve-se ao facto de as propriedades mecânicas serem superiores na forma fibra em comparação à forma maciça. A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas dos materiais na forma maciça, enquanto que a Tabela 3 apresenta as mesmas propriedades na forma de fibra [23].

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos materiais na forma maciça - Adaptada de [23] e [24]

Material	Densidade, $\rho$ ( $g/cm^3$ )	Módulo de Elasticidade , $E$ (GPa)	Resistência à tração, $\sigma_y$ (GPa)	Módulo específico, $E/\rho$	Resistência específica; $\sigma_y/\rho$
Vidro	2,5	70	0,7 – 2,1	28	0,28 – 0,84
Tungstênio	19,3	350	1,1 – 4,1	18,1	0,057 – 0,21
Berílio	1,83	300	0,7	164	0,38
Ligas de Al	2,7	70	0,14 – 0,62	25,9	0,052 - 0,23
Aço	7,8	210	0,34 – 2,1	26,9	0,043 - 0,27

Tabela 3 - Propriedades mecânicas das fibras - Adaptada de [23] e [24]

Material	Densidade, $\rho$ ( $g/cm^3$ )	Módulo de elasticidade, $E$ (GPa)	Resistência à tração, $\sigma_y$ (MPa)	Módulo específico, $E/\rho$	Resistência específica; $\sigma_y/\rho$
Vidro E	2,54	72	3,5	28,5	1,38
Vidro S	2,49	87	4,3	35	1,7
Tungstênio	19,3	414	4,2	21	0,22
Berílio	1,83	240	1,3	131	0,71
Carbono (Pitch CP)	2,15	6900	2,2	321	1,0
Carbono (PAN C)	1,85	345	2,3	186	1,24

As primeiras fibras a surgirem nos compósitos avançados foram as fibras de vidro (Figura 14 e Figura 15) sendo atualmente das mais utilizadas nas aplicações de engenharia. São produzidas através da técnica do estiramento de vidro fundido. Este método consiste basicamente na fusão do vidro a aproximadamente 1300°C e estirá-lo através de matrizes com furos 0,8 a 3 mm de diâmetro a alta velocidade até atingirem 3 a 9  $\mu m$  de diâmetro. Apresentam baixo custo, elevada resistência química e biológica. Contudo, a rigidez é baixa quando comparado com os aços [24].



Figura 14 - Manta de fibras de vidro contínuas -  
Fonte: Elaborada pelo autor



Figura 15 - Fibras de vidros impregnadas com 20 a 25 mm de comprimento no SMC - Fonte: Elaborada pelo autor

Para casos em que é necessário um elevado desempenho mecânico com peso reduzido, são usadas as fibras de carbono (Figura 16) e as fibras de aramida (Figura 17).

O reforço de fibra de carbono usa-se quando se pretende propriedades como elevados valores de módulo e resistência específica, elevada resistência química e biológica, condutividade elétrica e um baixo coeficiente de dilatação térmica [25]. Por sua vez as fibras de aramida, existem dois tipos comercializados, Kevlar 29 e Kevlar 49. O primeiro confere elevada resistência mecânica, aplicado em proteções balísticas, cordas e cabos, enquanto que o segundo é caracterizado por elevada resistência mecânica e módulo de elasticidade, aplicado na indústria aeroespacial, marítima e automóvel.



Figura 16 - Pré-forma em fibra de carbono - Fonte: Elaborada pelo autor

As fibras combinadas com a matriz numa percentagem inferior a 50 %, conferem ao compósito excelentes propriedades mecânicas de rigidez e resistência. Este desempenho é influenciado diretamente pelos fatores comprimento, orientação, forma e material das fibras.



Figura 17 - Pré-forma em fibra de aramida - Fonte: Elaborada pelo autor

As solicitações mecânicas, segundo a direção das fibras, são essencialmente transmitidas para as mesmas, pois estas possuem propriedades de rigidez e resistência superiores à da matriz. No caso de esforços à tração, a matriz dificilmente tem influência nas propriedades. Contrariamente, no caso de esforço à compressão, a capacidade de resistência é significativamente afetada pelas propriedades da matriz. Uma solicitação à flexão e/ou torção provocam um desgaste acelerado na matriz [26].

Na direção perpendicular às fibras, os esforços são transmitidos para a matriz e para as ligações entre a matriz e a fibra. Quando aplicada uma força de impacto, o resultado é a própria descoesão dos componentes. No caso de aplicação de força de tração, o efeito visível no material é a fissura que se propaga ao longo da fibra sem cruzar com esta. Esta ação comprova que, em caso de solicitações mecânicas perpendiculares à fibra, esta não sofre qualquer impacto na sua resistência. Por sua vez, em caso de força de compressão, o efeito no material é o “esmigalhar” do mesmo.

#### Reforços em partículas

Para além dos reforços em fibra, também é possível encontrar reforços em partículas, ou vulgarmente conhecido por compósitos particulados (CRP). Estas partículas podem variar em tamanho (pequenas, na casa do micron, ou grandes) e em forma (quadradas, triangulares e redondas). A partícula não pode reagir com o(s) elemento(s) da matriz e tem de ser humidificado pela liga líquida. Tendencialmente representam mais de 28% do volume do compósito, são de metal e cerâmica, e são embutidas na matriz de modo aleatório. As propriedades do material final depende do tamanho da partícula, do espaçamento entre elas e do volume que representam no produto final [27].

Em comparação com as fibras, os CRP são mais baratos tanto na matéria-prima como na sua produção, e produzem materiais mais homogêneos e controlados. Em solicitações ao desgaste, este reforço é mais aconselhável, uma vez que a dureza destes reforços é tendencialmente maior que as fibras.

A título de exemplo, o betão é um reforço particulado não metálico em uma matriz não metálica. Por sua vez, uma liga metálica com excelentes propriedades é obtida por um reforço metálico particulado numa matriz metálica, é exemplo disso partículas de chumbo numa matriz de cobre ou aço [28].

#### 2.1.4 “Sheet Mould Compound” (SMC)

O “Sheet Mould Compound” é, como o nome indica, um composto polimérico de moldação em forma de “folha”, também designado por pré-impregnado. É constituído essencialmente por uma matriz em resina termoendurecível com reforço de fibra de vidro e cargas minerais (Figura 18). Este material é adequado para peças estruturalmente reforçadas, com acabamento nos dois lados. É ideal para a produção em quantidades moderadas e altas, de 5 000 a 10 000 peças por ano.

O SMC é composto por vários componentes, principais e secundários:

- Principais:
  - Poliéster não saturado – Agente ligante dos vários componentes que promove o escoamento do material;
  - Fibra de vidro – Componente que confere a resistência e durabilidade da peça final;

- Secundários:
  - Aditivos termoplásticos - Reduzem a contração e melhoram o aspeto da superficial da peça final;
  - Catalisadores ou Inibidores – Iniciam a reação química de polimerização, que vai provocar a passagem do poliéster insaturado e do monómero presente na resina, do estado líquido ao estado sólido.
  - Agentes desmoldantes – Facilitam a extração da peça do molde;
  - Espessantes – Provocam uma reação que transforma a mistura resinosa para SMC, num material facilmente manipulável com propriedades reprodutíveis.
  - Estireno – Aumenta o escoamento do material;
  - Cargas minerais – Promovem a qualidade superficial e dependendo da dosagem promovem propriedades como resistência ao fogo, isolamento térmico e/ou elétrico.

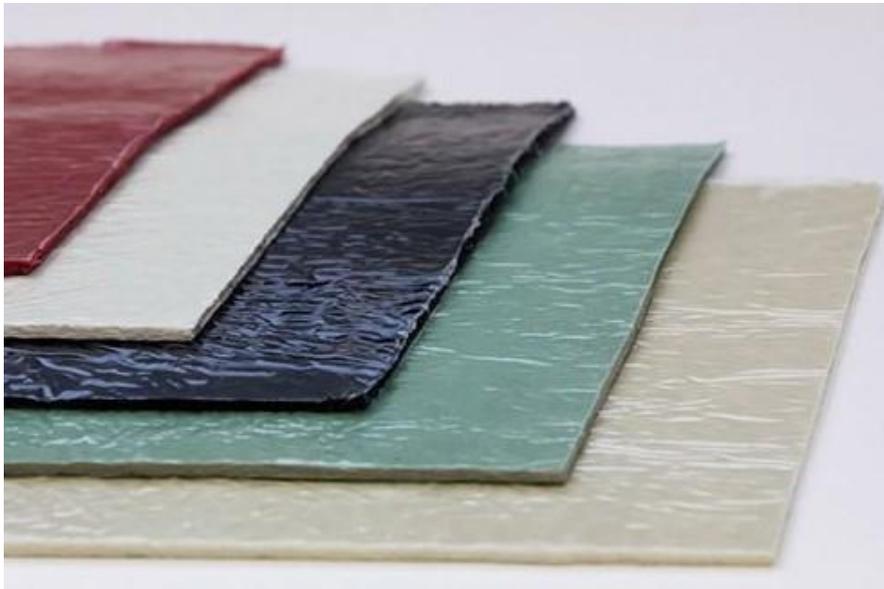


Figura 18 - "Folhas" de SMC com pigmentos à cor [29]

Dependendo das propriedades pretendidas do material, as percentagens de cada um dos componentes são ajustadas de modo a obtê-las. São elas:

- Resistência mecânica;
- Inflamabilidade (exemplo: veículos do setor público com regulamentações de segurança e ambiente restritas);
- Densidade, consequentemente variação do peso no produto final (exemplo: indústria automóvel, aplicável de alta performance);
- Resistência ao calor.

A grande mais valia do SMC é a diversidade em termos de design, de dimensão de produto final e a estabilidade dimensional.

### 2.1.4.1 Processo de fabrico

O processo de fabrico do SMC é produzido em quatro etapas. Primeira etapa, tal como referido anteriormente, é a mistura entre a resina e todas as cargas minerais que promovem ou não, uma determinada propriedade. Esta mistura está em constante monitorização de modo a garantir os corretos parâmetros. Segunda, os pigmentos são introduzidos para dar cor ao material e do ativador. A introdução do ativador inicia o processo de maturação da mistura, que por sua vez é dividida em dois grupos, um para a camada inferior e outro para a camada superior. No interior é depositada aleatoriamente a fibra de vidro cortada com 20 a 25 mm de comprimento. Estas camadas são devidamente compactadas de forma a impregnar as fibras na mistura. Terceira, o impregnado é envolto com duas películas de plástico, e desta forma permitir a conservação da mistura e o enrolamento em bobine (Figura 19).

Por fim, segue o processo de maturação a uma temperatura controlada, geralmente com uma duração de 48h a uma temperatura de 30°C. Após a maturação, possui um prazo de validade para ser moldado, podendo ir de várias semanas, a vários meses [30].

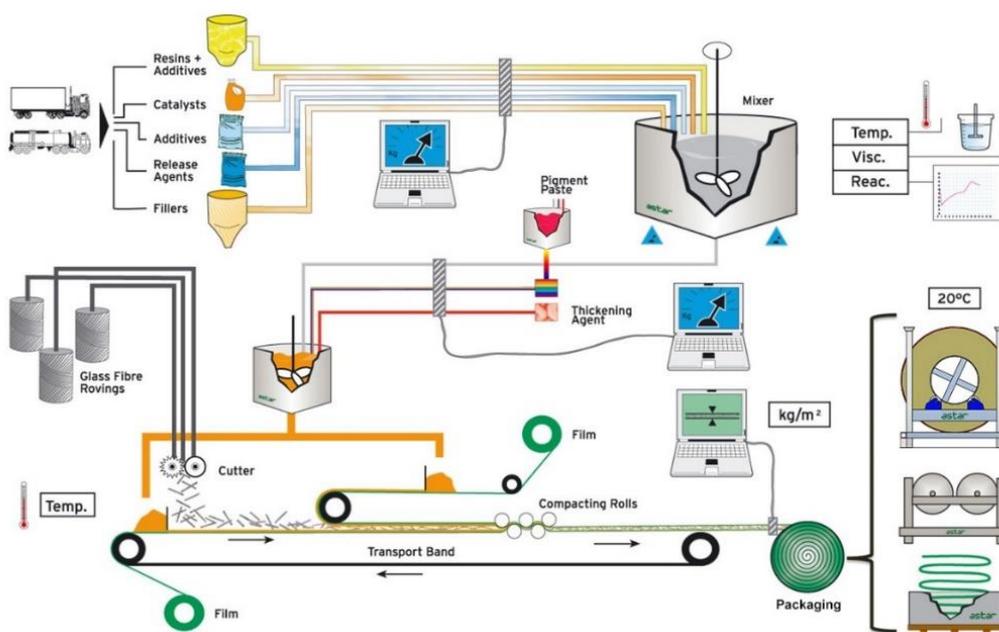


Figura 19 - Processo de fabrico do SMC [29]

### 2.1.4.2 Processo de moldação

O único método para moldar SMC é por compressão a quente, efetuada através de um molde de compressão com duas figuras moldantes que conferem à peça o design pretendido. Geralmente, as figuras são feitas em aço forjado com um acabamento superficial em crómio, de modo a aumentar a durabilidade, e projetadas de forma a serem aquecidas a uma temperatura entre 130 e 160°C. A pressão é dada em função do SMC, cada material tem um intervalo de pressão de trabalho recomendada, tendencialmente entre 30 e 120 bar.

Dependendo da geometria da peça e/ou das condições de trabalho da empresa, os moldes de compressão podem ter vários elementos, estando os mais comuns descritos abaixo e alguns deles representados na Figura 22:

- Cavidade (Figura 20) – Tal como na fundição, a cavidade, tendencialmente dita a parte visível da peça, onde será aplicado o acabamento final da mesma. Linhas de estilo, texturas, *in-mould coating* (IMC), pintura, entre outros, são normalmente aplicados nesta face da peça. Por regra a cavidade costuma localizar-se na parte móvel, por isso é menos propícia a defeitos gerados pelo processo. Contudo, há situações em que o design da peça, ou outros fatores impossibilitam esta situação. Nestes casos, a cavidade pode ser projetada para a parte fixa do molde. A cavidade, devido à dilatação do aço, necessita de uma temperatura de trabalho superior ao punção.
- Punção da peça (Figura 21 e Figura 22, Legenda 1) – O punção é o par da cavidade. Enquanto um dita a parte exterior da peça, o outro dita a parte interior. Geralmente é deste lado que são colocados todos os elementos que permitem desmoldar a peça, mais concretamente sopro e/ou extração. O punção tem a menor temperatura no molde e normalmente localiza-se na parte fixa do mesmo, tal como explicado anteriormente.



Figura 20 - Cavidade molde de compressão - Fonte: Elaborada pelo autor



Figura 21 - Punção molde de compressão - Fonte: Elaborada pelo autor

- Pré-guiamento (Figura 22, Legenda 2) – Quando a parte móvel inicia o fecho do molde, de modo a evitar danos desnecessários ao mesmo, existe um primeiro sistema de guiamento entre ambos, o pré-guiamento. Este sistema não é mais que quatro colunas presentes no punção, sendo que uma está desfasada para servir como anti erro ao incorreto posicionamento de uma parte em relação à outra. Na cavidade temos quatro casquilhos, que entram em contato e guiam o fecho do molde. Este sistema é pouco preciso, e apesar de proteger o molde em si, não é suficiente para proteger a câmara de compressão. Por este razão existe um segundo sistema de guiamento, as guias prismáticas;
- Guias prismáticas (Figura 22, Legenda 3) – As guias prismáticas são placas calibradas de bronze, endurecidas com grafite, geralmente posicionadas nas

paredes verticais entre a cavidade e o punção. Estas servem como guiamento final durante o fecho do molde;

- Sopro e/ou extração mecânica – são dois sistemas para auxiliar a extração da peça. O sopro, como o nome indica, são pontos de sopragem que ajudam a desmoldar a peça. A extração mecânica é composta por tubulares que sobem quando o molde abre, e por sua vez levantam a peça em relação ao molde. A aplicação de um ou de outro varia com vários fatores, desde o design, tipo de peça (classe A, B ou C) e peso da mesma. Estes sistemas são geralmente aplicados no lado não visível da peça, pelo facto de deixarem pequenas marcas na superfície da peça;
- Batentes de fecho (Figura 22) – 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);
- Vácuo (Figura 22, Legenda 4) - Sistema de extração de ar do interior do molde. Não é aplicado em todos os moldes, mas a qualidade da peça só tem a beneficiar com a sua aplicação. Serve principalmente para reduzir crateras ou micro porosidades, que podem aparecer na peça final, devido ao aprisionamento do ar entre as camadas de SMC e nas extremidades da figura, aquando do escoamento do material;
- Batente antirretorno (Figura 22, Legenda 5) – Elementos em aço, ligados à placa dos pinos de extração, de modo a impedir que no processo de fecho os extratores toquem na outra parte do molde;
- Batente de fecho (Figura 22, Legenda 5) – discos em aço endurecido para delimitar o limite de fecho do 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;
- Placas de isolamento – Uma vez que todo o conceito de moldação assenta no aquecimento da matéria prima de modo à mesma escoar na figura, é importante que existe um sistema de isolamento no mesmo. Isto para evitar perdas de calor, para preservar principalmente os componentes elétricos e por questões de segurança dos operadores;
- Circuito elétrico – É um sistema que lê o ponto de situação do molde passo a passo, seja movimentos, temperaturas, entre outros. Toda esta informação é transferida para a prensa, onde é realizada a gestão dessa mesma informação, de modo a executar as várias etapas do processo de moldação, abertura e fecho do molde, avanço e recuo da extração.

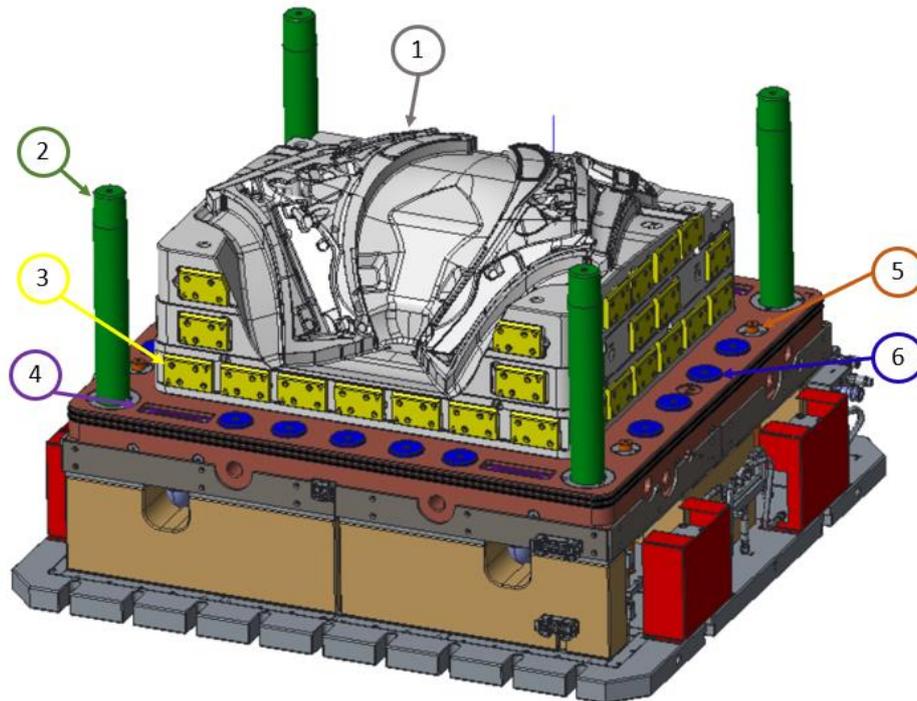


Figura 22 - Esquema 3D de um molde de compressão - Fonte: Elaborada pelo autor



Figura 23 - Molde de compressão aberto - Fonte: Elaborada pelo autor

Para além do molde, são necessários outros equipamentos para a execução da peça. Estes diferem consoante o volume de produção, o nível de automação da linha e principalmente a qualidade e geometria final da peça. Mas de uma forma geral são necessárias mesas de corte de SMC, balanças, arrefecedores/conformadores específicos à peça e bancas de rebarbagem.

O processo de moldação por compressão assenta nas seguintes etapas:

- Corte do SMC e preparação da carga – é cortado o SMC com o peso, forma e dimensão pré-estabelecida;
- Colocação da carga – a carga é disposta estrategicamente no molde;
- Moldação – etapa de polimerização da peça, onde a prensa fecha o molde, comprime o material à pressão definida e durante o tempo de ciclo de polimerização especificado em função da espessura da peça;
- Desmoldagem – o molde abre e retira-se a peça moldada com a ajuda dos sistemas de extração (sopro e extração mecânica);
- Arrefecimento/conformação e rebarbagem – Algumas das peças são colocadas em arrefecedores ou conformadores para que o arrefecimento da peça seja controlado de modo a evitar possíveis empenos. Posteriormente, toda a periferia da peça tem de ser lixada para eliminar os excessos da moldação.

Terminada a etapa de moldação, e dependendo da peça, com cortes ou sem cortes, com componentes ou sem componentes, com acabamento superfície ou sem este, a mesma pode sofrer várias etapas de processo após a moldação. Algumas dessas etapas podem ser:

- Corte CNC ou CJA;
- Pintura regular ou classe A;
- Montagem de componentes;
- Colagem e/ou injeção.

#### 2.1.4.3 Aplicações

Iniciando pelo catálogo da IPL, e peças de industriais menos conhecidas, o SMC pode ser encontrado em pequenas indústrias como o fabrico de bancos de estádio e tabuleiros para cantinas (Figura 24).



Figura 24 - Aplicação de peças em SMC em tabuleiros de cantina - Fonte: Elaborada pelo autor

No que respeita a indústria automóvel (Figura 25), nos EUA, em 1953, foi publicado o primeiro trabalho no tema SMC. Contudo as primeiras aplicações práticas só vieram a surgir em 1960, em moldação manual. O desenvolvimento da produção em massa só veio a acontecer em meados de 1969, com a produção do primeiro carro com peças em SMC, Chrysler Station. No contexto Inapal Plásticos, a produção do primeiro carro com peças em SMC só veio a surgir em 1994, no VW Sharan. Atualmente já são produzidas peças tanto em classe C (compartimento de motor) como classe A (malas pintadas à cor final do carro) [31].



Figura 25 - Evolução da aplicação de peças em SMC na indústria automóvel [32]

A aplicação do SMC não é exclusiva à indústria automóvel. No catálogo de peças da IP, podem ser encontradas peças neste compósito para a indústria dos camiões, dos transportes públicos (autocarro e comboio), e na indústria de refrigeração em veículos (Figura 26).



Figura 26 - Evolução da aplicação de peças em SMC na indústria dos camiões e transportes públicos [32]

## 2.2 Caracterização dos materiais

### 2.2.1 Propriedades de resistência mecânica – Ensaio de tração

No âmbito da caracterização dos materiais, o ensaio de tração é o mais usado pelo facto de ser um ensaio de fácil e rápida execução, e ter uma ótima reprodutibilidade. Trata-se de um ensaio, cujo processo de execução está documentado por diferentes normas. Como por exemplo, a NP/EN 10002-1, DIN 50125, DIN 50145, DIN 50146, ASTM A 370-E8, AFNOR A03-151, AFNOR, A03-160 e a DIN EN ISO 527. Permite obter experimentalmente as propriedades mecânicas, principalmente as propriedades relacionadas com a resistência do material [33]. Contudo, trata-se de um ensaio destrutivo. No qual, habitualmente, o provete é solicitado até a ocorrência da rotura.

#### 2.2.1.1 Procedimento de ensaio

O procedimento de todo ensaio mecânico deve respeitar a norma de forma a garantir a uniformização, repetibilidade e sucesso do mesmo. Existem fatores que devem ser seguidos tais como:

- Condições ambientais durante a realização do ensaio
- Tipo de provete com respetivas dimensões
- Fixação do provete à máquina de ensaio;
- Pré-carga do provete;
- Configuração do extensómetro;
- Velocidade de ensaio;
- Registo de dados.

#### Condições ambientais durante a realização do ensaio

A temperatura e humidade do espaço devem manter-se estáveis ao longo do ensaio para evitar alterações características dos corpos.

#### Tipo de provete com respetivas dimensões

A forma como é estruturado o ensaio subdivide-se em duas categorias. Ensaio cujos provetes são maciços, normalmente conhecidos por provetes *bulk*, ou então ensaios de juntas, designados por método de juntas de topo. O ensaio de tração de provetes maciços é utilizado com maior frequência. Estes provetes são produzidos em grande parte através de maquinaria, mas também por puncionagem ou fundição. A geometria pode ser circular, retangular, quadrada, entre outras, de acordo com a norma utilizada. A Figura 27 representa as dimensões gerais do provete para o ensaio de tração segundo a norma EN ISO 527-4, cuja espessura pode ir dos 2 aos 10 mm.

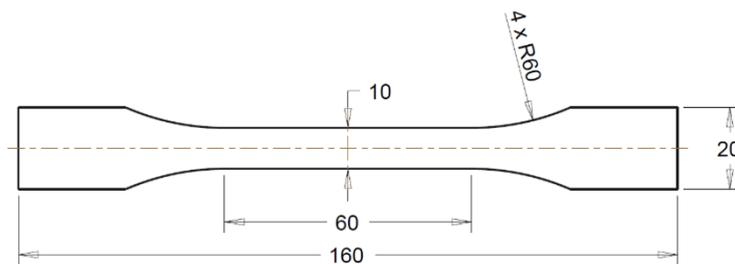


Figura 27 - Provete maciço segundo a norma EN ISO 527-4 [34]

O facto de serem constituídos exclusivamente pelo material em causa, leva a que não haja influência dos aderentes quando comparado com o método de juntas de topo.

Contudo para o método de ensaio através de juntas topo traduz um efeito muito próximo da realidade, especialmente, quando usado para determinar o módulo de elasticidade, módulo de rigidez e coeficiente de Poisson dos adesivos. Este tipo de provete é constituído por dois substratos metálicos ligados entre si pelo adesivo, conforme representa a Figura 28. Estes podem ser de secção circular ou retangular.



Figura 28 - Representação esquemática da junta de topo a topo [35]

Contudo, possui algumas desvantagens quando comparado com os provetes maciços. O fabrico dos provetes de juntas topo a topo requer um maior rigor, uma vez que deve ser garantido o perfeito alinhamento axial entre os substratos. Pelo efeito de Poisson, o desalinhamento do provete traduz-se numa distribuição não uniforme de tensões, que origina esforços de flexão. Por conseguinte, influencia a resistência da junta.

Fixação do provete à máquina de ensaio

De acordo com a tipologia e geometria do provete, são usadas cabeças de amarração específicas para cada um dos casos (Figura 29). Deve ser garantido o correto alinhamento axial do provete, assim como a distância entre amarras definida na norma. É necessário ter em atenção a força exercida no provete de forma a não introduzir tensões internas que possam influenciar os resultados do ensaio.



Figura 29 - Amarra de fixação dos provetes à máquina de ensaio - Fonte: Elaborada pelo autor

#### Pré-carga do provete

De forma a reduzir as possíveis tensões internas geradas aquando do fabrico ou fixação do provete, é possível aplicar uma pré-carga antes de iniciar o ensaio. Segundo a norma EN ISO 527, esta tensão inicial deve estar compreendida nos intervalos definidos na Equação (1) e (2) [34].

$$0 < \sigma_0 \leq \frac{E_t}{2000} \quad (1)$$

Este intervalo corresponde a uma  $\varepsilon_0 \leq 0,05\%$ , aplicando a lei de Hooke.

$$0 < \sigma_0 \leq \frac{\sigma^*}{100} \quad (2)$$

Sendo que  $\sigma^* = \sigma_y$  ou  $\sigma^* = \sigma_m$ , por exemplo.

No caso de a tensão inicial estar fora do intervalo, deve proceder-se ao alívio da tensão com uma velocidade de 1 mm/min até estar dentro do intervalo.

#### Configuração do extensómetro

O extensómetro tem como função medir os deslocamentos dos provetes de ensaio em tempo real. Quanto maior a flexibilidade e ductilidade do material, maior deve ser a capacidade do extensómetro de forma a permitir a medição do deslocamento do provete durante o regime elástico. Os extensómetros mais comuns são mecânicos, do tipo indutivo ou resistivo. Estes são fixos nas extremidades da zona de estrição do provete, conforme observa-se na Figura 30. Devem ser retirados antes de ocorrer a rotura do provete de forma a não sair danificada. Por norma, são retirados assim que se atinge o regime plástico. Os extensómetros óticos (Figura 31) têm a possibilidade de medir a deformação até à rotura do provete e ainda previnem a introdução de possíveis tensões que podem influenciar o ensaio.



Figura 30 - Extensômetro mecânico [36]



Figura 31 - Extensômetro ótico [36]

### Velocidade de ensaio

Este parâmetro é especificado na norma com um intervalo de velocidades de ensaio recomendadas consoante diferentes variáveis. No caso da norma ISO 527-1, a velocidade de ensaio pode ser de 0,125 mm/min a 500 mm/min, onde é restringida pela capacidade da máquina de ensaio e respetiva tolerância. Este parâmetro pode ser ajustado de acordo com o comportamento dos provetes durante o ensaio [37].

### Registo de dados

Inicialmente é necessário verificar se o sistema de aquisição de dados cumpre com os requisitos mínimos quanto à frequência de aquisição como à tolerância de medição. São necessários três canais de aquisição de dados. O primeiro para medir o alongamento do provete através do extensômetro. O segundo mede a força exercida na tração. E por fim, o terceiro para medir o deslocamento entre maxilas. Este último pode ser prescindido no caso de não existirem canais suficientes.

#### 2.2.1.2 Propriedades do material – Curva tensão-deformação

Conforme mencionado no procedimento, ao longo do ensaio é registada a força de tração exercida pelas maxilas no provete. Esta força gera uma reação interna que é responsável pelo estabelecimento do equilíbrio do corpo. Esta reação é designada por tensão e trata-se da resistência interna do corpo a uma força externa ( $F$ ) aplicada sobre ele, por unidade de secção ( $S_0$ ), como indica a equação (3) [33]. Sendo  $F$  a força exercida sobre o corpo e  $S_0$  a área da secção calibrada do provete.

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (3)$$

A tensão aplicada gera um alongamento no provete. Desta forma, a diferença entre o comprimento de referência final e inicial ( $\Delta L$ ), dividido pelo comprimento calibrado do provete ( $L_0$ ), dá uma grandeza adimensional designada por deformação ( $\varepsilon$ ) como indica a equação (4) [38].

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4)$$

Com estes dados, é criado o gráfico tensão-deformação, sendo que a tensão e a deformação estão alocadas ao eixo das abcissas e ao eixo das ordenadas, respetivamente. Como a secção é considerada constante, a tensão é dada em função da força ( $F$ ),  $\sigma(F)$ . Assim como o comprimento inicial do provete também é constante, a deformação é dada em função da diferença entre o comprimento final e inicial do provete ( $\Delta L$ ),  $\varepsilon(\Delta L)$ . As curvas tendem a ter geometrias semelhantes às representadas na Figura 32, consoante a natureza e comportamento do material.

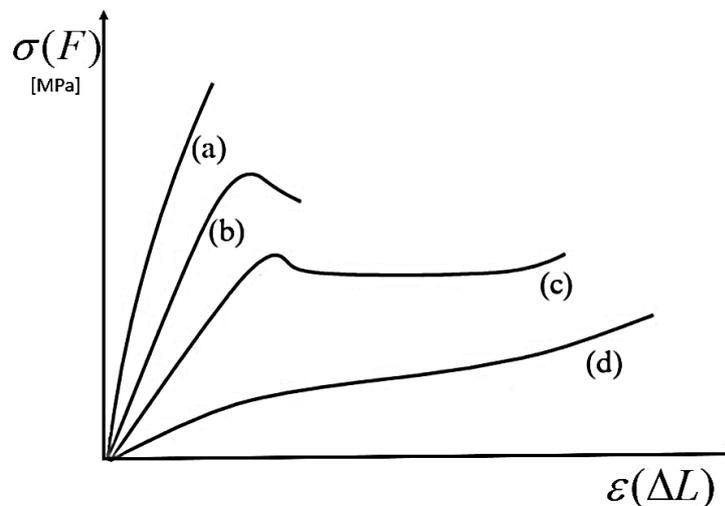


Figura 32 - Curvas típicas de  $\sigma$ - $\varepsilon$  - Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 32, a curva (a) representa um material frágil, cuja rotura ocorre com pequenas deformações. Contrariamente, a curva (d) apresenta um comportamento de um material dúctil, o qual conserva a sua tensão mecânica para além do seu limite elástico sem ocorrer a rotura. Na curva (b) trata-se de um material com baixa tenacidade e na curva (c) verifica-se o oposto, ou seja, possui capacidade de absorção de energia no domínio plástico. Nas curvas (a), (b) e (c) da Figura 32 verifica-se inicialmente uma linearidade, trata-se do regime elástico do material. O regime elástico é definido como o intervalo de tensões/deformações suportadas pelo corpo, sem deixar qualquer deformação permanente quando estas são descarregadas. Este regime obedece à lei de Hooke, cuja representação é feita pela equação (5) ou (6).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6)$$

O módulo de elasticidade ( $E$ ), ou também conhecido por módulo de Young, é traduzido pelo valor do declive da curva  $\sigma$  -  $\varepsilon$  no regime elástico.

Segundo a norma EN ISO 527-1 [37], o módulo de elasticidade, ( $E_t$ ), também pode ser calculado pelo declive da reta formada pelos pontos do gráfico referentes a 0,05% e 0,25% de deformação, equação (7) (Figura 33).

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \quad (7)$$

onde a tensão 1 ( $\sigma_1$ ) é o valor de tensão do gráfico para uma deformação 1 ( $\varepsilon_1$ ) igual a 0,05% e a tensão 2 ( $\sigma_2$ ) é o valor de tensão do gráfico para uma deformação 2 ( $\varepsilon_2$ ) igual a 0,25%.

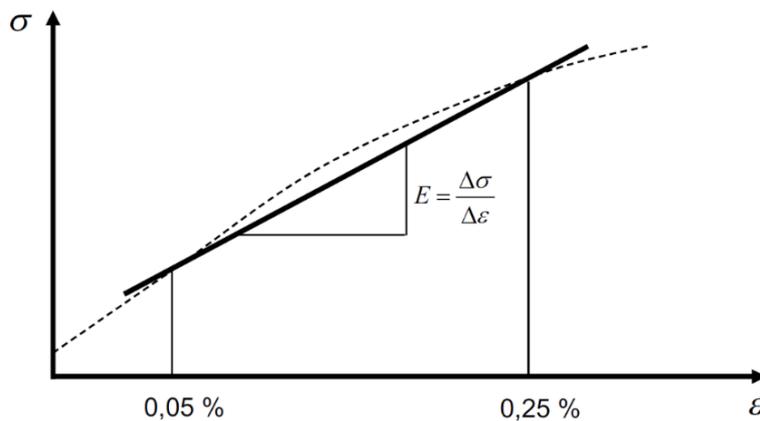


Figura 33 - Gráfico  $\sigma$ - $\varepsilon$  - Fonte: Elaborada pelo autor

No caso de tratar-se de materiais cuja zona elástica é muito pequena ou inexistente, há alternativas para definir o módulo de elasticidade, módulo de tangente inicial, módulo de tangente ou módulo secante. O primeiro obtêm-se traçando uma tangente à curva a partir do ponto de origem. O segundo traçando uma tangente num determinado ponto da curva. Por fim, o módulo secante é dado através de uma reta que liga o ponto de origem a um determinado ponto da curva [38]. Estes métodos são exemplificados na Figura 34.

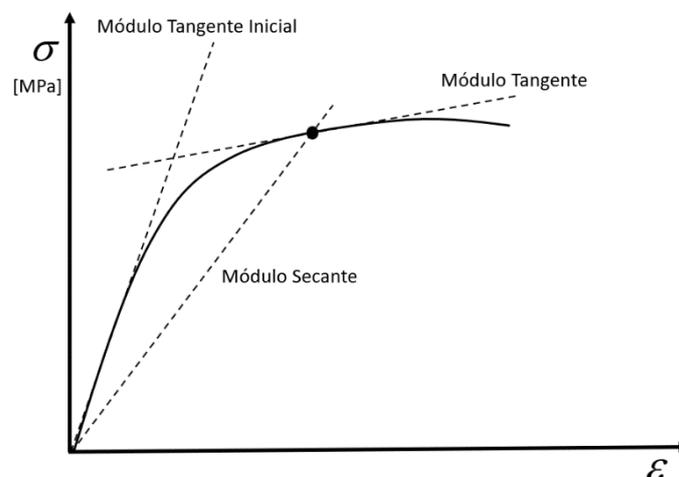


Figura 34 - Traçados dos módulos de elasticidade tangentes e secante - Fonte: Elaborada pelo autor

Após o regime elástico, atinge-se o regime plástico, no qual deixa de existir uma proporcionalidade entre a tensão e a deformação. Passa sim a existir uma deformação permanente ou residual devido à descarga das tensões. A Figura 35 mostra um alívio de tensões entre ponto B, na zona elástica, até à linha das abcissas. Observa-se uma regressão da deformação, na mesma proporcionalidade, aquando da deformação no regime elástico. Ficam apenas as deformações ocorridas no regime plástico [38].

A transição entre o regime elástico e o regime plástico difere consoante os diferentes tipos de materiais. Esta corresponde à tensão limite de elasticidade, que pode ser obtida por vários métodos.

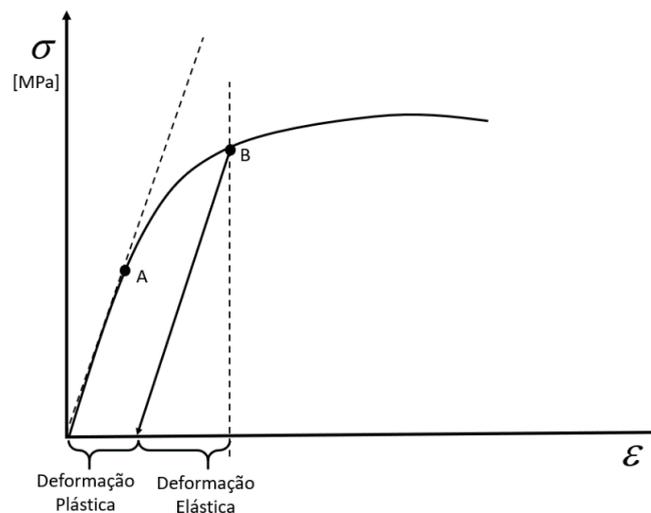


Figura 35 - Gráfico  $\sigma$ - $\epsilon$  - Regime elástico vs. Regime plástico - Fonte: Elaborada pelo autor

Para os materiais metálicos, ligas metálicas, entre outros, define-se a transição na zona onde ocorre o patamar de cedência, ou seja, tensão de cedência ( $\sigma_{ced}$ ) (Figura 36).

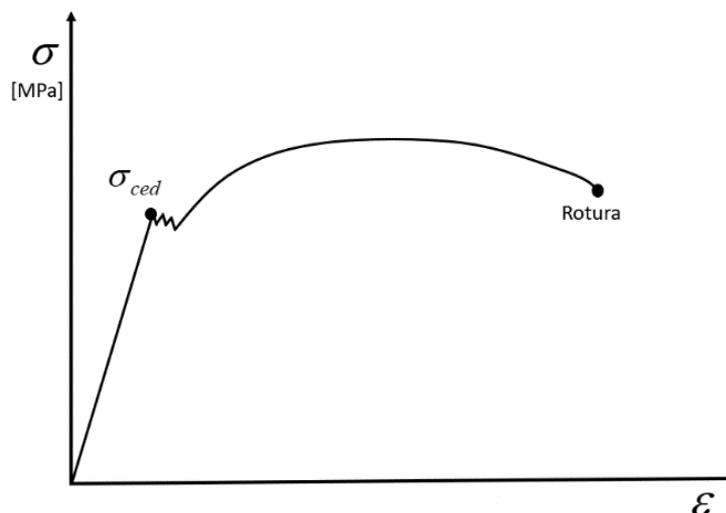


Figura 36 - Gráfico  $\sigma$ - $\epsilon$  com patamar de cedência - Fonte: Elaborada pelo autor

O seguinte método passa por determinar o valor da “tensão limite de proporcionalidade  $n$ ” sendo que  $n$  corresponde à percentagem de deformação. Habitualmente usa-se uma

deformação de 0,2 %, ou seja, uma “*tensão limite de proporcionalidade de 0,2%*”,  $\sigma_{0,2}$ . Deste modo, o valor é obtido através de uma reta paralela à reta de proporcionalidade entre a tensão e a deformação, quando a mesma intersecta o eixo das abcissas e o ponto de deformação de 0,2% [39]. Conforme exemplificado na curva (a) da Figura 37.

Quando se trata de materiais frágeis, a tensão de cedência ( $\sigma_{ced}$ ) é definida na interseção entre a reta tangente ao regime elástico e a reta tangente ao regime plástico. De acordo com a representação da Figura 37.

Para materiais dúcteis, considera-se que a tensão limite de elasticidade é aproximadamente igual à tensão de rotura ( $\sigma_r$ ). Como por exemplo a curva (b) da Figura 37.

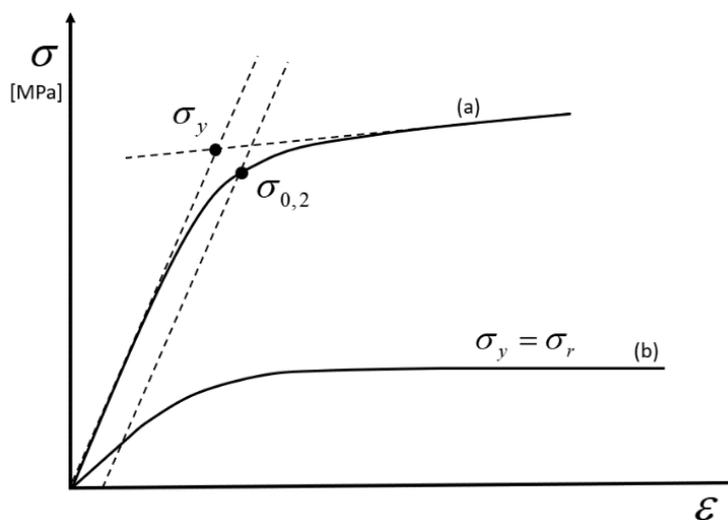


Figura 37 - Métodos para determinação da  $\sigma_y$ - Fonte: Elaborada pelo autor

A tensão de rotura é fortemente influenciada pela presença de fendas ou faltas de enchimento. Estes fatores originam concentração de tensões indesejáveis. E por conseqüente, os valores de tensão de rotura para os diferentes provetes apresentam uma grande dispersão. A menos que o fabrico dos provetes seja muito bem controlado de forma a evitar estes pequenos defeitos [40].

### 2.2.2 Propriedades de resistência mecânica – Ensaio de corte

Os ensaios de corte utilizam-se quando se pretende saber o módulo de corte,  $G$ , de um material. Existem vários métodos que explicam como o mesmo deve ser realizado, mas de acordo com os autores do livro *Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, “...nenhum é universalmente aceite.” [23].

O maior problema deste tipo de ensaio consiste em obter um provete com um corte preciso num volume de amostra representativo, para que os métodos apresentem um módulo de corte satisfatório.

Para além da dificuldade anteriormente referida, outra dificuldade nos ensaios de corte é como fixar os provetes ao equipamento de modo a que a única força aplicada seja a

força que vai gerar o corte, tendencialmente, esta força tem de ser paralela ao plano de corte. Para além do descrito anteriormente, é necessário perceber como eliminar as tensões secundárias geradas pela sobreposição dos blocos do provete.

Apesar disto, existem vários tipos de métodos para vários tipos de provetes:

- Provede sólido;
- União entre provedes do mesmo material;
- União entre provedes de materiais diferentes.

Alguns dos métodos estão detalhados em normas como ISO14129, ASTM D3518, ASTM D4255, ASTM D5379, ISO 15310, ASTM D9051, ASTM4501, entre outras. O método de losipescu é direcionado para laminados compósitos sólidos, onde é necessário abrir um entalhe no provede e a força é aplicada diretamente no entalhe.

Neste caso de estudo desta dissertação, o ensaio de corte será regido pela norma ASTM4501. Este ensaio tem sido aplicado principalmente na caracterização de adesivos; no entanto, pode ser aplicado a amostras sólidas. Este teste pode ser realizado com o equipamento disponível no ISEP.

Em 1947, foi publicada uma das primeiras normas referentes à colagem de blocos em madeira, ASTM D905, vulgarmente conhecida como o teste de cisalhamento de blocos sobrepostos. Ao longo dos anos esta norma foi aplicada a laminados compósitos. O pressuposto da mesma assenta na união de dois blocos com o mesmo comprimento e largura, com ou não a mesma espessura, numa geometria ligeiramente escalonada, de modo a que o equipamento de ensaio possa suportar um bloco, enquanto que no outro bloco é aplicada força, seja ela de tração ou compressão[41], como mostra a Figura 38.

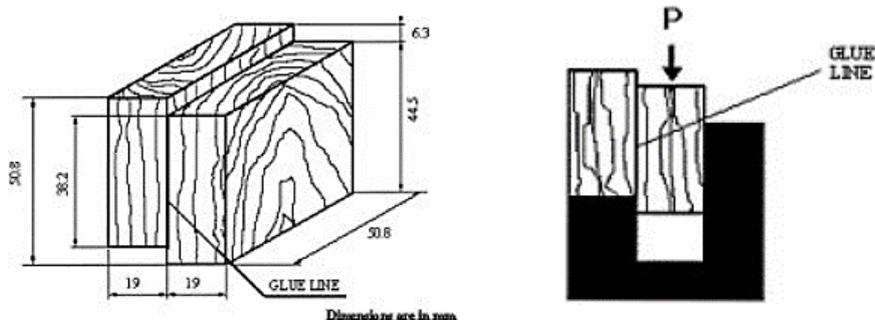


Figura 38 - Representação do provede e do princípio de aplicação de força da norma ASTM D905 [42]

Já em 1985, foi publicada uma norma similar à anterior, mas direcionada para a colagem de plásticos e compósitos reforçados com fibra, ASTM D4501, norma usada no decorrer da dissertação. Novamente, esta norma é aplicada quando existe a sobreposição de dois blocos do mesmo material ou não, com o mesmo comprimento e largura, com a mesma espessura ou não, unidos por um adesivo (Figura 39). O método usado é conhecido como o método guilhotina [43].

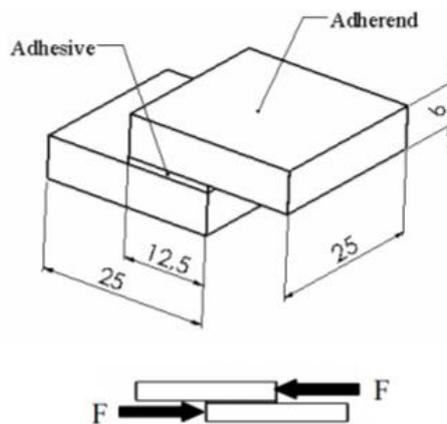


Figura 39 - Representação do provete e princípio de aplicação de força da norma ASTM D4501 [44]

### 2.2.2.1 Procedimento de ensaio

Na Figura 40 está representado o mecanismo de cisalhamento para realização do ensaio segundo a norma ASTM D4501. As extremidades do mesmo são montadas nas amarras da máquina de ensaios.

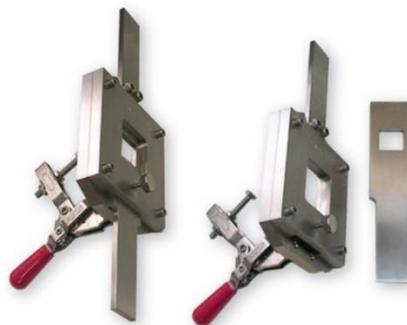


Figura 40 - Dispositivo de teste para ASTM D4501 [45]

A montagem do provete é realizada manualmente através do seu posicionamento dentro do quadrado presente no dispositivo. A parte móvel do dispositivo de cisalhamento é então ajustada de modo a que ocorra o bloqueio do provete. Quando este está devidamente bloqueado, sem que força esteja a ser exercida no mesmo, a posição entre maxilas é definida como referência inicial de deslocamento. De seguida é aplicado um deslocamento a velocidade constante até à rotura do provete. Na máquina de ensaio é definida a velocidade de acordo com a recomendação da norma. Para a norma ASTM 4501 é recomendada uma velocidade de 1,26 mm/min. Ao longo do ensaio, é registada a força exercida em função do deslocamento [46].

### 2.2.2.2 Propriedades do material

Quando aplicado em provetes de ensaio para ligações adesivas, o ensaio permite comparar a resistência das ligações adesivas com a resistência coesiva dos substratos e do adesivo. Através da inspeção visual, verificando o tipo de rotura ocorrida. Neste caso

de estudo, incide no SMC para o qual foram feitos provetes maciços. Assim sendo, o objetivo passa por quantificar a resistência ao corte através da tensão de corte máxima,  $\tau_{m\acute{a}x}$ . Esta é dada pela equação seguinte:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{S_0}, \quad (8)$$

onde  $S_0$  corresponde à secção do plano de corte e  $P_{m\acute{a}x}$  à força máxima atingida no ensaio.

O módulo de corte pode ser calculado pela força aplicada na secção do plano de corte a dividir pela deformação angular de corte ( $\gamma$ ) [47].

$$G = \frac{\tau}{\gamma}. \quad (9)$$

Onde  $\gamma$  é calculada pela tangente do ângulo  $\vartheta$ . A Figura 41 representa um esquema da deformação ocorrida num corpo quando sujeita a esforços de corte.

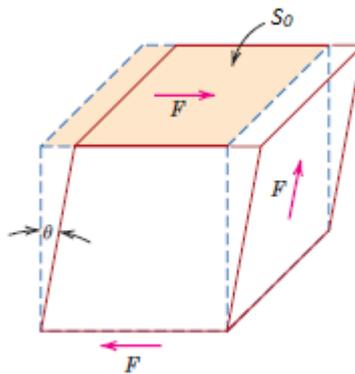


Figura 41 - Representação da deformação angular de corte - Adaptada de [48]

### 2.2.3 Propriedades de tenacidade à fratura

A caracterização do material quanto à tenacidade à fratura está assente na Mecânica de Fratura. Esta área estuda o comportamento à fratura, de componentes contendo defeitos sob diferentes condições externas. Por exemplo, a presença de delaminações numa peça compósita pode ter origem no processo de fabrico ou em solicitação à fadiga, mesmo quando esta sofre um impacto transversal a baixa velocidade. Estes defeitos podem levar a rotura catastrófica do componente. Perante esta situação, é de grande interesse para os projetistas conhecer as condições sob as quais essas fendas se propagam [49]. A tenacidade é a propriedade do material que define a sua capacidade de absorver energia até à sua rotura. Em suma, quanto maior a tenacidade à fratura do material, maior é a capacidade de o material resistir à propagação da fenda.

A caracterização da fratura pode seguir diferentes tipos de critérios e parâmetros. Neste capítulo será abordada com base na taxa crítica de libertação de energia ( $G_c$ ), sendo esta

uma propriedade do material. Na Figura 42 estão representados três modos de sollicitação das fendas, que utilizam metodologias diferentes para caracterização [50].

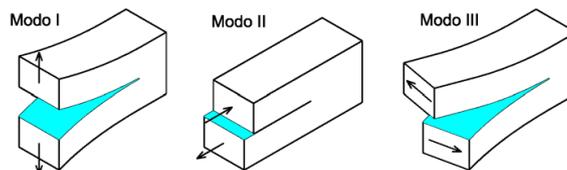


Figura 42 - Modos de sollicitação das fendas [51]

A caracterização à fratura em modo I é, na grande parte dos casos, analisada pelo ensaio “*double cantilever beam*” (DCB). Neste caso, a fenda sofre uma sollicitação à tração. O ensaio de modo II mais utilizado é o ensaio “*end-notched flexure*” (ENF), no qual a fenda é sollicitada ao corte segundo a direção perpendicular. Para o modo III, o ensaio mais adequado é o “*Edge Crack Torsion*” (ECT) [52], sendo que não será abordado neste trabalho.

### 2.2.3.1 Ensaio de fratura à tração – Modo I – *Double-Cantilever Beam* (DCB)

Atualmente, o ensaio DCB é o ensaio mais empregue para determinar a resistência à fratura em modo I. Trata-se de um ensaio relativamente simples de se realizar, estando documentado por normas, tais como a ISO 15024 [53], JIS K 7086 [54] e ASTM D5528-13 [55]. Tem como principal essência obter o valor da taxa crítica de libertação de energia em modo I ( $G_{Ic}$ ). É utilizado com o propósito de estabelecer comparação quantitativa:

- Mesmo compósitos:
  - Tratamentos superficiais;
  - Variações da fração volúmica de fibra;
  - Processo produtivo.
- Diferentes compósitos:
  - Propriedades consoante a aplicação final.

Segundo a norma ASTM D5525-13, direcionada para compósitos, os provetes são compostos por placas com um comprimento superior a 125 mm, 25 mm de largura e 3 a 5 mm de espessura. Numa das extremidades é introduzida uma fenda no plano intermédio com 50 mm de comprimento ( $a_0$ ), conforme representado na Figura 43.

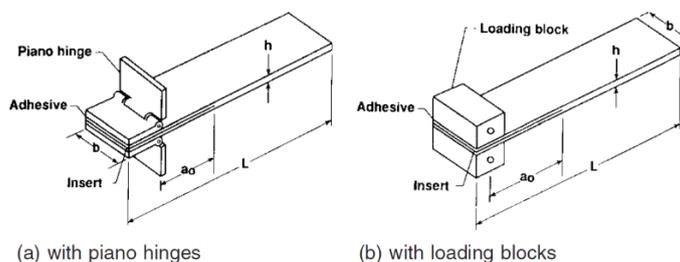


Figura 43 - Provetes de ensaio DCB segundo a norma ASTM D5528-13 [55]

O ensaio DCB consiste na aplicação de forças de tração na zona com a fenda, através da aplicação de dobradiças (Figura 43-a) ou blocos de carregamento (Figura 43-b), nessa mesma zona. O resultado destas forças traduz-se na propagação da fenda, a qual é medida através de uma escala previamente colada nas laterais do provete. Ao mesmo tempo, é feito o registo da carga ( $P$ ) aplicada e do deslocamento de abertura ( $\delta$ ) (Figura 44).

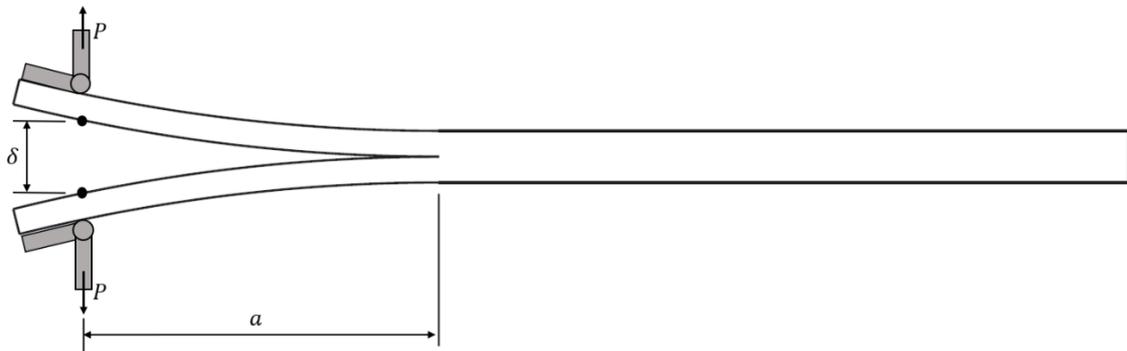


Figura 44 - Esquema do ensaio DCB - Fonte: Elaborada pelo autor

A análise dos ensaios de fratura é feita pela curva de resistência (curva R), que representa a evolução da taxa de libertação de energia à medida que a fenda se propaga (Figura 45).

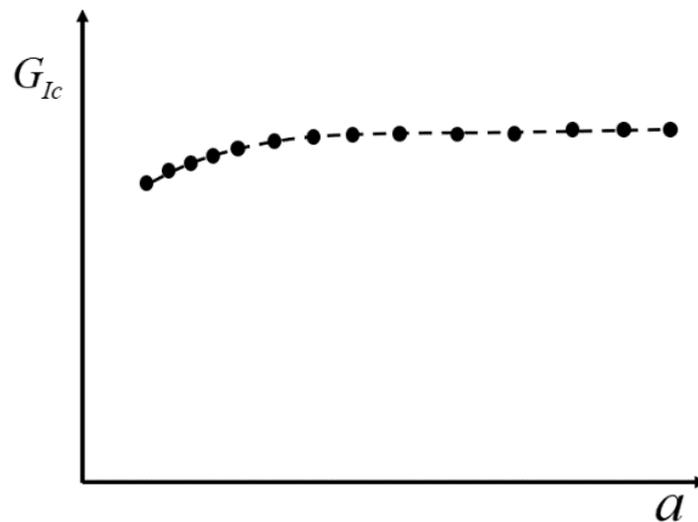


Figura 45 - Curva R de um compósito - Fonte: Elaborada pelo autor

A forma de propagação da fenda é fortemente influenciada pela fenda inicial. De modo que, a curva R apresenta um efeito inicial crescente até estabilizar. Desta forma, os valores de  $G_{Ic}$  a ter em conta na curva R, são os valores constantes que formam um patamar. Contudo, podem surgir efeitos negativos que influenciam o comportamento da curva, tais como o fenómeno de pontes de fibras (Figura 46) a qual consiste na migração de fibras entre a parte superior e inferior do plano médio de propagação da fenda [56].

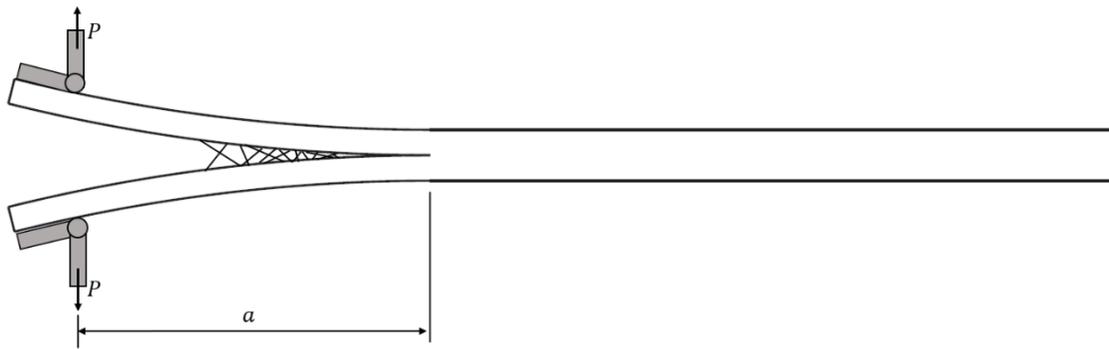


Figura 46 - Representação do fenômeno ponte de fibras num compósito - Fonte: Elaborada pelo autor

A medição da propagação requer algum cuidado, uma vez que pode ser instável. Nem sempre a ponta da fenda é claramente visível, daí ser aplicado um verniz frágil na lateral dos provetes e utilizadas ferramentas óticas para facilitar esta medição [57]. Segundo Davidson, pode ainda ocorrer o fenômeno de curvatura da fenda em alguns materiais compósitos. A fenda inicia com uma frente reta, porém propaga-se com uma forma curva devido às ligações elásticas dos materiais [58], conforme representado na Figura 47.

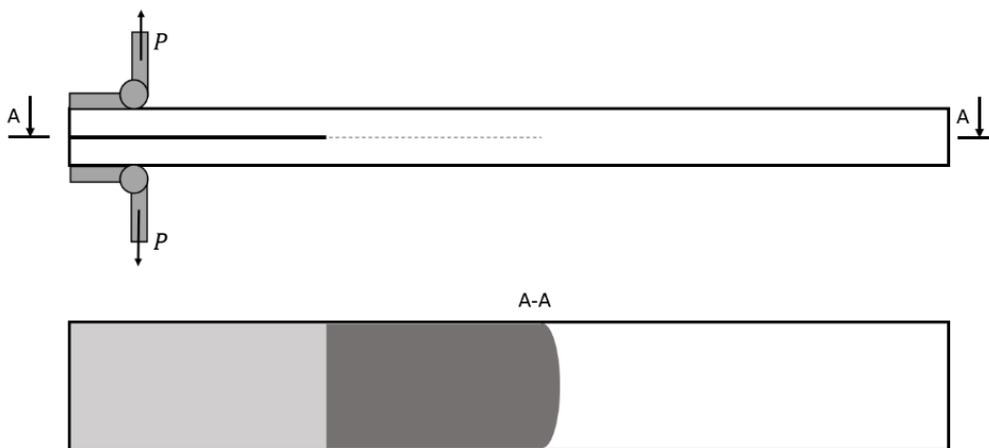


Figura 47 - Simulação da Curvatura da frente da fenda - Fonte: Elaborada pelo autor

### 2.2.3.1.1 Procedimento do ensaio “Double-Cantilever Beam” (DCB)

Inicialmente, deve-se fazer a preparação dos provetes. Isto implica primeiramente, o fabrico dos mesmos de acordo com as medidas e tolerâncias estabelecidas na norma pela qual o ensaio é regido. De seguida, a aplicação de uma tinta ou verniz frágil na lateral de forma a facilitar a visualização da propagação da fenda. Nessa mesma lateral, é colada uma escala milimétrica que serve de auxílio na medição do comprimento de fenda durante o ensaio [59]. Por fim, são aplicados os sistemas de fixação, como exemplifica a Figura 43-a.

Com isto, os provetes com o sistema de fixação são montados numa máquina universal de ensaios através de amarras ou gabarits adequados. Estes devem garantir o correto alinhamento entre o provete e a força ao longo do todo o ensaio. A velocidade deve ser

constante com um valor compreendido entre 1 e 5 mm/min, dependendo do comportamento do material a ensaiar [40].

Ao longo do ensaio, a medição do comprimento da fenda pode ser realizada de diversas formas. Através de ferramentas óticas, como por exemplo microscópicos. Contudo a forma mais simples e mais usada, é com o auxílio de uma câmara fotográfica de alta resolução, onde são captadas imagens que relacionam o tempo decorrido, desde o início do ensaio, com o avanço da fenda em relação ao seu ponto inicial.

Segundo a norma ASTM 5528-13, é feito o registo do carregamento e do deslocamento de acordo com o comprimento de fenda. Ou seja, nos primeiros 5 mm de propagação deve-se registar os valores de  $P$ ,  $\delta$  e  $a$  a cada 1 mm, sendo  $a$  o comprimento da fenda. Posteriormente, registar a cada 5 mm de propagação da fenda até esta atingir os 45 mm. E voltar novamente a fazer o registo de 1 em 1 mm até os 50 mm. Nesta fase, a norma recomenda o descarregamento de forma a verificar se houve a ocorrência de um carregamento assimétrico no ensaio. Caso as extremidades da fenda diferirem de posição em 2 mm, o ensaio é descartado [55].

### 2.2.3.1.2 Propriedades do material – Taxa crítica de libertação de energia

O cálculo de  $G_I$  pode ser calculado por três metodologias diferentes:

- *Corrected Beam Theory* (CBT);
- *Compliance Calibration Method* (CCM);
- *Compliance Based Beam Method* (CBBM).

Metodologia segundo a *Corrected Beam Theory* (CBT)

O método CBT é definido pela equação (10).

$$G_I = \frac{3P\delta}{2B(a+|\Delta|)} \quad (10)$$

O  $\Delta$  é um fator de correção para a rotação e o deslocamento ocorridos na frente da fenda. Este valor é determinado pela regressão linear de  $C^{1/3}$  em função de  $a$  (Figura 48), onde a flexibilidade ( $C$ ) é a razão entre o deslocamento do ponto de carga e a carga aplicada, equação (10) [60].

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{2a^3}{3EI} \quad (11)$$

Como  $I = Bh^3/12$  para uma secção retangular,

$$C = \frac{8a^3}{BEh^3} \quad (12)$$

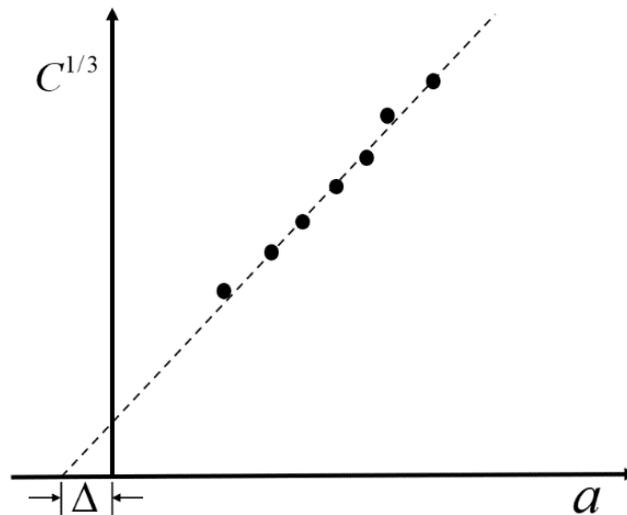


Figura 48 - Exemplificação do cálculo de  $\Delta$  segundo a metodologia CBT - Fonte: Elaborada pelo autor

O  $\Delta$  pode ser dado através da equação reduzida da reta:

$$y = mx + b, \quad (13)$$

Onde  $b$  é o ponto de interseção da reta com o eixo das ordenadas, ou seja, a ordenada na origem. A diferença entre  $b$  e a origem em módulo traduz o valor de  $\Delta$ .

Neste método considera-se ainda um módulo de flexão equivalente  $E_f$ , que pode ser obtida pela equação (13).

$$E_f = \frac{64(a + |\Delta|)^3 P}{\delta B h^3} \quad (14)$$

Metodologia segundo o *Compliance Calibration Method* (CCM)

Este método é baseado na equação de *Irwin-Kies* [61], a qual está dependente da flexibilidade ( $C$ ) do material. Esta faz o cálculo da taxa de energia segundo a equação (14) [62, 63].

$$G_I = \frac{P^2}{2B} \frac{d(C)}{d(a)}, \quad (15)$$

$$C = \frac{\delta}{P}, \quad (16)$$

Neste caso,  $C$  é dada pela equação (14) na qual  $\delta$  corresponde ao deslocamento e  $P$  à carga. Com estes valores é criado um gráfico de  $C$  em função de  $a$  onde é traçada uma função que melhor defina o conjunto de pontos. Normalmente, a regressão polinomial de grau 3 ( $C = C_3 a^3 + C_2 a^2 + C_1 a + C_0$ ) é a mais adequada para esta situação. A partir desta função obtemos o valor de  $C$ ,  $C = f(a)$ . Desta forma, chegamos à equação (16) [57] (Figura 49).

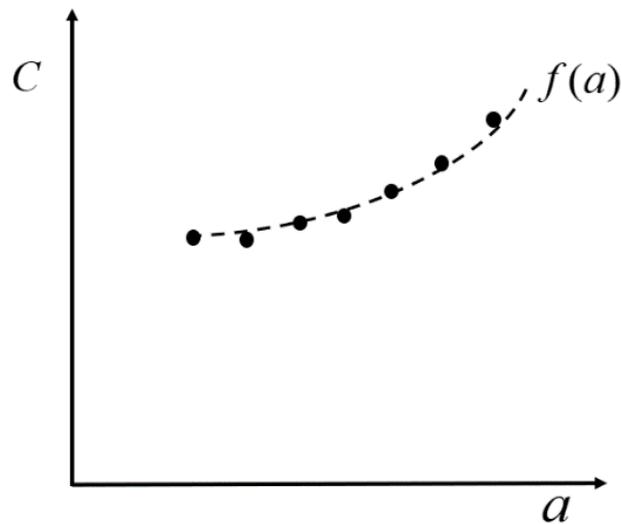


Figura 49 - Determinação do valor de  $d(C)/d(a)$  para o método CCM - Fonte: Elaborada pelo autor

$$G_I = \frac{P^2}{2Ba} (C_3 a^3 + C_2 a^2 + C_1 a + C_0). \quad (17)$$

Metodologia segundo o *Modified Compliance Calibration Method* (MCCM)

À semelhança do método anterior, o valor de flexibilidade é determinado da mesma forma. Porém,  $G_I$  é dado pela equação (17).

$$G_I = \frac{3P^2 C^{2/3}}{2A_1 B h}. \quad (18)$$

Conforme representado na Figura 50, para o cálculo de  $A_1$ , é realizado uma regressão linear dos pontos do gráfico  $a/h$  em função de  $C^{1/3}$ . O valor de  $A_1$  é dado pelo declive da reta.

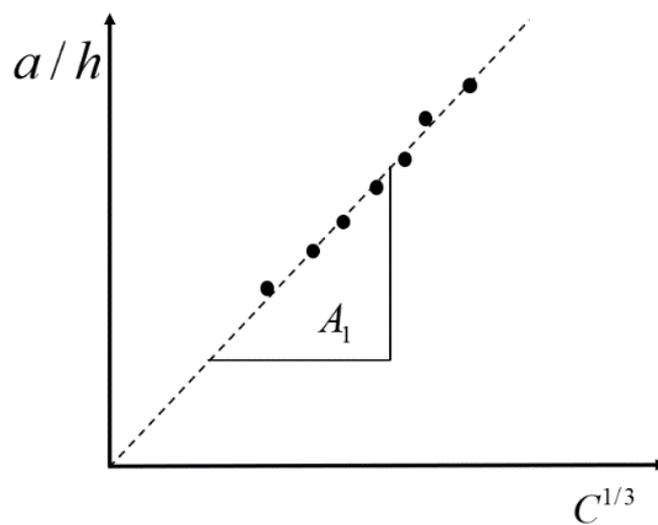


Figura 50 - Determinação do valor de  $A_1$  para o método MCCM - Fonte: Elaborada pelo autor

Metodologia segundo o *Compliance Based Beam Method* (CBBM)

Este método tem como base, exclusivamente, o comprimento equivalente da fenda  $a_{eq}$  para o cálculo de  $G_I$ . Daí, tem a vantagem de dispensar a medição de  $a$  [64] e tem um procedimento simples e conciso. Contudo, é necessário ter em conta o efeito da Zona de Processo de Fratura (ZPF). Esta zona é caracterizada por ser a região do material danificado por processos inelásticos. Como por exemplo, a microfissuração, microdeformação, entre outros. Esta aumenta com a ductilidade do material e localiza-se na extremidade da fenda, de acordo com a Figura 51 [63, 65].

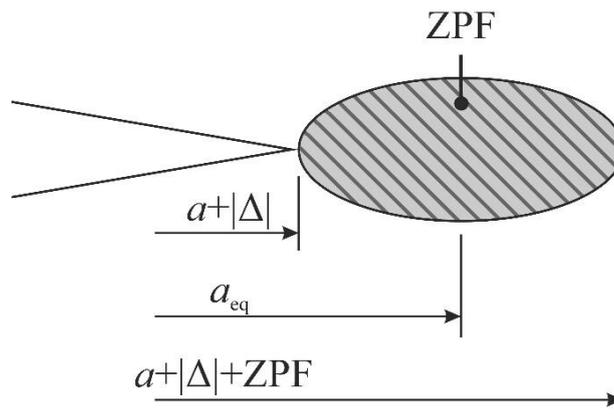


Figura 51 - Representação esquemática da ZPF e do conceito  $a_{eq}$  [57]

O valor de  $a_{eq}$  é dado pela equação (16), como função da equação (17) (Teorema de Castigliano), substituindo  $a$  por  $a_{eq}$ .

$$a_{eq} = a + |\Delta| + \Delta_{aZPF}, \quad (19)$$

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{8P \times a^3}{E \times B \times t^3} + \frac{12P \times a}{5B \times t \times G}, \quad (20)$$

Assume-se que:

$$U = 2 \times \left[ \int_0^a \frac{M_f}{2E \times I} dx + \int_0^a \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \frac{\tau^2}{2G} \times B dz dx \right], \quad (21)$$

e ainda que:

$$\tau = \frac{3}{2} \times \frac{V}{B \times t} \times \left( 1 - \frac{y^2}{c^2} \right), \quad (22)$$

onde  $U$  corresponde à energia de deformação devido à flexão e ao corte dos dois braços do provete. Os parâmetros  $c$  e  $V$  são metade da espessura e a carga transversal em cada braço, respetivamente.

Este método permite também fazer o cálculo do módulo de flexão equivalente  $E_f$  que pode ser obtido através da equação (23), usando uma flexibilidade inicial  $C_o$  [63]:

$$E_t = \left( C_0 - \frac{12 \times (a_0 + |\Delta|)}{5B \times t \times G} \right)^{-1} \times \frac{8 \times (a_0 + |\Delta|)}{B \times t^3} \quad (23)$$

$G_{Ic}$  é obtido pela seguinte equação, [63]:

$$G_{Ic} = \frac{6P^2}{B^2 \times t} \times \left( \frac{2a_e^2}{t^2 \times E_f} + \frac{1}{5G} \right). \quad (24)$$

No entanto, os valores estimados de  $G_I$  nas diferentes metodologias devem ser novamente corrigidos devido à rotação do provete em torno da dobradiça. Este fenómeno provoca grandes deslocamentos. Desta forma é calculado o fator de correção ( $F$ ) pela equação (26). É aplicado um segundo fator de correção ( $N$ ) devido ao aumento de rigidez provocada pelos blocos de fixação dado pela equação (27) [66]. Com isto, é aplicada a equação (25) para correção destes fatores.

$$G_I = \frac{F}{N} G_I^0, \quad (25)$$

sendo  $G_I^0$  o valor estimado nos métodos referidos.

$$F = 1 - \frac{3}{10} \left( \frac{\delta}{a} \right)^2 - \frac{3}{2} \left( \frac{\delta t}{a^2} \right), \quad (26)$$

$$N = 1 - \left( \frac{L'}{a} \right)^3 - \frac{9}{8} \left[ 1 - \left( \frac{L'}{a} \right)^2 \right] \left( \frac{\delta t}{a^2} \right) - \frac{9}{35} \left( \frac{\delta}{a} \right)^2, \quad (27)$$

Onde  $L'$  e  $t$  estão representadas na Figura 52.

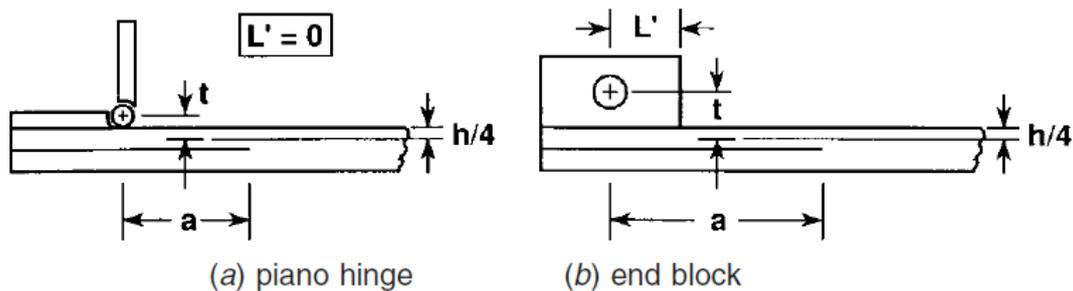


Figura 52 - Métodos para introdução da carga de tração nos provetes DCB [55]

### 2.2.3.2 Ensaio de fratura ao corte – Modo II

A caracterização dos materiais segundo a tenacidade de fratura ao corte tem vindo a ganhar uma maior importância e singularidade. O facto de grande parte dos compósitos serem apenas reforçados bidimensionalmente, ou seja, segundo o plano, faz com que a fratura por delaminação seja um modo de falha significativo [67]. Nas estruturas em compósitos é comum ocorrerem solicitações de flexão. Estas, segundo *Masters* [68],

geram tensões significativas em modo II. Verificou-se ainda que existe uma relação entre a taxa crítica de libertação de energia ( $G_{IIc}$ ) e a resistência à compressão após impacto.

Com isto, são já vários os métodos de ensaio estudados e aplicados pela comunidade científica com o objetivo de uniformizar e validar esta caracterização. Os principais métodos são:

- *End-Loaded Split* (ELS);
- *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF);
- *End-Notched Flexure* (ENF).

Este último é o mais utilizado, pelo facto de ser de simples execução.

Para o tratamento de dados e obtenção do  $G_{II}$ , tal como descrito anteriormente, pode usar-se os métodos clássicos:

- *Direct Beam Theory* (DBT);
- *Modified Beam Theory* (CBT);
- *Compliance Calibration Method* (CCM);
- *Compliance Based Beam Method* (CBBM).

Em relação ao ensaio ELS, trata-se de um ensaio complexo mas que reporta uma propagação de fenda estável [40]. Representado pela Figura 53, o ensaio implica a fixação da extremidade oposta à fenda do provete de forma a impedir o movimento na direção paralela à direção de aplicação de carga. Isto leva a existência de muitas variáveis e a uma dificuldade acrescida na elaboração do ensaio e na obtenção de dados [69].

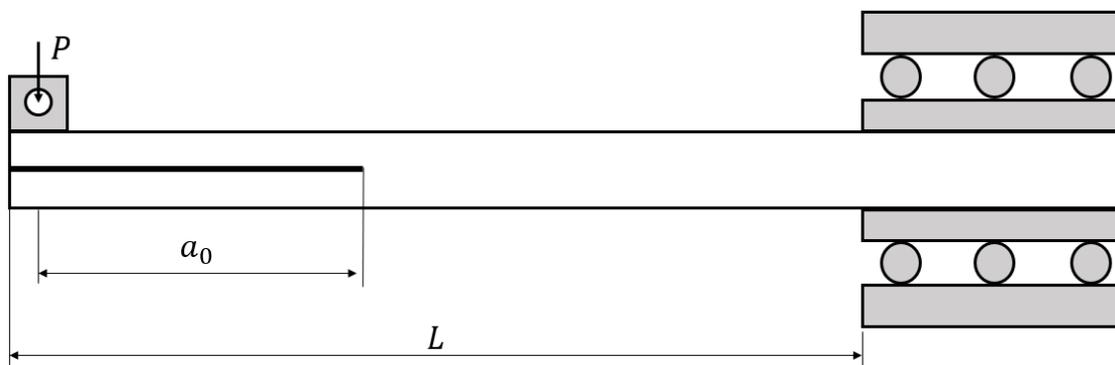


Figura 53 - Representação do ensaio *End-Loaded Split* (ELS) - Fonte: Elaborada pelo autor

O método 4ENF, proposto por *Martin e Davidson* [70], tem como princípio a simplicidade do ensaio ENF. A flexão é realizada através de 4 pontos de contacto em detrimento de três pontos (Figura 54). A propagação da fenda é mais estável, o que leva à obtenção de dados para o cálculo de  $G_{II}$  mais fidedignos. No entanto, há estudos que afirmam existir efeitos de atrito que influenciam o ensaio [67].

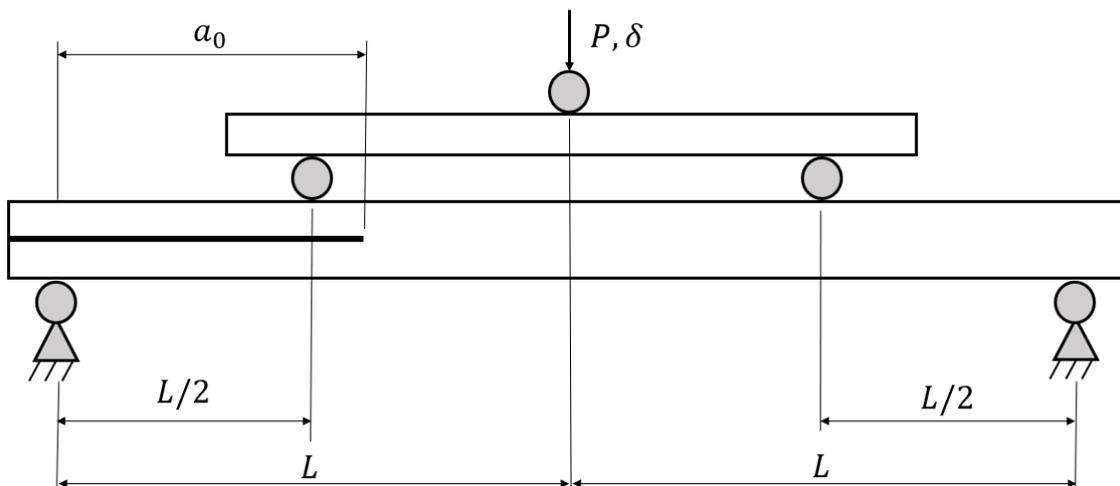


Figura 54 - Representação do ensaio *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF) - Fonte: Elaborada pelo autor

O ensaio ENF consiste na flexão do provete em três pontos. À semelhança do ensaio DCB, os provetes são compostos por placas de espessura constante. Numa das extremidades, é introduzida uma fenda no plano intermédio, conforme representado na Figura 55.

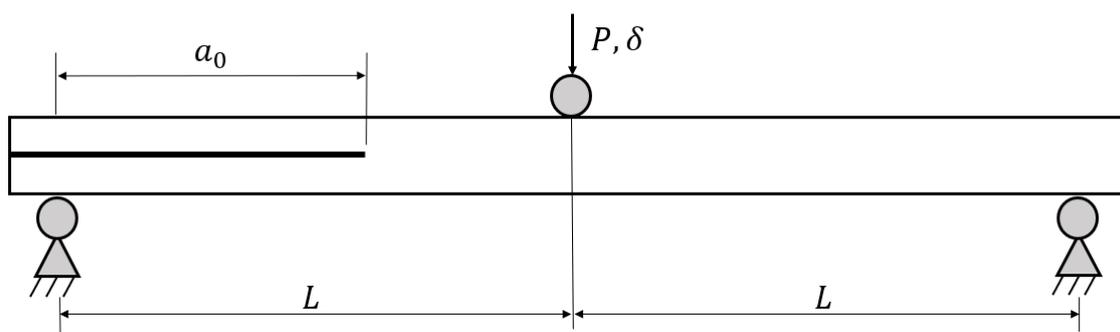


Figura 55 - Representação do ensaio ENF - Fonte: Elaborada pelo autor

Contudo, a propagação da fenda neste ensaio é instável e a monitorização da mesma é complexa. Devido à forma como é aplicada a carga, a fenda tende a fechar, o que resulta numa dificuldade acrescida na visualização da propagação da mesma. Nestes casos, cuja variável é de difícil obtenção, o método CBBM é o único que pode ser aplicado. Além disso, no caso de materiais dúcteis, há o aumento das ZPF desenvolvidas na fenda que influencia diretamente os resultados obtidos e analisados no método CBBM. Quando comparado com o ensaio DCB, este não requer a utilização de acessórios de fixação.

#### 2.2.3.2.1 Procedimento de ensaio “*End-Notched Flexure*” (ENF)

O método inicia-se com o fabrico dos provetes de acordo com as medidas e tolerâncias estabelecidas na norma. De seguida, de igual modo que o ensaio DCB, é aplicada uma tinta ou verniz frágil na lateral, de forma a facilitar a visualização da propagação da fenda. Nessa mesma lateral, é colada uma escala milimétrica que serve de auxílio na medição do comprimento de fenda a cada momento do ensaio [59].

Com isto, os provetes são montados numa máquina universal de ensaios. No provete é marcado o centro que será o ponto de aplicação de carga. No lado oposto, são marcados dois pontos equidistantes do centro de forma a fazer a montagem num suporte. Este deve permitir dois pontos de apoio ajustáveis na distância entre eles. Deve-se garantir o correto alinhamento e paralelismo entre o suporte e a aplicação da carga. Caso contrário, a propagação da fenda pode ser comprometida. A velocidade deve ser constante com um valor compreendido entre 1 e 5 mm/min, a qual deve ser ajustada consoante o material em ensaio.

Ao longo do ensaio, a medição do comprimento da fenda pode ser realizada de diversas formas. Através de ferramentas óticas, como por exemplo microscópicos. Contudo a forma mais simples e mais usada, é com o auxílio de uma câmara fotográfica. As imagens são captadas em intervalos constantes e reduzidos, normalmente de 5 s, de modo a visualizar a progressão da fenda e relacionar o tempo decorrido desde o início do ensaio com o avanço da fenda em relação ao seu ponto inicial. O ensaio é realizado até a fratura atingir o ponto de aplicação da carga [59].

#### 2.2.3.2.2 Propriedades do material – Taxa crítica de libertação de energia

Muito à semelhança de  $G_I$ , o cálculo de  $G_{II}$  pode ser estimado por diferentes metodologias. Normalmente baseadas na *compliance calibration* e na teoria das vigas.

Metodologia segundo o *Direct Beam Theory* (DBT)

Este método passa pela aplicação direta da teoria das vigas, no qual  $G_{IIc}$  é calculado pela equação (28) [71].

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 \delta a^2}{2B(2L^3 + 3a^3)} \quad (28)$$

Onde  $L$  corresponde a metade do comprimento do provete sob ensaio, de acordo com a representação na Figura 55.

Metodologia segundo a *Corrected Beam Theory* (CBT)

O método CBT é definido pela equação (29).

$$G_{II} = \frac{9(a + 0,42\Delta_I)^2 P^2}{16B^2 h^3 E}, \quad (29)$$

onde  $\Delta_I$  é um fator de correção do comprimento da fenda para explicar a deformação de corte. A determinação deste fator foi abordada no capítulo Ensaio de fratura à tração através da equação (12), contudo existe um segundo método através da seguinte expressão [72]:

$$\Delta_1 = h \sqrt{\frac{E}{11G_{II}} \left[ 3 - 2 \left( \frac{\Gamma}{1+\Gamma} \right)^2 \right]}, \quad (30)$$

onde,

$$\Gamma = 1,18 \frac{\sqrt{E_x E_y}}{G}. \quad (31)$$

Metodologia segundo o *Compliance Calibration Method* (CCM)

Este método é baseado na equação de *Irwin-Kies* [61].

$$G_{IIc} = \frac{P^2}{2B} \frac{d(C)}{d(a)}. \quad (32)$$

Neste caso a função que melhor define C, é a função cúbica pela equação (33), onde  $C = f(a)$ .

$$C = C_1 a^3 + C_0. \quad (33)$$

Desta forma, da equação (32) e (33) é obtida a equação (34) [62, 63]:

$$G_{IIc} = \frac{3P^2 C_1 a^2}{2B}. \quad (34)$$

Metodologia segundo o *Compliance Based Beam Method* (CBBM)

Esta metodologia é particular, em relação aos métodos já abordados, pelo facto de não requerer a medição do comprimento de fenda. Tal como descrito anteriormente, este caso é o mais aplicado ao Modo II à fratura, devido à dificuldade em obter esta medição. Este método apenas se baseia na flexibilidade do material, usando apenas a teoria das vigas [73].

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_1 B h} + \frac{3L}{10GBh}. \quad (35)$$

O módulo de elasticidade pode ser determinado pela equação (36), usando a flexibilidade inicial,  $C_0$ , e comprimento de fenda inicial  $a_0$ .

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8Bh^3 C_{0corr}}, \quad (36)$$

onde  $C_{0corr}$  é dado pela equação (37).

$$C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10GBh}. \quad (37)$$

Desta forma, os defeitos associados ao provete e as variações das propriedades do material são tidas em conta. Ao fazer o cálculo do módulo à flexão, a influência destes fatores é contabilizada. Assim como o efeito da ZPF é tido em conta no cálculo do comprimento equivalente da fenda,  $a_{eq}$  [74]. Substituindo  $E_f$  da equação (34) e  $a_{eq}$  da equação (38) pelo  $E_1$  e  $a$ , respetivamente, a equação (33) pode ser escrita da seguinte forma [75].

$$a_{eq} = a + \Delta_{aZPF} = \left[ \frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left( \frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{1/3}. \quad (38)$$

Com isto,  $G_{IIc}$  é obtido pela equação (39) de Irwin-Kies

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16B^2 E_f h^3}. \quad (39)$$

## 2.3 Modelos de dano coesivo

### 2.3.1 Fundamentos da técnica

Como foi anteriormente referido, os Modelos de Dano Coesivo (MDC), baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos, que ligam nós homólogos dos elementos coesivos, de forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima, e conseqüentemente à degradação das propriedades dos materiais até à rotura [76].

### 2.3.2 Tipos de leis coesivas

Existem vários modelos MDC aplicados em diferentes situações, consoante o comportamento dos materiais em causa, ou das interfaces a serem simuladas [77], por exemplo:

- Modelo linear;
- Modelo parabólico [78];
- Modelo triangular [79];
- Modelo exponencial [80];
- Modelo polinomial [81];
- Modelo trapezoidal [82].

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 [83]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em Método de Elementos Finitos (MEF) de interface [84] de seis nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do ABAQUS®.

### 2.3.3 Métodos de obtenção das leis coesivas

Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 56).

A lei pura é caracterizada pelo facto de a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos, quando os valores das tensões no modo respetivo forem anulados na respetiva lei coesiva.

O modo misto utiliza critérios energéticos e de tensões, para combinar as leis puras de tração e de corte [85]. Neste caso, os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente normal de deformação, e uma componente relativa à deformação de corte, sendo estas determinadas por via de uma análise cinemática do elemento. É preciso realçar que em camadas finas entre substratos rígidos as tensões de membrana são desprezáveis.

Antes da existência de dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz  $\mathbf{K}_{\text{COH}}$ , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte, através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida como em (40) [86].

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{sn} & k_{ss} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{\text{COH}} \times \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (40)$$

A matriz  $\mathbf{K}_{\text{COH}}$  tem a rigidez da ligação adesiva. Num caso mais específico, em que uma formulação local é usada para simular fraturas numa espessura nula, os parâmetros da matriz possuem valores muito elevados com a finalidade de não criar deformações na estrutura induzidas, pela presença dos elementos coesivos [86]. Para o caso de uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, tem-se uma aproximação fiável aos parâmetros de rigidez admitindo:

- $k_{nn}=E$ ;
- $k_{ss}=G$ ;
- $k_{ns}=0$ .

Em que:

- $E$  - Módulo de elasticidade longitudinal;
- $G$  - Módulo de elasticidade transversal.

Assim, ao considerar estes parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [85].

Na lei em modo misto, a inicialização do dano pode ser definida por diferentes critérios, sendo o mais comum o critério quadrático de tensões [86].

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1, \quad (41)$$

onde “ $\langle \rangle$ ” são os parênteses de *Macaulay*, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. Este critério é reconhecido pela sua precisão, como indicado em trabalhos anteriores [87]. Quando  $t_n^0$  é atingido (Figura 56), segundo a expressão (41), a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de homólogos (Figura 56) é prevista por um critério linear energético, em função de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ ,

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (42)$$

Através do método enunciado é possível estudar a variável do dano ao longo da junta adesiva. Um dos parâmetros para este estudo é o *stiffness degradation (SDEG)*. Este critério revela a degradação dum elemento coesivo entre 0 e 1, sendo 0 o valor para quando não existe dano no elemento, e 1 para quando ocorre a rotura total. Os valores de *SDEG* definem de forma percentual a plastificação do adesivo, sendo que se o valor de *SDEG* do adesivo estiver dentro dos limites, significa que este se encontra em processo de amaciamento (Figura 56).

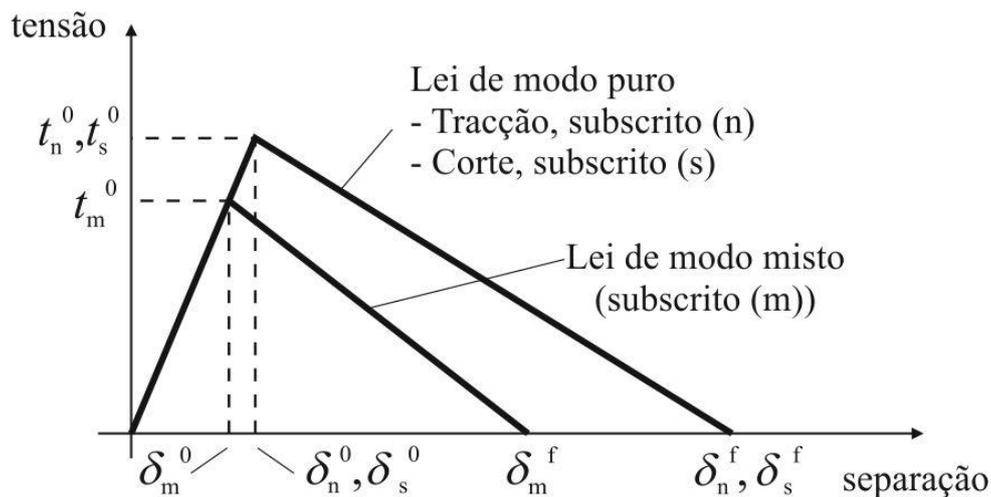


Figura 56 - Modelo coesivo triangular [82, 86].

## 2.3.4 Revisão da literatura da caracterização dos compósitos

Autor	Desenvolvimento e as conclusões tiradas dos ensaios
<p><i>A review of finite element analysis of adhesively bonded joints (Análise de ligações adesivas através da metodologia de elementos finitos) - Xiacong He 2011</i></p>	<p>Mesmo considerando a modelação de ligações adesivas (MLA) bastante precisa e de confiança, continua a ser uma tarefa difícil, uma vez que é influenciada pelas características geométricas da ligação, pelos materiais e pela combinação. A informação obtida pela modelação de elementos finitos das ligações adesivas centra-se nas diferentes propriedades mecânicas e variação dos esforços em vários pontos da ligação. A modelação eficaz tem de ser capaz de prever o ponto de rotura do adesivo e da ligação entre o aderente e o adesivo, em suma, o comportamento dos materiais e da ligação. A MLA ainda é um tópico pouco estudado. O artigo em causa faz uma análise crítica da pesquisa e evolução da MLA. Atingindo a conclusão de que a mesma irá ajudar no desenvolvimento e estudo das ligações adesivas, uma vez que permite a simulação de diferentes parâmetros e oferece uma visão mais ampla da aplicação de ligações no processo, num menor intervalo de tempo e sem elevados custos associados.</p>
<p><i>A Survey of Computational Models for Adhesion (Pesquisa de modelação computacional em adesivos) - Roger A. Sauer 2016</i></p>	<p>O estudo realizado reflete a pesquisa de métodos de modelação para ligações adesivas (MLA), focando-se em modelos mecânicos. O objetivo é expor as várias formulações e métodos adequados à MLA, com distinção entre métodos que analisam o comportamento do material (<i>local material models</i>), métodos que analisam o comportamento da ligação (<i>local interface models</i>) e por fim, métodos que analisam o sistema completo (<i>effective models</i>). Os LMM descrevem o comportamento tensão-deformação do adesivo considerando propriedades como elasticidade, viscosidade, plasticidade, fratura, entre outros. Os LIM a separação do adesivo, considerando as ligações moleculares, as interações electrostáticas e os modelos de fratura. Os EM descreve a rotura da ligação considerando o sistema do adesivo-aderentes, tendo em conta modelos de adesão para esferas, superfícies rugas, microestruturas em fibra, entre outros. Em suma, os métodos de modelação existem são bastante eficazes, mas é necessário desenvolvê-los de modo a ser possível analisar a durabilidade da ligação sob influência de forças não lineares, envolvente térmica e corrosiva.</p>
<p><i>Strength Predictions for Lap Joints, Especially with Composite Adherends: A Review</i></p>	<p>Existem vários tipos de ligações adesivas, mas o artigo em causa centra-se nas ligações chamadas simples, na sua compreensão e design, assumindo o pressuposto que a ligação quebra sempre no adesivo (falha coesiva) e não entre o adesivo e o aderente ou substrato (falha adesiva). O mesmo pretende executar uma análise crítica das várias teorias e métodos que permitem analisar a ligação, sejam os métodos analíticos sejam os métodos através de elementos</p>

- 
- (Previsão de forças em ligações sobrepostas, com ênfase em aderentes compósitos) - Robert D. Adams  
1989
- Static strength prediction of adhesive joints: A review* (Previsão das forças estáticas em ligações adesivas: Revisão) – L.D.C Ramalho, R.D.S.G. Campilho, J. Belinha, L.F.M. da Silva  
2020
- finitos, e as desvantagens de cada um. Bem como, a aplicação das modelações em ligações com materiais compósitos. Esta análise é feita em comparação com os resultados experimentais.
- O presente artigo pretende apresentar os diferentes métodos de análise das ligações adesivas, as suas aplicações e limitações. Os métodos em causa são analíticos ou numéricos. O método analítico é o modelo mais antigo de estudo da ligação adesiva, é uma solução em sistema fechado para tensões, em que deve ser associado o critério de falha de modo a prever a resistência da ligação desconsiderando questões particulares da mesma. Tendencialmente é o método usado para a primeira tentativa de análise da ligação adesiva, devido à sua simplicidade e rapidez, mas cada formulação analítica só é capaz de prever a força de um tipo de junta, e com o aumento da complexidade da mesma, torna-se menos fiável. Mais ainda, este tipo de métodos negligencia a plasticidade adesiva, tornando-se menos fiáveis com o aumento do comprimento da ligação. Em suma, são bastante limitados para os dias de hoje.
- Por sua vez, os métodos numéricos utilizam várias metodologias, incluindo métodos sem malhas, mas o mais comum é a análise de elementos finitos. Existem várias maneiras de avaliar a falha da ligação adesiva, através de mecânica contínua, mecânica de fratura, danos mecânicos, CZM (*Cohesive Zone Models*) ou XFEM (*Extended Finite Element Method*). O método mais recomendado é o CZM, pois incorpora a mecânica contínua e os princípios da mecânica de fratura. A modelação em software é eficaz e demora menos tempo a simular. Para além disso estão disponíveis em software comerciais com diferentes princípios e critérios para início da fenda. Futuramente, o CZM pode vir a ser substituído pelo XFEM. O XFEM é um método muito recente que prevê o início da fenda com diferentes critérios, sendo um deles, um adesivo fino entre aderentes mais rígidos. É a base do *software* ABAQUS®, e tem como principal vantagem em relação ao CZM, a análise da propagação da fenda independentemente da malha, assim sendo é possível obter várias simulações sem a necessidade de refazer a malha. Qualquer um destes métodos pode e deve ser acompanhado pela análise experimental, mas em casos cujo ensaio experimental é dispendioso, a modelação é bastante eficaz e fidedigna.
-



**DESENVOLVIMENTO**



### 3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo vai ser dividido em duas partes:

- Fase experimental;
- Fase numérica.

No que respeita à primeira parte serão descritos os vários materiais escolhidos, métodos de produção dos provetes, ensaios realizados aos mesmos e os resultados obtidos. Na segunda parte serão desenvolvidos modelos numéricos, de forma a reproduzir e comparar os resultados destes aos da fase experimental.

#### 3.1 Trabalho experimental

##### 3.1.1 Seleção dos materiais

O compósito SMC é essencialmente constituído por uma matriz e pelo reforço em fibras de vidro. Conforme abordado no capítulo 2.1.4, o SMC pode ser composto de inúmeras formas de acordo com as características requeridas. Um dos principais parâmetros característicos do SMC é a percentagem de fibra de vidro impregnada pelo facto de se tratar do componente que lhe confere rigidez. Com isto, a seleção dos materiais foi baseada na percentagem de fibra de vidro contida na impregnação.

Com o apoio dos fornecedores de SMC da IP, foram escolhidos quatro SMC's cujas propriedades da matriz fossem o mais equivalentes possíveis com exceção da percentagem de fibra de vidro. A Tabela 4 apresenta os quatro materiais escolhidos com as respetivas percentagens de fibra.

Tabela 4 - Quantidade de fibra dos materiais escolhidos

	<b>LP 2502 R15 (SMC 15%)</b>	<b>LS 3123 R20 (SMC 20%)</b>	<b>HUP 12/30 LE (SMC 30%)</b>	<b>PG45-H330.LE (SMC 45%)</b>
<b>Quantidade de Fibra</b>	15%	20%	30%	45%

Inicialmente, foi escolhido o PG45-H330.LE e o HUP 12/30 LE tratando-se de materiais utilizados em peças estruturais. De seguida foi selecionado o LS3123 R20, o qual é utilizado no fabrico de peças com acabamento superficial. Estes SMC provieram da produção em série da IP. Por fim, foi escolhido o LP 2502 R15 com 15% de fibra produzido no laboratório da Polynt. Na Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8 são apresentadas as propriedades dadas pelos fabricantes.

Tabela 5 - Características do SMC LP 2502 R15

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Contração linear</b>	0,15 %
<b>Densidade</b>	1,75 g/cm <sup>3</sup>
<b>Resistência à flexão</b>	100 MPa
<b>Módulo à flexão</b>	9 500 MPa
<b>Resistência ao impacto (Charpy)</b>	45 kJ/m <sup>2</sup>
<b>Temperatura de distorção</b>	>200 °C

Tabela 6 - Características do SMC LS 3123 R20 BIANCO

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Contração linear</b>	0,1 %
<b>Densidade</b>	1,75 g/cm <sup>3</sup>
<b>Resistência à flexão</b>	120 MPa
<b>Módulo à flexão</b>	9 000 MPa
<b>Resistência ao impacto (Charpy)</b>	80 kJ/m <sup>2</sup>
<b>Temperatura de distorção</b>	>200 °C

Tabela 7 - Características do SMC HUP 12/30 LE RN-9500/39406

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Contração linear</b>	-0,07 %
<b>Densidade</b>	1,89 g/cm <sup>3</sup>
<b>Resistência à flexão</b>	155 MPa
<b>Módulo à flexão</b>	9 800 MPa
<b>Resistência ao impacto (Charpy)</b>	80 kJ/m <sup>2</sup>
<b>Temperatura de distorção</b>	>200 °C

Tabela 8 - Características do SMC VERKID PG45 H330.LE

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Contração linear</b>	0,05 %
<b>Densidade</b>	1,7 g/cm <sup>3</sup>
<b>Resistência à flexão</b>	210 MPa
<b>Módulo à flexão</b>	12 500 MPa
<b>Resistência ao impacto (Charpy)</b>	100 kJ/m <sup>2</sup>
<b>Temperatura de distorção</b>	>280 °C

### 3.1.2 Fabrico dos provetes

O processo de fabrico dos provetes para os ensaios iniciou com a moldação do SMC. Para tal, foi escolhido o molde da IP referente ao fabrico de tabuleiros de cantinas (Figura 56), pelo facto de possuir uma geometria que permite obter placas de espessura

constante. Desta forma, foi possível recortar os provetes com as dimensões pretendidas. Para o ensaio de tração e BS foram moldados tabuleiros de cada um dos materiais com espessuras de 4 e 8 mm, respetivamente. Nos ensaios DCB e ENF foram moldados tabuleiros com 6mm de espessura. Inicialmente, foi calculado o SMC necessário para cada uma das espessuras pretendidas. Este cálculo é feito pela multiplicação da densidade do material indicada pelo fornecedor pelo volume de peça já conhecidos, cujos resultados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Peso das cargas de moldação dos tabuleiros de ensaio

	SMC 15%	SMC 20%	SMC 30%	SMC 45%
Densidade [g/mm <sup>2</sup> ]	1,7	1,89	1,75	1,75
Carga do Tab. c/ 4 mm [g]	1208	1343	1243	1243
Carga do Tab. c/ 6 mm [g]	1812	2014	1865	1865
Carga do Tab. c/ 8 mm [g]	2415	2685	2486	2486

Quanto aos parâmetros de moldação foram usados 2, 3 e 4 minutos de tempo de ciclo para as espessuras de 4, 6 e 8 mm, respetivamente. O tempo de polimerização do SMC é dado consoante a espessura de peça, considerando-se geralmente 30 segundos por cada milímetro. As temperaturas definidas para o macho e a cavidade foram de 140°C e 150°C, respetivamente. Estas são controladas pelo controlador da prensa, contudo foram verificadas com um pirómetro (Figura 57-a). A força de moldação é determinada com base na pressão de moldação de aproximadamente 100 bar recomendada pelo fabricante de SMC (Figura 57-b). Esta força é calculada pela pressão a dividir pela área projetada da peça segundo o eixo de moldação. Os restantes parâmetros de moldação, tais como velocidades de descida e subida, estão previamente determinados para o molde em questão.

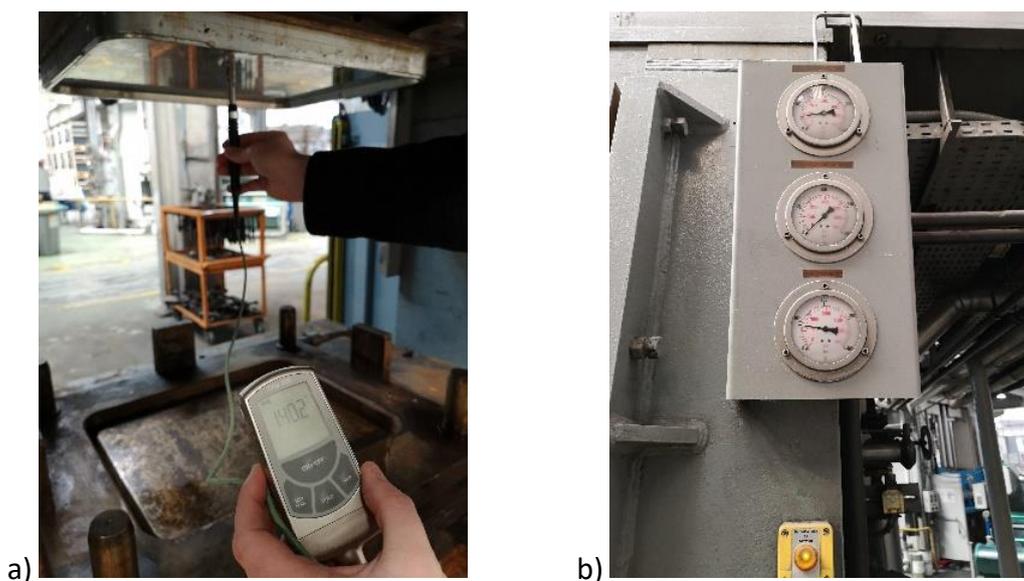


Figura 57 - a) Medição da temperatura das figuras moldantes e b) Manómetros da prensa

Seguidamente, foram cortadas as cargas com dimensões de aproximadamente 200×100 mm<sup>2</sup> (Figura 58) e realizado o processo de moldação conforme descrito no capítulo 2.1.4.2.



Figura 58 - Banca de preparação de carga - Corte e pesagem da carga

Por fim, os tabuleiros foram maquinados na CNC (Figura 59). Foram criados os diferentes códigos G de programação CNC de acordo com as dimensões definidas para cada ensaio. Os parâmetros de corte utilizados foram de 20000 RPM na ferramenta com um avanço de 300, 350 e 400 mm/min para as espessuras de 4, 6 e 8 mm, respetivamente. Foi usada uma fresa diamantada de  $\varnothing 8$  mm.



Figura 59 - Tabuleiro na máquina de corte, *Belotti*, durante a maquinação dos provetes

A descrição anterior é comum a todos os procedimentos de ensaio. As etapas específicas a cada um dos procedimentos serão detalhadas em cada um dos subcapítulos (3.1.2.1, 3.1.2.2, 3.1.2.3 e 3.1.2.4).

### 3.1.2.1 Provetes do ensaio de tração

Os provetes para o ensaio de tração saíram finalizados do processo de corte na CNC (Figura 60). Apenas foi realizada a identificação e numeração dos mesmos segundo o respetivo SMC.



Figura 60 - Provetes após corte, respetivamente catalogados pelo material e espessura

As dimensões dos provetes estão discriminadas na Figura 61, sendo este um provete de secção constante com 4 mm de espessura.

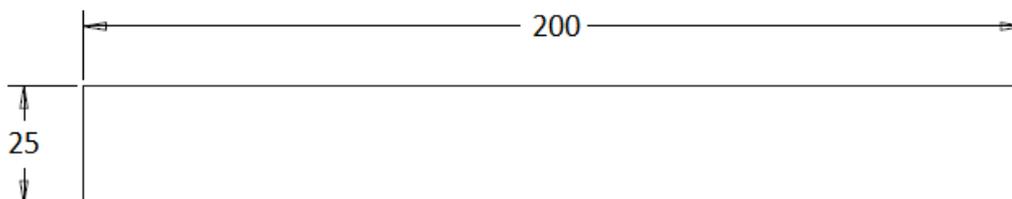


Figura 61 - Dimensão do provete do ensaio à tração segundo a norma ISO 527-04 [34]

### 3.1.2.2 Provetes do ensaio *block shear*

No que diz respeito aos provetes do ensaio de corte, foram maquinados provetes com as dimensões da definidas na norma ASTM D4501 (Figura 39) com exceção da espessura, nos quais foram usados os tabuleiros de 8 mm. Inicialmente, foram cortados retângulos de  $37,5 \times 25 \text{ mm}^2$ . Posteriormente numa fresadora manual (Figura 62) foi maquinado o efeito escalonado nos mesmos.



Figura 62 - Fresadora manual utilizada para o corte dos provetes do ensaio de corte

Inicialmente, a maquinação foi realizada perpendicular ao plano das fibras de vidro, mas a quantidade de fibras soltas ao longo da superfície foi demasiada elevada, e a integridade do provete, devido à delaminação, foi colocada em causa (Figura 63-a). Assim sendo, os provetes acabaram por ser maquinados no sentido paralelo ao plano das fibras. Também foi possível observar alguma delaminação, mas em quantidade reduzida (Figura 63-b).

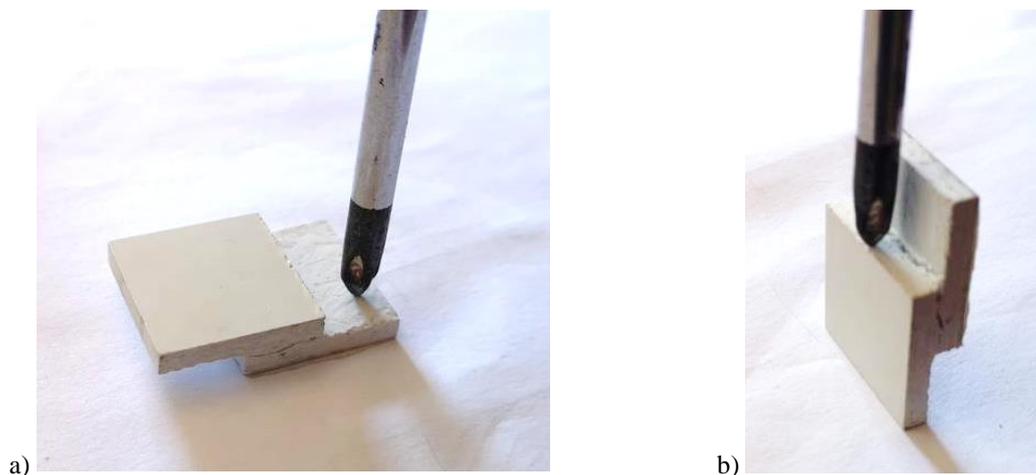


Figura 63 - Esquema representativo da maquinação na fresadora manual – a) perpendicular à fibra e b) paralelo à fibra

A maquinação em si pressupôs a redução da espessura de 8 para 4 mm em um dos lados, num comprimento de 6,25 mm. Posteriormente, rodou-se o bloco, e do lado oposto ao já maquinado repetiu-se o processo anteriormente descrito (Figura 64).

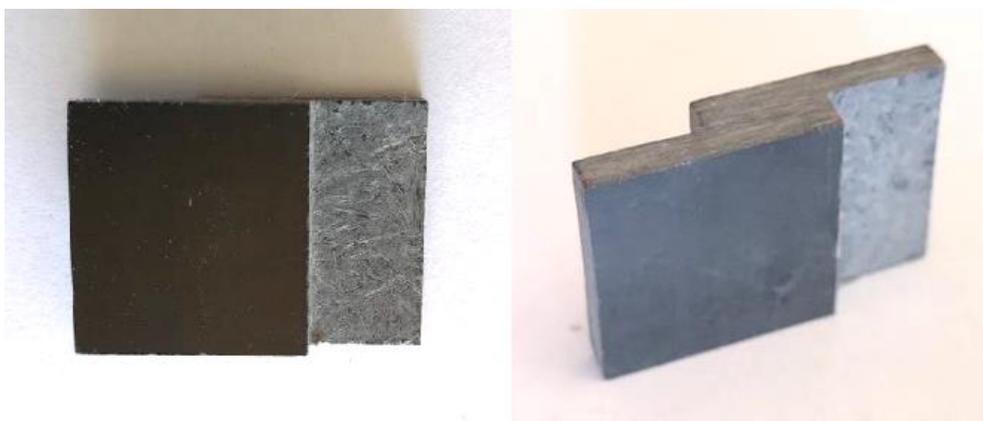


Figura 64 - Provete do ensaio de corte

### 3.1.2.3 Provetes do ensaio DCB

Os provetes para o ensaio DCB foram maquinados na CNC baseado nas dimensões especificadas na norma ASTM D5528-01, com exceção da fenda inicial. Para a execução da fenda, houve alguma dificuldade em realizar o corte com a espessura e comprimento especificado na norma. A melhor solução encontrada foi executar o corte numa máquina de corte de precisão Minitom da Struers, disponível nas instalações do ISEP. Foi utilizado um disco de corte adiantado da Metkon com 0,4 mm de espessura e

Ø127 mm, a uma rotação de 400 RPM. No entanto, o comprimento máximo de corte do disco é de 40 mm, o que levou a não cumprir com o  $a_0$  definido na norma e desta forma condicionou o ensaio. As dimensões finais estão representadas na Figura 65.

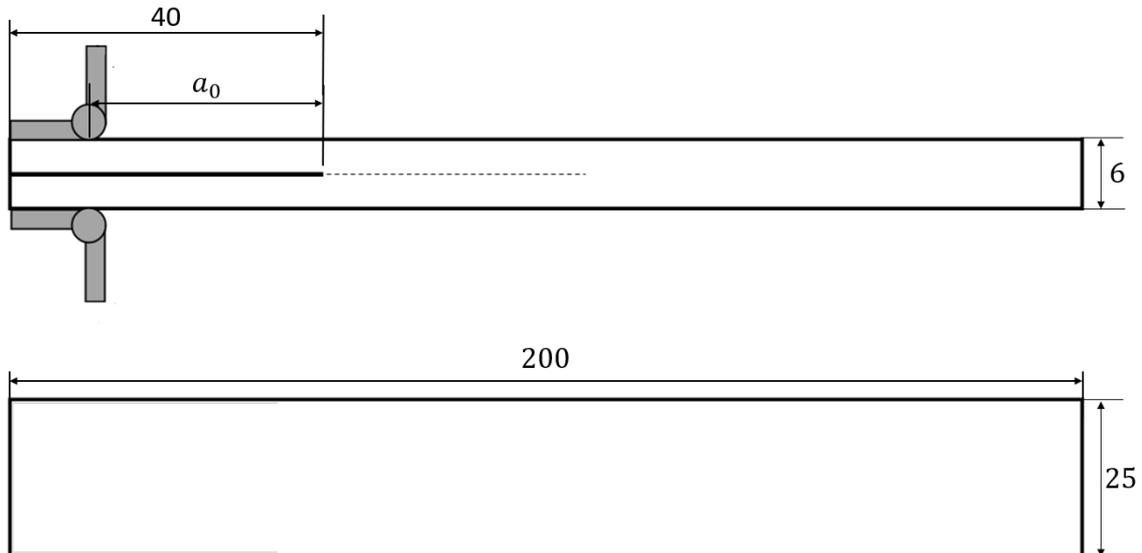


Figura 65 - Dimensão do provete DCB baseado a norma ASTM D5528-01 [55]

O passo seguinte é colar dobradiças aos provetes para permitir a fixação dos mesmos à máquina de ensaios. As dobradiças utilizadas são fornecidas com um comprimento de 1 m a 1,5 m, designadas por dobradiças piano em aço inox. Com isto, foram cortadas manualmente com o auxílio de uma serra manual a cada 25 mm de comprimento. Estas não podem ser montadas completas sob risco de ambas as partes colarem uma à outra, devido ao excedente de adesivo. Assim sendo, foi realizada a desmontagem, e posterior processo de colagem de uma das partes ao provete (Figura 66). O adesivo usado foi Araldite 2015. Trata-se de um adesivo bicomponente adequado para o SMC e de alta resistência, cuja polimerização é realizada à temperatura ambiente. De modo a promover uma boa adesão entre o SMC e a dobradiça, todas as superfícies de contacto foram lixadas, limpas e desengorduradas com acetona.



Figura 66 - Provetes com as dobradiças piano coladas

Após a colagem, foi dado um período de uma semana para finalização do processo de cura do adesivo. De seguida, foi removido o excedente de adesivo com recurso a uma mó e procedeu-se à montagem da outra parte da dobradiça.

Para finalizar, uma das faces laterais do provete é preparado de forma a permitir a medição da propagação da fenda (Figura 67). Com isto, é aplicada uma tinta frágil, que neste caso, foi aplicada uma tinta corretora de uso corrente. Por fim, é foi colada uma escala milimétrica. Esta colagem é realizada com cola rápida de cianoacrilato.

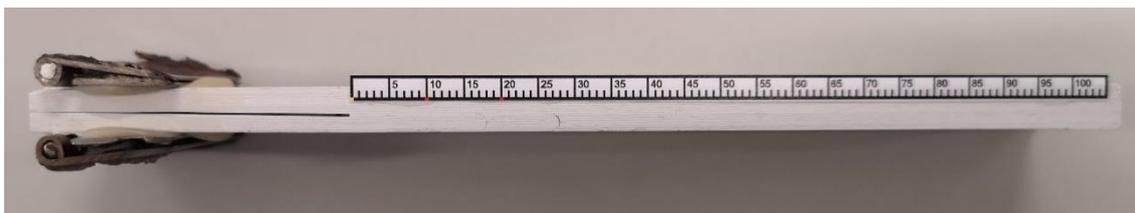


Figura 67 - Provete DCB com a escala milimétrica colada na face lateral

#### 3.1.2.4 Provetes do ensaio ENF

O processo de fabrico dos provetes para o ensaio ENF é equivalente ao do capítulo 3.1.2.3 com exceção da montagem das dobradiças. O ensaio ENF não requer nenhum sistema de fixação à máquina de ensaio. À semelhança dos provetes DCB, a fenda está limitada pelo método de fabrico do provete. A Figura 68 representa as dimensões do provete ENF.

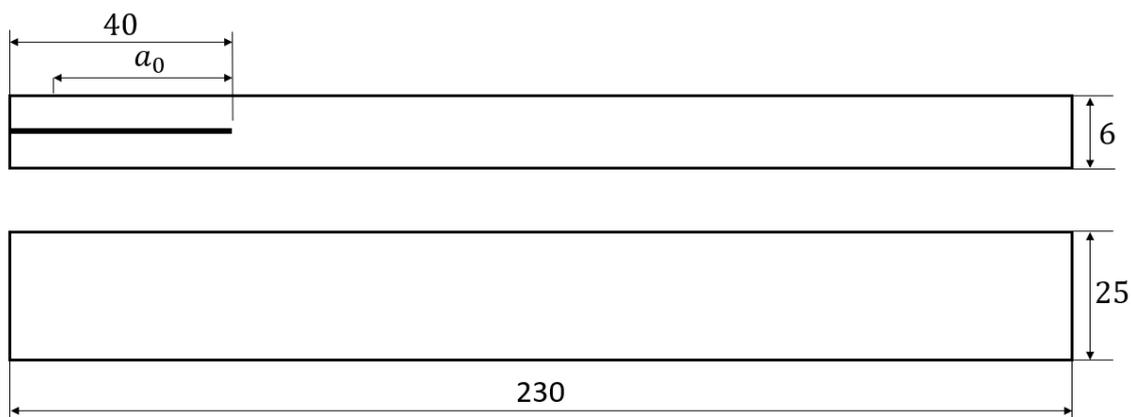


Figura 68 - Dimensões do provete ENF

Numa das faces laterais foi aplicada uma tinta frágil e foi colada uma escala milimétrica de forma a facilitar a medição do  $a$ . A Figura 69 representa o resultado de um exemplar de provete ENF com marcação das posições de contacto.



Figura 69 - Provete ENF com a escala milimétrica colada na face lateral

### 3.1.3 Ensaio à tração

Para a realização dos ensaios foi utilizada a máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 (Figura 70-a).do Laboratório de Ensaios Tecnológicos do ISEP. Esta está equipada com uma célula de carga de 100 kN, assim como um sistema de aquisição de dados que faz o registo sistemático do tempo de ensaio, força ( $P$ ) e deslocamento ( $\delta$ ). A Figura 70-b apresenta o *setup* de montagem do provete na máquina através das amarras. O extensómetro foi colocado no início de cada ensaio e retirado momentos antes de ocorrer a rotura de forma a não danificar o mesmo.

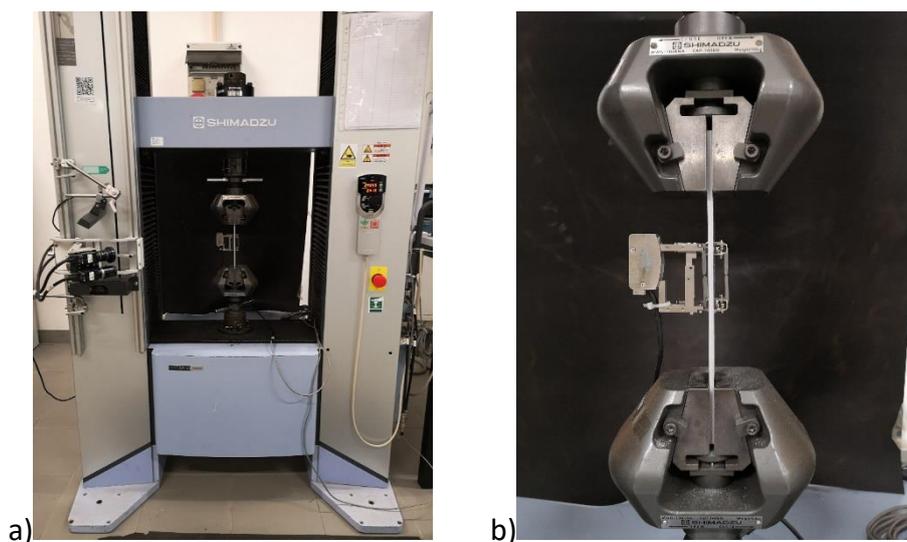


Figura 70 - a) Máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100; b) *setup* de montagem do provete à tração

Para este ensaio foi escolhida a norma DIN EN ISO 527-04: 1997 que está vocacionada para compósitos plásticos reforçados com fibras isotrópicas e ortotrópicas, no qual está incluído o SMC. Os valores de  $\sigma_{0,2\%}$ ,  $\sigma_{m\acute{a}x}$ ,  $\sigma_{rot}$  e  $E$  foram determinados conforme apresentado no capítulo 2.2.3.1. A velocidade de ensaio foi de 5 mm/min e o ensaio foi realizado à temperatura ambiente.

#### 3.1.3.1 Análise de resultados

Após a realização dos ensaios de tração procedeu-se com os respetivos tratamentos de dados registados pelo *software* TRAPEZIUM X, integrado na máquina de ensaio. Reproduziram-se as curvas  $P$ -  $\delta$  mostradas na Figura 71, Figura 73, Figura 75 e Figura 77, assim como as curvas  $\sigma$ -  $\epsilon$  apresentadas na Figura 72, Figura 56, Figura 74, Figura 76 e Figura 78. A descontinuidade da curva gerada pela paragem para remoção do extensómetro foi tida em conta e tratada de forma a reproduzir uma curva mais próxima do objetivo.

Após o tratamento de dados são apresentadas na Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12, as propriedades mecânicas mais relevantes para cada um dos materiais, obtidas através dos cálculos já descritos no ensaio de tração.

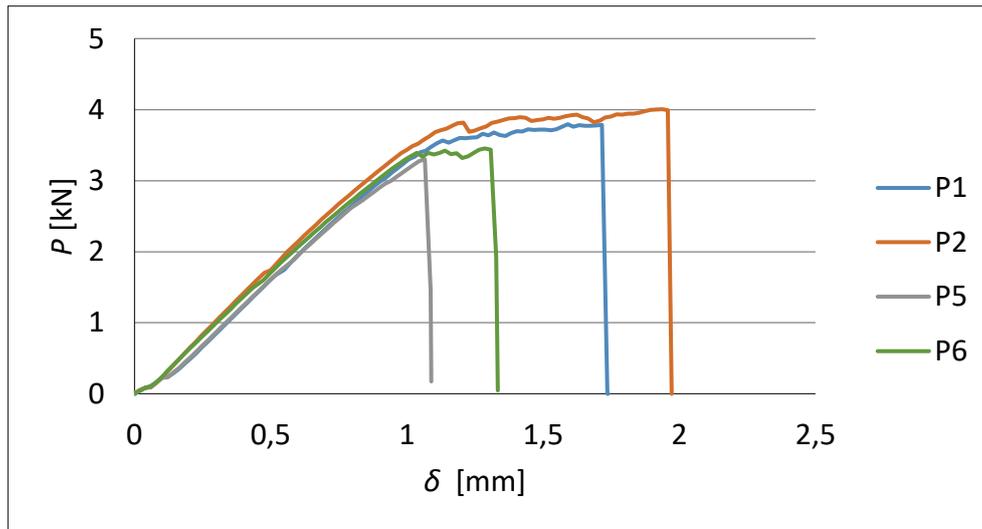
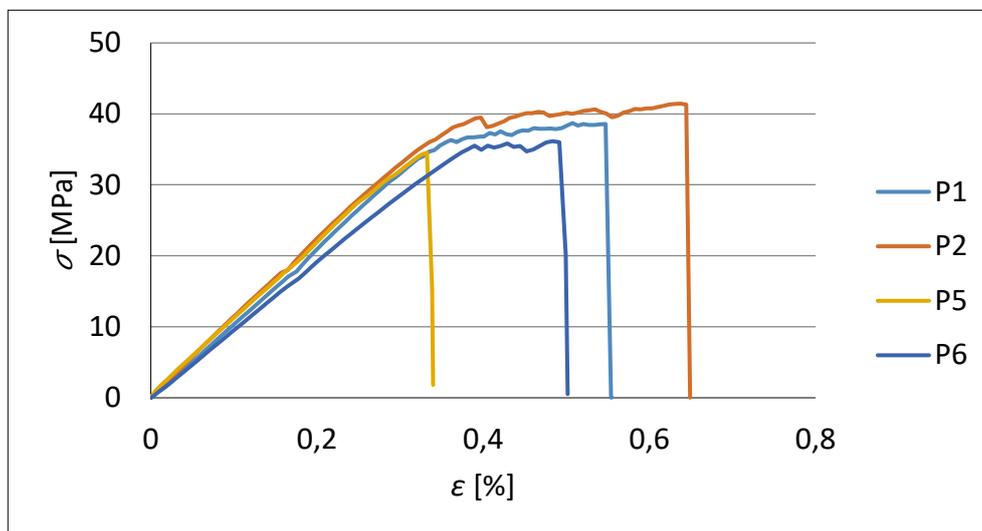
Figura 71 - Curvas  $P$ - $\delta$  para o SMC 15%Figura 72 - Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  para o SMC 15%

Tabela 10 - Propriedades mecânicas do SMC 15% obtidas à tração

Provete	$P_{m\acute{a}x}$ [N]	$\sigma_{0,2\%}$ [MPa]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\sigma_{rot}$ [MPa]	$E$ [MPa]
P1	3797,9	38,6	38,7	38,6	11012,4
P2	4008,6	39,5	41,4	41,3	11247,8
P5	3301,6	34,6	34,5	34,6	10970,2
P6	3454,5	36,0	36,1	36,0	9788,7
<b>Média</b>	<b>3640,6</b>	<b>37,2</b>	<b>37,7</b>	<b>37,6</b>	<b>10754,8</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>321,3</b>	<b>2,3</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>655,5</b>
<b>Coefficiente. de Variação (CV) [%]</b>	<b>8,8%</b>	<b>6,2%</b>	<b>8,0%</b>	<b>7,9%</b>	<b>6,1%</b>

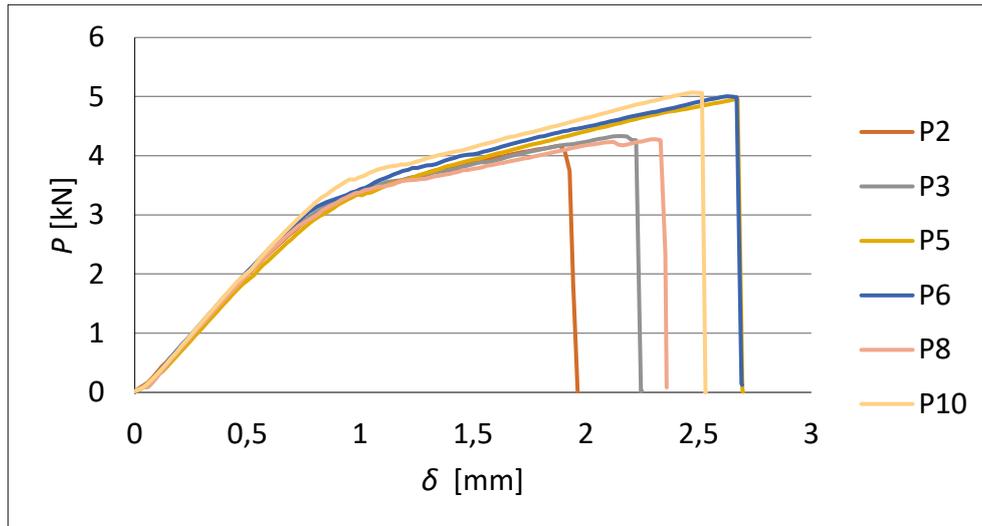
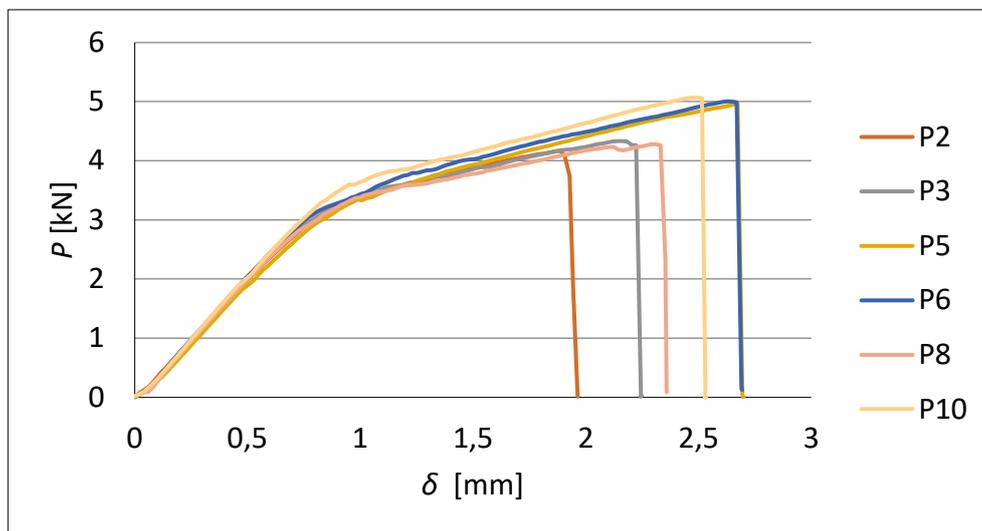
Figura 73 - Curvas  $P$ - $\delta$  para o SMC 20%Figura 74 - Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  para o SMC 20%

Tabela 11 - Propriedades mecânicas do SMC 20% obtidas à tração

Proвете	$P_{m\acute{a}x}$ [N]	$\sigma_{0,2\%}$ [MPa]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\sigma_{rot}$ [MPa]	$E$ [MPa]
<b>P2</b>	4171,3	41,1	41,1	40,2	11090,7
<b>P3</b>	4329,5	37,8	42,5	41,8	10556,3
<b>P5</b>	4954,9	40,4	51,8	51,9	9766,0
<b>P6</b>	5003,2	43,8	52,4	52,2	11728,7
<b>P8</b>	4280,4	40,1	44,8	44,6	11059,1
<b>P10</b>	5068,7	46,1	53,0	52,9	11870,3
<b>Média</b>	4634,7	41,5	47,6	47,2	11011,9
<b>Desvio Padrão</b>	414,8	2,9	5,4	5,7	777,0
<b>CV [%]</b>	8,9%	7,1%	11,4%	12,1%	7,1%

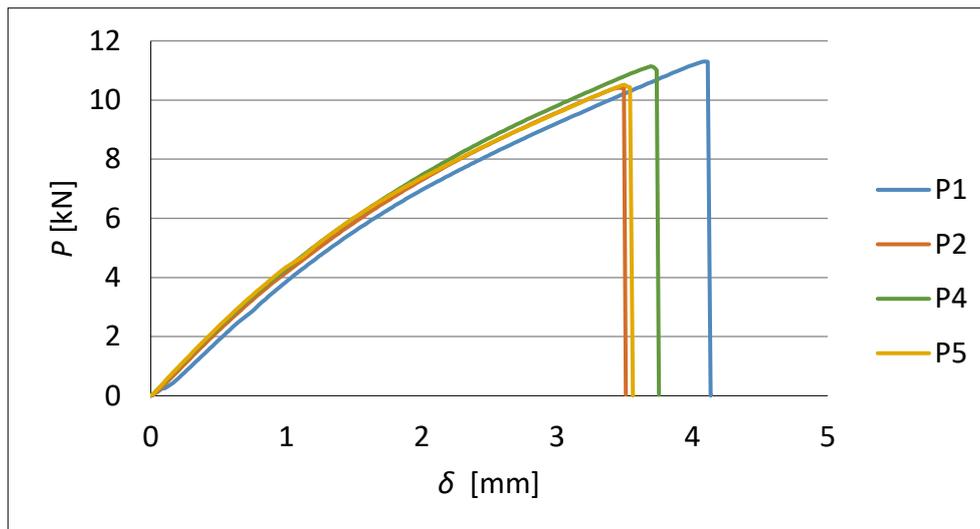
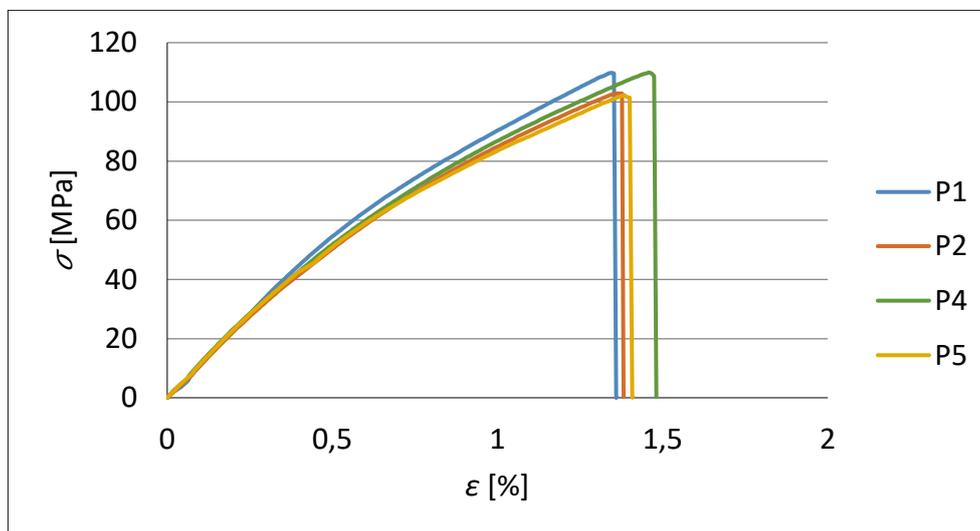
Figura 75 - Curvas  $P$ - $\delta$  para o SMC 30%Figura 76 - Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  para o SMC 30%

Tabela 12 - Propriedades mecânicas do SMC 30% obtidas à tração

Provete	$P_{m\acute{a}x}$ [N]	$\sigma_{0,2\%}$ [MPa]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\sigma_{rot}$ [MPa]	$E$ [MPa]
<b>P1</b>	11307,7	88,5	109,8	109,7	11573,2
<b>P2</b>	10410,8	82,1	102,9	102,9	11074,3
<b>P4</b>	11140,2	85,3	110,0	108,8	11704,8
<b>P5</b>	10523,0	78,7	102,3	101,5	11646,6
<b>Média</b>	10845,4	83,6	106,2	105,7	11499,7
<b>Desvio Padrão</b>	444,8	4,2	4,2	4,1	288,7
<b>CV [%]</b>	4,1%	5,0%	4,0%	3,9%	2,5%

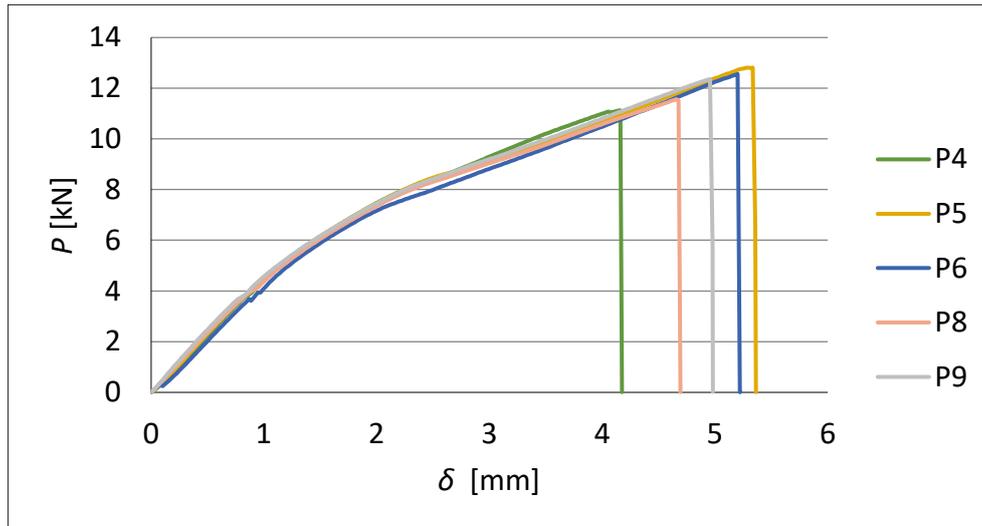
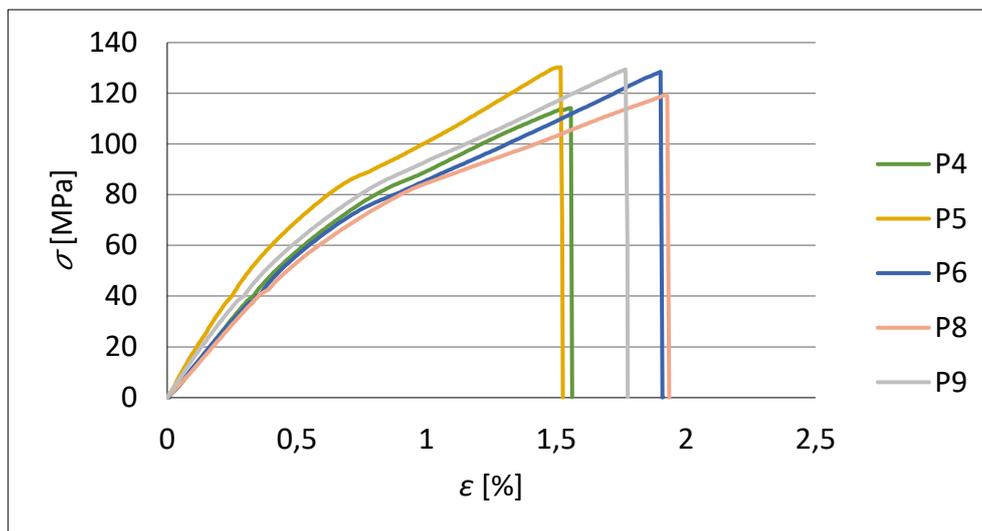
Figura 77 - Curvas  $P$ - $\delta$  para o SMC 45%Figura 78 - Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  para o SMC 45%

Tabela 13 - Propriedades mecânicas do SMC 45% obtidas à tração

Proвете	$P_{m\acute{a}x}$ [N]	$\sigma_{0,2\%}$ [MPa]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\sigma_{rot}$ [MPa]	$E$ [MPa]
P4	11123,7	82,8	114,1	114,1	12674,8
P5	12814,5	88,8	130,3	130,3	15662,5
P6	12559,0	79,3	128,4	128,4	12235,1
P8	11563,5	79,5	119,3	118,8	11662,8
P9	12365,0	85,2	129,4	129,4	13662,8
<b>Média</b>	<b>12085,2</b>	<b>83,1</b>	<b>124,3</b>	<b>124,2</b>	<b>12778,1</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>712,6</b>	<b>4,0</b>	<b>7,2</b>	<b>7,3</b>	<b>880,5</b>
<b>CV [%]</b>	<b>5,9%</b>	<b>4,8%</b>	<b>5,8%</b>	<b>5,9%</b>	<b>6,9%</b>

Tendo em consideração os intervalos de fibra de vidro analisados, e numa primeira análise geral, é possível verificar que, quanto maior a quantidade de fibra maiores são as propriedades mecânicas do material. Inclusivamente, na Tabela 14, pode-se verificar que a  $\sigma_{m\acute{a}x}$  é experimentalmente idêntica à  $\sigma_{rot}$ , o que revela um comportamento frágil do SMC.

Tabela 14 - Propriedades experimentais determinados no ensaio de tração

Material	$P_{m\acute{a}x}$	$\sigma_{0,2\%}$	$\sigma_{m\acute{a}x}$	$\sigma_{rot}$	$E$
SMC 15%	3 641 N	37 MPa	38 MPa	38 MPa	10 755 MPa
SMC 20%	4 635 N	42 MPa	48 MPa	47 MPa	11 012 MPa
SMC 30%	10 845 N	84 MPa	106 MPa	106 MPa	11 500 MPa
SMC 45%	12 085 N	83 MPa	124 MPa	124 MPa	12 778 MPa

Numa análise mais detalhada, é possível verificar que as propriedades de  $P_{m\acute{a}x}$  (Figura 79),  $\sigma_{m\acute{a}x}$  (Figura 80) e  $\sigma_{rot}$  (Figura 81), seguem uma linearidade proporcional para o SMC 15%, SMC 20% e SMC 45%. Contudo, os valores de SMC 30% não seguem a mesma tendência.

Contudo, os valores de  $E$  obtidos experimentalmente seguem um crescimento gradual, tendencialmente segundo uma linha reta, que nos permite concluir que, quanto maior for a % de fibra de vidro maior é o módulo de Young. (Figura 82). Este facto confirma que a rigidez do material é fortemente influenciada pela fibra. Contudo, existe um limite de percentagem de fibra admissível. A partir de uma determinada percentagem a viabilidade da moldação é colocada em causa.

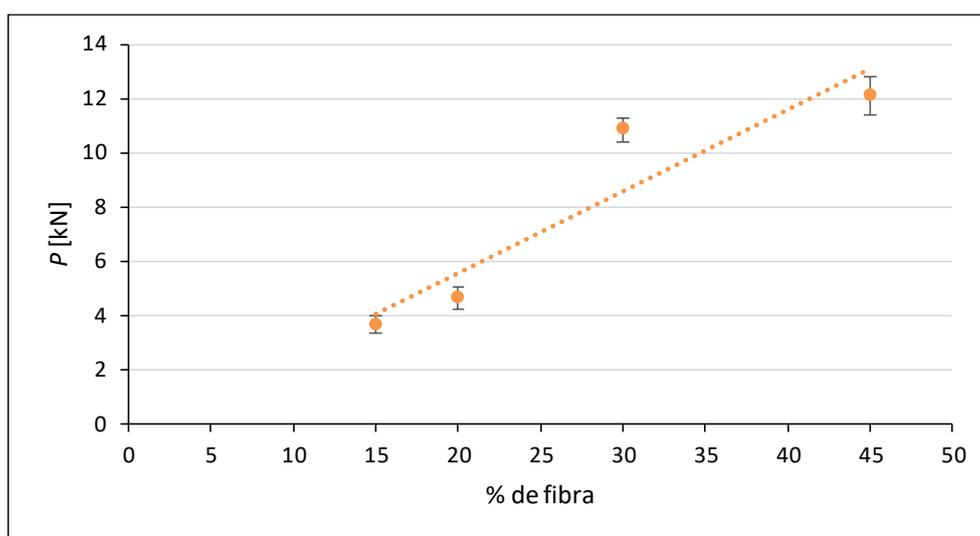
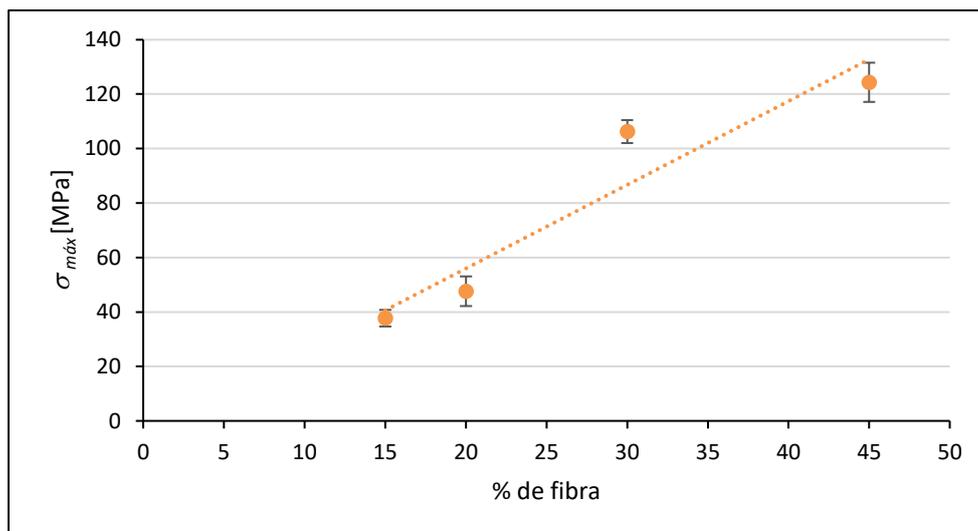
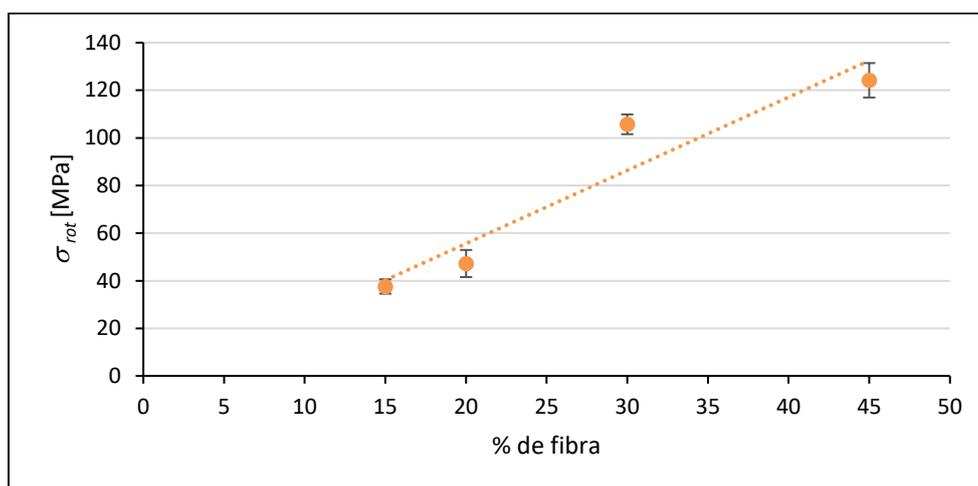
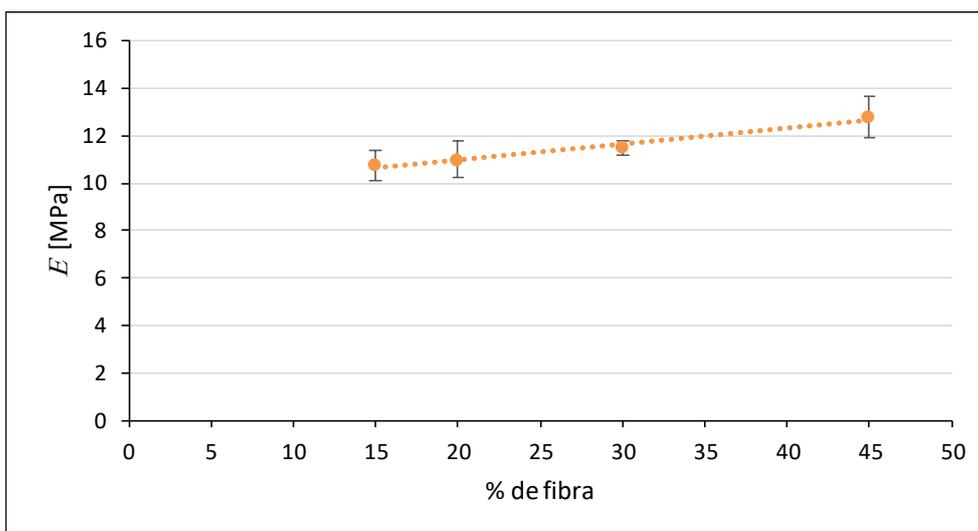


Figura 79 - Valores de  $P_{m\acute{a}x}$  do ensaio experimental à tração

Figura 80 - Valores de  $\sigma_{m\acute{a}x}$  do ensaio experimental à traçãoFigura 81 - Valores de  $\sigma_{rot}$  do ensaio experimental à traçãoFigura 82- Valores de  $E$  do ensaio experimental à tração

### 3.1.4 Ensaio ao corte

O ensaio de *Block Shear Test Method* (BS) foi realizado segundo a norma ASTM D4501-01. Todos os provetes foram ensaiados a uma velocidade de 0,5 mm/min e à temperatura ambiente. Foi usada a máquina de ensaios do laboratório de Ensaios Tecnológicos do ISEP referida anteriormente. A tensão máxima de cada material foi calculada pela média das forças máximas de cada provete válido, a dividir pela área do plano de corte conforme descrito no capítulo 2.2.2.2.

#### 3.1.4.1 Análise de resultados

A Figura 83, Figura 84, Figura 85 e Figura 86 apresentam as curvas  $P$ - $\delta$  dos provetes BS ensaiados, cujos resultados foram válidos e tidos em conta para os cálculos de  $\tau_{\text{máx}}$ .

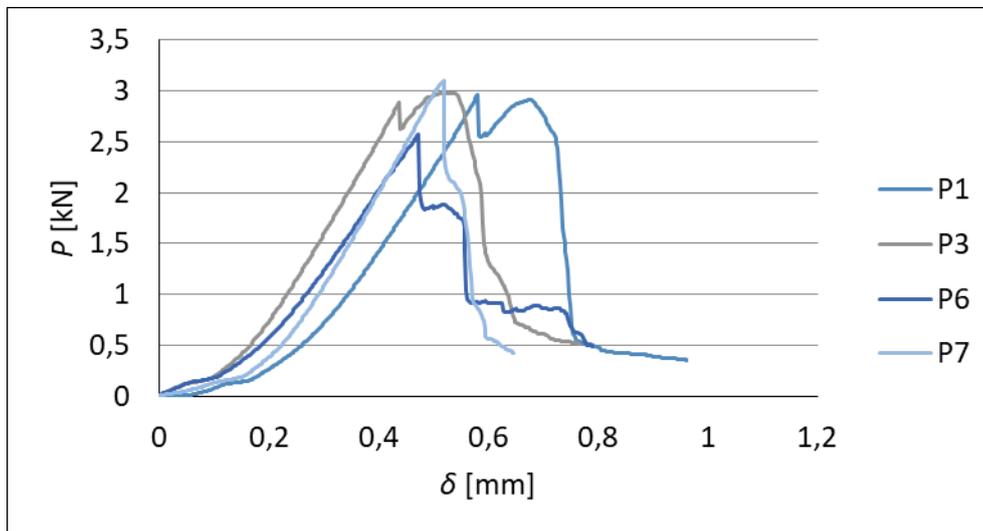


Figura 83 - Curvas  $P$ - $\delta$  do ensaio BS com SMC 15%

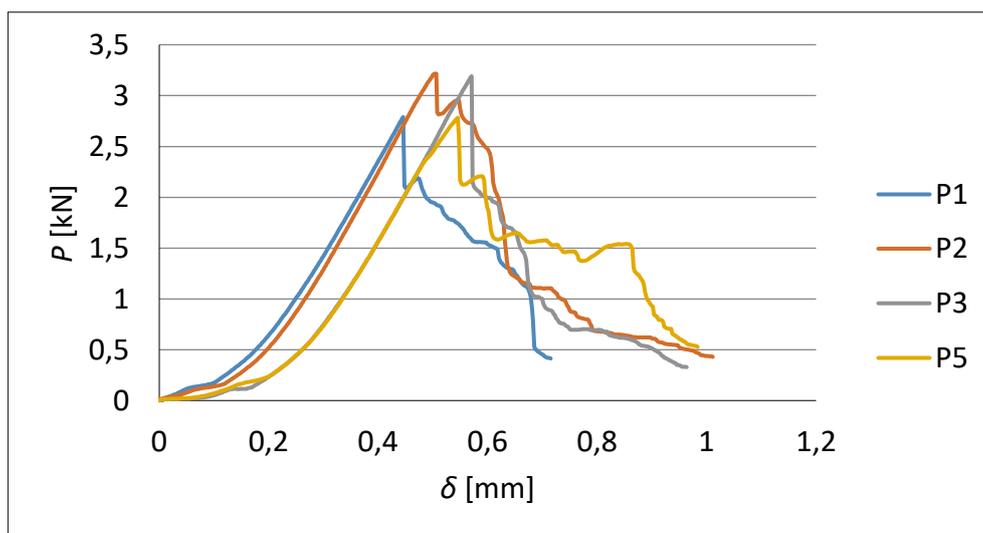
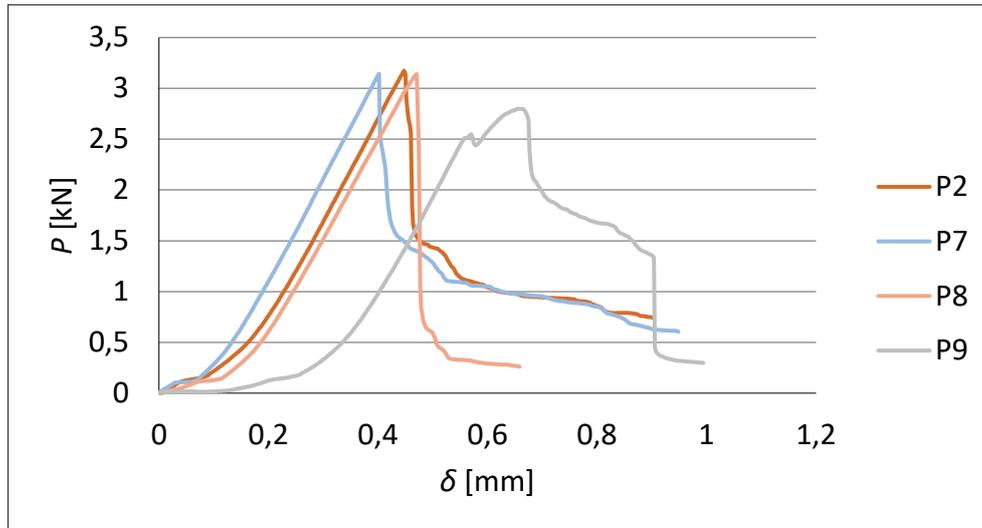
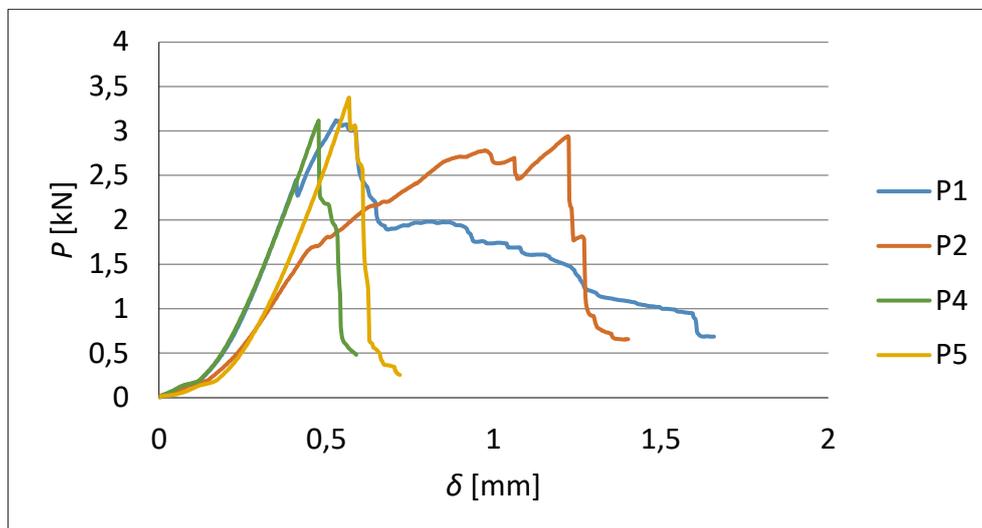


Figura 84 - Curvas  $P$ - $\delta$  do ensaio BS com SMC 20%

Figura 85 - Curvas  $P$ - $\delta$  do ensaio BS com SMC 30%Figura 86 - Curvas  $P$ - $\delta$  do ensaio BS com SMC 45%

A  $\tau_{\text{máx}}$  e respectivos desvios padrão determinados no ensaio BS são apresentados na Tabela 15. Conforme descrito no capítulo 3.1.2.2, alguns dos provetes possuem fendas advindas do processo de fabrico. Os provetes cujas fendas existentes influenciaram o ensaio foram descartados, assim como aqueles em que o esforço de corte ocorreu fora do plano de corte idealizado.

Tabela 15 – Valores médios de  $\tau_{\text{máx}}$  determinados experimentalmente no ensaio BS

Material	SMC 15%	SMC 20%	SMC 30%	SMC 45%
$\tau_{\text{máx}}$ [MPa]	9,3	9,6	9,8	9,9
Desvio Padrão	0,7	0,8	0,6	0,6
CV [%]	7,9%	8,0%	5,8%	6,1%

Em análise ao gráfico da Figura 87, verifica-se um ligeiro aumento da força máxima com o aumento da percentagem de fibra. Apesar de o SMC ser constituído por fibras com orientações aleatórias, durante o processo de moldação ocorre o alinhamento parcial das fibras segundo o plano de escoamento do material. No entanto, a ínfima parte das fibras que ficam na direção oposta ao plano de corte conferem ao material alguma resistência de corte. Esta ocorrência justifica o pequeno aumento de força máxima de acordo com o aumento da percentagem de fibras.

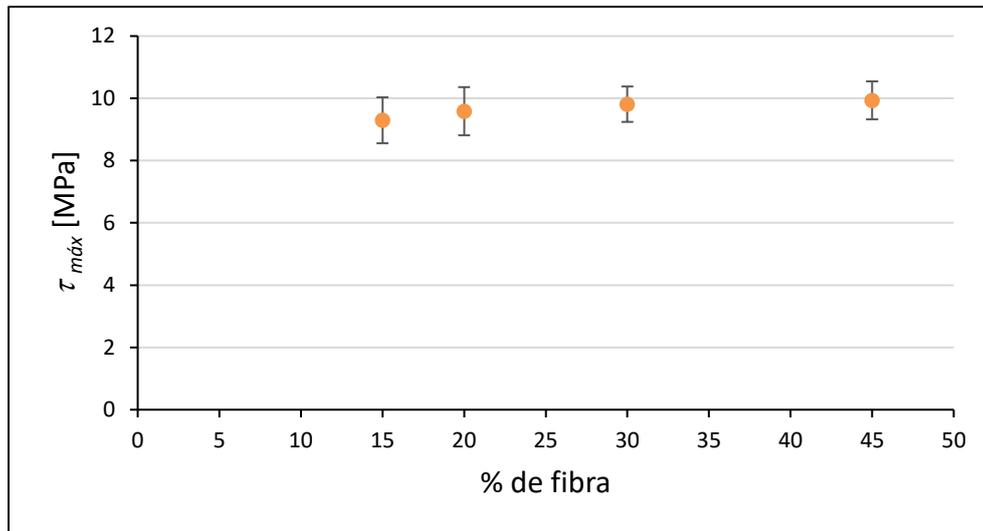


Figura 87 - Valores médios de  $P_{máx}$  do ensaio experimental em BS

A Figura 88, Figura 89, Figura 90 e Figura 91 apresenta as curvas  $\tau$ - $\gamma$  determinadas através dos resultados experimentais. No capítulo 2.2.2.2 explica como são obtidos estes valores, no qual foi admitido uma a distância entre as placas do dispositivo de corte de 0,05 mm.

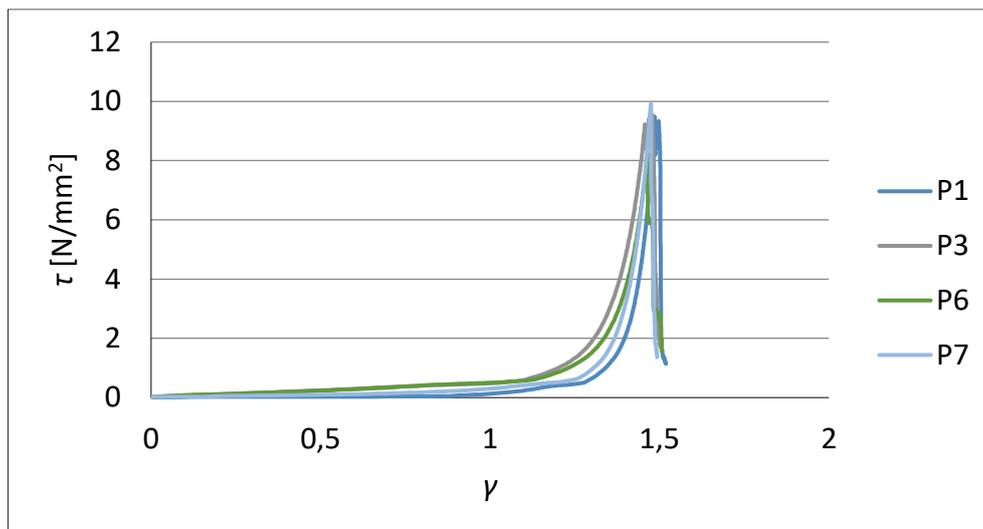
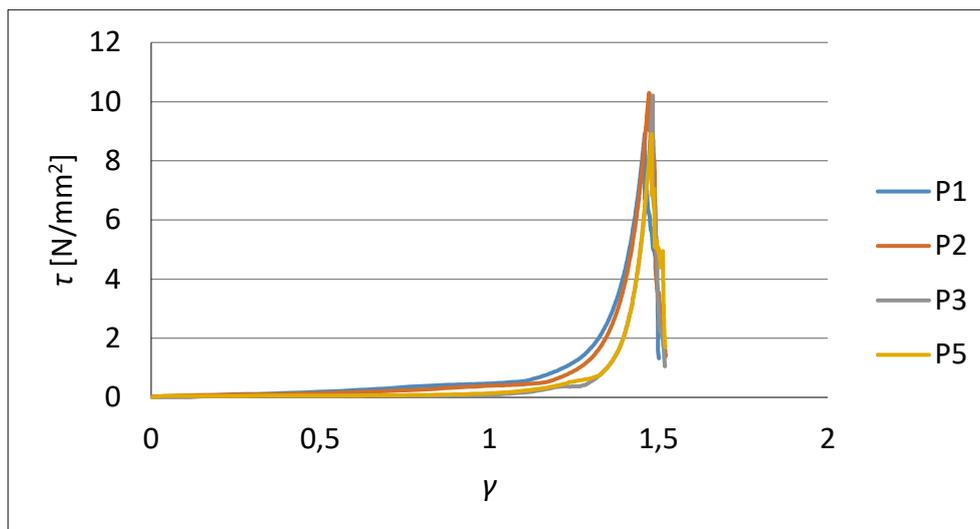
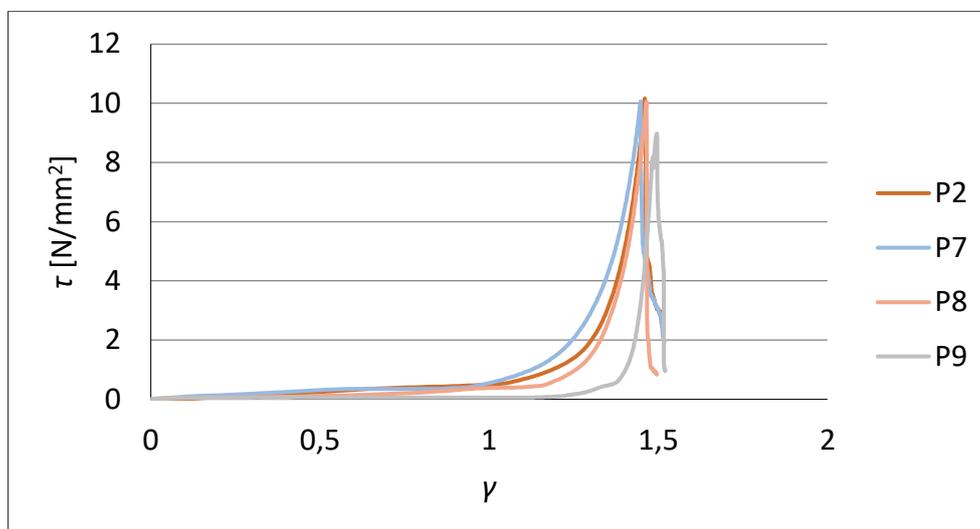
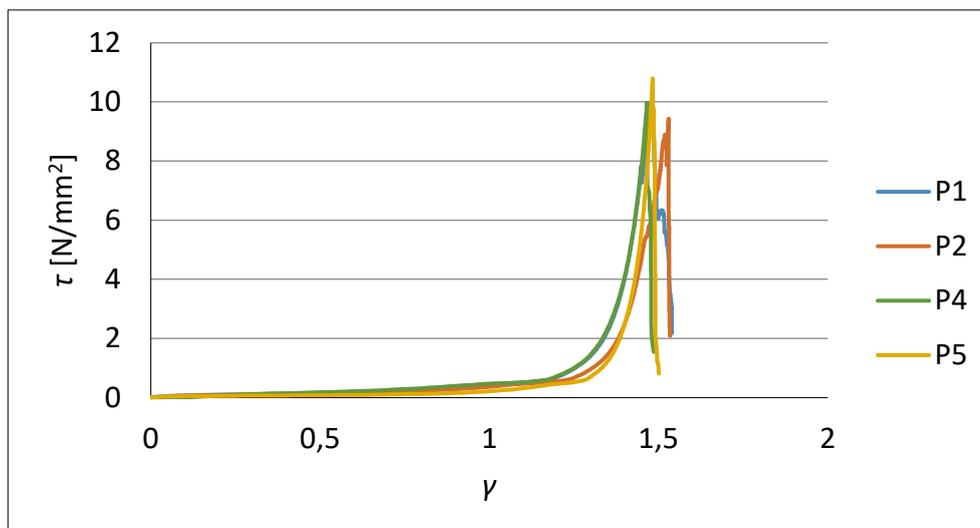


Figura 88 - Curvas  $\tau$ - $\gamma$  do ensaio BS com SMC 15%

Figura 89 - Curvas  $\tau$ - $\gamma$  do ensaio BS com SMC 20%Figura 90 - Curvas  $\tau$ - $\gamma$  do ensaio BS com SMC 30%Figura 91 - Curvas  $\tau$ - $\gamma$  do ensaio BS com SMC 45%

A Tabela 16 apresenta os valores médios de  $G$  obtidos pelo declive das curvas  $\tau$ - $\gamma$  para cada um dos materiais. Apenas foram tidos em conta os provetes validados no ensaio experimental.

Tabela 16 - Valores de médios de  $G$  calculados do ensaio experimental BS

Material	SMC 15%	SMC 20%	SMC 30%	SMC 45%
$G$ [MPa]	117,7	126,3	133,8	151,2
Desvio Padrão	11,7	11,2	12,0	18,5
CV [%]	10,0%	8,9%	9,0%	12,2%

A Figura 92 apresenta graficamente os valores de  $G$ . Com a análise dos mesmos, podemos verificar um ligeiro aumento gradual com o aumento da percentagem de fibra. Contudo, este aumento não é significativo.

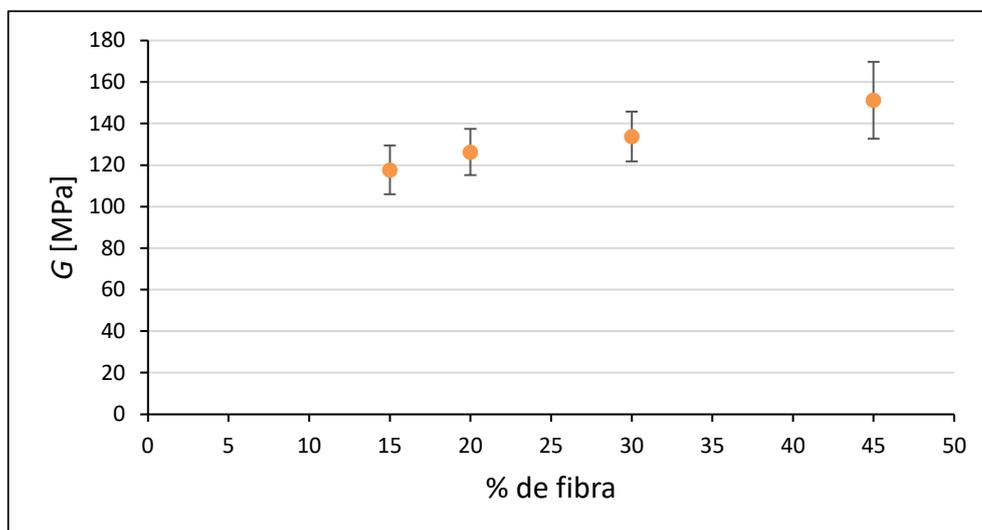


Figura 92 - Valores médios de  $G$  do ensaio experimental em BS

Com a análise dos resultados, pode-se afirmar que a resistência ao corte, segundo a direção das fibras, é essencialmente dada pela matriz. Como as propriedades das matrizes dos diferentes materiais escolhidos são equivalentes, o  $\tau_{máx}$  e o  $G$  são praticamente idênticos entre os quatro materiais. Desta forma, pode-se concluir que a percentagem de fibra não afeta significativamente a resistência ao corte do SMC.

### 3.1.5 Ensaio à fratura – modo I

O ensaio DCB foi realizado com base na norma ASTM D5528-01, e recorreu-se à máquina de ensaios do Laboratório de Ensaios Tecnológicos do ISEP referida anteriormente. Foram testados seis provetes a uma velocidade de 8 mm/min e à temperatura ambiente.

Os parâmetros medidos durante o ensaio DCB foram  $P$ ,  $\delta$  e  $a$ . Para a leitura de  $a$  efetuou-se o registo fotográfico de 5 em 5 segundos com recurso a uma máquina fotográfica Canon® modelo EOS 650D com uma resolução de 20 Megapixéis, posicionada de acordo com a Figura 93.

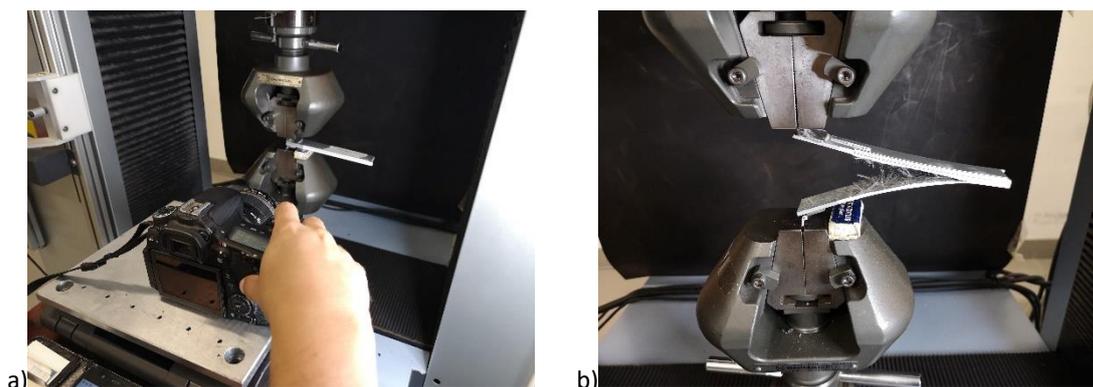


Figura 93 - Montagem do equipamento fotográfico para medição de comprimento de fenda no ensaio DCB, e b) montagem do provete nas amarras do equipamento de ensaio

Com o auxílio de um paquímetro digital, foram medidos os valores de  $a_0$ . Os valores obtidos são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores obtidos na medição de  $a_0$  para os provetes DCB

Provete	SMC 15% $a_0$ [mm]	SMC 20% $a_0$ [mm]	SMC 30% $a_0$ [mm]	SMC 45% $a_0$ [mm]
<b>P1</b>	36,3	38,5	36,7	36,6
<b>P2</b>	39,3	38,7	36,9	36,2
<b>P3</b>	38,6	36,4	38,2	37,4
<b>P4</b>	38,3	36,6	38,5	38,2
<b>P5</b>	39,7	36,7	37,6	38,5
<b>P6</b>	38,8	40,8	36,5	34,8

### 3.1.5.1 Análise de resultados

As propriedades de fratura à tração foram determinadas pelos métodos CCM e CBT que requerem a medição do comprimento de fenda, e o método CBBM que é baseado no comprimento de fenda equivalente. As equações para determinação do  $G_{Ic}$  pelos diferentes métodos foram apresentadas no capítulo 2.2.3.1.

As curvas  $P-\delta$  foram registadas através do *software* para cada um dos provetes DCB dos quatro materiais a estudo e encontram-se na Figura 94, Figura 95, Figura 96 e Figura 97. Estas apresentam um comportamento com pouca repetibilidade. Este comportamento deve-se ao facto de o SMC ser constituído por fibras dispostas de forma aleatória que resultam em comportamentos bastante díspares. A este facto acresce o fenómeno das pontes de fibra, referido no capítulo 2.2.3.1, ter mais ou menos influência na propagação da fenda. Como forma de filtragem destes fenómenos, todos os provetes considerados *outliers* foram rejeitados.

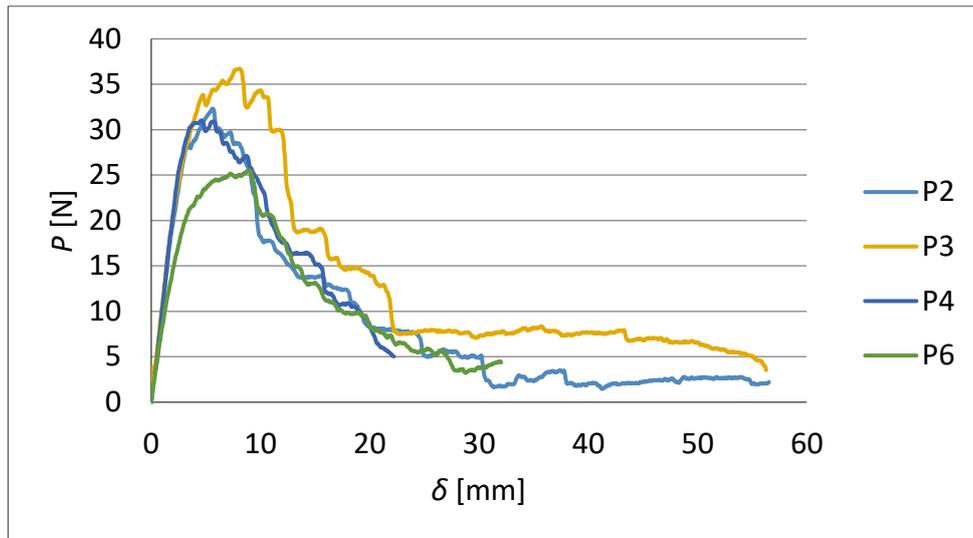


Figura 94 - Curvas P-δ para o SMC 15%

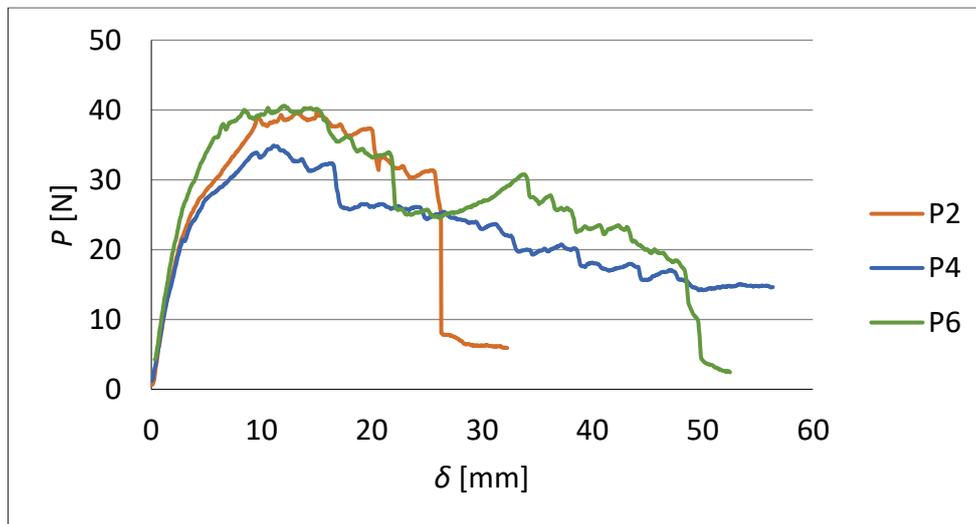


Figura 95 - Curvas P-δ para o SMC 20%

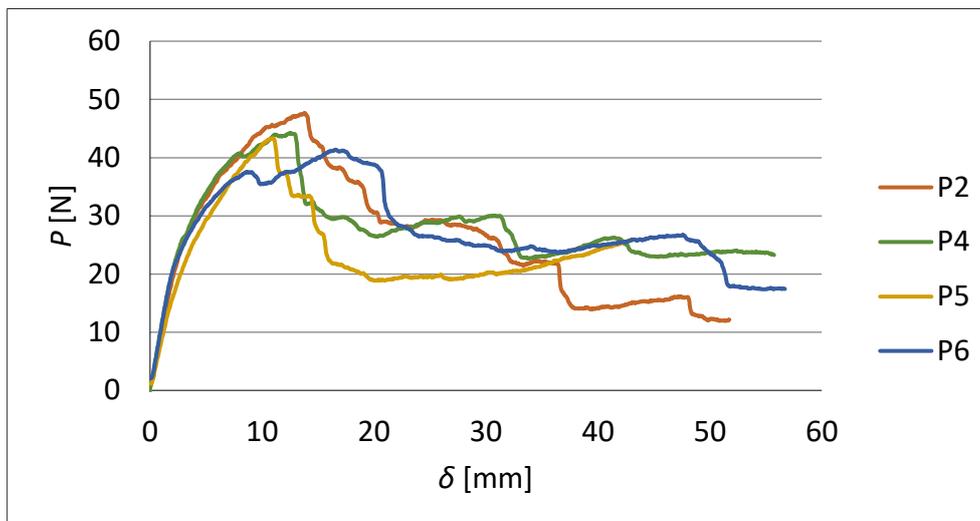


Figura 96 - Curvas P-δ para o SMC 30%

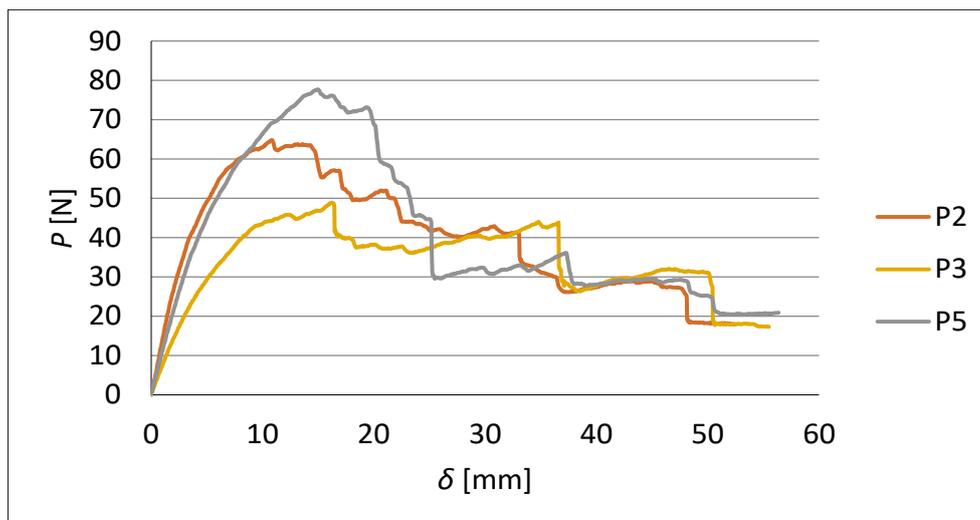


Figura 97 - Curvas  $P$ - $\delta$  para o SMC 45%

A Figura 98, Figura 99, Figura 100 e Figura 101 representa a(s) curva(s)  $R$  de um provete do ensaio experimental, para cada uma das % de fibra. A curva  $R$  é a taxa de libertação de energia para cada momento do deslocamento da fenda. Nos pontos, cuja curva  $R$  aparenta estabilizar em torno de um valor é possível determinar a  $G_{Ic}$  do provete através da média dos pontos desse mesmo patamar. Na ilustração de cada uma das curvas, o patamar da curva  $R$  é evidenciado através de um círculo e/ou oval para cada um dos métodos utilizados.

Durante o ensaio experimental de SMC com 15% de fibra de vidro foi possível observar que particamente não ocorre propagação da fenda, uma vez que ocorre rotura precoce do provete. Este facto tornou os resultados obtidos nos métodos CCM e CBT incoerentes, uma vez que os mesmos utilizam o  $a$  medido. Contudo, foi possível estudar os provetes através do método CBBM, já que este utiliza o  $a_{eq}$ . A Figura 98 é a ilustração da curva  $R$  para o provete P4 e permite determinar que a  $G_{Ic}$  é de 0,16 N/mm, aproximadamente.

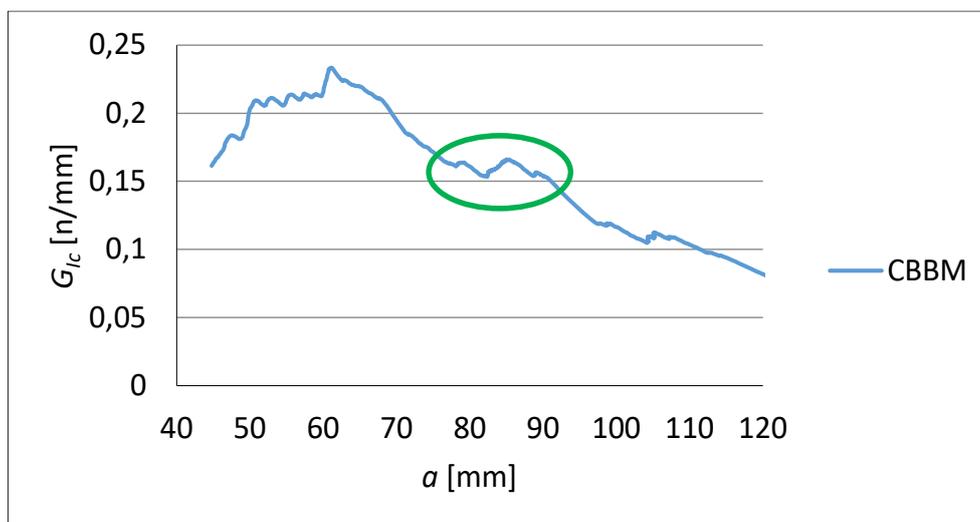


Figura 98 - Curva  $R$  do provete P4 do SMC 15%

O método CBBM foi aplicado aos restantes provetes, o que permitiu determinar o valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação para esta propriedade para a % de fibra em causa. A Tabela 17 representa a compilação de todos os valores descritos anteriormente.

Tabela 18 - Resultados de  $G_{Ic}$  para o SMC 15%

Provete	CBBM $G_{Ic}$ [N/mm]
P2	0,1311
P3	0,1539
P4	0,1587
P6	0,1385
Média	0,1455
Desvio	0,01291
CV [%]	8,9%

Para as restantes três % de fibra de SMC em estudo, já foi possível estudar os três métodos para este tipo de análise experimental.

No caso do SMC com 20% de fibra de vidro, a Figura 99 representa esses mesmos três métodos estudados no provete P6. Neste caso, os patamares escolhidos têm valores de comprimento de fenda distintos:

- CCM – 0,50 N/mm;
- CBT – 0,54 N/mm;
- CBBM – 0,51 N/mm.

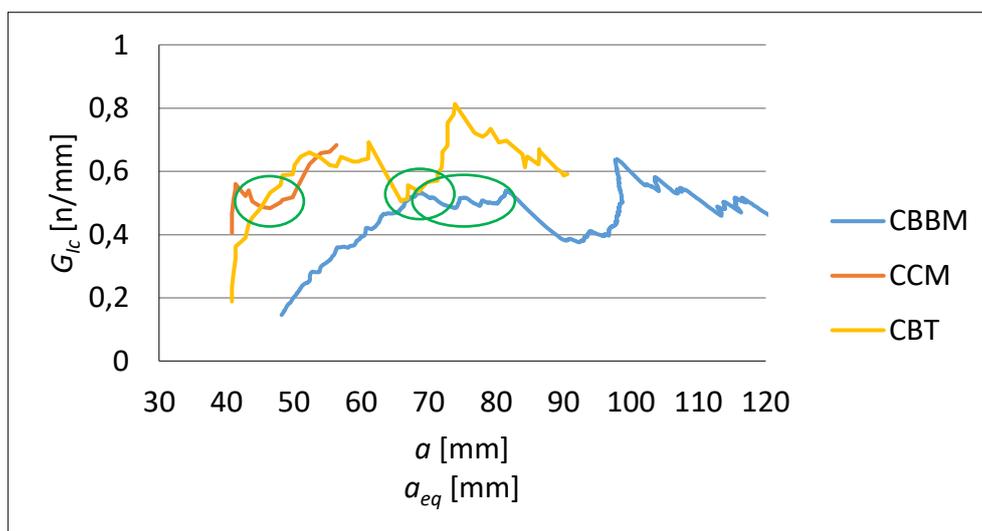


Figura 99 - Curvas R do provete P6 do SMC 20%

A Tabela 19 é um quadro resumo dos valores de  $G_{Ic}$ , para cada um dos métodos em cada um dos provetes de 20% de fibra, bem como o valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 19 - Resultados de  $G_{Ic}$  para o SMC 20%

Provete	CCM $G_{Ic}$ [N/mm]	CBT $G_{Ic}$ [N/mm]	CBBM $G_{Ic}$ [N/mm]
P2	0,5377	0,5353	0,4855
P4	0,5272	0,4917	0,4213
P6	0,5043	0,5376	0,5093
Média	0,5231	0,5149	0,4903
Desvio	0,01706	0,02192	0,01719
CV [%]	3,2%	4,3%	3,5%

A Figura 100 representa as curvas R do provete P6 do SMC com 30% de fibra para cada um dos métodos. Neste caso, a estabilização de  $G_{Ic}$  ocorreu praticamente para o mesmo  $a$  nos três métodos:

- CCM – 0,47 N/mm;
- CBT – 0,50 N/mm;
- CBBM – 0,49 N/mm.

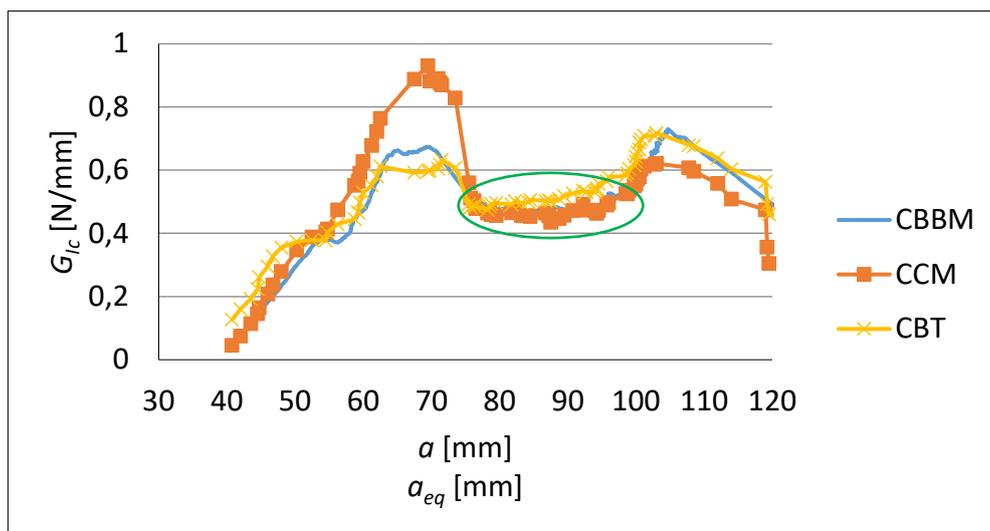


Figura 100 - Curvas R do provete P6 do SMC 30%

O quadro resumo dos dados obtidos para cada um dos métodos em cada um dos provetes do SMC de 30% de fibra, está descrito na Tabela 20. Novamente, é possível na mesma verificar qual o valor de  $G_{Ic}$  médio para cada método, o desvio padrão e o coeficiente de variação associado.

Tabela 20 - Resultados de  $G_{Ic}$  para o SMC 30%

Provete	CCM $G_{Ic}$ [N/mm]	CBT $G_{Ic}$ [N/mm]	CBBM $G_{Ic}$ [N/mm]
P2	0,5145	0,5235	0,5383
P4	0,5150	0,4673	0,4796
P5	0,4822	0,4742	0,4774
P6	0,4729	0,4996	0,4869
Média	0,4962	0,4912	0,4955
Desvio	0,02180	0,02563	0,02881
CV [%]	4,4%	5,2%	5,8%

Por fim, para o SMC de 45% de fibra de vidro, foi selecionado o provete P2, cuja representação das curvas R está na Figura 101.

Os patamares de  $G_{Ic}$  para este provete concentram-se num pequeno patamar bastante similar entre os vários métodos. Estes patamares traduzem-se nos seguintes valores:

- CCM – 0,81 N/mm;
- CBT – 0,79 N/mm;
- CBBM – 0,82 N/mm.

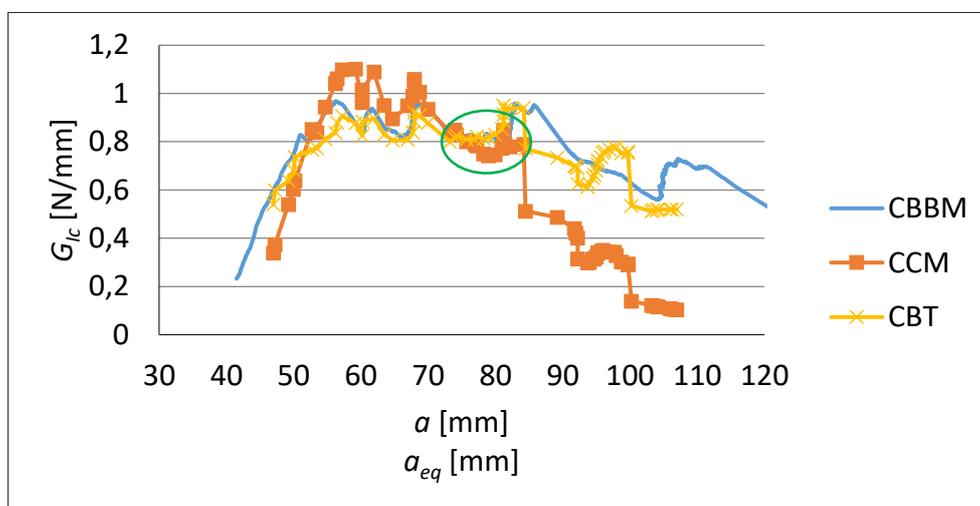


Figura 101 - Curvas R do provete P2 do SMC 45%

A Tabela 21 apresenta o resumo dos dados de  $G_{Ic}$  obtidos experimentalmente para o SMC de 45% de fibra de vidro em cada um dos provetes, média, desvio padrão e coeficiente de variação.

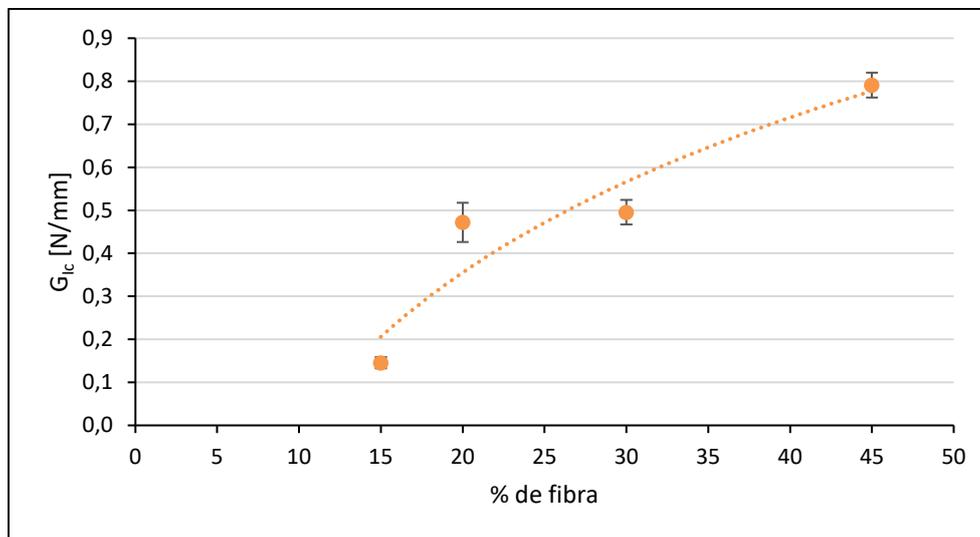
Tabela 21 - Resultados de  $G_{Ic}$  para o SMC 45%

Provete	CCM $G_{Ic}$ [N/mm]	CBT $G_{Ic}$ [N/mm]	CBBM $G_{Ic}$ [N/mm]
P2	0,7852	0,8131	0,8184
P3	0,8157	0,8037	0,7943
P5	0,8009	0,7868	0,7609
Média	0,8006	0,8012	0,7912
Desvio	0,00757	0,01337	0,02890
CV [%]	0,9%	1,7%	3,7%

Em suma, a Figura 102 é a representação gráfica do método CBBM, considerando não os provetes, mas cada uma das % de fibra do SMC. Na mesma é possível verificar que existe um crescimento da  $G_{Ic}$  com o aumento da percentagem de fibra de vidro, e inclusive que este aumento segue uma tendência logarítmica.

Em termos percentuais, utilizando os valores da Tabela 22, quadro resumo da  $G_{Ic}$ . para cada uma das % de fibra em cada um dos métodos, é possível calcular a percentagem de crescimento da taxa de libertação de energia para cada uma das % de fibra:

- 20% de fibra – Aumento de 324% em relação a 15% de fibra;
- 30% de fibra – Aumento de 340% em relação a 15% de fibra;
- 45% de fibra – Aumento de 544% em relação a 15% de fibra.

Figura 102 - Valores médios de  $G_{Ic}$  segundo o método CBBM com curva de tendência logarítmica

A Tabela 22 contém ainda os valores médios para os outros dois métodos, CCM e CBT para cada uma das % de fibra. É possível verificar que os valores são bastante similares aos do método CBBM, logo as ilações são transversais a todos os métodos. Por esta razão, e porque este método tem um menor erro associado, utiliza o  $a_{eq}$  em vez do  $a$  medido, optou-se por não realizar a representação gráfica dos métodos CCM e CBT.

Tabela 22 - Resumo valores experimentais de  $G_{Ic}$  médios para todos os materiais

Material	CCM $G_{Ic}$ [N/mm]	CBT $G_{Ic}$ [N/mm]	CBBM $G_{Ic}$ [N/mm]
SMC 15%	-	-	0,1455
SMC 20%	0,5231	0,5149	0,4721
SMC 30%	0,4962	0,4912	0,4955
SMC 45%	0,8073	0,8012	0,7912

### 3.1.6 Ensaio à fratura – modo II

À semelhança dos restantes ensaios, os ensaios ENF foram realizados na máquina de ensaios do Laboratório de Ensaios Tecnológicos do ISEP. Estes ensaios foram realizados à temperatura ambiente e com uma velocidade de ensaio de 1,5 mm/min.

Os parâmetros medidos durante o ensaio ENF foram  $P$ ,  $\delta$  e  $a$ . Para a leitura de  $a$ , efetuou-se o registo fotográfico a cada 5 em 5 segundos com recurso a uma máquina fotográfica Canon® modelo EOS 650D com uma resolução de 20 Megapixéis, posicionada de acordo com a Figura 103. Os dois restantes parâmetros foram registados pela máquina de ensaio com uma frequência de 4 Hz.

No entanto, devido ao processo de fabrico dos provetes, em que não foi possível introduzir uma fenda com o comprimento desejado, foi necessário ajustar a distância entre pontos de contacto inferiores. Este ajuste foi feito de forma a garantir que  $a_0$  fosse superior a 70% de  $L$ . Para isto, foi definido um  $L$  de 60 mm.

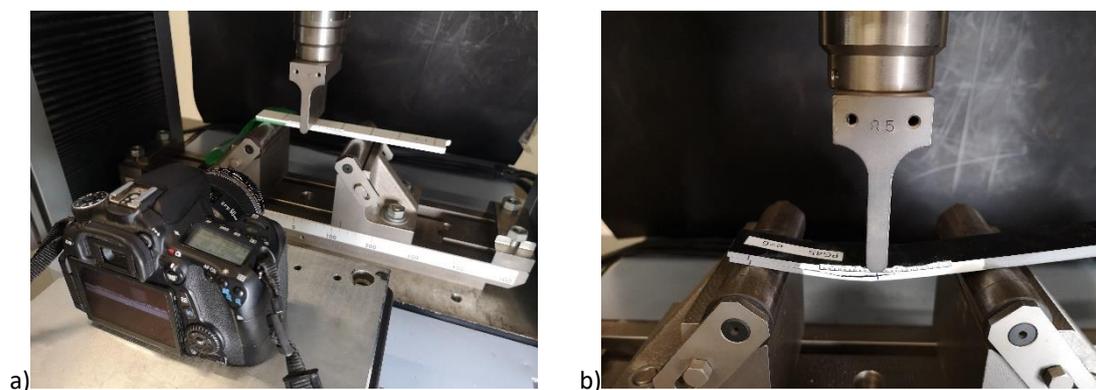


Figura 103 - a) Montagem do equipamento fotográfico para medição de comprimento de fenda no ensaio ENF, e b) montagem do provete nas amarras do equipamento de ensaio

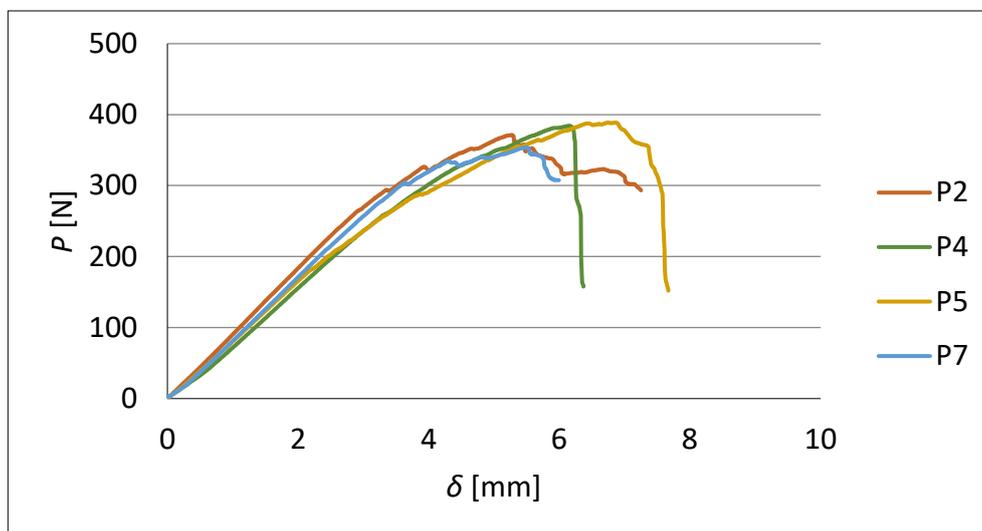
Com o auxílio de um paquímetro digital, foram medidos os valores de  $a_0$ . Os valores obtidos são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Valores obtidos na medição de  $a_0$  para os provetes ENF

Provete	SMC 15% $a_0$ [mm]	SMC 20% $a_0$ [mm]	SMC 30% $a_0$ [mm]	SMC 45% $a_0$ [mm]
P1	36,1	34,5	29,9	35,1
P2	33,6	33,9	33,0	34,0
P3	33,0	32,5	33,9	32,6
P4	34,1	32,7	31,9	34,6
P5	33,9	34,3	32,3	33,2
P6	32,4	34,6	33,0	33,9

### 3.1.6.1 Análise de resultados

A Figura 104, Figura 105, Figura 106 e Figura 107 representa as curvas  $P-\delta$  para cada um dos provetes ENF dos quatro materiais em estudo. A estrutura da apresentação de resultados segue a mesma linha de raciocínio que os ensaios DCB. Para cada uma das % de fibra é analisada a(s) curva(s) R de um dos provetes, Figura 108, Figura 109, Figura 110 e Figura 111, e posteriormente apresentado a análise comparativa entre os vários provetes ensaiado. No final, é realizada a análise comparativa dos valores da taxa de liberação de energia do ensaio ENF para cada uma das % de fibra de vidro no SMC.

Figura 104 - Curvas  $P-\delta$  para o SMC 15%

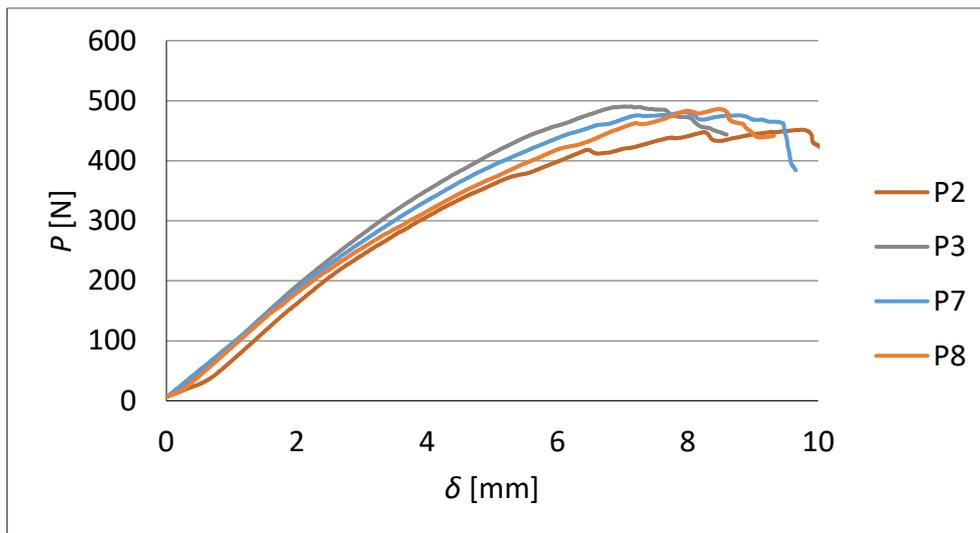


Figura 105 - Curvas P-δ para o SMC 20%

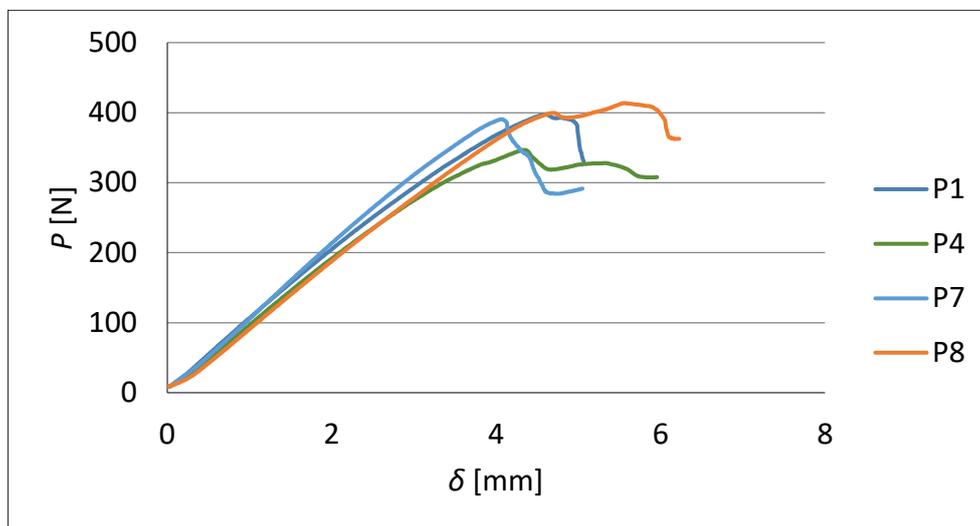


Figura 106 - Curvas P-δ para o SMC 30%

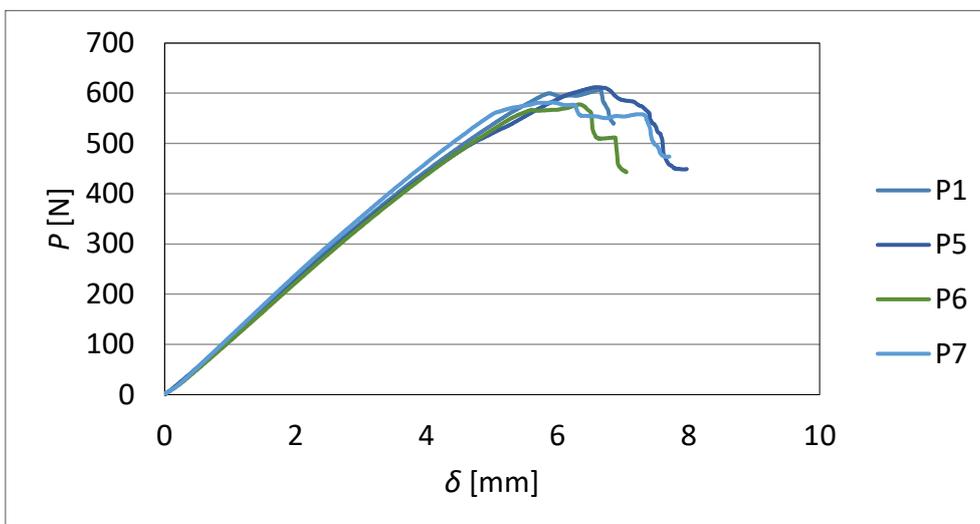


Figura 107 - Curvas P-δ para o SMC 45%

Tal como ocorreu nos ensaios DCB, para o SMC com 15 e 20% de fibra de vidro, foi possível observar que praticamente não ocorre propagação da fenda, mas sim a rotura precoce do provete. Assim sendo, os métodos CCM, CBT e DBT apresentaram resultados inconclusivos. Novamente, só foi possível estudar o método CBBM, uma vez que o mesmo utiliza o  $a_{eq}$ .

No seguimento do exposto, a Figura 108 representa a curva R do provete P7 no método CBBM, cujo valor de  $G_{IIc}$  é de 1,05 N/mm, aproximadamente.

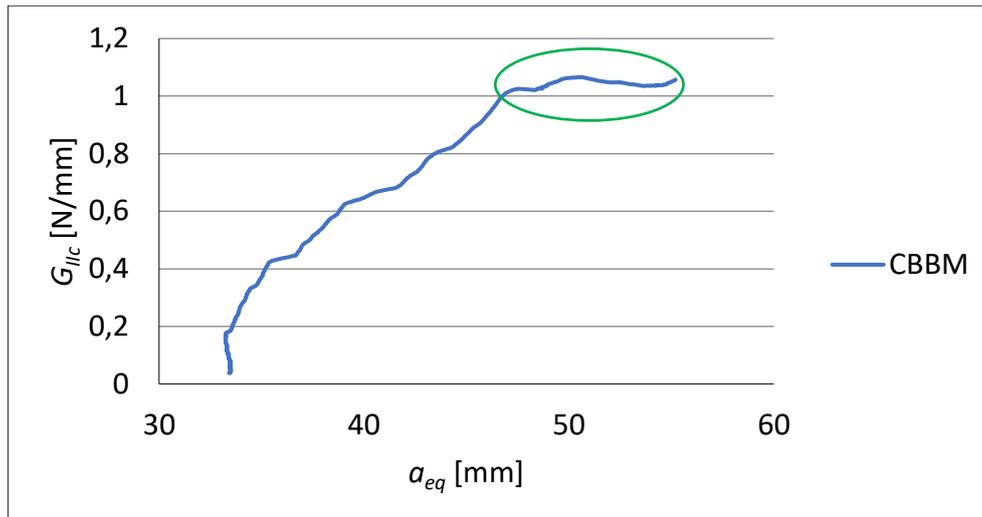


Figura 108 - Curva R do provete P7 do ensaio ENF para SMC 15%

A Tabela 24 apresenta os valores da  $G_{IIc}$  para cada um dos provetes, bem como a média obtida, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 24 - Resultados de  $G_{IIc}$  para o SMC 15%

Provete	CBBM - $G_{IIc}$ [N/mm]
P2	1,2256
P4	1,2950
P5	1,3269
P7	1,0522
Média	1,2249
Desvio	0,12267
CV [%]	10,01%

Tal como exposto anteriormente, para o SMC 20% só foi possível aplicar o método CBBM e o valor de taxa de libertação de energia obtido para o provete P8 é de 2,37 N/mm, aproximadamente, representado graficamente na Figura 109.

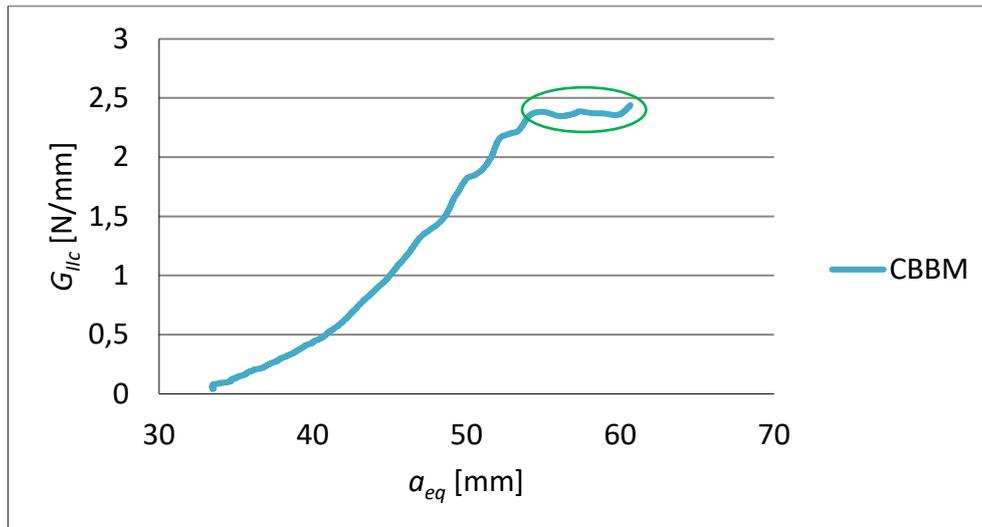


Figura 109 - Curva R do provete P8 do ensaio ENF para SMC 20%

O quadro resumo da Tabela 25 indica todos os valores de  $G_{IIc}$  para os provetes em estudo, a média obtida para esta % de fibra, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 25 - Resultados de  $G_{IIc}$  para o SMC 20%

Provete	CBBM - $G_{IIc}$ [N/mm]
P2	2,2762
P3	2,2493
P7	2,2391
P8	2,3670
Média	2,2829
Desvio	0,05820
CV [%]	2,55%

Já no SMC com 30 e 45% de fibra, foi possível estudar os quatro métodos associados aos ensaios ENF. No provete P7 com 30% de fibra, os patamares do método DBT e CBBM são quase equivalentes, enquanto que nos métodos CCM e CBT são ligeiramente superiores. A partir da Figura 101, é possível verificar que os valores obtidos são:

- CCM – 0,9 N/mm;
- DBT – 0,8 N/mm;
- CBT – 0,9 N/mm;
- CBBM – 0,8 N/mm.

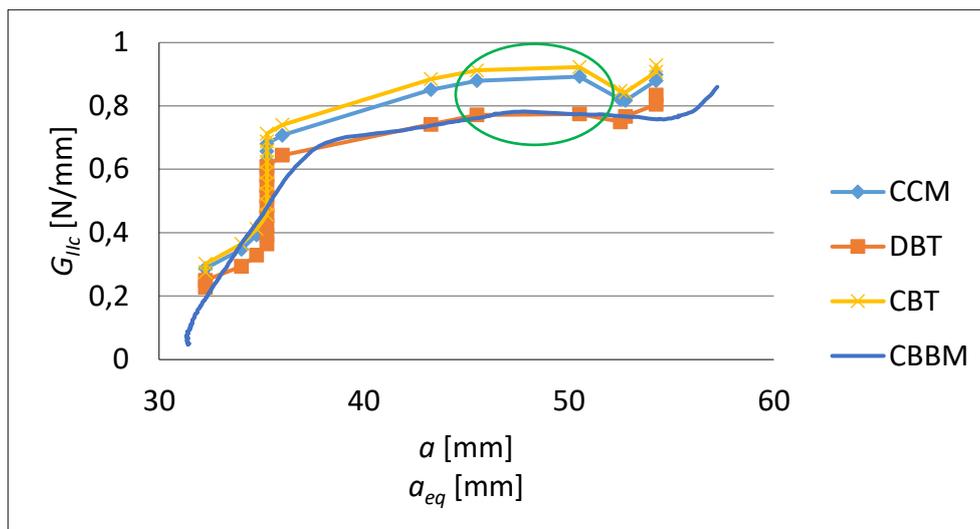


Figura 110 - Curvas R do provete P7 do ensaio ENF para SMC 30%

A Tabela 26 segue o conceito das anteriores, mas para o SMC de 30% de fibra de vidro, e na mesma é possível encontrar todos os valores da  $G_{IIc}$  obtidos para os vários provetes nos vários métodos, média dos mesmos, desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 26 - Resultados de  $G_{IIc}$  para o SMC 30%

Provete	CCM	CBT	DBT	CBBM
	$G_{IIc}$ [N/mm]	$G_{IIc}$ [N/mm]	$G_{IIc}$ [N/mm]	$G_{IIc}$ [N/mm]
<b>P1</b>	0,8557	0,8333	0,8347	0,9066
<b>P4</b>	0,8964	0,8309	0,8720	0,8103
<b>P7</b>	0,8521	0,8376	0,7779	0,7903
<b>P8</b>	0,8692	0,9426	0,8614	0,9956
<b>Média</b>	0,8684	0,8611	0,8365	0,8757
<b>Desvio</b>	0,02008	0,05440	0,04212	0,09469
<b>CV [%]</b>	2,3%	6,3%	5,0%	10,8%

Por fim, para o provete P5 do SMC de 45% de fibra, a zona do patamar de  $G_{IIc}$  não é tão perceptível como nas restantes representações gráficas, mas é possível de identificar na Figura 111. Os resultados obtidos para cada um dos métodos em estudo foram:

- CCM – 2,2 N/mm;
- DBT – 2,0 N/mm;
- CBT – 2,1 N/mm;
- CBBM – 2,1 N/mm.

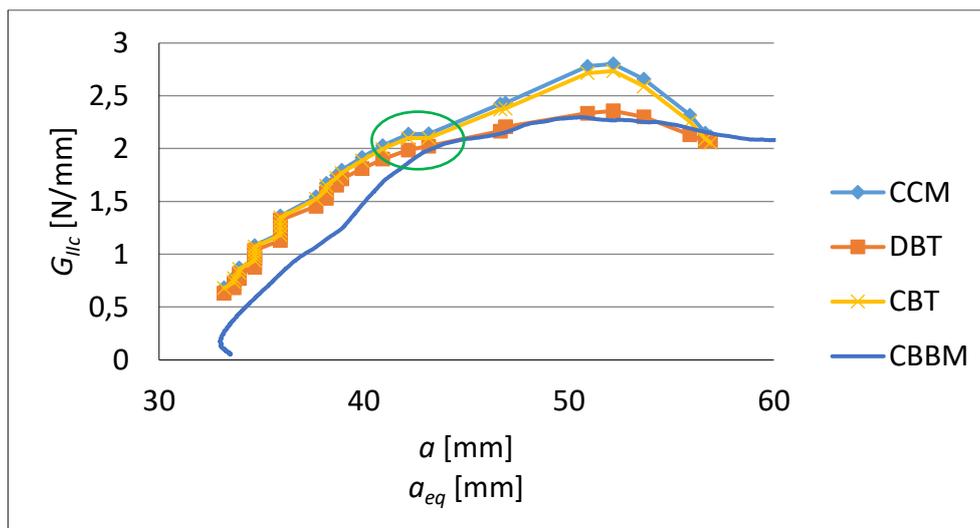


Figura 111 - Curvas R do provete P5 do ensaio ENF para SMC 45%

A Tabela 27 é a compilação de todos os valores de  $G_{IIc}$  obtida nos vários provetes do SMC de 45% de fibra de vidro, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação em cada um dos métodos a estudo.

Tabela 27 - Resultados de  $G_{IIc}$  para o SMC 45%

Provete	CCM	CBT	DBT	CBBM
	$G_{IIc}$ [N/mm]	$G_{IIc}$ [N/mm]	$G_{IIc}$ [N/mm]	$G_{IIc}$ [N/mm]
<b>P1</b>	2,0765	2,3334	2,1006	2,1010
<b>P5</b>	2,1382	2,0997	2,0057	2,1823
<b>P6</b>	2,1013	2,1547	2,0386	2,0967
<b>P7</b>	2,1332	2,2492	2,0518	2,1793
<b>Média</b>	2,1123	2,2092	2,0492	2,1398
<b>Desvio</b>	0,02892	0,10324	0,03941	0,04735
<b>CV [%]</b>	1,4%	4,7%	1,9%	2,2%

Tal como no ensaio DCB, foi realizada uma representação gráfica do método CBBM com os valores médios obtidos em cada uma das % de fibra, estando a mesma representada na Figura 112.

Após uma análise detalhada, não foi possível obter relação entre os valores obtidos. Apesar de existir um crescimento entre 15 e 20%, tal como era de esperar, logo de imediato dá-se um declínio abrupto entre 20 e 30%. Posteriormente, entre 30 e 45% volta a existir um aumento acentuado, tornando a taxa de libertação obtida em 45% muito similar ao valor obtido para 20%. Esta variação entre os dados, não permite encontrar uma relação entre os valores, tal como se encontrou para os ensaios DCB, o que leva a crer que neste tipo de ensaios é a matriz que confere tenacidade ao corte do material.

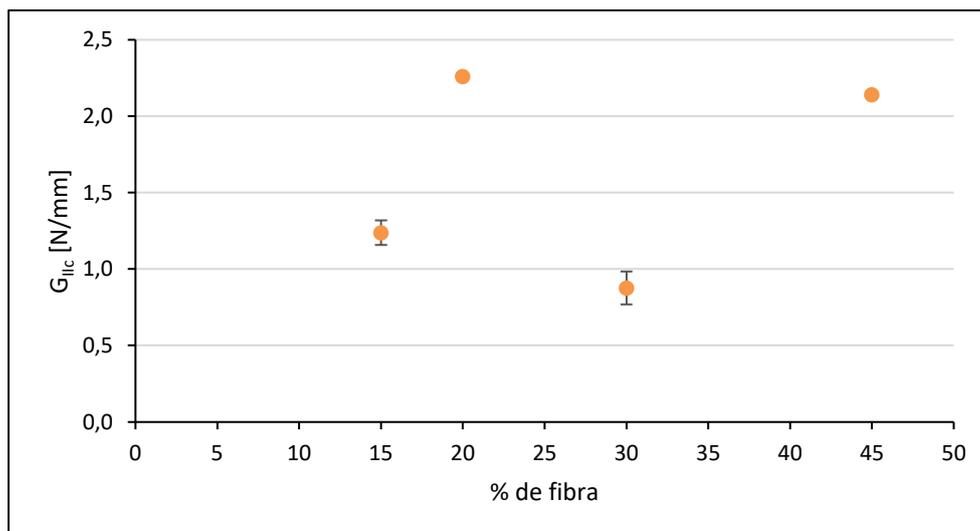


Figura 112 - Gráfico de valores de  $G_{IIc}$  segundo o CBBM

Através dos valores da Tabela 28 é possível comprovar percentualmente a discrepância entre os valores obtidos:

- 20% de fibra – Aumento de 183% em relação a 15% de fibra;
- 30% de fibra – Redução de 30% em relação a 15% de fibra;
- 45% de fibra – Aumento de 173% em relação a 15% de fibra.

Ainda na Tabela 28 é possível verificar os valores médios da  $G_{IIc}$  para os restantes métodos. O método CBBM foi o único possível de estudar nas quatro % de fibra, e mesmo assim mostrou-se inconclusivo. Por esta razão, e pelo facto de os valores dos restantes métodos terem sido muito similares ao método CBBM, optou-se por não realizar a representação gráfica dos restantes métodos para cada uma das % de fibra de vidro.

Tabela 28 - Resumo valores experimentais de  $G_{IIc}$  médios para todos os materiais

Material	CCM	CBT	DBT	CBBM
<b>SMC 15%</b>	-	-	-	1,2374
<b>SMC 20%</b>	-	-	-	2,2593
<b>SMC 30%</b>	0,8524	0,8564	0,8365	0,8757
<b>SMC 45%</b>	2,1123	2,2092	2,0492	2,1398

## 3.2 Modelação numérica

Este capítulo aborda a análise numérica dos ensaios experimentais realizados.

Através da modelação computacional são calculadas as propriedades numéricas para cada tipo de ensaio e posteriormente, comparadas com as propriedades obtidas experimentalmente. Para tal, recorreu-se ao *software* ABAQUS®, versão 2017 da *Dassault Systèmes*, o qual oferece soluções para as mais diversas áreas da engenharia. Possui uma interface de simples utilização e permite criar simulações pela análise por elementos finitos.

Para a realização da análise numérica foram privilegiados os ensaios DCB e ENF devido à sua complexidade em comparação com ensaio de tração e BS. Assim sendo, toda análise exposta neste capítulo faz menção exclusiva aos ensaios de tenacidade à fratura.

As análises numéricas dos ensaios DCB e ENF passaram essencialmente por três etapas distintas. Primeiramente, foram definidos os modelos com as suas respectivas características físicas do problema. De seguida, foram executadas as simulações em si com recurso aos dados introduzidos na primeira etapa. Desta forma foi possível obter o modelo numérico. Por fim, foram comparados os resultados das curvas  $P-\delta$  obtidas numericamente com as obtidas experimentalmente.

### 3.2.1 Condições da análise numérica

A análise numérica foi realizada com base no módulo integrado de MDC disponível no *software* ABAQUS®. A elaboração dos modelos requer a seguinte sequência de passos e parâmetros.

Primeiramente, foram criadas as geometrias dos provetes. Neste caso, foram considerados modelos bidimensionais (2D) uma vez que a largura dos provetes é constante. A Figura 113 representa um exemplo da definição de geometria para o provete DCB. As dimensões dos provetes DCB e ENF podem ser consultadas nos capítulos 3.1.2.3 e 3.1.2.4, respetivamente. Contudo, estas dimensões variam consoante as medições experimentais dos mesmos no que diz respeito ao  $a$ , conforme apresentado nos capítulos 3.1.5 e 3.1.6. Desta forma, para cada provete foram usadas as dimensões específicas de cada um.

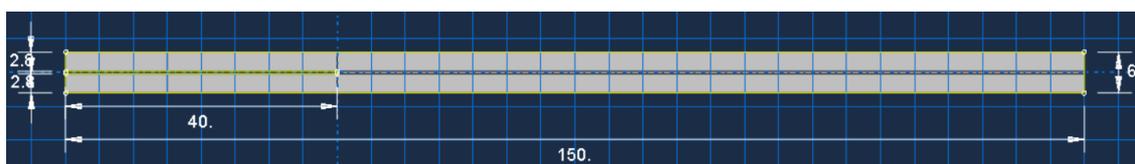


Figura 113 - Exemplo de geometria definida no ABAQUS® para o provete DCB

De seguida, foram definidas partições de modo a criar secções para a zona coesiva e para a zona homogénea. No plano médio foi definida uma secção com 0,4 mm de espessura como zona coesiva, por onde se irá propagar a fenda. As restantes secções

foram divididas para otimizar a construção da malha. Na Figura 114 e Figura 115 estão representadas a verde as secções do material homogéneo, e a cor-de-laranja a secção coesiva para os provetes DCB e ENF.



Figura 114 - Definição das secções sólidas homogéneas e coesivas para o provete DCB



Figura 115 - Definição das secções sólidas homogéneas e coesivas para o provete ENF

Seguidamente, foram aplicadas as condições fronteira. Para o provete DCB foi definido o ponto de carregamento com um deslocamento vertical de 50 mm e restrição horizontal, bem como o ponto de encastramento. Estas condições são apresentadas na Figura 116.



Figura 116 - Parâmetros de simulação - condições fronteira do provete DCB

Quanto às condições fronteira do provete ENF, estas estão apresentadas na Figura 117. A verde está o ponto de contacto que vai fazer o carregamento com deslocamento vertical máximo de 10 mm. Os apoios de reação normal estão representados a azul. A zona sinalizada a amarelo faz referência à condição de contacto entre as superfícies internas da fenda.



Figura 117 - Parâmetros de simulação - condições fronteira do provete ENF

A incrementação é outro dos parâmetros de particular importância. É necessário definir o tamanho de incremento inicial, mínimo e máximo, assim como o número máximo de incrementos. Os valores definidos para as simulações estão indicados na Figura 118. Foi considerado um máximo de segurança de 10000 incrementos. De forma a evitar problemas de convergência resultantes da fase de propagação de dano, foi definido um valor mínimo de  $1 \times 10^{-20}$  e um valor máximo de 1% do deslocamento aplicado ao modelo. Por fim, o tamanho incremento inicial é também de 1% do deslocamento imposto na simulação.

✚ 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 118 - Parâmetros de simulação - Definição dos incrementos para análise numérica

A operação seguinte é das mais importantes no desenvolvimento de modelos numéricos, trata-se da discretização da geometria em elementos finitos. Este processo consiste na criação da malha consoante a precisão necessária à análise. Nas zonas onde são aplicadas as forças, e onde existem os pontos de contacto, é necessária uma maior precisão na determinação de tensões. De igual modo, as zonas definidas como coesivas, onde se inicia e propaga a fenda, necessitam também de maior precisão. Desta forma, nestas zonas foi feito um refinamento da malha mais fino. A Figura 119 e na Figura 120 representam o tipo de refinamento utilizado para cada uma das modelações.

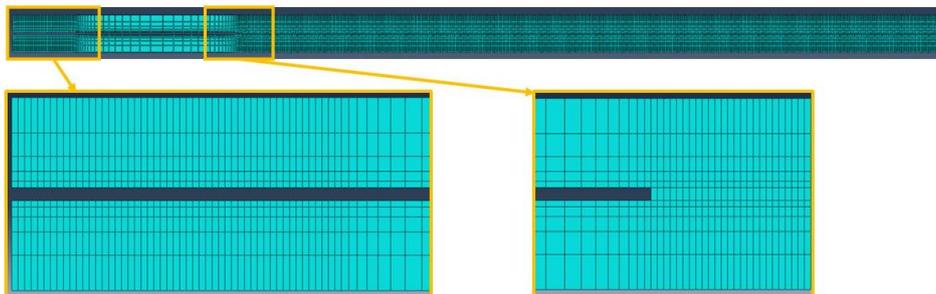


Figura 119 - Modelo numérico do provete DCB com detalhe do tipo da malha de MEF em cada uma das zonas

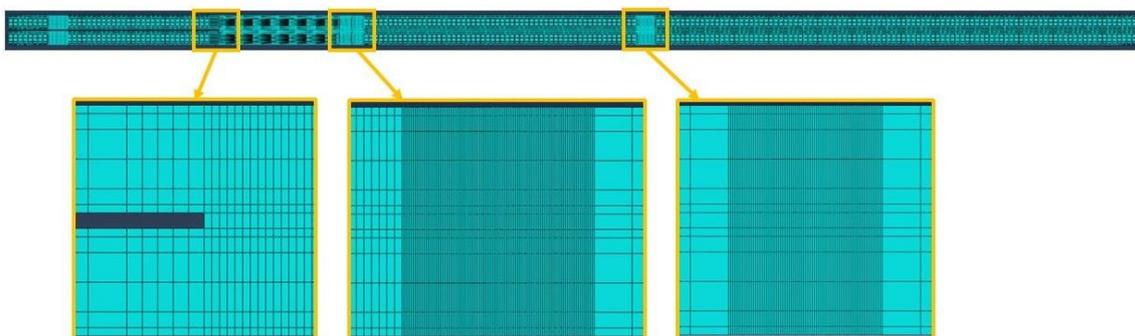


Figura 120 - Modelo numérico do provete ENF com detalhe do tipo da malha de MEF em cada uma das zonas

Na mesma fase, ainda são definidos o tipo de elementos e os controladores da malha. Na zona de elementos coesivos foi atribuído o controlador *sweep* e para as restantes zonas foi atribuído o controlador *structured*.

Para finalizar, executaram-se as simulações. Este processo foi feito de duas formas distintas. Uma dessas formas foi através da interface do ABAQUS® CAE na secção da ferramenta *Jobs*, onde é possível definir a capacidade de memória, processamento do computador e ainda permite monitorizar o processamento da simulação à medida que a mesma vai ocorrendo.

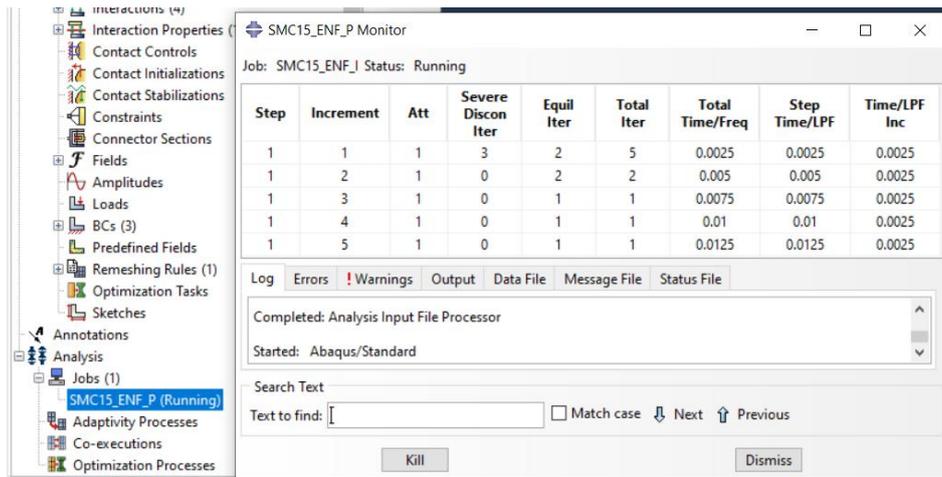


Figura 121 - Exemplo da interface do ABAQUS® CAE com a monitorização da simulação

Noutra fase, foram usadas linhas de comando para executar as simulações (Figura 122). Os principais motivos para usar este método são:

- Capacidade de executar várias simulações ao mesmo tempo;
- Capacidade de executar simulações de uma forma sequencial, sem necessitar de intervenção para iniciar cada uma delas.

Para tal, é apenas necessário criar os ficheiros de “Input” (ficheiros .inp) com toda a informação sobre os modelos numéricos a simular [89].

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\Users\Pedro Silva\Desktop\DCB15>(
abaqus job=SMC15_DCB_P2 cpus=12 interactive
abaqus job=SMC15_DCB_P3 cpus=12 interactive
abaqus job=SMC15_DCB_P4 cpus=12 interactive
abaqus job=SMC15_DCB_P6 cpus=12 interactive
)
Analysis initiated from SIMULIA established products
Abaqus JOB SMC15_DCB_P2
Abaqus 3DEXPERIENCE R2017x
Abaqus License Manager checked out the following licenses:
Abaqus/Standard checked out 14 tokens from Flexnet server LAPTOP-FAKK9E8H.
<1010 out of 1024 licenses remain available>.
Begin Analysis Input File Processor
10/10/2020 12:17:47 PM
Run pre.exe
10/10/2020 12:17:54 PM
End Analysis Input File Processor
Begin Abaqus/Standard Analysis
10/10/2020 12:17:54 PM
Run standard.exe
```

Figura 122 - Exemplo das linhas de comando para executar várias simulações sequencialmente

### 3.2.2 Previsão do comportamento

Neste subcapítulo são comparados e analisados os resultados experimentais com os resultados numéricos num intuito de perceber a correlação e fiabilidade das simulações numéricas com a realidade. De forma a realizar esta comparação, foram elaboradas curvas  $P$ - $\delta$  para cada condição de ensaio e tecidos os devidos comentários e análises. De referir, que para cada um dos provetes foram utilizados os valores de  $E$ ,  $\sigma_{m\acute{a}x}$ ,  $\tau_{m\acute{a}x}$ ;  $G$ ,  $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$  determinados experimentalmente.

#### 3.2.2.1 Análise das curvas $P$ - $\delta$ para o ensaio DCB

Na Figura 123, Figura 124, Figura 125 e Figura 126 estão representadas as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas experimentalmente nos ensaios DCB em comparação com as curvas obtidas na modelação numérica para os diferentes tipos de SMC estudados. Numa primeira análise, verifica-se uma estabilidade das curvas muito diferente. Nos ensaios experimentais as curvas são instáveis devido ao fenómeno ponte de fibras que existe no SMC. O modo como as fibras rompem aleatoriamente cria esta instabilidade na força exercida ao longo da propagação da fenda. Em contrapartida, este efeito não é refletido na modelação numérica. Relativamente à evolução das curvas  $P$ - $\delta$  numéricas e experimentais, ao longo do processo de propagação da fenda verifica-se a existência de uma concordância aceitável.

Na Figura 123 é apresentada a comparação para o SMC com 15% de fibra, no qual a correlação geral é aceitável no início do ensaio. Contudo, durante a propagação da fenda existe uma divergência que está relacionada com a fragilidade revelada durante o ensaio experimental, uma vez que os provetes fraturaram em vários pontos, originando assim libertação de tensões.

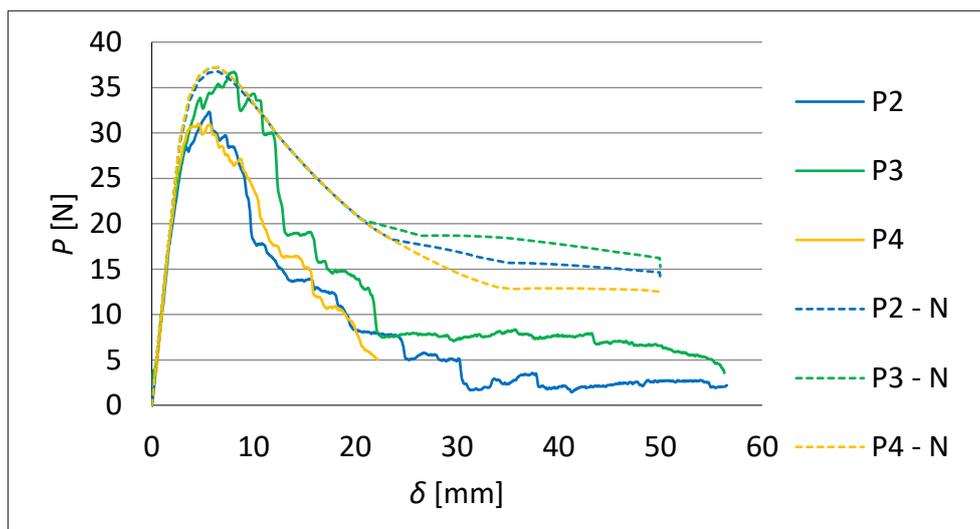


Figura 123 - Comparação das curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas para o ensaio DCB do SMC 15%

Para as curvas  $P$ - $\delta$  dos materiais com 20%, 30% e 45% de fibra de vidro (Figura 124, Figura 125 e Figura 126), o comportamento da correlação entre as curvas é muito semelhante. Na fase inicial do carregamento, há uma discrepância de valores. Nas simulações numéricas existe um pico de tensões até iniciar a propagação da fenda, enquanto nos ensaios experimentais há uma evolução dos valores de  $P$  mais gradual. Contudo, após a estabilização da propagação da fenda, verifica-se uma convergência e concordância aceitável, onde a perda de carga se mantém equivalente ao longo da propagação do dano.

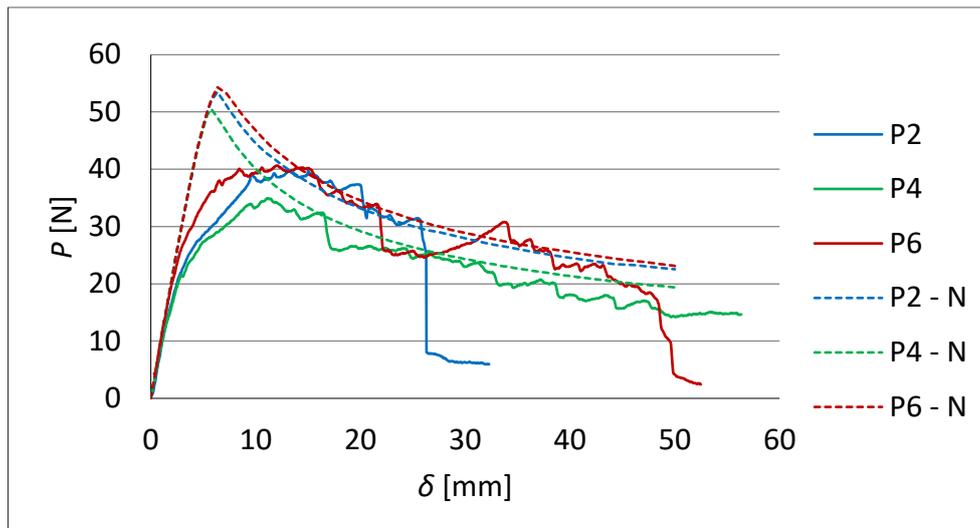


Figura 124 - Comparação das curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas para o ensaio DCB do SMC 20%

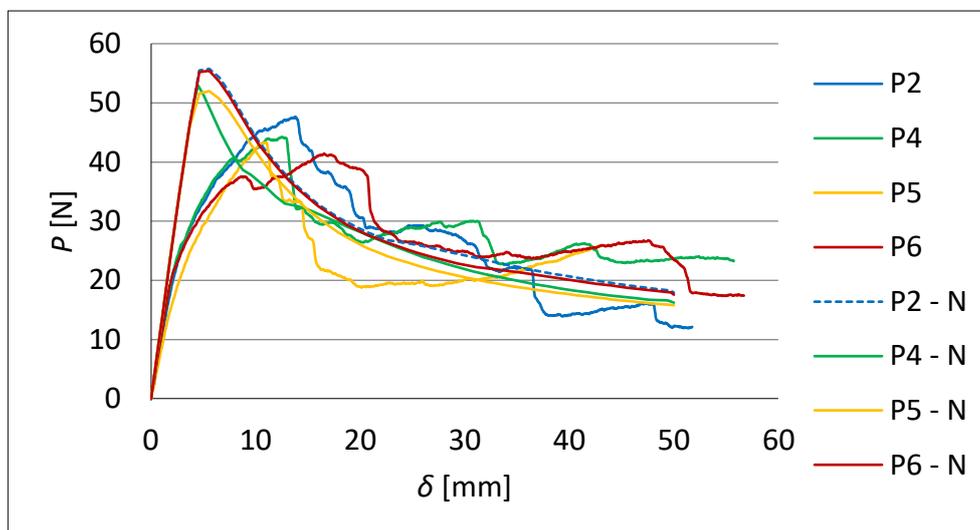


Figura 125 - Comparação das curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas para o ensaio DCB do SMC 30%

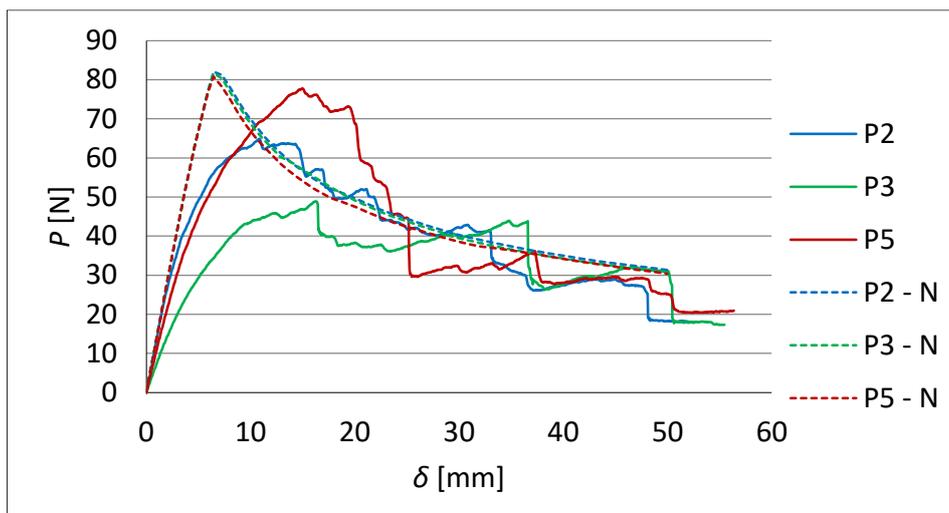


Figura 126 - Comparação das curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas para o ensaio DCB do SMC 45%

Quando é comparada a  $P_{máx}$ , verifica-se que os valores obtidos são muito distintos. Os resultados numéricos possuem um pico superior aos resultados experimentais. A Tabela 29 apresenta esses mesmo resultados. Esta circunstância está relacionada com o processo de fabrico da fenda inicial. O facto de realizar a fenda com recurso de um disco de corte, não foi possível garantir um bom acabamento da fenda. E para este tipo de ensaio, o acabamento da fenda é um ponto importante no início da propagação da fenda.

Tabela 29 - Comparação de  $P_{máx}$  experimental com  $P_{máx}$  numérico dos ensaios DCB para cada um dos materiais

SMC		SMC 15%	SMC 20%	SMC 30%	SMC 45%
Experimental	$P_{máx}$ [N]	31,4	38,4	44,2	63,8
	Desvio	4,6	3,1	2,6	14,5
Numérico	$P_{máx}$ [N]	37,1	52,8	54,0	81,5
	Desvio	0,2	2,0	1,8	0,6
Desvio relativo (%)		18%	37%	22%	28%

### 3.2.2.2 Análise das curvas $P$ - $\delta$ para o ensaio ENF

A Figura 127, Figura 128, Figura 129 e Figura 130 representa as comparação das curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas do ensaio ENF para as diferentes percentagens de fibra. De um modo geral, verifica-se uma excelente correlação das curvas entre o início do ensaio e o ponto de degradação da resistência do provete. Após atingir este ponto de  $P_{máx}$ , verifica-se uma instabilidade nas curvas experimentais que não se reflete nas curvas numéricas devido ao efeito produzido pela rotura das fibras. Contudo, quanto maior a percentagem de fibra, maior é convergência das curvas no que diz respeito à evolução de  $P$ .

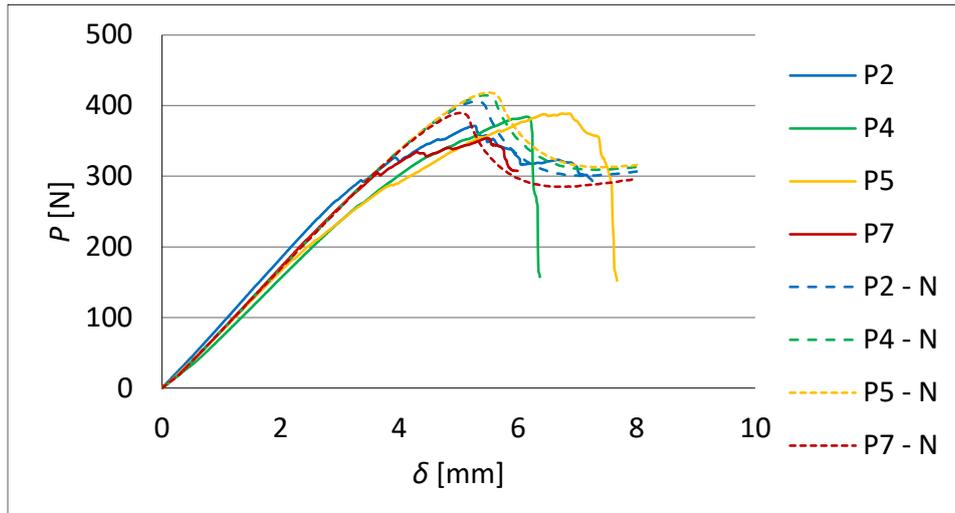


Figura 127 - Comparação das curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas para o ensaio ENF do SMC 15%

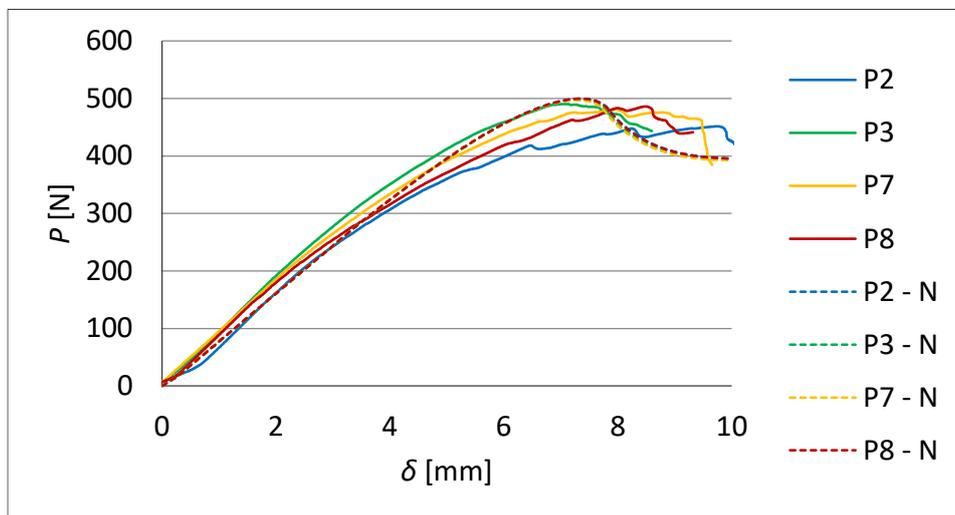


Figura 128 - Comparação das curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas para o ensaio ENF do SMC 20%

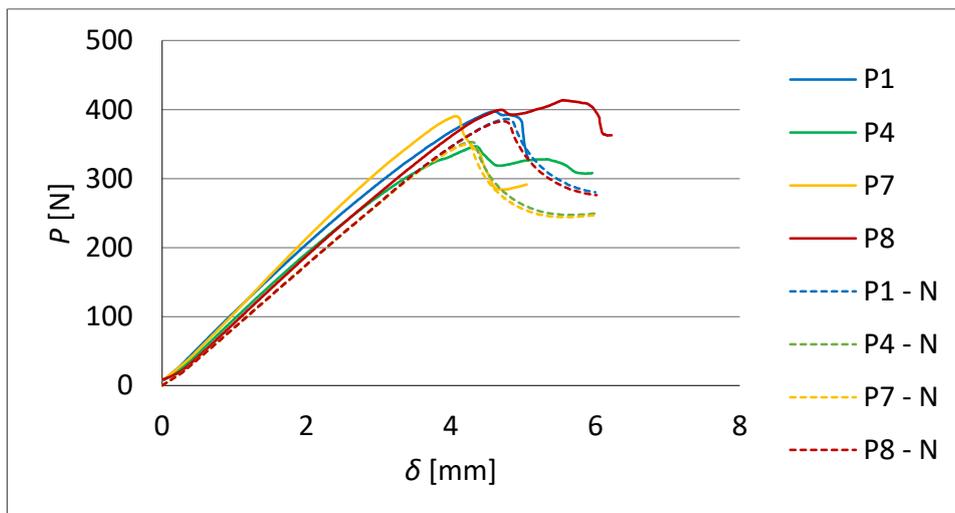


Figura 129 - Comparação das curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas para o ensaio ENF do SMC 30%

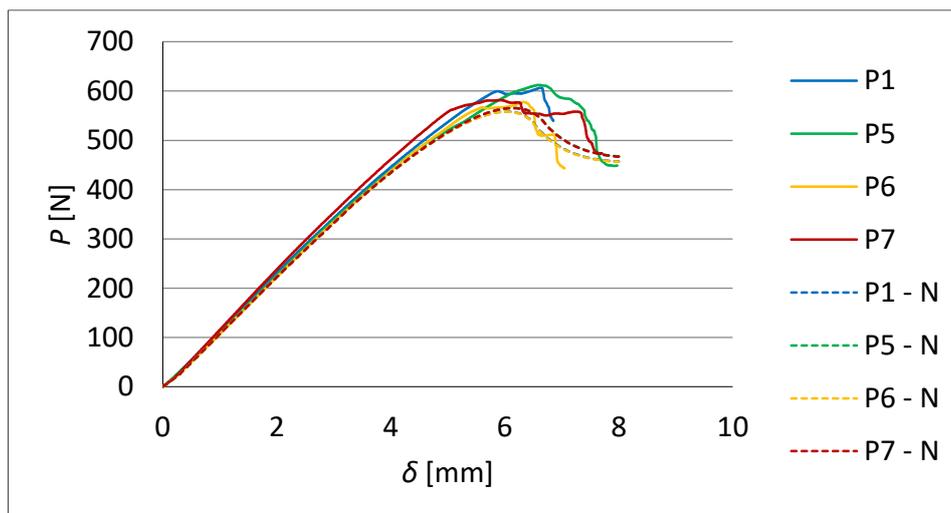


Figura 130 - Comparação das curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas para o ensaio ENF do SMC 45%

Na Figura 127 e Figura 129 é possível verificar, que após a curva atingir  $P_{máx}$ , a propagação de dano ocorre com uma queda mais acentuada da carga. Por outro lado, na Figura 128 e Figura 130 a diminuição da carga é menor. Este facto está relacionado com o  $G_{IIC}$  de cada um dos materiais determinados experimentalmente, uma vez que os materiais com percentagens de 20% e 45% de fibra obtiveram valores superiores em detrimento dos materiais de 15 e 30% de fibra. Este comportamento é refletido em ambas as curvas, experimentais e numéricas.

A Tabela 30 faz uma comparação dos  $P_{máx}$  obtidos, nos quais se verifica valores muito semelhantes. Ao contrário do ensaio DCB, para o ensaio ENF, pode-se concluir que o acabamento da fenda inicial não influencia significativamente a carga exercida.

Tabela 30 - Comparação de  $P_{máx}$  experimental com  $P_{máx}$  numérico dos ensaios ENF para cada um dos materiais

	SMC	SMC 15%	SMC 20%	SMC 30%	SMC 45%
Experimental	$P_{máx}$ [N]	374,5	477,3	387,1	594,5
	Desvio	15,6	17,5	28,6	17,5
Numérico	$P_{máx}$ [N]	407,0	498,7	368,1	561,9
	Desvio	12,8	1,3	19,4	4,2
Desvio relativo (%)		9%	4%	-5%	-5%

Conclui-se que os MDC têm capacidade para reproduzirem simulações muito próximas da realidade. Com isto, é possível determinar numericamente as propriedades de tenacidade à tração e ao corte do SMC e serem aplicadas nos projetos de estruturas de SMC.

**CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE  
TRABALHOS FUTUROS**



## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação teve como objetivo caracterizar por análise experimental e numérica as propriedades mecânicas e de tenacidade à fratura do SMC com diferentes percentagens de fibra. Foram testados materiais de baixo, médio e alto teor de fibras, ou seja, 15, 20, 30 e 45%, respetivamente.

Quanto às propriedades mecânicas, concluímos que o SMC é um material frágil. O ensaio de tração refletiu valores de deformação abaixo de 1%. Este facto indica que praticamente não existiu deformação plástica. Em contrapartida foi possível determinar que quanto maior o teor de fibra maior o módulo de elasticidade, isto porque o esforço aplicado é no sentido de tracionar as fibras.

Pelo contrário, durante o ensaio de corte foi possível perceber que o esforço aplicado não é transmitido às fibras, mas sim à matriz, o que significa que a percentagem de fibra não tem praticamente impacto neste tipo de solicitação de esforço.

O mesmo efeito foi verificado durante o ensaio ENF. Neste ensaio as energias obtidas para as diferentes % de fibra não apresentaram qualquer relação. Assim sendo, foi possível concluir que a tenacidade à fratura ao corte é garantida pela matriz e não pelas fibras.

Nos provetes DCB foi possível verificar um aumento gradual da tenacidade à fratura à tração. Contudo, este aumento pode não estar diretamente relacionado com a percentagem de fibras. Uma vez que o esforço é aplicado em cada uma das metades do provete, a rigidez dessas metades tem impacto na capacidade de transmissão dos esforços para a fenda. Quanto mais rígido for o material, menor é a deformação. Assim sendo, a correlação entre a tenacidade à fratura à tração e a % de fibra no SMC, pode estar relacionada à rigidez do material e não à sua capacidade de absorção da energia libertada.

Quanto às simulações numéricas, conclui-se que ambas têm capacidade para reproduzirem simulações muito próximas da realidade. Com isto, é possível determinar numericamente as propriedades de tenacidade à tração e ao corte do SMC e serem aplicadas nos projetos de estruturas de SMC.

Todos os ensaios cujo esforço é aplicado na matriz, podem ser influenciados pelos materiais que compõem a mesma. Tal como referido, esta é uma informação confidencial, assim sendo, para futuros estudos seria importante proceder à caracterização da matriz. Outra opção, seria utilizar SMC exclusivamente de um só fabricante, de modo a garantir que a matriz não é uma variável no processo.

Diretamente relacionado com os ensaios efetuados, para futuros estudos, seria importante planejar e realizar ensaios de tração e corte na direção perpendicular ao plano de orientação das fibras.

Durante a análise de resultados, foram verificadas algumas incoerências nos vários intervalos de % de fibra, assim sendo, seria importante realizar o mesmo estudo para intervalos mais pequenos, principalmente entre os 20 e 30% de fibra de vidro.

Aplicando os conceitos obtidos da caracterização do SMC a um ambiente empresarial, no que respeita ao desenvolvimento de uma mala de automóvel, é necessário ter em linha de conta o aspeto final da peça bem como aos esforços a que o mesmo está sujeito. Como o SMC torna-se mais complexo com o aumento da % de fibra de vidro, mas torna-se mais resistente em termos de propriedades mecânica com esse mesmo aumento, é possível concluir que não é possível produzir uma mala como uma peça só. Ou seja, é necessário criar uma peça de aspeto e uma peça estrutural. Sendo que podem ser utilizados os MDC para a determinação do SMC mais apropriado consoante os esforços a que a mesma está sujeita.

# REFERÊNCIAS



## 5 REFERÊNCIAS

1. Continental Structural Plastics. 2020 [cited 2020 Data de acesso: 11/08/2020]; Available from: <https://www.cspplastics.com/>.
2. Transicold, C. *Truck / Trailer Refrigeration Europe*. 2020 Data de acesso: 2020/09/29]; Available from: <https://www.carrier.com/truck-trailer/en/eu/products/eu-truck-trailer/trailer/>.
3. Jones, R.M., *Mechanics of composite materials*. 1999, Great Britain: CRC press.
4. Kawa, L., *Taipa - A Arquitetura da Terra*. 2015.
5. © CYPE Ingenieros, S.A. [cited 2020 Data de acesso: 2020/08/29]; Available from: [http://www.geradordeprecos.info/espacos\\_urbanos/Estruturas/Betoes\\_\\_acos\\_e\\_cofragens/Acos/Aco\\_para\\_betao.html](http://www.geradordeprecos.info/espacos_urbanos/Estruturas/Betoes__acos_e_cofragens/Acos/Aco_para_betao.html).
6. Van Suchtelen, J., *Product properties: a new application of composite materials*. Philips Res. Rep, 1972. **27**(1): p. 28-37.
7. Departamento de Defesa dos USA, *Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis.*, in *Composite materials handbook*, D.o.d. handbook, Editor. 2002.
8. Lopes, V.H.P., *Estudo numérico e experimental da adesão de SMC e Prepreg*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2018, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
9. Nijssen, R., *Composite Materials: An Introduction*. 2015: Inholland University of Applied Sciences.
10. Shalin, R.E., *Polymer matrix composites*. Soviet Advanced Composites Tecnology Series, ed. J.N. Fridlyander and I.H. Marsball. 1995: Springer Science & Business Media.
11. Wang, R.-M., S.-R. Zheng, e Y.-P. Zheng, *Polymer matrix composites and technology*. 2011, Cornwall, UK: Woodhead Publishing Limited.
12. Rezende, M.C. e E.C. Botelho, *O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial*. *Polímeros*, 2000. **10**(2): p. e4-e10.
13. de Paula, P.G., *Formulação e caracterização de compósitos com fibras vegetais e matriz termoplástica*. 2011, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro: Campos dos Goytacazes.
14. *Cadeira Polipropileno c/ Fibra de Vidro*. [cited 2020 Data de acesso: 30/08/2020]; Available from: <https://loja.totalcenter.pt/>.
15. Skibo, M.D. e D.M. Schuster, *Process for preparation of composite materials containing nonmetallic particles in a metallic matrix*. 1989, Google Patents.
16. Chawla, K.K., *Metal Matrix Composites*. 2006: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,.
17. *Model of sustaintability*, in *E-Mobility Engineering*. 2019, High Power Media Ltd.

18. Biela em matriz cerâmica - [cited 2020 Data de acesso: 2020/08/02]; Available from: <http://www.mxcomposites.com/>.
19. Chawla, K.K., *Ceramic matrix composites*. 2013, USA: Springer Science & Business Media.
20. Insulcon, *Ventilador para gases quentes*, in *HT COMPOSITE SHAPES AND SHEETS*. 2019.
21. SKF, *Rolamentos cerâmicos*, in *Hybrid bearings*.
22. Chawla, K.K., *Composite Materials: Science and Engineering*. 2012, New York: Springer Science & Business Media.
23. de Moura, M.F.S.F., A.B. de Moraes, e A.G. de Magalhães, *Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2005, Porto/Portugal: Publindústria.
24. Kaw, A.K., *Mechanics of composite materials*. 2005, United States of America: CRC Press.
25. Vasiliev, V.V. e E.V. Morozov, *Mechanics and analysis of composite materials*. 2001, Great Britain: Elsevier.
26. Matzenmiller, A., J. Lubliner, e R. Taylor, *A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites*. *Mechanics of Materials*, 1995. **20**(2): p. 125-152.
27. Ventura, A.M.F., *Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas*. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 2009. **21**(3-4): p. 10-19.
28. Nedelcu, D., R. Comaneci, R. Chelariu, e L. Tabacaru, *Overview of composite material technology with Si-C particles, reinforcement*. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2009. **1**(1): p. 57-62.
29. ASTAR. *SMC | Sheet Moulding Compound - What is SMC*. [cited 2020 Data de acesso; Available from: <https://www.astar.es/products/smc-sheet-moulding-compound/>].
30. Magnaud, H., *Design for Succes*, in *A DESIGN & TECHNOLOGY MANUAL FOR SMC BMC*, E.A.f. SMC/BMC, Editor. 2016: Brussels - Belgium.
31. *No. 7 - Sheet Molding Compound*. 2005 Data de acesso; Available from: <https://www.ptonline.com/articles/no-7---sheet-molding-compound>.
32. Plásticos, I., *Catálogo de produtos da Inapal Plásticos*.
33. Davim, J. e A. Magalhães, *Ensaio Mecânicos e Tecnológicos*. 1992: Publindústria.
34. ISO, *Plastics — Determination of tensile properties — Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*, in *ISO 527-4:1997*. 1997, ISO - International Organization for Standardization: Genebra, Suíça. p. 12.
35. Reedy, E.D., *Cohesive zone finite element analysis of crack initiation from a butt joint's interface corner*. *International Journal of Solids and Structures*, 2014. **51**(25): p. 4336-4344.
36. Extensómetro Ótico in <https://www.directindustry.com/>, Editor.
37. Standardization, I.-I.O.f., *Plastics — Determination of tensile properties — Part 1: General principles*, in *ISO 527-1:2019*. 2019. p. 34.
38. de Souza, S.A., *Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos*. 1982: Editora Blucher.
39. CHIAVERINI, V., *Estrutura e propriedades das ligas metálicas*. 2ª. Tecnologia Mecânica. 1986, São Paulo: McGraw-Hill.

40. da Silva, L.F., D.A. Dillard, B. Blackman, e R.D. Adams, *Testing Adhesive Joints: Best Practices*. 2012: John Wiley & Sons.
41. Pinto, A., A. Magalhães, F. Gomes da Silva, e A. Baptista, *Acrylic Adhesives in the Polyolefins Joining*. Materials Science Forum, 2008. **587-588**: p. 577-581.
42. International, A., *Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading*, in *ASTM D905-08(2013)*. 2013: West Conshohocken.
43. Adams, D.F., *Block shear strength of adhesive bonds*. CompositesWorld, 2010.
44. International, A., *Standard Test Method for Shear Strength of Adhesive Bonds Between Rigid Substrates by the Block-Shear Method*, in *ASTM D4501-01*. 2001: West Conshohocken.
45. CompositesWorld, *Block shear strength of adhesive bonds*, in *Block shear strength of adhesive bonds*, A.t.A.D.t.f. assembled, Editor. 2010.
46. Callister, W.D. e D.G. Rethwisch, *Materials science and engineering*. Seventh Edition. Vol. 5. 2011: John Wiley & Sons NY.
47. Medina, J.A.H., *Avaliação de Previsões de Fratura Elastoplástica*. 2014, Tese de Doutorado. PUC-Rio: Rio de Janeiro.
48. Gong, X., A. Hurez, e G. Verchery, *On the determination of delamination toughness by using multidirectional DCB specimens*. Polymer Testing, 2010. **29(6)**: p. 658-666.
49. Pereira, A.M.B., *Fratura interlaminar de compósitos de matriz polimérica*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2006, Tese de Doutorado. Universidade de Aveiro: Aveiro.
50. Lee, S., *An Edge Crack Torsion Method for Mode III Delamination Fracture Testing*,. Journal of Composites, Technology and Research, 1993. **15(3)**: p. 193-201.
51. Standardization, I.-I.O.f., *Fibre-Reinforced Plastic Composites—Determination of Mode I Interlaminar Fracture Toughness, G<sub>IC</sub>, for Unidirectionally Reinforced Materials*, in *ISO15024*. 2001, International Organization for Standardization Geneva, Switzerland.
52. Association, J.S., *Testing methods for interlaminar fracture toughness of carbon fibre reinforced plastics*, in *JIS K 7086:1993*. 1993.
53. International, A., *Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*, in *ASTM D5528-13*. 2013: West Conshohocken.
54. Hashemi, S., A. Kinloch, e J. Williams, *Mechanics and Mechanisms of Delamination in a Poly(ether sulphone)—Fibre composite*. Composites Science and Technology, 1990. **37(4)**: p. 429-462.
55. de Moura, M., R.D.S.G. Campilho, e J. 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.
56. Davidson, B.D., *An analytical investigation of delamination front curvature in double cantilever beam specimens*. Journal of Composites Materials, 1990. **24(11)**: p. 1124-1137.
57. da Silva, L.F.M., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media.

58. Hashemi, S., A. Kinloch, e J. Williams, *Corrections needed in double-cantilever beam tests for assessing the interlaminar failure of fibre-composites*. Journal of Materials Science Letters, 1989. **8**(2): p. 125-129.
59. Kanninen, M.F. e C.L. Popelar, *Advanced fracture mechanics*. International Journal of Fracture, 1985. **30**: p. R73–R74.
60. Irwin, G. e J. Kies, *Critical energy rate analysis of fracture strength*. Weld Journal 1954. **33**: p. 193-198.
61. Constante, C.J., R.D.S.G. Campilho, e D.C. Moura, *Tensile fracture characterization of adhesive joints by standard and optical techniques*. 2015. **136**: p. 292-304.
62. Lopes, R., R.D.S.G. Campilho, F. Da Silva, e T. Faneco, *Comparative evaluation of the Double-Cantilever Beam and Tapered Double-Cantilever Beam tests for estimation of the tensile fracture toughness of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016. **67**: p. 103-111.
63. Faneco, T.M.S., Campilho, R.D.S.G., Silva, F.e Lopes, R., *Strength and Fracture Characterization of a Novel Polyurethane Adhesive for the Automotive Industry*. Journal of Testing Evaluation, 2017. **45**(2): p. 398-407.
64. Williams, J., *The fracture mechanics of delamination tests*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1989. **24**(4): p. 207-214.
65. Davies, P., P. Casari, e L. Carlsson, *Influence of fibre volume fraction on mode II interlaminar fracture toughness of glass/epoxy using the 4ENF specimen*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(2): p. 295-300.
66. Masters, J.E., *Correlation of Impact and Delamination Resistance in Interleafed Laminates*. Proc. ICCM6/ECCM2, 1987. **3**: p. 96-107.
67. Blackman, B., Kinloch, A. e Paraschi, M., *The determination of the mode II adhesive fracture resistance, GIIC, of structural adhesive joints: an effective crack length approach*. Engineering Fracture Mechanics, 2005. **72**(6): p. 877-897.
68. Martin, R. e Davidson, B.D., *Mode II fracture toughness evaluation using four point bend, end notched flexure test*. Plastics, Rubber and Composites, 1999. **28**(8): p. 401-406.
69. de Moura, M.F.S.F., *Numerical simulation of the ENF test for the mode-II fracture characterization of bonded joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2006. **20**(1): p. 37-52.
70. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*, tese de doutoramento. Departamento de Engenharia Mecânica. 2009, Faculdade de Engenharia do Porto.
71. Arrese, A., Carbajal, N., Vargas, G. e Mujika, F., *A new method for determining mode II R-curve by the End-Notched Flexure test*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**: p. 51-70.
72. Banea, M., da Silva, L. e Campilho, R.D.S.G. *Mode II fracture toughness of adhesively bonded joints as a function of temperature: experimental and numerical study*. The Journal of Adhesion 2012. **88**(4-6): p. 534-551.
73. de Moura, M.F.S.F., Campilho, R.D.S.G. e Gonçalves, J.P.M., *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
74. da Silva, L.F.M. e Campilho, R.D.S.G., *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011: Springer.

75. Pinto, A.M.G., Magalhães, A.G., Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F. e Baptista, A.P.M., *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
76. Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
77. Alfano, G. e 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.
78. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *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.
79. 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.
80. Kafkalidis, M.S. e 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.
81. Liljedahl, C.D.M., Crocombe, A.D., Wahab, M.A., e Ashcroft, I.A., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
82. de Moura, M., Gonçalves, J., Marques, A. e de Castro P., *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.
83. Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F. e Domingues, J.J.M.S., *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
84. Campilho, R.D.S.G., Banea, M.D., Neto, J. e da Silva, L.F., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
85. Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F. e Domingues, J.J.M.S., *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
86. Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F. e Domingues, J.J.M.S., *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.