

**UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR**

**Departamento de Ciências Aeroespaciais**



**Caracterização mecânica de um material híbrido  
de  
Carbono/Epoxy e Cortiça**

*Nádia Simão Franco, nº M1760*

Professor Doutor José Miguel Almeida da Silva (Orientador)

Dissertação para a Obtenção de Grau de Mestre em  
Engenharia Aeronáutica

**Covilhã  
2009**

*Dedicado a meu Pai*

## AGRADECIMENTOS

No âmbito do desenvolvimento deste trabalho contribuíram várias pessoas, que num maior ou menor envolvimento foram importantes para a sua concretização e a quem eu expresso o meu agradecimento.

Num reconhecimento especial gostaria de denotar aquelas que realmente foram cruciais e agradecer:

Em primeiro lugar ao Professor Doutor José Miguel Silva (UBI), orientador científico desta investigação, pelo seu apoio e dedicação, tanto na realização do trabalho experimental como pela sua orientação na realização desta tese.

Ao Professor Doutor Tesseleno Devezas (UBI), Professor Doutor Paulo Fael (UBI) e ao Professor Doutor Abílio Silva (UBI), pelas suas preciosas ajudas em todo o desenvolvimento do trabalho experimental, pelos conhecimentos e conselhos partilhados.

Ao Engenheiro Carlos Coelho do Instituto Politécnico de Tomar, pela disponibilidade e preciosa ajuda na realização dos ensaios de impacto.

A todos os elementos do Departamento de Ciências Aeroespaciais da UBI, professores e funcionários, que acompanharam e demonstraram o seu apoio ao longo destes cinco anos e, que de alguma forma contribuíram para esta concretização.

A todos os meus colegas e amigos que sempre estiveram presentes e que foram um alicerce muito importante em toda esta caminhada.

Por fim, um profundo agradecimento ao meu Pai, sem o qual nada teria sido possível.

## RESUMO

A procura de novos materiais para aplicação na indústria aeroespacial tem tido um desenvolvimento constante, visando alcançar estruturas leves e de elevada resistência específica, mas também de elevada tolerância ao dano e fiabilidade em serviço.

O tema desta investigação insere-se no âmbito do desenvolvimento e caracterização mecânica de um novo material, que combina a elevada performance do carbono/epoxy com as propriedades únicas da cortiça, pretendendo-se analisar e quantificar as vantagens e desvantagens da combinação dos dois materiais. A cortiça é um material natural, renovável e reciclável que demonstra propriedades muito interessantes no contexto aeroespacial. Para além da sua elevada resistência térmica, fazendo deste um excelente escudo térmico para aplicações em veículos espaciais, a cortiça apresenta propriedades bastante particulares, demonstrando elevada tolerância ao dano, bom isolamento acústico e elevada capacidade de amortecimento e supressão de vibrações.

Neste estudo são efectuados testes estáticos e dinâmicos de modo a analisar as propriedades mecânicas de um tecido de carbono unidireccional pré-impregnado com resina epoxy, ao qual se adicionou dois tipos de grânulos de cortiça em duas posições de empilhamento distintas. Para os diversos parâmetros, são determinadas experimentalmente as características mecânicas do material sob a forma de ensaios de resistência estática à flexão em três pontos e tracção. Na avaliação do comportamento face a solicitações dinâmicas, são efectuados ensaios de fadiga e impacto de baixa-velocidade. Numa segunda fase, após ensaios de impacto é feita uma análise de caracterização da extensão do dano.

Os resultados experimentais revelam que a performance deste material híbrido depende da granulometria da cortiça, do tipo de empilhamento e do modo de carregamento efectuado. Como conclusão geral, constatou-se que a adição da cortiça aos compósitos tradicionais de carbono/epoxy apresenta algumas vantagens no âmbito de solicitações de carácter dinâmico, embora se tenha verificado uma diminuição das propriedades mecânicas em situações de carregamento estático.

**Palavras-chave:** *Material híbrido, carbono/epoxy, cortiça, resistência estática, impacto, fadiga.*

## ABSTRACT

The demand of new materials for the aerospace industry has been facing a constant development aiming at the design of lightweight structures with high specific resistance, as well as high damage tolerance and reliability capabilities.

The aim of this research is part of the development and characterization of a new engineering material, which combines the high performance of carbon/epoxy with the unique properties of cork, which seeks to analyze and quantify the advantages and disadvantages of combining these two materials. The cork material is a natural, renewable and recyclable, which shows very interesting properties in the aerospace. In addition to its high thermal resistance, making this an excellent thermal applications in space vehicles, the cork possesses every specific properties, showing high tolerance to damage, good sound insulation and high damping capacity and suppression of vibrations.

In this study static and dynamic tests are made to analyze the properties of a tissue unidirectional carbon pre-impregnated with epoxy resin, to which was added two types of granules of cork in two different positions of stacking. For the various parameters are determined experimentally through static tests of bending in three points and traction, the mechanical characteristics of the material. In evaluating the dynamic behavior in the face of requests, are tests of fatigue and low-speed impact. In a second step, after testing for impact analysis is a characterization of the extent of the damage.

The experimental results show that the performance of this hybrid material depends on the size of the cork granules, the type of stacking and the mode of loading place. As a general conclusion, it was found that the addition of cork composites to traditional carbon / epoxy has some advantages in the context of requests for dynamic character, although there was a decrease of mechanical properties in case of static loading.

**Keywords:** *Hybrid material, carbon/epoxy, cork material, static strength, fatigue.*

# Índice

1. Introdução .....	2
1.1. Motivação.....	2
1.2. Objectivo da investigação .....	3
1.1. Estrutura da tese .....	3
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Materiais compósitos - Vantagens em aplicações aeroespaciais .....	5
2.2 Impacto de baixa velocidade em materiais compósitos .....	6
2.3 Fadiga em materiais compósitos .....	10
2.4 Propriedades da cortiça .....	11
2.5 Considerações sobre materiais híbridos .....	15
3. Metodologia Experimental.....	20
3.1. Processo de fabrico.....	20
3.1.1. Materiais.....	20
3.1.2. Parâmetros de estudo.....	21
3.1.3. Fabrico e processo de cura em autoclave .....	22
3.2. Ensaio de caracterização estática .....	25
3.2.1. Ensaio de flexão em três pontos .....	25
3.2.2. Ensaio à tracção .....	28
3.3. Ensaio de caracterização dinâmica .....	31
3.3.1 Ensaio de fadiga.....	31
3.3.2 Ensaio de impacto de baixa velocidade .....	32
4. Análise e discussão de Resultados .....	35
4.1 Características à Flexão.....	35
4.2 Características à Tracção.....	39
4.3 Características à fadiga.....	41
4.4 Características ao Impacto de baixa velocidade.....	42
4.4.1 Extensão do dano pós impacto .....	47
5. Conclusões e trabalhos futuros.....	49
Referências Bibliográficas .....	51
Anexos.....	53

# 1. Introdução

---

## 1.1. Motivação

Na indústria aeroespacial existe uma constante procura de novos materiais que satisfaçam os elevados requisitos que estão inerentes a esta actividade. A realização deste trabalho insere-se numa tese de Mestrado em Engenharia Aeronáutica na Universidade da Beira Interior (UBI), tendo como tema de estudo a caracterização de um laminado híbrido de carbono/epoxy com grânulos de cortiça.

A eminência deste tema deve-se às extraordinárias propriedades dos laminados de carbono/epoxy e da cortiça. A cortiça é um material natural, renovável e ecológico de grande abundância em Portugal. Apresenta uma baixa densidade e propriedades muito interessantes no contexto aeronáutico, destacando-se: elevada resistência ao dano, bom isolamento térmico e acústico, e grande capacidade de amortecimento e supressão de vibrações. Este é um material com enorme potencialidade, que tem vindo a ser objecto de estudo para compreensão das suas propriedades e aplicações em diversos ramos industriais. Concretamente, no contexto de aplicações aeroespaciais, houve já algumas investigações anteriores desenvolvidas na UBI visando determinar a viabilidade de utilização deste material em componentes sujeitos a elevadas solicitações mecânicas (1, 2). Por seu turno, sendo os laminados de carbono/epoxy de alta resistência, um material de referência para uso aeroespacial devido à sua elevada resistência específica, vários estudos têm sido desenvolvidos tendo em vista a caracterização detalhada das suas principais propriedades mecânicas. Existe, pois, já uma vasta documentação técnica e científica relativa a compósitos de carbono/epoxy de alto desempenho, sendo possível salientar as suas propriedades mecânicas face a outros materiais alternativos, designadamente aços-carbono e ligas de alumínio tradicionalmente utilizadas na indústria aeronáutica. Por outro lado, alguns problemas inerentes a este tipo de material face a solicitações dinâmicas estão extensamente documentados, particularmente mecanismos de dano inerentes a processos de fadiga e impacto. Torna-se, portanto, importante avaliar possíveis soluções que permitam contornar o problema de fragilidade dos compósitos de carbono/epoxy face a este tipo de solicitações que ocorrem com frequência em componentes aeronáuticos.

Assim, o presente trabalho procura avaliar o potencial de desenvolvimento de um novo material híbrido que combine as propriedades dos laminados de carbono/epoxy de alta resistência com as propriedades da cortiça, obtendo-se um novo material com diferentes propriedades relativamente a cada um dos constituintes.

## **1.2. Objectivo da investigação**

O âmbito desta investigação científica assenta na caracterização de um material híbrido, construído com laminados de carbono/epoxy de alta resistência e grânulos de cortiça.

Para este estudo variam-se alguns parâmetros de modo a obter-se um amplo conhecimento das propriedades deste material. Em primeira instância, a granulometria da cortiça foi o parâmetro principal usado para esta caracterização; seguidamente, o seu posicionamento no empilhamento com o laminado de carbono/epoxy foi também avaliado.

Numa fase inicial procedeu-se a uma caracterização estática do material, recorrendo a ensaios de flexão pura e tracção. Com estes pretendeu-se compreender qual a melhor configuração do material a ser posteriormente considerada para ensaios de carácter dinâmico. Numa segunda fase efectuou-se o estudo do comportamento dinâmico, onde as amostras foram sujeitas a ensaios de fadiga à tracção e impacto de baixa velocidade. Após os diversos ensaios, procede-se à análise do dano e tipo de ruptura do material, principalmente pós-impacto, onde é susceptível a ocorrência de danos não visíveis, sendo estes os mais problemáticos no que respeita à ruptura do material durante a sua utilização.

## **1.1. Estrutura da tese**

Este trabalho consta de cinco capítulos principais, iniciando-se com a presente introdução, seguida da revisão bibliográfica, onde se pretende compilar o actual conhecimento essencial à realização do presente estudo, enumerando diversas referências importantes para o conhecimento dos materiais em causa e seus comportamentos mecânicos.

O terceiro capítulo insere todas as considerações inerentes aos estudos experimentais realizados, nomeadamente o processos de fabrico das amostras e a descrição minuciosa dos ensaios de caracterização mecânica. A fase seguinte é composta pelos resultados obtidos para as diferentes

configurações e tipos de ensaios a que foi sujeito o material, assim como a interpretação dos mesmos.

O culminar da investigação encontra-se no quinto capítulo, com as conclusões retiradas de todo o trabalho experimental, enumerando as vantagens e desvantagens deste novo material e, referenciando os pontos de interesse para futuros estudos.

## 2. Revisão Bibliográfica

---

### 2.1 Materiais compósitos – Vantagens em aplicações aeroespaciais

Os materiais compósitos como hoje os conhecemos aparecem na década de cinquenta como resposta aos programas espaciais na busca de um material leve e termicamente estável. Na década de sessenta o desenvolvimento tecnológico dos compósitos expande grandemente como resposta não só ao sector espacial, mas a todo o sector dos transportes que se encontrava então em ascensão. Na indústria aeronáutica estes materiais compósitos são predilectos na construção de vários constituintes de uma aeronave devido à sua elevada resistência específica e à capacidade de fabrico dos mais diversos componentes com formas complexas e, que de outro modo, usando materiais monolíticos, não seria possível (3).

Desde do seu desenvolvimento até aos dias de hoje é notável a influência dos materiais compósitos no nosso quotidiano, pois a sua capacidade adaptativa e multifuncional resulta em aplicações simples e ao dispor de qualquer pessoa, estando presente em nossas casas e nos veículos que usamos no dia-a-dia. Porém, são as excelentes propriedades físicas e mecânicas que tornam estes materiais atractivos a aplicações de alta performance, não só para a indústria aeroespacial, mas também para a engenharia em si, no fabrico de componentes para os mais diversos fins.

A sua constituição dá origem à denominação de *material compósito* ou *material composto*, que, como o próprio nome indica, é uma composição de dois ou mais materiais que após a sua junção formam um material em si, embora macroscopicamente seja possível distinguir os diferentes constituintes. Podemos dividir, então, os compósitos em duas fases distintas: a fase do reforço, que suporta a maior parte dos esforços a que este possa estar solicitado, sendo normalmente constituída por fibras como as fibras de vidro, aramida e carbono ou por pós cerâmicos; e a fase da matriz, que tem por função agregar o reforço transmitindo os esforços entre si. O tipo de material recebe a designação consoante o tipo de matriz que o constitui e deste modo temos compósitos de matriz polimérica (PMCs), compósitos de matriz metálica (MMCs), compósitos de matriz cerâmica (CMCs) e os compósitos carbono/carbono (CCCs) (4).

Os compósitos são materiais heterogéneos onde são visíveis as diferentes fases e, em cada fase as propriedades variam. No caso do reforço de fibras, estas têm comportamentos muito distintos

consoante o sentido da solicitação, ao longo da fibra ou transversalmente. A sua heterogeneidade propicia o aparecimento de falhas complexas, diferenciando-se neste ponto dos metais e outro materiais monolíticos. O caso de falhas devido a cargas dinâmicas de impacto é um exemplo bastante explícito dessas diferenças. Quando aparece um dano num monolítico, normalmente a fenda propaga-se até que ocorra falha desse material. Num compósito o início de uma fissura não significa obrigatoriamente ruptura do material, pois quando uma fibra se quebra as fibras vizinhas podem manter-se intactas limitando os danos.

A área dos materiais compósitos é uma área bastante extensa apresentando uma vasta literatura que aprofunda e especifica cada tema. Os compósitos reforçados com fibra de carbono são os mais utilizados em estruturas aeroespaciais, podendo ser combinadas com matrizes poliméricas, metálicas, cerâmicas e carbono. No entanto, a resina epoxídica, uma matriz polimérica termoendurecível, é aquela que permite a obtenção de melhores propriedades mecânicas (3). As fibras de carbono podem apresentar-se de dois modos: (UHS) – “Ultrahigh Strength” e as (UHM) – “Ultrahigh Modulus”. Como os próprios nomes sugerem, as fibras UHS têm uma elevada resistência à tracção, ao passo que as UHM têm um elevado módulo de Young. O presente estudo cinge-se à aplicação de CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic), mais propriamente *carbono/epoxy* de alta resistência, sendo que este compósito não só apresenta uma boa relação peso/custo, como também as melhores características mecânicas, nomeadamente resistência específica e elevada resistência à fadiga (3, 5).

## 2.2 Impacto de baixa velocidade em materiais compósitos

Uma aeronave não se encontra isenta de colisões com objectos desconhecidos, que embora não causem danos devastadores, podem dar origem a rupturas de estruturas caso a falha não seja controlada. Durante o voo esta encontra-se exposta a diversos perigos como: aves, bolas de granizo e objectos de pista desconhecidos. O impacto, em qualquer um destes casos, se for num material monolítico, como as ligas de aço e alumínio é facilmente detectado, pois o dano é visível à superfície. Mas, hoje em dia em aeronaves recentes onde as estruturas, tanto fora como dentro das aeronaves, são feitas essencialmente de materiais compósitos, o impacto de um objecto destas dimensões pode ser dificilmente identificado. Embora a colisão de objectos em compósitos não deixe aparentemente dano, pode causar danos no interior do material, manifestados sob a forma de delaminações, ruptura da matriz ou mesmo quebra de fibras de reforço.

O impacto tem porém de ser considerado de dois modos distintos: *impacto de alta velocidade* e *impacto de baixa velocidade*. No impacto de alta velocidade para um mesmo impactor, o dano causado é localizado na zona de impacto, pois o tempo de contacto é diminuto e a energia absorvida pelo material é muito baixa. No impacto de baixa velocidade, o contacto do impactor com a amostra é longo, aumentando o momento de incidência (Figura 1, (6)). Durante este contacto, do impactor com o material, a energia de impacto é transmitida a zonas da amostra mais distantes da zona de impacto em si (6, 7). Para o presente trabalho iremos apenas considerar impacto de baixa-velocidade, dado o estudo ter a pretensão de compreender a capacidade do material se deformar elasticamente e absorver energia durante esse processo.

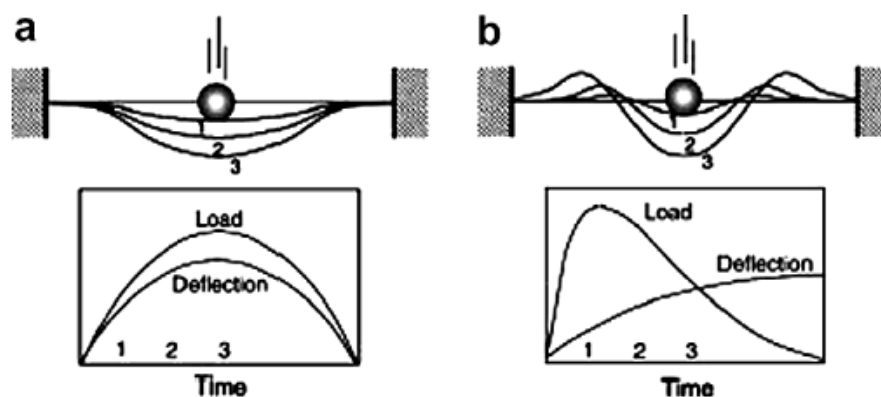


Figura 1 – a) Resposta típica a um impacto de baixa-velocidade, b) Resposta típica a um impacto de alta-velocidade. (Imagem retirada de: W. J. Cantwell, J. Morton. *The influence of varying projectile mass on the impact response of CFRP*)

Os compósitos são materiais de elevada resistência e dureza específicas, mas devido a serem laminados de interfases frágeis são susceptíveis a danos provocados por cargas de impacto. Nos ensaios de impacto de baixa velocidade o modo de ruptura mais comum é a delaminação, que embora não se encontre imediatamente adjacente à zona de impacto, pode estender-se até zonas mais distantes da amostra (8,9). Esta delaminação só ocorre para certos níveis de energia, abaixo dos quais o material não tem dano permanente. Após impacto, dado não ser possível visualizar externamente este tipo de dano, o componente ao ser carregado novamente pode sofrer ruptura total. Para a previsão do início do processo de delaminação foram efectuados estudos numéricos que visam compreender e implementar modelos que possam prever o início de dano em compósitos sujeitos a cargas de impacto (7,8,9,10) Mas não podemos falar de delaminação em compósitos de um modo geral, uma vez que cada estudo é um caso concreto, pois o processo de delaminação depende de vários factores e, cada estudo numérico engloba parâmetros específicos.

O impacto em materiais compósitos gera normalmente uma área de dano envolvente à zona de impacto. Essa extensão de dano depende do tipo de impactor, ou seja, se este é esférico, cilíndrico, cónico ou piramidal. Os mais comuns são os esféricos e cilíndricos, dado aproximarem-se mais a casos reais de impacto, onde o raio é também factor preponderante na medida em que quanto maior o raio do impactor, menor é o dano causado no espécime impactado (6). A extensão do dano depende não só do tipo de impactor mas da massa e da distância a que este se encontra do alvo. Um impacto de uma pequena massa quando largada de uma altitude considerável pode ser mais significativo do que o de massa substancialmente superior a uma altitude menor. Deste modo o nível de energia de impacto é o factor preponderante na extensão do dano, pois para uma mesma massa largada de altitudes diferentes a energia transmitida ao material é tanto maior quanto a altura de queda (9). Esta relação é dada pelo balanço de energia, entre a energia cinética e a energia potencial (Equação 1 e 2). Onde a energia de impacto é igual à energia potencial, podendo deste modo obter-se a velocidade de impacto (Equação 3).

**Equação 1**  $E_m = E_c + E_p$

**Equação 2**  $\frac{1}{2}mv^2 = m \cdot h \cdot g$

**Equação 3**  $E_{impacto} = m \cdot h \cdot g$

m = massa (Kg);

v = velocidade (m/s);

h = altura de queda (m);

g = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

Os compósitos reforçados com fibra de carbono, CFRP têm a capacidade de absorver e dissipar energia de impacto através de deformação elástica e no processo de fractura do material. Esta capacidade de absorção de energia elasticamente depende das propriedades mecânicas das fibras e da matriz, da velocidade de impacto e da estrutura do componente. Em condições de impacto de baixa velocidade em compósitos CFRP é importante a geometria do material, ao contrário do impacto de alta velocidade (9, 11). Em amostras circulares a capacidade de absorção de energia é inferior em relação a amostras com formato de uma viga. A espessura do espécime é também importante: em amostras finas o dano causado tende a ser mais localizado, enquanto que em

---

amostras de maior espessura, as camadas inferiores separam-se das superiores, transmitindo entre si energia e dissipando-a. Em conclusão, a extensão do dano depende fortemente da habilidade do material em absorver energia elasticamente e, depende da geometria deste, não se podendo deste modo generalizar através de um só caso (12).

Quando ocorre um impacto em componentes construídos em materiais compósitos, e devido ao facto do dano ser muitas vezes invisível à superfície, as inspecções destes são mais complexas e morosas, recorrendo-se a testes de carácter não destrutivo para analisar e quantificar a extensão do dano. Exemplos destes testes são a *termografia*, radiografia *raio-X*, a análise por *ultra-sons* A,B e C scans, *holografia*, *emissão acústica* e a FPI - *inspecção por líquidos penetrantes* (9,13, 14).

A inspecção por ultra-sons é a técnica mais comum na inspecção de defeitos e danos em materiais compósitos. O espécime é colocado dentro de água de modo a garantir a máxima transmissão da energia ultrasónica e, o teste consiste na emissão de um impulso e recepção do seu eco. Este sinal é posteriormente amplificado e convertido num sinal eléctrico que é tratado pelo software e resulta num espectro de cores. A análise C-Scan é a mais indicada para a detecção de delaminações em compósitos, embora não seja suficientemente ampla, não detectando quebra de fibras nem fractura da matriz. A inspecção ultrasónica pode tornar-se muito complexa de analisar, pois os materiais compósitos apresentam quase sempre defeitos de fabrico e, caso estes sejam muito significativos, são detectados com falhas induzindo a erros nos resultados obtidos. Porém existe um problema que se pode tornar ainda mais complexo, devido à não propagação do sinal em materiais que apresentem propriedade visco elásticas muito acentuadas.

A termografia é uma das técnicas mais indicadas para a detecção de delaminações, estando associada à capacidade de absorção e dissipação de calor na região do dano. A condutividade do material é também factor importante, pois no caso onde se usam fibras de reforço, esta varia com o alinhamento das fibras. Assim como no caso do raio-X, onde a obtenção de uma imagem clara depende da capacidade de absorção da radiação (14). A inspecção por líquidos penetrantes é uma técnica mais recente que consiste na injeção capilar de um líquido através das falhas do material que quando iluminado por uma luz ultravioleta floresce, sendo assim possível visualizar as zonas de falha (13).

## 2.3 Fadiga em materiais compósitos

O problema da fadiga é um dos campos que dá origem a mais investigações no mundo dos materiais. A fadiga em compósitos é alvo de vários estudos, pois ao contrário dos materiais monolíticos, a previsão e propagação de uma falha é bastante complexa. Nos materiais compósitos, a ocorrência de uma fractura na matriz ou mesmo numa das fibras não significa que o dano se estenda a fibras vizinhas. Deste modo os materiais compósitos apresentam geralmente uma resistência à fadiga superior a materiais metálicos isotrópicos, como ligas de aço e alumínio comumente usadas na construção de aeronaves (15).

Quando se fala em fadiga nos componentes de uma aeronave, entramos num campo complexo e questionável. Ao pensarmos numa estrutura que tenha um dano provocado por fadiga é errado pormos em causa a sua integridade: na realidade não quer dizer que esta esteja inutilizada ou represente algum perigo. A fadiga de um material é definida como alterações das suas propriedades mecânicas quando este se encontra sujeito a carregamentos cíclicos (**Figura 2**). Esses carregamentos podem ser efectuados sem que haja ruptura do material durante um determinado número de ciclos. Este limite depende da natureza do material, e depende do valor da carga aplicada. O modo de aplicação da carga é também preponderante na vida do material, pois ao falarmos em cargas de flexão, tracção ou compressão, estamos a falar de modo de carregamento distintos entre si que afectam mais ou menos o desempenho do material (16).

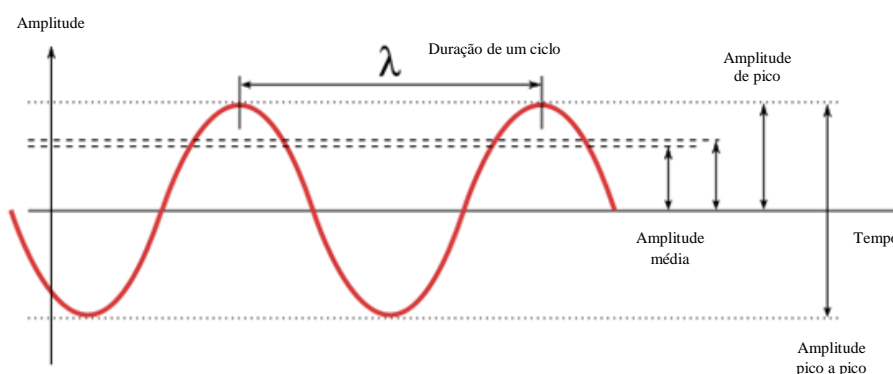


Figura 2 – Curva sinusoidal representativa da amplitude de tensões versus tempo

Ao falarmos em fadiga e carregamentos cíclicos, estamos normalmente a referir-nos a ondas sinusoidais onde é aplicada uma tensão média,  $\sigma_{média}$  (

Equação 4) e uma amplitude de tensões,  $\Delta\sigma$ , (Equação 5), que fazem deste modo variar uma razão de tensões, R, (Equação 6) entre um valor máximo e mínimo. Deste modo para um estudo de fadiga devem ser tomadas em conta as seguintes equações:

$$\text{Equação 4} \quad \sigma_{média} = \frac{(\sigma_{máx} + \sigma_{mín})}{2}$$

$$\text{Equação 5} \quad \Delta\sigma = \frac{(\sigma_{máx} - \sigma_{mín})}{2}$$

$$\text{Equação 6} \quad R = \frac{\sigma_{mín}}{\sigma_{máx}}$$

No projecto de um componente que estará sujeito a cargas cíclicas, a escolha do material deve ser bem analisada. O material deve apresentar características à fadiga, para esse tipo de carregamento, bem compreendidas e, deve ser feita uma previsão da vida desse componente, nomeadamente da iniciação da falha, crescimento e a ruptura final (16). Caso concreto dos compósitos, os mecanismos de falha são diversos: falha transversal da matriz, delaminações, fissuras ao longo das fibras, desagregação entre a matriz e a fibra e fractura das fibras de reforço (17 e 18).

Diversos estudos foram efectuados na busca de uma previsão sólida do inicio e propagação de fissuras em materiais compósitos, embora seja no estudo da fadiga em CFRP que a maioria dos investigadores se debruce, dado este ser o material com mais aplicações em toda a indústria. A previsão de vida de uma estrutura de CFRP tornou-se crucial desde que este material foi aplicado na construção de componentes aeronáuticos e, desde então, a procura de soluções para aumentar o tempo de vida deste material à fadiga é incansável (17,18, 19, 20).

## 2.4 Propriedades da cortiça

As aplicações da cortiça são conhecidas desde 3000 anos antes de Cristo, onde esta era aplicada em utensílios de pesca, devido à sua capacidade de flutuar. Já nos tempos da Antiguidade Grega se refere a existência de rolhas e tonéis fabricadas em cortiça, bem como ânforas vedadas de

cortiça, encontradas em escavações de Pompeia (65-8 a.C.). Em Portugal existem relatos do uso desta como isolamento contra o frio e a humidade, em selas em conventos, como no caso do Convento dos Capuchos datado de 1560 (21).

A cortiça provém da espécie botânica *Quercus suber L.* denominada tipicamente de *Sobreiro*. Esta é composta essencialmente por suberina (30% a 50%), lenhina (20% a 30%) e celulose (10% a 20%) (21). Este *parênquima suberoso*, tem origem em células merismáticas de súber-felodérmico, formando uma camada de células mortas em torno do tronco e ramos, que funciona como protecção do espécime. Este tecido morto apresenta características particulares, dado ser um material celular, isto é um material constitui apenas pelas paredes das células em que o seu interior ficou vazio durante o processo de crescimento, como é possível ver na Figura 3, (22). Esta característica morfológica confere-lhe assim a designação de *material alveolar*, albergando grandes quantidades de ar no seu interior (22). Um exemplo de um material alveolar sintetizado é o caso do *honeycomb* ou favos de abelha, muito usado em estruturas *sandwich*. A sua estrutura assemelha-se à da cortiça, caracterizando-se assim este tipo de material de uma enorme leveza. A palavra *liège*, que significa cortiça em francês, deriva do latim *levis* e tem origem na propriedade de “leveza” deste material.

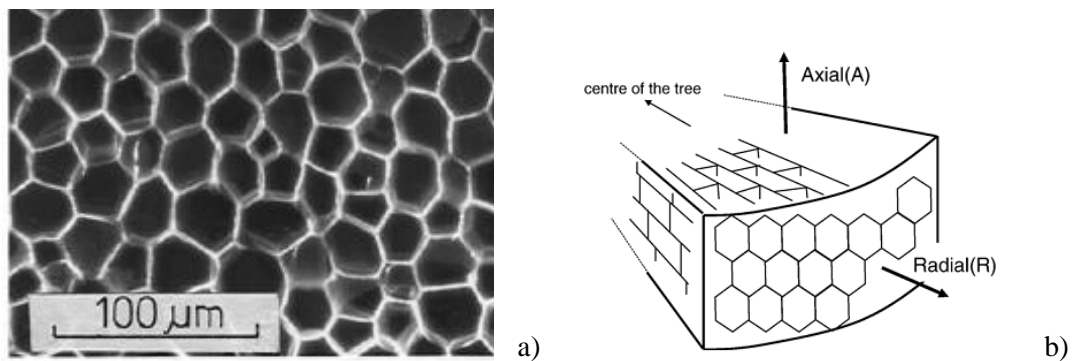


Figura 3 – a) Imagem microscópica da estrutura celular da cortiça. b) Representação esquemática da estrutura da cortiça evidenciando as duas principais direcções. (Imagem retirada de: Lorna J. Gibson, *Biomechanics of cellular solids*).

Actualmente, Portugal é o maior produtor mundial de cortiça, detém três-terços da produção mundial, sendo que a Europa (Portugal, Espanha, França e Itália) representa 80% de toda a produção (21). Este material tem importante valor económico, na medida em que apresenta propriedades ecológicas, pois além de ser natural e renovável é também reciclável, o que hoje em dia é factor importante quando se fala em desenvolvimento sustentável.

A cortiça é um material com propriedades bastante particulares, tendo um bom isolamento térmico, acústico, eléctrico e vibrático, sendo impermeável a líquidos e a gases, e com boas propriedades dieléctricas (23). Devido à sua capacidade de suportar elevadas temperaturas esta é também usada como escudo térmico. Recentemente, um composto de cortiça e resina fenólica foi implementado pela *EADS-Space Transports Company*, no escudo térmico da sonda *Beagle 2* que foi lançada em 2005 com destino a Marte. Este novo material denominado *Norcoat-liège*, foi sujeito a um tratamento térmico de 1500°C e, concluiu-se que as células merismáticas eram conservadas, assim como a sua morfologia da cortiça, verificando-se porém uma diminuição da espessura da parede das células (24).

Devido à sua estrutura alveolar de paredes celulares finas, esta tem a capacidade de se deformar e recuperar a sua forma original na maior parte das vezes quase completamente. J.F. Mano et al. (25) referem a recuperação da cortiça ao longo do tempo após carregamento, tanto no sentido axial como no sentido radial. A resistência e recuperação da cortiça é superior no sentido axial, o que se deve à rigidez que no sentido radial é oferecida pelas células alveolares, enquanto no sentido axial a cortiça deforma-se quando comprimida sem ocorrer ruptura do material. Apesar do diferente comportamento nos distintos sentidos, em geral a cortiça apresenta um comportamento visco elástico, com capacidade de recuperação ao longo do tempo, embora mesmo para cargas de baixa amplitude esta não consiga recuperar totalmente a sua forma inicial, a deformação permanente é muito baixa.

Quando sujeita a cargas à compressão é nítido que o comportamento da cortiça varia consoante o sentido de aplicação, verificando-se uma maior resistência no sentido axial face ao sentido radial (26). Na

Figura 4 (23, 26), na curva de tensão-deformação da cortiça à compressão é possível visualizar as diferentes fases, elástica e plástica, vendo que a fase inicialmente corresponde à flexão elástica do material, a cortiça deforma-se mas recupera a forma inicial, mas com o aumento da tensão aplicada as células vão sendo esmagadas entre si e as paredes enrugadas até entrarem em contacto permanente ao atingir 70% da extensão. Já quando sujeita a uma carga à tracção, a cortiça apresenta resultados bem diferentes, onde exhibe uma maior tensão e extensão no sentido radial quando comparada ao sentido não radial (**Figura 5**, (23)). Verificam-se também diferenças em termos do módulo de Young, onde os valores à compressão são inferiores aos da tracção, pensa-se que este facto ocorra devido à rugosidade das paredes das células, sendo que à tracção as ondulações das paredes diminuem e à compressão aumentam.

De um modo geral o comportamento mecânico da cortiça é substancialmente diferente quanto ao sentido e direcção de aplicação do esforço.

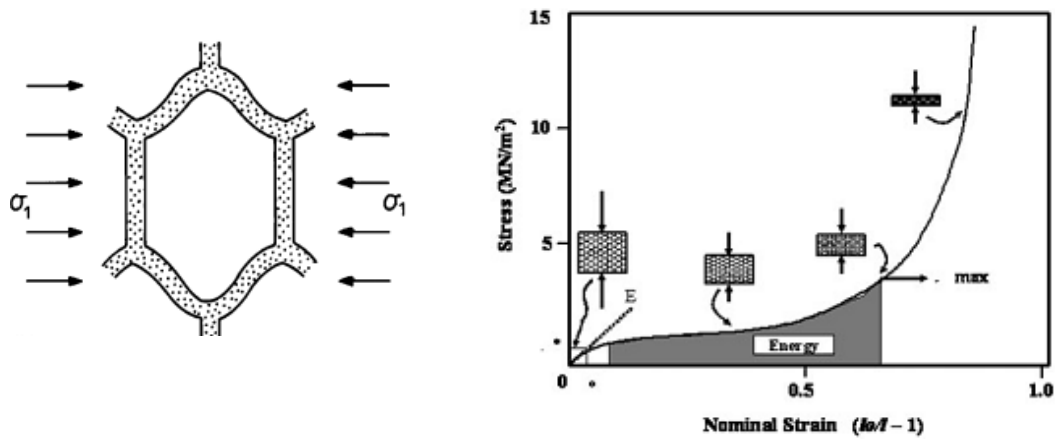


Figura 4 – Compressão das células de cortiça no sentido axial. Curva de compressão, tensão-deformação da cortiça. (Imagens retiradas de: L. Gibson, M. Ashby, *Cellular solids: structures and properties* and S. P. Silva et al, *Cork: properties, capabilities and applications*).

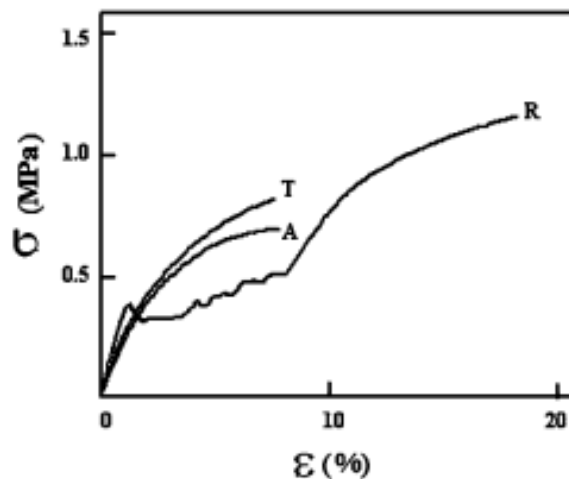


Figura 5 – Curva de tracção, tensão-extensão para as diferentes direcções: R, radial; A, axial; T, tangencial. (Imagem retirada de: S. P. Silva et al, *Cork: properties, capabilities and applications*).

Os produtos de cortiça podem ser divididos em três sectores: os *produtos obtidos por simples talha*, que são feitos de cortiça natural; os *granulados*, que são obtidos por trituração de cortiça virgem, aparas ou refugo e, os *aglomerados puros*, que são denominados de aglomerados negros e subdividem-se em três tipos: térmico, acústico e vibrático.

Os granulados de cortiça são os que apresentam as granulometrias menores em relação à gama dos triturados, sendo subdivididos consoante o tipo de aplicação que são três: os *granulados “limpos”*, que se destinam essencialmente ao fabrico de rolhas e discos de aglomerados de

---

cortiça, neste não há regranulações, são obtidos por trituração de aparas, bocados e refugos; *os granulados para aglomerados compostos*, são obtidos por trituração de cortiça virgem, refugos e desperdícios de outros processamentos e, *os granulados para fabrico de aglomerado negro*, onde a trituração é mais grosseira e provem de cortiça virgem e mesmo ramos de sobreiro (21).

Na investigação inerente são usados os granulados de cortiça, mais propriamente granulados compostos. Os granulados usados são de pequenas dimensões e de duas granulometrias diferentes.

## 2.5 Considerações sobre materiais híbridos

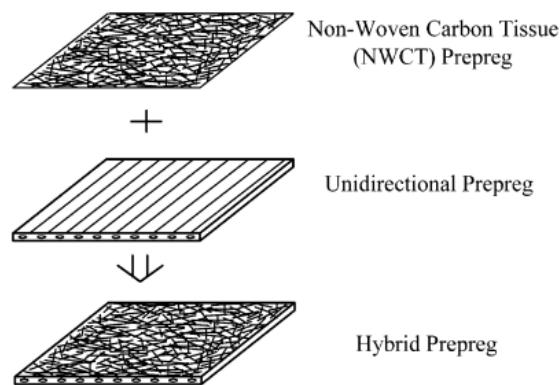
Nenhum material reúne características excelentes em todos os domínios de utilização. Há sempre que considerar uma solução de compromisso entre as vantagens e inconvenientes de cada tipo de material. Alternativamente, pode-se tentar combinar dois ou mais materiais já existentes e sobrepor as suas propriedades, resultando num material híbrido. O ideal de um híbrido é combinar as melhores propriedades de ambos os materiais constituintes originais.

Existe uma certa dualidade sobre os materiais híbridos. Há quem diga que os compósitos, os polímeros e as madeiras são materiais em si com propriedades distintas. Mesmo as estruturas sandwich, podem ser vistas como faces e núcleo separadamente ou ser consideradas como um material em si com densidade, dureza e resistência próprias (27).

Na realidade, um material híbrido não é apenas uma junção de dois ou mais materiais, mas sim um material otimizado, com geometria e escala definidas, com os constituintes certos e a sobreposição adequada das suas propriedades individuais para um propósito específico de engenharia. Por vezes o compromisso entre as propriedades implica um “sacrifício” de um dos lados. Nem sempre é possível criar uma harmonia perfeita, mas consoante os ganhos e as perdas a combinação pode ser útil.

Quando se fala em materiais compósitos, o termo híbrido é maioritariamente associado à conjugação de duas ou mais fibras de reforço, pois é possível tirar as vantagens de ambas simultaneamente. Um caso de implementação de tecidos de reforço híbridos foi estudado por S. H. Lee et al. (28), que combinou dois tipos de tecido de CFRP. Um dos tecidos é pré-impregnado de fibras longas unidireccionais e o outro é um prepreg não tecido, ou seja, é um pré-impregnado de fibras soltas, dispostas aleatoriamente (**Figura 6**, (28)). Neste trabalho

efectuaram-se ensaios estáticos de tracção e, fadiga à tracção no novo pré-impregnado híbrido. Dos ensaios estáticos de tracção obtiveram-se os seguintes resultados: O CRFP unidireccional apresenta um módulo de Young longitudinal superior ao das amostras de prepreg híbrido, contudo no sentido transversal é o prepreg híbrido que apresenta maior módulo de Young. Em relação ao comportamento à fadiga, assim como nos ensaios de tracção estática, as amostras híbridas apresentam um aumento na resistência à fadiga no sentido transversal, apesar de no sentido longitudinal o prepreg unidireccional ter uma resistência maior. Concluí-se que o prepreg de fibras soltas influencia a resistência do material híbrido no sentido transversal, mas no sentido longitudinal não são incrementadas as propriedades, sendo que o CFRP unidireccional apresenta maior resistência (28).



**Figura 6 – Representação esquemática do pré-impregnado híbrido. (Imagem retirada de: S. H. Lee et al, *Tensile properties and fatigue characteristics of hybrid composites with non woven carbon tissue*).**

Para aplicações de elevado desempenho, como é o caso de aplicações aeroespaciais, onde resistência específica, rigidez específica, absorção de energia, resistência à corrosão e redução de peso são imperativos é usual o uso das fibras de elevado módulo elástico (HM), mas são fibras muito dispendiosas. Por isso, uma hibridação com fibras mais económicas, embora de menor módulo, pode ser uma solução vantajosa.

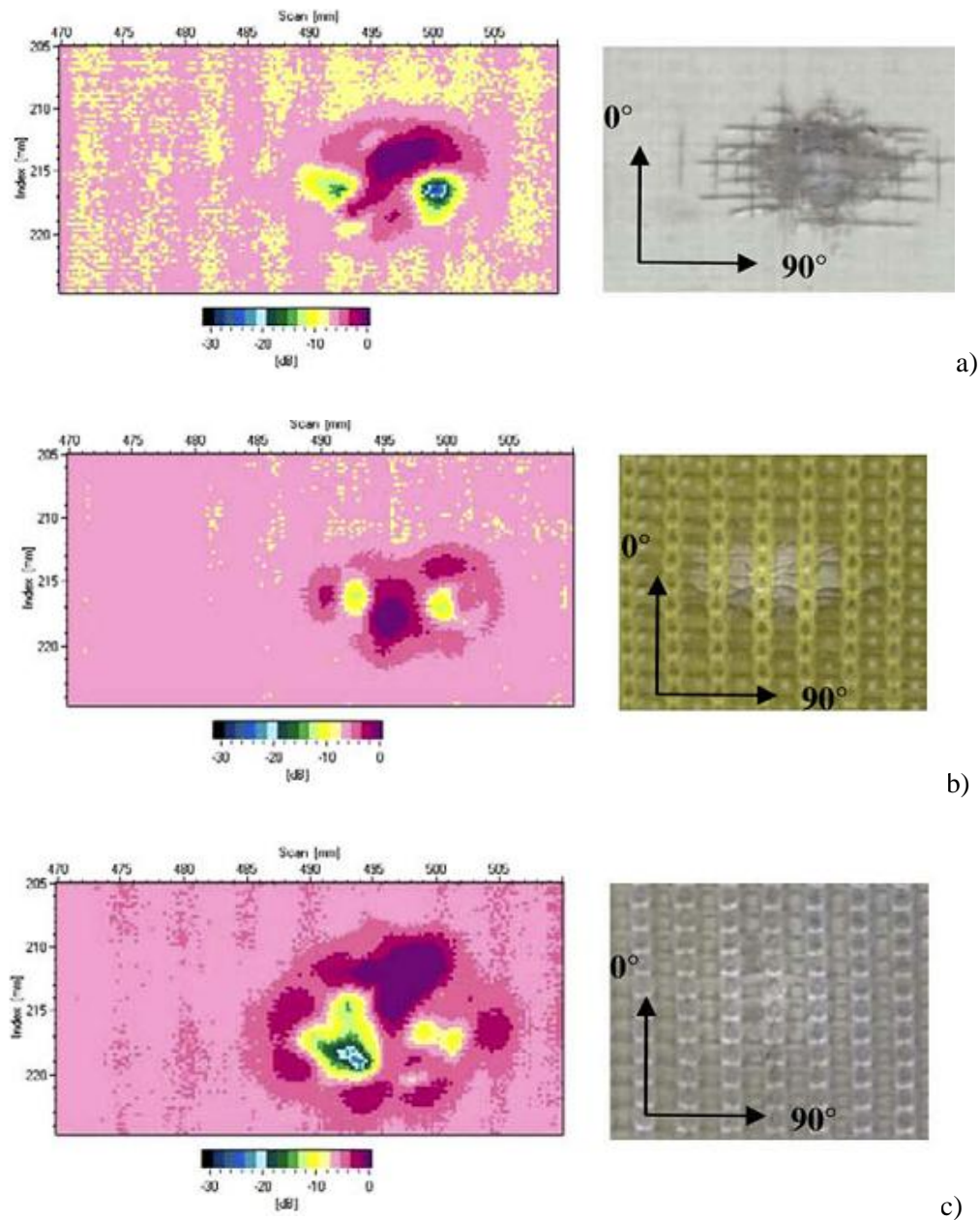
Quando sujeitos a cargas de impacto, os compósitos reforçados com fibras de HM, como as de carbono e boro, apresentam uma menor resistência em relação aos reforçados com fibras de vidro ou mesmos às usuais ligas de aço. Neste caso um modo de melhorar as propriedades ao impacto é a combinação destas fibras HM com uma fibra de módulo elástico menor como a “*E-glass*”. Juntando as vantagens de ambas, obtemos a rigidez das fibras de HM, a tolerância ao dano das de baixo módulo e uma redução de custo.

---

Um estudo efectuado com compósitos de reforço híbrido por N. K. Naik et al, (29), combina as fibras de carbono com fibras E-glass numa matriz epoxídica. As amostras são sujeitas a ensaios de compressão de taxa de carregamento de elevada deformação (high strain rate loading), através do aparelho de “*Split Hopkinson pressure bar*” (SHPB). O funcionamento do SHPB consiste na propagação de ondas elásticas através de variações de pressão. Este é um teste de carregamento dinâmico, distinto dos de carregamento estáticos ou quase-estáticos, onde normalmente as fibras de HM apresentam melhores características que os reforços híbridos. Neste caso verificou-se que o reforço híbrido de *Carbono/E-glass*, apresentou uma resistência à compressão superior aos laminados só com reforço de carbono e a deformação máxima é significativamente superior para o laminado híbrido em relação aos laminados de fibra de carbono e fibra de vidro (29).

Um outro exemplo de hibridação de reforços em materiais compósitos é demonstrado por W. Huttenbach et al, (30), num estudo realizado na Universidade Técnica de Dresden, onde se desenvolveu uma técnica para tecer fibras de reforço em três dimensões. Neste estudo pretende-se conceber reforços para aplicação em estruturas sujeitas a impactos. Combinaram-se três tipos de reforço, um deles apenas composto por fibras de vidro e duas de fibras híbridas: a primeira de fibra de vidro com fibra de aramida e a segunda com fibras de vidro e fibras de polietileno. Os três tipos de tecido são embebidos com resina epoxídica e sujeitos a testes de impacto. O objectivo é caracterizar o comportamento de cada reforço a cargas dinâmicas e tipos de ruptura. Analisando a Figura 7, (30), é possível ver a extensão do dano para cada caso. É possível observar a que para a fibra de vidro e para a fibra híbrida de vidro e aramida a extensão da delaminação é inferior que no caso da fibra de vidro com fibra de polietileno. No caso de aplicação das fibras de polietileno, mesmo estas apresentando um módulo de Young superior, a delaminação é maior, verificando-se que para fibras de módulos inferiores a extensão do dano pós impacto é menor (30).

Estes são exemplos onde a combinação de fibras com propriedades inferiores pode ter resultados surpreendentes e positivos para as aplicações desejadas. Ao aplicarem-se cargas dinâmicas os materiais estão sujeitos a solicitações muito complexas. Deste modo, quando pensamos nos materiais para formar um híbrido é necessário saber quais os esforços predominantes que serão aplicados neste material.



**Figura 7** – Imagens de C-Scan onde se pode ver a propagação da delaminação. a) Fibra de vidro; b) fibra de vidro e aramida; c) fibra de vidro e polietileno. (Imagem retirada de: W. Huttenbach et al, *Hybrid 3D-textile reinforced composites with tailored property profiles for crack and impact applications*).

Sandrine Petit et al, (31), leva a cabo um estudo de impacto em amostras de CFRP com escudo térmico de Norcoat Liège. Como foi referido anteriormente, o Norcoat Liège é um material composto de cortiça e resina fenólica que foi desenvolvido para escudo térmico. O escudo é colocado sobre amostras de dois tipos de carbono, de alta resistência (HS) e de elevado módulo (HM). Os resultados demonstram que as amostras com escudo térmico de cortiça suportam níveis de energia de impacto maiores do que as amostras só de carbono, o que demonstra uma

tolerância ao dano maior. Verifica-se também que a delaminação ocorre mais tarde no caso das amostras com escudo térmico, o que revela a capacidade de absorção de energia por parte do escudo de cortiça. Após impacto, através de ensaios C-Scan observou-se que a área afectada pelo impacto em provetes com escudo térmico é maior quando se inicia a delaminação, embora as amostras de carbono tenham sido impactadas com forças menores. Em conclusão o uso do escudo térmico revelou-se eficaz na absorção de energia revelando uma boa tolerância ao dano. As delaminações nas amostras com escudo só ocorrem para níveis de energia elevados e, muito superiores ao das amostras sem escudo (Figura 8, (31)).

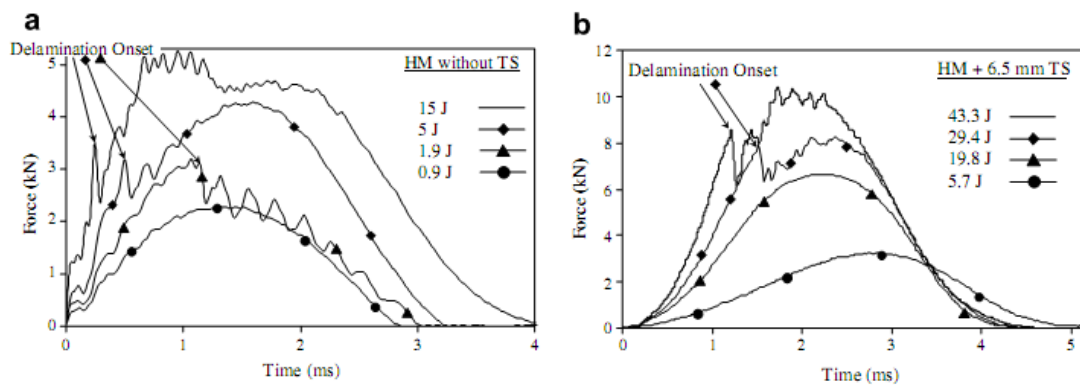


Figura 8 – Curvas de força versus tempo de amostras sujeitas a impacto para vários níveis de energia. a) Painéis de Carbono HM sem escudo térmico, b) Painéis de Carbono HM com escudo térmico (Imagens retiradas de: S. Petit et al, *Impact and compression after impact experimental study of composite laminate with cork thermal shield*).

Ao pensarmos em **carbono/epoxy** e **cortiça** estamos a combinar dois materiais de propriedades muito distintas. O carbono/epoxy é um material de excelência para aplicações de alta performance, como na indústria aeroespacial onde os requisitos são bastante elevados e, onde os factores resistência, tolerância ao dano e redução de peso e custo são imperativos. Porém a cortiça é um material que não oferece grande resistência estática, mas apresenta baixo custo e peso, propriedades visco elásticas e uma capacidade de recuperação de deformação notável. Deste modo, face às características destes materiais, este estudo visa criar um novo material que sobreponha as propriedades de ambos.

## 3. Metodologia Experimental

---

### 3.1. Processo de fabrico

O carácter deste trabalho assenta essencialmente em ensaios experimentais de várias naturezas, de modo a compreender o mais aprofundado possível o comportamento mecânico deste novo material de *carbono/epoxy* e *cortiça*. O carbono/epoxy é usado sob a forma de pré-impregnado unidireccional e a cortiça sob a forma de granulados. Para cada estudo distinto, o pré-impregnado de carbono é cortado com a geometria pretendida e depositado em camadas alternadas com os grânulos de cortiça. Após os vários empilhamentos, as amostras são curadas em autoclave com saco de vácuo seguindo o processo de cura recomendado para o prepreg.

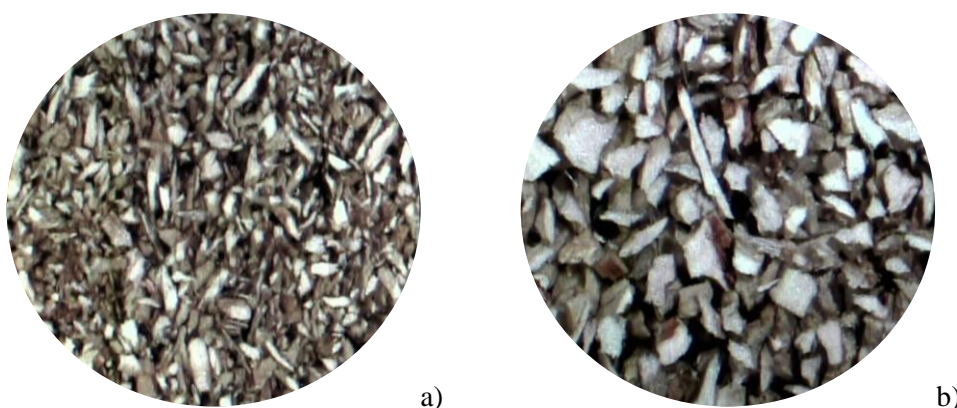
O trabalho experimental pode ser dividido em duas partes: uma parte de caracterização estática, à flexão e tracção e, outra de caracterização dinâmica, de ensaios de impacto e fadiga. Com este estudo pretende-se comparar o comportamento de laminados de carbono/epoxy convencionais com outros com grânulos de cortiça, procurando avaliar as vantagens e desvantagens da aplicação deste material natural conjuntamente com um material de alta performance no uso aeroespacial.

#### 3.1.1. Materiais

Para o fabrico de todos os provetes deste estudo foi utilizado um *pré-impregnado* da marca *SEAL*<sup>®</sup>, de referência *Texipreg HS 160 REM*. Este prepreg é formado de fibras de carbono unidireccionais de alta resistência, HS-high strength (T300), de gramagem 160g/m<sup>2</sup>, embebidas numa matriz epoxídica modificada (REM). As características deste material e do compósito resultante encontram-se descritas no Anexo 1.

O *granulado de cortiça* é outro dos materiais utilizados na construção das amostras. Para este estudo foram usados dois tipos de granulados de dimensões distintas. Os granulados são diferenciados pela indústria através de uma sigla com dois números. O primeiro faz referência à qualidade da cortiça, ou seja, a origem, e o segundo número relaciona-se com o calibre do granulado. De modo a compreender melhor as dimensões dos granulados usados, foram obtidas

imagens ampliadas de uma amostra de cada um dos tipos, usando uma lupa existente no Centro de Óptica da Universidade da Beira Interior. Posteriormente, através de um software de análise microestrutural obtiveram-se as dimensões dos grânulos e, a média do tamanho e da área de cada granulado de cortiça (**Figura 9**). O granulado de menor dimensão, ao qual denominamos de granulado fino, apresenta um grânulo de tamanho médio 0,54mm e área de 0,21mm<sup>2</sup>. O granulado maior, ao qual se dá a denominação de granulado médio, tem uma dimensão média de grânulo de 0,9mm e área de 0,64mm<sup>2</sup>.



**Figura 9 –** Imagens dos tipos de granulado de cortiça fotografados com recurso a uma lupa com ampliação de 64x. a) granulado fino, 0.54mm, b) granulado médio, 0.9mm

Para provetes onde o prepreg é empilhado conjuntamente com grânulos de cortiça, foi também usada *resina epoxy* da marca Sicomin<sup>®</sup>, e referência SR 1500, assim, como o endurecedor da mesma marca e referência SD 2503 Esta matriz foi usada para embeber os grânulos de cortiça, promovendo uma melhor adesão entre o granulado e o prepreg.

### 3.1.2. Parâmetros de estudo

O processo de fabrico das amostras é idêntico para todos os tipos de ensaio. Consiste no empilhamento de várias camadas de pré-impregnado a 0°. Consoante o teste, e de modo a cumprir as normas da ASTM (*American Society for Testing and Materials*), a geometria e espessura pretendida é diferente, o que leva a maior ou menor quantidade de camadas, como se verá adiante. As variáveis em estudo são a *granulometria da cortiça* e o tipo de empilhamento, ou seja, a colocação do granulado de cortiça em diferentes posições.

Realizaram-se dois tipos de *empilhamento* para o estudo estático do material. Em ambos os empilhamentos, o número total de camadas de pré-impregnado é igual, variando apenas o seu posicionamento. O primeiro, empilhamento A, tem duas camadas de cortiça, enquanto o empilhamento B dispõe apenas uma camada de cortiça central (Figura 10).

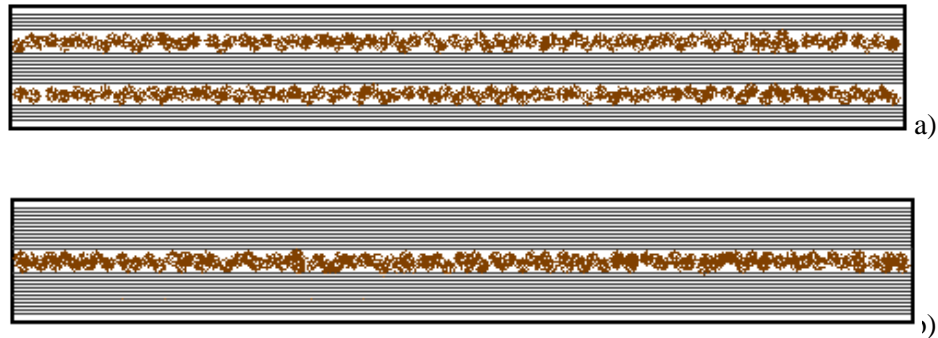


Figura 10 – Tipos de empilhamento usados nas amostras para ensaios estáticos. a) empilhamento A, b) empilhamento B.

### 3.1.3. Fabrico e processo de cura em autoclave

Para o fabrico de materiais compósitos de alta performance são usados sistemas de cura controlados, com pressão e temperatura regulados e especificados para cada material. Neste trabalho, foi usada uma autoclave de pequenas dimensões, disponível no Departamento de Engenharia Electromecânica da UBI, de modo a uniformizar o processo de fabrico dos provetes necessários para os ensaios experimentais (Figura 11). Para o processo de cura usou-se o ciclo recomendado para o pré-impregnado *Texipreg HS 160 REM* (Figura 12).

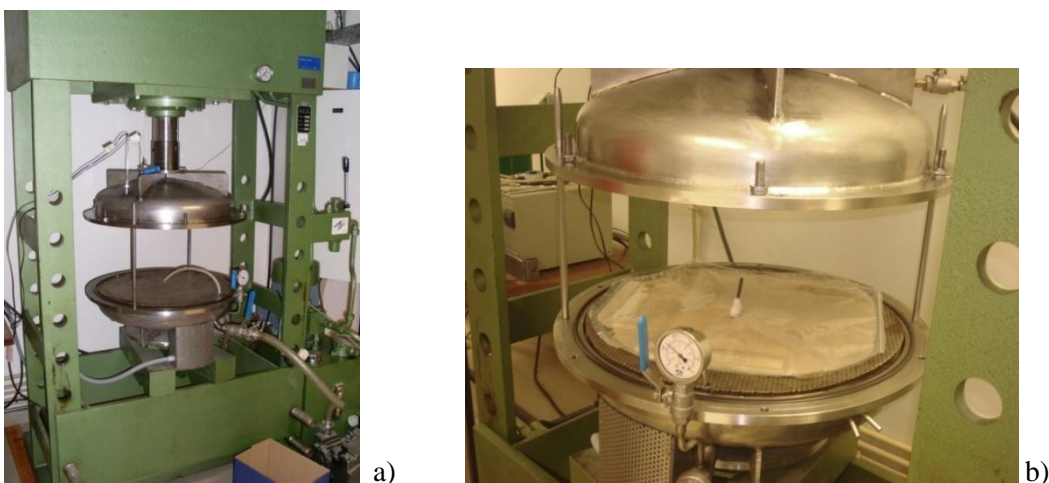


Figura 11 – a) Autoclave e Prensa, b) Pormenor da autoclave

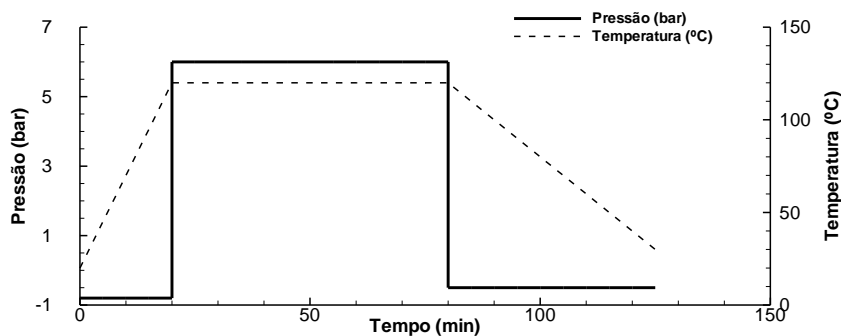


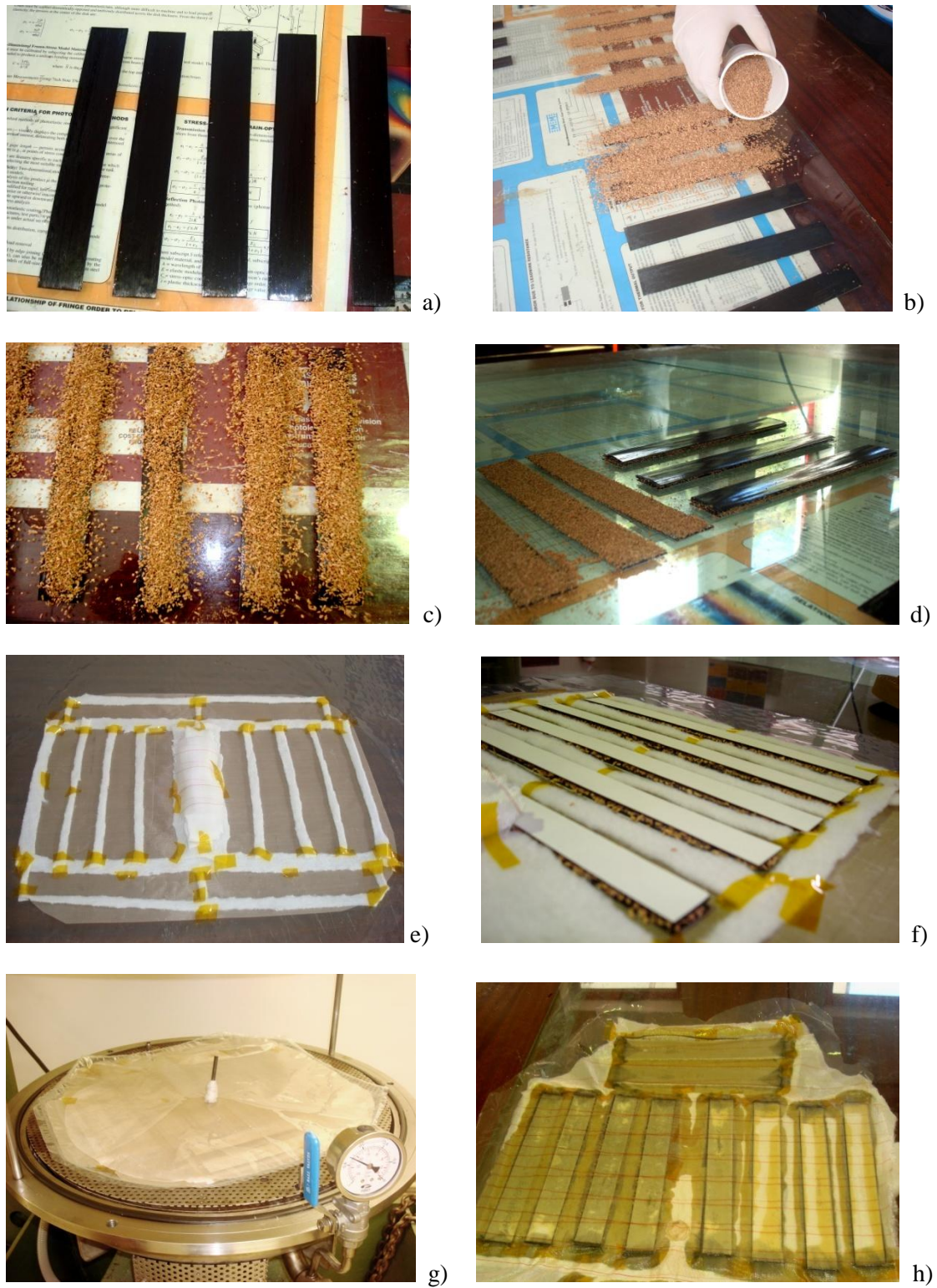
Figura 12 – Processo de cura recomendado para o pré-impregnado *Texipreg HS 160 REM* (pressão e temperatura usadas ao longo do tempo de cura)

Para o fabrico das amostras para cada ensaio, procedeu-se ao corte do prepreg com as dimensões associadas a cada estudo procedendo-se, em seguida, ao empilhamento em camadas sempre a 0° (Figura 13, a)). Nos provetes de carbono e cortiça, é usada uma fina camada de resina epoxy, colocando sobre esta os grânulos disposto de modo a formar uma fina camada de cortiça (Figura 13, b)). Foram feitos provetes com e sem cortiça para os distintos empilhamentos (Figura 13, c) e d)).

O *saco de vácuo* é feito de um plástico próprio para alta temperatura, onde se dispõe o tecido de Teflon<sup>®</sup>, evitando, assim, que as amostras fiquem coladas ao saco. Depois, a posição de cada provete é delineada com tecido absorvente que serve para acumular os excessos de resina durante o processo de cura (Figura 13, e) e f)). Por fim o saco é fechado por colagem a quente.

O vácuo é efectuado colocando um tubo na parte superior que se liga posteriormente a uma bomba de vácuo (Figura 13, g)). O saco é colocado, então, dentro da autoclave e ligado à bomba de vácuo. Fecha-se a autoclave e liga-se o sistema de pressão e temperatura para efectuar o ciclo de cura que demora aproximadamente duas horas. Após a cura, o tecido absorvente ao redor das amostras encontra-se impregnado de resina (Figura 13, h)).

O processo de fabrico com autoclave é eficiente para uniformização dos parâmetros de fabrico, produzindo amostras de alto desempenho e baixo peso. O vácuo no saco é importante na eliminação da resina em excesso que não oferece por si só mais resistência, mas aumenta o peso se não for retirada.



**Figura 13 – Etapas do processo de fabrico das amostras. a) Amostras de prepreg unidireccional, b) processo de fabrico do provetes de prepreg e cortiça, c) fabricaçaõ do empilhamento tipo B com o granulado médio, d) empilhamento tipo A com granulado fino, e) fabrico do saco de vácuo, f) colocação das amostras no saco de vácuo, g) pormenor do saco de vácuo fechado, h) Saco de vácuo pós cura.**

## 3.2. Ensaio de caracterização estática

Inicialmente procedeu-se a uma caracterização estática com recurso a ensaios de flexão em três pontos e tracção. Estes ensaios têm o objectivo de caracterizar estaticamente o material e retirar desses ensaios a melhor configuração a aplicar nos ensaios dinâmicos. Ao estudar o comportamento do material à flexão e à tracção, é possível definir quais os parâmetros a escolher para inserir nos ensaios de impacto e fadiga, respectivamente.

### 3.2.1. Ensaio de flexão em três pontos

#### i. Descrição da metodologia

Os ensaios de flexão em três pontos têm o objectivo de caracterizar mecanicamente o material, de modo a compreender o seu comportamento para este tipo de solicitação.

A realização dos ensaios foi regida pela norma da ASTM D790-03: *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials* (32) O actuador e os suportes devem ter formas cilíndricas de modo a evitar falhas por concentração de tensões, e o raio do actuador deve ter no mínimo 3,2 mm (Figura 14).

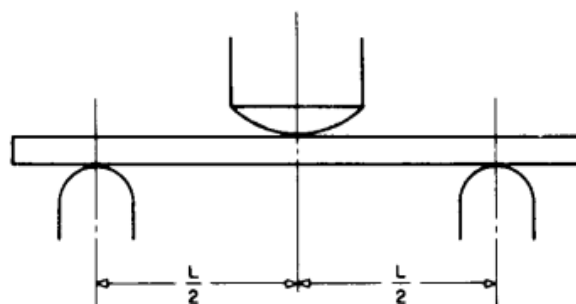


Figura 14 – Representação esquemática de ensaios de flexão em três pontos

Através da aplicação de uma carga à flexão, o material flexiona sendo sujeito a cargas de compressão na superfície em contacto com o actuador e de tracção na superfície inferior. Através da deflexão do material e da força que este suporta é possível calcular a tensão directa

associada à flexão,  $\sigma_f$ , (Equação 7), a extensão,  $\epsilon_f$ , (Equação 8) e o módulo de elasticidade,  $E_B$ , (obtido pelo método da tangente) (Equação 9).

$$\text{Equação 7} \quad \sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

$$\text{Equação 8} \quad \epsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

$$\text{Equação 9} \quad E_B = \frac{L^3m}{4bd^3}$$

P = Carga aplicada (N);

D = Deflexão máxima no centro da amostra (mm);

L = Distância entre apoios (mm);

b = largura da amostra (mm);

d = espessura da amostra (mm).

m = Declive da tangente da zona elástica

## ii. Geometria e caracterização das amostras

A geometria dos provetes é escolhida seguindo também requisitos referenciados na norma ASTM D790. A espessura da amostra não pode exceder a largura da mesma e a distância entre apoios deve ser pelo menos dezasseis vezes superior à largura (Equação 10).

$$\text{Equação 10} \quad 16 < \frac{L}{d} < 60$$

A geometria e caracterização das amostras segue as disposições indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Geometria das amostras sujeitas a ensaios de flexão em três pontos

Amostras	Espessura d (mm)	Largura b (mm)	Vão L (mm)	L/d
Carbono [0° <sub>10</sub> ]	1,56	25	80	51,3
Carbono e granulado fino Empilhamento A [0° <sub>3</sub> /cortiça/0° <sub>2</sub> ]s	1,71	25	80	48,2
Carbono e granulado fino Empilhamento B [0° <sub>5</sub> /cortiça]s	1,66	25	80	46,8
Carbono e granulado médio Empilhamento A [0° <sub>3</sub> /cortiça/0° <sub>2</sub> ]s	2,20	25	80	41
Carbono e granulado médio Empilhamento B [0° <sub>5</sub> /cortiça]s	1,95	25	80	36,4

### iii. Equipamento

Os testes de flexão em três pontos foram realizados na Universidade da Beira Interior numa máquina *Zwick 1435* de accionamento electromecânico. Este equipamento possui uma célula de carga de 5kN, tendo sido usado um sistema de suporte dos provetes com um raio de 5mm; o raio do actuador, com geometria hemi-esférica, é de 10mm. A velocidade do actuador é regulada pelo software de comando da máquina (*Zwick V 5.43.*), tendo sido escolhida uma razão de avanço de 5mm/min, de acordo com as recomendações da norma.



Figura 15 – Equipamento de ensaios de flexão estática ZWICK 143

### 3.2.2. Ensaio à tracção

#### i. Descrição da metodologia

Neste tipo de ensaio pretende-se quantificar as propriedades à tracção do material. A realização dos ensaios foi regida pela norma da ASTM D3039/D 3039M-00: *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composites Materials* (33). Nesta constam todos os requisitos para ensaios de tracção em materiais de matriz polimérica.

O objectivo centra-se na determinação da tensão última à tracção,  $\sigma_{ul}$ , (Equação 11), assim como da extensão do material e seu módulo elástico. A extensão é medida através de um extensómetro de marca Instron, referência 1620-602 e extensão máxima de 2,5m, que se coloca na amostra para cada ensaio. Para obter o módulo de elasticidade à tracção,  $E_c$ , calcula-se o declive da zona elástica da curva Tensão-Extensão (Equação 13). Esta curva é traçada com os valores de tensão calculados através da força e da extensão medida pelo extensómetro.

$$\text{Equação 11} \quad \sigma_{ul} = \frac{P_{max}}{A}$$

$$\text{Equação 12} \quad A = b \cdot d$$

$$\text{Equação 13} \quad E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$$

$P_{max}$  = Força máxima antes da ruptura (N);

$A$  = Área (mm<sup>2</sup>).

$b$  = Largura da amostra (mm);

$d$  = Espessura da amostra (mm).

## ii. Geometria e caracterização das amostras

Os ensaios de tracção em compósitos exigem algumas cautelas especiais. Como é óbvio, os provetes necessitam de ser bem fixados, o que é feito através de amarras hidráulicas com pressão de aperto ajustável. No entanto, ocorre por vezes o esmagamento do provete na zona de encaixe com a amarra. De modo a evitar esta possibilidade, colocam-se pedaços de metal (tabs) nas extremidades do provete para aumentarem a resistência ao esmagamento e distribuírem as tensões resultantes do aperto.

Assim sendo o requisito de geometria dos provetes é condicionado pelas dimensões dos tabs, já que o comprimento mínimo da amostra deve ser igual à soma do comprimento dos tabs, mais duas vezes a largura do provete, mais o comprimento da zona central de ensaio. As dimensões recomendadas para fibras unidireccionais são:

Largura b (mm)	Comprimento L (mm)	Espessura t (mm)	Comprimento do tab (mm)	Espessura do tab (mm)
15	250	1	56	1.5

Para o presente trabalho, usaram-se tabs feitos em alumínio com uma espessura de 3mm, pois oferecem uma maior resistência que os de 1,5mm inicialmente utilizados, tendo estes últimos sido esmagados aquando do accionamento das amarras (Figura 16 – Pormenor dos tabs e provetes usados nos ensaios de tracção). Os tabs foram também chanfrados para evitar a concentração de tensões na transição com a superfície do provete.

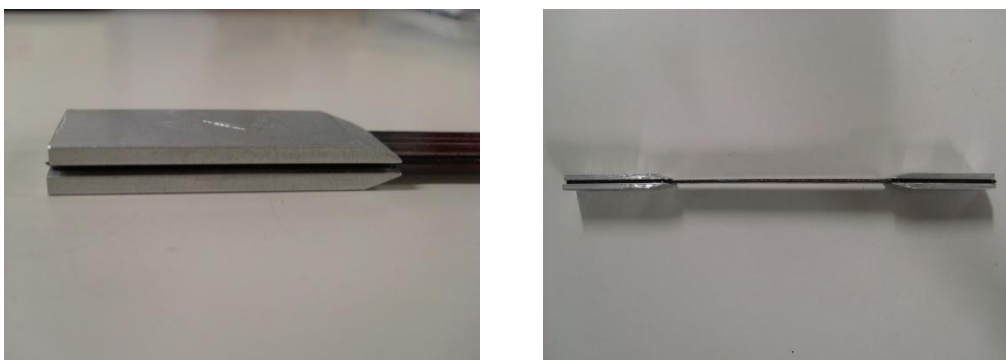


Figura 16 – Pormenor dos tabs e provetes usados nos ensaios de tracção

Tabela 2 - Geometria das amostras sujeitas a ensaios de tracção estática

Amostras	Espessura d (mm)	Largura b (mm)	Comprimento L (mm)	Espessura do tab (mm)	Comprimento do tab (mm)
Carbono [0° <sub>10</sub> ]	1,48	15	80	3	55
Carbono e granulado fino Empilhamento A [0° <sub>3</sub> /cortiça/0° <sub>2</sub> ]s	1,57	15	80	3	55
Carbono e granulado fino Empilhamento B [0° <sub>5</sub> /cortiça]s	1,53	15	80	3	55
Carbono e granulado médio Empilhamento A [0° <sub>3</sub> /cortiça/0° <sub>2</sub> ]s	1,69	15	80	3	55
Carbono e granulado médio Empilhamento B [0° <sub>5</sub> /cortiça]s	1,6	15	80	3	55

### iii. Equipamento

Os ensaios à tracção das diferentes amostras foram realizados na máquina de ensaios mecânicos universal *Instron 1341*, instalada na Universidade da Beira Interior. Este equipamento possui uma célula de carga com um limite de 100kN ou 50kN, consoante se considere um carregamento estático ou dinâmico. O comando deste equipamento é feito com recurso a um controlador digital e softwares fornecidos pelo fabricante, *Fast Track 8800* e *Sax V6.5*. Com estes é possível escolher o modo de carregamento e a velocidade do actuador. Para os ensaios realizados foi efectuado um carregamento linear com velocidade de 1mm/min.



Figura 17 – Máquina universal de ensaios INSTRON 1341 e sistema de controlo associado.

### **3.3. Ensaios de caracterização dinâmica**

#### **3.3.1 Ensaios de fadiga**

##### **i. Descrição da metodologia**

Este tipo de ensaio é comumente usado na previsão de vida de componentes fabricados em materiais compósitos. A norma que rege os requisitos de ensaio em materiais compósitos é a ASTM 3479/D 3479M-96: *Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composites Materials* (34).

O carregamento cíclico necessário para a fadiga foi obtido sob a forma de uma onda sinusoidal de amplitude constante. A tensão máxima limite é obtida através de ensaios de tracção estática. A partir desta, e tendo em vista a obtenção de um diagrama típico S-N (i.e., ciclos de carregamento até à ruptura do material em função do nível de tensão aplicada), consideraram-se 4 níveis de carregamento: 90%, 80%, 75% e 60%. Estes níveis são uma percentagem da tensão limite admissível pelo material em condições de carregamento estático.

Considerou-se para o presente trabalho que os ensaios que evidenciaram uma vida à fadiga superior a  $10^6$  ciclos sem ocorrência de ruptura da amostra correspondiam a uma condição de vida infinita. Para cada nível de tensão e parâmetro em estudo efectuaram-se sempre, no mínimo cinco ensaios, tal como recomendado pela norma.

##### **ii. Geometria e caracterização das amostras**

A geometria dos provetes segue a norma ASTM D3039/D 3039M-00, também usada para os ensaios estáticos de tracção. Deste modo os provetes para ensaios de fadiga apresentam as mesmas dimensões que os usados nos ensaios de tracção estática, tendo sido utilizados o mesmo tipo de tabs.

Neste estudo apenas são usados dois tipos de amostras: provetes com dez camadas unidireccionais de carbono e provetes de carbono/cortiça de granulometria fina com o empilhamento tipo B. Na Tabela 3 apresentam-se as dimensões de cada tipo de provete.

Tabela 3 - Geometria das amostras sujeitas a ensaios de fadiga

Amostras	Espessura d (mm)	Largura b (mm)	Comprimento L (mm)	Espessura do tab (mm)	Comprimento do tab (mm)
Carbano [0° <sub>10</sub> ]	1,48	15	220	3	55
Carbano e granulado fino Empilhamento B [0° <sub>5</sub> /cortiça]s	1,65	15	220	3	55

### iii. Equipamento

Utilizou-se uma máquina de ensaios universal *Instron 1341*, a mesma usada para os ensaios de tracção estática anteriormente descritos. Usando o software de controlo deste equipamento definiu-se um carregamento recorrendo a uma onda sinusoidal com amplitude constante, razão de tensões  $R=0,1$  e a uma frequência de 6Hz.

### 3.3.2 Ensaios de impacto de baixa velocidade

#### i. Descrição da metodologia

Os ensaios de baixa velocidade avaliam a resistência do material sujeito a impacto por queda de uma massa por acção da gravidade. Os testes são feitos para vários níveis de energia, variando a altura da queda da massa. A resistência da amostra depende da sua geometria, da geometria e massa do impactor, força e energia de impacto e condições de fronteira. Nesta investigação usaram-se três níveis de energia: 5, 10 e 15J. Após impacto é necessário quantificar o dano usando métodos não destrutivos ou seccionando os provetes e analisando a extensão do dano.

Este tipo de ensaios seguiram a norma ASTM D7136/D 7136M-05: *Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event* (35) . A fixação dos provetes pode ser feita de dois modos: em quatro pontos através de pinças ou usando um suporte superior fixo por quatro parafusos com janela de impacto pré-definida. Para o presente estudo utilizou-se o segundo modo de fixação, o qual está representado na Figura 18, com uma janela de impacto de 10mm x 7,5mm.

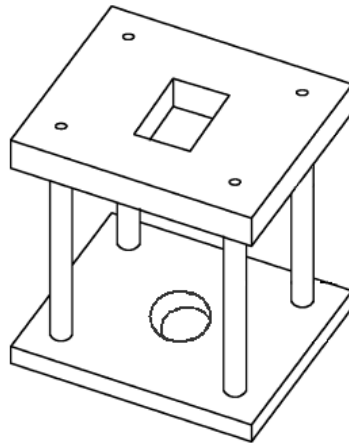


Figura 18 – Representação da fixação para os ensaios de impacto, com suporte superior e quatro parafusos de fixação.

## ii. Geometria e caracterização das amostras

As amostras de resistência ao impacto têm medidas standard bem definidas pela norma. Devem ser rectangulares (150mm x 100mm) e ter uma espessura entre 4 e 6mm (Figura 19). Para alcançar o objectivo de 5mm de espessura foram empilhadas 28 camadas a  $0^\circ$  nas amostras de prepreg ; nas amostras com granulado de cortiça usou-se o mesmo número de camadas e o empilhamento tipo A com a seguinte sequência  $[0^\circ_4/\text{cortiça}/0^\circ_{10}]$  (ver especificações das amostras no Anexo 2).

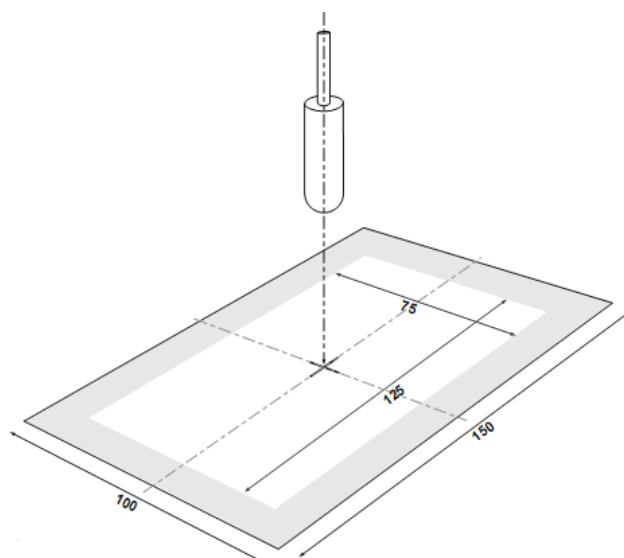


Figura 19 – Dimensões das amostras utilizadas nos ensaios de impacto.

### iii. Equipamento

Nos ensaios de resistência ao impacto usou-se uma máquina de queda de massa IMATEK série 10 disponível no Instituto Politécnico de Tomar (Figura 20). Este equipamento controla a altura de queda, a velocidade e a energia de impacto que varia entre 4 e 882 J. O carrinho de queda tem uma massa de 3,005kg e o impactor um diâmetro de 20mm. A célula de carga tem capacidade de leitura de forças entre  $\pm 60\text{kN}$ . O software apresenta capacidade de amostragem de  $1,25 \times 10^6$  por segundo, permitindo adquirir informação sobre o tempo, aceleração, velocidade, deslocamento, força e energia de impacto. Com todos estes parâmetros é possível construir qualquer curva de resposta do material e obter toda a informação sobre o ensaio.

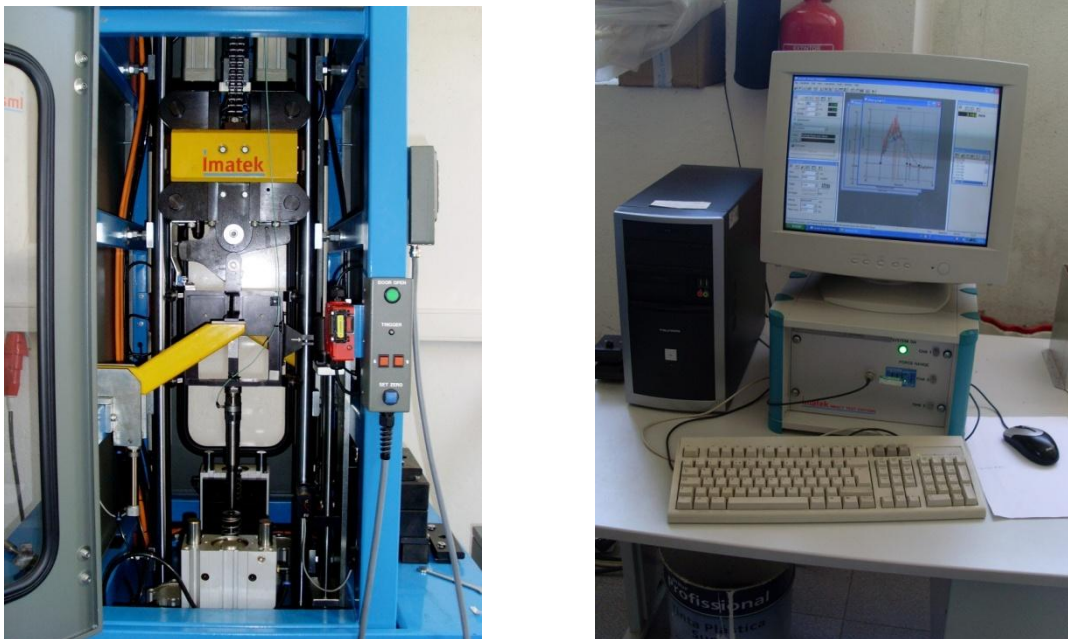


Figura 20 – Máquina de ensaios de impacto IMATEK e software de aquisição de dados

## 4. Análise e discussão de resultados

---

### 4.1 Características à Flexão

Este trabalho iniciou-se com uma análise das propriedades estáticas das várias amostras para provetes com e sem cortiça, onde os parâmetros em estudo foram os mesmos: granulometria da cortiça, fina ou média, e empilhamento, A ou B.

Em primeiro lugar, foram efectuados ensaios de flexão em três pontos para provetes unidireccionais de carbono/epoxy e carbono/epoxy com cortiça. A Tabela 4 compila a informação das tensões de ruptura média e do módulo elástico médio, obtidos para os cinco tipos de material. Apresentam-se, também, as diferenças percentuais verificadas nos valores relativos a estes parâmetros comparando todas as configurações de provetes com e sem cortiça.

Tabela 4 – Valores médios da tensão de ruptura e módulo elástico. Relação percentual entre as amostras com e sem granulados de cortiça

Amostras	$\sigma_{rmed}$ [MPa]	$\Delta\sigma_r$ [%]	$E_{fmed}$ [GPa]	$\Delta E_f$ [%]
Carbono [0° <sub>10</sub> ]	1628,0	-	112,9	-
Carbono e granulado fino Empilhamento A [0° <sub>3</sub> /cortiça/0° <sub>2</sub> ]s	1316,3	-19,8	106,0	-7,9
Carbono e granulado fino Empilhamento B [0° <sub>5</sub> /cortiça]s	1199,0	-26	104,2	-6
Carbono e granulado médio Empilhamento A [0° <sub>3</sub> /cortiça/0° <sub>2</sub> ]s	902,2	-44,5	88,0	-12
Carbono e granulado médio Empilhamento B [0° <sub>5</sub> /cortiça]s	583,7	-64	73,0	-26,6

Analisando a tabela de resultados verificam-se perdas de 19,8 e 26% na tensão limite nas amostras com granulado de cortiça fino, sendo as perdas mais significativas para o caso das amostras com granulado médio, onde se obtém uma redução de 44,5 a 65%, consoante a localização da camada de cortiça.

A influência da presença da cortiça nos laminados manifesta-se, também, através de uma diminuição dos valores de módulo elástico, verificando-se, novamente, uma diminuição mais acentuada para as amostras construídas com granulado de cortiça médio, entre 12 e 26,6%, enquanto que nas amostras de grânulos finos as perdas andam entre os 6 e 7,9%, consoante a localização da camada de cortiça.

Outro parâmetro em estudo é o empilhamento, que distingue a colocação do granulado de cortiça entre as camadas de pré-impregnado. Fazendo a análise entre o mesmo tipo de grânulo, para o caso do granulado fino, verifica-se que o tipo de empilhamento tem uma influência menor que no caso do granulado médio. Observando o Gráfico 1 vê-se uma ligeira diminuição da tensão de ruptura para o caso do empilhamento B (Cf5 a Cf8). Existe uma diminuição de cerca de 9% do valor da tensão de ruptura entre os dois tipos de empilhamento. No caso do Gráfico 2, referente ao granulado médio, a perda entre os dois tipos de empilhamento é maior, concretamente o empilhamento tipo B apresenta uma perda de 35% em relação ao tipo A.

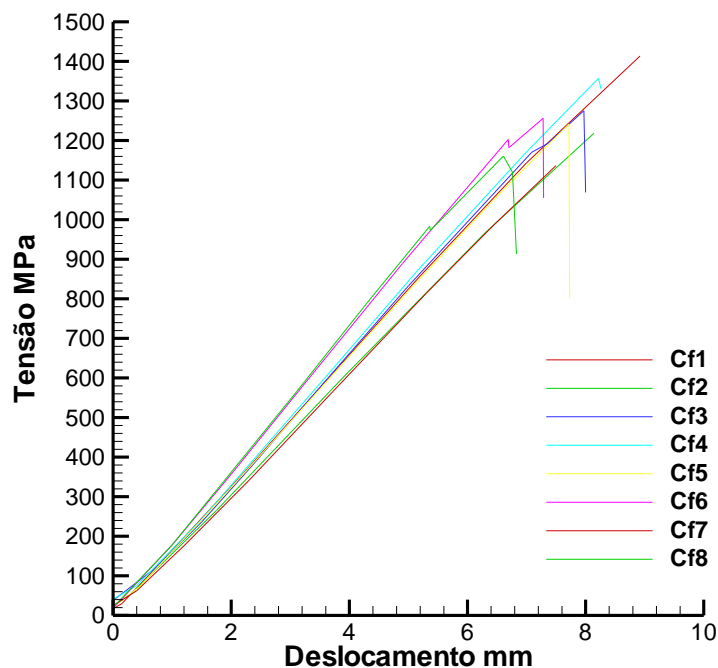
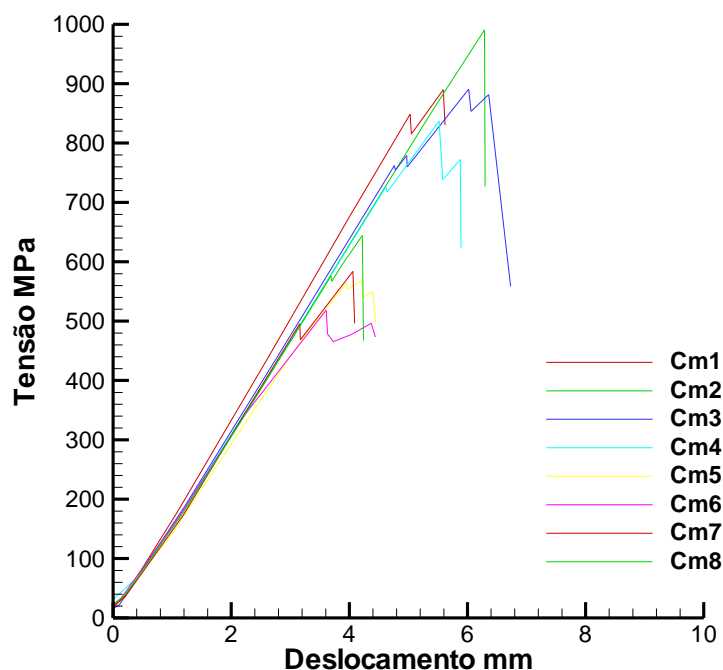


Gráfico 1 - Curva tensão-deslocamento para amostras de granulado fino com os dois tipos de empilhamento A e B. (Cf1 a Cf4 – Emp. A e Cf5 a Cf8 – Emp. B)



**Gráfico 2 - Curva tensão-deslocamento para amostras de granulado médio com os dois tipos de empilhamento A e B. (Cm1 a Cm4 – Emp. A e Cm5 a Cm8 – Emp. B)**

Comparando os resultados de cada granulado com os laminados sem cortiça, observa-se, no caso das amostras de granulado fino, uma diminuição de 20% na tensão de ruptura para o empilhamento tipo A, aumentando para 45% no caso das amostras de granulado médio (**Gráfico 3**).

Já para o empilhamento tipo B, comparando novamente com os provetes sem cortiça, ambos os tipos de granulado apresentam maiores perdas nos valores de tensão de ruptura, sendo esta é bastante significativa para o caso do granulado médio. Concretamente, verifica-se uma diminuição na ordem dos 26% nas amostras com granulado de cortiça fino e de 64% nas amostras com granulado de cortiça médio (**Gráfico 4**).

Face aos resultados obtidos, de um modo geral, o granulado de cortiça fino apresenta menores perdas em ambos os empilhamentos propostos. Comparando os dois tipos de empilhamento, verifica-se que o empilhamento A é o que apresenta uma melhor configuração para carregamento à flexão.

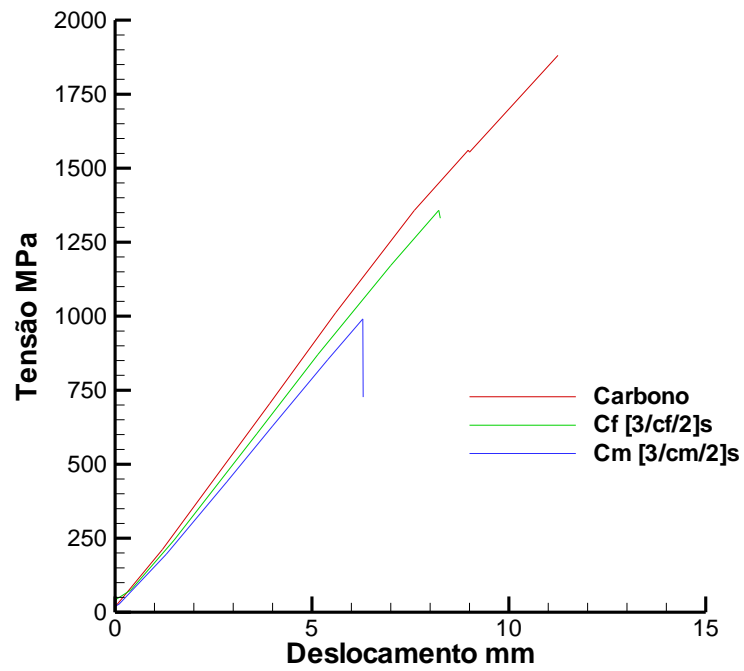


Gráfico 3 – Curva tensão-deslocamento de comparação entre o pré-impregnado e as amostras de empilhamento A para os dois tipos de granulados.

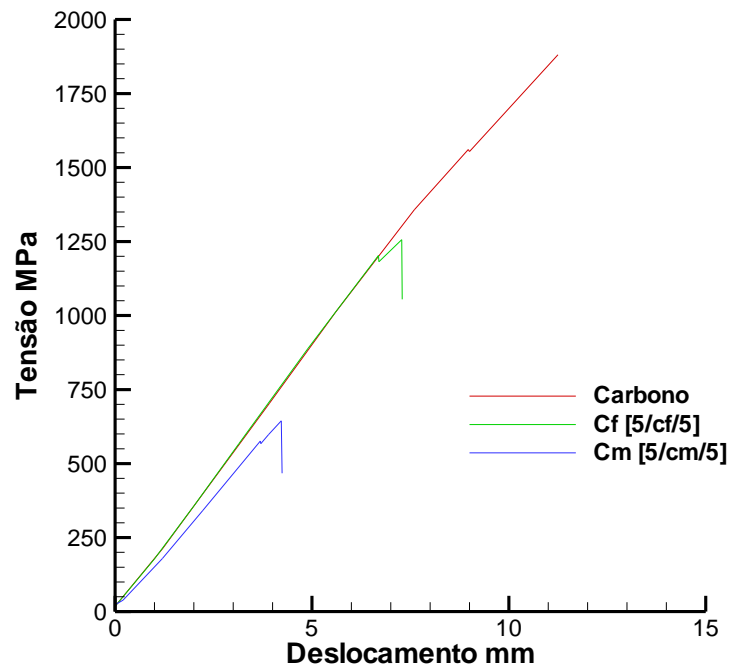


Gráfico 4 - Curva tensão-deslocamento de comparação entre o pré-impregnado e as amostras de empilhamento B para os dois tipos de granulados.

## 4.2 Características à Tracção

Para os ensaios de tracção estática procedeu-se de forma análoga aos ensaios de flexão. Ensaaiaram-se provetes unidireccionais de carbono/epoxy e carbono/epoxy com cortiça. O objectivo centra-se na comparação das tensões de ruptura e módulo elástico à tracção entre os provetes com e sem cortiça.

Na Tabela 5 observam-se todos os valores obtidos para cada tipo de amostra, efectuando-se uma comparação percentual entre o prepreg e as amostras com granulados de cortiça para os dois tipos de empilhamento.

**Tabela 5 - Valores médios da tensão de ruptura e módulo elástico à tracção. Relação percentual entre as amostras com e sem granulados de cortiça**

<b>Amostras</b>	<b><math>\sigma_{rmed}</math> [MPa]</b>	<b><math>\Delta\sigma_r</math> [%]</b>	<b><math>E_{tmed}</math> [GPa]</b>	<b><math>\Delta E_t</math> [%]</b>
<b>Carbono [0°10]</b>	1841,4	-	137,6	-
<b>Carbono e granulado fino Empilhamento A [0°3/cortiça/0°2]s</b>	1382,4	-24,9	134,0	-2,6
<b>Carbono e granulado fino Empilhamento B [0°5/cortiça]s</b>	1719,7	-6,6	138,2	+ 0,4
<b>Carbono e granulado médio Empilhamento A [0°3/cortiça/0°2]s</b>	1277,1	-30,6	120,4	-12,5
<b>Carbono e granulado médio Empilhamento B [0°5/cortiça]s</b>	1407,3	-23,6	135,9	-1,2

A tabela demonstra que amostras com granulado de cortiça médio apresentam valores de tensão de ruptura 23,6 a 30,6% inferiores aos dos laminados sem cortiça, embora para as amostras de granulado fino apresentem perdas entre 6,6 a 24,9%. Ao analisar as variações de módulo

elástico, detecta-se novamente um efeito mais evidente da cortiça com maior granulometria, já que os provetes com granulado médio apresentam valores inferiores, na ordem dos -1,2 e -12,5% em relação ao material sem cortiça. No caso das amostras de granulado fino, regista-se um ganho mínimo de 0,4%, no módulo elástico no caso do empilhamento B, e uma diminuição de 2,6% nas de empilhamento A.

Analisando o Gráfico 5, observa-se para qualquer um dos empilhamentos usados, as amostras com granulado de cortiça fino (Cf) apresentam uma tensão limite de ruptura superior à das amostras de granulado médio (Cm). Dentro do mesmo granulado, o empilhamento A demonstra-se um comportamento inferior à tracção que o empilhamento B, com perdas de 9,3 e 19,6%, para o granulado médio e granulado fino, respectivamente.

Em termos de granulometria da cortiça, o granulado fino apresenta novamente perdas inferiores em relação aos laminados sem cortiça, verificando-se mesmo grande similaridade entre os seus módulos elásticos. O empilhamento tipo B demonstra propriedades à tracção superiores ao empilhamento tipo A para os dois tipos de granulado.

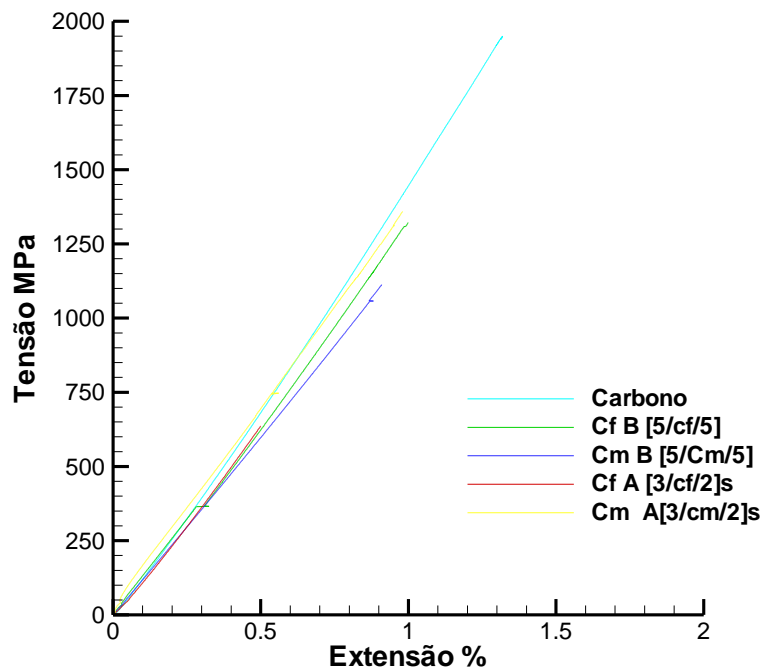


Gráfico 5 - Curva tensão-extensão de comparação entre o pré-impregnado e as amostras de empilhamento A e B para os dois tipos de granulados.

### 4.3 Características à fadiga

Após a realização dos ensaios de tracção estática, escolheu-se a melhor configuração a ser submetida aos ensaios de fadiga. Assim, optou-se pelo tipo de empilhamento B com granulado de cortiça fino, uma vez que este levou a valores de tensão de ruptura mais próximos dos valores obtidos para o carbono/epoxy sem cortiça.

Todos os níveis de carregamento usados para os ensaios de fadiga foram estabelecidos a partir do valor da tensão de ruptura obtida em condições de carregamento estático. Assim, os ensaios foram iniciados para 90% da carga limite de ruptura, embora posteriormente, devido a dificuldades no carregamento estático, se efectuassem essencialmente carregamentos a 80%, 75% e 60% da carga limite.

**Tabela 6 – Valores de carregamento efectuados para os ensaios de fadiga**

	<b>100%</b>	<b>90%</b>	<b>80%</b>	<b>75%</b>	<b>60%</b>
<b>Fmax kN</b>	40	36	32	30	24
<b>Fmin kN</b>	4	3,6	3,2	3	2,4
<b>Fmed kN</b>	22	19,8	17,6	16,5	13,2
<b>Amplitude kN</b>	18	16,2	14,4	13,5	10,8
<b>Tensão média Carbono</b>	1810,4	1629,3	1448,3	1357,8	1086,2
<b>Tensão média Carbono/Cortiça</b>	1621,1	1459	1296,9	1215,8	972,6

Foram realizados no mínimo três ensaios para cada nível de carregamento. No carregamento a 60% nenhuma das amostras partiu até ao número de um milhão de ciclos, tendo evidenciado um comportamento coerente, dispensando a realização de ensaios adicionais. Para carregamentos a 75% e 80%, obtiveram-se alguns resultados inconsistentes e a ocorrência de fracturas junto aos tabs. Nestes casos, os resultados foram rejeitados e repetiram-se os ensaios, obtendo no mínimo cinco ensaios válidos dos quais os três mais próximos foram considerados. No Anexo 5 é possível ver todos os provetes que foram ensaiados.

O Gráfico 6 apresenta a curva S-N das amostras de carbono/epoxy. Neste verifica-se que para um carregamento de 75% as amostras suportaram um número médio de 146 mil ciclos e, nos carregamentos a 80% o número médio foi 103 mil ciclos.

Nos ensaios de fadiga nos provetes de carbono com granulado de cortiça verifica-se também vida infinita para o carregamento a 60%, tendo todos os provetes suportado um milhão de ciclos. A 75% e 80% da carga máxima verifica-se o número médio de 389 mil e 124 mil ciclos respectivamente.

Comparando os valores do número de ciclos para cada nível de tensão em ambos os tipos de materiais, detecta-se uma ligeira tendência para aumento da vida à fadiga dos provetes com cortiça. Este facto pode ser observado através do Gráfico 6 que reúne as curvas S-N para os provetes com e sem cortiça, considerando níveis de tensão adimensionalizados.

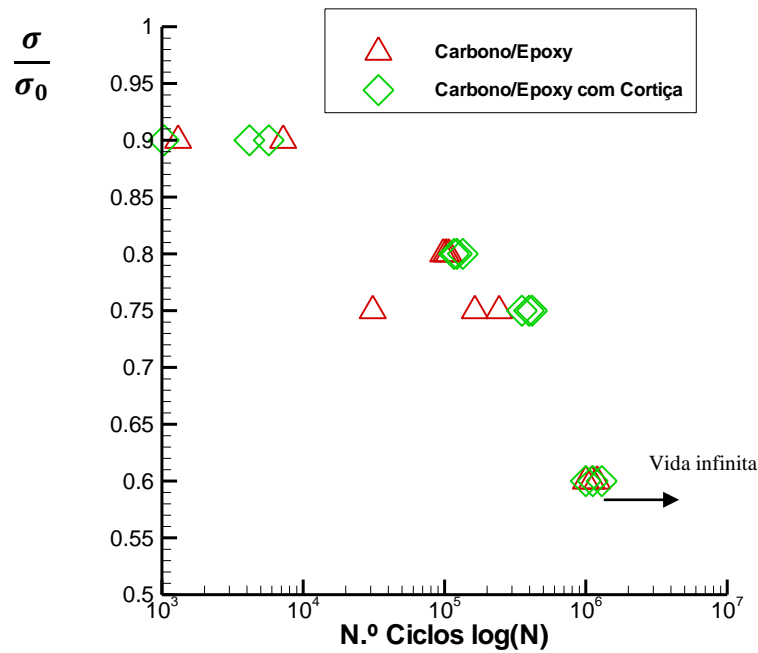


Gráfico 6 - Curva S-N de fadiga para os provetes com e sem cortiça

#### 4.4 Características ao Impacto de baixa velocidade

Nos ensaios de resistência ao impacto, pretende-se uma vez mais compreender o comportamento do carbono/epoxy com granulado de cortiça em comparação com amostras só de carbono/epoxy. A configuração adoptada para amostras de carbono e granulado de cortiça foi

a tipo A, mas neste caso com um maior número de camadas de pré-impregnado que nos restantes ensaios de modo a se alcançar uma maior espessura:  $[0^4/cortiça/10]_s$ , num total de 28 camadas de prepreg e duas de cortiça mais próximas das faces. Analisaram-se, ainda, os dois tipos de granulometria.

Da análise dos gráficos de força-deslocamento, para um nível de energia de 5J, verifica-se que o deslocamento das amostras de carbono com granulado de cortiça é superior ao deslocamento dos laminados sem cortiça; porém este resultado verifica-se apenas neste nível de energia (Gráfico 7). Verifica-se, também, que as amostras de prepreg apresentam um valor de força de impacto superior para o nível de energia mais baixo. Porém, com o aumento da energia de impacto, essa diferença vai tornando-se cada vez menos significativa, não se notando qualquer efeito relativo à presença da cortiça. Os gráficos de força-tempo também permitem concluir que a duração do evento de impacto parece não depender da presença da cortiça, uma vez que os resultados obtidos são idênticos entre os dois tipos de material e para todos os níveis de energia.

A análise das curvas de energia versus tempo demonstram uma tendência de aumento da energia absorvida dos provetes com cortiça (Gráfico 8 e 9). De facto, a energia absorvida é superior para as amostras com grânulos de cortiça médios, com um valor máximo de 6J para o nível de energia de 10J (Gráfico 8). Os restantes gráficos podem ser consultados nos Anexos 6 e 7.

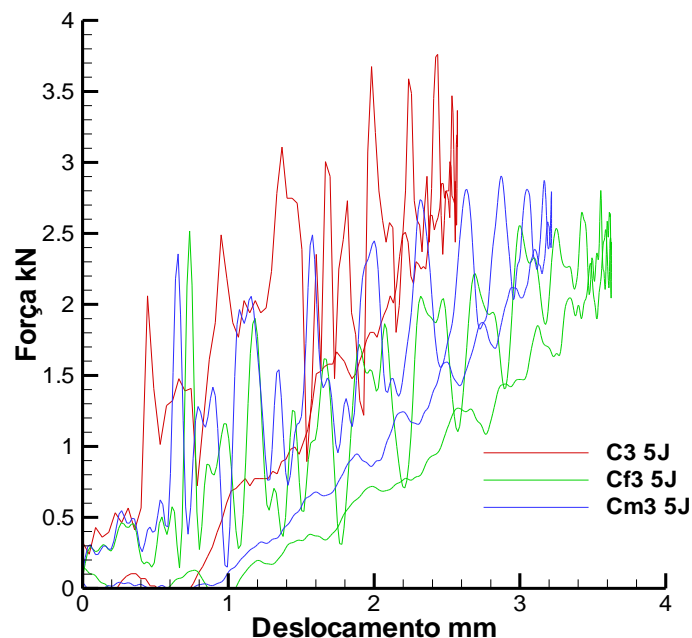


Gráfico 7 – Curva força-deslocamento para o nível de energia de 5J. Comparação entre o prepreg e os materiais com dois tipos de granulometria de cortiça

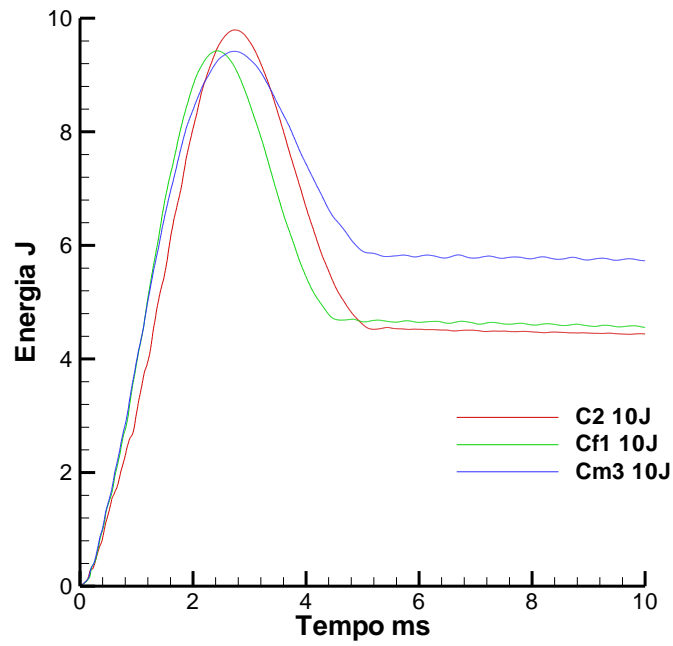


Gráfico 8 - Curva energia-tempo para o nível de energia de 10J. Comparação entre os provetes com e sem cortiça

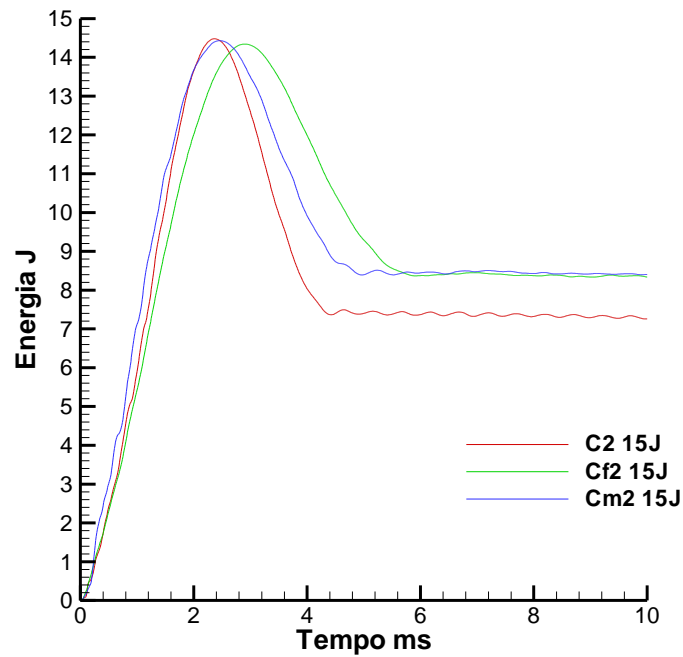


Gráfico 9 - Curva energia-tempo para o nível de energia de 15J. Comparação entre os provetes com e sem cortiça

Outro parâmetro a analisar é a força de impacto em função do tempo. Analisando os Gráfico 10 e 11, relativos às energias de 5J e 10 J respectivamente, observa-se uma ligeira tendência de amortecimento na resposta do material com a introdução dos grânulos de cortiça, sendo mais significativo esse amortecimento para o granulado médio. No entanto, este efeito não é tão notório para o nível de energia mais elevado (Gráfico 12).

Fazendo uma análise mais detalhada destas curvas através da sua ampliação para os diferentes níveis de energia, é possível detectar a ocorrência do primeiro pico de força para cada caso. Segundo alguns autores (31), este pico indica o início do processo de delaminação típico de materiais compósitos. Analisando os distintos níveis de energia constata-se que as amostras híbridas apresentam um atraso no aparecimento deste primeiro pico em relação ao material sem cortiça, indicando um atraso no início da delaminação (Gráfico 10, 11 e 12). Os restantes gráficos podem ser consultados nos Anexos 8.

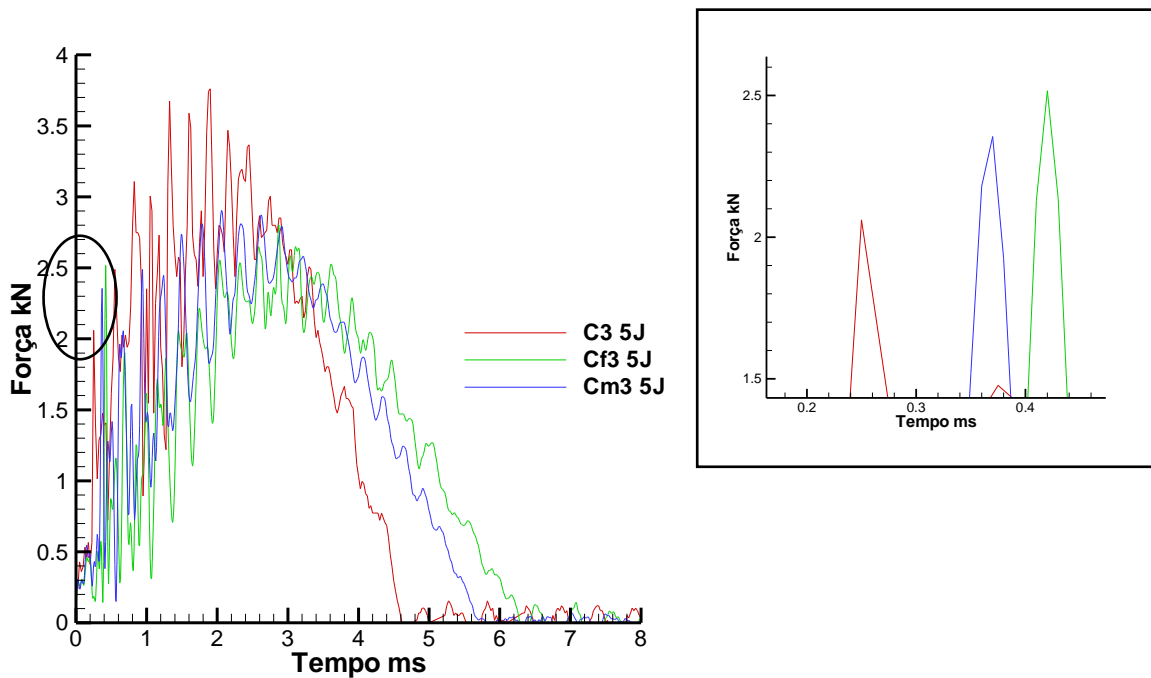


Gráfico 10 - Curva força-tempo para o nível de energia de 5J. Comparação entre o prepreg e os materiais com duas granulometrias de cortiça. Pormenor dos picos de início de delaminação para os três materiais.

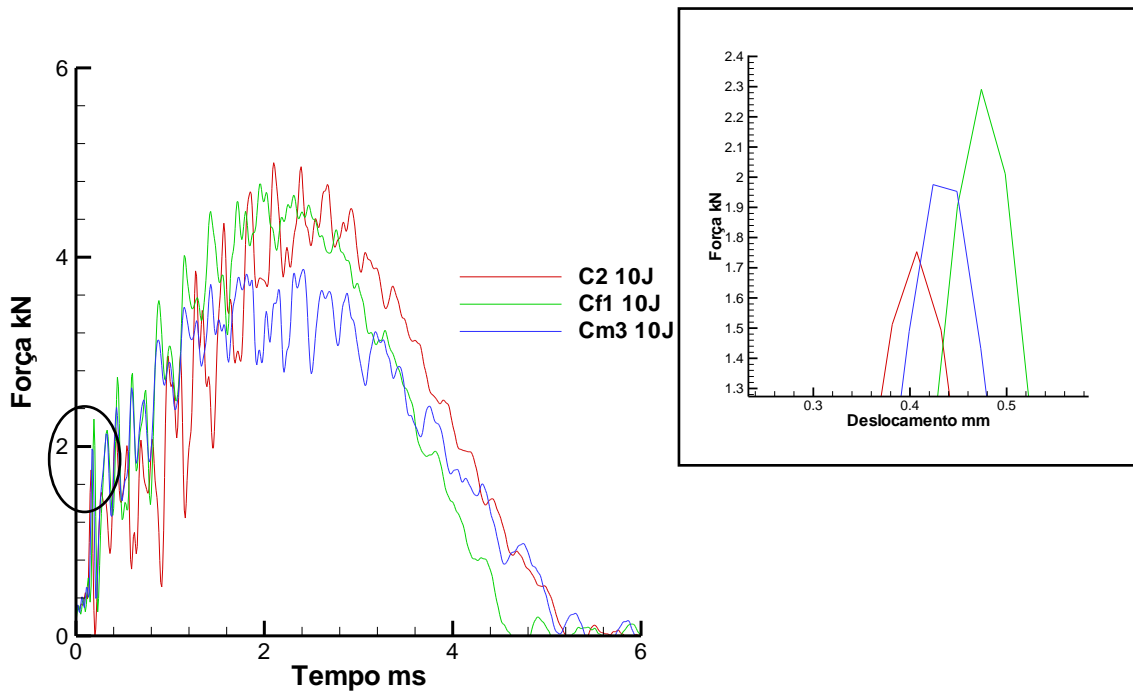


Gráfico 11 - Curva força-tempo para o nível de energia de 10J. Comparação entre o prepreg e os materiais com duas granulometrias de cortiça. Pormenor dos picos de início de delaminação para os três materiais.

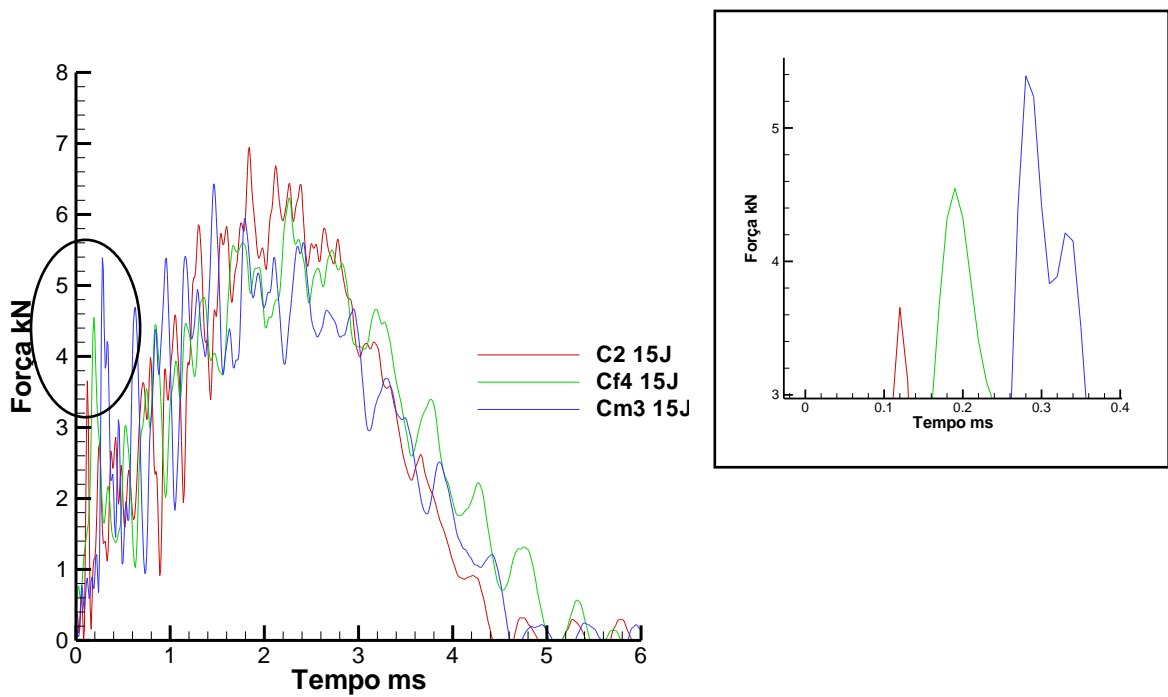


Gráfico 12 - Curva força-tempo para o nível de energia de 15J. Comparação entre o prepreg e os materiais com duas granulometrias de cortiça. Pormenor dos picos de início de delaminação para os três materiais.

#### 4.4.1 Extensão do dano pós impacto

A necessidade de quantificar a extensão de dano decorrente do impacto é fundamental para avaliar o comportamento dos diferentes tipos de materiais. Na sua maioria, os provetes sujeitos a cargas de impacto não apresentam dano visível, detectando-se, apenas, umas pequenas fendas na superfície superior para impactos a 15J, ilustradas pelo esquema da Figura 21. Numa primeira abordagem, tentou-se usar um método não destrutivo recorrendo à análise C-Scan, mas foi impossível a visualização do dano nas amostras híbridas, pois o granulado de cortiça absorvia o sinal impedindo a reflexão do impulso.



Figura 21 – Representação esquemática do tipo de fissuração provocada pelo impacto

Deste modo, optou-se por seccionar os provetes impactados e efectuar uma observação da extensão do dano ao longo do sentido longitudinal e a partir da zona de impacto. Estas observações foram feitas com recurso a uma lupa com ampliação de 64x, e em alguns casos de 160x, para as distintas amostras.

Observa-se que no interior de todos os provetes existe dano visível a olho nu. Para os ensaios de 5J e 10J realizados nos provetes com granulado de cortiça, a secção mais afastada da zona de impacto não apresenta dano visível para ambas as granulometrias. No entanto, para os laminados sem cortiça, detecta-se uma extensão de fissuração até aos limites da amostra. Para os ensaios de 15J de energia de impacto, o dano estende-se até ao limite de todos os provetes, embora a fenda observada nas amostras híbridas seja menor.

Outro aspecto interessante prende-se com a descontinuidade verificada na direcção de propagação da fissura no caso dos provetes com cortiça, em especial nos de maior granulometria. Este facto parece indicar que a camada de cortiça tem um efeito de obstáculo à propagação de defeitos resultantes dos eventos de impacto (**Figura 22, 23 e 24**).



**Figura 22 –** Imagens da propagação da fenda num interior do pré-impregnado para energia de impacto de 10J. Da esquerda para a direita: zona de impacto e zonas adjacente no sentido de dentro para fora.



**Figura 23 -** Imagens da propagação da fenda num interior do pré-impregnado com granulado de cortiça fino, para energia de impacto de 10J. Da esquerda para a direita: zona de impacto e zonas adjacente no sentido de dentro para fora.



**Figura 24 -** Imagens da propagação da fenda num interior do pré-impregnado com granulado de cortiça médio, para energia de impacto de 10J. Da esquerda para a direita: zona de impacto e zonas adjacente no sentido de dentro para fora.

## 5. Conclusões e trabalhos futuros

---

Através dos ensaios de flexão em três pontos conclui-se que a granulometria da cortiça influencia as propriedades do material. O uso de grânulos maiores reflecte-se numa diminuição das propriedades mecânicas. O tipo de empilhamento é também preponderante na escolha da configuração do material, pois para o empilhamento tipo A os resultados obtidos para a tensão limite foram superiores em 35% aos do empilhamento tipo B. De um modo geral, pode afirmar-se que existe uma degradação do comportamento à flexão devido à introdução dos grânulos de cortiça no interior do pré-impregnado.

A análise à tracção evidencia perdas menos significativas nas tensões de ruptura e no módulo elástico para o caso do empilhamento tipo B. Em termos de tamanho de grânulo, e a exemplo do ocorrido nos ensaios de flexão, as amostras de granulado fino apresentam um comportamento superior e muito próximo do material sem cortiça. Em conclusão, a melhor configuração dos provetes com cortiça face a solicitações à tracção é a que corresponde aos granulados finos com o empilhamento tipo B.

Os ensaios de fadiga demonstram que os provetes com cortiça têm um ligeiro aumento de desempenho, tendo atingido um número de ciclos superior para o mesmo nível de carregamento.

Nos ensaios de resistência ao impacto, as amostras de laminados sem cortiça apresentam uma força de impacto superior para o menor nível de energia de impacto, embora esta tendência se esvaneça com o aumento deste parâmetro de ensaio. Por outro lado, a duração do evento de impacto parece não ser grandemente afectada pela presença de cortiça no interior dos laminados. No entanto, a análise qualitativa das curvas de reposta dos diferentes tipos de provetes permite concluir que o uso de cortiça confere uma maior capacidade do material se deformar, tornando a resposta mais suave e com menos picos de oscilação associados a ressonância. Por outro lado, através dos ensaios de impacto é possível concluir, também, que a hibridação do carbono/epoxy com granulado de cortiça atrasa o início do processo de delaminação. Este facto deve-se à capacidade de absorção de energia da cortiça durante o impacto, uma vez que este se trata de um material naturalmente resiliente.

A extensão do dano provocado por impacto diminui com o uso dos granulados de cortiça, tendo-se verificado uma menor extensão de fissuração a partir da zona de impacto. Ao mesmo tempo, verifica-se que a direcção de propagação das fissuras sofre um forte desvio devido à

presença da camada de granulado de cortiça no interior dos laminados, pelo que esta poderá funcionar como obstáculo à propagação de danos provocados por impacto.

Os resultados obtidos por esta investigação experimental demonstram um claro efeito do tamanho do granulado de cortiça no desempenho do material, o qual poderá sair beneficiado face a solicitações de carácter dinâmico (impacto e fadiga), mas prejudicado em solicitações de carácter estático. Assim, seria interessante estender este estudo a laminados de carbono/epoxy com embebimento de granulados de cortiça de menor dimensão, possivelmente na forma de pós. A utilização da cortiça sob esta forma permitiria, ainda, melhorar o processo de fabrico dos provetes, tornando mais homogénea a mistura dos diferentes constituintes do compósito.

Finalmente, a caracterização de dano pós-impacto sairia certamente beneficiada com a realização de ensaios complementares, designadamente, a obtenção da extensão de dano através de ensaios não destrutivos apropriados (como análise de raio-x), e a realização de ensaios de resistência residual, a qual poderia ser obtida, por exemplo, com recurso a ensaios de flexão e de fadiga.

## Referências Bibliográficas

1. **Silva, J. M., Devezas, T., Silva, A., Gil, L., Nunes, C., Franco, N.;** *Exploring the use of cork based composites for aerospace applications*. Materiais 2009, 5<sup>th</sup> International Materials Symposium – Recent Advances in Characterization, Processing, Design and Modelling of Structural and Functional Materials; SPM; IST – Lisbon, Portugal; 5-8 April 2009.
2. **Castro, O. P.** *Caracterização de estruturas tipo sandwich com aglomerados de cortiça para aplicação aeroespacial*. Dissertação de mestrado, Universidade da Beira Interior; Covilhã, 2008.
3. **Jones, Robert M.** *Mechanics of composites materials.*: Taylor & Francis; Virginia, 1998.
4. **Kutz, Myer.** *Handbook of Materials Selection.*: John Wiley & Sons; New York, 2002.
5. **Handbook, Militar.** *Composite Materials Handbook, volume 2.* 1996.
6. **Cantwell, W. J., Morton, J.** *The influence of varying projectile mass on the impact response of CFRP.*: Composites Structures; London, 1989.
7. **Zheng, D., Binienda, W. K.** *Effect of permanent indentation on the delamination threshold for small mass impact on plates.*: Solids and Structures, Elsevier; Akron, 2007.
8. **Davies, G. A. O., Hitchings, D., Wang, J.** *Predition of threshold impact energy for onset of delamination in quasi-isotropic carbon/epoxy composite laminates under low-velocity impact.*: Composites Science and Technology, Elsevier; London, 1999.
9. **Luo, R.K., Green, E. R., Morrison, C. J.** *Impact damage analysis of composites plates*. International Journal of Impact Engineering, Elsevier; Leicester, 1998.
10. **Lopes, C. S., Camacho, P. P., Gürdal, Z., Maimí, P., González, E. V.** *Low-velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates. Part II: Numerical simulations.*: Composites Science and Technology; Delft, Porto and Girona, 2009.
11. **Cantwell, W. J., Morton, J.** *Geometrical effects in the low velocity impact response of CFRP.*: Composites Structures; London 1989.
12. **Cantwell, W. J., Morton, J.** *Geometrical effects in the low velocity impact response of CFRP.* Composites Structures, London 1989.
13. **Lopes, C. S., Seresta, O., Coquet, Y., Gürdal, Z., Camacho, P. P., Thuis, B.** *Low-velocity impact on dispersed stacking sequence laminates. Part I: Experiments*. Delft, Porto and Toulouse : Composites Science and Technology, 2009.
14. **Cantwell, W. J., Morton, J.** *The significance of damage and defects and their detection in composites materials: a review*. Journal of strain analysis, vol. 27; Lausanne, 1992.
15. **Lampman, S.** *Fatigue and Fracture*. s.l. : ASM Handbook, 1996.
16. **Schijve, Jaap.** *Fatigue damage in aircraft structures, not wanted, but tolerated?* International Journal of Fatigue, Elsevier; Deft, 2008.

17. **Hoang, N., Gamby, D., Lafarie-Frenot, M.** *Predicting fatigue transverse crack growth in cross-ply carbon-epoxy laminates from quasi static strength tests by using iso-damage curves.*: International journal of Fatigue, Chasseneuil Cedex, 2009.
18. **Mohandesi, J. A., Majidi, B.** *Fatigue damage accumulation in carbon/epoxy laminted composites.*: Materials and Design, Elsevier; Tehran, 2008.
19. **Ogi, K., Yashiro, S., Takahashi, M., Ogihara, S.** *A probabilistic static fatigue model for transverse cracking in CFRp cross-ply laminates.* Composites Science and Technology, Matsuyama, 2008.
20. **Aymerich, F., Priolo, P., Sun, C. T.** *Static and fatigue behavior of stitched graphite/epoxy composite laminates.*: Composites Science and Technology, Elsevier; Cagliari and West Lafayette, 2002.
21. **Gil, Luis.** *Cortiça (Produção, Tecnologia e Aplicação:)* INETI, Lisboa, 1998.
22. **Gibson, Lorna J.** *Biomechanics of cellular solids.*: University of Cambridge Elsevier, 2004.
23. **Silva, S. P., Sabino, M. A., Fernandes, E. M., Correlo, V. M., Boesel, L. F., Reis, R. L.** *Cork: properties, capabilities and applications.* s.l. : ASM International, 2005.
24. **Reclusa, S., Trinquecoste, M., Dariol, M., Delhaès, P.** *Formation of low-density carbon materials through thermal degradation of cork-based composites.*: Elsevier, France, 2005.
25. **Mano, J. F.** *Creep-recovery behavior of cork.* Braga : s.n., 2006.
26. **L. J. Gibson, M. F. Ashby.** *Cellular solids: structures and properties.* Cambridge : Cambridge University Press, 1997.
27. **Ashby, M. F., Bréchet, Y. J. M.** *Designing hybrid materials.*: Pergamon; Cambridge, 2003.
28. **Lee, S. H., Noguchi, H., Cheong, S. K.** *Tensile properties and fatigue characteristics of hybrid composites with non-woven carbon tissue.*: International Journal of Fatigue; Seoul, 2002.
29. **Naik, N. K., Veerajay Ch, Kavala, V. R.** *Hybrid composites under high strain rate compressive loading.*: Materials Science & Engineering, Elsevier; Bombay, 2007.
30. **Hutenbach, W., Gude, M., Ebert, C.** *hybrid 3D-textile reinforced composites with tailored property profiles for crash and impact applications.*: Composite Science and Technology, Elsevier; Dresden, 2008.
31. **Petit, S., Bouvet, C., Bergerot, A., Barrau, J. J.** *Impact and compression after impact experimental study of a composite laminate with a cork thermal shield.*: Composites Science and Technology, Elsevier; Toulouse, 2007.
32. **3039M-00, ASTM D3039/D.** Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composites Materials.
33. **ASTM D3039/D 3039M-00:** Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composites Materials
34. **ASTM 3479/D 3479M-96:** Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composites Materials
35. **ASTM D7136/D 7136M-05:** Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event

# Anexos

---

## ANEXO 1

### Ficha técnica do pré-impregnado

#### *Texipreg HS 160 REM*

<b>Pre-Preg</b>			
<b>Fibra</b>			
Tipo	Carbono de alta resistência tipo T300		
Tecido	Unidireccional a 0°		
Peso por área	g/m <sup>2</sup>	160	±4%
<b>Resina</b>			
Temperatura de cura	°C	125	
Tempo de gelificação	min	12 ± 3	a 125 °C
<b>Prepreg</b>			
Conteúdo da resina	%	36 ± 3	
Peso por área	g/m <sup>2</sup>	250	
Conteúdos voláteis	%	<1	10' a 150 °C
Prazo de armazenamento	meses	12	a -18 °C

### Ficha técnica do Compósito resultante

<b>Compósito</b>			
(Após cura em autoclave durante 60 min, T=125°C e P=5bar)			
<b>Propriedades físicas</b>			
Peso específico	g/m <sup>2</sup>	1,46	ASTM D792
Condutividade térmica	°C	110-120	
<b>Propriedades mecânicas</b>			
Resistência à tracção	MPa	1700	ASTM D3039
Alongamento de ruptura	%	1,3	ASTM D3039
Módulo à tracção	GPa	150	ASTM D3039
Resistência à flexão	Mpa	1400	ASTM D790
Módulo à flexão	GPa	130	ASTM D790
Resistência à compressão	Mpa	-	ASTM D695
Resistência interlaminar	Mpa	60	ASTM D2344

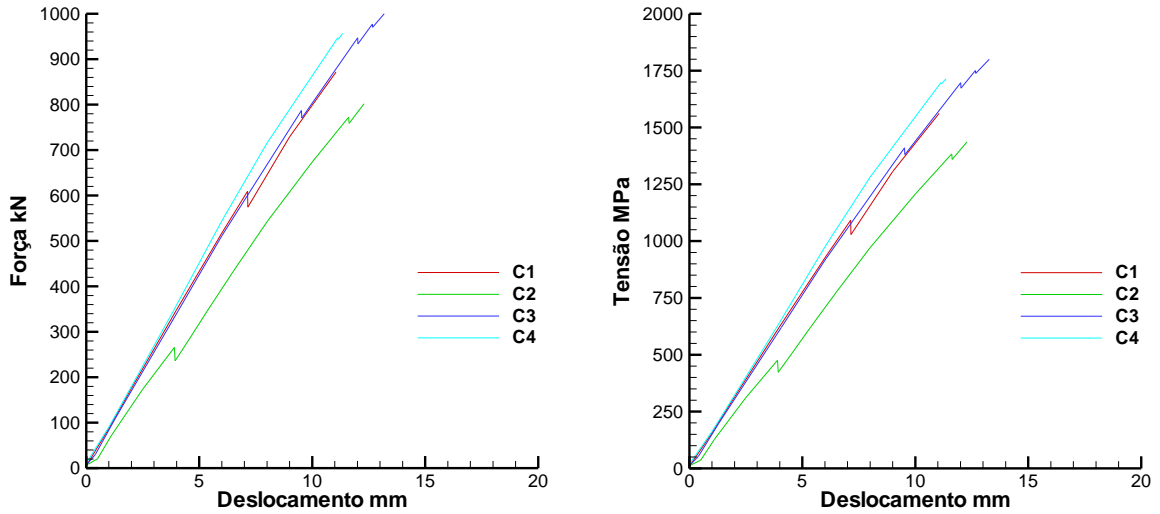
## ANEXO 2

Tabela de geometria das amostras de ensaios de impacto

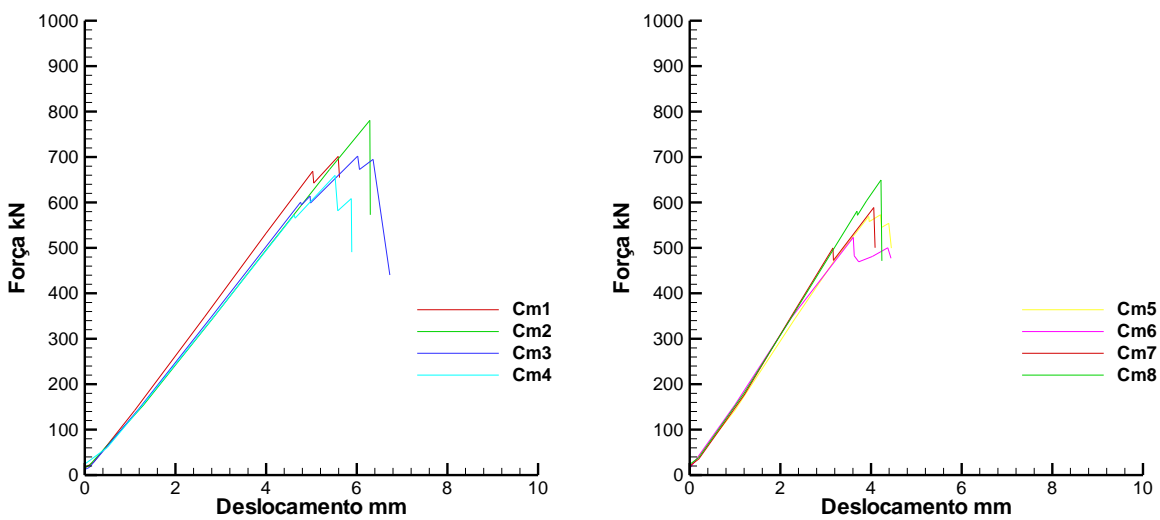
Nível de Energia	Amostras	Dimensões (mm)	Espessura (mm)
5 J	Carbono [0° <sub>28</sub> ]	Comprimento 150mm x Largura 100mm	4,57
	Carbono e granulado fino [0° <sub>4</sub> /cortiça/0° <sub>10</sub> ]s		4,83
	Carbono e granulado médio [0° <sub>4</sub> /cortiça/0° <sub>10</sub> ]s		5,1
10 J	Carbono [0° <sub>28</sub> ]		4,41
	Carbono e granulado fino [0° <sub>4</sub> /cortiça/0° <sub>10</sub> ]s		4,64
	Carbono e granulado médio [0° <sub>4</sub> /cortiça/0° <sub>10</sub> ]s		4,98
15 J	Carbono [0° <sub>28</sub> ]		4,3
	Carbono e granulado fino [0° <sub>4</sub> /cortiça/0° <sub>10</sub> ]s		4,56
	Carbono e granulado médio [0° <sub>4</sub> /cortiça/0° <sub>10</sub> ]s		4,75

**ANEXO 3**

**Gráficos referentes aos ensaios estáticos de flexão em três pontos**



**Gráfico 13 – Curvas Força Deslocamento e Tensão-Deslocamento dos provetes de carbono**



**Gráfico 14 – Curva Força Deslocamento dos provetes de carbono e cortiça média para o empilhamento A e B respectivamente.**

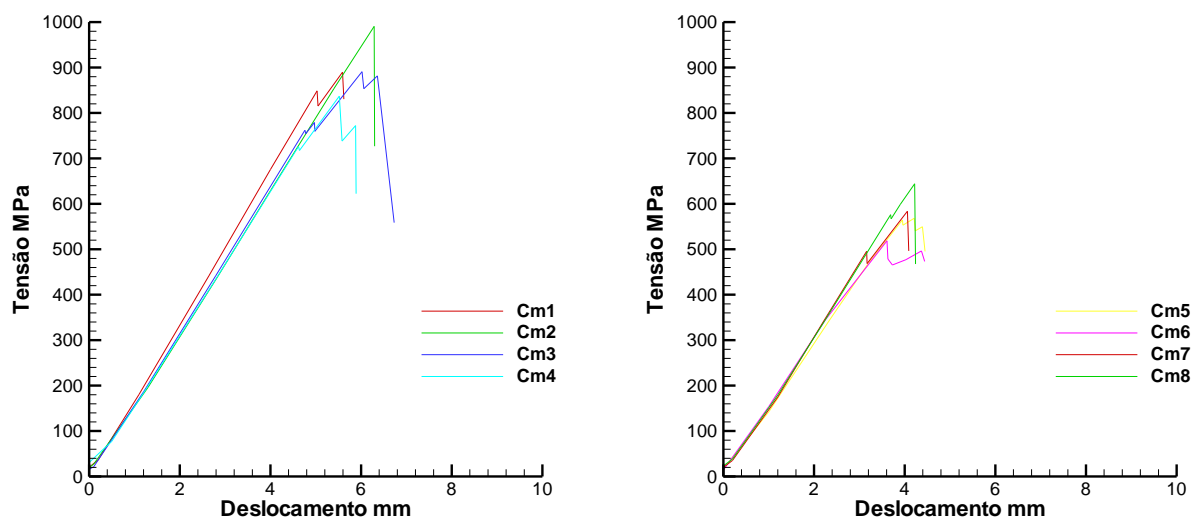


Gráfico 3 – Curva Tensão-Deslocamento dos provetes de carbono e cortiça média para o empilhamento A e B respectivamente

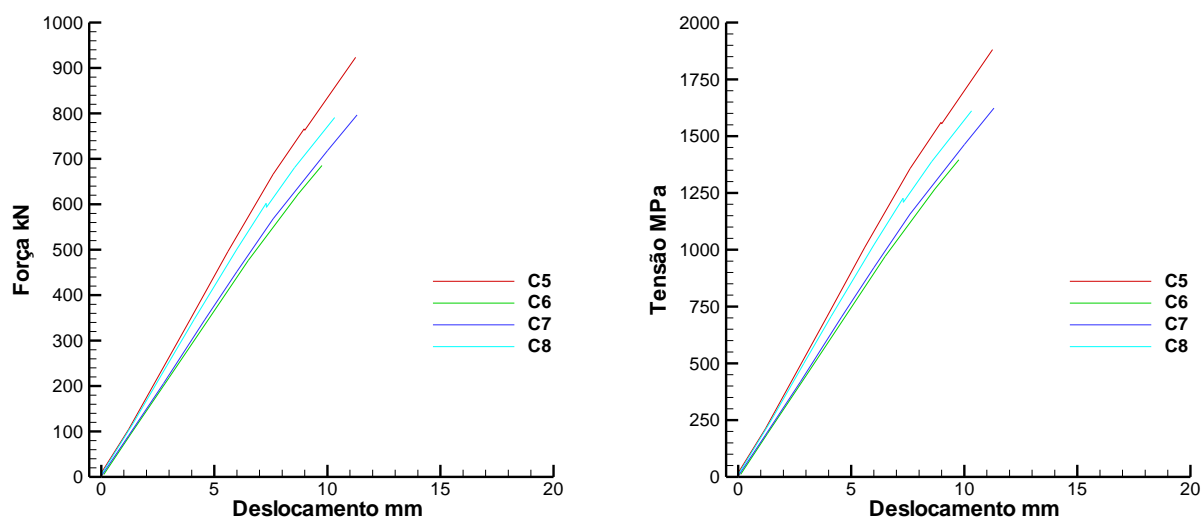


Gráfico 4 – Curvas Força-Deslocamento e Tensão-Deslocamento dos provetes de carbono

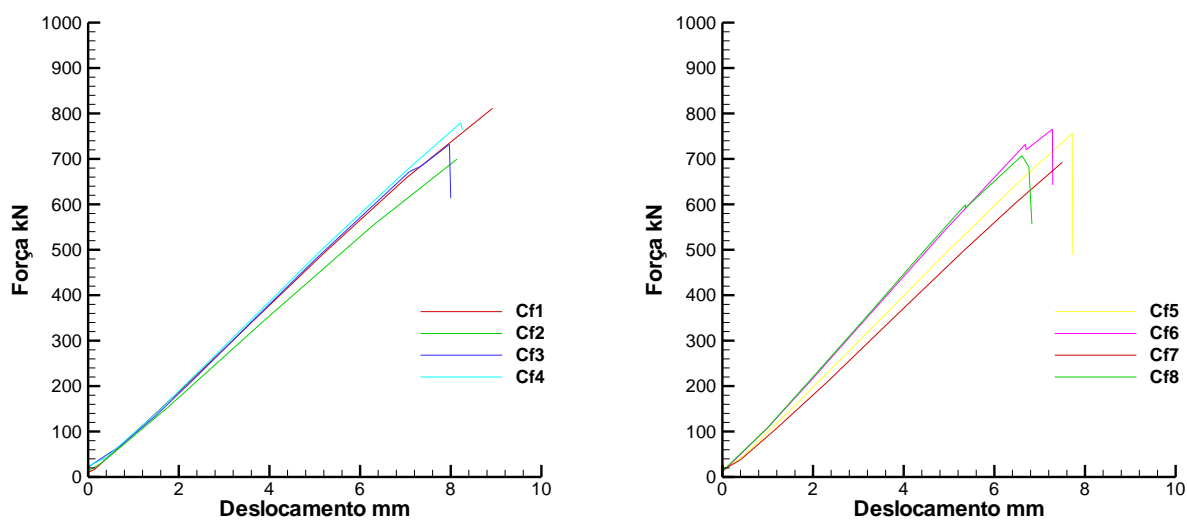


Gráfico 5 – Curva Força-Deslocamento dos provetes de carbono e cortiça fina para o empilhamento A e B respectivamente

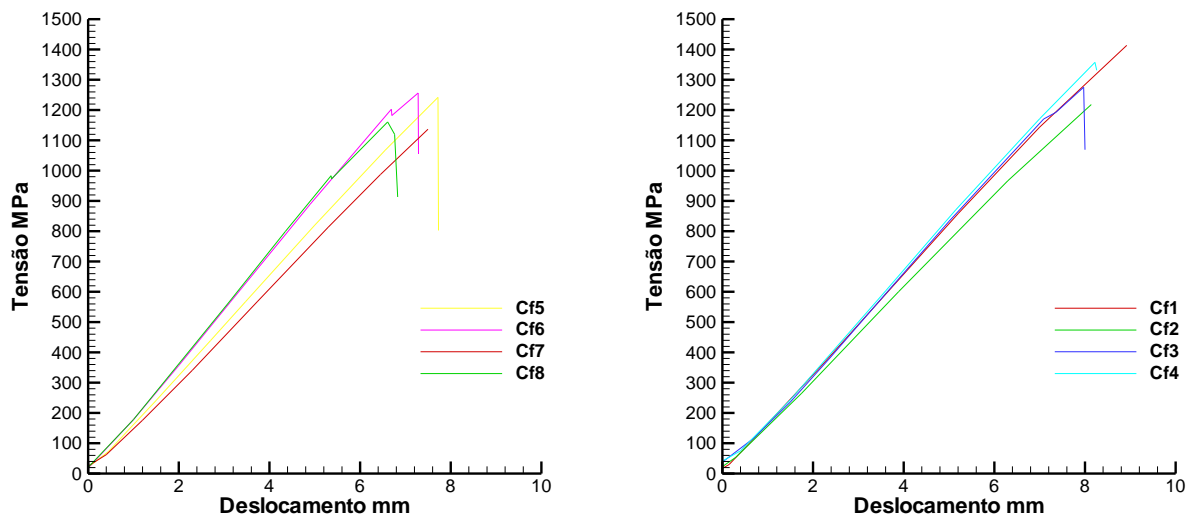


Gráfico 6 – Curva Tensão-Deslocamento dos provetes de carbono e cortiça fina para o empilhamento A e B respectivamente

## ANEXO 4

### Gráficos referentes aos ensaios estáticos de tracção

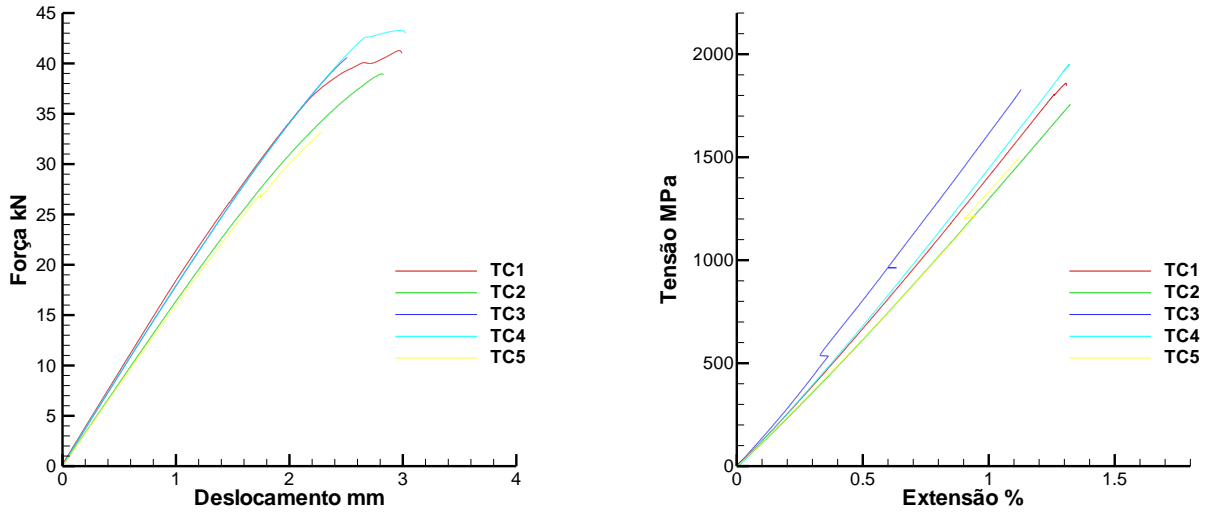


Gráfico 15 – Curvas Força-Deslocamento e Tensão-Extensão para os provetes de carbono

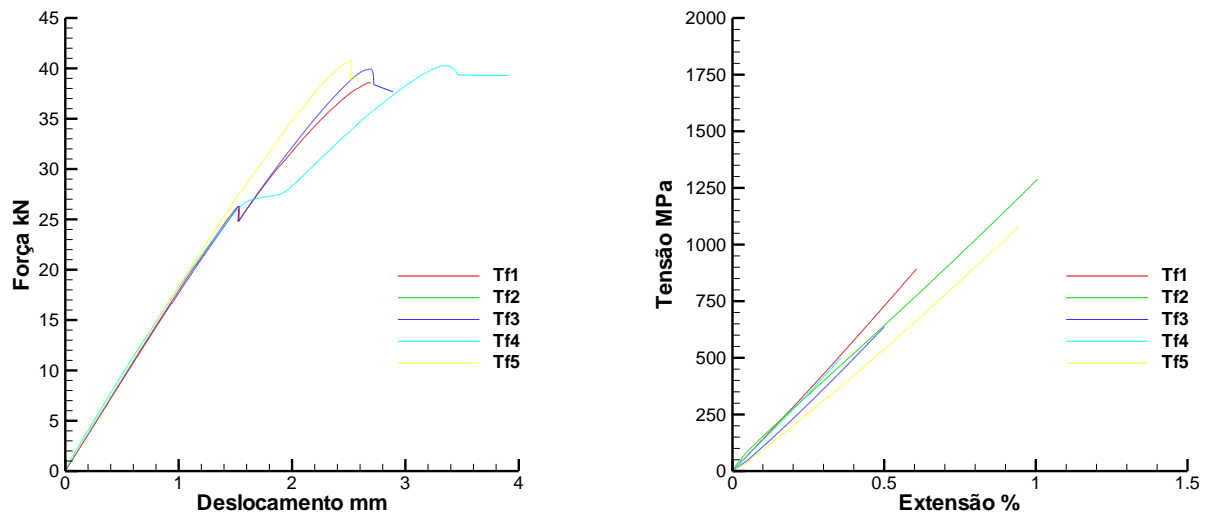


Gráfico 2 – Curvas Força-Deslocamento e Tensão-Extensão para os provetes de carbono e cortiça fina com empilhamento tipo B

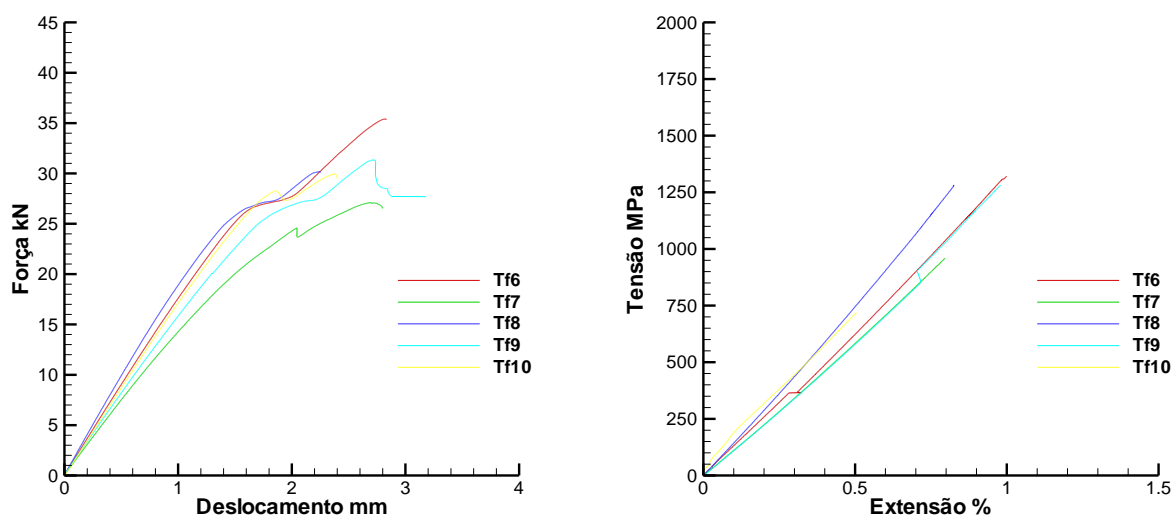


Gráfico 3 – Curvas Força-Deslocamento e Tensão-Extensão para os provetes de carbono e cortiça fina com empilhamento tipo A

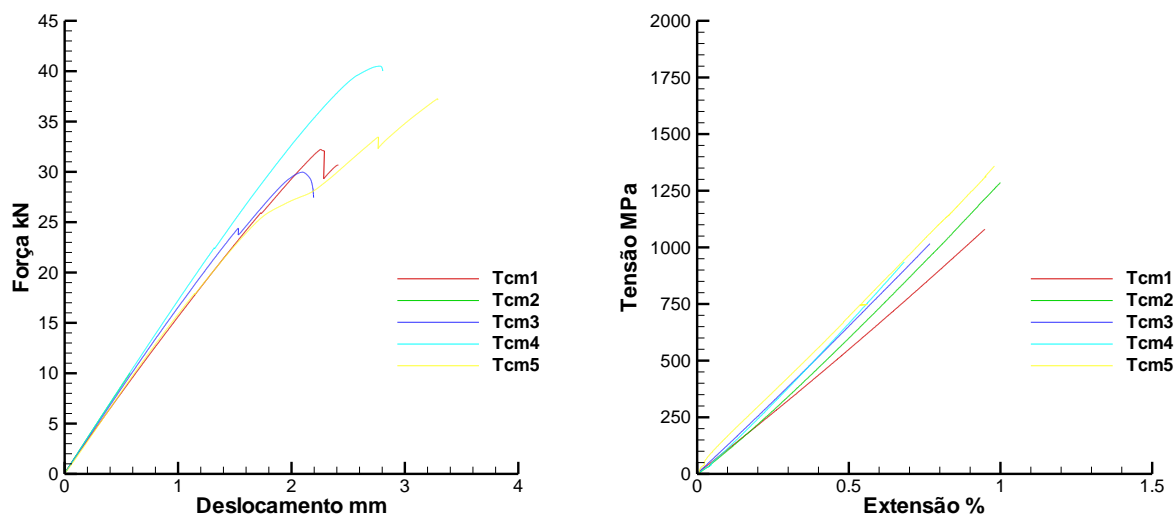


Gráfico 4 – Curvas Força-Deslocamento e Tensão-Extensão para os provetes de carbono e cortiça média com empilhamento tipo B

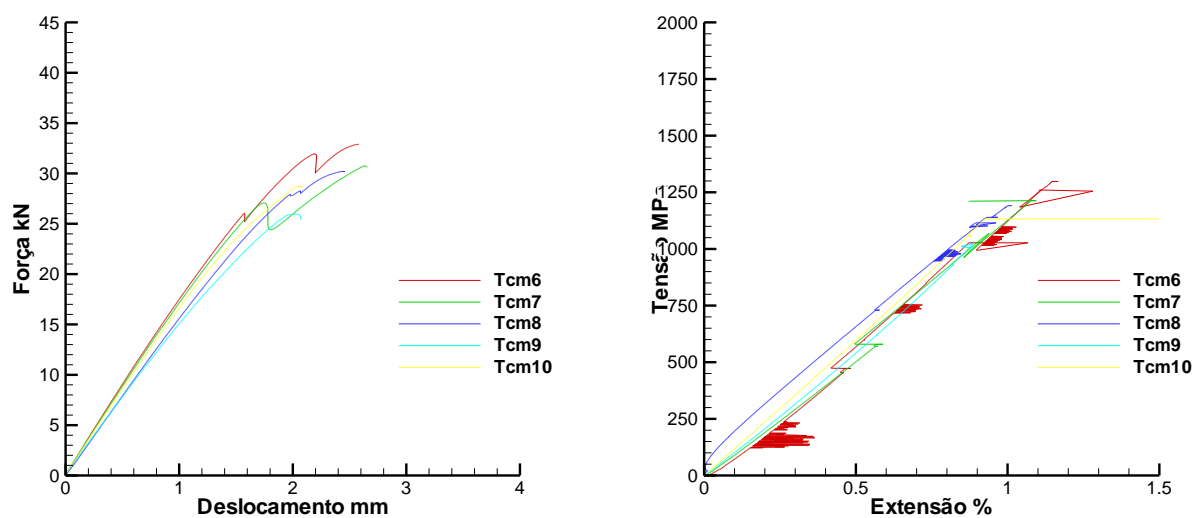


Gráfico 5 – Curvas Força-Deslocamento e Tensão-Extensão para os provetes de carbono e cortiça média com empilhamento tipo A

## ANEXO 5

Tabela de provetes usados nos ensaios de fadiga

Tipo	Designação	$\sigma_r$ [%]	N.º Ciclos
Provetes Pre-impregnado de Carbono [0°10]	F8	90	7208
	F9	90	1300
	F10	80	102506
	F11	80	107181
	F12	80	14098
	F14	80	2120
	F16	80	97830
	F1	75	9200
	F3	75	31000
	F6	75	28814
	F7	75	8059
	F17	75	243400
	F18	75	163700
	F20	60	10 <sup>6</sup>
	F21	60	10 <sup>6</sup>
F22	60	10 <sup>6</sup>	
Provetes Pre-impregnado de Carbono e Granulado de Cortiça fino [0°15/cf/0°5]	Fcf1	90	4162
	Fcf2	90	5700
	Fcf4	90	1034
	Fcf7	80	116606
	Fcf8	80	15000
	Fcf9	80	22900
	Fcf10	80	122200
	Fcf14	80	134000
	Fcf6	75	136700
	Fcf7	75	31860
	Fcf11	75	416338
	Fcf12	75	352600
	Fcf13	75	396400
	Fcf17	60	10 <sup>6</sup>
	Fcf18	60	10 <sup>6</sup>
Fcf19	60	10 <sup>6</sup>	

## ANEXO 6

## Gráficos força-deslocamento referentes aos ensaios de impacto de baixa-velocidade

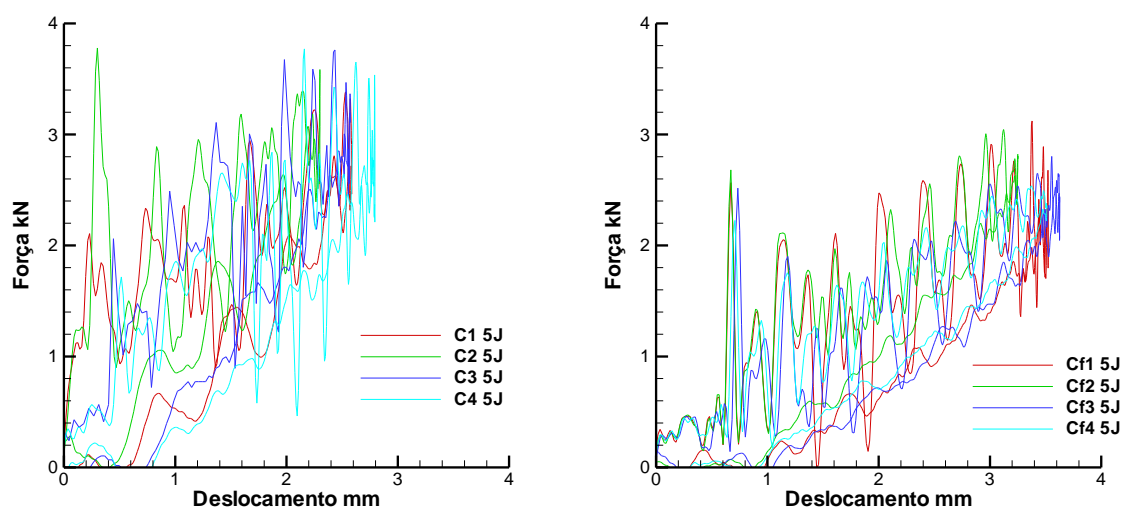


Gráfico 16 - Curvas Força-Deslocamento para provetes de prepreg e provetes com granulado de cortiça fino para nível de energia de 5J

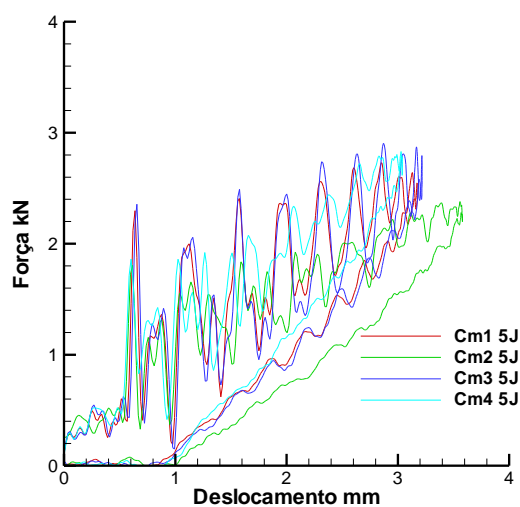


Gráfico 17 - Curvas Força-Deslocamento para provete granulado de cortiça médio para o nível de energia de 5J

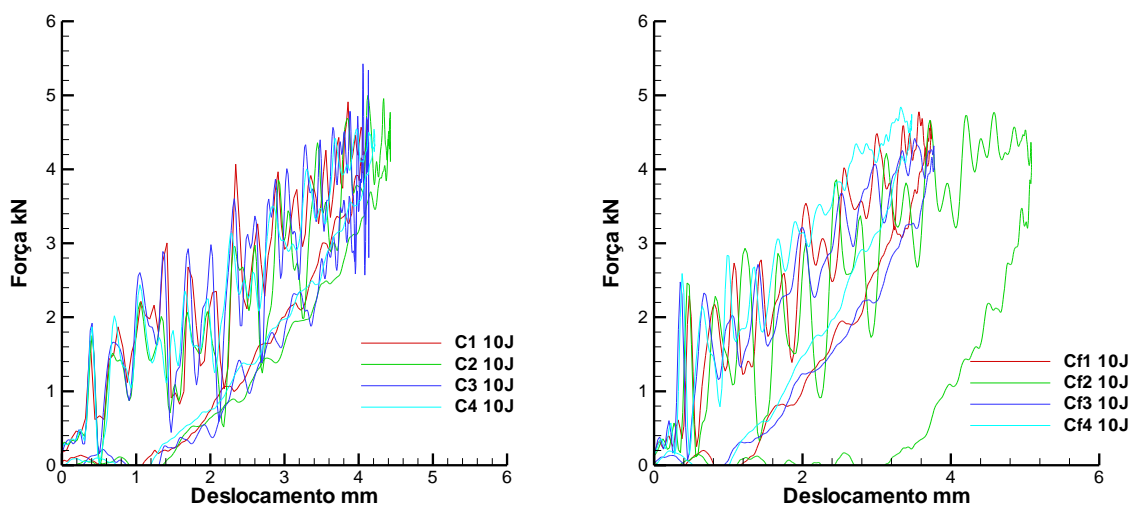


Gráfico 18 - Curvas Força-Deslocamento para provetes de prepeg e provetes com granulado de cortiça fino para nível de energia de 10J

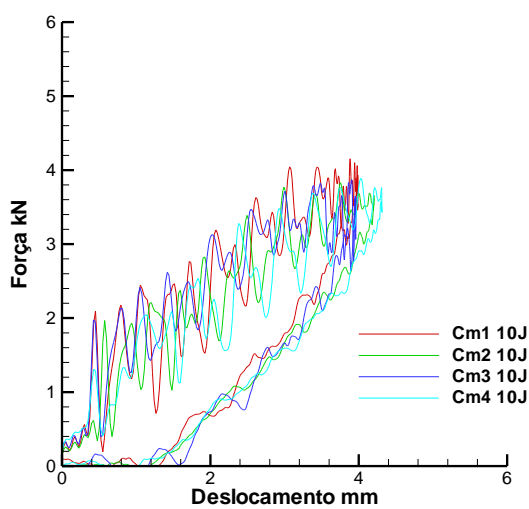


Gráfico 19 - Curvas Força-Deslocamento para provetes granulado de cortiça médio para nível de energia de 10J

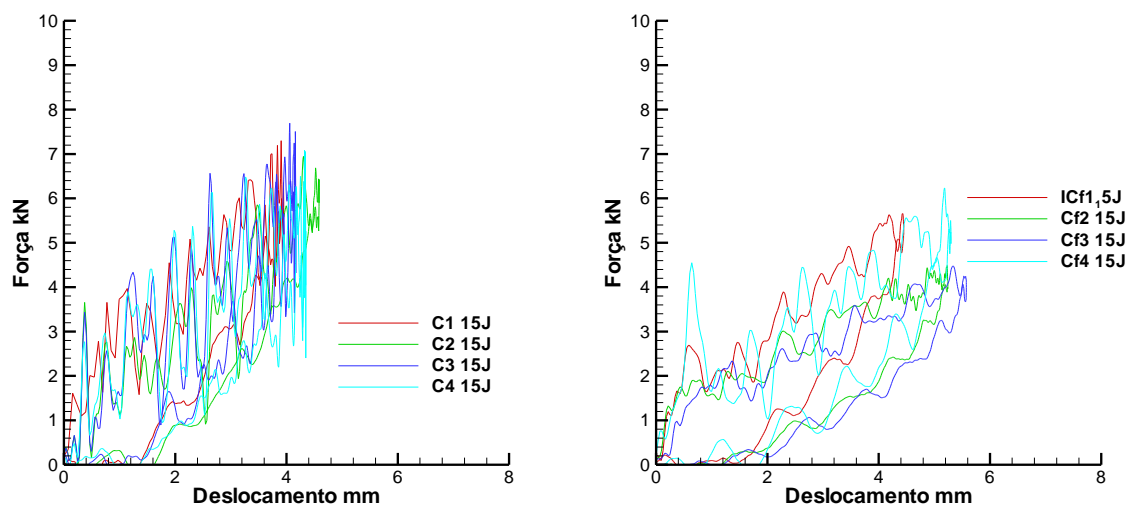


Gráfico 20 - Curvas Força-Deslocamento para provetes de prepreg e provetes com granulado de cortiça fino para nível de energia de 15J

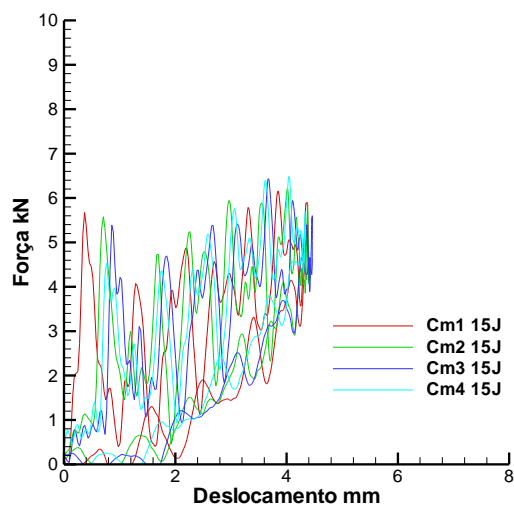


Gráfico 21 - Curvas Força-Deslocamento para provetes granulado de cortiça médio para nível de energia de 15J

## ANEXO 7

## Gráficos energia-tempo referentes aos ensaios de impacto de baixa-velocidade

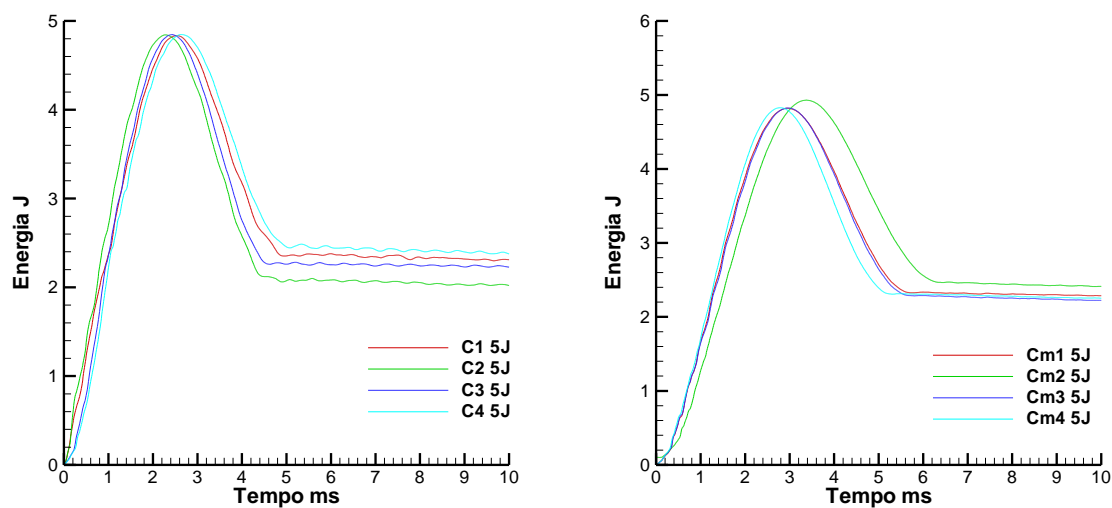


Gráfico 22 – Curva Energia-Tempo para provetes de prepreg e provetes com granulado de cortiça fino para nível de energia de 5J

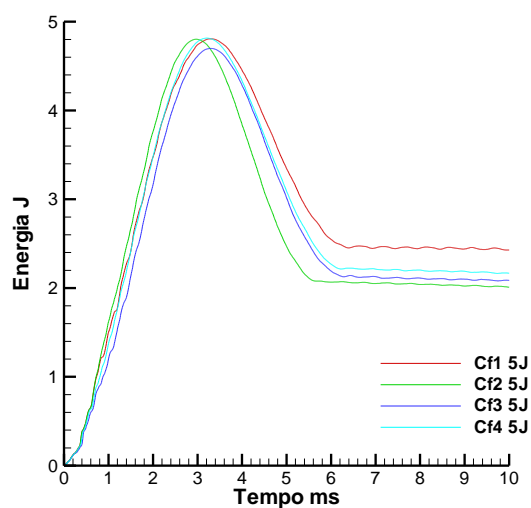


Gráfico 23 - Curva Energia-Tempo para provetes com granulado de cortiça médio para nível de energia de 5J

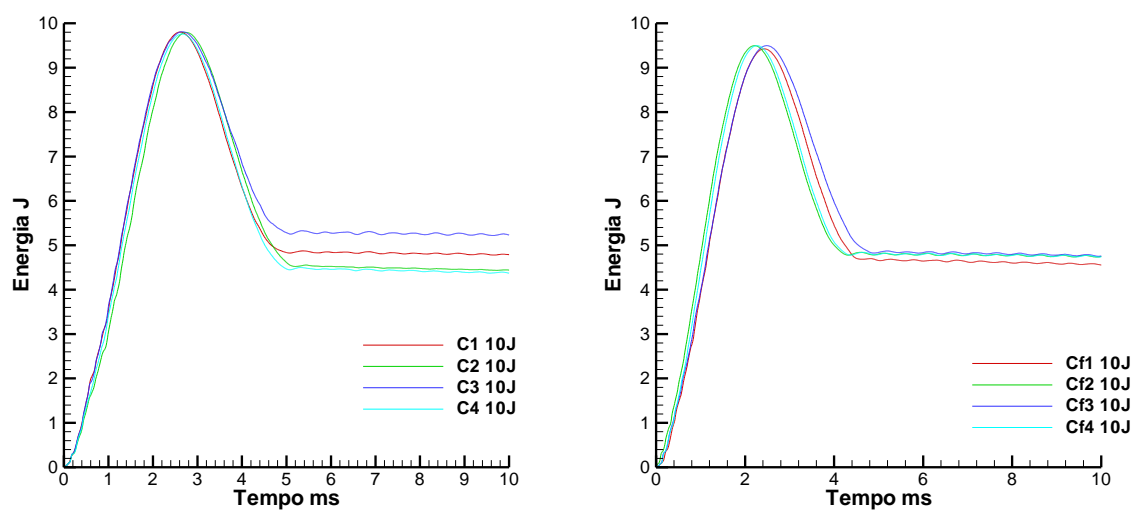


Gráfico 24 - Curva Energia-Tempo para provetes de prepreg e provetes com granulado de cortiça fino para nível de energia de 10J

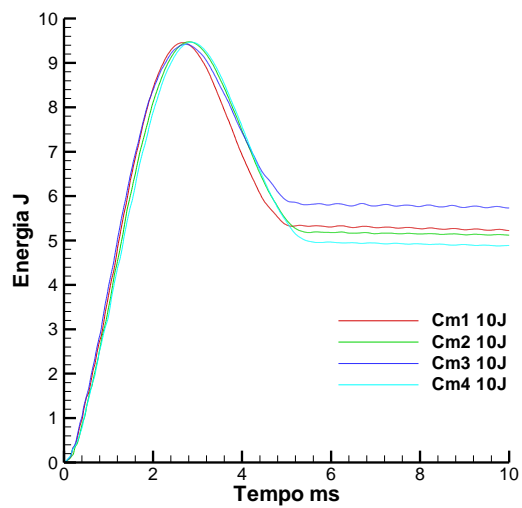


Gráfico 25 - Curva Energia-Tempo para provetes com granulado de cortiça médio para nível de energia de 10J

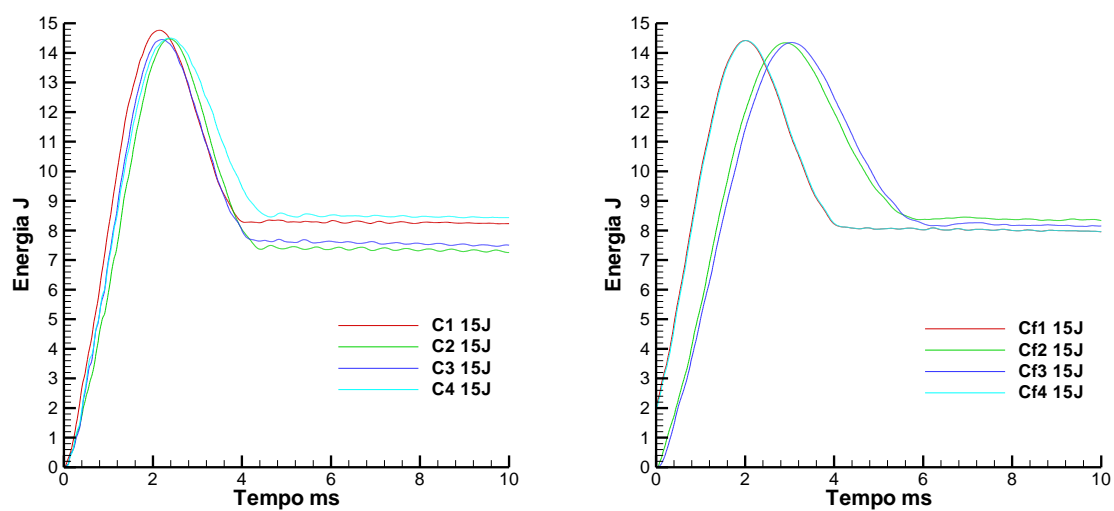


Gráfico 26 - Curva Energia-Tempo para provetes de prepreg e provetes com granulado de cortiça fino para nível de energia de 15J

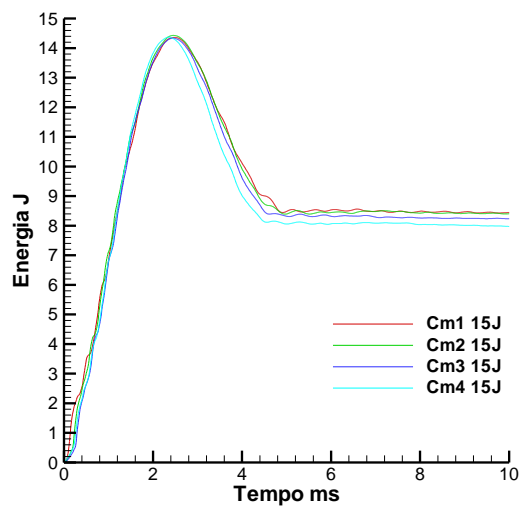


Gráfico 27 - Curva Energia-Tempo para provetes com granulado de cortiça médio para nível de energia de 15J

## ANEXO 8

## Gráficos força-tempo referentes aos ensaios de impacto de baixa-velocidade

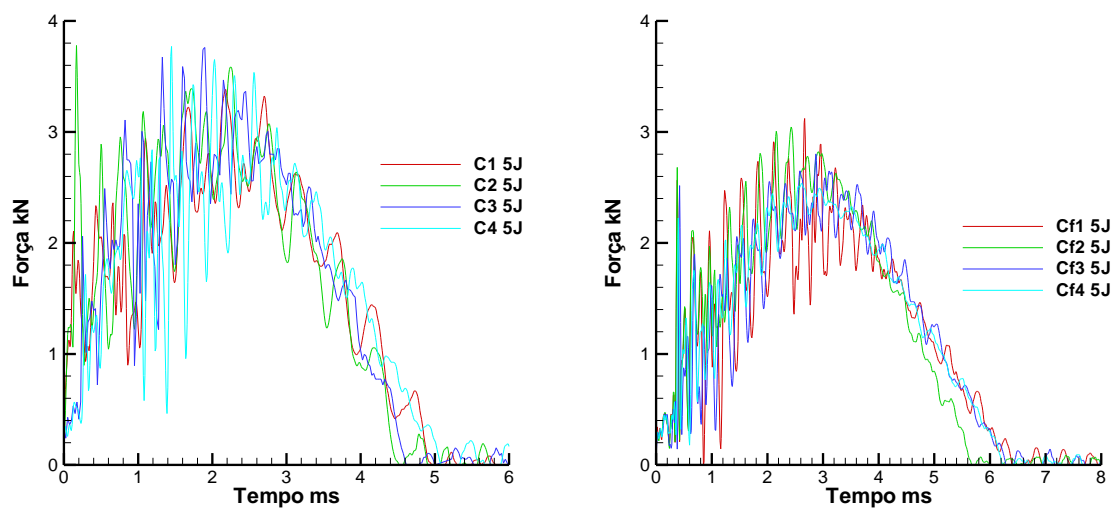


Gráfico 28 – Curva Força-Tempo para os provetes de prepreg e provetes com granulado de cortiça fino para o nível de energia de 5J

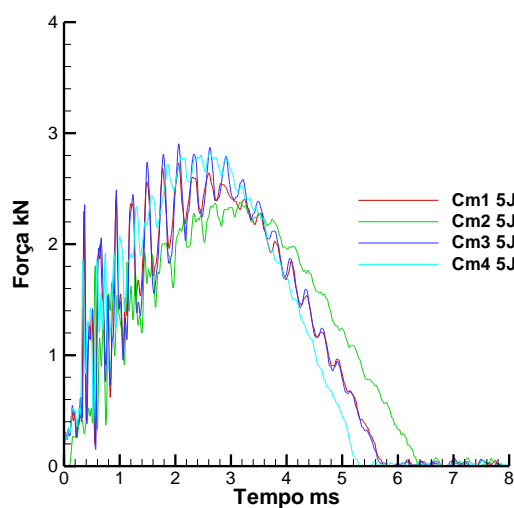


Gráfico 29 - Curva Força-Tempo para provetes com granulado de cortiça médio para o nível de energia de 5J

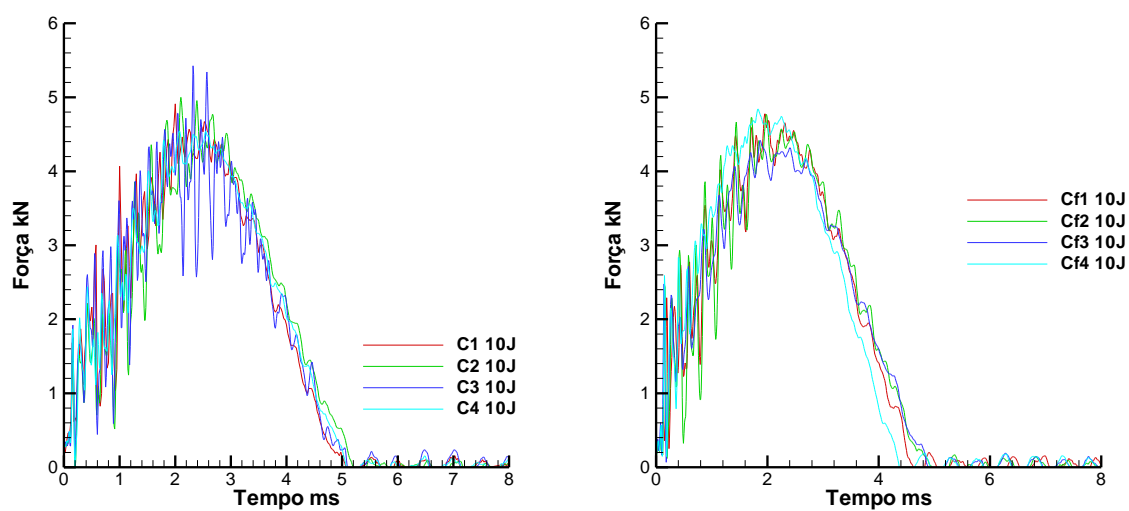


Gráfico 30 - Curva Força-Tempo para os provetes de prepreg e provetes com granulado de cortiça fino para o nível de energia de 10J

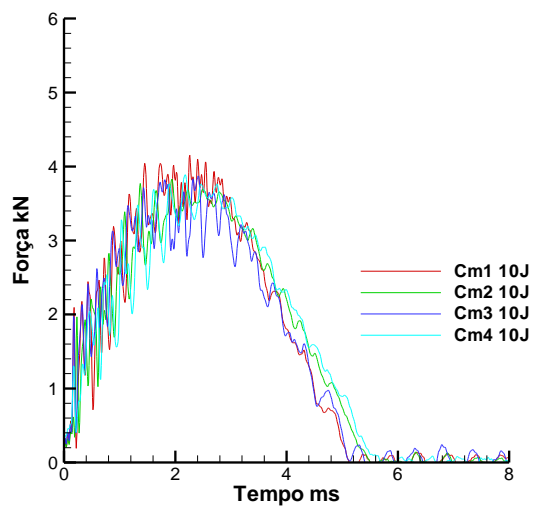


Gráfico 31 - Curva Força-Tempo para provetes com granulado de cortiça médio para o nível de energia de 10J

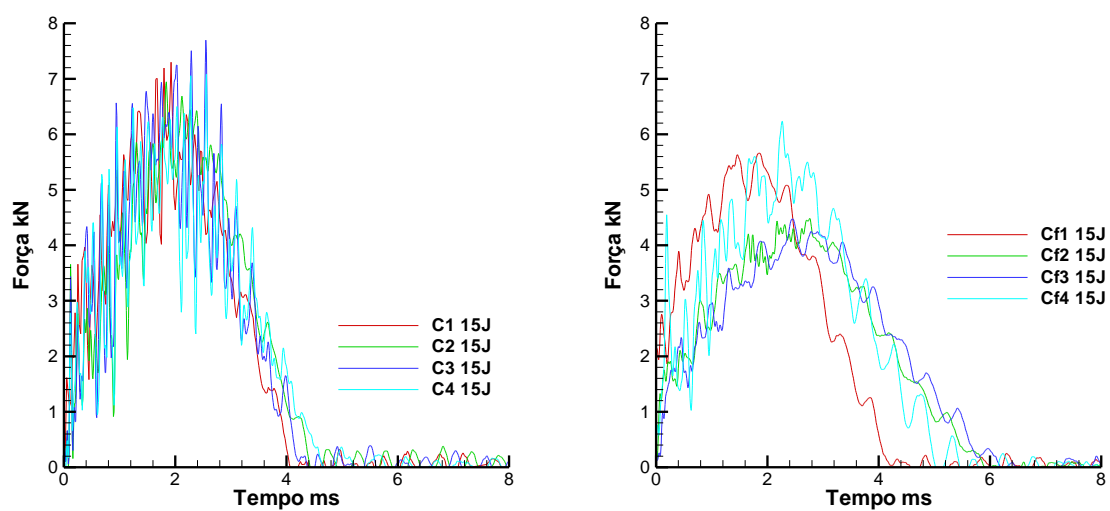


Gráfico 32 - Curva Força-Tempo para os provetes de prepeg e provetes com granulado de cortiça fino para o nível de energia de 15J

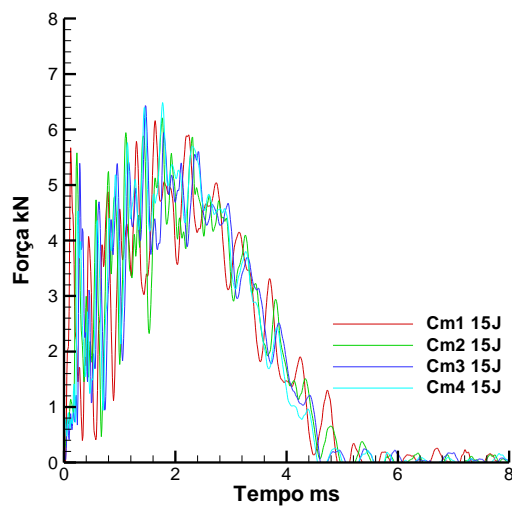


Gráfico 33 - Curva Força-Tempo para provetes com granulado de cortiça médio para o nível de energia de 15J