



Dissertation

Master in Product Design Engineering

***Processamento e Caracterização de Compósitos com
Fillers de Argila Expandida***

Tiago Emanuel Lourenço Branquinho

Leiria, *March* de 2017



Dissertation

Master in Product Design Engineering

***Processamento e Caracterização de Compósitos com
Fillers de Argila Expandida***

Tiago Emanuel Lourenço Branquinho

Master's Dissertation held under the guidance of Dr. Carlos Alexandre Bento Capela, Professor of the School of Technology and Management of the Polytechnic Institute of Leiria.

Leiria, *Março de 2017*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha filha Sara,
sem ela nunca seria possível.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Ao finalizar este trabalho, gostaria de deixar expresso o meu reconhecido e sincero agradecimento a todas as pessoas e entidades que contribuíram de alguma forma para a sua realização, nomeadamente:

- Ao orientador científico, Professor Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, pela iniciativa, pelo constante apoio, pela paciência e pelos conhecimentos que disponibilizou durante todo o meu percurso académico na Escola Superior de Tecnológica e Gestão.
- À minha família, pela compreensão, pela amizade, pelo carinho, e por sempre terem acreditado e apoiado os meus objetivos, tornando-os realidade.
- Ao Instituto Politécnico de Leiria pela oportunidade que me facultaram na realização do presente trabalho, em particular à Escola Superior de Tecnológica e Gestão, que disponibilizou o Laboratório de Engenharia Mecânica.
- À empresa WEBER, Grupo Saint Gobain (Tojeira, Avelar, Portugal), por cederem o material necessário à realização do produto experimental.
- À Força Aérea Portuguesa, em particular à Base Aérea nº5, bem como os meus camaradas, que com o seu apoio, compreensão e estímulo, contribuíram para alcançar esta meta.
- Ao meu amigo Eng.º Lécio Lourenço, deixo um apreço especial pelo grato acompanhamento desde os anos da licenciatura/Mestrado, bem como todo o incentivo e apoio que me deu durante a execução do trabalho.
- Ao meu amigo Arquiteto Frederico Barbosa, pela disponibilidade, empenho e indispensável colaboração na realização dos provetes, bem como os respetivos ensaios mecânicos.

A todos o meu muito Obrigado!

Tiago Branquinho

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

Ao longo das últimas décadas os materiais compósitos têm vindo a ter uma grande evolução fruto da sua aplicação no fabrico de componentes industriais e das cada vez maiores exigências ao nível da sua performance, nomeadamente os compósitos de matriz polimérica com fibras ou partículas. As partículas de argila expandida têm sido vastamente utilizadas no fabrico de compósitos de aplicação industriais, tais como materiais de isolamento térmico, acústico e elementos estruturais de edifícios. Estes materiais de enchimento (fillers) podem também ser utilizados no fabrico de núcleos de materiais em sanduíche onde se pretende ter um bom desempenho em termos de resistência mecânica, isolamento térmico e acústico e baixo peso de estruturas ou equipamentos industriais.

Neste estudo, compósitos de matriz epóxida com diferentes fillers foram fabricados e caracterizados em termos das suas propriedades físicas e mecânicas. Estes materiais foram processados utilizando as técnicas de mistura e vazamento em vácuo. Os testes realizados mostraram uma diminuição na intensidade de ruído e na condutividade térmica com o aumento da fração de massa de partículas de argila expandida. No que às suas propriedades mecânicas respeita, foi possível observar que a rigidez aumenta, enquanto os valores de resistência mecânica em flexão em três pontos e em compressão diminuem com o aumento da fração em massa de partículas de argila expandida. Foi também possível constatar que a tenacidade à fratura também diminuiu com o aumento da fração em peso de partículas de argila expandida.

Palavras-chave: Materiais compósitos; Fillers; Partículas de argila expandida; Resistência Mecânica; Intensidade sonora; Condutividade térmica.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

During last decades composite materials have been developing as a result of their application in the manufacture of industrial components and the increasing demands on their performance, namely the polymer matrix composites with fibers or particles. Expanded clay particles have been widely used in the manufacture of industrial application composites, such as thermal insulation, acoustical materials and building structural elements. These fillers can also be used in the manufacture of cores of sandwich materials where they are expected to perform well in terms of mechanical strength, thermal and acoustic insulation and low weight of industrial structures or equipment.

In this study, epoxy matrix composites with different fillers were manufactured and characterized in terms of their physical and mechanical properties. These materials were processed using vacuum mixing and casting techniques. The tests performed showed a decrease in noise intensity and thermal conductivity with the increase of the mass fraction of expanded clay particles. As regards its mechanical properties, it was possible to observe that the stiffness increases, while the values of mechanical resistance in three-point bending and compression decrease with the increase in the mass fraction of expanded clay particles. It was also possible to verify that the fracture toughness also decreased with the increase in the weight fraction of expanded clay particles,

Keywords: Composite materials; Fillers; Clay particles; mechanical resistance; Noise intensity; Thermal conductivity.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de Figuras

Figura 1 – Evolução na utilização de materiais por parte do homem [1]	5
Figura 2 – Representação esquemática das fases constituintes de um compósito [5] .	6
Figura 3 - Classificação do tipo de materiais compósitos [7]	7
Figura 4 – Compósitos de Matriz Polimérica	8
Figura 5 – Compósitos de Matriz Metálica.....	8
Figura 6 – Compósitos de Matriz Cerâmica	8
Figura 7 – Características da fase dispersa que influenciam os materiais compósitos [13]	11
Figura 8 – Classificação dos materiais compósitos segundo a fase dispersa [14]	12
Figura 9 – Sanduíche com núcleo em espuma [adaptado de [16].....	12
Figura 10 – Sanduíche com núcleo em madeira leve e Sanduíche com núcleo em forma de ninho de abelha [adaptado de 16].....	13
Figura 11 – Compósito reforçado com Fibras contínuas e alinhadas (a), reforçado com fibras descontínuas alinhadas (b) e reforçado com fibras descontínuas e orientadas aleatoriamente (c)	14
Figura 12 – Cadeia Molecular da resina epóxida [24].	22
Figura 13 – Moldação por contacto manual [27].	24
Figura 14 – Moldação por Spray Up [28].	25
Figura 15 – Representação do processo de moldação por RTM [29].	26
Figura 16 – Esquema de flexão de uma viga simplesmente apoiada [32]	28
Figura 17 – Ensaio de compressão de um provete entre pratos planos [34]	29
Figura 18 – Esquema que mostra a direção do fluxo de calor [35].	31
Figura 19 – Condutividades térmicas de alguns sólidos típicos [35].	32
Figura 20 – Transferência de calor por convecção de urna placa [35].	33
Figura 21 – Sons sensíveis ao ouvido humano [36].	35
Figura 22 – Nível sonoro em dB de sons comuns [36].	36
Figura 23 – Esquema de separação por peneiros, com a utilização de vibrador mecânico	39
Figura 24 – Método para obter a densidade aparente. a) Medição da massa; b) Medição do volume.	40
Figura 25 – Representação esquemática para obter a densidade real	41

Figura 26 – Molde utilizado, montagem e aplicação de desmoldante.....	44
Figura 27 – Pesagem das partículas de argila expandida e resina epóxida.....	44
Figura 28 – Mistura homogeneizada de resina, endurecedor, partículas de argila expandida e fibras curtas de vidro.....	45
Figura 29 – Camara de vácuo utilizada no processamento dos materiais compósitos (marca HEK)	45
Figura 30 – Desmoldação da placa processada.	45
Figura 31 – Estufa utilizada (à esquerda); Pós-cura do material (à direita)	46
Figura 32 – Máquina de Corte de Provetes e Polidora Mecânica.....	46
Figura 33 – Equipamento usado para medir o coeficiente de condutividade térmica a) Caixa isolada, b) Lâmpada 46W, c) Multímetro com termopar do tipo k, d) Câmara de infravermelhos.....	48
Figura 34 – Medição do coeficiente de condutividade térmica, com os equipamentos usados e a leitura da temperatura da face exterior.	48
Figura 35 – Equipamento usado para medir a intensidade sonora a) Caixa isolada, b) Besouro, c) Sonómetro digital.....	49
Figura 36 – Medição da intensidade sonora com os equipamentos usados.....	50
Figura 37 – Geometria e dimensões dos provetes: a) Ensaio de flexão em 3 pontos, b) Ensaio de tenacidade à fratura, c) Ensaio de compressão	50
Figura 38 – Determinação de densidades, a) Água destilada, b) Balança analítica e kit, c) Tabela de variação da massa volúmica da água com a temperatura.....	51
Figura 39 - Equipamento e suportes do ensaio de flexão em três pontos e tenacidade à fratura.	52
Figura 40 - Representação esquemática do ensaio em flexão em três pontos.	53
Figura 41 – Realização de um ensaio de flexão em três pontos.	53
Figura 42 – Representação esquemática do ensaio de tenacidade à fratura.	55
Figura 43 – Realização de um ensaio de tenacidade à fratura.	55
Figura 44 - Determinação da complacência [23]......	56
Figura 45 – Representação esquemática do ensaio de compressão.	57
Figura 46 – Realização de um ensaio de compressão.....	57
Figura 47 - Distribuição de temperaturas do compósito $W_p=32\%$ de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$).	59
Figura 48 – Condutividade térmica versus fração mássica de partículas de argila expandida para as três granulometrias processadas.	61

Figura 49 – Intensidade sonora versus fração mássica para as diferentes placas processadas com partículas de argila expandida, e consideradas em outras duas situações: a) sem material de isolamento; b) som ambiente.	62
Figura 50 – Densidade dos materiais: valores experimentais e teóricos.....	65
Figura 51 – Curvas típicas de tensão versus deslocamento da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$). ..	66
Figura 52 – Tensão máxima à flexão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)	67
Figura 53 – Tensão máxima à flexão da resina e dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e de fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)	68
Figura 54 – Módulo de elasticidade à flexão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$).....	69
Figura 55 – Módulo de elasticidade à flexão da resina SR 1500 e dos compósitos de matriz SR 1500 com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e de fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)	70
Figura 56 – Curvas típicas de tensão versus deslocamento para a resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)	70
Figura 57 – Tensão máxima à flexão da resina SR1500 e para os compósitos de matriz SR150 com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida (granulometria $d=1,9\text{mm}$).....	71
Figura 58 – Módulo de elasticidade à flexão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1.9\text{mm}$).....	72
Figura 59 – Curvas típicas de tensão versus deslocamento para a resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)	73
Figura 60 – Tensão máxima à flexão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)	74
Figura 61 – Módulo de elasticidade à flexão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$).....	75
Figura 62 – Valores de tensão máxima à flexão versus fração mássica de todas as granulometrias de partículas de argila expandida e de fibras curtas de vidro	75

Figura 63 – Valores do módulo de elasticidade à flexão versus fração mássica de todas as granulometrias de partículas de argila expandida e de fibras curtas de vidro	76
Figura 64 – Valores de K_Q em função fração mássica de partículas de argila expandida para a gama de granulometria $d=0,7\text{mm}$	77
Figura 65 – Valores de K_Q em função das diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e de fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$).....	78
Figura 66 – Valores de K_Q em função das diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$).....	79
Figura 67 – Valores de K_Q em função das diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)	80
Figura 68 – Valores de K_Q versus as frações mássicas de partículas de argila expandida e fibras curtas de vidro.....	80
Figura 69 – Curvas típicas de tensão à compressão versus extensão para a resina e para os com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)...	81
Figura 70 - Tensão máxima à compressão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)	82
Figura 71 – Curvas típicas de tensão à compressão versus extensão para a resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)	83
Figura 72 – Tensão máxima à compressão de compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$).....	84
Figura 73 – Modulo de elasticidade à compressão para a resina e para compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)	85
Figura 74 – Módulo à compressão da resina e dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e de fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)	86
Figura 75 – Curvas típicas de tensão à compressão versus extensão para a resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$).....	87
Figura 76 - Tensão máxima à compressão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)	88

Figura 77 – Modulo de elasticidade à compressão para a resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$).....	89
Figura 78 – Curvas típicas de tensão à compressão versus extensão para a resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida (granulometria $d=2,6\text{mm}$).....	89
Figura 79 - Tensão máxima à compressão da resina SR1500 e para os compósitos de matriz SR1500 com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida (granulometria $d=2,6\text{mm}$).....	90
Figura 80 – Modulo de elasticidade à compressão para a resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$).....	91
Figura 81– Valores de tensão máxima à compressão versus fração mássica de todas as granulometrias de partículas de argila expandida e de fibras curtas de vidro.....	92
Figura 82 – Valores do módulo à compressão versus fração mássica de todas as granulometrias de partículas de argila expandida e de fibras curtas de vidro	93

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

Tabela 1 – Fatores de Seleção do material da matriz de um compósito [adaptado de 9].....	9
Tabela 2 – – Propriedades de fios de fibras de vidro, carbono e aramida para reforço de polímeros [11].....	15
Tabela 3 – Principais vantagens e desvantagens das fibras mais utilizadas [11].....	15
Tabela 4 – Propriedades de resinas utilizadas em materiais compósitos [25].	23
Tabela 5 – Velocidade de propagação do som a 25°C em diferentes materiais [36].	36
Tabela 6 – Especificações da resina epóxida SR1500 e endurecedor SD2505 [37]..	37
Tabela 7 – Especificações da mistura da resina [37]	37
Tabela 8 – Características físicas das partículas de argila expandida utilizadas no processamento dos materiais compósitos [adaptado de 38].	38
Tabela 9 – Principais características das fibras curtas de Vidro, tipo E	39
Tabela 10 – Tipos de materiais compósitos moldados com partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)	42
Tabela 11 – Tipos de materiais compósitos moldados com partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)	43
Tabela 12 – Tipos de materiais compósitos moldados com partículas de argila expandida ($\varnothing=2.6\text{mm}$)	43
Tabela 13 – Tipos de materiais compósitos moldados com partículas de argila expandida ($\varnothing=0.7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro.....	43
Tabela 14 – Características da câmara de Infravermelhos Portátil utilizada nos ensaios de avaliação do comportamento térmico dos materiais processados [39].....	47
Tabela 15 – Características do sonómetro utilizado nos ensaios de avaliação do comportamento acústico dos materiais processados [40].....	49
Tabela 16 – Temperaturas obtidas na avaliação do comportamento térmico das várias placas processadas	60
Tabela 17 – Valores de condutividade térmica obtidos para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida.	61
Tabela 18 – Nível de Intensidade sonora medido para as placas de materiais compósitos com diferentes frações mássicas e granulometrias de partículas de argila expandida.....	63

Tabela 19 – Comparação dos valores de densidade para cada material, valores experimentais e teóricos	64
Tabela 20 – Valores da tensão máxima à flexão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)	66
Tabela 21 – Valores da tensão máxima à flexão dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)	67
Tabela 22 – Valores de módulo de elasticidade à flexão da resina e dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)	68
Tabela 23 – Valores do módulo de elasticidade à flexão para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)	69
Tabela 24 – Valores da tensão máxima à flexão dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida (granulometria $\varnothing=1,9\text{mm}$)	71
Tabela 25 – Valores de módulo de elasticidade à flexão dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)	72
Tabela 26 – Valores da tensão máxima à flexão dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)	73
Tabela 27 – Valores de módulo de elasticidade à flexão dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)	74
Tabela 28 – Valores médios do parâmetro de fratura K_Q dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)	77
Tabela 29 – Valores médios do parâmetro de fratura K_Q dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)	78
Tabela 30 – Valores médios do parâmetro de fratura K_Q dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)	79
Tabela 31 – Valores da tensão à compressão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)	82
Tabela 32 – Valores médios da tensão máxima à compressão dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)	83

Tabela 33 – Valores médios do módulo à compressão de compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida (granulometria $d=0,7\text{mm}$)	84
Tabela 34 – Valores médios do módulo de elasticidade à compressão de compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$).....	85
Tabela 35 – Valores da tensão à compressão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$).....	87
Tabela 36 – Valores médios do módulo à compressão de compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)	88
Tabela 37 – Valores da tensão à compressão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$).....	90
Tabela 38 – Valores médios do módulo à compressão de compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)	91

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas

ESTG	Escola Superior e Tecnologia e Gestão de Leiria
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DEC	Departamento de Engenharia Civil
SR1500	Resina Epóxida da SICOMIN <i>Epoxy Systems</i>
Argex	Argila Expandida
dArgex	Diâmetro da Partícula de argila Expandida
FV	Fibras de Vidro
Wp	Fração mássica de Partículas
Wf	Fração Mássica de Fibras
S	Desvio padrão
RTM	Moldação por transferência de resina
$X_{\text{médio}}$	Valor Médio

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

DEDICATÓRIA	III
AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XVII
LISTA DE SIGLAS	XXI
ÍNDICE	XXIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Estrutura	3
2. ESTADO DE ARTE	5
2.1. Materiais Compósitos	6
2.1.1. Classificação segundo a fase da Matriz	7
2.1.2. Classificação Segundo a Fase do Reforço	11
2.1.3. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras	13
2.1.4. Materiais Compósitos Reforçados com Partículas	18
2.1.5. Processamento de Materiais Termoendurecíveis	21
2.1.6. Técnicas de Processamento Materiais Compósitos	23
2.2. Propriedades Mecânicas de Compósitos de Matriz Polimérica com Reforço de Partículas	27
2.2.1. Ensaio de Flexão	28
2.2.2. Ensaio de Compressão	29
2.2.3. Ensaio de Tenacidade À Fratura	29
2.3. Propriedades Físicas de Compósitos de Matriz Polimérica com Reforço de Partículas	30
2.3.1. Propriedades Térmicas	30
2.3.2. Propriedades Acústicas	35
3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	37
3.1. Materiais (Matriz e Cargas)	37
3.1.1. Granulometria	39
3.1.2. Densidade Aparente	40

3.1.3.	Densidade Real	40
3.2.	Metodologia de Processamento	42
3.3.	Caracterização Física	46
3.3.1.	Ensaio Térmico	47
3.3.2.	Ensaio Acústico	49
3.3.3.	Geometria e Dimensão dos Provetes	50
3.3.4.	Densidades	51
3.4.	Caracterização Mecânica	52
3.4.1.	Ensaio de Flexão em Três Pontos	52
3.4.2.	Ensaio de Tenacidade à Fratura	54
3.4.3.	Ensaio de Compressão	57
4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	59
4.1.	Ensaio Térmico	59
4.2.	Ensaio Acústico	62
4.3.	Densidades	63
4.4.	Ensaio de Flexão em Três Pontos	65
4.4.1.	Materiais Compósitos Reforçados com Partículas de Argila Expandida $\varnothing=0,7\text{mm}$	65
4.4.2.	Materiais Compósitos Reforçados com Partículas de Argila Expandida $\varnothing=1,9\text{mm}$	70
4.4.3.	Materiais Compósitos Reforçados com Partículas de Argila Expandida $\varnothing=2,6\text{mm}$	73
4.4.4.	Análise Comparativa dos Diferentes Compósitos Processados	75
4.5.	Ensaio de Tenacidade à Fratura	76
4.6.	Ensaio de Compressão	81
4.6.1.	Materiais Compósitos Reforçados com Partículas de Argila Expandida $\varnothing=0,7\text{mm}$	81
4.6.2.	Materiais Compósitos Reforçados com Partículas de Argila Expandida $\varnothing=1,9\text{mm}$	86
4.6.3.	Materiais Compósitos Reforçados com Partículas de Argila Expandida $\varnothing=2,6\text{mm}$	89
4.6.4.	Análise Comparativa dos Diferentes Compósitos Processados	91
5.	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	95
5.1.	Conclusões	95
5.2.	Trabalhos Futuros	97
6.	BIBLIOGRAFIA	99

1. Introdução

Nas últimas décadas tem ocorrido um grande desenvolvimento a nível industrial, o que contribuiu para o uso de materiais compósitos em substituição de materiais mais convencionais, em diferentes áreas, nomeadamente, na indústria aeroespacial, aeronáutica, naval, automóvel, construção civil, medicina, entre outras. Os materiais compósitos constituem um dos mais interessantes grupos de materiais atualmente utilizados, pois apresentam inúmeras vantagens em relação aos materiais convencionais, como elevada rigidez, resistência à corrosão, condutividade térmica e estabilidade estrutural.

A utilização de fillers nos compósitos, tais como partículas de argila expandida, pode permitir obter componentes mais económicos para aplicações específicas. De um modo geral, as propriedades mecânicas de um compósito de matriz polimérica reforçada com partículas dependem do tamanho destas, bem como da geometria, distribuição e adesão das mesmas ao material da matriz.

Atualmente é possível utilizar argila expandida na área da construção, nomeadamente na construção de edifícios ou plataformas petrolíferas. No entanto, a utilização mais comum deste material passa por aplicações não estruturais, nomeadamente em elementos de enchimento e pavimentos, devido às suas características de leveza e isolamento térmico e acústico.

Deste modo, e de modo a alargar a utilização de agregados leves para além da engenharia civil pretende-se estudar neste trabalho um novo produto (compósitos de matriz polimérica reforçada com partículas de argila expandida) para aplicações na área do mobiliário e decoração.

1.1. Objetivos

Pretende-se com este trabalho, efetuar estudos relativos ao comportamento mecânico e físico dos materiais compósitos de resina polimérica, processados com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida. Neste estudo foram considerados três tamanhos de partículas de argila expandida: ($\varnothing=0,7\text{mm}$, $\varnothing=1,9\text{mm}$, $\varnothing=2,6\text{mm}$). Como é expetável que a resistência mecânica diminua com o aumento da fração de partículas, foi considerado adicionar fibras curtas de vidro aos compósitos para contrariar esta tendência. Deste modo, foi considerado adicionar fibra de vidro (1 e 3%) aos compósitos com as frações mássicas de 32, 36 e 40% e para o tamanho médio de partículas de $\varnothing=0,7\text{mm}$.

A partir das placas com as diferentes frações mássicas e granulometrias vão ser realizados os seguintes ensaios:

- Ensaio de Condutividade Térmica;
- Ensaio de Intensidade Acústica;
- Ensaio de Densidade;
- Ensaio de Flexão em 3 pontos;
- Ensaio de Tenacidade à Fratura K_Q ;
- Ensaio de Compressão.

Pretende com estes diferentes ensaios a realizar, obter as seguintes propriedades físicas e mecânicas:

- Propriedades físicas:
 - A variação da densidade em função da variação da fração mássica e diferentes tamanhos de partículas;
 - Curvas de variação da condutividade térmica versus fração mássica e diferentes tamanhos de partículas;
 - Curvas de variação da condutividade acústica versus a fração mássica e diferentes tamanhos de partículas;
- Propriedades mecânicas:
 - Curvas de variação da resistência mecânica à flexão em 3 pontos (σ_{flex} e E_{flex}) versus a fração mássica e diferentes tamanhos de partículas;
 - Curvas de variação da resistência à compressão (σ_{comp} e E_{comp}) versus a fração mássica e diferentes tamanhos de partículas;
 - Curvas de variação da resistência à fratura (K_Q) versus a fração mássica e diferentes tamanhos de partículas;

1.2. Estrutura

O trabalho realizado foi estruturado e organizado da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução

Neste capítulo, pretende-se apresentar os principais objetivos do projeto e efetuar um enquadramento geral do mesmo.

Capítulo 2 – Estado de Arte

Enquadramento geral sobre materiais compósitos e as suas características, tendo como principal incidência, os compósitos de matriz polimérica reforçados com partículas e fibras, sendo apresentadas as características gerais do material constituinte da matriz, a resina epóxida, como dos materiais que constitui o reforço, as partículas de argila expandida e as fibras curtas de vidro. Estes temas abordados vão ter como base para a realização dos pontos seguintes, no que diz respeito aos procedimentos experimentais, e fundamentalmente permitirá entender os resultados obtidos.

Capítulo 3: Materiais e Procedimentos Experimentais

Descrição dos ensaios físicos/mecânicos realizados aos compósitos analisados para a caracterização das suas propriedades, apresentação dos equipamentos e métodos usados.

- Capítulo 4: Resultados Experimentais e Discussão

Apresentação dos resultados provenientes dos ensaios experimentais efetuados aos materiais analisados. Análise e discussão dos resultados obtidos nos diferentes ensaios mecânicos e físicos realizados.

Capítulo 5: Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste capítulo descrevem-se as principais conclusões relativas ao trabalho realizado. São também apresentados os possíveis trabalhos a realizar em termos futuros.

- Capítulo 6: Bibliografia

No último capítulo faz-se referência às fontes bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

2. Estado de Arte

Os materiais de construção encontram-se por todo o lado, à nossa volta podemos identificar objetos em metal, plástico e cerâmica em tudo o que nos rodeia. Estes revestem-se de extrema importância para a nossa sobrevivência, pois possibilitam-nos o fabrico de habitações, meios de transporte, vias de comunicação, equipamentos e ferramentas de trabalho, utensílios de lazer etc. Desde que o homem começou a fabricar as primeiras ferramentas de pedra, as primeiras peças de vestuário de peles de animais, que a procura de novos materiais esteve no centro das suas atenções. No entanto nos primórdios o homem empregava os materiais na forma como os encontrava na natureza. Moldava-os e adaptava-os às suas necessidades. Até ao final da idade média, a técnica de tratamento dos materiais consistia simplesmente em modelar os materiais encontrados de forma bruta na natureza, dos quais a pedra, a madeira, o couro, o marfim, outras fibras vegetais, a argila e a uma escala mais reduzida os metais. As exigências do Homem foram aumentando e assim, os padrões exigidos para o uso dos materiais tais como maior resistência, maior durabilidade e melhor aparência. Atualmente dispomos de mais de 50.000 diferentes materiais, agrupados em três grandes grupos, metais, cerâmicos e polímeros [1].

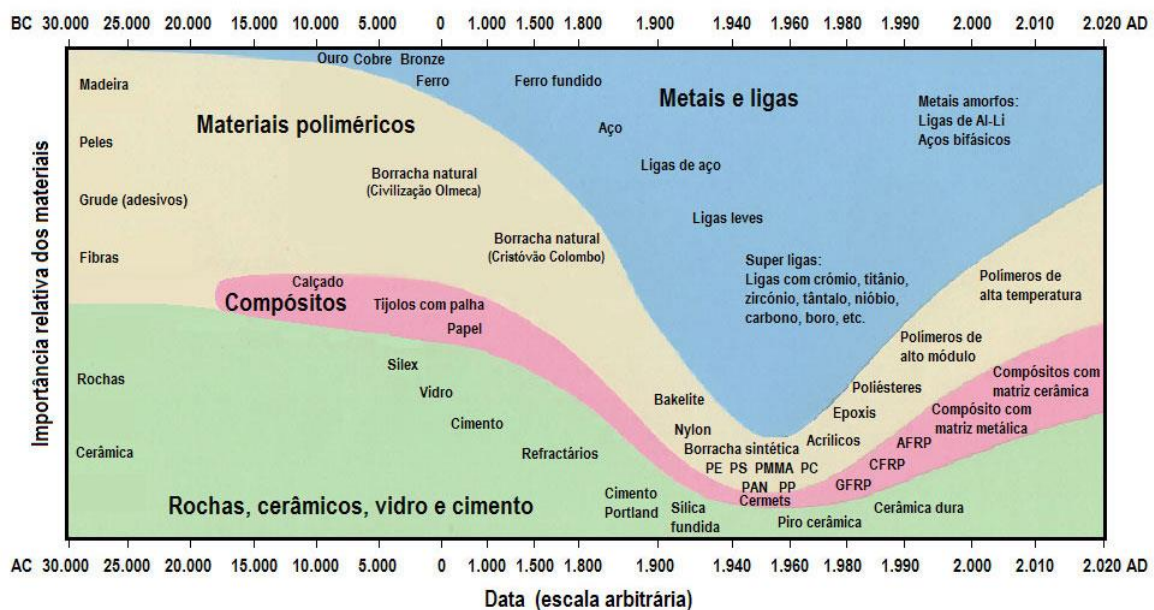


Figura 1 – Evolução na utilização de materiais por parte do homem [1]

2.1. Materiais Compósitos

O termo “material compósito” surgiu em meados do século 20 como uma promissora classe de materiais de engenharia [2]. Não existe nenhuma definição universalmente aceita para materiais compósitos. No entanto, um compósito pode ser considerado como um mistura ou combinação de dois ou mais micro ou macro constituintes, que diferem na forma e na composição química e que na sua essência, são insolúveis entre si. São criados com o intuito de obter um material com propriedades mecânicas superiores, em alguns aspectos, aos materiais constituintes [3].

Segundo *Mattews* e *Rawlings*, um material é considerado um material compósito quando é constituído por duas fases de propriedades distintas, contem uma proporção razoável (5%) da fase dispersa e quando o material final tem propriedades mecânicas diferentes dos constituintes iniciais [4].

Os compósitos são constituídos por duas fases: o reforço ou fase dispersa que é responsável por suportar as cargas aplicadas e a matriz que é contínua, tendo como função transferir os esforços mecânicos externos para o reforço. A matriz nem sempre é a fase do compósito presente em maior quantidade.

A ligação entre a matriz e o reforço é realizada através de uma interfase cuja qualidade desta influencia diretamente no desempenho mecânico do compósito. Na Figura 5 pode-se observar uma representação esquemática das fases constituintes de um compósito [5].

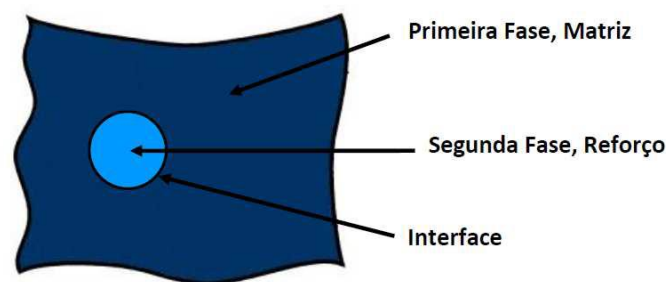


Figura 2 – Representação esquemática das fases constituintes de um compósito [5]

Para que haja uma interação entre componentes com naturezas químicas, dimensões e formas diferentes é necessária uma área de contacto entre eles. Quanto maior for essa área, maior a possibilidade de ocorrer uma interação de natureza física, química ou físico-química.

De um modo geral, as ligações na interfase são caracterizadas pelas forças intermoleculares e energia livre de superfície. A qualidade da interfase depende de alguns fatores como a humidade, a reação química, as tensões residuais, a morfologia da superfície e a rugosidade.

De acordo com a natureza química da matriz, os materiais compósitos poderão ser divididos em três classes, materiais compósitos de matriz cerâmica, matriz metálica e matriz polimérica. Segundo *Callister*, devido à grande variedade de matrizes e reforços existentes, os materiais compósitos também podem ser classificados como reforçados por partículas, reforçados por fibras e compósitos estruturais [6], como observada na Figura 3.

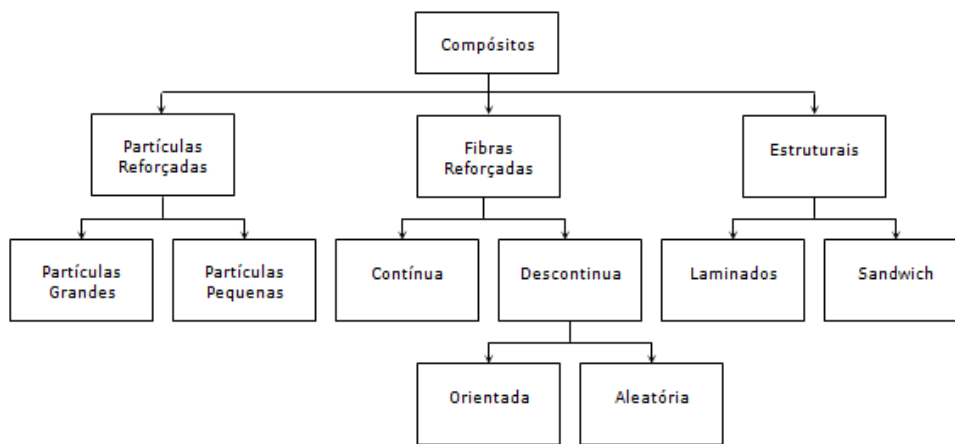


Figura 3 - Classificação do tipo de materiais compósitos [7]

As propriedades dos compósitos dependem das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas, do tamanho, da geometria e orientação do reforço e do grau de interligação entre o reforço e a matriz [3]. O reforço é o componente descontínuo do material compósito, é, em regra, mais resistente do que a matriz e no caso de assumir a forma de fibras permite que o material tenha capacidade de resistência na direção do carregamento.

2.1.1. Classificação segundo a fase da Matriz

Os compósitos podem surgir de combinações entre metais, cerâmicos e polímeros. As possíveis combinações são condicionadas às condições de processamento e às prováveis incompatibilidades entre os componentes. Em relação ao peso, os materiais compósitos poliméricos apresentam propriedades mecânicas específicas que podem exceder consideravelmente às dos metais [8].

Os materiais utilizados como matriz apresentam-se numa única fase e podem consistir em materiais poliméricos, metálicos ou cerâmicos, dando origem às seguintes categorias de materiais compósitos:

- Compósitos de Matriz Polimérica (Figura 4);
- Compósitos de Matriz Metálica (Figura 5);
- Compósitos de Matriz Cerâmica (Figura 6).

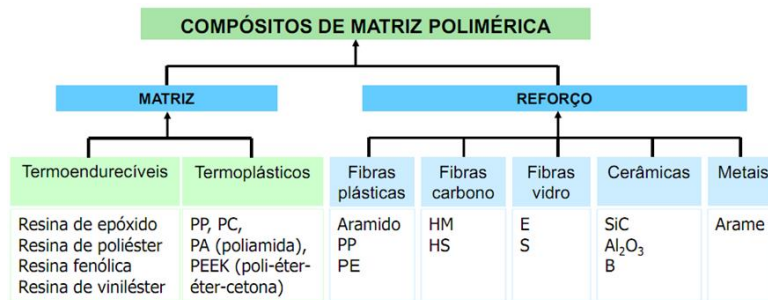


Figura 4 – Compósitos de Matriz Polimérica

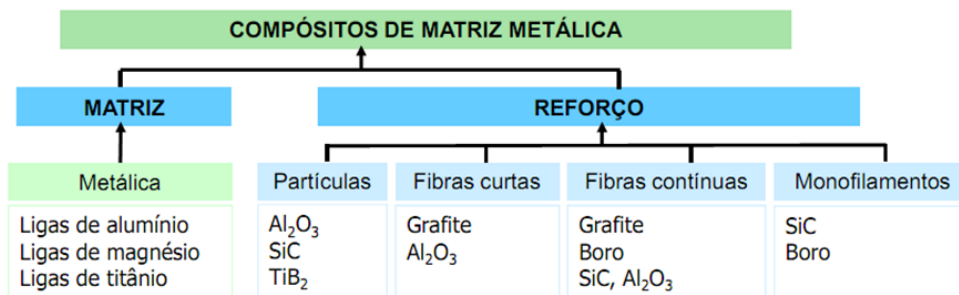


Figura 5 – Compósitos de Matriz Metálica

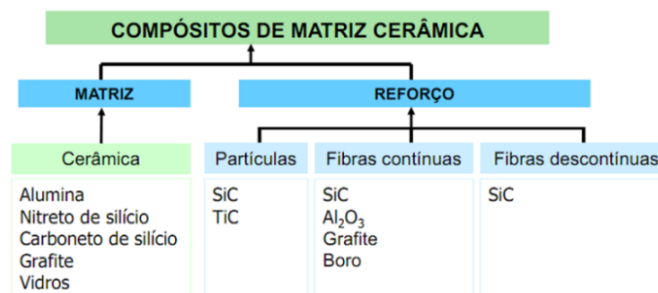


Figura 6 – Compósitos de Matriz Cerâmica

Dos compósitos apresentados, os polímeros constituem o material de matriz mais versátil, como se pode analisar na Tabela 1, no entanto, uma vez que a resistência a elevadas temperaturas e ambientes agressivos é um fator fundamental, os materiais cerâmicos ou carbono devem ser utilizados na matriz [9].

Tabela 1 – Fatores de Seleção do material da matriz de um compósito [adaptado de 9]

Fator de Seleção	Avaliação dos Materiais da Matriz		
	Pobre ←		→ Bom
Facilidade de Processamento	Cerâmico	Metal	Polímero
Qualidade	Cerâmico	Metal	Polímero
Capacidade de deformação	Cerâmico	Metal	Polímero
Resistência ao Ambiente	Polímero	Metal	Cerâmico
Densidade	Metal	Cerâmico	Polímero
Custo	Metal	Cerâmico	Polímero

Se compararmos os materiais compósitos de matriz polimérica, os cerâmicos e os metálicos, podemos afirmar que estes apresentam ponto de fusão, dureza e módulo de elasticidade inferiores, apesar de representarem um dos materiais mais utilizados na matriz. O aumento do uso destes materiais está relacionado com análise das propriedades destes materiais versus o seu custo de fabrico. Ao apresentarem uma baixa densidade e baixo ponto de fusão, o seu processo produtivo é simplificado, pois não necessitam de elevadas temperaturas e/ou pressões, não sendo necessário complexos equipamentos de fabrico, minimizando os custos de processo e fabrico de materiais. Apresentam como desvantagens na sua utilização a sua baixa estabilidade dimensional, elevado coeficiente de expansão térmica e a elevada sensibilidade à radiação.

2.1.1.1. Compósitos de Matriz Cerâmica

Os materiais compósitos de matriz cerâmica, são dos materiais mais antigos, usados pelo ser humano, apesar da sua utilização ter ficado muito aquém dos outros tipos de matrizes, devido à sua dificuldade de fabricação. As elevadas temperaturas necessárias à sua fabricação fazem com que seja necessário a utilização de outro tipo de materiais no seu reforço, que suportem as elevadas temperaturas. Os materiais cerâmicos mais utilizados na matriz são, o cimento, a alumina, o nitreto de silício e a zircônia. Estes materiais apresentam como vantagens a elevada resistência à oxidação e a baixa densidade, só superada pela matriz polimérica. São quimicamente inertes e apresentam uma excelente resistência à erosão. Além da sua dificuldade de fabricação, estes materiais, apresentam uma predisposição à fratura fácil [10]. Os principais campos de aplicação dos materiais são a indústria aeronáutica, no fabrico de turbinas e sistema de travagem dos aviões, na área militar para a construção dos mísseis e na medicina para a construção de próteses.

2.1.1.2. Compósitos de Matriz Metálica

Nos materiais compósitos de matriz metálica, a matriz é constituída por um metal. Este tipo de compósito desenvolveu-se na década de 60 com a produção de fibra de boro e de carboneto de silício para reforço de ligas de alumínio [10]. O seu uso ainda é bastante restrito, sendo mais aplicável no sector automóvel e aeroespacial. Os materiais metálicos mais utilizados na matriz são o alumínio, o magnésio ou o titânio. Estes materiais destacam-se principalmente no sector dos transportes, através da construção de discos de travagem com matriz de alumínio e no sector aeroespacial e militar utilizando uma matriz de titânio. Apresentam como principais limitações o seu elevado preço de produção e o seu difícil processamento, que condicionam a sua utilização como material.

2.1.1.3. Compósitos de Matriz Polimérica

Os compósitos de matriz polimérica representam os compósitos mais empregues nos dias de hoje, sendo também designados por plásticos reforçados. Ao utilizarmos uma matriz polimérica pretende-se oferecer suporte às fibras ou às partículas usadas no material, absorver as deformações e conferir resistência quando sujeito a forças. O material polimérico, que deriva da palavra “polímero” que significa muitas partes. É caracterizado por ser constituído por muitas unidades ligadas quimicamente entre si formando um sólido. Dependendo da forma como estão ligados química e estruturalmente, os polímeros podem ser divididos em três classes distintas: os termoplásticos, os termoendurecíveis e os elastómeros.

Os polímeros termoplásticos, na presença de calor, amolecem ganhando a forma pretendida, e após o seu arrefecimento mantêm essa mesma forma, sendo um processo reversível. Como não sofrem alterações na sua estrutura química durante o aquecimento, estes podem ser novamente fundidos após o arrefecimento. Devem ser reciclados pois não se decompõem facilmente pela natureza. Alguns exemplos destes materiais são os polietilenos, os vinilos, os acrílicos e os nylons [11].

Os polímeros termoendurecíveis são os materiais plásticos que não se fundem com o seu reaquecimento, não podem portanto ser reaquecidos nem reprocessados, pois ao serem aquecidos degradam-se e decompõem-se [11]. Estes resistem fisicamente a variações térmicas, possuem baixa massa molecular e ligações cruzáveis e não são recicláveis. Exemplos típicos destes polímeros são resinas epóxicas, poliésteres e fenólicas.

O elastômero também conhecidos por borracha, é um material macromolecular que recupera rapidamente a sua forma e dimensões iniciais após a remoção da força aplicada. A sua característica mais importante é o seu comportamento elástico após ser deformado. Sabe-se que é possível esticar um elastômero até dez vezes o seu comprimento inicial e após remoção da tensão aplicada, este voltará à forma e comprimentos originais. Este processo ocorre devido às cadeias moleculares enroladas serem facilmente desenroladas pela aplicação da força, retomando a sua forma original quando esta deixa de ser aplicada devido ao reduzido número de ligações cruzadas entre as cadeias. Exemplos de elastômeros são o policloropreno e o copolímero butadieno. Um exemplo de um material compósito usando o elastômero pode ser os pneus de automóveis que são constituídos por uma matriz de borracha natural e sintética, reticuladas com enxofre, que contém partículas de aço ou nylon como reforço.

2.1.2. Classificação Segundo a Fase do Reforço

As propriedades dos materiais compósitos, além de dependerem da sua forma, orientação e distribuição da fase dispersa ou reforço, também são influenciados pela sua concentração e tamanho das partículas e/ou fibras, [13] como esquematizado na Figura 7.

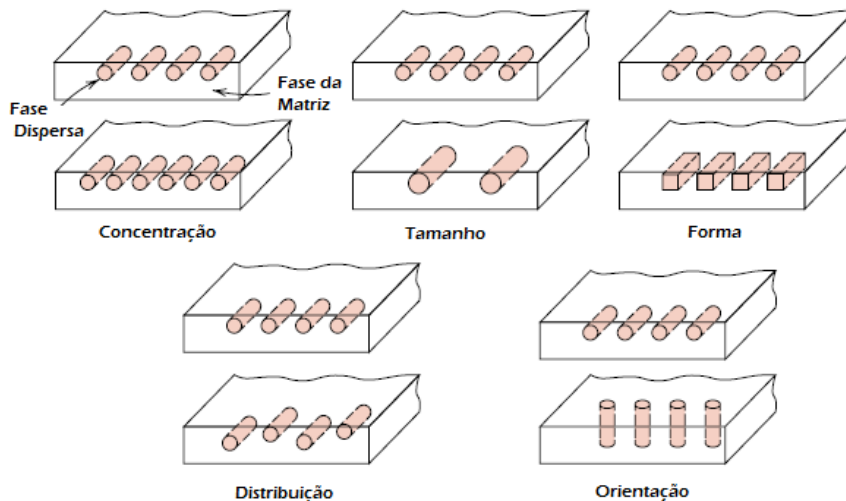


Figura 7 – Características da fase dispersa que influenciam os materiais compósitos [13]

Como esquematizado na Figura 8, os materiais compósitos, são classificados em três classes: os compósitos estruturais, as partículas reforçadas e as fibras reforçadas.

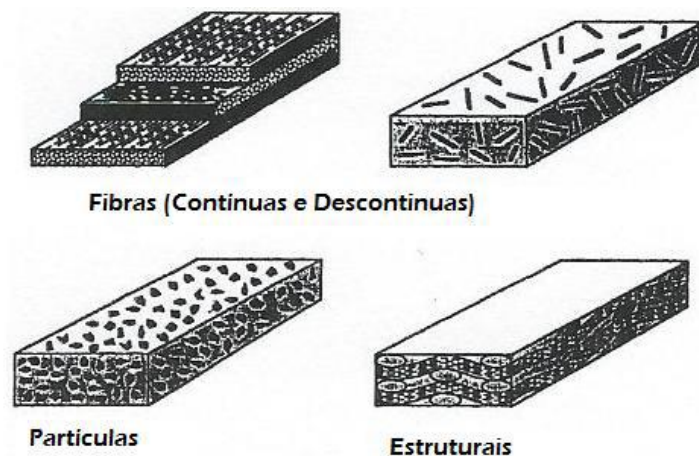


Figura 8 – Classificação dos materiais compósitos segundo a fase dispersa [14]

Os compósitos estruturais são divididos em compósitos laminares e em estruturas sandwich. Os compósitos laminados [15] são formados através do empilhamento de várias camadas impregnadas com resina polimérica, denominadas de lâminas. Este tipo de material apresenta uma resistência elevada numa diversidade de direções no plano bidimensional.

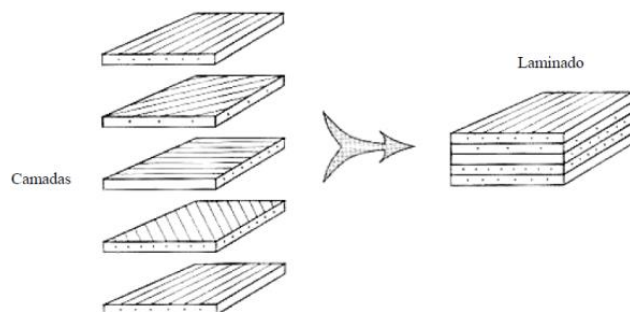


Figura 9 – Sanduíche com núcleo em espuma [adaptado de [16]]

Os materiais compósitos de painéis sandwich são projetados para que, as cargas mecânicas a que a estrutura está submetida, sejam suportadas pelo reforço. As propriedades do material dependem da matriz, do reforço, e da ligação destes dois elementos através de um filme adesivo que garante a integridade do conjunto. Este tipo de materiais consiste basicamente em duas faces externas mais resistentes que estão separadas por uma camada de material menos denso, que apresenta uma menor rigidez e menor resistência. O material da matriz tem como funções a separação das faces, resistir às deformações perpendiculares ao plano da face e o aumento de rigidez ao longo dos planos.

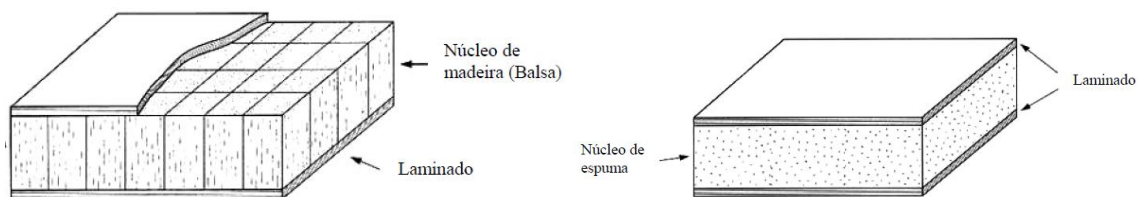


Figura 10 – Sanduíche com núcleo em madeira leve e Sanduíche com núcleo em forma de ninho de abelha [adaptado de 16]

Os materiais compósitos reforçados com partículas são caracterizados por apresentarem uma fase dispersa equiaxial, ou seja, as dimensões das partículas são aproximadamente as mesmas em todas as direções, enquanto que os compósitos reforçados com fibras têm uma fase dispersa com geometria da fibra com uma relação entre comprimento e diâmetro. Estes dois tipos de materiais vão ser descritos pormenorizadamente, que são objeto de estudo deste trabalho.

2.1.3. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras

As fibras consistem em pequenos filamentos de diferentes seções, semelhantes a um cabelo humano. Devido ao seu pequeno diâmetro, que pode ir até 100 μm , a fibra é flexível e facilmente moldável em várias formas [17]. Ao utilizarmos materiais compósitos reforçados com fibras pretende-se obter materiais com elevada resistência, tenacidade e rigidez.

Os materiais compósitos reforçados com fibras longas ou contínuas são considerados materiais anisotrópicos, e as fibras apenas são cortadas após a fabricação da peça. Estes materiais são muito mais rígidos e resistentes que os compósitos com fibras curtas.

As fibras curtas ou descontínuas são cortadas com comprimentos entre os 3 e 10mm e os materiais compósitos reforçados com fibras curtas ou com partículas são considerados materiais isotrópicos. Os materiais que apresentam no reforço fibras curtas, têm um reforço menos eficiente que os com fibras longas. Mas como os de fibras curtas têm maior facilidade de processamento e menor custo são os mais utilizados. Este tipo de material pode ser apresentado em três tipos: contínuo e alinhado que confere uma melhor resistência do material, descontínuo e alinhado e descontínuo mas orientado aleatoriamente, como esquematizado na Figura 11.

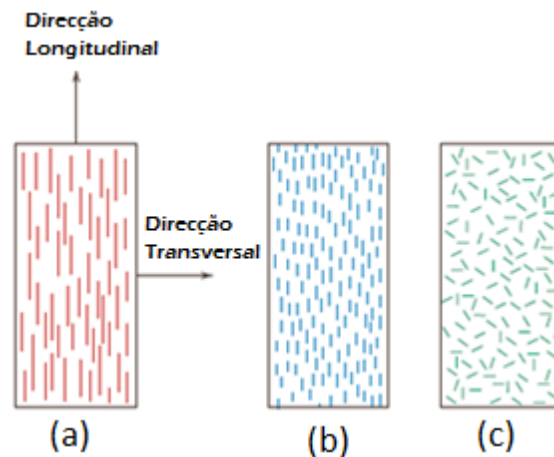


Figura 11 – Compósito reforçado com Fibras contínuas e alinhadas (a), reforçado com fibras descontínuas alinhadas (b) e reforçado com fibras descontínuas e orientadas aleatoriamente (c)

As fibras são consideradas unidirecionais quando estão orientadas segundo uma mesma direção ou multidirecional quando estão orientadas segundo duas ou mais direções ortogonais. A orientação unidirecional das fibras proporciona uma maior rigidez e maior resistência à tração na direção das fibras, na orientação bidirecional ou multidirecional garante um comportamento mecânico mais uniforme e melhor resistência ao impacto, enquanto a orientação aleatória das fibras proporciona um comportamento isotrópico do material, um bom acabamento superficial mas propriedades mecânicas inferiores quando comparado com os outros dois tipos de orientações.

Os reforços mais utilizados na produção de materiais compósitos são as fibras de vidro, de carbono, de aramida e de boro. O diâmetro de uma fibra de vidro pode variar entre 5 a 25 μm , de uma fibra de carbono poderá ser entre 5 a 8 μm , de uma fibra aramídica ronda os 12,5 μm e de uma fibra de boro poderá rondar os 100 μm [11].

Atualmente já são usadas fibras naturais como o Sisal e fibras minerais como o amianto em algumas aplicações mas que exijam menores esforços (Moura, 2005). A utilização de fibras naturais como reforço tem tido um crescimento acentuado, tanto na investigação como na sua aplicabilidade, devido a razões ecológicas, pois são biodegradáveis e económicos. Neste campo destaca-se o sisal, utilizado como reforço em materiais poliméricos, devido ao seu reduzido custo e baixa densidade [11]. Atualmente as fibras naturais já são utilizadas no sector da construção civil e automóvel.

Na Tabela 2, podemos comparar algumas as propriedades de fios de fibras de vidro, carbono e aramida, usados no reforço de polímeros.

Tabela 2 – Propriedades de fios de fibras de vidro, carbono e aramida para reforço de polímeros [11]

Propriedade	Fibra de Vidro Tipo E	Fibra de Carbono	Aramida Kevlar 49
Resistência à Tração (MPa)	2.410	3.100	3.617
Módulo de Elasticidade em Tração (MPa)	69.000	220.000	124.000
Alongamento (%)	3,5	1,4	2,5
Densidade (g/cm ³)	2,54	1,75	1,48

Na Tabela 3, são apresentadas as principais vantagens e desvantagens da utilização dos principais tipos de fibra usados como reforço.

Tabela 3 – Principais vantagens e desvantagens das fibras mais utilizadas [11]

	Fibras de Vidro	Fibras de Carbono	Fibras Aramídicas	Fibras de Boro
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Boa resistência ao calor, à humidade e corrosão; - Boa elasticidade; - Estabilidade Dimensional; - Baixo Custo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resistente à fadiga e fluência; - Resistente à temperatura; - Baixa expansão térmica; - Elevado módulo de elasticidade. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resistência ao Impacto; - Fáceis de trabalhar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevado módulo de elasticidade; - Elevada dureza; - Elevada resistência à compressão; - Resistência à temperatura.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo módulo de elasticidade; - Fadiga. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevado custo; - Fraca resistência ao impacto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa resistência à compressão e flexão; - Absorção de humidade; - Atacado pela luz UV. 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo muito elevado; - Formas de materiais limitadas.

2.1.3.1. Fibras de Vidro

As fibras de vidro são usadas na sua maioria para reforço das matrizes poliméricas, sendo que cerca de 90% dos plásticos reforçados utilizam este tipo de fibra. A utilização deste tipo de fibra como reforço teve início na década de 40, no sector da aeronáutica, sendo que devido à sua versatilidade a sua aplicação expandiu-se a outros sectores [18], As

fibras de vidro são facilmente produzidas por aquecimento do vidro e por moldação por forças gravitacionais a partir de um mandril de platina [4].

Atualmente, os tipos de fibra de vidro mais utilizados como reforço são [7]:

- Fibra de Vidro Tipo E (E-glass): são obtidas numa mistura de óxidos de Si (sílica), Al (alumínio), B (boro), Ca (cálcio), e Mg (magnésio), que começou a ser utilizada na indústria elétrica. Devido às suas boas propriedades de resistência, rigidez, e resistência ao ataque de água ou humidade, o seu campo de aplicações foi alargado para outros sectores. Devido ao seu baixo custo de produção, quando comparado com outras fibras, aramida e o carbono, são frequentemente usadas no reforço em materiais termoplásticos [19].

- Fibra de Vidro Tipo S (S-glass): as propriedades mecânicas destas fibras, em relação às fibras do tipo E, são entre 20 a 30% superiores e apresentam uma maior resistência térmica e à fadiga, porém o seu uso está mais limitado devido ao seu elevado custo [7]. Os materiais compósitos em que são utilizadas as fibras de vidro como reforço, são utilizados em cascos de navios, hélices de barcos, pranchas de surf, componentes para indústria automóvel e aeronáutica.

2.1.3.2. Fibras de Carbono

As fibras de carbono tiveram a sua origem nos anos 60, e foram obtidas através da oxidação/carbonização a 2800°C de fios seda natural (Rayon), fibras com excelentes propriedades mecânicas (elevada resistência e dureza e baixa densidade), a que chamou fibras de carbono [7]. Atualmente existem dois tipos de fibras de carbono: as fibras de grafite, onde a sua percentagem de carbono chega aos 99% e as fibras de carbono que compreendem percentagens de carbono entre 80 e 95% [18].

Existem diversos processos para a produção das fibras de carbono: através da decomposição térmica de vários precursores orgânicos, a celulose (rayon fibers), o poliácridonitrilo (PAN) e o alcatrão (pitch). Estes diferentes precursores conduzem a fibras de carbono com características mecânicas distintas [18]. O precursor mais utilizado é o PAN, que confere boas propriedades mecânicas, apresentando também vantagens económicas, enquanto o processo que utiliza a celulose caiu em desuso, pelo facto de caracterizar o material compósito com baixas propriedades mecânicas. Estes tipos de fibras são muito utilizadas em reforço de materiais no sector da indústria aeronáutica e espacial [7].

2.1.3.3. Fibras Aramídicas

Produzidas a partir de poliamidas aromáticas, surgiram em 1972 pela empresa Dupond, tendo como nome comercial Kevlar. As fibras aramídicas que existem atualmente são a Kevlar®29 e Kevlar®49. A última apresenta um módulo de elasticidade superior [7]. Uma das grandes desvantagens da utilização destas fibras é o seu elevado preço, não sendo por isso muito utilizada. Das suas aplicações, destacam-se a indústria aeroespacial, marítima e automóvel (Kevlar®49) enquanto a fibra Kevlar®29 é mais usada em correntes em cabos e objetos de proteção pessoal.

2.1.3.4. Fibras de Boro

Devido ao seu processo de produção ser muito dispendioso, através da utilização de técnicas de deposição química de vapores sobre um filamento de Tungsténio, a uma temperatura de 1500K, esta fibra não é muitas vezes utilizada [18]. Comparando esta fibra com a fibra de vidro, o seu módulo de elasticidade é cinco vezes superior ao da fibra de vidro mas apresenta um custo muito superior. Devido ao seu elevado custo, este tipo de fibras tem o seu campo de aplicação reduzido, apenas na indústria aeroespacial.

2.1.3.5. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras Curtas

Os principais fatores que contribuem para o desempenho mecânico dos materiais compósitos reforçados com fibras são o teor de fibras presentes em relação ao volume total do compósito e o comprimento das suas fibras. Os materiais compósitos de fibras curtas apresentam valores de módulo e resistência inferiores aos compósitos de fibras longas, que são mais utilizados para aplicações estruturais. Este facto ocorre devido às frações volumétricas do reforço serem muito inferiores aos compósitos com fibra longa e também à distribuição das fibras curtas na matriz, que tende a distribuir-se de forma mais ou menos aleatória impedindo obter elevados módulos e resistências dos compósitos unidirecionais na direção das fibras.

Em termos de propriedades mecânicas, os compósitos reforçados com fibras longas apresentam melhores resultados quando comparados aos compósitos com fibras curtas, pois o aumento do comprimento das fibras faz com que a transferência de esforços da

matriz para as fibras seja mais eficiente evitando a desintegração das fibras, o que permite o aumento das propriedades avaliadas [11].

2.1.4. Materiais Compósitos Reforçados com Partículas

Este tipo de material compósito pode ser classificado em duas subclasses: os materiais reforçados com partículas grandes ou reforçados por dispersão [6]. A distinção entre estas classes está relacionada com o tamanho das partículas e no mecanismo para reforçar o material.

Os compósitos reforçados com partículas grandes apresentam dimensões de 0,1 até 50 μm , e após aplicação da carga no compósito, as partículas tendem a restringir o movimento da matriz na vizinhança de cada partícula [20]. Assim, o grau de reforço ou a melhoria do comportamento mecânico depende da ligação na interface matriz versus partículas. A matriz transfere tensão para as partículas, as quais suportam uma fração da carga aplicada. As propriedades destes materiais compósitos são influenciadas por diversos fatores, nomeadamente a sua fração volumétrica, pois ao adicionarmos carga ao material as propriedades finais do material compósito vão ser superiores à do material inicial, e pela relação calculada pela regra das misturas. O tamanho e a distribuição das partículas têm uma forte influência na resistência do material compósito, e em geral a resistência do material aumenta com a diminuição do tamanho da partícula, a forma das partículas também influencia nas propriedades do material. As partículas das cargas deverão estar bem dispersas e bem distribuídas na matriz, uma vez que há tendência natural das cargas em formarem agregados, que impedem o incorreto envolvimento da partícula-matriz, o que origina concentrações de tensões, provocando a redução das propriedades mecânicas do material compósito.

Nos compósitos reforçados por dispersão, as partículas pequenas apresentam um diâmetro que pode variar entre 0,01 a 0,1 μm [20]. As interações entre a partícula e a matriz, neste caso, ocorrem num nível atômico ou molecular, onde as partículas são responsáveis em restringir a deformação plástica, aumentar a resistência à tração e à dureza [6].

2.1.4.1. Argila Expandida

A argila expandida é um agregado leve que se apresenta na forma arredondada, com estrutura interna formada por uma espuma cerâmica com micróporos e uma casca rígida e resistente.

As principais características da argila expandida são: durabilidade, leveza, excelentes propriedades de isolamento térmico e absorvente acústico (devido ao seu interior microporoso), incombustibilidade, inércia química e estabilidade dimensional. É usada sobretudo na construção civil e tem como principal vantagem a redução do peso das estruturas sem afetar a resistência das mesmas. Para além disso, não ataca o ferro e permite redução de custos ao economizar betão e cargas de fundições. Por se tratar de material isolante térmico, a argila expandida é indicada para a confeção de betão refratário, pois resiste a temperaturas até 800°C. A sua densidade, quando seca e no estado solto, é aproximadamente 2,5 vezes menor que a de agregados normais de areia e pedra, o que facilita o armazenamento do material. A comercialização da argila expandida é efetuada em diversas classes granulométricas.

A argila expandida é também usada frequentemente nas atividades de jardinagem, uma vez que é a única capaz de garantir a humidade adequada da terra, drenar de forma rápida e por igual, além de ser o único material disponível a garantir total sucesso na cultura hidropónica (método suíço onde as plantas são cultivadas em estufas e depois adaptadas em vasos com água), permitindo a sustentação e humidade necessárias.

A argila é um material proveniente da decomposição, durante milhões de anos, das rochas feldspáticas, muito abundantes na crosta terrestre.

As argilas classificam-se em duas categorias: argilas primárias e argilas secundárias ou sedimentares. As primeiras são formadas no mesmo local da rocha mãe, onde são pouco atacadas pelos agentes atmosféricos. Possuem partículas mais grossas e coloração mais clara, são pouco plásticas, porém de grande pureza e possuem alto nível de fusão. O caulino é uma das argilas deste tipo [21].

Argilas secundárias ou sedimentares são as que foram transportadas para mais longe da rocha mãe pela água, pelo vento e nos fenómenos de degelo. A água, em especial, tritura a argila em partículas de diferentes dimensões, fazendo com que as mais pesadas se depositem primeiro, as outras vão-se depositando de acordo com o seu peso ao longo do

percurso, depositando-se as mais leves onde a água já não tem velocidade. As secundárias são mais finas e plásticas que as primárias, podendo, no entanto conter impurezas ao se misturarem com outras matérias orgânicas.

O mineral básico das argilas é a caulinite. A argila é um silicato de alumínio hidratado, composto por alumínio (óxido de alumínio), sílica (óxido de silício) e água. Uma partícula de argila é formada por uma molécula de alumínio (que contém dois átomos de alumínio e três de oxigénio), duas moléculas de sílica (que contém um átomo de silício e dois de oxigénio) e duas moléculas de água [21].

No processo de fabrico dos agregados leves de argila expandida os procedimentos adotados dependem dos seguintes aspetos [22]:

- Das matérias-primas utilizadas, essencialmente quando se trata de argilas ou xistos cuja extração e preparação sejam condicionadas pela natureza da rocha;
- Do modo de preparação, em que se pode utilizar a via seca, a via semi-seca (granulação) e via húmida (extrusão ou prensagem);
- Do sistema de cozedura, o qual compreende a secagem, a cozedura/expansão e o arrefecimento.

As três fases de tratamento térmico (cozedura) podem ser efetuadas por vários procedimentos:

- Em forno rotativo;
- Em forno rotativo, mas acompanhado por um processo de secagem e arrefecimento separado;
- Por intermédio de uma grelha de cozedura.

Os diversos sistemas, assentam contudo nos mesmos princípios:

- Necessidade de conformar os grãos antes da cozedura;
- Assegurar a eliminação da água de modelação de forma suficientemente lenta, para evitar a explosão dos grãos durante a cozedura;
 - Provocar um aquecimento rápido no fim da cozedura, para que a superfície dos grãos possa tornar-se estanque, com uma película dura e resistente, sem que os grãos se aglomerem.

2.1.5. Processamento de Materiais Termoendurecíveis

Os polímeros termoendurecíveis são os mais utilizados para a fabricação de compósitos devido ao seu menor custo, facilidade de processamento, alta resistência térmica e dimensional, sendo que os mais utilizados na matriz são as resinas poliéster, epoxídica e fenólica. As grandes desvantagens da utilização de materiais compósitos de matriz polimérica são a faixa limitada de temperatura de uso, a baixa estabilidade térmica e dimensional, a sua degradação em ambientes húmidos e não poderem ser usados em temperaturas próximas ou acima da transição vítrea, na qual os polímeros perdem as suas propriedades físicas. Os elastómeros, também denominados de borrachas, apresentam propriedades que se situam entre os termoplásticos e termoendurecíveis, sendo constituído por moléculas lineares que estão reticuladas entre si por ligações covalentes. Com este tipo de ligações, há uma melhoria da rigidez e da resistência à temperatura, o que permite obter a produção de materiais e produtos distintos.

As resinas termoendurecíveis mais utilizadas nos materiais compósitos são as de poliéster, éster vinílico e epóxida. As resinas poliéster e éster vinílico são utilizados quando se pretende obter um material com bom desempenho mecânico, mas com razoável durabilidade e não devem ser aplicados em produtos que suportam aplicações exigentes, visto que, as contrações de cura são significativas e o desempenho destas matrizes com outras fibras têm sido insuficientes, à exceção das fibras de vidro, material onde se obtiveram razoáveis propriedades mecânicas [9]. As resinas epoxidas estão classificadas como resinas termoendurecíveis de elevado desempenho, assim como as poliamidas e as resinas fenólicas, pois apresentam boas qualidades mecânicas, resistência a elevadas temperaturas e apresentam elevada fragilidade e sensibilidade à humidade. Dependendo do tipo de polimerização ou reação de cura das resinas termoendurecíveis originam diferentes resinas, as epóxida e poliamida são obtidas por uma reação de adição sem produção de voláteis, enquanto as resinas fenólicas são obtidas por reações de condensação [9].

As resinas epoxidas são resinas sintéticas que abrangem inúmeras propriedades desde líquidas de baixa viscosidade sem solvente até sólidas de alto ponto de fusão, os agentes de cura ou endurecedores reagem com a resina epóxida formando moléculas de diferentes composições, tornando-se num material termorrígido com excelentes

propriedades mecânicas, químicas e no isolamento de componentes elétricos. Consoante o tipo de agente de cura que utilizarmos obtemos diferentes propriedades no produto final.

A resina epóxida sofre um processo de cura para adquirir propriedades de um material termorrígido, pois as moléculas epóxi no seu estado puro e a uma temperatura ambiente não reagem umas com as outras, podendo estas ficar armazenadas durante largos anos num local seco, sem que haja reação entre elas [23]. Para reagirem é necessário incorporar agentes de cura ou catalisadores para obter uma estrutura tridimensional estável e insolúvel. A resina epóxi é o resultado de uma reação de polimerização entre um bisfenol A e a Epicloridrina, utilizando como catalisador o hidróxido de sódio [23]. Dependendo da quantidade de bisfenol A, a cadeia pode aumentar linearmente, alterando as propriedades da resina, tais como a viscosidade, reatividade e flexibilidade. Na Figura 12 está esquematizada a cadeia molecular da resina epóxida.

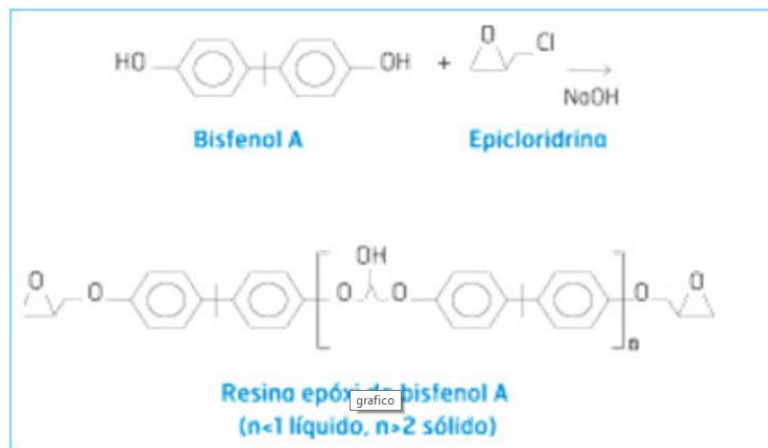


Figura 12 – Cadeia Molecular da resina epóxida [24].

A densidade de ligações cruzadas influencia diretamente a resistência química da resina, quanto maior a densidade maior será a resistência química devido à maior dificuldade de um produto agressivo penetrar na superfície. Assim, como a temperatura de transição vítrea e a resistência mecânica também aumentam com maiores densidades [24].

Se compararmos as propriedades de duas resinas termoendurecíveis mais utilizadas, nomeadamente as resinas epóxidas e poliéster, verificamos que a resina epóxida é mais cara que a resina poliéster [25], mas apresenta uma melhor resistência mecânica e à humidade, tem uma menor contração durante a cura, baixa absorção de água e uma maior faixa de temperatura de utilização. Na Tabela 4 são apresentadas algumas propriedades mecânicas de uma resina epóxida e de uma resina poliéster.

Tabela 4 – Propriedades de resinas utilizadas em materiais compósitos [25].

Resina	Módulo de Elasticidade à Tração [GPa]	Resistência à tração [MPa]	Extensão na Rotura (%)	Densidade [kg/m ³]
Poliéster	2,1-4,1	20-100	1,0-6,5	1000-1450
Epóxida	2,5-4,1	55-130	1,5-9,0	1100-1300

Quando as resinas epóxicas são utilizadas como matriz em compósitos com cargas, estas apresentam inúmeras vantagens, como uma baixa contração na cura, favorecendo a precisão dimensional na sua fabricação e evitar tensões residuais; a sua natureza polar permite uma boa adesão com vários tipos de cargas, ausência de produtos voláteis evitando a formação de bolhas no seu interior e apresenta uma estrutura reticulada, oferecendo uma excelente resistência em ambientes quimicamente agressivos. Apresentam alto módulo de elasticidade, boa compressão e baixa viscosidade, facilitando a moldação. Apresentam como principais desvantagens, uma baixa aderência nas paredes do molde em que são processadas e não podem ser recicladas dado que pertencem ao grupo das resinas termoendurecíveis.

2.1.6. Técnicas de Processamento Materiais Compósitos

Os diferentes processos de processamento podem ser classificados de processos de molde aberto e de molde fechado. No de molde aberto, apenas uma das superfícies apresenta um bom acabamento mas neste processo podemos obter peças mais complexas e de maiores dimensões devido à pressão exercida durante este processo ser muito reduzida ou praticamente inexistente. A emissão de produtos voláteis nocivos à saúde também é muito inferior quando comparado com processo de molde fechado, como o estireno presente nas resinas poliéster [26]. Os materiais obtidos através de processo de molde fechado apresentam excelentes acabamentos em ambas as superfícies e uma boa reprodutibilidade.

Atualmente existem inúmeras técnicas de processamento de materiais compósitos no mercado, que contribuiram para o crescente aumento e desenvolvimento dos materiais compósitos. As técnicas mais utilizadas e que serão descritas neste trabalho são a moldação manual e a moldação por transferência de resina (RTM) para os compósitos reforçados

com fibras curtas de vidro, e a mistura e vazamento a vácuo para os materiais compósitos reforçados com partículas.

2.1.6.1. Moldação Manual

A moldação manual dos materiais compósitos pode ser efetuada de diversas formas, das quais destacamos: moldação por contacto manual, moldação por projeção e moldação com pré-impregnados, quando se fala em materiais compósitos reforçados com fibras.

O processo de moldação por contacto manual ou hand lay-up é descrito da seguinte forma [27]): aplicação de uma camada de desmoldante no molde a usar, de seguida aplica-se a camada do material de reforço colada e depois a resina é vertida no molde. Estas duas últimas operações são repetidas o número de vezes necessário até obter a espessura pretendida da peça. Este processo é completado com um processo de compactação, realizado através da passagem de rolos ou escovas (Figura 13), de modo a forçar a resina a impregnar os tecidos e a retirar as bolhas de ar que se vão formando. A cura do material é feita sob as condições atmosféricas adequadas ao tipo de resina utilizada. Esta técnica de processamento é uma das mais simples e baratas sendo utilizada no fabrico de peças grandes e para pequenas quantidades e ainda usado como reforço as fibras.

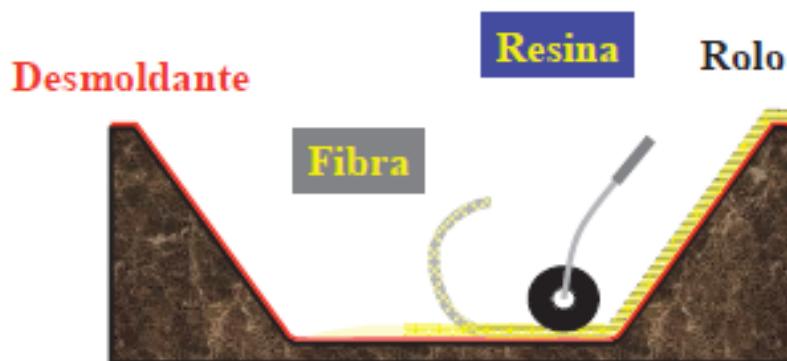


Figura 13 – Moldação por contacto manual [27].

A moldação manual por projeção, também conhecida por Spray-Up, é um processo muito semelhante ao processo anterior (Figura 13). Consiste na aplicação simultânea da resina e fibra sobre um molde, mas neste caso usando uma pistola de projeção de ar comprimido. O reforço, geralmente uma fibra, é alimentado em rolo, o qual é cortado nas dimensões pretendidas pela pistola [27]. A camada depositada sobre o molde é compactada através da passagem do rolo, de forma a remover o ar e assegurar a impregnação das fibras

de reforço. Nesta técnica também podem ser adicionadas várias camadas até obtenção da espessura pretendida (Figura 14).

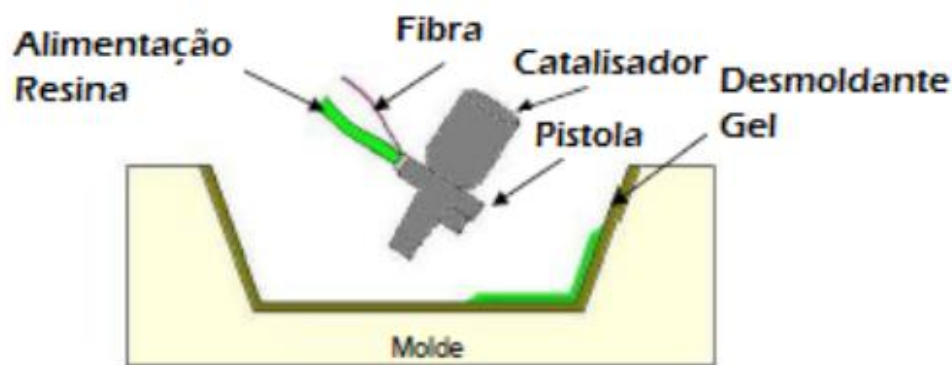


Figura 14 – Moldação por Spray Up [28].

A moldação por Spray Up apresenta uma maior produtividade e maior homogeneidade entre a matriz e material de reforço, quando comparado com a técnica de moldação por contacto.

Na técnica de moldação com pré-impregnados também é necessário a colocação desmoldante no molde e depois é aplicado o material pré-impregnado, ou seja a resina com o material de reforço já incorporado. A peça deverá ser submetida a vácuo, com o objetivo de reduzir a quantidade de ar presente no material e ajuda a resina a penetrar uniformemente as fibras. A cura do material deverá ser efetuada à temperatura ambiente ou numa estufa, dependendo das características do material usado. Este tipo de técnica, em comparação com as anteriores apresenta algumas vantagens como obtenção de peças com maior homogeneidade e com menor quantidade de imperfeições, como poros, apesar de ser mais exigente com mão-de-obra e na dificuldade de aplicar vácuo em peças complexas [27].

2.1.6.2. Moldação por Transferência de Resina (RTM)

Neste processo (Figura 15) o reforço é colocado na parte inferior do molde, este é fechado, injeta-se a resina sob pressão para o interior da cavidade. A resina impregna o reforço e após a cura forma o material compósito. A cura do material pode ser efetuada à temperatura ambiente ou pode ser acelerada, através do aquecimento do molde. Após a cura da peça, esta é retirada do molde. Este processo tem sido muito desenvolvido nos últimos anos através da utilização e aplicação de outro tipo de tecnologias, como a

utilização de um sistema de cura por ultravioleta que permite aumentar, substancialmente, a taxa de produção.

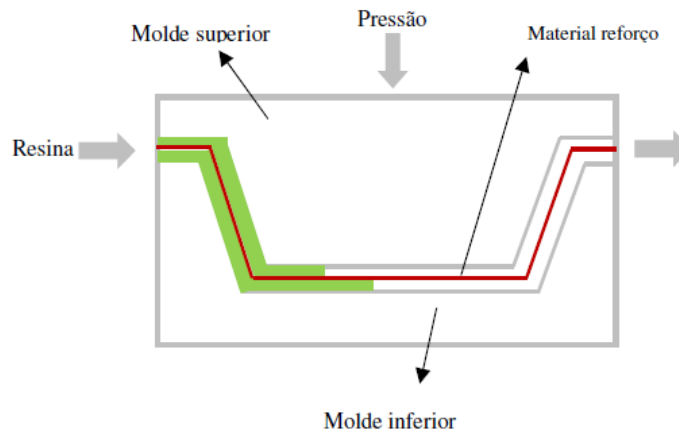


Figura 15 – Representação do processo de moldação por RTM [29].

Esta técnica de processamento permite obter um acabamento em ambas as superfícies do molde, apresentar peças com baixa porosidade, produção de peças com uma espessura uniforme (0,5mm a 9mm) e pode obter-se formas mais complexas quando comparando com outros processos. Por outro lado, apresenta como desvantagens, como o elevado custo do investimento, dificuldade em prever o fluxo de enchimento e a necessidade de bastante mão-de-obra [29].

Existe uma variante no processo de RTM, que recorre à utilização de vácuo após a injeção da resina, designando-se por VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer). Com este processo pretende-se que a resina impregne mais facilmente o reforço, minimizando a formação de porosidades no material.

2.1.6.3. Mistura e Vazamento a Vácuo

A mistura e vazamento a vácuo é o processo mais utilizado no processamento dos materiais compósitos reforçados com partículas, podendo também ser adicionado fibras à matriz. Esta técnica de processamento não requer equipamentos dispendiosos, quando comparados com outros processos, mas necessita de muita mão-de-obra, o que pode dificultar o processamento dos materiais e encarecer o processo. Este processo é utilizado para a produção de estruturas de pequenas ou grandes dimensões, em pequenas séries, onde o vácuo é o elemento fundamental do processo. Para isso é necessário a utilização de uma bomba de vácuo, que dependendo da dimensão da estrutura ou peças deverá ser de pequena ou grande dimensão. A mistura das partículas com o material da matriz deverá ser

realizada de forma manual ou semiautomática (misturadora), na presença de vácuo. De seguida, ocorre o vazamento no molde (que deverá ser revestido com desmoldante para extrair melhor a peça) e a cura do material deverá ser efetuada na presença de vácuo. O vácuo é utilizado neste processo por duas razões, para garantir uma boa compactação entre os materiais usados na matriz e reforço e para assegurar que todos os espaços vazios entre a matriz e as partículas (e/ou fibras) são preenchidos. O processo apresenta como vantagens a rapidez de processamento, facilidade de preparação e manuseamento dos materiais.

2.2. Propriedades Mecânicas de Compósitos de Matriz Polimérica com Reforço de Partículas

As propriedades mecânicas compreendem várias propriedades que representam a resposta do material às influências mecânicas externas, podendo estas ser do tipo tensão ou deformação, podendo provocar alterações reversíveis ou irreversíveis. No caso dos polímeros, a natureza da resposta a estas influências depende da estrutura química, da temperatura, do tempo e do histórico de processamento [30].

Um material compósito é, como já foi dito, formado pelo menos por duas fases, uma primeira com a função de matriz, e uma segunda, imergente da primeira, sob a forma de fibras de elevada resistência ou sob outras formas sobretudo partículas de enchimento. A matriz de um material compósito pode ser formada por resinas, metais ou materiais cerâmicos podendo as suas fibras ser de simples filamentos, de espessura variável, mais ou menos finos ou de monocristais no estado filamentosos (whiskers).

Para se conseguir obter materiais com características específicas, tais como, aumento da rigidez, redução do coeficiente de expansão térmica, melhoria de resistência à fluência e melhoria da tenacidade à fratura, opta-se por adicionar partículas rígidas a polímeros ou a outro tipo de matrizes. Estes efeitos provêm de uma ação complexa entre as propriedades dos materiais: resina, material de enchimento e região interfacial [31].

Os parâmetros a ter em consideração no desenvolvimento e fabrico de materiais compósitos, tais como, fração volúmica ou mássica, tamanho das partículas de enchimento, forma, alongamento e distribuição das partículas de reforço na matriz polimérica podem

afetar as propriedades mecânicas do compósito. É importante, também, considerar o grau de orientação, no caso de partículas não esféricas, relativamente à tensão aplicada. A adição de cargas cerâmicas a matrizes poliméricas permite reduzir custos de produção e poder deste modo materiais com diferentes combinações de propriedades. Quando se modifica a interface entre as partículas e a matriz polimérica, é importante conseguir uma boa dispersão de carga e ter em atenção a influência do tratamento superficial das partículas de carga, pois, poderemos estar a modificar propriedades do conjunto.

2.2.1. Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão é mais utilizado em materiais frágeis, dado permitir determinar a tensão de flecha de rutura, para além de permitir avaliar outras propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade à flexão. A grande vantagem deste ensaio, reside no facto de se poder utilizar provetes mais fáceis de maquinar que os provetes utilizados no ensaio de tração. No entanto, para materiais muito frágeis, os resultados obtidos apresentam uma grande dispersão de valores (até 25%), de modo que, nestes casos devem ser realizados diversos ensaios de forma a estabelecer um valor médio com maior exatidão.

A técnica deste ensaio consiste em apoiar o provete em dois apoios distanciados de um comprimento L (sendo este tipo de montagem muito semelhante ao ensaio de dobragem), sendo posteriormente aplicada uma força de flexão. Neste tipo de ensaio são colocados extensómetros na zona sujeita à tração, ou seja, na zona inferior do provete, para medir a deformação. A Figura 16 ilustra um ensaio de flexão em três pontos, de uma viga simplesmente apoiada [32].

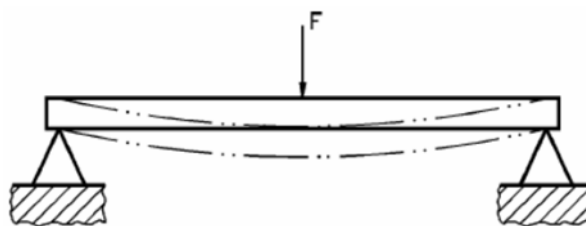


Figura 16 – Esquema de flexão de uma viga simplesmente apoiada [32]

Os resultados dos ensaios de flexão são afetados, sobretudo em materiais frágeis, por vários fatores tais como: velocidade de aplicação da força de ensaio; a distância entre apoios; dimensão transversal do provete. Em provetes com a mesma secção e dimensão, quanto menor for a distância entre apoios, mais elevado é o módulo de rutura obtido, quanto maior a velocidade de aplicação da força, mais elevada é a resistência à flexão [30].

2.2.2. Ensaio de Compressão

É a aplicação de carga compressiva uniaxial em um provete. A deformação linear obtida pela medida da distância entre as placas que comprimem o corpo versus a carga de compressão consiste na resposta desse tipo de ensaio, basicamente utilizado nas indústrias de construção civil e de materiais cerâmicos. Além disso, fornece resultados da análise estatística, permitindo quantificar o comportamento mecânico do concreto, da madeira, dos compósitos e de materiais de baixa ductilidade (frágeis). Na indústria de conformação, o ensaio de compressão é utilizado para parametrizar condições de processos que envolvam laminação, forjamento, extrusão e semelhantes. Os resultados numéricos obtidos no ensaio de compressão são similares aos obtidos no ensaio de tração. Os resultados de ensaio são influenciados pelas mesmas variáveis do ensaio de tração (temperatura, velocidade de deformação, anisotropia do material, tamanho do grão, percentagem de impurezas e condições ambientais) [32].

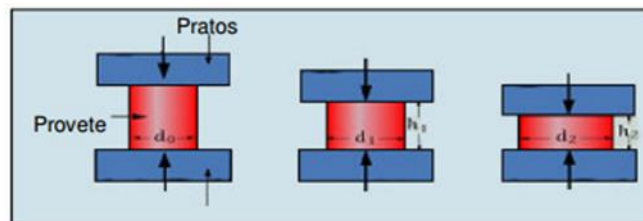


Figura 17 – Ensaio de compressão de um provete entre pratos planos [34]

2.2.3. Ensaio de Tenacidade À Fratura

A tenacidade define a aptidão do material para absorver energia no domínio plástico até à rutura. O valor da tenacidade varia com alguns fatores que influenciam a energia de fratura, como seja: as condições de tensão; a geometria do material; e a velocidade de aplicação da carga. A fratura de um material submetido a solicitações estáticas ou monotonamente aplicadas pode ser frágil ou dúctil.

A fratura frágil é caracterizada pela libertação, num pequeno intervalo de tempo, de uma elevada quantidade de energia de deformação, que faz progredir a grande velocidade uma fenda existente no material. Na fratura frágil, a deformação plástica é reduzida, o que não permite, por exemplo, que, numa estrutura, certos elementos suportem um certo grau de plastificação antes da rutura. Portanto a fratura frágil é, de um modo geral, catastrófica,

visto que a resistência residual existente numa estrutura em processo de fratura frágil é bastante baixa [32].

No caso da fratura dúctil, esta caracteriza-se pela elevada deformação plástica antes da ocorrência de fratura. A elevada deformação plástica, traduz-se numa elevada quantidade de energia absorvida pelo material antes da ocorrência de fratura.

Os mecanismos de fratura estão relacionados com os planos cristalográficos, e designam-se por corte e clivagem. O mecanismo de corte é provocado pelo escorregamento de certos planos cristalográficos (em especial aqueles em que a tensão de corte é máxima), correspondendo a uma quantidade apreciável de deformação plástica local, como acontece na fratura dúctil. A clivagem verifica-se em planos cristalográficos diferentes, sendo provocada por uma tensão normal de tração envolvendo pouca deformação plástica localizada (fratura frágil) [34].

Sob o ponto da morfologia da fratura, uma peça que fraturou por corte apresenta um aspeto fibroso, enquanto uma peça que fraturou por clivagem, revela uma superfície de fratura brilhante e regular.

2.3. Propriedades Físicas de Compósitos de Matriz Polimérica com Reforço de Partículas

2.3.1. Propriedades Térmicas

Transferência de calor é a ciência que estuda as transferências de energia entre corpos materiais causadas por diferenças de temperatura. A termodinâmica ensina que esta energia transferida é definida como calor. O objetivo da transferência de calor não é meramente explicar como esta energia pode ser transferida, mas também avaliar as taxas em que esta interação ocorre sob certas condições especificadas. A termodinâmica trata de sistemas em equilíbrio; pode ser utilizada para calcular a quantidade de energia necessária para que um sistema passe de um estado de equilíbrio estável a outro, porém não pode prever a rapidez com que esta mudança irá ocorrer, pois o sistema não está em equilíbrio durante este processo. A transferência de calor suplementa o primeiro e o segundo princípio da termodinâmica, fornecendo regras experimentais adicionais que podem ser empregadas para estabelecer as taxas de transferência de energia. Como na ciência da

termodinâmica, as regras experimentais usadas como base da transferência de calor são simples e podem ser desenvolvidas para englobar diversas situações práticas [35].

2.3.1.1. Transferência de Calor por Condução

Quando existe um gradiente de temperatura num corpo, a experiência mostra que ocorre uma transferência de energia da região de alta temperatura para a região de baixa temperatura. Diz-se que a energia é transferida por condução e que a taxa de transferência de calor por unidade de área é proporcional ao gradiente normal de temperatura

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}$$

Quando a constante de proporcionalidade é inserida,

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

onde q é a taxa de transferência de calor e $\partial T/\partial x$ é o gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor. A constante positiva k é chamada condutividade térmica do material, sendo o sinal de menos inserido para satisfazer o segundo princípio da termodinâmica, ou seja, o calor deve fluir no sentido da temperatura decrescente, como indicado no sistema de coordenadas da Figura 18 [35].

A Equação (1) é chamada de lei de Fourier da condução de calor, em homenagem ao físico-matemático francês Joseph Fourier que trouxe contribuições significativas ao tratamento analítico da transferência de calor por condução. É importante observar que a Equação (1) é a equação de definição da condutividade térmica e que k tem unidade de watt por metro por grau Celsius num sistema de unidades onde o fluxo de calor é expresso em watts.

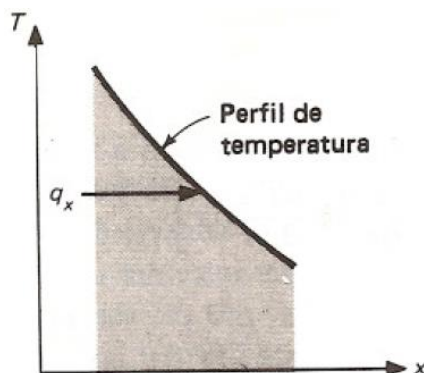


Figura 18 – Esquema que mostra a direção do fluxo de calor [35].

2.3.1.2. Transferência de Calor por Convecção

É sabido que uma placa de metal aquecida irá arrefecer mais rapidamente quando colocada em frente a um ventilador, do que quando exposta ao ar parado. Este processo é chamado de transferência de calor por convecção. O termo convecção fornece uma noção intuitiva em relação ao processo de transferência de calor; entretanto, esta noção intuitiva deve ser ampliada para que se possa conseguir um tratamento analítico adequado do problema. Por exemplo, sabemos que a velocidade do ar sobre a placa aquecida influencia a taxa de transferência de calor [35].

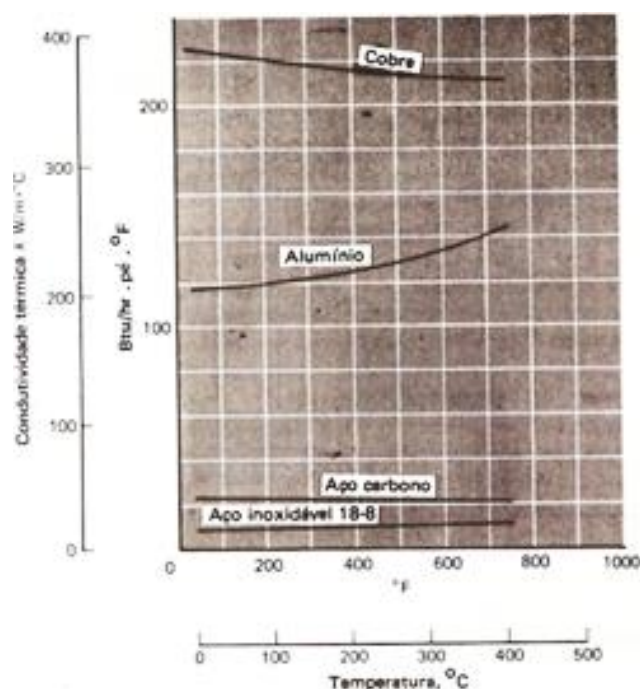


Figura 19 – Condutividades térmicas de alguns sólidos típicos [35].

Considere a placa aquecida mostrada na Figura 20, a temperatura da placa é T_p e a temperatura do fluido é T_∞ . Nesta figura está representado o comportamento da velocidade do escoamento, que se reduz a zero na superfície da placa como resultado da ação viscosa. Como a velocidade da camada de fluido junto à parede é zero, o calor deve ser transferido somente por condução neste ponto. Assim, devemos calcular o calor transferido, usando a Equação (1), com a condutividade térmica do fluido e o gradiente de temperatura junto à parede. Portanto, o gradiente de temperatura junto à parede depende do campo de velocidade. Deve ser lembrado que o mecanismo de transferência de calor na parede é um processo de condução [35].

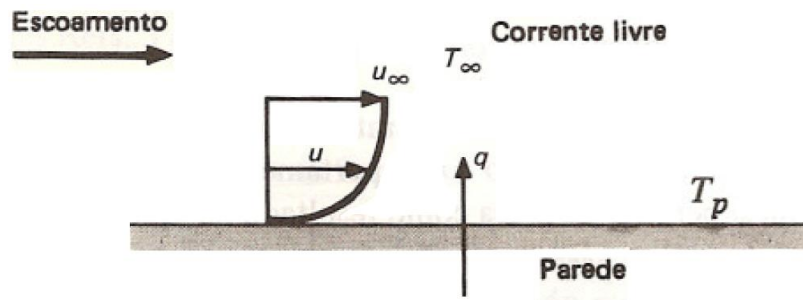


Figura 20 – Transferência de calor por convecção de uma placa [35].

O efeito global da convecção pode ser expresso através da lei de Newton do arrefecimento.

$$q = hA (T_p - T_\infty) \quad (2)$$

Aqui a taxa de transferência de calor é relacionada à diferença de temperatura entre a parede e o fluido e à área superficial A . A quantidade h chamada de coeficiente de transferência de calor por convecção, e a equação (2) é a equação de definição deste parâmetro: Para alguns sistemas é possível o cálculo analítico de h . Para situações complexas a determinação é experimental. O coeficiente de transferência de calor é algumas vezes chamado de condutância de película devido à sua relação com o processo de condução na fina camada de fluido estacionário junto à superfície da parede. Pela equação (2) a unidade de h é watt por metro quadrado por grau Celsius, quando o fluxo de calor está em watt [35].

Em vista desta discussão, pode-se antecipar que a transferência de calor por convecção irá exibir uma dependência da viscosidade do fluido além da sua dependência das propriedades térmicas do fluido (condutividade térmica, calor específico, densidade). Isto é esperado porque a viscosidade influencia o perfil de velocidade e, portanto, a taxa de transferência de energia na região junto à parede [35].

Se uma placa aquecida estiver exposta ao ar ambiente sem uma fonte externa de movimentação do fluido, o movimento do ar será devido aos gradientes de densidade nas proximidades da placa. Esta convecção é chamada natural ou livre em oposição à convecção forçada, que ocorre no caso de se ter um ventilador movimentando o ar sobre a placa. Os fenômenos de ebulição e condensação são também agrupados dentro deste assunto de transferência de calor por convecção [35].

2.3.1.3. Transferência de Calor por Radiação

Em contraste com os mecanismos de condução e convecção, onde a energia é transferida através de um meio natural, o calor pode também ser transferido em regiões onde existe o vácuo perfeito. O mecanismo neste caso é a radiação eletromagnética que é propagada como resultado de uma diferença de temperatura; trata-se da radiação térmica [35].

Considerações termodinâmicas mostram que um radiador ideal, ou corpo negro, emite energia numa taxa proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo. Quando dois corpos trocam calor por radiação, a troca líquida de calor é proporcional à diferença em T^4 . Assim,

$$q = \sigma A (T_1^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

onde σ é a constante de proporcionalidade chamada de constante de Stefan-Boltzmann que vale $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. A equação (3) é chamada de lei de Stefan-Boltzmann da radiação térmica e vale somente para corpos negros. É importante observar que esta equação é válida somente para radiação térmica; outros tipos de radiação eletromagnética podem não ser tratados com esta simplicidade [35].

Foi mencionado que um corpo negro é um corpo que emite energia de acordo com a lei T^4 . Tal corpo é denominado negro porque superfícies negras, como um pedaço de metal coberto por negro de fumo, se aproximam deste tipo de comportamento. Outros tipos de superfícies, como uma superfície pintada ou uma placa metálica polida, não emitem tanta energia, quanto o corpo negro; entretanto, a radiação total emitida por estes corpos ainda é proporcional a T^4 . Para levar em consideração a natureza "cinzenta" destas superfícies é introduzido um outro fator na equação (3), a emissividade ϵ , que relaciona a radiação de uma superfície "cinzenta" com a de uma superfície negra ideal. Além disso, devemos levar em conta que nem toda a radiação que deixa uma superfície atinge outra superfície, uma vez que a radiação eletromagnética se propaga segundo linhas retas havendo perdas para o ambiente. Portanto, para considerar estas duas situações, são introduzidos dois novos fatores na equação (3)

$$q = F_\epsilon F_G \sigma A (T_1^4 - T_\infty^4) \quad (4)$$

onde F_ϵ é a função emissividade e F_G é a função "fator de forma" geométrico. A determinação da forma destas funções para configurações específicas é objeto de um

capítulo subsequente. Entretanto, é importante alertar para o fato destas funções em geral não serem independentes uma da outra como indicado na equação (4) [35].

O fenômeno da transferência de calor por radiação pode ser muito complexo e os cálculos raramente são simples como indicado pela equação (4). No momento, interessamos somente enfatizar as diferenças entre o mecanismo físico da transferência de calor pela radiação e os sistemas de condução e convecção [35].

2.3.2. Propriedades Acústicas

As ondas sonoras propagam-se com diversas frequências, contudo o ouvido humano apenas é sensível a ondas com frequência entre 20 Hz e 20 000 Hz, aproximadamente. A Figura 21 ilustra os sons sensíveis ao ouvido humano.

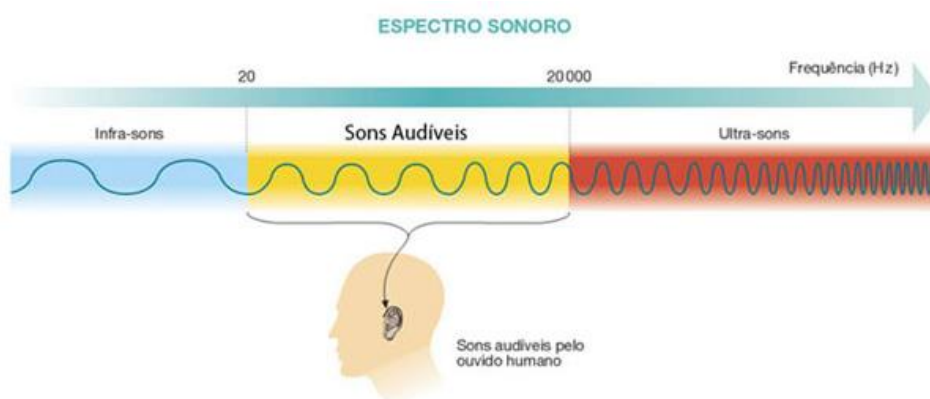


Figura 21 – Sons sensíveis ao ouvido humano [36].

A maioria dos sons chega ao ouvido transmitida pelo ar, que age como meio de transmissão. Nas pequenas altitudes, os sons são bem audíveis, o que não ocorre em altitudes maiores, onde o ar é menos denso. O ar denso é melhor transmissor do som que o ar rarefeito, pois as moléculas gasosas estão mais próximas e transmitem a energia cinética da onda de umas para outras com maior facilidade. Os sons não se transmitem no vácuo, porque exigem um meio material para sua propagação. De uma maneira geral, os sólidos transmitem o som melhor que os líquidos, e estes, melhor do que os gases. A tabela 5 ilustra a velocidade de propagação do som em diferentes materiais.

Tabela 5 – Velocidade de propagação do som a 25°C em diferentes materiais [36].

Meio	Velocidade (m/s)
Ar	340
Água	1498
Ferro	5200
Vidro	4540

A energia elementar de um som é conhecida como o seu nível de pressão de som, sendo medida em decibéis (dB). O valor de 1 dB corresponde à menor alteração do nível de som que normalmente pode ser detetada pelo ouvido humano. Para a generalidade das pessoas, um nível de 10 dB representa o limiar da audição e 120 dB o limiar da dor.



Figura 22 – Nível sonoro em dB de sons comuns [36].

3. Materiais e Procedimentos Experimentais

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados no processamento dos materiais compósitos, técnicas de processamento utilizadas, bem como equipamento e normas de ensaio utilizadas nos ensaios de densidade, ensaios de flexão em três pontos, ensaios de compressão e ensaios de tenacidade à fratura.

São também apresentados os procedimentos utilizados nos ensaios de avaliação térmica e acústica.

3.1. Materiais (Matriz e Cargas)

Resina Epóxida SR1500

A resina epóxida utilizada tem a designação comercial EPOXY SR1500 da SICOMIN *Epoxy Systems*, juntamente com o seu endurecedor SD2503 do mesmo fabricante (Tabela 6 e 7). Esta é uma resina de média viscosidade utilizada em diversas aplicações nas quais o processo de fabrico utilizado seja, por exemplo, a deposição manual. Apesar de ser um sistema de viscosidade média, este oferece uma boa impregnação.

Tabela 6 – Especificações da resina epóxida SR1500 e endurecedor SD2505 [37]

Propriedades	SR1500	SD2505
Densidade a 20°C	1.13 g/cm ³	1.0 g/cm ³
Aspetto	Líquido	Líquido
Viscosidade a 20°C	2100 cps	280 cps
Relação da mistura	100 g	33 g
Relação da mistura	100 cm ³	37 cm ³

Tabela 7 – Especificações da mistura da resina [37]

Densidade a 20°C	1.09 g/cm ³
Aspetto	Líquido
Viscosidade a 20°C	1700 MPa
Pico de exotérmico 100g a 20°C	215 °C
Tempo de gel em filme a 20°C (500 microns)	43 min
Polimerização total a 20°C	14 dias a 20°C

Partículas de Argila Expandida

As partículas de argila expandida foram disponibilizadas pela empresa WEBER especializada em produção de argamassas industriais, com sede em Aveiro. Estas partículas são provenientes da produção de argila expandida, sendo que as granulometrias de menor dimensão não têm campo de aplicação em grande escala, tornando-se um resíduo que pode ser considerado no fabrico de com estes materiais de reforço. A empresa contém a ficha técnica do material em questão, mas nas granulometrias usadas para efeitos comerciais. De modo a caracterizar as suas principais propriedades nas granulometrias pretendidas, foram utilizados equipamentos dos laboratórios do DEM e DEC da ESTG. As principais propriedades, granulometria, densidade aparente, densidade real, encontram-se na tabela 8.

Tabela 8 – Características físicas das partículas de argila expandida utilizadas no processamento dos materiais compósitos [adaptado de 38].

Produtos	Ø= 0.7mm	Ø=1.9mm	Ø=2.6mm
Classes granulométricas reais (mm)	0,0 – 1,4	1,4 – 2,4	2,4 – 2,8
Massa volúmica aparente seca (g/cm ³)	0,763	0,504	0,498
Massa volúmica real (g/cm ³)	1,6	1,4	1,2
Resistência ao fogo	Euroclasse A		
Variações ponderais em ambiente seco/húmido	Material pouco higroscópico		
pH	9 – 10		

Nos próximos subcapítulos, os procedimentos e equipamentos utilizados para determinar as propriedades acima indicadas serão apresentados.

Fibras Curtas de Vidro

As fibras curtas utilizadas no reforço dos compósitos de matriz epóxida com partículas de argila expandida são do tipo E. As fibras são disponibilizadas pela escola (ESTG-Leiria) bem como a sua ficha técnica. As suas principais características são descritas na Tabela 9.

Tabela 9 – Principais características das fibras curtas de Vidro, tipo E

Característica	Propriedades
Densidade	2,55 g/cm ³
Comprimento	3mm
Diâmetro das fibras	8-10 µm

3.1.1. Granulometria

As partículas de argila expandida disponibilizadas pela empresa WEBER são constituídas por granulometrias muito diversas, desde partículas muito grosseiras até às mais finas. Deste modo utilizou-se o Laboratório do DEC da ESTG para obter as diferentes granulometrias pretendidas.

As várias frações granulometrias foram separadas simultaneamente num vibrador mecânico, com os peneiros dispostos em coluna, os de malha maior em cima e os de malha mais pequena em baixo (Figura 23). Nas análises granulométricas das partículas os resultados são expressos sob a forma de escalas de tamanhos de grão (diâmetro, área ou volume do grão).

De acordo com o seu diâmetro, as partículas foram classificadas em três frações granulométricas, segundo as designações apresentadas na Tabela 8.

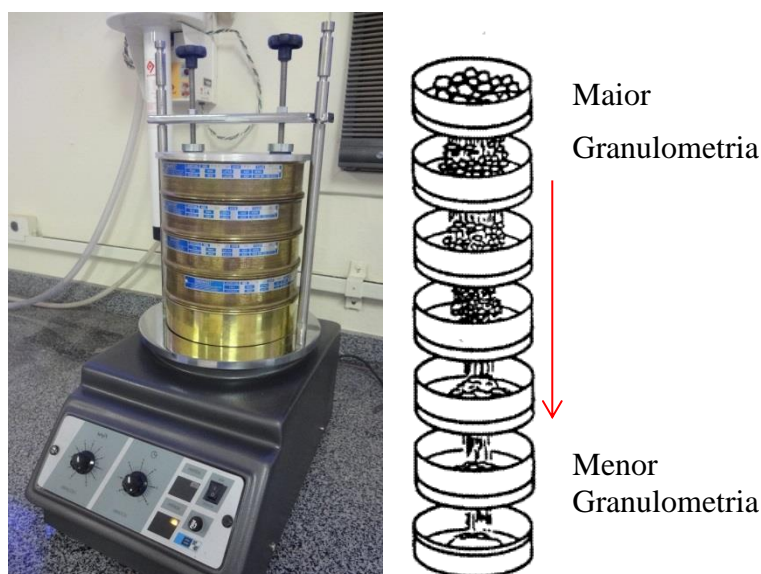


Figura 23 – Esquema de separação por peneiros, com a utilização de vibrador mecânico

3.1.2. Densidade Aparente

Na obtenção da densidade aparente temos de considerar o espaço ente os grãos das partículas, sendo determinada de acordo com os seguintes passos:

- Colocação de um gobelé na balança e desconto da sua tara;
- Colocação de uma determinada massa de partículas;
- Medição da massa (m), através da balança analítica;
- Medição do volume (V), através da escala de um gobelé.



Figura 24 – Método para obter a densidade aparente. a) Medição da massa; b) Medição do volume.

Terminados os passos anteriores, e sabendo que a densidade é dada pela equação 5, foi possível calcular a densidade aparente.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5)$$

em que:

ρ é a Densidade [kg/m^3]

m é a Massa das partículas [Kg]

V é o Volume das partículas [m^3]

3.1.3. Densidade Real

Na obtenção da densidade real não se considera o espaço ente os grãos de partículas, sendo determinada de acordo com o esquematizado na Figura 25 e de acordo com os seguintes passos:

- Colocação de um gobelé na balança e desconto da sua tara;
- Colocação de uma determinada massa de partículas;
- Medição da massa (m_1), através da balança analítica;
- Medição do volume (V_1) através da escala do gobelé.
- Repetição dos passos anteriores, mas com água destilada, obtendo-se o volume (V_2);
- Mistura da matéria-prima com a água;
- Submeter a mistura a vácuo, para garantir que não há bolhas de ar;
- Medir o volume total (V_{total}) da mistura através da escala do gobelé;

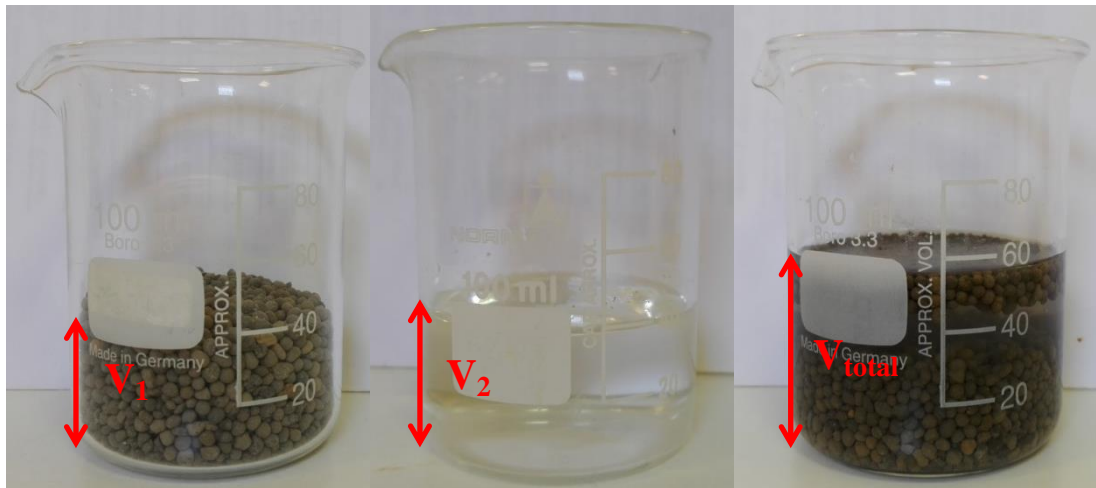


Figura 25 – Representação esquemática para obter a densidade real

Este método usa a água destilada para ocupar os espaços livres entre as partículas da matéria-prima, fazendo com que o volume da mistura seja inferior à soma dos volumes em separado. Desta forma, o volume ocupado pelas partículas é igual ao volume total, menos o volume da água destilada.

Adaptando a equação 5 a este método, obtemos a equação 6:

$$\rho = \frac{m_1}{V_{total} - V_2} \quad (6)$$

em que:

ρ é a Densidade [kg/m^3]

m_1 é a Massa das partículas [Kg]

V_1 é o Volume das partículas [m^3]

V_2 é o Volume da água destilada [m^3]

V_{total} é o Volume total (partículas + água destilada) [m^3]

3.2. Metodologia de Processamento

Como referido no subcapítulo 2.1.6, existem inúmeras formas de processar os materiais compósitos, desde técnicas manuais às mais automatizadas. Neste presente trabalho foi utilizada a técnica de processamento, mistura e vazamento em vácuo.

O processamento dos diferentes materiais foi obtido com recurso a vários equipamentos laboratoriais de onde se destacam: balança digital para pesagem dos diferentes materiais, a câmara de vácuo para desgaseificação da mistura, máquina de cortar provetes e a polidora mecânica.

Foram processadas vinte e uma placas de material compósito (Tabelas 10 a 13) de matriz epóxida com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida e respetivas granulometrias (subcapítulo 3.1.1). Nas três granulometrias foi tido em conta a fração de empacotamento de cada uma, sendo que com o aumento da granulometria diminui a fração mássica disponível. Os compósitos de matriz polimérica de partículas de argila expandida (granulometria $\varnothing=0.7\text{mm}$) com as frações mássicas de 32, 36 e 40% (Tabela 13) foram ainda reforçados com diferentes frações mássicas de fibras curtas de vidro ($W_f=1$ e $W_f=3\%$).

Tabela 10 – Tipos de materiais compósitos moldados com partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)

Amostra	Resina	Percentagem de Partículas de Argila Expandida $\varnothing=0.7\text{mm}$ [Fração mássica %]
SR1500 + 0% Argex	EPOXY SR1500	0
SR1500 + 24% Argex	EPOXY SR1500	24
SR1500 + 28% Argex	EPOXY SR1500	28
SR1500 + 32% Argex	EPOXY SR1500	32
SR1500 + 36% Argex	EPOXY SR1500	36
SR1500 + 40% Argex	EPOXY SR1500	40

Tabela 11 – Tipos de materiais compósitos moldados com partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)

Amostra	Resina	Percentagem de Argila Expandida $\varnothing=1,9\text{mm}$ [Fração mássica %]
SR1500 + 24%Argex	EPOXY SR1500	24
SR1500 + 28%Argex	EPOXY SR1500	28
SR1500 + 32%Argex	EPOXY SR1500	32
SR1500 + 36%Argex	EPOXY SR1500	36

Tabela 12 – Tipos de materiais compósitos moldados com partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)

Amostra	Resina	Percentagem de Argila Expandida $\varnothing=2,6\text{mm}$ [Fração mássica %]
SR1500 + 24%Argex	EPOXY SR1500	24
SR1500 + 28%Argex	EPOXY SR1500	28
SR1500 + 32%Argex	EPOXY SR1500	32

Tabela 13 – Tipos de materiais compósitos moldados com partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro

Amostra	Resina	Percentagem de Argila Expandida $\varnothing=0,7\text{mm}$ [Fração mássica %]	Percentagem de Fibras de Vidro [Fração mássica %]
SR1500 + 0%Argex+1%Fv	EPOXY SR1500	0	1
SR1500 + 32%Argex+1%Fv	EPOXY SR1500	32	1
SR1500 + 36%Argex+1%Fv	EPOXY SR1500	36	1
SR1500 + 40%Argex+1%Fv	EPOXY SR1500	40	1
SR1500 + 0%Argex+3%Fv	EPOXY SR1500	0	3
SR1500 + 32%Argex+3%Fv	EPOXY SR1500	32	3
SR1500 + 36%Argex+3%Fv	EPOXY SR1500	36	3
SR1500 + 40%Argex+3%Fv	EPOXY SR1500	40	3

O processamento dos materiais compósitos foi efetuado da seguinte forma:

1ªEtapa: Foi utilizada um molde em alumínio para colocação dos materiais após a sua mistura em vácuo (Figura 26). Foi necessário, limpar a superfície moldante e aplicar duas camadas de desmoldante (Álcool polivinílico), para posterior extração das diferentes placas processadas no molde.

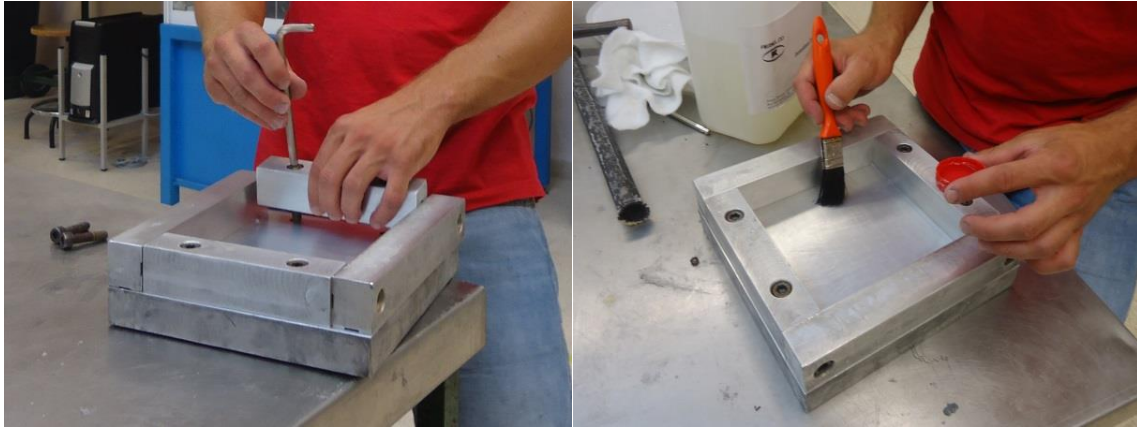


Figura 26 – Molde utilizado, montagem e aplicação de desmoldante.

2ªEtapa: De acordo com as granulometrias escolhidas para este estudo (Tabelas 10 a 13) procedeu-se à pesagem da resina e das partículas de argila expandida (Figura 27).

No caso dos materiais compósitos com partículas de argila expandida e fibras curtas de vidro, a proporção de fibras de vidro usadas foi em relação ao peso final do composto (resina + endurecedor + partículas de argila expandida).



Figura 27 – Pesagem das partículas de argila expandida e resina epóxida.

3ªEtapa: Com as várias frações em peso da resina, endurecedor, partículas de argila expandida e fibras curtas de vidro, procedeu-se à mistura manual dos vários materiais, até se obter uma mistura homogeneizada (Figura 28).



Figura 28 – Mistura homogeneizada de resina, endurecedor, partículas de argila expandida e fibras curtas de vidro.

4ªEtapa: A mistura obtida foi levada ao vácuo até retirar o ar existente na mesma (Figura 29).



Figura 29 – Camara de vácuo utilizada no processamento dos materiais compósitos (marca HEK)

5ªEtapa: Após a degaseificação da mistura, a mesma foi transferida para o molde em alumínio. Depois do ciclo de cura de 24 horas à temperatura ambiente o material compósito foi retirado do molde (Figura 30).



Figura 30 – Desmoldação da placa processada.

6ª Etapa: A pós-cura do material processado foi realizada durante 8 horas a 60°C, recorrendo para tal a uma estufa da marca MCP HEK (Figura 31).



Figura 31 – Estufa utilizada (à esquerda); Pós-cura do material (à direita)

6ª Etapa: Por fim as placas de material compósito foram cortadas por uma máquina concebida para o corte de provetes, sendo depois retificados na polidora mecânica (Figura 32).



Figura 32 – Máquina de Corte de Provetes e Polidora Mecânica

3.3. Caracterização Física

Para avaliar as propriedades térmicas e acústicas foi utilizado um equipamento desenvolvido para o efeito. Este equipamento é constituído por uma caixa em madeira, com uma espessura significativa de material isolante. As placas em material compósito com diferentes frações mássicas e granulometria de partículas de argila expandida foram fixas na parte frontal da caixa. A fonte térmica e a fonte de ruído foram colocadas no

interior da caixa para cada tipo de ensaio. Após a avaliação do desempenho acústico e térmico foi efetuado o corte dos provetes de acordo com os diversos ensaios mecânicos. Por fim foi avaliada a densidade dos materiais processados.

3.3.1. Ensaio Térmico

O ensaio de condutividade térmica foi realizado no aparelho FLUKE Ti45 (Tabela 14) segundo o método descrito nas normas ASTM C-518-91 e NE 1530-93, permitindo determinar a condutividade térmica de uma placa, para um fluxo de calor entre o interior da caixa e o seu exterior.

De modo a avaliar as propriedades de isolamento térmico foi colocada no interior da caixa uma fonte de calor. A uma distância de cerca de 1 m, da face das amostras foram registadas as temperaturas na face exterior dos materiais. Este registo foi realizado até estabilizar os fluxos de calor gerados no interior da caixa.

A medição do coeficiente de condutividade térmica foi efetuada numa sala fechada, tendo sido utilizado o equipamento a seguir indicado para obter os dados necessários para o cálculo da condutividade térmica (Figura 33):

- Caixa com isolamento térmico;
- Lâmpada incandescente de 46W (fonte de calor);
- Multímetro com termopar (registo de temperaturas interiores da caixa);
- Câmara de Infravermelhos Portátil (registo de temperaturas exteriores da placa em estudo);
- Termómetro (registo da temperatura ambiente).

Tabela 14 – Características da câmara de Infravermelhos Portátil utilizada nos ensaios de avaliação do comportamento térmico dos materiais processados [39].

Equipamento	Câmara de Infravermelhos Portátil
Marca/Modelo	FLUKE/Ti45 IR FlexCam Thermal Imagens
Taxa de atualização	30Hz
Banda espectral	8µm a 14µm
Sensibilidade térmica	< 0,08°C a 30°C
Zoom eletrónico	2x
Faixas de temperaturas calibradas	Faixa 1 = -20°C a 100°C
	Faixa 2 = -20°C a 350°C
	Faixa 3 = 250°C a 600°C
	Faixa 4 = 500°C a 1200°C
Precisão	± 2°C ou 2%, valendo o que for mais alto

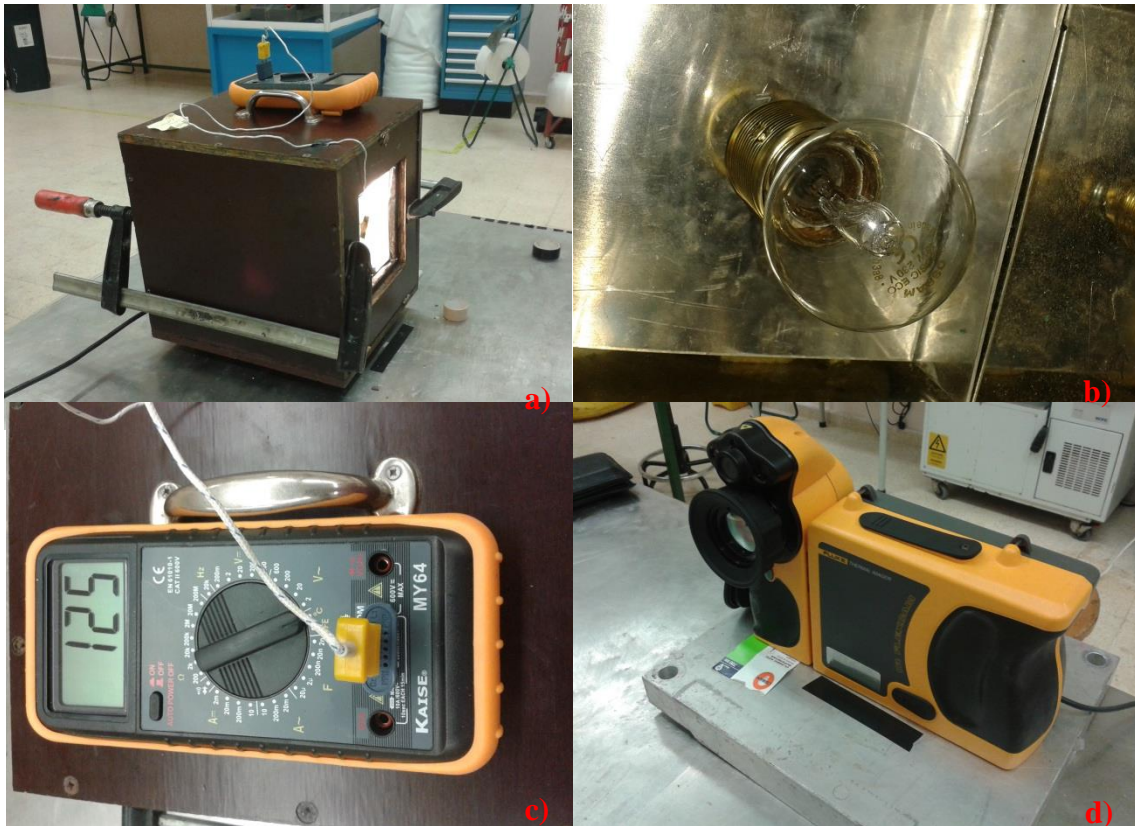


Figura 33 – Equipamento usado para medir o coeficiente de condutividade térmica a) Caixa isolada, b) Lâmpada 46W, c) Multímetro com termopar do tipo k, d) Câmara de infravermelhos

Na figura 34 pode visualizar-se o sistema em funcionamento. O sistema de montagem do equipamento consiste em colocar o termopar do tipo k na face interior da placa a ser testada, seguindo-se o seu posicionamento na zona específica da caixa para o efeito. A fonte de calor era ligada até estabilizar os fluxos de calor registados na câmara infravermelhos FLUKE Ti45, que se encontrava distanciada a aproximadamente 1000 mm da caixa isolada.

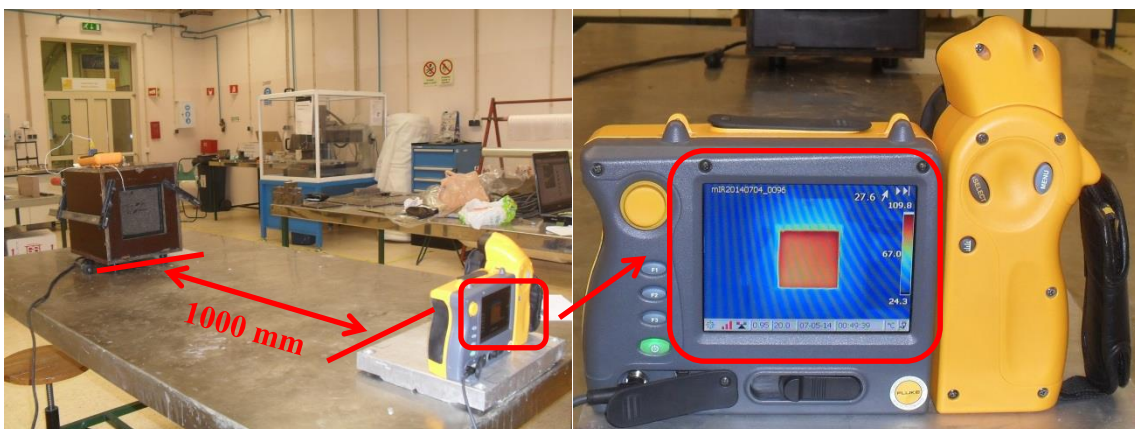


Figura 34 – Medição do coeficiente de condutividade térmica, com os equipamentos usados e a leitura da temperatura da face exterior.

3.3.2. Ensaios Acústicos

Na avaliação do comportamento acústico, o sonómetro (Tabela 15) foi colocado a uma distância de 1 m, da face do material processado instalado na caixa, por forma a realizar as medições de intensidade sonora. Foram feitas 3 medidas por placa do material processado, sendo o tempo entre medidas de 15 segundos.

A medição da intensidade sonora foi efetuada numa sala fechada, tendo sido utilizado o equipamento a seguir indicado (Figura 35):

- Caixa com isolamento acústico;
- Besouro com tensão de funcionamento de 6 V (fonte de ruído);
- Sonómetro digital (registo dos sons exteriores da placa em estudo);

Tabela 15 – Características do sonómetro utilizado nos ensaios de avaliação do comportamento acústico dos materiais processados [40]

Equipamento	Marca e Modelo	Tipo de medição	Sensibilidade/ Erro	Método Analítico
Sonómetro digital	Sound level meter NL - 31	Amostragem pontual	$\pm 0,5\text{dB}$	Equipamento para medição espectral de frequência em intervalos de 1/3 de oitava



Figura 35 – Equipamento usado para medir a intensidade sonora a) Caixa isolada, b) Besouro, c) Sonómetro digital

Na figura 36 pode visualizar-se o sistema em funcionamento. O sistema de montagem do equipamento consiste em colocar a placa na parte frontal da caixa, ligar o besouro e registar os valores de intensidade sonora com o sonómetro digital que se encontrava distanciada a aproximadamente 1000 mm da caixa isolada.

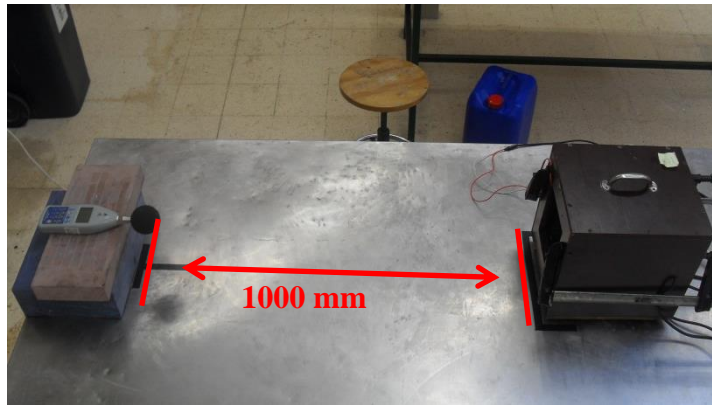


Figura 36 – Medição da intensidade sonora com os equipamentos usados

3.3.3. Geometria e Dimensão dos Provetes

Neste ponto são apresentadas as dimensões e a geometria dos provetes utilizados nos ensaios de flexão em três pontos, tenacidade à fratura e compressão. Os provetes utilizados nos vários ensaios foram os obtidos a partir das placas processadas em materiais compósitos. Estes provetes encontram-se normalizados de acordo com a norma ASTM D638 para ensaios de flexão em três pontos e de acordo com a ASTM D790-93 para ensaios de tenacidade à fratura.

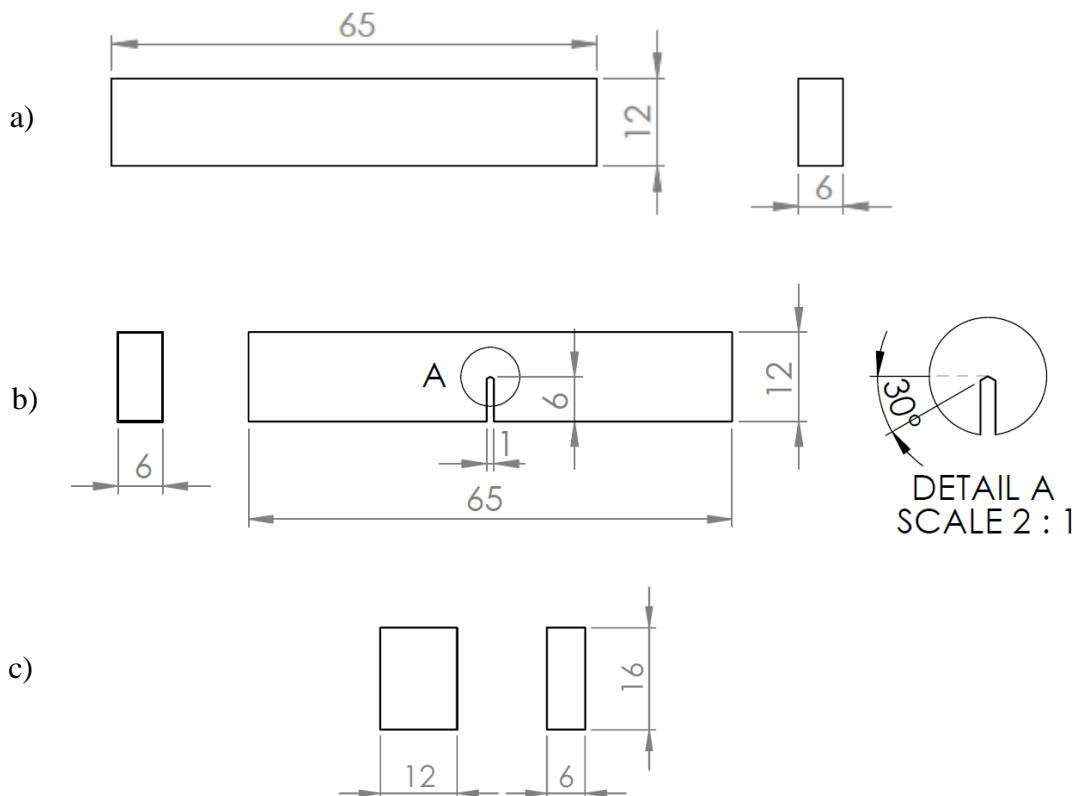


Figura 37 – Geometria e dimensões dos provetes: a) Ensaio de flexão em 3 pontos, b) Ensaio de tenacidade à fratura, c) Ensaio de compressão

3.3.4. Densidades

O objetivo destes ensaios é o de determinar as densidades experimentais dos materiais processados. No cálculo das densidades dos materiais foi utilizada uma balança analítica da marca Mettler Toledo AG204 (Figura 38) e equipada com um kit que permite calcular as densidades pelo método descrito abaixo. Não é obrigatório possuir nenhum provete específico, bastando para tal uma pequena amostra do material.

O método usado para a determinação das densidades foi o método de flutuação – Princípio de Arquimedes.

- Determinação da massa do material (m_c);
- Determinação da massa aparente (m_a);
- Cálculo da temperatura da água (T_{H_2O});
- Cálculo da densidade da amostra pela fórmula (equação 7).

$$\rho_c = \left(\frac{m_c}{m_c - m_a} \right) \times \rho_{H_2O} \quad (7)$$

A densidade da água destilada (H₂O) é 1 g/cm³, para uma temperatura de 14°C, logo deve-se ter em conta a temperatura da água medida no ponto 3 e consultar a tabela de variação da densidade. A temperatura medida foi de 20°C, sendo a densidade correspondente igual a 0.9982 g/cm³.



Figura 38 – Determinação de densidades, a) Água destilada, b) Balança analítica e kit, c) Tabela de variação da massa volúmica da água com a temperatura

3.4. Caracterização Mecânica

De modo a caracterizar mecanicamente os materiais compósitos processados foram realizados um conjunto de ensaios mecânicos que serão descritos de seguida.

3.4.1. Ensaios de Flexão em Três Pontos

Os ensaios de flexão em três pontos foram realizados de acordo com a norma ASTM D638. Estes foram realizados numa máquina eletromecânica Zwick modelo Z100, com uma capacidade de carga de ensaio de 100 kN à temperatura ambiente (Figura 39).

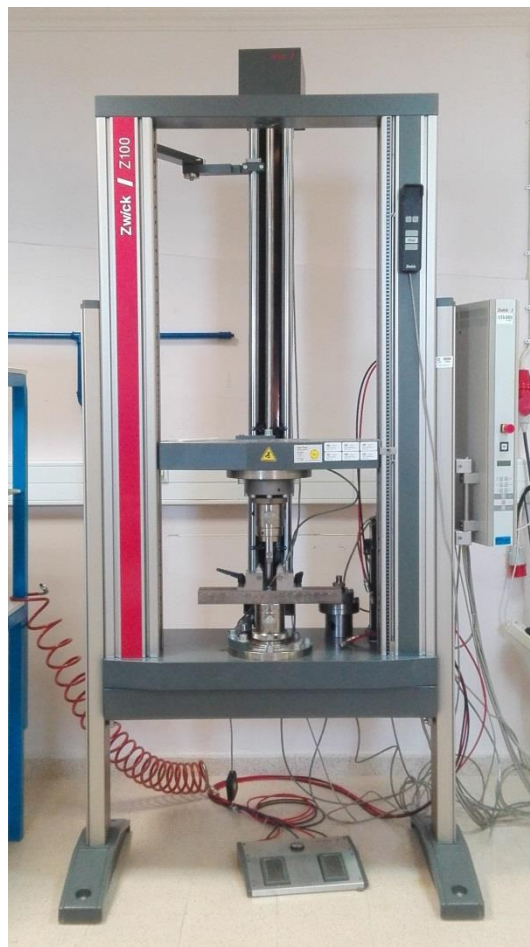


Figura 39 - Equipamento e suportes do ensaio de flexão em três pontos e tenacidade à fratura.

Esta possui uma consola de controlo e acoplamento a um computador, permitindo, através de um *software* específico, o controlo e tratamento de todos os parâmetros (carga, velocidade, deslocamento, etc.). Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, com a velocidade do carregamento em todos os ensaios de 2 mm/min, registando-se a força, deslocamento e extensão dos provetes.

Foram realizados cinco ensaios para cada fração mássica de material processado. Na Figura 40 pode-se observar de forma esquemática o tipo de carregamento considerado na realização dos ensaios de flexão, os apoios encontravam-se distanciados a 40 mm.

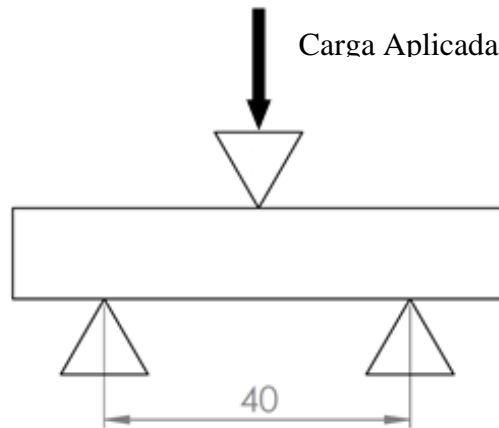


Figura 40 - Representação esquemática do ensaio em flexão em três pontos.

Na Figura 41 temos uma imagem da realização de um dos ensaios.

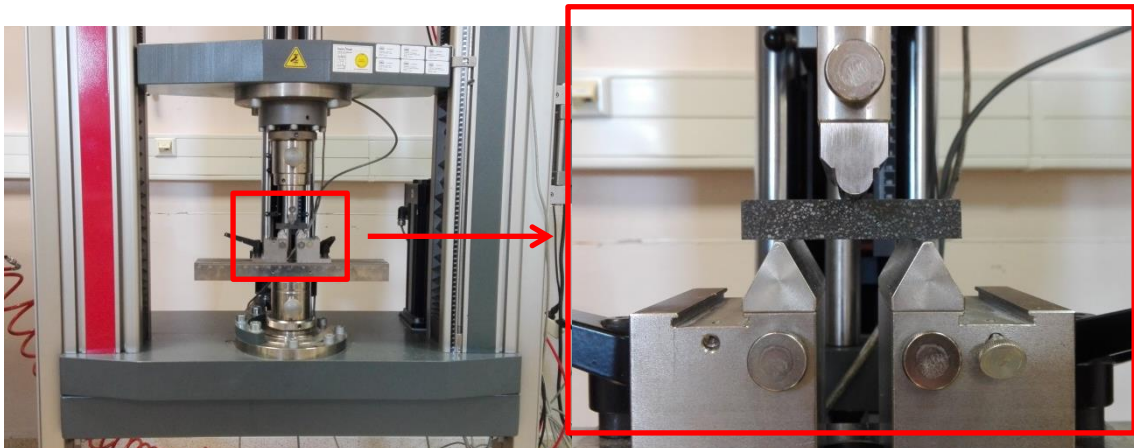


Figura 41 – Realização de um ensaio de flexão em três pontos.

Após obtenção dos dados foi calculada a tensão de flexão σ_f , utilizando a equação 8.

$$\sigma_f = \frac{M_c}{I} \quad (8)$$

onde, M_c é o momento fletor e I é o momento de inércia. Para o caso de uma viga simplesmente apoiada, tem-se (equação 9):

$$\sigma_f = \frac{F/2 \cdot L/2 \times h/2}{I} \quad (9)$$

onde F é a força, L a distância entre apoios e h a altura do provete. Como a secção transversal do provete é retangular, o momento de inércia foi calculado utilizando a equação 10 onde b é a espessura do provete.

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (10)$$

Após o tratamento dos dados com base nas fórmulas apresentadas, obtiveram-se os gráficos de tensão/deslocamento, para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida.

O valor do módulo E foi obtido por regressão linear através da equação 11.

$$E = \frac{FL^3}{48I} \quad (11)$$

Com base nesta equação obteve-se o gráfico do módulo em função do deslocamento. O valor do módulo E foi obtido através da aplicação de uma regressão linear aos valores representados graficamente.

3.4.2. Ensaio de Tenacidade à Fratura

A tenacidade à fratura foi determinada de acordo com o protocolo para a determinação de K_Q para polímeros e compósitos. Estes testes foram concebidos para caracterizar a tenacidade de polímeros e materiais compósitos em termos da intensidade de tensão crítica, K_Q .

No processo utilizado assume-se que o provete fraturado possui um comportamento linear elástico e, conseqüentemente têm que ser impostas algumas restrições na linearidade do diagrama carga/deslocamento e na espessura do provete de modo a se ter ensaios válidos. Como valor inicial para a espessura foi utilizado a regra $h=2b$ e para a profundidade do entalhe foi tomado um valor que satisfaça a relação $0,45 < a/h < 0,55$, onde a é o comprimento da fenda.

Os ensaios de tenacidade à fratura foram efetuados com o mesmo equipamento dos ensaios de flexão (Figura 39), mantendo-se a mesma velocidade de carregamento de 2 mm/min, a distância entre apoios (30 mm), à mesma temperatura e de acordo com a norma ASTM E399-83.

Foram realizados três ensaios para cada fração mássica de material processado. Foi necessário criar um pequeno entalhe, sendo este feito por um processo de fresagem

utilizando uma fresa de 1mm. Pode-se ver na Figura 42 de forma esquemática o tipo de carregamento considerado na realização dos ensaios de tenacidade à fratura.

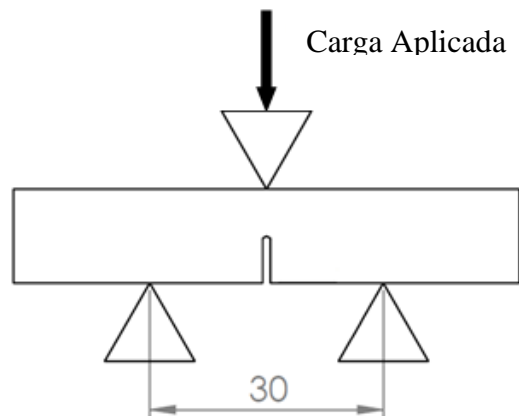


Figura 42 – Representação esquemática do ensaio de tenacidade à fratura.

Na Figura 43 temos uma imagem da realização de um dos ensaios.

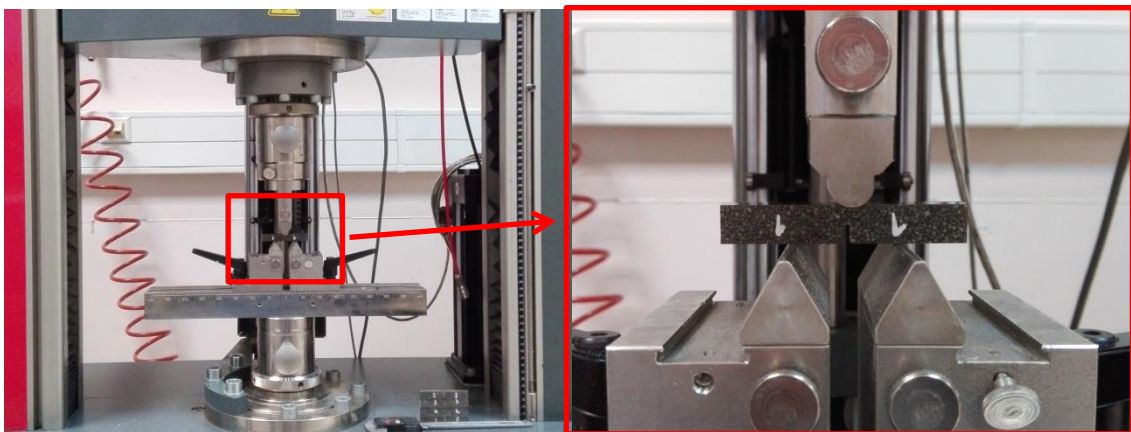


Figura 43 – Realização de um ensaio de tenacidade à fratura.

Após a realização dos ensaios de fratura os comprimentos de fenda foram medidos, com o objetivo de determinar o tamanho médio desta.

No início do teste, é obtido um diagrama de carga/deslocamento. Este, no caso ideal, é linear com uma queda abrupta no instante do início do crescimento da fenda. Em alguns casos esta situação ocorre e K_Q pode ser encontrado para a carga máxima. Na maior parte dos casos há algumas não linearidades no diagrama e estas podem ser devidas a [41]:

- Deformação plástica da ponta da fenda;
- Elasticidade não linear;
- Viscoelasticidade geral;
- Crescimento estável da fenda depois da iniciação.

Os três primeiros efeitos violam a suposição da mecânica de fratura linear elástica e o quarto efeito significa que a carga de iniciação verdadeira não é definida pelo máximo. Para mostrar o modo de determinação da complacência inicial C é apresentada a Figura 46 onde se encontra desenhada uma linha reta perfeita para determinar a complacência inicial.

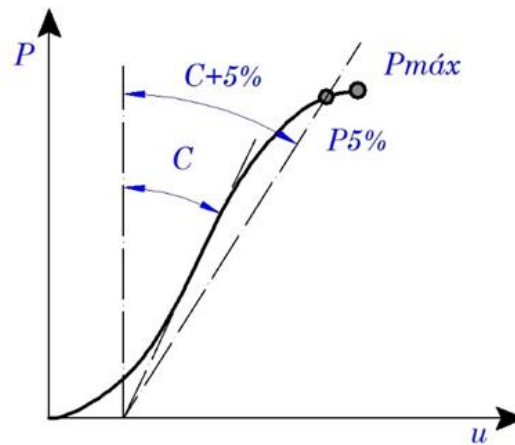


Figura 44 - Determinação da complacência [23].

Este valor é aumentado em 5% e uma linha posterior é desenhada. Se $P_{máx}$ se encontrar entre estas duas linhas então $P_{máx}$ é usado para determinar K_Q . Se a linha $C+5\%$ intercepar a linha de carga então o valor de $P_{5\%}$ é encontrado e este valor é usado como valor de iniciação da fenda.

Para ensaios de tenacidade à fratura os valores de K_Q são calculados a partir da equação 12, sendo o valor de $f(a/h)$ obtido a partir de valores tabelados:

$$K_Q = \frac{P_Q \times L}{bh^{3/2}} \times f(a/h) \quad (12)$$

Os valores de K_Q calculados devem ser verificados através do critério da equação 13:

$$a, b, (h - a) > 2,5 \times \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ced}} \right)^2 \quad (13)$$

Se para as dimensões dos provetes forem consideradas as relações $0,45 < a/h < 0,55$ e $h=2b$ então, normalmente, a condição é satisfeita. De facto, o critério cobre duas limitações no qual a espessura deve ser suficiente para assegurar a deformação plana mas o valor $(h - a)$ tem de ser suficiente para evitar excessiva plasticidade.

Caso as condições não sejam satisfeitas é necessário repetir os ensaios, utilizando provetes de maiores dimensões.

3.4.3. Ensaios de Compressão

Os ensaios à compressão foram efetuados com o mesmo equipamento dos ensaios de flexão (Figura 39), mas com os acessórios próprios à realização dos ensaios de compressão, mantendo-se a mesma velocidade de carregamento de 2 mm/min, à mesma temperatura e de acordo com a norma ASTM E399-83.

Foram realizados cinco ensaios para cada granulometria e fração mássica de material processado. Pode-se observar na Figura 45 de forma esquemática o tipo de carregamento considerado na realização dos ensaios de compressão.

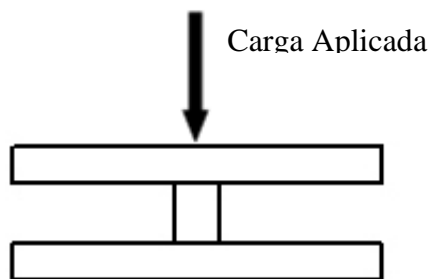


Figura 45 – Representação esquemática do ensaio de compressão.

Na Figura 46 pode-se observar a realização de um dos ensaios de compressão.

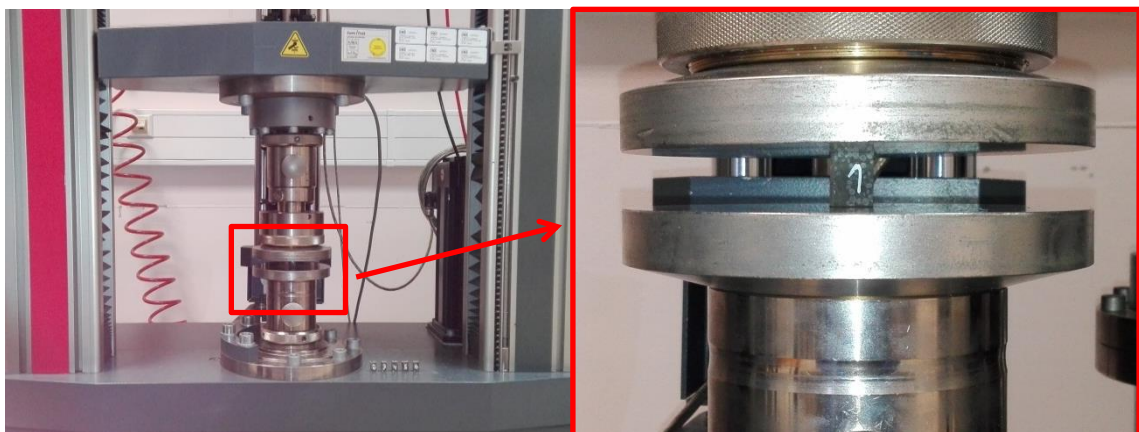


Figura 46 – Realização de um ensaio de compressão.

Após obtenção dos dados foi calculada a tensão de compressão σ_c , utilizando a equação 14.

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (14)$$

onde, F é a força aplicada e A a área.

Após o tratamento dos dados com base nas fórmulas apresentadas, obtiveram-se os gráficos de tensão/deslocamento, para os compósitos com diferentes granulometrias e frações mássicas de partículas de argila expandida.

Para o cálculo da deformação, temos a equação 15:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (15)$$

onde, δ é a extensão e L a altura do provete.

O valor do módulo E (Young) foi obtido através da aplicação de uma regressão linear aos valores do gráfico de tensão/deformação.

4. Resultados Experimentais e Discussão

Foram realizados ensaios de flexão em três pontos, ensaios de tenacidade à fratura, ensaios de compressão, densidades, ensaios térmicos e acústicos. Os resultados experimentais dos ensaios térmicos e acústicos foram obtidos diretamente das 13 placas processadas com partículas de argila expandida sem o reforço das fibras curtas de vidro. Os resultados experimentais dos ensaios de flexão em três pontos e compressão foram obtidos partir da realização de cinco ensaios válidos e os ensaios de tenacidade à fratura e densidade a partir de três ensaios válidos, após o corte e polimento mecânico dos provetes. Na análise de resultados foram considerados os valores médios e os desvios padrão de provetes obtidos a partir de placas de resina com diferentes granulometrias/frações mássicas de partículas de argila expandida e fibras curtas de vidro.

4.1. Ensaios Térmicos

Na Tabela 16 são apresentados os resultados relativos aos ensaios térmicos realizados com as placas processadas, com diferentes frações mássicas/granulometrias de partículas de argila expandida consideradas neste trabalho. As placas reforçadas com fibras curtas de vidro não são consideradas neste estudo pois apenas foram utilizadas para melhoria das propriedades mecânicas do material processado. Com base na análise dos resultados dos ensaios térmicos obtidos, pode-se observar que, após a estabilização dos fluxos de calor, se verifica que entre os materiais testados existe uma variação da resistência térmica, como era espectável, esta aumenta com o aumento da fração mássica, assim como o aumento da granulometria das partículas de argila expandida

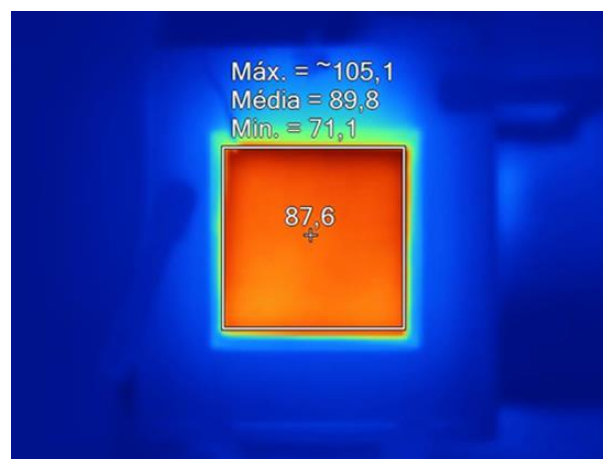


Figura 47 - Distribuição de temperaturas do compósito Wp=32% de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$).

Os resultados foram obtidos a partir da imagem termográfica, com a distribuição de temperaturas ao longo da placa, para cada ensaio. No tratamento dos resultados obtidos foi considerada uma área de distribuição igual para as 13 placas processadas neste estudo.

Tabela 16 – Temperaturas obtidas na avaliação do comportamento térmico das várias placas processadas

Amostra	Temperatura Experimental [°C]				
	Máxima da Placa	Média da Placa	Mínima da Placa	Interna da Caixa	Ambiente
SR1500	101,2	79,1	69,6	122	24,6
SR1500 + 24%Argex (Ø=0,7mm)	101,9	88,8	66,1	125	24,7
SR1500 + 28%Argex (Ø=0,7mm)	105,3	91,2	72,4	126	24,5
SR1500 + 32%Argex (Ø=0,7mm)	107,4	93,1	75,1	126	24,8
SR1500 + 36%Argex (Ø=0,7mm)	109,8	94,2	75,4	126	24,6
SR1500 + 40%Argex (Ø=0,7mm)	109,9	86,7	47,3	139	24,4
SR1500 + 24%Argex (Ø=1,9mm)	102,2	81	44,4	136	23,9
SR1500 + 28%Argex (Ø=1,9mm)	109,4	83,1	44,6	133	24,7
SR1500 + 32%Argex (Ø=1,9mm)	105	84,5	43,8	132	24,8
SR1500 + 36%Argex (Ø=1,9mm)	105,1	85,5	42,8	136	24,3
SR1500 + 24%Argex (Ø=2,6mm)	100,9	84,6	63,6	128	23,9
SR1500 + 28%Argex (Ø=2,6mm)	103,1	87,3	68,9	127	24,1
SR1500 + 32%Argex (Ø=2,6mm)	105,1	89,9	71,1	132	24,4

Com base nos valores das temperaturas obtidas nos ensaios de realizados para a determinação das propriedades térmicas (Tabela 16) e da equação 1 (Capítulo 2), foram obtidos os coeficientes de condutividade térmica (tabela 17).

Tabela 17 – Valores de condutividade térmica obtidos para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida.

Amostra	Resultado Experimental			
	Área (m ²)	Espessura (m)	Q _{cond} (w)	K (w/m.°C)
SR1500	0,0203	0,0154	46	0,8152
SR1500 + 24%Argex (Ø=0,7mm)	0,0203	0,0126	46	0,7887
SR1500 + 28%Argex (Ø=0,7mm)	0,0203	0,0108	46	0,7054
SR1500 + 32%Argex (Ø=0,7mm)	0,0203	0,0089	46	0,6130
SR1500 + 36%Argex (Ø=0,7mm)	0,0203	0,0068	46	0,4846
SR1500 + 40%Argex (Ø=0,7mm)	0,0203	0,0087	46	0,3769
SR1500 + 24%Argex (Ø=1,9mm)	0,0203	0,0165	46	0,6812
SR1500 + 28%Argex (Ø=1,9mm)	0,0203	0,0131	46	0,5964
SR1500 + 32%Argex (Ø=1,9mm)	0,0203	0,0110	46	0,5232
SR1500 + 36%Argex (Ø=1,9mm)	0,0203	0,0095	46	0,4278
SR1500 + 24%Argex (Ø=2,6mm)	0,0203	0,0121	46	0,6300
SR1500 + 28%Argex (Ø=2,6mm)	0,0203	0,0097	46	0,5537
SR1500 + 32%Argex (Ø=2,6mm)	0,0203	0,0089	46	0,4790

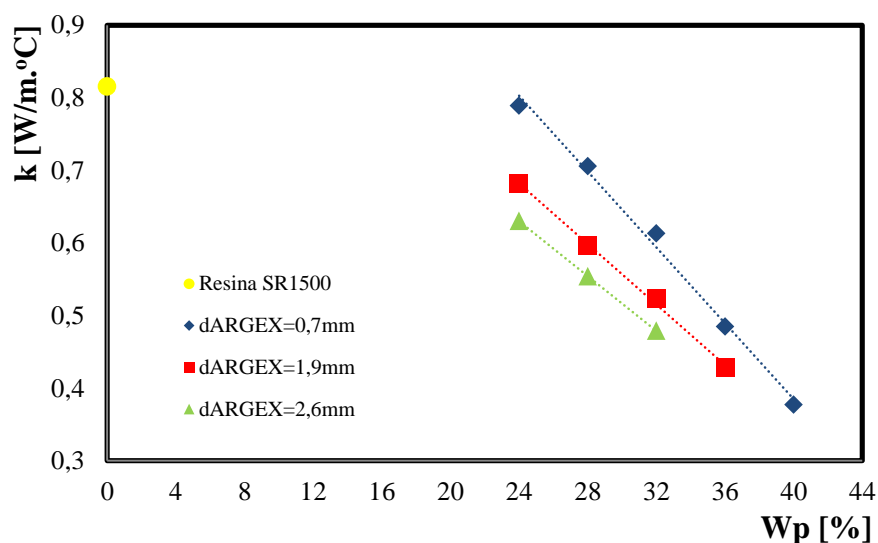


Figura 48 – Condutividade térmica versus fração mássica de partículas de argila expandida para as três granulometrias processadas.

Na Figura 48 são apresentados os resultados experimentais de condutividade térmica obtidos para as diferentes placas de material compósito processado com diferentes frações mássicas e as três granulometrias de partículas de argila expandida. A partir da Figura 48 e da Tabela 17 é possível observar uma diminuição da condutividade térmica com o aumento da fração mássica de partículas para todas as granulometrias consideradas neste estudo. O aumento da granulometria das partículas de argila expandida também provoca uma diminuição da condutividade térmica, tendo a granulometria $\varnothing=2.6\text{mm}$ obtido os valores mais baixos para $W_p=24\%$, $W_p=32\%$ e $W_p=36\%$.

4.2. Ensaios Acústicos

Na Tabela 18 são apresentados os resultados relativos aos ensaios acústicos realizados com as placas processadas, com diferentes frações mássicas/granulometrias de partículas de argila expandida consideradas neste trabalho. As placas reforçadas com fibras curtas de vidro não são consideradas neste estudo pois apenas foram utilizadas para melhoria das propriedades mecânicas do material processado. Com base na análise dos resultados dos ensaios acústicos obtidos, pode-se observar que com o aumento da fração/granulometria uma diminuição significativa da intensidade sonora (dB).

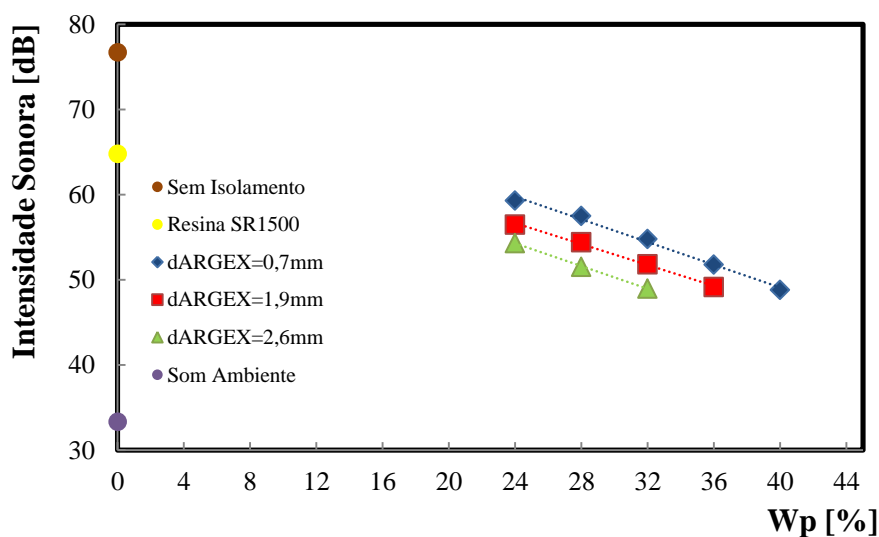


Figura 49 – Intensidade sonora versus fração mássica para as diferentes placas processadas com partículas de argila expandida, e consideradas em outras duas situações: a) sem material de isolamento; b) som ambiente.

A partir da Figura 49 é, também, possível observar a melhoria clara em termos de isolamento acústico com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida e granulometrias consideradas neste estudo.

Tabela 18 – Nível de Intensidade sonora medido para as placas de materiais compósitos com diferentes frações mássicas e granulometrias de partículas de argila expandida.

Amostra	Resultado Experimental [dB]				
	X ₁	X ₂	X ₃	X _{médio}	S
SR1500	65,0	64,6	64,7	64,8	0,2
SR1500 + 24%Argex (Ø=0,7mm)	59,4	59,3	59,2	59,3	0,1
SR1500 + 28%Argex (Ø=0,7mm)	57,5	57,8	57,1	57,5	0,4
SR1500 + 32%Argex (Ø=0,7mm)	54,6	55,4	54,3	54,8	0,6
SR1500 + 36%Argex (Ø=0,7mm)	51,8	51,6	51,9	51,8	0,2
SR1500 + 40%Argex (Ø=0,7mm)	48,5	49,1	48,8	48,8	0,3
SR1500 + 24%Argex (Ø=1,9mm)	56,1	56,7	56,6	56,5	0,3
SR1500 + 28%Argex (Ø=1,9mm)	54,2	54,4	54,6	54,4	0,2
SR1500 + 32%Argex (Ø=1,9mm)	51,5	52,0	51,9	51,8	0,3
SR1500 + 36%Argex (Ø=1,9mm)	48,8	49,0	49,6	49,1	0,4
SR1500 + 24%Argex (Ø=2,6mm)	54,3	55,5	53,1	54,3	1,2
SR1500 + 28%Argex (Ø=2,6mm)	51,3	51,5	51,7	51,5	0,2
SR1500 + 32%Argex (Ø=2,6mm)	49,9	48,8	48,2	49,0	0,9
Sem Isolamento	77,2	76,4	76,5	76,7	0,4
Som Ambiente	33,4	32,9	33,6	33,3	0,4

4.3. Densidades

Foram determinadas as densidades dos materiais processados para a realização deste trabalho (Tabela 19). Os materiais processados foram os seguintes: compósitos de matriz epóxida SR1500 com diferentes frações mássicas e granulometrias de partículas de argila expandida e/ou fibras curtas de vidro (Tabelas 10 a 13). Foram, também determinados os valores teóricos de densidade para todos os materiais processados e obtidos os desvios padrão relativamente aos materiais experimentais. Os maiores desvios podem deve-se a problemas relacionado com processamento dos materiais (porosidades, tempos e temperaturas de curas, etc), distribuição das partículas na matriz (no caso dos compósitos

reforçados com partículas) e distribuição das fibras de vidro (no caso dos compósitos reforçados com fibras).

Tabela 19 – Comparação dos valores de densidade para cada material, valores experimentais e teóricos

Amostra	Resultado Experimental [g/cm ³]					Valor Teórico [g/cm ³]	Desvio [%]
	X ₁	X ₂	X ₃	X _{médio}	S		
SR1500	1,156	1,155	1,157	1,156	0,001	1,17	1,2
SR1500 + 1%Fv	1,167	1,163	1,167	1,166	0,002	1,164	0,2
SR1500 + 3%Fv	1,172	1,165	1,154	1,164	0,009	1,193	2,4
SR1500 + 24%Argex (Ø=0,7mm)	1,246	1,245	1,253	1,248	0,005	1,258	0,8
SR1500 + 28%Argex (Ø=0,7mm)	1,262	1,260	1,263	1,262	0,001	1,276	1,1
SR1500 + 32%Argex (Ø=0,7mm)	1,262	1,282	1,295	1,280	0,017	1,294	1,1
SR1500 + 32%Argex+1%Fv (Ø=0,7mm)	1,294	1,277	1,301	1,290	0,012	1,308	1,4
SR1500 + 32%Argex+3%Fv (Ø=0,7mm)	1,130	1,129	1,301	1,303	0,005	1,336	2,5
SR1500 + 36%Argex (Ø=0,7mm)	1,255	1,258	1,270	1,261	0,003	1,312	3,9
SR1500 + 36%Argex+1%Fv (Ø=0,7mm)	1,266	1,269	1,271	1,269	0,008	1,342	5,4
SR1500 + 36%Argex+3%Fv (Ø=0,7mm)	1,323	1,322	1,318	1,331	0,002	1,354	1,7
SR1500 + 40%Argex (Ø=0,7mm)	1,282	1,261	1,265	1,264	0,005	1,330	5,0
SR1500 + 40%Argex+1%Fv (Ø=0,7mm)	1,283	1,280	1,280	1,281	0,002	1,344	4,7
SR1500 + 40%Argex+3%Fv (Ø=0,7mm)	1,327	1,324	1,316	1,322	0,002	1,372	3,6
SR1500 + 24%Argex (Ø=1,9mm)	1,206	1,208	1,215	1,210	0,004	1,210	0,0
SR1500 + 28%Argex (Ø=1,9mm)	1,203	1,199	1,198	1,200	0,002	1,220	1,6
SR1500 + 32%Argex (Ø=1,9mm)	1,197	1,197	1,194	1,196	0,002	1,230	2,8
SR1500 + 36%Argex (Ø=1,9mm)	1,183	1,186	1,190	1,186	0,004	1,24	4,4
SR1500 + 24%Argex (Ø=2,6mm)	1,175	1,180	1,177	1,177	0,002	1,165	1,0
SR1500 + 28%Argex (Ø=2,6mm)	1,158	1,162	1,160	1,160	0,002	1,170	0,9
SR1500 + 32%Argex (Ø=2,6mm)	1,151	1,155	1,155	1,153	0,002	1,175	1,9

Na Figura 50, pode-se observar os valores de densidade experimental e teórica versus tipos de materiais processados. É possível observar diferenças entre os valores teóricos e experimentais devido a problemas relacionados com o processamento dos materiais.

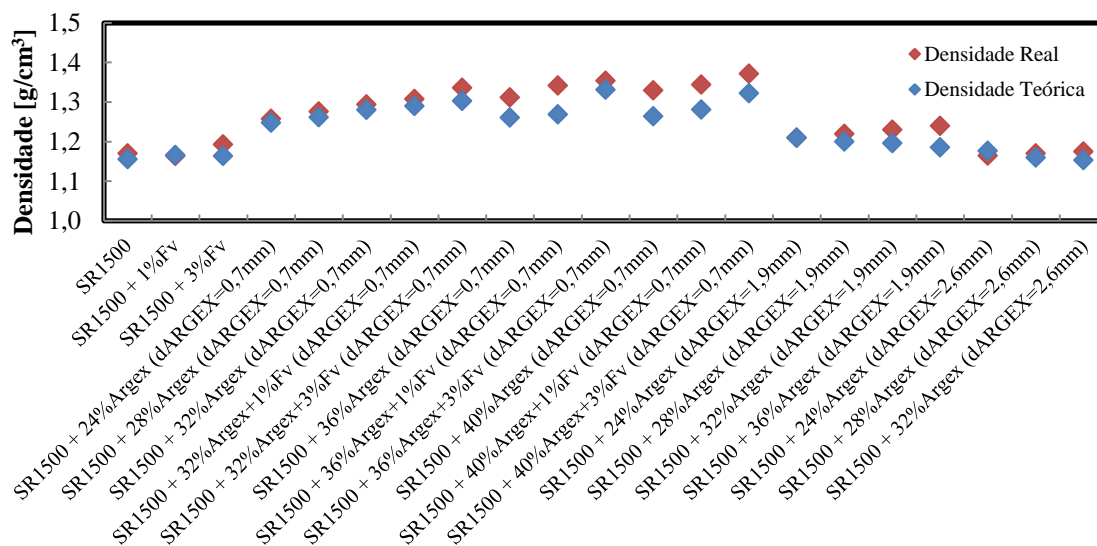


Figura 50 – Densidade dos materiais: valores experimentais e teóricos

4.4. Ensaios de Flexão em Três Pontos

A discussão dos resultados de flexão em três pontos foi analisada considerando os seguintes quatro: nos primeiros três foi analisada as propriedades mecânicas (tensão máxima e o módulo à flexão) para cada uma das três granulometrias ($\varnothing=0,7\text{mm}$, $\varnothing=1,9\text{mm}$ e $\varnothing=2,6\text{mm}$) consideradas. No quarto foi analisada as propriedades mecânicas considerando as três granulometrias e as várias frações mássicas.

4.4.1. Materiais Compósitos Reforçados com Partículas de Argila Expandida $\varnothing=0,7\text{mm}$

Na Figura 51 são apresentadas as curvas típicas de tensão versus deslocamento dos materiais compósitos de matriz epóxida reforçada com as partículas de argila expandida com o tamanho médio de $\varnothing=0,7\text{mm}$.

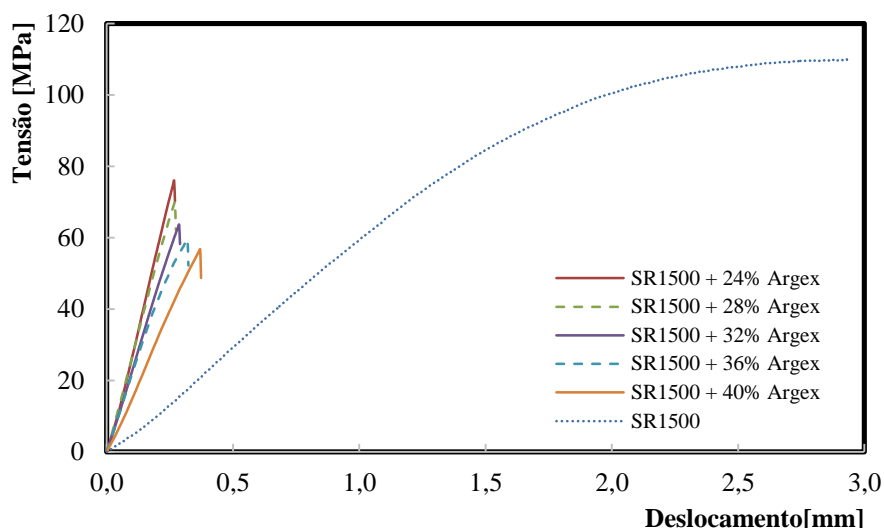


Figura 51 – Curvas típicas de tensão versus deslocamento da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)

Pode-se observar que os materiais compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) ensaiados apresentam o mesmo tipo de comportamento. Os valores de tensão máxima em flexão diminuem com o aumento de fração mássica de partículas de argila expandida. Por outro lado com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida diminui a rigidez dos compósitos processados mas com valores superiores aos do material da matriz polimérica.

Os valores dos resultados experimentais da tensão máxima à flexão são apresentados na Tabela 20, incluindo os valores médios de tensão máxima à flexão assim como os desvios padrão.

Tabela 20 – Valores da tensão máxima à flexão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X _{médio}	S
SR1500	119,0	117,1	116,0	-	-	117,4	1,5
SR1500 + 24%Argex	77,2	67,0	75,9	79,8	72,0	74,4	5,0
SR1500 + 28%Argex	68,2	67,1	76,2	69,7	70,9	70,4	3,5
SR1500 + 32%Argex	64,9	61,6	67,9	68,9	71,6	67,0	3,9
SR1500 + 36%Argex	65,8	67,2	64,3	63,7	61,8	64,6	2,1
SR1500 + 40%Argex	63,1	56,8	63,7	59,9	60,1	60,7	2,8

Os valores de tensão máxima à flexão (valores médios e desvios padrão) dos compósitos processados de matriz SR1500 e com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida são apresentados na Figura 52. É possível observar uma diminuição

significativa dos valores de resistência mecânica para os materiais com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida. Com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida diminui a resistência mecânica. A resina epóxida, material usado no processamento de todos os compósitos, apresenta o maior valor de resistência mecânica. O material compósito que apresenta um menor valor de resistência mecânica é o compósito com maior fração mássica de partículas de argila expandida (40%) com 60MPa.

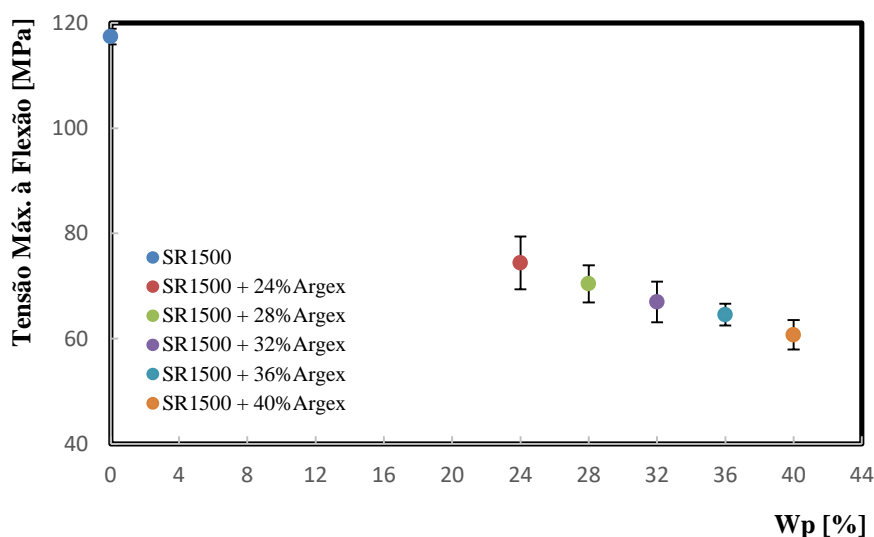


Figura 52 – Tensão máxima à flexão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)

Foram, também, processados compósitos de matriz epóxida SR 1500 com partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) com a adição de 1% e 3% em peso de fibras curtas de vidro (Tabela 21).

Tabela 21 – Valores da tensão máxima à flexão dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						S
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X _{médio}	
SR1500 + 1%Fv	159,2	162,4	160,6	-	-	160,7	1,6
SR1500 + 3%Fv	196,6	200,2	204,9	-	-	200,6	4,1
SR1500 + 32%Argex+1%Fv	74,6	76,1	77,8	82,5	85,9	79,4	4,7
SR1500 + 32%Argex+3%Fv	78,3	78,7	89,7	80,3	78,9	81,2	4,8
SR1500 + 36%Argex+1%Fv	74,2	79,9	75,7	69,3	77,2	75,2	3,9
SR1500 + 36%Argex+3%Fv	81,2	69,6	80,8	74,4	86,5	78,5	6,6
SR1500 + 40%Argex+1%Fv	69,0	63,9	69,4	78,1	74,5	71,0	5,5
SR1500 + 40%Argex+3%Fv	82,2	67,1	69,0	79,2	82,6	76,0	7,4

Na Figura 53, pode-se observar que com a adição de fibras curtas de vidro (fração mássica) aos compósitos processados com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida, resultou no aumento dos valores de resistência mecânica, com o aumento da fração mássica das fibras curtas de vidro.

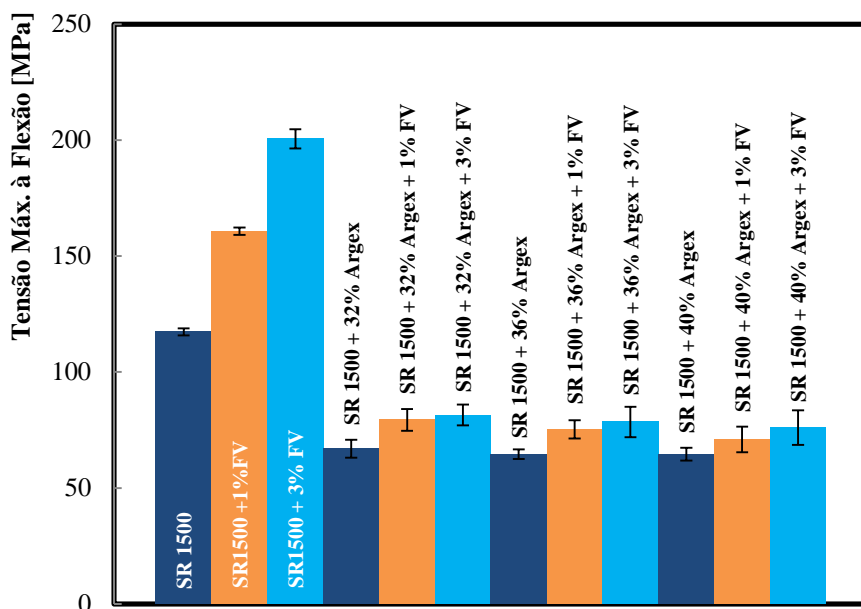


Figura 53 – Tensão máxima à flexão da resina e dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e de fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)

Na Tabela 22 são apresentados os valores de módulo de elasticidade relativos aos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida.

Tabela 22 – Valores de módulo de elasticidade à flexão da resina e dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						S
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X _{médio}	
SR1500	2877	2776	2859	-	-	2837	54
SR1500 + 24%Argex	11203	10111	12997	10955	11422	11338	1052
SR1500 + 28%Argex	9021	8460	11624	11775	9459	10068	1532
SR1500 + 32%Argex	9381	7218	8950	9095	8667	8662	847
SR1500 + 36%Argex	8556	7646	7026	8789	8508	8105	743
SR1500 + 40%Argex	6773	4593	6758	5368	4683	5635	1075

Na Figura 54 são apresentados os resultados experimentais de módulo de elasticidade em flexão versus a fração mássica de partículas de argila expandida (granulometria $\varnothing=0,7\text{mm}$). Pode-se observar que os valores de módulo dos compósitos processados são claramente superiores aos valores obtidos com a resina epóxida SR 1500. Por outro lado,

os valores de módulo obtidos com os compósitos processados apresentam uma tendência para diminuir com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida.

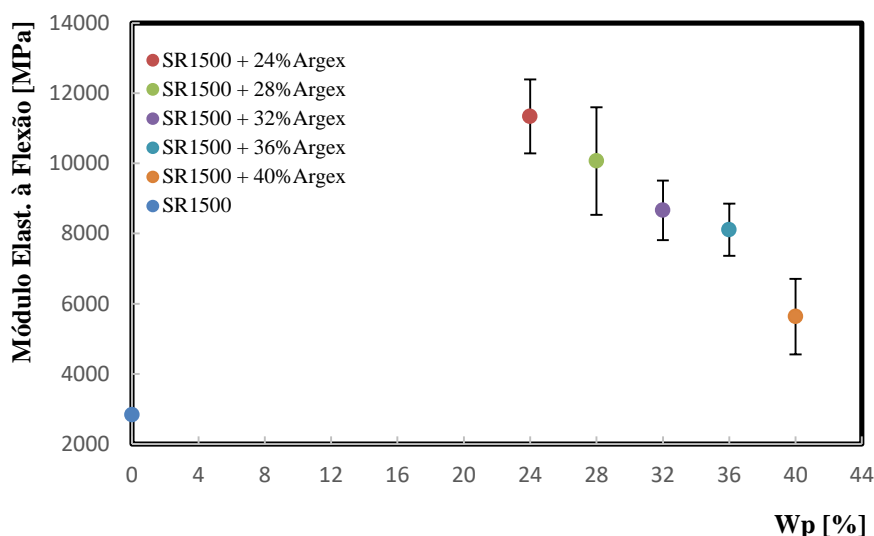


Figura 54 – Módulo de elasticidade à flexão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)

Na Tabela 23 são apresentados os valores de módulo de elasticidade dos materiais compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida (granulometria $\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$).

Tabela 23 – Valores do módulo de elasticidade à flexão para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$X_{\text{médio}}$	S
SR1500 + 1%Fv	8058	8021	7976	-	-	8018	41
SR1500 + 3%Fv	7400	8298	8414	-	-	8037	555
SR1500 + 32%Argex+1%Fv	11427	9973	12373	12228	11260	11452	959
SR1500 + 32%Argex+3%Fv	11426	13102	11248	11993	11521	11858	748
SR1500 + 36%Argex+1%Fv	12129	11364	10931	8851	11910	11037	1309
SR1500 + 36%Argex+3%Fv	11303	11030	11045	13619	11087	11617	1125
SR1500 + 40%Argex+1%Fv	9548	9988	10718	9913	10269	10087	437
SR1500 + 40%Argex+3%Fv	11884	11647	10880	10965	11787	11433	474

Verifica-se que com o aumento da fração mássica das fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$), compósitos com $W_p=32\%$, $W_p=36\%$ e $V_p=40\%$ de partículas de argila expandida (granulometria $\varnothing=0,7\text{mm}$), se obteve um aumento significativo dos módulos de elasticidade (Figura 55).

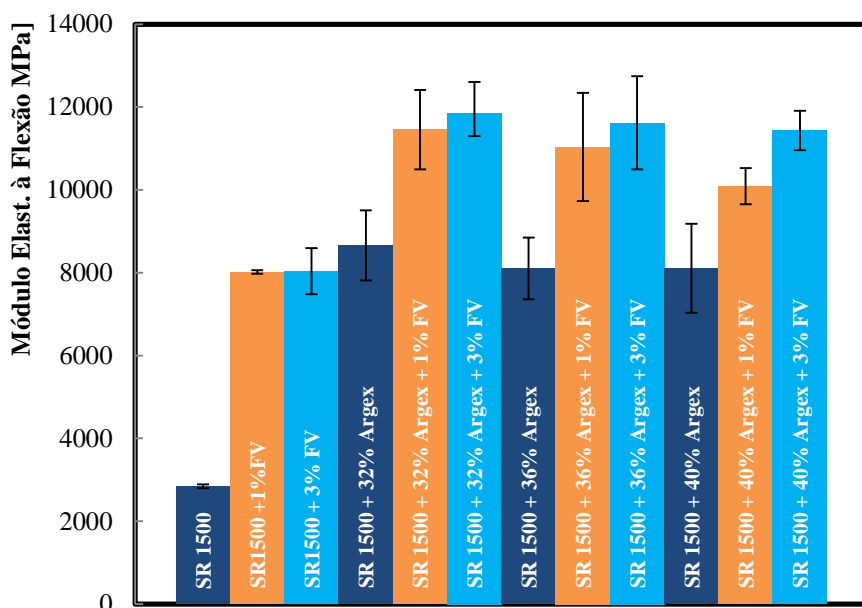


Figura 55 – Módulo de elasticidade à flexão da resina SR 1500 e dos compósitos de matriz SR 1500 com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e de fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)

4.4.2. Materiais Compósitos Reforçados com Partículas de Argila Expandida $\varnothing=1,9\text{mm}$

A partir da análise dos resultados experimentais da resistência à flexão e do módulo elasticidade em flexão em três pontos foi possível obter as curvas típicas de tensão versus deslocamento dos materiais compósitos de matriz epóxida reforçada com a granulometria $\varnothing=1,9\text{mm}$ de partículas de argila expandida (Figura 56).

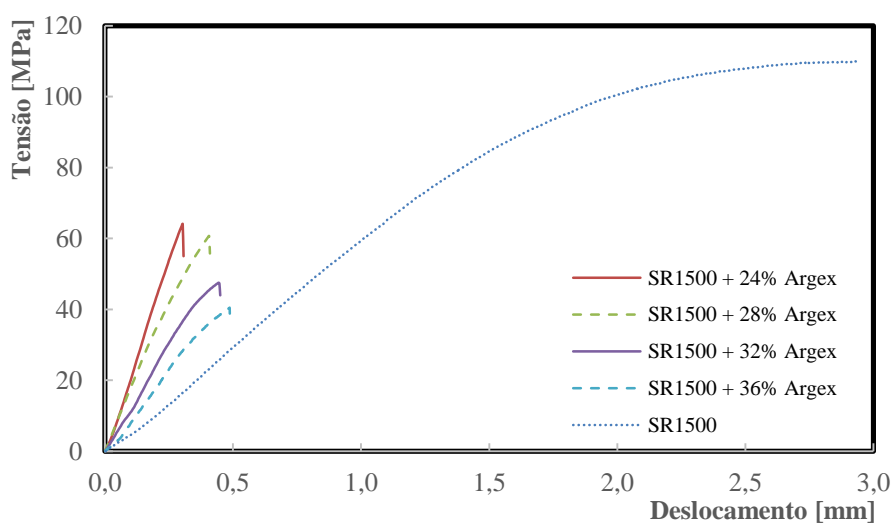


Figura 56 – Curvas típicas de tensão versus deslocamento para a resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)

Pode-se observar que os materiais compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$) ensaiados apresentam o mesmo tipo de comportamento: os valores de tensão máxima em flexão diminuem com o aumento de fração mássica de partículas de argila expandida. Por outro lado com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida aumenta a rigidez dos compósitos processados. Os valores dos resultados experimentais da tensão à flexão são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Valores da tensão máxima à flexão dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida (granulometria $\varnothing=1,9\text{mm}$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						S
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X _{médio}	
SR1500 + 24%Argex	65,2	62,6	64,1	62,5	64,9	63,9	1,3
SR1500 + 28%Argex	50,7	50,4	58,4	63,7	60,7	56,8	6,0
SR1500 + 32%Argex	47,5	48,4	45,4	50,8	55,6	49,5	3,9
SR1500 + 36%Argex	49,9	46,6	41,4	47,8	40,3	45,2	4,2

Os valores de tensão máxima à flexão (valores médios e desvios padrão) dos compósitos processados de matriz SR1500 com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida são apresentados na Figura 57. É possível observar uma diminuição significativa dos valores de resistência mecânica para os materiais com maiores frações mássicas de partículas de argila expandida. Com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida diminui a resistência mecânica. A resina epóxida, material usado no processamento de todos os compósitos, apresenta o maior valor de resistência mecânica.

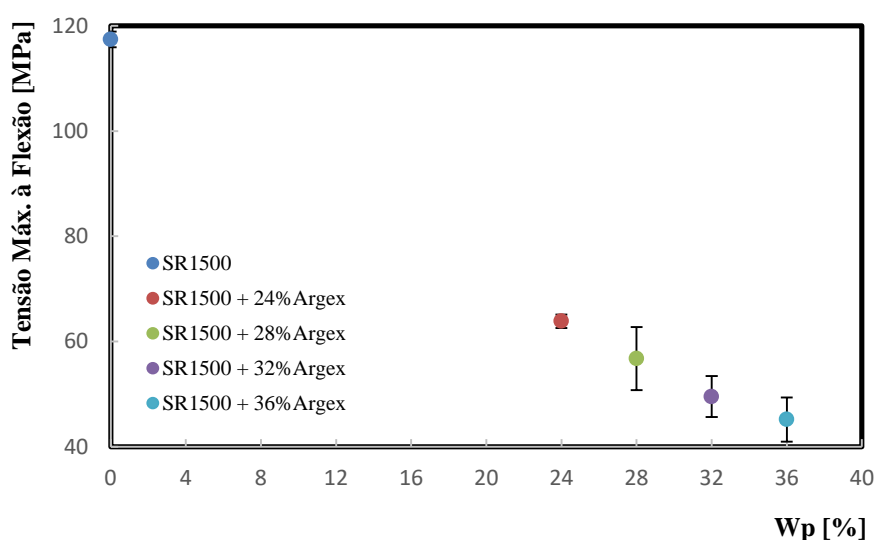


Figura 57 – Tensão máxima à flexão da resina SR1500 e para os compósitos de matriz SR1500 com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida (granulometria $d=1,9\text{mm}$)

Na Tabela 25 são apresentados os valores de módulo de elasticidade relativos aos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$).

Tabela 25 – Valores de módulo de elasticidade à flexão dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$X_{\text{médio}}$	S
SR1500 + 24%Argex	8458	8304	9339	8056	8900	8611	510
SR1500 + 28%Argex	8563	7073	7067	7274	6045	7205	899
SR1500 + 32%Argex	7248	7216	6055	7469	7360	7070	576
SR1500 + 36%Argex	6237	5646	6481	5416	7891	6334	971

Na Figura 58 são apresentados os resultados experimentais de módulo de elasticidade em flexão versus a fração mássica de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$). Pode-se observar que os valores de módulo dos materiais compósitos processados são claramente superiores aos valores obtidos para a resina epóxida SR1500. Por outro lado, os valores de módulo obtidos com os compósitos processados apresentam uma tendência para diminuir com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida.

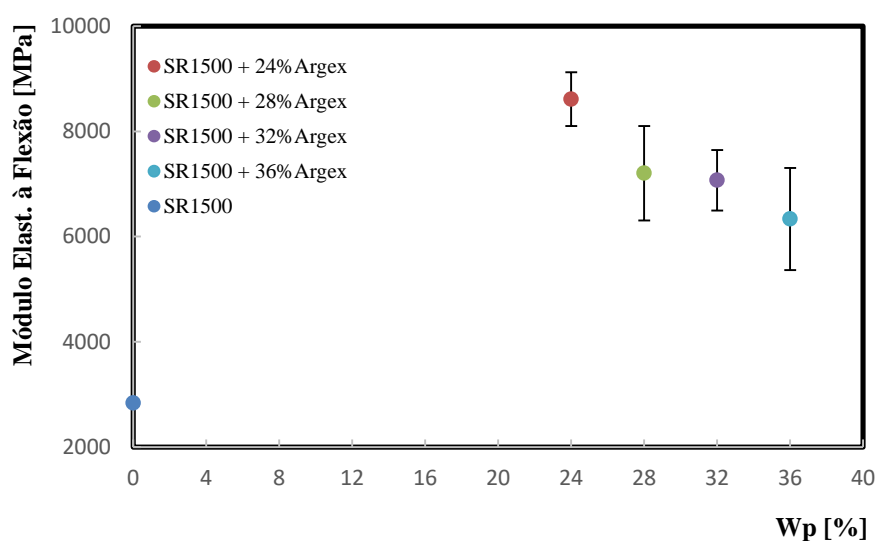


Figura 58 – Módulo de elasticidade à flexão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)

4.4.3. Materiais Compósitos Reforçados com Partículas de Argila Expandida $\varnothing=2,6\text{mm}$

A partir da análise dos resultados experimentais da resistência à flexão e do módulo elasticidade em flexão em três pontos foi possível obter as curvas típicas de tensão versus deslocamento dos materiais compósitos de matriz epóxida reforçada com a granulometria $\varnothing=2.6\text{mm}$ de partículas de argila expandida (Figura 59).

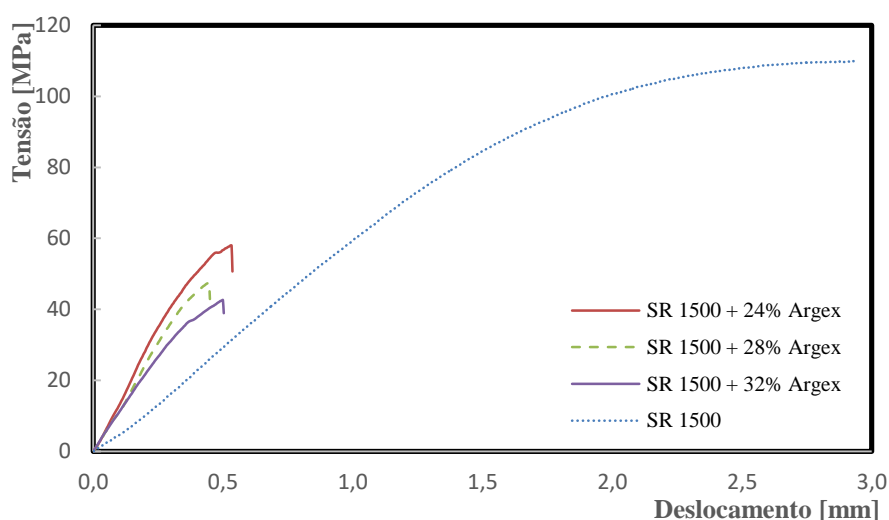


Figura 59 – Curvas típicas de tensão versus deslocamento para a resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)

Pode-se observar que os materiais compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$) ensaiados apresentam o mesmo tipo de comportamento. Os valores de tensão máxima em flexão diminuem com o aumento de fração mássica de partículas de argila expandida. Por outro lado com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida aumenta a rigidez dos compósitos processados.

Os valores dos resultados experimentais da tensão máxima à flexão são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Valores da tensão máxima à flexão dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X _{médio}	S
SR1500 + 24%Argex	58,0	46,0	57,1	46,2	51,9	51,8	5,7
SR1500 + 28%Argex	45,0	49,7	47,5	48,6	42,4	46,6	2,9
SR1500 + 32%Argex	42,6	44,9	46,2	39,3	44,9	43,6	2,7

Os valores de tensão máxima à flexão (valores médios e desvios padrão) dos compósitos processados de matriz SR1500 com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida são apresentados na Figura 60. É possível observar uma diminuição significativa dos valores de resistência mecânica para os materiais com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida. Com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida diminui a resistência mecânica. A resina epóxida, material usado no processamento de todos os compósitos, apresenta o maior valor de resistência mecânica. O material compósito que apresenta um menor valor de resistência mecânica é o compósito com maior fração mássica de partículas de argila expandida (32%) com 43MPa, conforme se pode ver na Figura 60.

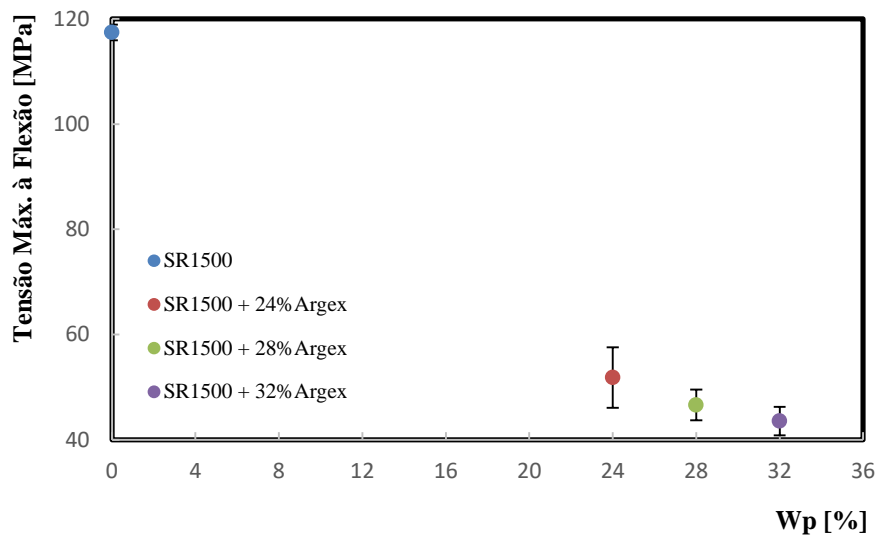


Figura 60 – Tensão máxima à flexão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)

Na Tabela 27 são apresentados os valores de módulo de elasticidade relativos aos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$).

Tabela 27 – Valores de módulo de elasticidade à flexão dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						S
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X _{médio}	
SR1500 + 24%Argex	6767	6937	6178	7456	5454	6558	768
SR1500 + 28%Argex	5680	5409	7366	6904	6424	6356	818
SR1500 + 32%Argex	3418	5264	4705	5949	4980	4863	931

Na Figura 61 são apresentados os resultados experimentais de módulo de elasticidade em flexão versus a fração mássica de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$). Pode-se

observar que os valores de módulo dos materiais compósitos processados são claramente superiores aos valores obtidos com a resina epóxida SR 1500. Por outro lado, os valores de módulo obtidos com os compósitos processados apresentam uma tendência para diminuir com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida.

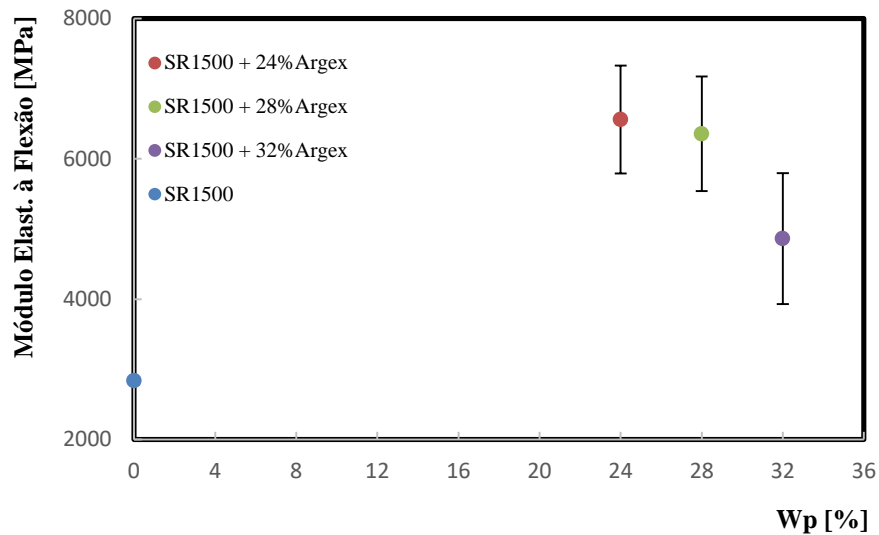


Figura 61 – Módulo de elasticidade à flexão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)

4.4.4. Análise Comparativa dos Diferentes Compósitos Processados

Com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida, os valores de tensão em flexão diminuem (Figura 62).

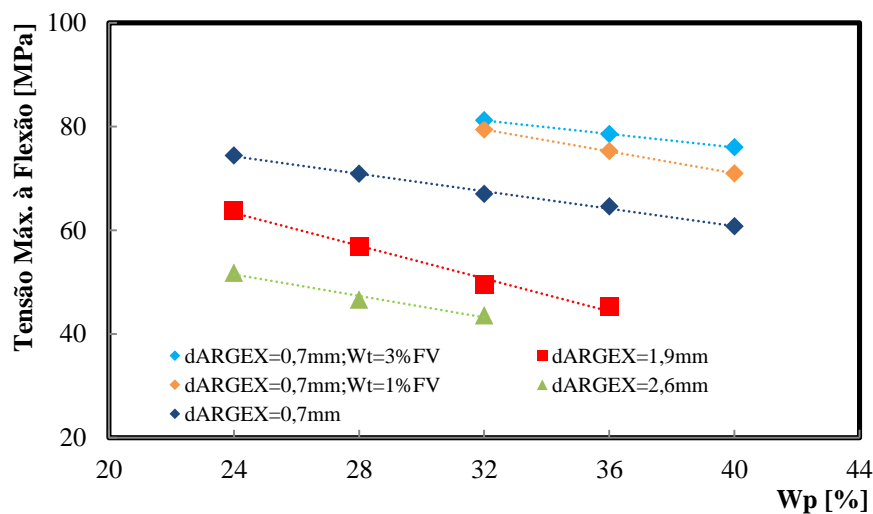


Figura 62 – Valores de tensão máxima à flexão versus fração mássica de todas as granulometrias de partículas de argila expandida e de fibras curtas de vidro

No entanto, é possível observar que esta diminuição é menos efetiva para a granulometria $\varnothing=0,7\text{mm}$ e, com o aumento da fração mássica de fibras curtas de vidro tem-se um aumento da tensão à flexão para a mesma granulometria.

Na Figura 63 são apresentados os resultados experimentais de módulo de elasticidade em flexão versus a fração mássica de partículas de argila expandida e para as três gamas de granulometrias. Pode-se observar que os valores de módulo em flexão em 3 pontos diminuíram com a fração mássica e essa diminuição é menos efetiva para a gama de partículas menor. Nos compósitos $\varnothing=0,7\text{mm}$ com reforço de fibras curtas de vidro tem-se um aumento elevado do módulo

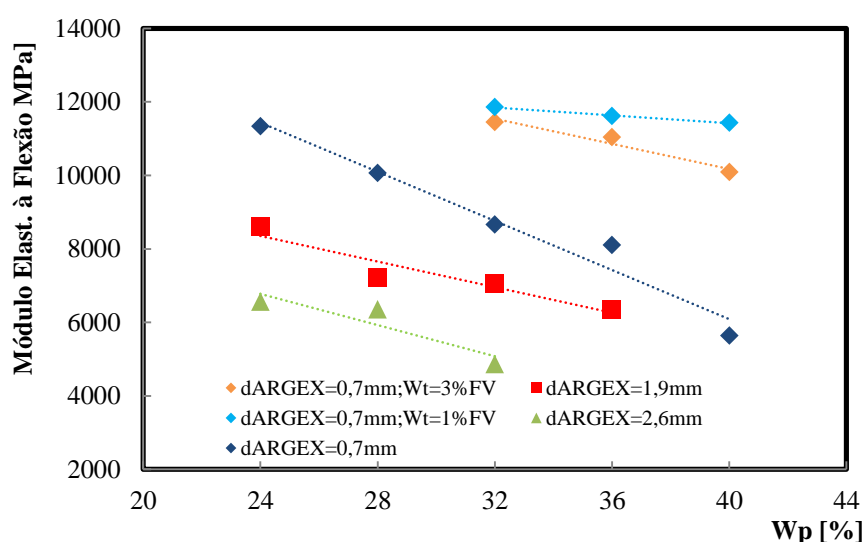


Figura 63 – Valores do módulo de elasticidade à flexão versus fração mássica de todas as granulometrias de partículas de argila expandida e de fibras curtas de vidro

4.5. Ensaios de Tenacidade à Fratura

Os resultados dos ensaios de tenacidade à fratura versus fração mássica são apresentados na Tabela 28, para a granulometria $\varnothing=0,7\text{mm}$ de partículas de argila expandida. São ainda apresentados os resultados do reforço com fibras curtas de vidro na mesma granulometrias mas apenas nas frações mássicas 32%, 36% e 40% de argila expandida. Os resultados são apresentados em termos dos seus valores médios e desvios padrão, do parâmetro de fratura K_Q .

Tabela 28 – Valores médios do parâmetro de fratura K_Q dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)

Amostra	Resultado Experimental [$\text{MPa}\cdot\text{mm}^{0,5}$]				
	X_1	X_2	X_3	$X_{\text{médio}}$	S
SR1500	127,3	115,0	121,3	121,2	6,1
SR1500 + 1%Fv	167,5	148,0	140,3	152,0	14,0
SR1500 + 3%Fv	163,7	151,9	172,8	162,8	10,5
SR1500 + 24%Argex	83,4	94,0	81,3	86,2	6,8
SR1500 + 28%Argex	74,7	79,0	73,3	75,7	3,0
SR1500 + 32%Argex	73,8	70,2	66,8	70,3	3,5
SR1500 + 32%Argex+1%Fv	76,0	74,9	66,7	72,5	5,1
SR1500 + 32%Argex+3%Fv	76,9	89,2	76,6	80,9	7,2
SR1500 + 36%Argex	69,1	69,6	63,0	67,2	3,7
SR1500 + 36%Argex+1%Fv	66,0	74,9	66,7	69,2	5,0
SR1500 + 36%Argex+3%Fv	73,5	81,4	73,0	76,0	4,7
SR1500 + 40%Argex	61,2	60,8	67,2	63,1	3,6
SR1500 + 40%Argex+1%Fv	59,8	64,4	68,5	64,2	4,3
SR1500 + 40%Argex+3%Fv	74,3	61,6	75,4	70,5	7,7

Na Figura 64 pode observar-se os valores relativos ao parâmetro K_Q em função da fração mássica de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) presente no compósito. Verifica-se que o valor de tenacidade à fratura diminui com o aumento da fração mássica.

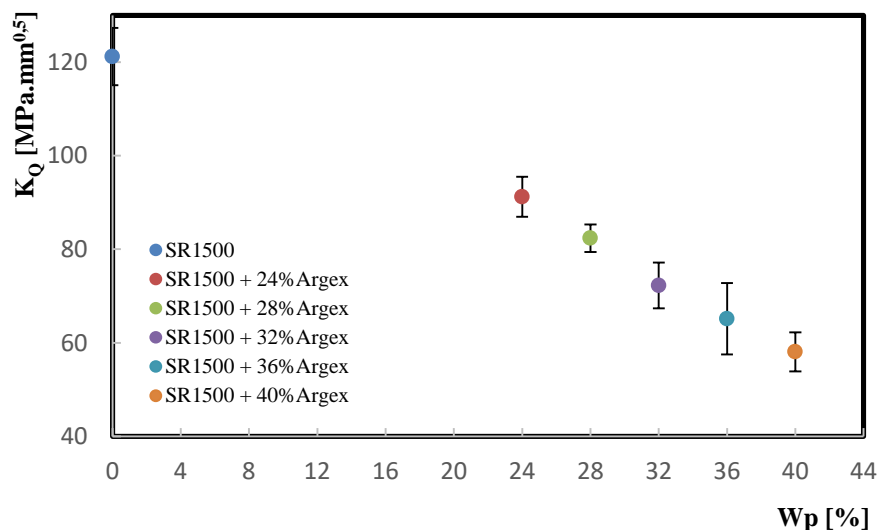


Figura 64 – Valores de K_Q em função fração mássica de partículas de argila expandida para a gama de granulometria $d=0,7\text{mm}$

Na Figura 65 pode observar-se os valores relativos ao parâmetro K_Q em função das frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e de fibras curtas de vidro (1% e

3%). Verifica-se que o valor de tenacidade à fratura diminui com o aumento da fração mássica, mas com valores superiores nas frações mássicas 32%, 36% e 40% de argila expandida em relação à Figura 64. Obtendo-se, assim um aumento do valor da tenacidade com o aumento da fração mássica das fibras curtas de vidro, cumprindo o objetivo pretendido de melhorar as propriedades mecânicas do material em estudo.

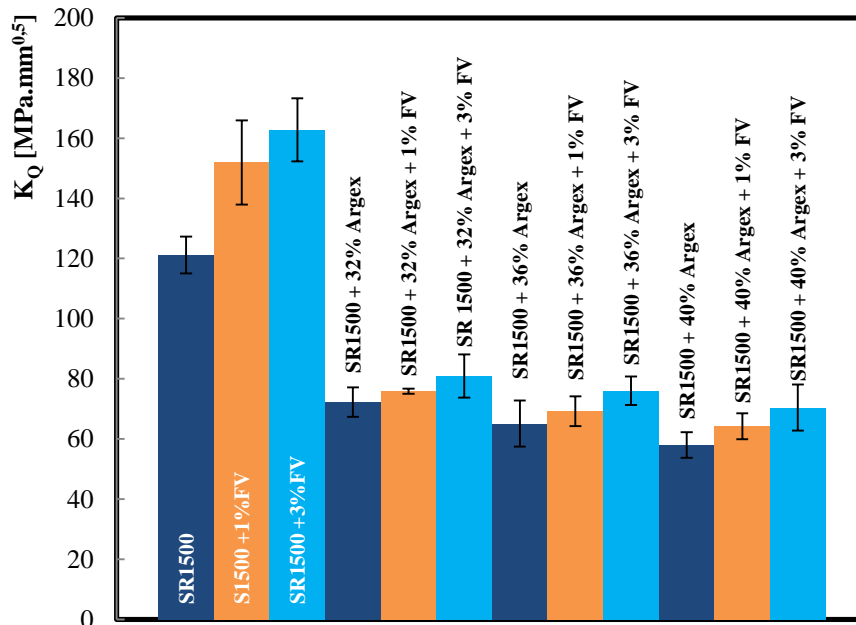


Figura 65 – Valores de K_Q em função das diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e de fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)

Os resultados dos ensaios de tenacidade à fratura versus fração mássica são apresentados na Tabela 29 para a granulometria $\varnothing=1,9\text{mm}$ de partículas de argila expandida. Os resultados são apresentados em termos dos seus valores médios e desvios padrão, do parâmetro de fratura K_Q .

Tabela 29 – Valores médios do parâmetro de fratura K_Q dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa.mm ^{0.5}]				
	X ₁	X ₂	X ₃	X _{médio}	S
SR1500 + 24%Argex	84,2	90,2	74,0	82,8	8,2
SR1500 + 28%Argex	69,7	77,3	74,6	73,9	3,9
SR1500 + 32%Argex	66,0	67,4	68,2	67,2	1,1
SR1500 + 36%Argex	64,0	52,7	61,7	59,5	6,0

Na Figura 66 pode observar-se os valores relativos ao parâmetro K_Q em função da fração mássica de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$) presente no compósito. Verifica-se que o valor de tenacidade à fratura diminui com o aumento da fração mássica.

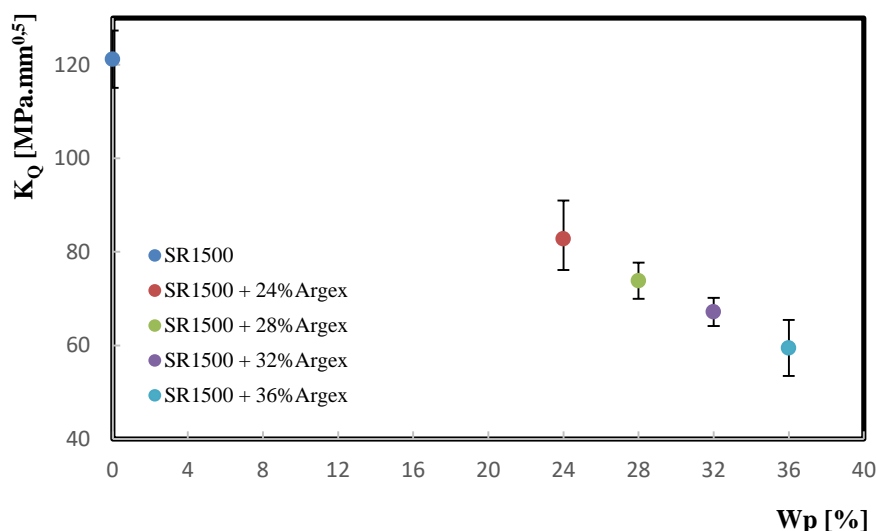


Figura 66 – Valores de K_Q em função das diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)

Os resultados dos ensaios de tenacidade à fratura versus fração mássica são apresentados na Tabela 30 para a granulometria $\varnothing=2,6\text{mm}$ de partículas de argila expandida. Os resultados são apresentados em termos dos seus valores médios e desvios padrão, do parâmetro de fratura K_Q .

Tabela 30 – Valores médios do parâmetro de fratura K_Q dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$).

Amostra	Resultado Experimental [MPa.mm ^{0,5}]				
	X_1	X_2	X_3	$X_{\text{médio}}$	S
SR1500 + 24%Argex	76,9	89,2	76,6	80,9	7,2
SR1500 + 28%Argex	73,5	81,4	73,0	76,0	4,7
SR1500 + 32%Argex	74,3	61,6	75,4	70,5	7,7

Na Figura 67 pode observar-se os valores relativos ao parâmetro K_Q em função da fração mássica de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$) presente no compósito. Verifica-se que o valor de tenacidade à fratura diminui com o aumento da fração mássica.

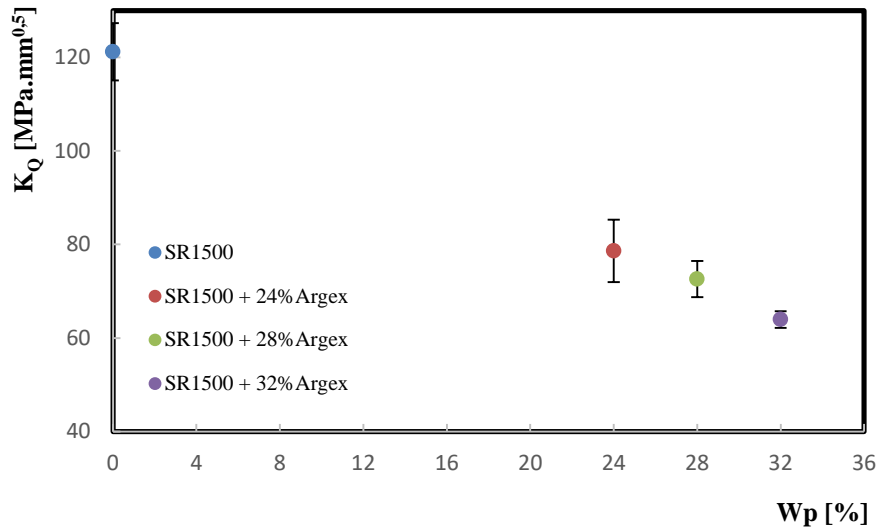


Figura 67 – Valores de K_Q em função das diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)

Na Figura 68 são apresentados os resultados experimentais do parâmetro de tenacidade à fratura (K_Q) versus as frações mássicas de partículas de argila expandida (as três gamas de granulometrias) e de fibras curtas de vidro. Pode-se observar que os valores K_Q diminuem com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida e esta diminuição é mais efetiva para a gama de partículas com granulometrias maior. Os compósitos com menor tamanho de partículas apresentam um melhor desempenho em termos de comportamento à fratura. Assim, o material de granulometria $d=0,7\text{mm}$ com o incremento das frações mássicas de fibras curtas de vidro obtém um aumento significativo no parâmetro de tenacidade à fratura (K_Q).

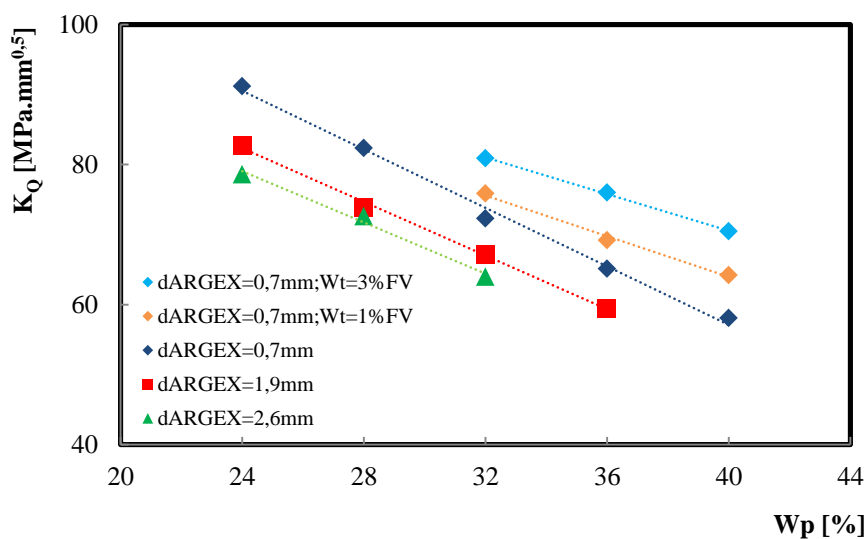


Figura 68 – Valores de K_Q versus as frações mássicas de partículas de argila expandida e fibras curtas de vidro.

4.6. Ensaios de Compressão

A discussão dos resultados dos ensaios de compressão foi analisada com base em quatro aspetos, nos primeiros três foi analisado o comportamento mecânico (tensão máxima e o módulo à compressão) para cada uma das três granulometrias ($\varnothing=0,7\text{mm}$, $\varnothing=1,9\text{mm}$ e $\varnothing=2,6\text{mm}$). No último ponto foi analisada as três granulometrias em conjunto.

4.6.1. Materiais Compósitos Reforçados com Partículas de Argila Expandida $\varnothing=0,7\text{mm}$

A análise dos resultados experimentais da resistência à compressão e do módulo de rigidez permitiram obter as curvas típicas de tensão versus deslocamento dos materiais compósitos de matriz epóxida reforçada com a granulometria $\varnothing=0,7\text{mm}$ de partículas de argila expandida (Figura 69).

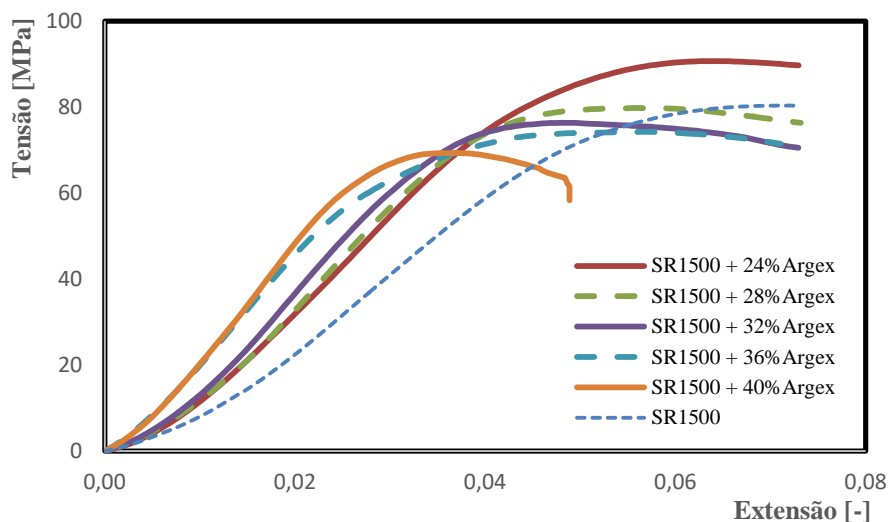


Figura 69 – Curvas típicas de tensão à compressão versus extensão para a resina e para os com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)

Pode-se observar que os materiais compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) ensaiados apresentam o mesmo tipo de comportamento. A partir da análise da Figura 69, pode-se concluir que com a adição de

partículas de argila expandida à resina epóxida SR1500, a resistência mecânica diminui e a rigidez aumenta.

Os resultados experimentais dos ensaios estáticos de compressão (resistência à compressão) são apresentados na Tabela 31 e Figura 70.

Tabela 31 – Valores da tensão à compressão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X _{médio}	S
SR1500	80,4	82,1	81,0	-	-	81,2	0,9
SR1500 + 24%Argex	86,7	87,6	86,8	90,0	89,0	88,0	1,4
SR1500 + 28%Argex	79,8	78,3	78,2	81,2	79,6	79,4	1,2
SR1500 + 32%Argex	76,6	77,0	74,5	75,5	74,8	75,7	1,1
SR1500 + 36%Argex	68,5	69,6	71,3	74,8	82,3	73,3	5,6
SR1500 + 40%Argex	58,4	75,8	70,1	74,0	66,6	69,0	6,9

Na Figura 70 são apresentados os resultados experimentais de tensão máxima à compressão versus a fração mássica de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$). Pode-se observar que os valores de tensão máxima diminuíram com o aumento da fração mássica como seria expectável. Estes resultados apresentam a mesma tendência observada nos ensaios de flexão em três pontos.

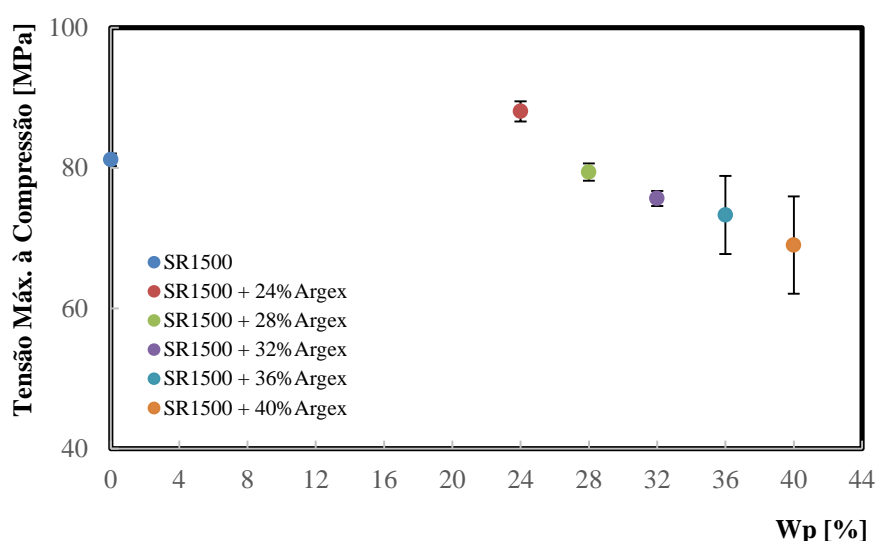


Figura 70 - Tensão máxima à compressão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)

Foram, também processados compósitos de matriz epóxida com diferentes frações de partículas de argila expandida (32, 36 e 40%) e diferentes frações mássicas de fibras curtas de vidro (1% e 3%).

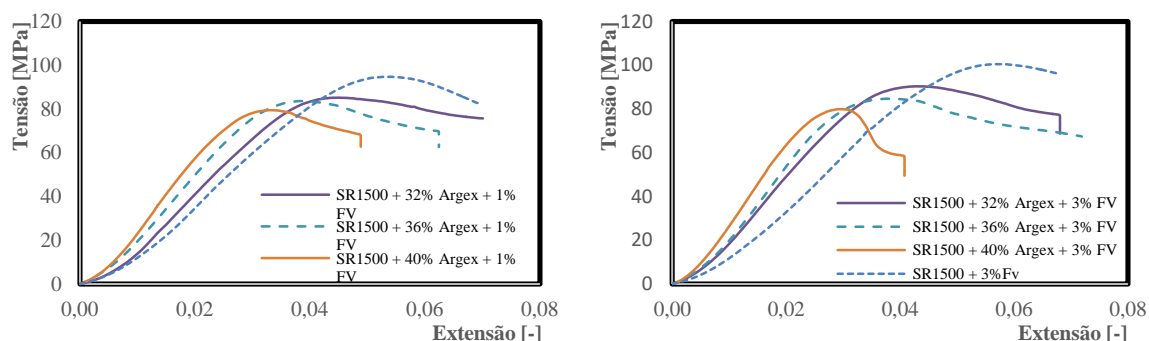


Figura 71 – Curvas típicas de tensão à compressão versus extensão para a resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)

Ao adicionar diferentes frações mássicas de fibras curtas de vidro (1% e 3%) à matriz epóxida reforçada com partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) foi possível observar um aumento da tensão máxima à compressão destes novos materiais (Figura 71). Os valores de resistência mecânica aumentam o que significa que as fibras curtas de vidro vão conferir uma maior resistência ao material, mesmo com frações mássicas de fibras curtas de vidro mais baixas. Os valores obtidos experimentalmente são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – Valores médios da tensão máxima à compressão dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X _{médio}	S
SR1500 + 1%Fv	94,4	94,7	96,6	-	-	95,2	1,2
SR1500 + 3%Fv	103,0	104,0	103,9	-	-	103,6	0,6
SR1500 + 32%Argex+1%Fv	81,2	84,8	84,8	83,4	83,3	83,5	1,5
SR1500 + 32%Argex+3%Fv	89,8	85,3	85,1	90,3	88,2	87,8	2,4
SR1500 + 36%Argex+1%Fv	82,7	79,7	80,3	77,5	82,7	80,6	2,2
SR1500 + 36%Argex+3%Fv	84,7	84,0	84,2	86,4	81,0	84,0	2,0
SR1500 + 40%Argex+1%Fv	77,9	79,4	77,4	77,5	80,8	78,6	1,5
SR1500 + 40%Argex+3%Fv	79,4	81,6	77,9	79,9	81,6	80,1	1,6

Se comparar os valores obtidos com o material compósito reforçado com $W_p= 32\%$ de partículas de argila expandida, com e sem adição de fibras curtas de vidro, nas frações

volúmicas de 1% e 3% (Tabela 31 e Tabela 32), é possível observar que existem diferenças no valor de tensão máxima: na ausência de fibras curtas, o valor médio para o material compósito reforçado com partículas de argila expandida, o valor da tensão máxima é de 75,7 MPa (com desvio padrão de 1,1); com a adição de $W_f=1\%$ fibras curtas de vidro, o valor da tensão máxima aumenta para 83,5 MPa (com desvio padrão de 1,5); ano caso de se aumentar a fração mássica das fibras de vidro para 3% , o valor médio da tensão é de 87,8 MPa (com desvio padrão de 2,4). Este aumento da tensão máxima, dos compósitos reforçados com partículas de argila expandida, para os mesmos materiais reforçados com fibras curtas de vidro é uma caraterística que pode ser observada na Figura 72.

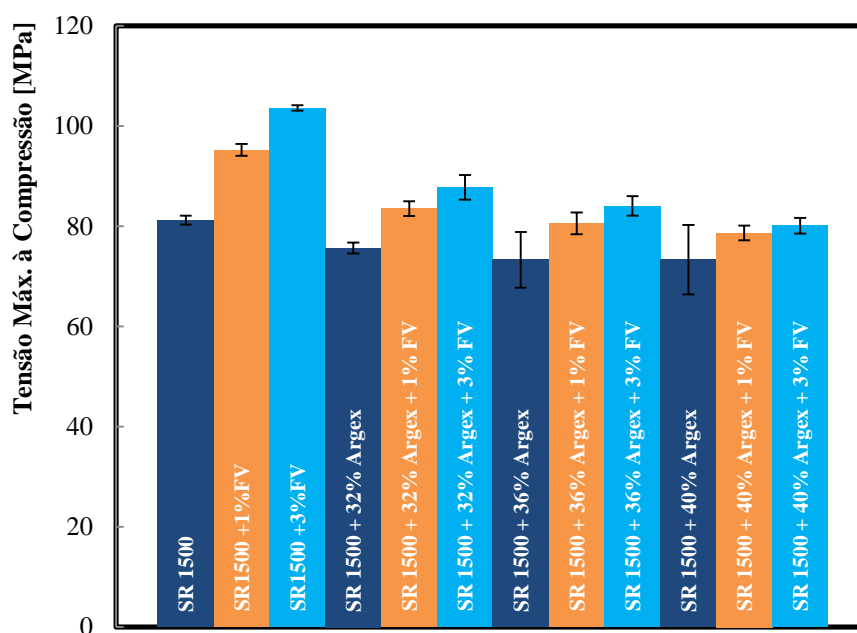


Figura 72 – Tensão máxima à compressão de compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)

Os valores dos resultados experimentais do módulo de elasticidade à compressão são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Valores médios do módulo à compressão de compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida (granulometria $d=0,7\text{mm}$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$X_{\text{médio}}$	S
SR1500	18,6	17,5	19,1	-	-	18,4	0,8
SR1500 + 24%Argex	21,3	21,3	22,0	21,5	21,4	21,5	0,3
SR1500 + 28%Argex	20,3	25,3	24,1	24,7	25,2	23,9	2,1
SR1500 + 32%Argex	24,6	26,0	22,0	26,9	25,5	25,0	1,9
SR1500 + 36%Argex	25,1	22,8	26,0	24,4	28,0	25,3	1,9
SR1500 + 40%Argex	27,0	25,8	25,7	23,6	25,3	25,5	1,2

Na Figura 73, estão representados os valores médios do módulo de elasticidade para os materiais compósitos de matriz epóxida SR1500 reforçados com diferentes frações mássicas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$). Pode-se observar que os valores de módulo de elasticidade aumentam com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida.

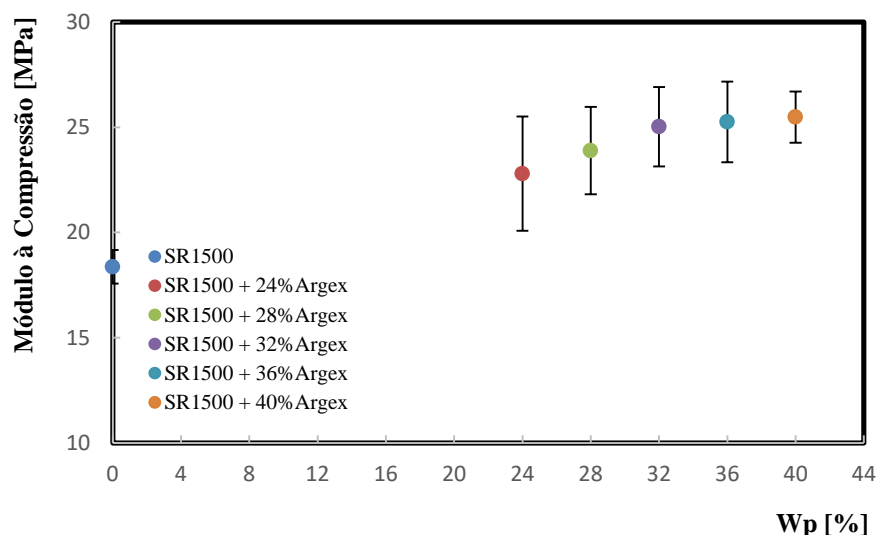


Figura 73 – Módulo de elasticidade à compressão para a resina e para compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$)

Na Tabela 34 são apresentados os valores de módulo à compressão dos materiais compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida (granulometria $\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$).

Tabela 34 – Valores médios do módulo de elasticidade à compressão de compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X _{médio}	S
SR1500 + 1%Fv	26,1	24,2	22,5	-	-	24,2	1,5
SR1500 + 3%Fv	25,3	26,3	25,9	-	-	25,8	0,5
SR1500 + 32%Argex+1%Fv	30,2	30,8	26,4	29,5	25,7	28,5	2,3
SR1500 + 32%Argex+3%Fv	32,4	30,7	28,8	28,7	30,3	30,2	1,5
SR1500 + 36%Argex+1%Fv	33,8	26,7	26,2	29,8	30,5	29,4	3,1
SR1500 + 36%Argex+3%Fv	33,8	33,7	33,6	32,8	35,2	33,8	0,9
SR1500 + 40%Argex+1%Fv	33,5	26,6	33,3	35,5	30,3	31,8	3,5
SR1500 + 40%Argex+3%Fv	32,6	34,5	36,8	38,1	36,1	35,6	2,1

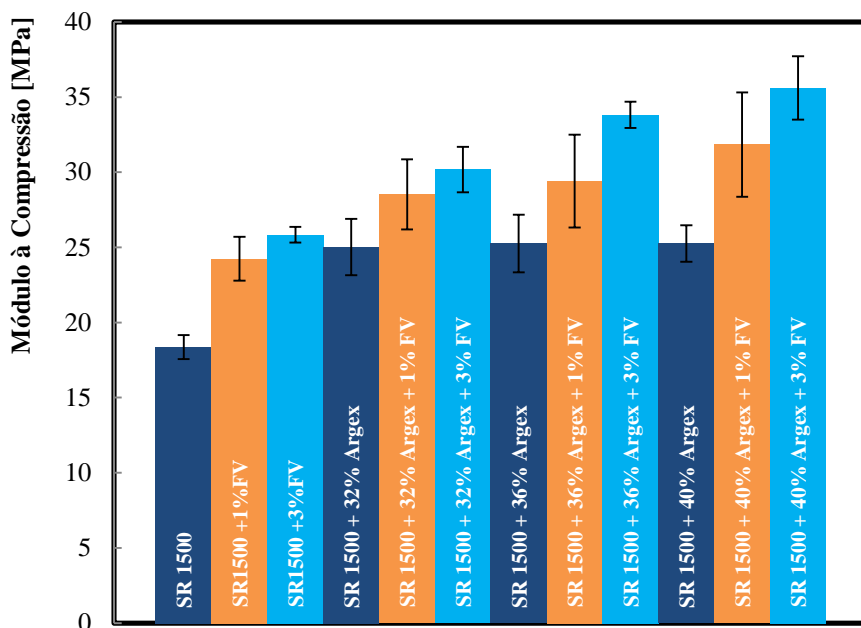


Figura 74 – Módulo à compressão da resina e dos compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) e de fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$)

Verifica-se que com o aumento da fração mássica das fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$) aos compósitos com $W_p=32\%$, $W_p=36\%$ e $V_p=40\%$ de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) obteve um aumento significativo dos respectivos módulos de elasticidade (Figura 74).

4.6.2. Materiais Compósitos Reforçados com Partículas de Argila Expandida $\varnothing=1,9\text{mm}$

A partir da análise dos resultados experimentais do comportamento mecânico (resistência e do módulo à compressão) foi possível obter as curvas típicas de tensão versus deslocamento dos materiais compósitos de matriz epóxida reforçada com a granulometria $\varnothing=1,9\text{mm}$ de partículas de argila expandida (Figura 75).

Pode-se observar que os materiais compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$) ensaiados apresentam o mesmo tipo de comportamento. A partir da análise da Figura 75, pode-se concluir que com a adição de partículas de argila expandida à resina epóxida SR1500, a resistência mecânica diminui e a rigidez aumenta.

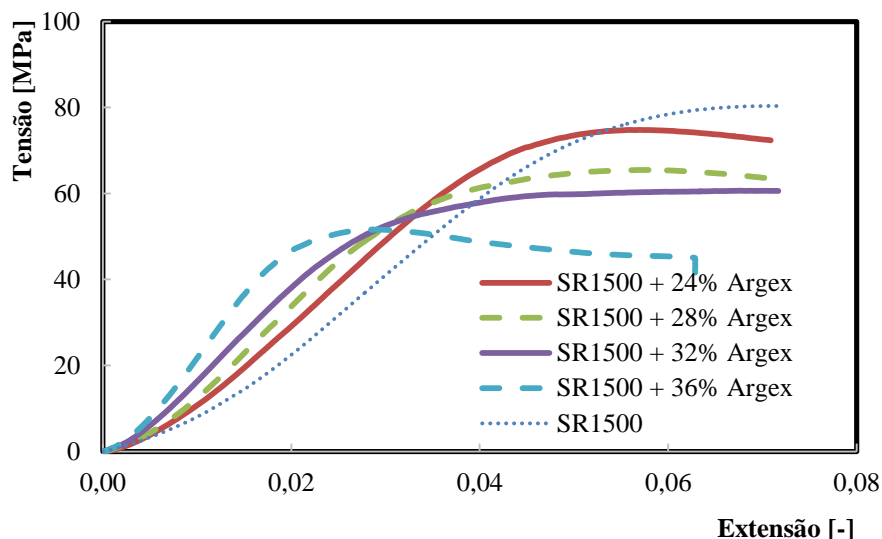


Figura 75 – Curvas típicas de tensão à compressão versus extensão para a resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)

Os resultados experimentais dos ensaios estáticos de compressão (resistência à compressão) são apresentados na Tabela 35 e Figura 76.

Tabela 35 – Valores da tensão à compressão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						S
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X _{médio}	
SR1500 + 24%Argex	73,1	73,5	74,8	72,1	73,1	73,3	1,0
SR1500 + 28%Argex	64,0	66,9	67,2	66,3	68,3	66,5	1,6
SR1500 + 32%Argex	59,4	60,1	55,6	61,6	65,6	60,5	7,1
SR1500 + 36%Argex	51,5	46,4	48,6	48,5	52,0	49,4	2,3

Na Figura 76 são apresentados os resultados experimentais de tensão máxima à compressão versus a fração mássica de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$). Pode-se observar que os valores de tensão máxima diminuíram com o aumento da fração mássica como seria expectável. Estes resultados apresentam a mesma tendência observada nos ensaios de flexão em três pontos.

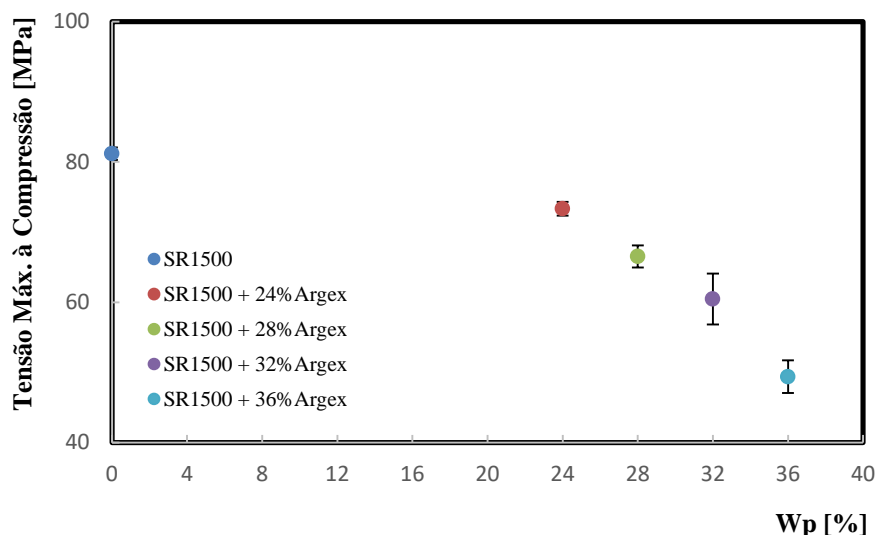


Figura 76 - Tensão máxima à compressão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)

Os valores dos resultados experimentais do módulo de elasticidade à compressão são apresentados na Tabela 36, incluindo os respectivos valores médios assim como os desvios padrão.

Tabela 36 – Valores médios do módulo à compressão de compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X _{médio}	S
SR1500 + 24%Argex	20,6	19,9	19,2	19,6	22,8	20,4	1,4
SR1500 + 28%Argex	21,6	23,0	21,4	23,1	19,8	21,8	1,4
SR1500 + 32%Argex	22,3	19,0	25,9	23,1	23,4	22,7	2,5
SR1500 + 36%Argex	23,8	24,7	23,5	21,1	26,9	24,0	2,1

Na Figura 77 são apresentados os valores médios do módulo de elasticidade para os materiais compósitos de matriz epóxida SR1500 reforçados com diferentes frações mássicas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$). Pode-se observar que os valores de módulo de elasticidade aumentam com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida.

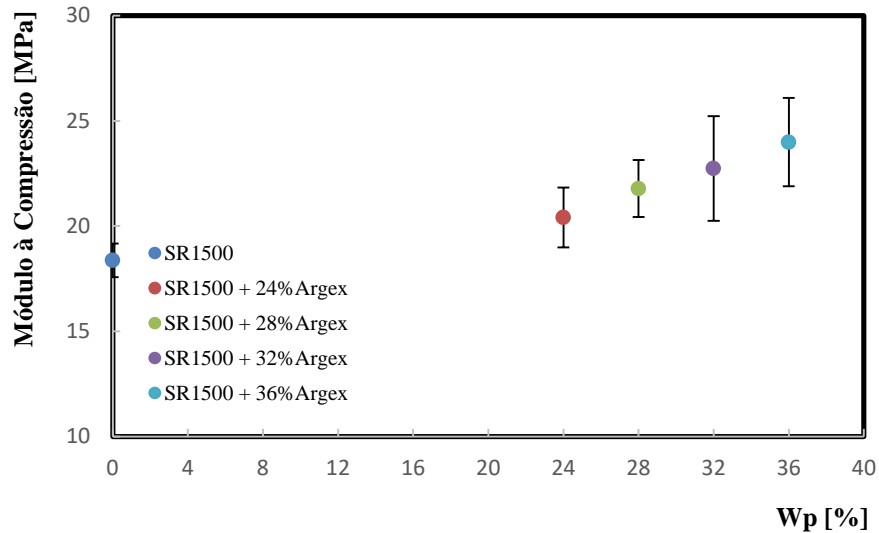


Figura 77 – Modulo de elasticidade à compressão para a resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=1,9\text{mm}$)

4.6.3. Materiais Compósitos Reforçados com Partículas de Argila Expandida $\varnothing=2,6\text{mm}$

A partir da análise dos resultados experimentais relativos ao comportamento mecânico (resistência e do módulo à compressão) foi possível obter as curvas típicas de tensão versus deslocamento dos materiais compósitos de matriz epóxida reforçada com a granulometria $\varnothing=2,6\text{mm}$ de partículas de argila expandida (Figura 78).

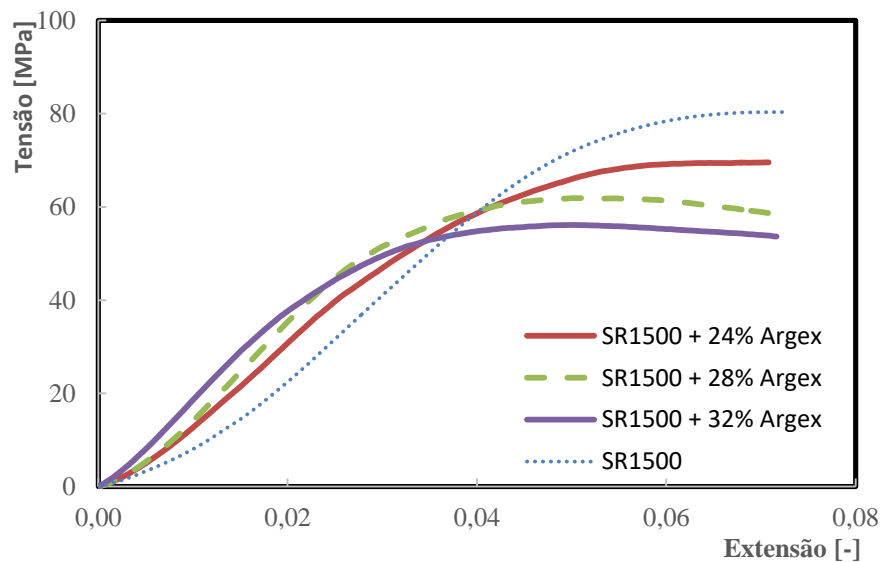


Figura 78 – Curvas típicas de tensão à compressão versus extensão para a resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida (granulometria $d=2,6\text{mm}$)

Pode-se observar que os materiais compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$) ensaiados apresentam o mesmo tipo de comportamento. A partir da análise da Figura 78, pode-se concluir que com a adição de partículas de argila expandida à resina epóxida SR1500, a resistência mecânica diminui e a rigidez aumenta.

Os resultados experimentais dos ensaios estáticos de compressão (resistência à compressão) são apresentados na Tabela 37 e Figura 79.

Tabela 37 – Valores da tensão à compressão da resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X _{médio}	S
SR1500 + 24%Argex	69,6	66,8	67,9	70,8	67,0	68,4	1,7
SR1500 + 28%Argex	60,3	64,2	59,2	61,9	64,4	62,0	2,3
SR1500 + 32%Argex	56,7	54,4	52,9	56,1	49,2	53,9	3,0

Na Figura 79 são apresentados os resultados experimentais de tensão máxima à compressão versus a fração mássica de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$). Pode-se observar que os valores de tensão máxima diminuíram com o aumento da fração mássica como seria expectável. Estes resultados apresentam a mesma tendência observada nos ensaios de flexão em três pontos.

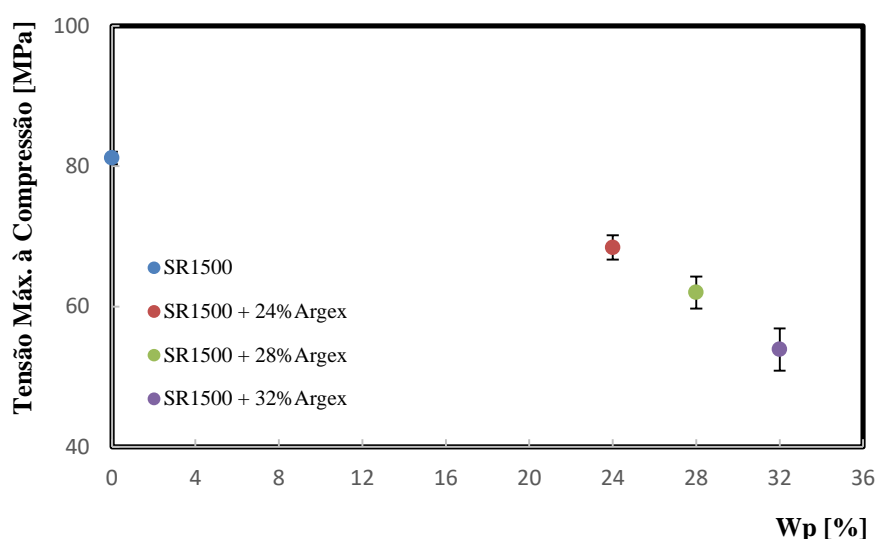


Figura 79 - Tensão máxima à compressão da resina SR1500 e para os compósitos de matriz SR1500 com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida (granulometria $d=2,6\text{mm}$)

Os valores dos resultados experimentais do módulo de elasticidade à compressão são apresentados na Tabela 38, incluindo os respectivos valores médios assim como os desvios padrão.

Tabela 38 – Valores médios do módulo à compressão de compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)

Amostra	Resultado Experimental [MPa]						
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X _{médio}	S
SR1500 + 24%Argex	15,5	18,9	19,3	22,3	22,7	19,7	2,9
SR1500 + 28%Argex	20,3	17,6	21,6	25,7	17,3	20,5	3,5
SR1500 + 32%Argex	23,5	20,2	24,7	21,2	18,0	21,5	2,6

Na Figura 80, estão representados os valores médios do módulo de elasticidade para os materiais compósitos de matriz epóxida SR1500 reforçados com diferentes frações mássicas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$). Pode-se observar que os valores de módulo de elasticidade aumentam com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida.

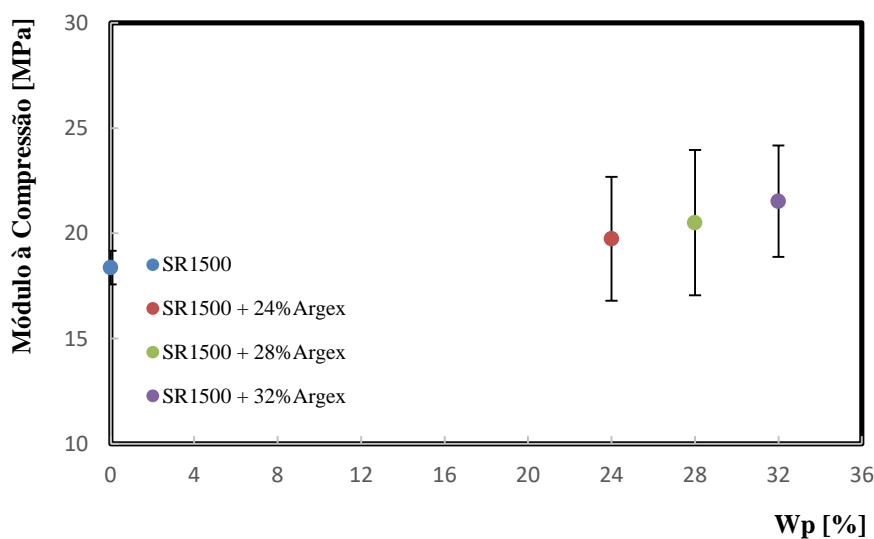


Figura 80 – Módulo de elasticidade à compressão para a resina e para os compósitos com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida ($\varnothing=2,6\text{mm}$)

4.6.4. Análise Comparativa dos Diferentes Compósitos Processados

Na Figura 81 são apresentados os resultados experimentais de tensão máxima à compressão versus a fração mássica de partículas de argila expandida para as três gamas de granulometrias. Pode-se observar que os valores tensão máxima diminuem com o aumento

da fração mássica e que esta diminuição é mais efetiva para a gama de partículas com granulometrias maior. Assim, os compósitos com menor tamanho de partículas apresentam um melhor desempenho em termos de resistência mecânica à compressão. A adição de fibras curtas de vidro na granulometria $\varnothing=0,7\text{mm}$ traduziu-se no aumento da tensão máxima à compressão, melhorando as propriedades mecânicas dos compósitos em estudo. Estes resultados apresentam a mesma tendência observada nos ensaios de flexão em três pontos.

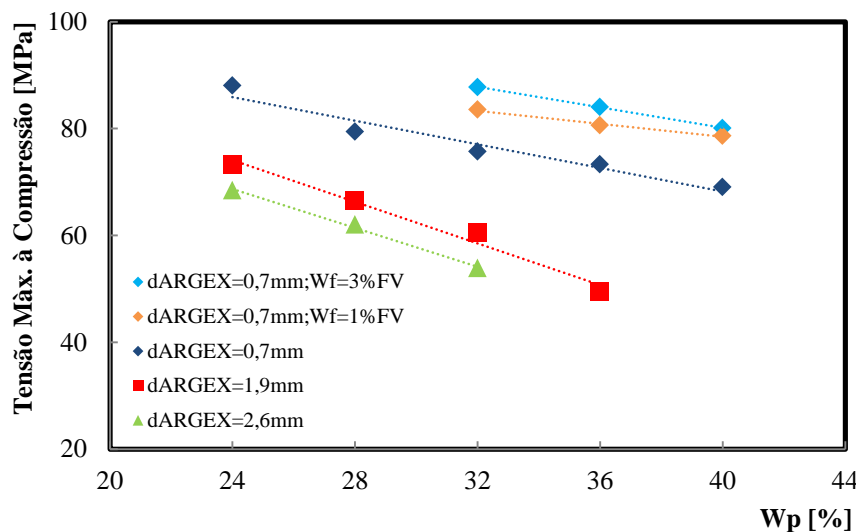


Figura 81– Valores de tensão máxima à compressão versus fração mássica de todas as granulometrias de partículas de argila expandida e de fibras curtas de vidro

Na Figura 82 são apresentados os resultados experimentais de módulo à compressão versus a fração mássica de partículas de argila expandida para as três gamas de granulometrias. Pode-se observar que os valores do módulo à compressão aumentam com o aumento da fração mássica e que esta diminuição é mais efetiva para a gama de partículas com granulometrias maior. Assim, o compósito com menor tamanho de partículas de argila expandida ($\varnothing=0,7\text{mm}$) apresenta um melhor desempenho em termos de rigidez quando comparado com os outros compósitos processados. A adição de fibras curtas de vidro na granulometria $\varnothing=0,7\text{mm}$ aumentou a rigidez com o aumento da fração mássica das mesmas, melhorando as propriedades mecânicas dos compósitos em estudo.

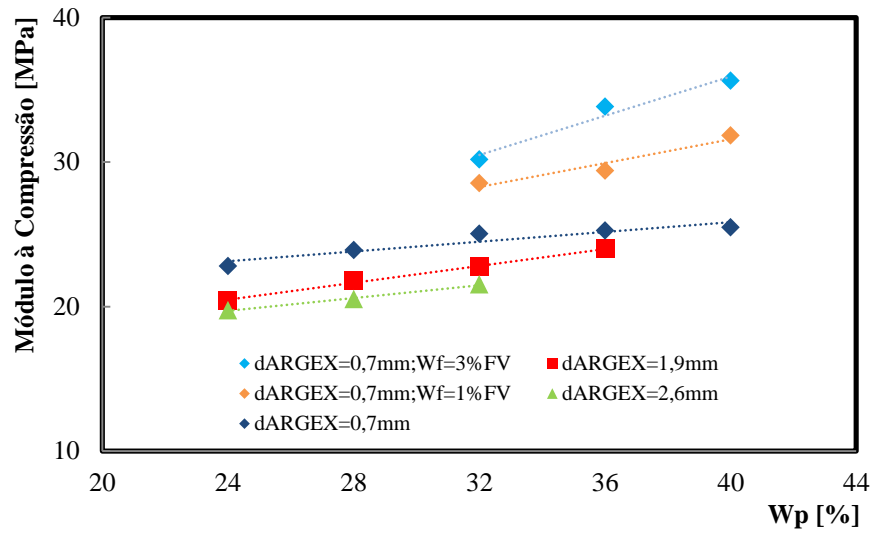


Figura 82 – Valores do módulo à compressão versus fração mássica de todas as granulometrias de partículas de argila expandida e de fibras curtas de vidro

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

5.1. Conclusões

Foram processados e caracterizados em termos físicos e mecânicos diferentes materiais compósitos de matriz polimérica com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida e fibras curtas de vidro. Os materiais foram processados com recurso a técnicas de mistura e vazamento em vácuo.

Ao nível das propriedades físicas:

- Na análise das densidades experimentais e as obtidas com base na lei das misturas, dos materiais processados, foram registadas pequenas diferenças que podem ser explicadas com problemas relacionados com processamento dos materiais (porosidades, tempos e temperaturas de curas), distribuição das partículas na matriz e das fibras de vidro.
- Na determinação do coeficiente de condutividade térmica a partir de placas com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida, foi possível concluir que com o aumento da fração mássica, se verifica uma diminuição dos coeficientes de condutividade térmica. Os compósitos com partículas de argila expandida $\varnothing=2,6\text{mm}$, apresentam coeficientes de condutividade térmica inferior aos compósitos com as granulometrias de diâmetro inferior.
- Na determinação do coeficiente de intensidade sonora a partir de placas com diferentes frações mássicas de partículas de argila expandida, foi possível concluir que com o aumento da fração mássica, se verifica uma diminuição da intensidade sonora. Os compósitos com partículas de argila expandida $\varnothing=2,6\text{mm}$, apresentam coeficientes de intensidade sonora inferior aos compósitos com as granulometrias de diâmetro inferior.

Quanto às propriedades mecânicas:

- Os ensaios estáticos de flexão em três pontos foram realizados e obtidos os valores de resistência mecânica e de módulo de elasticidade. Ao avaliar os resultados conclui-se que os valores de tensão máxima diminuem com o aumento de fração mássica de partículas de argila expandida. Por outro lado,

é possível observar que, com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida há a diminuição da rigidez do material, mas aumento em relação à matriz SR1500. Nos compósitos com partículas de argila expandida $\varnothing=0,7\text{mm}$ ($W_p=32\%$, $W_p=36\%$ e $W_p=40\%$) processados com a adição de fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$), verificou-se com a adição de fibras curtas de vidro uma melhoria da resistência mecânica destes materiais, bem como uma melhoria dos módulos de elasticidade (tendência crescente com o aumento da fração mássica).

- Com base nas curvas de K_Q e *versus* fração mássica de partículas de argila expandida e fibras curtas de vidro, observou-se uma diminuição da tenacidade à fratura com o aumento da fração mássica de argila expandida. Com o aumento da fração mássica de fibras curtas de vidro, observou-se um aumento da tenacidade à fratura para as frações mássicas de argila expandida de 32, 36 e 40% para $\varnothing=0,7\text{mm}$.
- Foram, também, realizados ensaios de compressão com os materiais compósitos processados por forma a obter os valores de resistência à compressão e os valores de rigidez. Foi possível observar que com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida diminui a resistência mecânica à compressão. Este comportamento também se verifica nos ensaios estáticos de flexão em três pontos. Nos compósitos com partículas de argila expandida $\varnothing=0,7\text{mm}$ ($W_p=32\%$, $W_p=36\%$ e $W_p=40\%$) processado com a adição de fibras curtas de vidro ($W_f=1\%$ e $W_f=3\%$) verificou-se um aumento da tensão máxima à compressão com adição das fibras curtas. Por outro lado, observou-se que os valores de módulo de elasticidade aumentam com o aumento da fração mássica de partículas de argila expandida.

5.2. Trabalhos Futuros

Como ponto de partida para trabalhos futuros, na área dos materiais compósitos e no seguimento deste trabalho, poderão ser realizados os seguintes estudos:

Analisar a influência da geometria, do tamanho das micropartículas e a adesão matriz/reforço nas propriedades mecânicas do compósito;

Estudar a influência do tempo de imersão em água nas propriedades dos compósitos processados;

Estudar a influência da exposição aos raios UV nas propriedades mecânicas

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

6. Bibliografia

- [1] - http://ctborracha.com/?page_id=442 visitado em 10/03/17
- [2] - Lucas, E. F.; Soares, B.G.; Monteiro, E.E. C. Caracterização de polímeros: determinação de peso molecular e análise térmica. Rio de Janeiro. e-papers, 336p, 2001.
- [3] - Mercier, J. P.; Maréchal, E. Chimie des polymères: synthèses, réactions, dégradations. PPUR presses polytechniques, 448p, 1993.
- [4] - Matthews, F. L.; Rawlings, R. D.; Composite materials: engineering and science, Great Britain, Chapman & Hall, 470p, 1994.
- [5] - Groover, M. P.; Fundamental of modern manufacturing, John Wiley & Sons, New York, 2002
- [6] - Callister, W. D. e Wiley, J. 1991. Materials Science and Engineering. New York, 1991.
- [7] - Gomes, C. E. 2008. Desenvolvimento de um Painel Sandwich para a Indústria Aeronáutica. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2008.
- [8] - Silva, R. V.; - “Compósito de resina poliuretano derivado de óleo mamona e fibras vegetais”. São Carlos, 2003.
- [9] - Vasconcelos, P. V 2005. Impact fracture study of epoxy-based composites with aluminium particles and milled fibres. Portugal : Journal of Materials Processing technology, 2005.
- [10] - Ventura, A., M. 2009. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. Lisboa : Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2009.
- [11] - Smith, William F. 1998. Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais, 3ª edição. Lisboa : McGraw Hill, 1998.
- [12] - Laney, P., “Use of Composite Pipe Materials in the Transportation of natural Gas”, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Fossil Energy Technologies Department, 2002
- [13] - Flinn, R. A., Trojan, P. 1990. Engineering Materials and Their Applications. s.l. : John Wiley & Sons, Inc, 1990.

[14] - Miracle, B. e Donaldson, L. 1990. Introduction to composites. 4. 1990. Vol. 75.

[15] - Oliveira, D. D. 2008. Introdução à Ciência e Engenharia dos Materiais - Compósitos. Faculdade de Engenharia Civil : ITEC, 2008.

[16] - Ramos, C. (2006). Materiais Compósitos Inteligentes. Tese de Doutorado em Ciência da Engenharia. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia, Porto.

[17] - Pinheiro, D., 2010. Análise Estática e Dinâmica de Painéis Corrugados Construídos em Materiais Compósitos. Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Lisboa : Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2010.

[18] - Moura, Marcelo F.S.F., Morais, Alfredo B. e Magalhães, António G. 2005. Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico. Porto : Publindústria, 2005.

[19] - Wambua P, I., Verpoest, J. 2003. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? Belgium : Elsevier Science, 2003.

[20] - Boari, M. 2003. Modelo Matemático da influência da distribuição de partículas de SiC nas tensões Térmicas em compósitos de matriz metálica. São Paulo, Brasil.2003.

[21] - Rossi, M. (2000) – “As Argilas”, Informativo da Pascoal Equipamentos e Massas Cerâmicas, www.pascoalmassas.com.br.

[22] - Cruz, P. e Jalali, S. (2000) – “Betões leves para aplicações estruturais”, Encontro nacional betão estrutural, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

[23] - Westrupp, F. L. 2008. Análise da Viabilidade da Usinagem de compositos de matriz epoxi com cargas de ferro visando a sua utilização em moldes de injeção. Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

[24] - <http://www.baserevest.com.br/novo/artigos/os-primordios-da-resina-epoxi/>

[25] - Carolin, A. June, 2003. Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements. s.l. : Division of Structural Engineering: Lulea University of Technology, June, 2003.

[26] - Neves, V. 2009. Comportamento mecânico de compósitos com aplicações navais. Aveiro : Universidade de Aveiro, 2009.

[27] - Leal, R. A. P. 2007. Processamento de materiais compósitos - Moldação Aberta. Coimbra: Faculdade de Ciencia e Tecnologia - Universidade de Coimbra, 2007.

[28] - Franco, V. S.. 2008. Produção de Componentes em Materiais Compósitos por. Lisboa : Instituto Superior Técnico, 2008.

[29] - Lopes, F. 2009. Dissertação de Mestrado: Estudo do processo de infusão a vácuo em materiais compósitos. Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Setembro 2009.

[30] - R. A. Damiani, “Estudo do efeito de parâmetros de processamento por injeção nas propriedades mecânicas do nanocompósito de poliamida/fibra de vidro/montmorilonita,” UNESC - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2013.

[31] - Ahmed, S. Jones, F.R. (1990) “A Review of Particulate Reinforcement Theories for Polymer Composites”.Journal of Materials Science 25.

[32] - Branco, C., Mecânica dos Materiais 4ª Edição ed. 2006: Fundação Calouste Gulbenkian

[33] - <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAeoGkAD/ensaio-materiais>

[34] - Davim, J.P. and A.G. Magalhães, Ensaios mecânicos e Tecnológicos 1992: Estante Editora

[35] - J. P. Holman, Thermodynamics, 3ª.ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1986.

[36] - http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f_07.html

[37] - <http://www.sicom.in.com/datasheets/product-pdf39.pdf>

[38] - EPA 833-F-98-002, “How Wastewater Treatment Works... The Basics”, Office of Water (4204), May 1998

[39] - http://assets.fluke.com/manuals/flexcam_umpor0200.pdf

[40] - <http://www.noisemeasurement.com.au/downloads/NL-21.pdf>

[41] - C. O. Affonso e R. J. Sassi, “Aplicação de redes NeuroFuzzy ao processamento de peças automóveis por meio de injeção de polímeros,” Production, 2012