

# Capítulo II

## *Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos*

O presente capítulo visa caracterizar o comportamento mecânico de dois compósitos reforçados com partículas, de casca de arroz e de pó de cortiça, visando uma possível aplicação na indústria do mobiliário. Após a descrição dos materiais utilizados no fabrico dos compósitos, processo de manufactura, provetes, equipamentos e procedimentos experimentais é elaborada uma análise e discutidos os resultados.

## 2.1 Introdução

A noção de compósito é muitas vezes associada à ideia de um material composto por dois ou mais componentes, com o objectivo de melhorar essencialmente as propriedades mecânicas finais. Ao nível macroscópico (acima dos  $10^{-1}$  mm) esta poderá ser uma forma de definir os compósitos, contudo, se a interpretarmos ao nível microscópico (microconstituintes) ela pode ser tão abrangente que engloba basicamente todos os materiais de aplicação industrial. Assim, apesar de aparecerem na literatura da especialidade várias definições [36-41], talvez a mais adequada seja a que define compósito como a combinação de dois materiais que permanecem em fases distintas mutuamente insolúveis, sendo uma delas a matriz e a outra o reforço [41].

Na verdade a combinação de vários materiais com o intuito de obter melhores propriedades não é recente. Podemos dizer que a primeira aplicação de um material compósito surgiu no âmbito da construção civil e remonta ao ano de 450 A.C. Como refere a Bíblia, no Livro do Êxodo (capítulo V, versículo 6 e 7), era enorme a dificuldade em fabricar tijolos sem palha. Mais recentemente a utilização destes materiais veio a implementar-se no campo aeronáutico, onde em 1938 começaram a surgir as primeiras aplicações de painéis de madeira tipo sanduíche de contraplacado. Posteriormente, veio a aplicação da fibra de cânhamo e de resina fenólica nas peças de fuselagem do Spitfire e, na década de 50, começam a ser introduzidas as novas fibras e resinas. Contudo, só no início dos anos 70, com a crise do petróleo, é que o interesse por este tipo de materiais se acentuou, tendo vindo a ser aplicado daí em diante nos mais variados campos industriais. Actualmente os materiais compósitos têm um campo de aplicação muito vasto, encontrando-se na tabela 2.1 alguns casos típicos.

Este tipo de materiais apresenta uma elevada resistência e rigidez específica, quando utilizados materiais de baixa densidade na matriz, assumindo desta forma uma clara vantagem quando comparados com os materiais mais tradicionais (metais). Assim, nos dias de hoje, eles assumem um particular interesse nas indústrias de transporte onde o peso da estrutura está directamente associado ao consumo de energia.

As propriedades mecânicas dos materiais compósitos são dominadas pelo elemento de reforço, o qual é constituído, na maior parte das vezes, por fibras com elevada resistência, rigidez e diâmetro muito reduzido. No entanto o elemento de reforço pode

assumir diferentes formas, nomeadamente, fibras alinhadas contínuas, fibras descontínuas, cristais alongados, partículas e numerosas formas de arquitecturas fibrosas produzidas por tecnologia têxtil, tais como tecidos e entrelaçados [42].

**Tabela 2.1 – Aplicações típicas dos materiais compósitos**

Sector	Aplicação
Aeroespacial	Caixas de motores Componentes estruturais Fuselagem Pás do rotor de helicópteros Assentos de cadeiras Estabilizadores verticais Portas de acesso
Automóvel	Veios Assentos Pára-choques Molas de lâmina Conduatas e sistemas de ventilação Chapas de carroçaria
Desportivo	Cascos de barcos Pranchas de windsurf Tacos de golfe Raquetes
Industrial	Tubos e reservatórios sob pressão Tanques de água Reservatórios diversos Engrenagens Chumaceiras
Medicina	Próteses para membros e articulações Mesas de raios X

Relativamente às matrizes, estas não só protegem os elementos de reforço da abrasão e do meio ambiente, como também promovem a transferência da carga. Todavia, condicionam substancialmente algumas propriedades dos compósitos, pois delas depende muitas vezes a temperatura de trabalho, a resistência a acções externas, as propriedades eléctricas e o próprio processo de fabrico. Actualmente os compósitos de matriz polimérica são os mais usados, apesar da resistência à tracção dos materiais plásticos ser relativamente baixa (apresentando a maior parte das vezes valores inferiores a 70 MPa) [42]. Ainda que sejam largamente aplicadas em compósitos estruturais, as resinas termoendurecíveis apresentam alguns inconvenientes ao nível do

fabrico e tempo de vida dos produtos, reflectindo-se posteriormente nos custos finais. Assim ao contraporem vantagens muito atractivas como baixo custo de fabrico, elevada tenacidade, boa tolerância ao dano e resistência ao impacto, fácil controlo de qualidade e possibilidade de serem recicláveis, não será de estranhar que ao longo dos últimos anos os termoplásticos tenham vindo a assumir-se como uma alternativa muito promissora.

Devido à constituição de um material compósito, as suas propriedades mecânicas dependem não só dos seus constituintes (tipo de fibra e resina, fracção volumétrica, tratamentos das fibras e/ou resina, orientação, diâmetro e dimensão das fibras) mas também de outros factores (processo de fabrico, temperatura, humidade, porosidade da resina, etc.).

As propriedades mecânicas de uso mais corrente são a resistência à tracção e a rigidez, as quais devem ser obtidas em condições padrão, uma vez que a normalização de todas as variáveis se torna bastante difícil. Para além da interface dever assegurar uma eficiente transferência de carga entre o reforço e a resina, sem que ocorra rotura, a resistência e rigidez de um compósito dependem da selecção destes elementos, sendo o primeiro elemento o mais importante [43].

Assim ao nível das resinas, apesar de suportarem uma pequena parcela da carga aplicada, poderemos dizer que quanto mais resistentes forem as matrizes melhor será o seu desempenho no compósito. Por outro lado, as mesmas resinas podem muitas vezes apresentar melhorias nas suas propriedades mecânicas, em virtude dos tratamentos e/ou alterações químicas a que são sujeitas. Estudos de Talbott *et al* [44] mostram, por exemplo, que a cristalinidade da matriz influencia as propriedades mecânicas dos materiais compósitos. Segundo estes autores, ocorre um aumento em cerca de 30%, tanto na resistência à tracção como na rigidez, quando a cristalinidade do polímero, neste caso PEEK, passa de 15 para 40%.

Relativamente aos compósitos de partículas, as propriedades mecânicas são afectadas por um conjunto de parâmetros como: tamanho, forma e distribuição das partículas de reforço [42]. No caso das partículas não esféricas, a sua orientação face à direcção de carregamento revela-se determinante nas propriedades finais do compósito [42]. Capela [42], por exemplo, faz uma revisão dos vários modelos matemáticos capazes de prever o comportamento à tracção destes materiais a partir das propriedades da matriz e do elemento de reforço (partícula). Verifica-se que, de uma forma geral, a

resistência à tracção aumenta com a diminuição do tamanho das partículas, pois o volume de matriz sujeito a uma dada concentração de tensão aumenta com o aumento do tamanho do elemento de reforço. A resistência à tracção também aumenta com o aumento da fracção volúmica de enchimento, contudo, acima de um dado valor esta passa a diminuir como resultado da resina não molhar completamente as partículas. Quanto à forma da inclusão verifica-se que as partículas mais arredondadas promovem menores concentrações de tensões e, conseqüentemente, maior resistência mecânica.

Neste sentido, o presente capítulo pretende caracterizar o comportamento mecânico de dois compósitos reforçados com partículas, visando uma possível aplicação na indústria do mobiliário. Para tal foram realizados ensaios de flexão em 3 pontos para obter a resistência à flexão dos materiais propostos bem como a sua tenacidade à fractura. Paralelamente foram realizados ensaios Charpy para determinar a energia de impacto para cada compósito e, finalmente, com recurso ao DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analysis) foi determinada a temperatura de transição vítrea e a variação da rigidez com a temperatura. O efeito da absorção da água também foi averiguado para os materiais em estudo e todos os resultados obtidos foram comparados com o polímero de base.

Para tal no ponto seguinte é efectuada uma descrição exaustiva dos materiais utilizados no fabrico dos compósitos, assim como o seu processo de manufactura, provetes, equipamentos e procedimentos experimentais utilizados. Na secção 3.3 é feita uma análise e discussão de resultados apresentando-se, finalmente, na secção 3.4 as principais conclusões.

## 2.2 Materiais, Provetes, Equipamentos e Técnicas Experimentais

### 2.2.1 Materiais Utilizados

Como vimos anteriormente, o recurso aos materiais compósitos é cada vez mais acentuado. Se por um lado a sua rigidez e resistência específica é determinante, por

outro, o impacto das actividades antrópicas no meio ambiente fez com que as empresas instituíssem uma estratégia de “actuação responsável”, de modo a reduzir o impacto ambiental das suas actividades industriais [45]. Neste contexto tem-se assistido ao desenvolvimento de novos processos que visam reaproveitar e/ou reciclar os resíduos provenientes não só dos processos industriais como os gerados na agricultura e na sociedade civil em geral. Procura-se cada vez mais que um material deixe de ser resíduo, pela sua valorização como matéria-prima, e seja inserido na produção de novos produtos. Neste caso o resíduo passa a ser tratado como sub-produto do processo produtivo [46].

Tendo como base esta filosofia, o presente trabalho pretende caracterizar dois compósitos que utilizam como elemento de reforço dois resíduos da nossa indústria agrícola, o pó de cortiça e a casca de arroz, com vista a uma possível inclusão na indústria do mobiliário. Na verdade já na década de 1990 se fabricavam perfis de plásticos com resíduos de madeira, WPC (Wood Polymer Composites), dando origem à expressão “Madeira plástica” que, segundo a ASTM (American Society for Testing and Materials), se aplica aos produtos manufacturados com um conteúdo de plástico superior a 50% [47]. Mais recentemente, em 2007, um estudo efectuado pelo Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas sobre o enfoque de “Tecnologias consideradas ecologicamente correctas” apresenta a casca de arroz como um dos resíduos mais versáteis, pois “(...) *pode ser utilizada como fonte de energia em usinas termelétricas e como fonte de sílica, utilizada na produção de pastas de dente e pneus. A casca de arroz pode virar aglomerado na produção de chapas de madeira, com baixo custo e altíssima qualidade. Assim, podem ser produzidos móveis derrubando menos árvores*” [47].

A razão de utilizar a cortiça neste estudo recai no facto de Portugal ser responsável por 54% da sua produção mundial, assumindo assim um peso bastante importante na economia nacional, dado que 90% é dedicada à exportação. Por outro lado, o sobreiro ocupa mais de 22% da área florestal e tem-lhe associado uma indústria que transforma cerca de 70% da cortiça produzida em todo o mundo. Estes dados conferem-nos o estatuto de líder mundial na produção, transformação e exportação de cortiça [48].

No entanto o pó de cortiça é o resíduo que é produzido em maior quantidade por este sector, cerca de 53545 toneladas/ano (segundo o relatório do Plano Nacional de Prevenção dos Resíduos Industriais) [49], e é proveniente essencialmente das operações

de granulação/trituração da cortiça e das operações de rectificação e acabamentos. O destino deste pó é actualmente a queima nas caldeiras quer da própria indústria corticeira quer na cedência para a indústria cerâmica. Apenas uma pequena percentagem é utilizada na operação de colmatação de rolhas de cortiça natural de qualidade inferior.

Pretende-se assim valorizar este resíduo, pois a cortiça já se encontra suficientemente caracterizada [50-58], sendo reconhecido que a generalidade das suas propriedades resulta da sua estrutura celular. Podemos realçar a baixa densidade, baixa condutibilidade térmica e acústica, elevada impermeabilidade e resiliência, capacidade de absorção de vibrações e elevado coeficiente de atrito. A tudo isto associa-se ainda o facto de ser um material natural e reciclável, fazendo dela uma matéria-prima bastante atractiva.

Quanto ao uso das cascas de arroz, em forma de cinza, a sua utilização deve-se ao facto de ser um material com alguma abundância no nosso país e, conforme já foi referido em [49], com alguma possibilidade de ser aplicada na indústria do mobiliário.

A casca de arroz (CA) não é mais do que o revestimento (ou uma capa protectora) formado durante o crescimento dos grãos de arroz que, após a sua separação, possui baixo valor comercial. Basicamente destina-se à queima, nas próprias indústrias de descasque, pelo facto do  $\text{SiO}_2$  e das suas fibras não possuírem qualquer valor nutritivo e, como tal, não servirem para a alimentação humana ou animal [59]. Segundo a literatura as CA contêm 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica em base anidra [60, 61]. No entanto a sua combustão gera cinzas com formas estruturais variáveis (amorfa e/ou cristalina) que depende do tipo de equipamento e queima usado, bem como do tempo e da temperatura de queima. Por exemplo a CA queimada a  $800^\circ\text{C}$  durante duas horas gera cinza residual constituída por sílica em forma cristalina de quartzo [45]. No entanto, para temperaturas entre os  $450^\circ\text{C}$  e os  $700^\circ\text{C}$  durante um período de três a quatro horas obtém-se sílica no estado amorfo [45], apresentando como principais propriedades: baixa condutividade térmica e elevada resistência ao choque térmico [59]. No entanto não existe na literatura uma concordância relativamente a estes dados. Segundo Mehta, citado por Pádua *et al* [60], a sílica não cristalina pode ser obtida a temperaturas de queima inferiores a  $500^\circ\text{C}$  por tempos prolongados e em atmosfera rica de oxigénio, ou então por queima até  $680^\circ\text{C}$  em menos de um minuto. Della *et al* [62] é da mesma opinião, afirmando que quando a temperatura de queima da cinza de CA é baixa, ou quando o tempo de exposição da mesma a altas temperaturas é pequeno, a

sílica contida na cinza é predominantemente amorfa. Ou seja, quanto menos tempo a cinza ficar exposta a uma elevada temperatura, menos cristalização ocorre.

Tibini [63] apresenta uma compilação da composição química de várias cinzas de CA, observando-se que os teores de sílica variam entre os 87% e os 95%. Como principais impurezas surgem os álcalis  $K_2O$  e  $Na_2O$ , com valores até 6.5%, e outras como o  $CaO$  e o  $MgO$ , mas nunca superiores a 2%. Segundo este autor as diferenças observadas podem resultar essencialmente da sua origem e/ou quanto à utilização de fertilizantes agrícolas. Para além da sílica a cinza da CA possui carbono, na ordem dos 3-18 % não queimado, cuja proporção é responsável pela sua coloração (preta ou branca) [60].

### 2.2.2 Processo de Manufactura dos Compósitos

Dois tipos de compósitos foram fabricados, tendo sido para tal usada uma resina de polyester Hetron 92 FR fornecida pela Ashland Chemical Hispania. Um dos elementos de reforço utilizado foi o pó de cortiça, que antes de ser adicionado à resina foi seco numa estufa da marca Heraus, modelo UT 6060 (figura 2.1), à temperatura de 40°C durante duas horas. Posteriormente, foi colocado num excicador (figura 2.2) onde arrefeceu até à temperatura ambiente e ficou armazenado até à sua utilização. O processo de queima da casca de arroz foi realizado de acordo com Ferro *et al* [45] e decorreu em duas fases. Na primeira a casca foi aquecida num forno, a uma temperatura entre 300 e 350 °C, durante 40 minutos para a volatilização de toda água e hidrocarbonetos. Após a eliminação de todos os voláteis a temperatura foi então elevada para 600 °C onde, durante uma hora, se obteve a cinza por total combustão da matéria. A sua cor escura (cinza escuro) evidencia a presença de carbono residual. Para tal foi utilizado um forno da marca Carbolite Furnaces com uma temperatura máxima de 1000°C e, ao contrário do que estes autores fizeram, a cinza neste trabalho não foi moída.

A resina e o endurecedor foram então misturados com cada um dos elementos de reforço num misturador eléctrico e, posteriormente, vazados num molde com as dimensões de 400x200x6 mm. Para cada um dos compósitos em estudo foram

manufacturadas placas com as fracções mássicas de 1%, 2.5% e 5% de material de reforço. O processo de cura decorreu à temperatura ambiente.



**Figura 2.1 – Estufa “Heraeus”**



**Figura 2.2 – Excicador**

### 2.2.3 Provetes

Os provetes foram manufacturados a partir das placas de 400x200 mm e espessura de  $6\pm 0.2$  mm, fabricadas segundo o procedimento descrito no parágrafo anterior. Posteriormente, e com recurso a uma serra de corte com disco diamantado, as placas foram cortadas para as geometrias desejadas. Houve um cuidado especial em evitar o aumento da temperatura nos provetes durante o processo de corte.

Dado que ao longo do trabalho foram realizados vários tipos de ensaios, seguidamente serão ilustradas as geometrias dos provetes usadas em cada um deles. Assim, para os ensaios de flexão em três pontos foi usada a geometria indicada na figura 2.3, a qual está de acordo com a norma ASTM D790.

Relativamente aos ensaios realizados para obter a tenacidade à fractura dos compósitos foram utilizados provetes de acordo com a norma ASTM D5045-96, cuja geometria está indicada na figura 2.4. Houve um particular especial na manufactura do entalhe, de modo a cumprir o estipulado pela norma, tendo sido para tal utilizada uma fresa especial.

No que diz respeito aos ensaios de resistência ao impacto, ensaios Charpy, estes decorreram em provetes com a geometria indicada na figura 2.5, a qual está de acordo com a norma ASTM D256. Na manufactura destes provetes, mais uma vez, recorreu-se a uma freza com uma geometria especial para a abertura do entalhe.

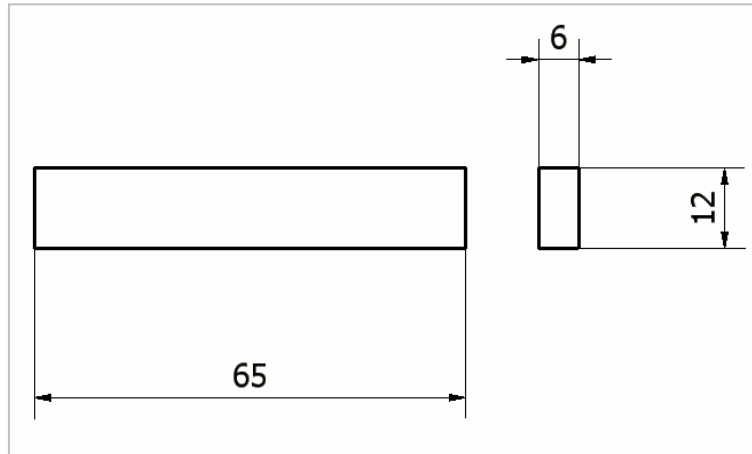


Figura 2.3 - Geometria dos provetes utilizados nos ensaios de flexão em 3 pontos

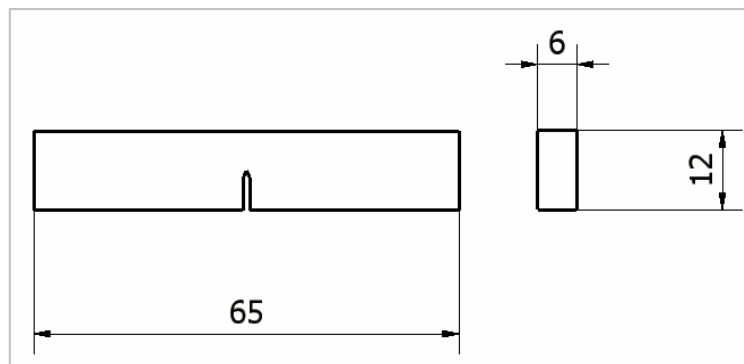


Figura 2.4 - Geometria dos provetes utilizados nos ensaios de tenacidade à fractura

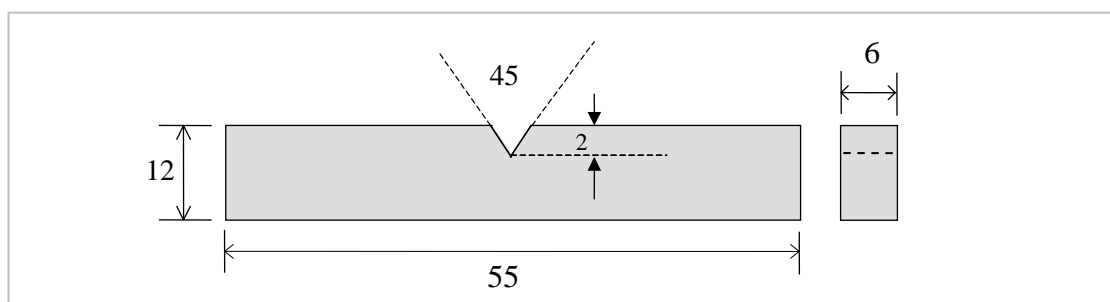


Figura 2.5 - Geometria dos provetes utilizados nos ensaios Charpy

Finalmente a determinação da temperatura de transição vítrea e a variação da rigidez com a temperatura foram realizadas com recurso ao DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analysis), estando, neste caso, os provetes sujeitos à geometria do porta-amostras. Para tal, foram então cortados provetes com 30x12 mm e espessura de  $2\pm 0.2$  mm. O estudo da absorção da água utilizou provetes de igual geometria com 30x12 mm e espessura de  $4\pm 0.2$  mm.

## 2.2.4 Equipamentos

Os ensaios para determinar a resistência à flexão e a tenacidade à fractura foram realizados numa máquina do tipo electromecânico, Zwick modelo 1435, figura 2.6, com uma capacidade de carga de 5 kN e uma velocidade máxima do travessão de 50 mm/min.



**Figura 2.6 - Máquina Zwick modelo 1435, utilizada nos ensaios de flexão**

Esta máquina é constituída por um motor que, através de um sistema de polias e correias, transmite o movimento a dois parafusos sem-fim. Estes, por seu turno, fazem movimentar verticalmente o travessão superior da máquina que, desta forma, aplica a carga ao provete a ensaiar. O controlo é feito por uma consola eléctrica de comando, a qual permite ainda a aquisição em tempo real dos sinais da carga, deslocamento do travessão e extensão do provete. Finalmente, os resultados podem ser registados numa impressora, ou adquiridos por uma porta interface IEEE-488 que possibilita a ligação da consola a um computador.

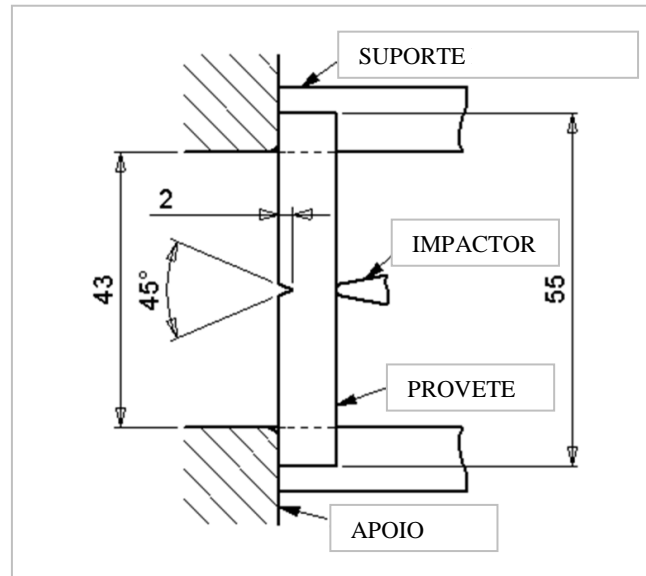
No que concerne aos ensaios para obter a resistência ao impacto, ensaios Charpy, estes foram realizados numa máquina da marca Ceast, modelo 6545.



**Figura 2.7 - Máquina Ceast modelo 6545 utilizada nos ensaios Charpy**

O funcionamento desta máquina é em muito semelhante ao de um martelo pendular. Neste caso, o martelo com uma massa de 500g, é deixado cair de uma certa posição, adquirindo assim uma dada energia inicial. Ao cair ele encontra no seu percurso o provete, que após desferir-lhe um golpe, continua a sua trajectória até parar numa determinada altura, que corresponde à energia final. Pela diferença de energias, inicial e final, obtém-se então a energia absorvida pelo material. É de salientar que o impacto dá-se na superfície oposta à que contém o entalhe, conforme ilustra a figura 2.8.

Neste tipo de ensaios é conhecida a massa do martelo, a sua altura inicial de queda e a aceleração da gravidade, pelo que o parâmetro a determinar é a altura final do martelo após impacto com o provete.



**Figura 2.8 - Detalhe esquemático do posicionamento do provete na máquina**

As propriedades macroscópicas em função da temperatura foram obtidas com recurso ao DMTA da marca Triton Technology, modelo Tritec 2000, ilustrada na figura 2.9.



**Figura 2.9 - Equipamento DMTA da marca Triton Technology, modelo Tritec 2000**

Podemos assim definir o comportamento viscoelástico dos materiais, através da aplicação de duas forças, sendo uma estática e outra dinâmica. Cada uma destas forças é controlada por sistemas totalmente independentes. A componente elástica e a componente viscosa do material são definidas pela análise da resposta a uma força dinâmica, que actua sobre a amostra de acordo com uma ou um conjunto de frequências pré-estabelecidas em determinadas condições de temperatura. A força dinâmica é proveniente do deslocamento de um transdutor eletro-magnético, onde a calibração de intensidade da força é feita pela corrente que passa através da bobine. Esta corrente varia de acordo com a força dinâmica pré-estabelecida para o ensaio. O transdutor está por sua vez ligado a uma haste que sustenta a parte móvel do porta-amostra. O comportamento do material devido a este movimento dinâmico é detectado por um sensor acoplado à haste e, através dele, obtém-se a curva de resposta. Esta é analisada com recurso a um software, determinando-se assim a componente viscosa e elástica do material.

Finalmente no estudo de absorção da água foi utilizada uma balança da marca Sartorius, modelo Research RC 210P, a qual apresenta uma precisão de 0,00001 g.

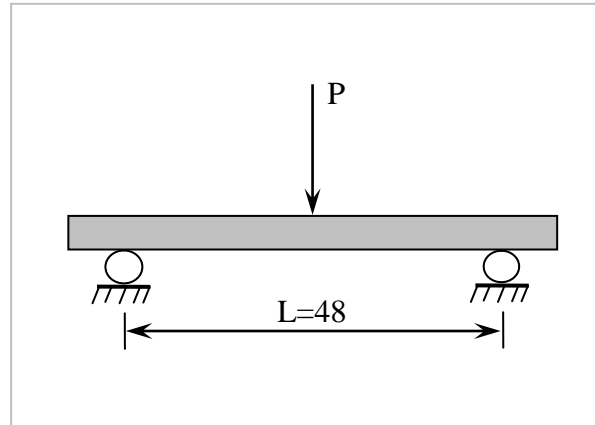
### 2.2.5 Técnicas Experimentais

As propriedades à flexão dos materiais em estudo foram obtidas através de ensaios de flexão em três pontos, realizados à temperatura ambiente e segundo o procedimento descrito na norma ASTM D790.

Os ensaios foram realizados numa máquina do tipo electromecânico da marca Zwick, modelo 1435 (descrita em 2.2.4), e para uma velocidade de deslocamento da amarra de 1 mm/min. Os provetes utilizados apresentam a geometria descrita em 2.2.3. Para cada condição de ensaio foram usados cinco provetes, tendo sido os dados posteriormente tratados em função dos respectivos valores médios. A tensão é obtida pela seguinte equação:

$$\sigma = \frac{3 P L}{2 B W^2} \quad (2.1)$$

onde P é a carga, L o comprimento entre apoios (figura 2.10), B a espessura e W a altura do provete.



**Figura 2.10 - Vista esquemática do provete e aplicação da carga**

A tenacidade à fractura dos diferentes materiais foi obtidas através de ensaios de flexão em três pontos, realizados à temperatura ambiente e segundo o procedimento descrito na norma ASTM D5045-96.

Os ensaios foram realizados numa máquina do tipo electromecânico da marca Zwick, modelo 1435 (descrita em 2.2.4), e para uma velocidade de deslocamento da amarra de 1 mm/min. Os provetes utilizados apresentam a geometria descrita em 2.2.3. Para cada condição de ensaio foram usados quatro provetes, tendo sido os dados posteriormente tratados em função dos respectivos valores médios.

De acordo com a referida norma o factor intensidade de tensões para o modo I, à flexão, é calculado pela seguinte expressão matemática:

$$K_{Ic} = \frac{P_Q}{B\sqrt{W}} \left\{ \frac{6\sqrt{c} [1.99 - c(1-c)(2.15 - 3.93c + 2.7c^2)]}{(1+2c)(1-c)^{3/2}} \right\} \quad (2.2)$$

onde  $P_Q$  é a carga máxima, neste caso onde ocorreu a rotura frágil,  $c = a/W$ , “a” o comprimento da fenda (obtido por microscopia óptica), B a espessura e W a altura do provete.

A resistência ao impacto dos diferentes materiais foi obtida através de ensaios Charpy, realizados à temperatura ambiente e segundo o procedimento descrito na norma ASTM D256.

Os ensaios foram realizados na máquina Ceasr, modelo 6545 (descrita em 2.2.4), e os provetes utilizados apresentam a geometria descrita em 2.2.3. Para cada condição de ensaio foram usados cinco provetes, tendo sido os dados posteriormente tratados em função dos respectivos valores médios.

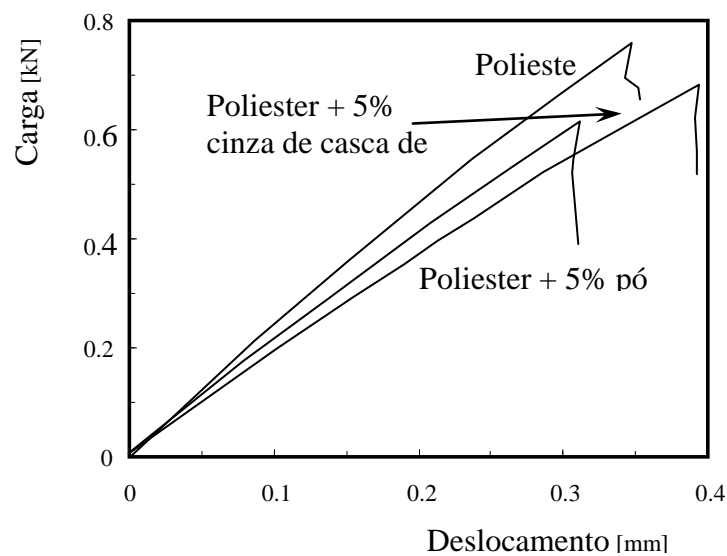
Relativamente ao comportamento viscoelástico dos materiais ele foi obtido com recurso ao equipamento (DMTA) Triton Technology, modelo Tritec 2000, descrito em 2.2.4 e com a geometria dos provetes descrita em 2.2.3. Os materiais foram ensaiados para um deslocamento de 0.05 mm a 1Hz e 10 Hz, na faixa de temperatura entre -150 e 200°C. Em todos os ensaios realizados a taxa de aquecimento foi de 2°C/min em atmosfera de nitrogénio a 50ml/min. Para cada uma das condições foram ensaiados três provetes, sendo os resultados tratados em função dos respectivos valores médios.

Finalmente o estudo da absorção de água foi efectuado de acordo com a norma BS EN ISO 62:1999 e com o estudo [64]. Para tal, começou-se por secar os provetes à temperatura de 40°C durante duas horas numa estufa da marca Heraeus, modelo UT 6060 (figura 2.1). Posteriormente foram colocados num excicador onde arrefeceram até à temperatura ambiente (figura 2.2). As amostras foram então mergulhadas num banho de água desionizada a 25°C e após 24 horas foram removidas. Com um pano seco retirou-se o excesso de água e então pesadas numa balança (marca Sartorius, modelo Research RC 210P) com precisão de 0,00001 g, voltando novamente a ser imersas. Este ciclo foi repetido regularmente até às 888 horas de exposição. A absorção de água foi calculada pela diferença de peso, sendo a sua representação, em percentagem, expressa graficamente.

## 2.3 Análise de Resultados

A resistência à flexão dos diferentes materiais em estudo foi obtida a partir de ensaios de flexão em 3 pontos, segundo o procedimento experimental descrito em 2.2.5.

Assim, na figura 2.11 ilustram-se três curvas típicas carga-deslocamento obtidas para a resina e para os compósitos com 5% de elemento de reforço. Podemos dizer que elas são representativas de todas as condições ensaiadas e para todos os materiais em estudo. Estas curvas pautam-se por um comportamento quase linear, desde o início do carregamento até ao valor da carga máxima que, após ser atingida, decai significativamente. Para todos os materiais em estudo podemos dizer que eles apresentam um comportamento frágil.

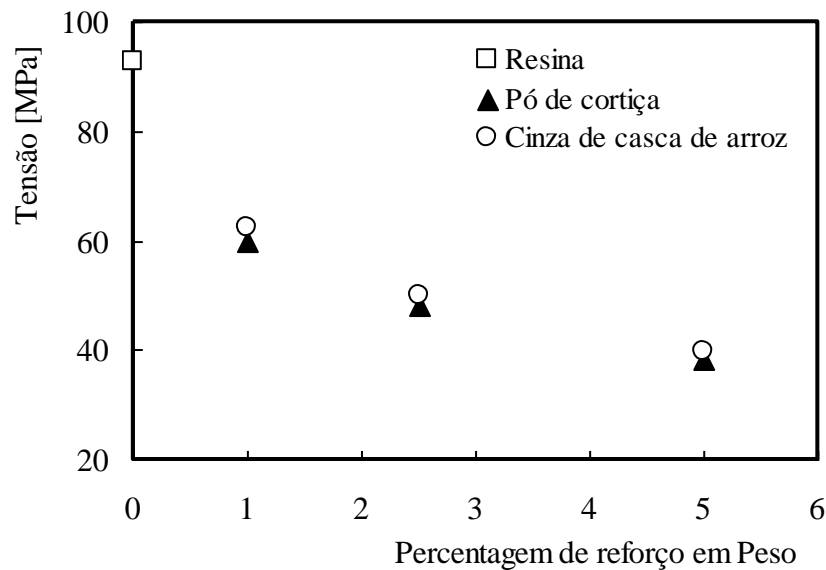


**Figura 2.11 - Curvas carga-deslocamento típicas para o Polieste, Polieste+5% de pó de cortiça e Polieste+5% de cinza de casca de arroz**

Na tabela 2.2 encontram-se representados os resultados de todos os ensaios realizados, bem como o seu valor médio e respectivo desvio padrão. Podemos verificar que a introdução de partículas diminui a resistência à flexão, sendo esta mais acentuada para o compósito reforçado com pó de cortiça. Neste caso assistimos a uma redução da resistência à flexão em 36% entre o compósito com 1% em peso de pó de cortiça e o de 5%. Por outro lado, a diferença da resistência entre a resina e o compósito com 5% em peso de pó de cortiça atinge os 59%. Para igual comparação, mas neste caso com cinza de casca de arroz, obtemos, respectivamente, valores de 36% e 57%. Esta evolução encontra-se representada na figura 2.12.

**Tabela 2.2 – Propriedades à flexão dos diferentes materiais em estudo**

Material	Carga [N]	$\sigma_R$ [MPa]	$\sigma_R$ médio [MPa]	Desv. Padrão [MPa]
Polyester	958.0	89.3	92.8	4.63
	1043.8	98.4		
	951.9	88.9		
	1302.8	97.3		
	989.4	90.2		
Compósito (1% de pó cortiça)	527.9	55.7	59.8	3.87
	619.5	65.1		
	594.1	62.3		
	466.8	57.1		
	622.3	58.5		
Compósito (2.5% de pó cortiça)	584.5	47.0	48.3	3.94
	631.2	51.5		
	484.4	44.2		
	705.5	53.2		
	547.8	45.3		
Compósito (5% de pó cortiça)	508.7	36.9	38.2	2.04
	495.6	38.3		
	532.4	41.7		
	491.2	37.3		
	517.9	36.7		
Compósito (1% de cinza de casca de arroz)	568.1	54.8	62.2	5.70
	660.2	70.8		
	594.1	61.6		
	623.5	62.7		
	608.3	61.3		
Compósito (2.5% de cinza de casca de arroz)	464.1	48.7	50.1	1.56
	525.6	52.6		
	446.2	49.8		
	500.4	50.3		
	498.2	48.9		
Compósito (5% de cinza de casca de arroz)	446.2	45.3	39.7	3.77
	427.4	41.2		
	407.9	37.8		
	410.3	39.1		
	391.9	35.4		



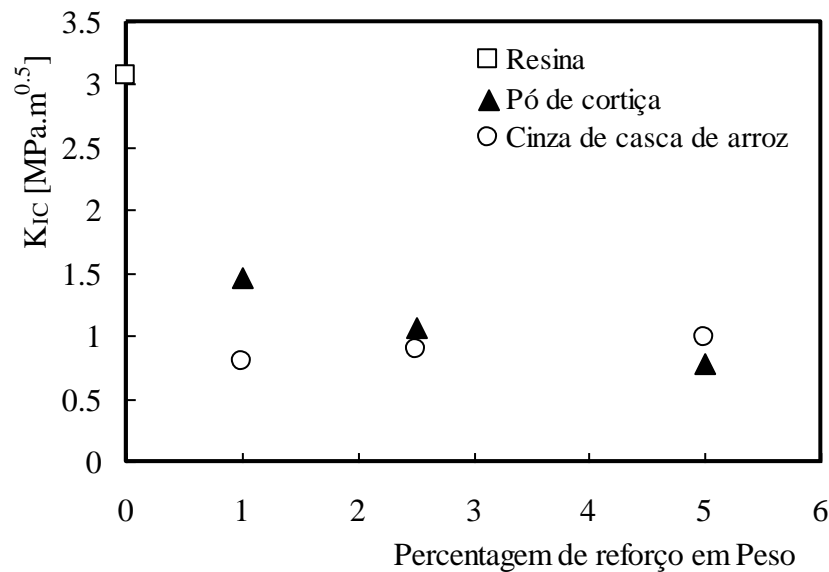
**Figura 2.12 - Resistência à flexão para os diferentes materiais em estudo**

Relativamente ao estudo de tenacidade à fractura os valores obtidos, de acordo com o procedimento experimental descrito em 2.2.5, encontram-se representados na tabela 2.3 e a sua evolução ilustrada na figura 2.13.

Os valores apresentados de  $K_{IC}$  foram obtidos pela equação 2.2 e podemos observar que o seu valor mais alto ocorre para a resina polyester, na ordem dos  $3.08 \text{ MPa.m}^{0.5}$ , o qual decresce com a introdução dos elementos de reforço. Relativamente ao pó de cortiça, o aumento da percentagem em peso deste elemento de reforço promove um decréscimo da tenacidade à fractura, onde se verifica que apenas 1% em peso deste elemento no compósito diminui o valor de  $K_{IC}$  em 52.3% relativamente ao do polímero. O valor mais baixo é de  $0.79 \text{ MPa.m}^{0.5}$  e ocorre para o compósito com 5% em peso de pó de cortiça, o qual representa um decréscimo de 74.4% relativamente ao observado para a resina. No que diz respeito ao compósito reforçado com cinza de casca de arroz, o aumento da percentagem em peso deste elemento conduz ao aumento da tenacidade à fractura. A adição de 1% em peso promove um decréscimo de  $K_{IC}$  em 74.2% relativamente ao valor observado para a resina, enquanto que para 5% esta diminuição é apenas de 68.1%. Neste caso o aumento de 1% para 5% em peso da cinza de casca de arroz promove um aumento da tenacidade em 19.2%.

**Tabela 2.3 – Tenacidade à fractura em função do tipo de reforço e da sua percentagem em peso**

Material	$K_{IC}$ [MPa.m <sup>0.5</sup> ]	$K_{IC}$ médio [MPa.m <sup>0.5</sup> ]	Desv. Padrão [MPa.m <sup>0.5</sup> ]
Polyester	2.992	3.078	0.208
	3.231		
	3.263		
	2.824		
	-		
Compósito (1% de pó cortiça)	1.488	1.467	0.130
	1.641		
	1.346		
	1.393		
	-		
Compósito (2.5% de pó cortiça)	1.082	1.068	0.016
	1.077		
	1.047		
	1.067		
	-		
Compósito (5% de pó cortiça)	0.773	0.785	0.028
	0.826		
	0.780		
	0.763		
	-		
Compósito (1% de cinza de casca de arroz)	0.723	0.795	0.088
	0.734		
	0.913		
	0.809		
	-		
Compósito (2.5% de cinza de casca de arroz)	0.916	0.894	0.048
	0.831		
	0.944		
	0.887		
	-		
Compósito (5% de cinza de casca de arroz)	0.913	0.983	0.061
	0.952		
	1.025		
	1.043		
	-		



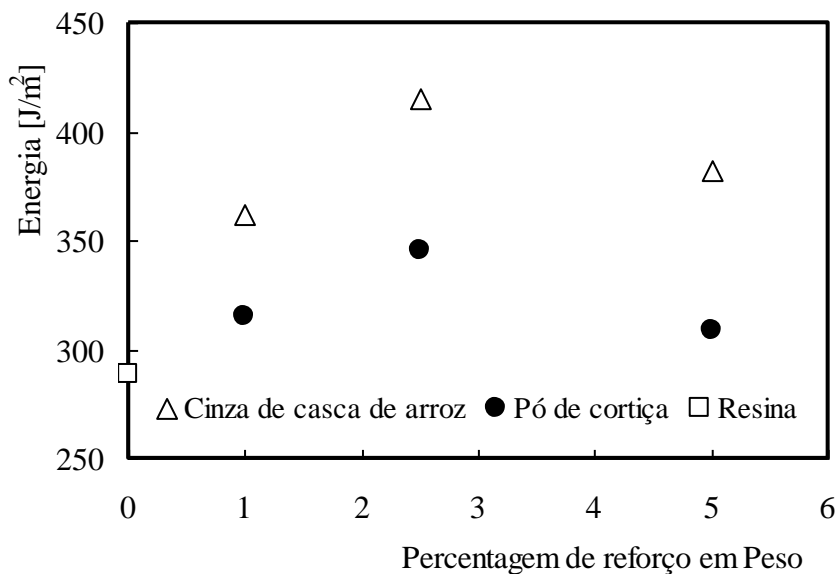
**Figura 2.13 - Tenacidade à fractura para os diferentes materiais em estudo**

A resistência ao impacto dos diferentes materiais em estudo foi obtida a partir dos ensaios Charpy, realizados segundo o procedimento experimental descrito em 2.2.5. Na tabela 2.4 encontram-se os valores obtidos, bem como a respectiva média e desvio padrão.

A evolução destes valores encontra-se representada no gráfico da figura 2.14, onde se observa que a adição de partículas melhora a resistência ao impacto. Independentemente do tipo de reforço verifica-se que até aos 2.5% de percentagem em peso do elemento de reforço a resistência aumenta, voltando posteriormente a decrescer, pelo que podemos dizer que este valor é a quantidade ideal para atingir a máxima resistência ao impacto. Comparativamente à resistência média da resina, a adição da cinza de casca de arroz melhora esta propriedade em 30.4% enquanto que o pó de cortiça melhora unicamente 16.5%. Podemos assim concluir que a cinza de casca de arroz se revela melhor que o pó de cortiça na resistência ao impacto, promovendo uma melhoria desta propriedade em 16.7% quando se compara os valores observados para os compósitos com 2.5% de elemento de reforço.

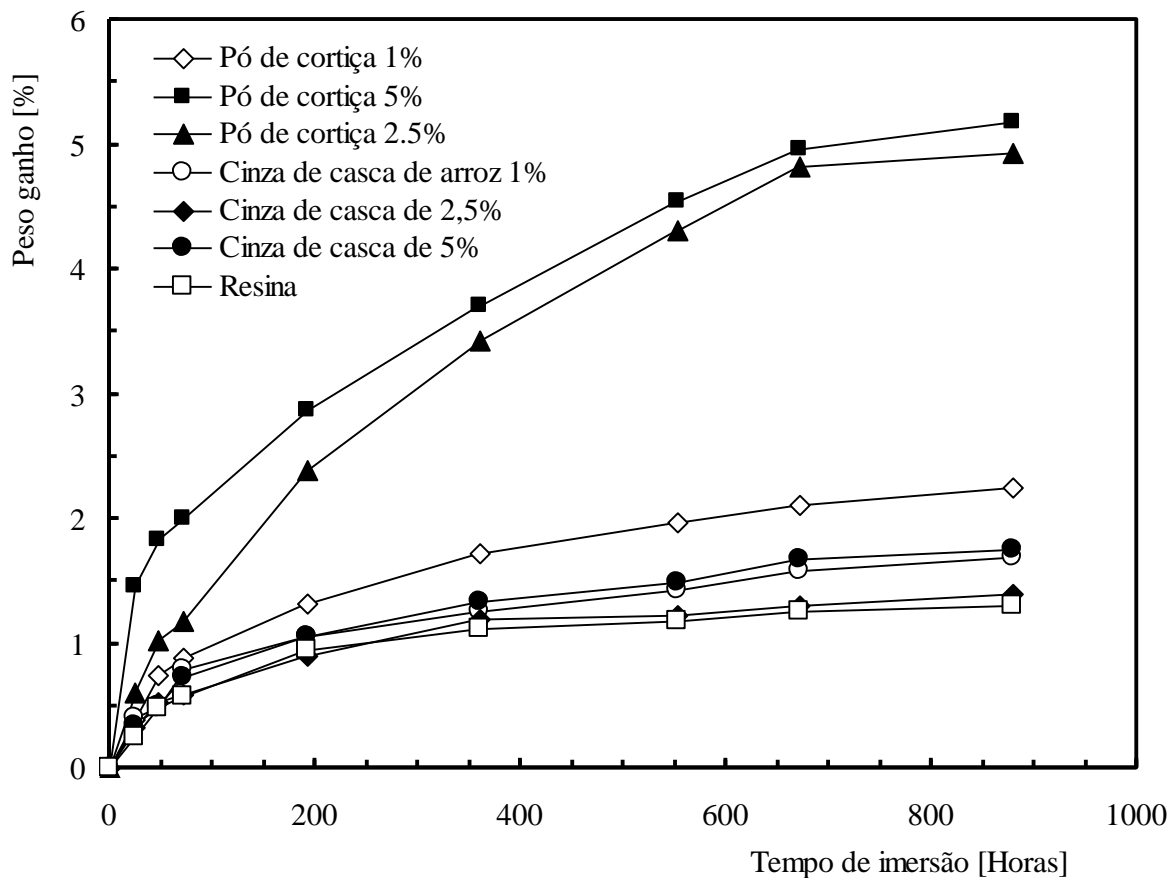
**Tabela 2.4 – Resistência ao impacto em função do tipo de reforço e da sua percentagem em peso**

Material	Energia [J/m <sup>2</sup> ]	Energia médio[J/m <sup>2</sup> ]	Desv. Padrão[J/m <sup>2</sup> ]
Polyester	347.5	288.6	41.4
	298.1		
	294.0		
	267.9		
	235.5		
Compósito (1% de pó cortiça)	304.9	315.0	31.0
	284.4		
	304.3		
	367.0		
	314.2		
Compósito (2.5% de pó cortiça)	338.3	345.6	17.5
	357.2		
	342.7		
	367.7		
	322.3		
Compósito (5% de pó cortiça)	325.4	308.7	20.4
	288.8		
	303.4		
	334.5		
	291.5		
Compósito (1% de cinza de casca de arroz)	324.5	361.9	57.0
	319.5		
	457.8		
	369.7		
	338.3		
Compósito (2.5% de cinza de casca de arroz)	447.6	414.9	24.4
	406.7		
	396.4		
	433.1		
	391.1		
Compósito (5% de cinza de casca de arroz)	402.1	381.9	41.3
	386.8		
	361.5		
	434.1		
	324.9		



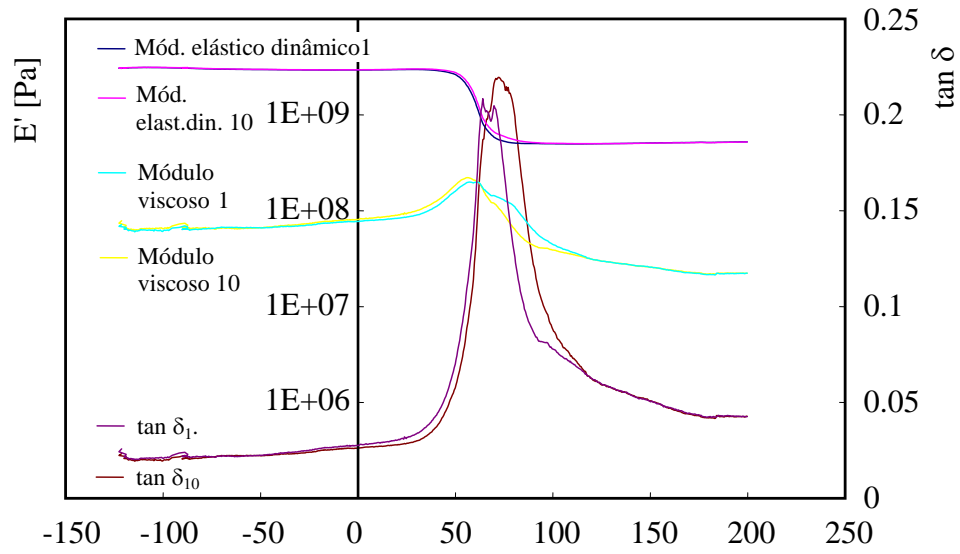
**Figura 2.14 - Evolução da resistência ao impacto com a percentagem em peso dos diferentes elementos de reforço.**

Por sua vez o estudo da absorção da água para os diferentes materiais foi efectuado segundo o procedimento experimental descrito em 2.2.5. A figura 2.15 ilustra a evolução da percentagem de peso de água contida na amostra em função do número de horas de imersão. As curvas apresentam todas um comportamento muito semelhante, pautando-se por uma fase inicial quase linear, seguindo-se de uma taxa de crescimento muito lenta até tender para a saturação após um período de tempo prolongado. Verificamos que ao fim de 888 horas o peso ganho pelo compósito reforçado com cinza de casca de arroz, para a percentagem de 1%, é muito semelhante ao da resina e apresenta um aumento na ordem dos 1%. Na verdade uma inclusão de 5% em peso de cinza promove um aumento da absorção de água em 25.7% relativamente ao polímero, enquanto que para 2.5% este aumento é de 23.1%. No que diz respeito ao compósito reforçado com pó de cortiça estes valores são muito superiores chegando a atingir os 5% de peso ganho em água (para o material que contém 5% de pó de cortiça). Se compararmos o valor do peso ganho pelas amostras, para uma percentagem de 2.5% de elemento de reforço, podemos observar que a adição do pó de cortiça conduz a uma absorção 65.6% mais elevada do que se adicionarmos cinza de casca de arroz ao polyester. Para tal contribui a elevada percentagem de celulose contida na cortiça.

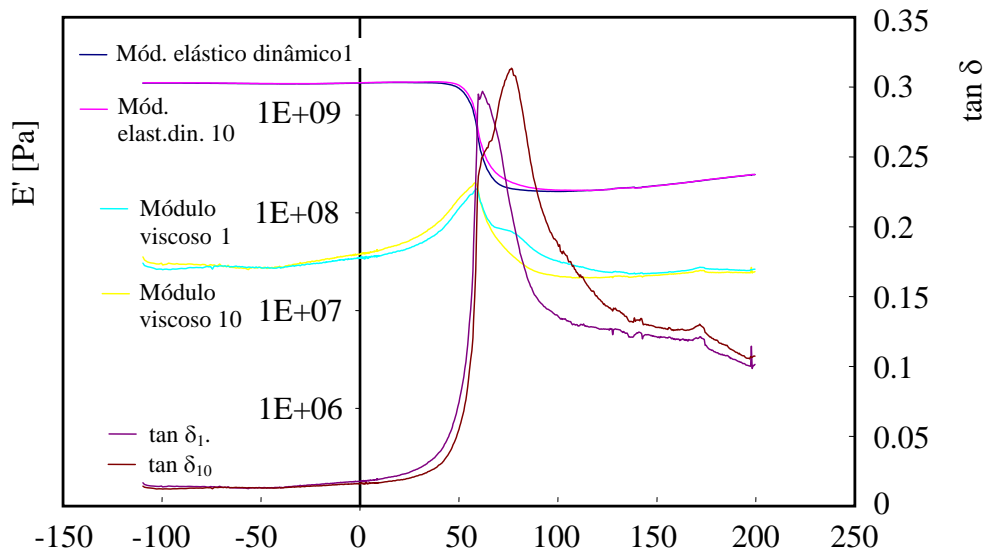


**Figura 2.15 - Absorção de água à temperatura ambiente para os diferentes materiais em estudo**

O estudo DMTA decorreu segundo o procedimento experimental indicado em 2.2.5. Na figura 2.16 encontram-se representadas as curvas típicas para a resina polyester e para o compósito com 5% de cinza de casca de arroz, todavia, elas são representativas dos restantes materiais intervenientes neste trabalho. Na tabela 2.5 encontram-se representados os valores médios do módulo elástico dinâmico, da temperatura de transição vítrea, do máximo coeficiente de amortecimento e da temperatura máxima de utilização do material. Considerou-se como critério, no estabelecimento deste parâmetro, uma queda de 20% no módulo elástico dinâmico.



a)



b)

Figura 2.16 –DMTA para: a) resina polyester, b) compósito com 5% de cinza de casca de arroz

**Tabela 2.5 – Propriedades obtidas do estudo DMTA para os diferentes materiais**

<b>Material</b>	<b>Módulo elást. dinâm. a 20° C [GPa]</b>	<b>T<sub>g</sub> [° C]</b>	<b>Máximo coeficiente de amortecimento [-]</b>	<b>Temperatura máxima de utilização [° C]</b>
Polyester	2.96	61.8	0.205	48.1
Compósito (1% de pó cortiça)	4.04	62.9	0.198	52.7
Compósito (2.5% de pó cortiça)	4.26	66.3	0.175	53.1
Compósito (5% de pó cortiça)	3.72	68.6	0.156	53.6
Compósito (1% de cinza de casca de arroz)	3.66	62.0	0.297	53.2
Compósito (2.5% de cinza de casca de arroz)	3.77	65.3	0.265	54.3
Compósito (5% de cinza de casca de arroz)	2.15	67.1	0.220	54.8

Podemos observar que a introdução de elementos de reforço aumenta o módulo elástico dinâmico comparativamente com o observado para o polyester. A percentagem ideal de reforço mais uma vez ocorre para os 2.5%, pois até este valor o módulo cresce, passando, seguidamente, a decrescer. Verificamos também que a temperatura de transição vítrea aumenta, para ambos os reforços, bem como a temperatura máxima de utilização do material. Ainda que o T<sub>g</sub> seja muito semelhante para ambos os compósitos, com diferença máxima apenas de 1.5° C para a percentagem de 5% do elemento de reforço, a temperatura de utilização máxima do material é mais elevada quando adicionamos cinza de casca de arroz. Para a percentagem em peso de 5% verificamos um aumento da temperatura máxima de utilização do material em 2.2% face a igual percentagem de pó de cortiça e de 12.3% quando comparada com a obtida para o polyester.

## 2.4 Conclusões

Podemos tirar algumas conclusões deste estudo. Independentemente do tipo de partículas utilizadas, pó de cortiça ou cinza de casca de arroz, a resistência à flexão diminui face à obtida com a resina polyester. Esta queda é todavia mais acentuada para o compósito reforçado com pó de cortiça. Apesar de se verificar esta diminuição, e sempre que as condições de projecto permitam a utilização destes compósitos, podemos dizer que o recurso a estes materiais (ditos de reforço) é benéfico pois diminuiu a percentagem de resina utilizada.

No que diz respeito ao estudo da tenacidade à fractura podemos observar que o valor mais elevado foi obtido para a resina, com  $3.08 \text{ MPa.m}^{0.5}$ , o qual decresce com a introdução dos elementos de reforço. A introdução do pó de cortiça diminui o valor de  $K_{IC}$ , enquanto o aumento da percentagem em peso da cinza de casca de arroz aumenta a tenacidade à fractura.

Por sua vez a adição de partículas melhora a resistência ao impacto, independentemente do tipo de reforço utilizado. Todavia verifica-se que existe um valor ideal e que ocorre para a percentagem de 2.5% em peso do elemento de reforço. Comparativamente à resistência média da resina, a adição da cinza de casca de arroz melhora esta propriedade em 30.4% enquanto que o pó de cortiça melhora unicamente 16.5%.

Por sua vez o estudo da absorção da água para os diferentes materiais mostra que a introdução do pó de cortiça na resina polyester promove o aumento da quantidade de água na amostra. Por exemplo se compararmos o valor do peso ganho pelos provetes, para uma percentagem de 2.5% de elemento de reforço, podemos observar que a adição do pó de cortiça conduz a uma absorção 65.6% mais elevada do que se adicionarmos cinza de casca de arroz ao polyester.

No que diz respeito ao estudo DMTA verificamos que a introdução dos elementos de reforço aumentam o módulo elástico dinâmico, todavia, a percentagem de 2.5% de elemento de reforço mostra ser o valor ideal (módulo mais elevado). A adição das partículas à resina também aumenta o  $T_g$ , e a temperatura máxima de utilização do material, ainda que esta última seja mais elevada quando se adiciona cinza de casca de arroz.

Face a estas conclusões verificamos que o elemento de reforço mais adequado para a aplicação prevista neste trabalho, indústria do mobiliário, é a cinza de casca de arroz. Apesar de baixar a resistência à flexão e a tenacidade à fractura, face aos valores obtidos para a resina, a adição deste material melhora todas as outras propriedades estudadas em relação à utilização do pó de cortiça. Para as diferentes percentagens em peso do elemento de reforço, aquela que mostrou ser a ideal foi a de 2.5%.