

• U • C •

**FCTUC** FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Estudo do impacto a baixa velocidade em compósitos epóxi/fibra de vidro nanoreforçados**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Projecto Mecânico

**Autor:**

**David Samuel da Costa Santos**

**Orientador:**

**Professor José António Martins Ferreira**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro</b> <b>Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra</b> <b>Professor Doutor José António Martins Ferreira</b> <b>Professor Catedrático da Universidade de Coimbra</b> <b>Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Associado c/ Agreg. da Universidade de Coimbra</b> <b>Professor Doutor Paulo Nobre Balbis Reis</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade da Beira Interior</b>

**Coimbra, Julho, 2012**



"Não há só um método para estudar as coisas."

Aristóteles

Aos meus pais.



## Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio de algumas pessoas às quais agradeço verdadeiramente todo o esforço e prontidão muitas vezes nas alturas menos propícias a isso.

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador, Prof. Doutor José António Martins Ferreira que sempre me aconselhou, ajudou e incentivou durante todas as etapas deste trabalho com a sua sabedoria e prudência.

Agradeço ao Prof. Doutor Carlos Capela que desde o primeiro dia me acompanhou, entre oficina e laboratório, para qualquer ajuda a nível teórico ou prático.

O meu sincero agradecimento ao André Oliveira que prestou um enorme suporte, sempre com a melhor disposição em fazê-lo principalmente durante os ensaios de tracção.

Também o meu grande agradecimento à Prof. Doutora Ana Amaro que desde início me ajudou nos ensaios de impacto, com a maior paciência e disponibilidade mesmo em ocasiões menos oportunas.

O meu agradecimento ao Prof. Doutor Mário Santos do departamento de Electrotecnia da UC que prestou uma enorme ajuda durante toda a fase dos *C-scan* e mesmo depois, para qualquer dúvida relacionada.

Agradeço a pronta e prestável ajuda à Prof. Doutora Marta Oliveira.

Agradeço a todos os meus colegas com quem partilhei a companhia e trocas de ideias no laboratório e aos restantes que directa ou indirectamente me suportaram na realização deste trabalho.

Por último, o meu agradecimento do fundo do coração aos meus pais não só por me apoiarem durante este trabalho como pelo suporte dado durante os cinco anos do curso.

Este trabalho é financiado por fundos FEDER – através do Programa Operacional Factores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do Projecto “PTDC/EME-PME/113695/2009; COMPETE: FCOMP-01-0124-FEDER-015152”.



## Resumo

O uso de componentes leves e resistentes é uma mais-valia actualmente, à medida que o mundo se torna mais rápido. Cada vez mais a necessidade de reduzir a massa em veículos, componentes desportivos, indústria aeroespacial, etc. passa pela adopção de peças e estruturas em materiais compósitos laminados de matriz polimérica.

Estes materiais são excepcionalmente resistentes atendendo ao seu peso mas as suas propriedades transversais ao plano, resultado da sua elevada anisotropia, são substancialmente mais baixas, tornando-se um motivo de investigação principalmente quando estes compósitos estão sujeitos a impactos.

O impacto pode ocorrer a alta velocidade, habitualmente associado a impactos balísticos, criando um dano bastante localizado e perceptível ou pode ocorrer a baixa velocidade, estado habitualmente associado a quedas dos próprios componentes ou de ferramentas, que cria um dano muitas vezes invisível à vista desarmada mas que é geralmente maior e mais prejudicial que o dano a elevada velocidade.

Assim, existe a necessidade de se conseguir um reforço que melhore as propriedades transversais, principalmente no que diz respeito ao impacto. Uma solução cada vez mais frequente é a dispersão de partículas de nanotubos de carbono ou de nanoargilas nos compósitos, na tentativa de reduzir a formação de fendas ou de evitar a sua propagação.

Este trabalho pretende estudar o comportamento, vantagens e desvantagens do uso destas partículas como nanoreforços em placas de fibra de vidro em matriz epóxi sujeitas a impacto de baixa velocidade.

**Palavras-chave:** Compósito, fibra de vidro, impacto, anisotropia, nanotubos, nanoargilas, dano.



## Abstract

The use of light and strong components is an added value nowadays that the world is becoming faster. More and more the need to reduce the mass of vehicles, sport components and aerospace industry components goes through the adoption of parts and structures built in composite laminated materials with a polymeric matrix.

These materials are exceptionally strong in regard to its weight but the plane-transverse properties, result of the elevated anisotropy, are substantially lower becoming a subject of investigation specially when these composites are under impact.

The impact can occur at high speed usually associated with ballistic impacts making a quite visible but localized damage or it can occur at low speeds being usually associated to the fall of the part itself or of tools. This type of damage is frequently invisible to the naked eye but is considerably bigger and more prejudicial than the damage resultant of an high speed impact.

Thus, there is a need to achieve a reinforcement which improves the transverse properties mainly in regard to the impact. A solution increasingly common is the dispersion of carbon nanotubes or nanoclays in the composites in order to reduce the formation of cracks or to prevent it from spreading.

This work aims to study the behavior, advantages and disadvantages of using these particles as nano-reinforcements in plates of glass fiber with epoxy matrix subjected to low velocity impact.

**Keywords:** Composite, fiberglass, impact, anisotropy, carbon nanotubes, nanoclays, damage.



## Índice

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xiii
Simbologia e Siglas .....	xv
Simbologia.....	xv
Siglas .....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Enquadramento .....	17
1.2. Objectivos .....	18
1.3. Organização .....	19
2. MATERIAIS COMPÓSITOS .....	21
2.1. O que são materiais compósitos.....	21
2.2. Reforço.....	23
2.3. Nanoreforços.....	25
2.3.1. Montmorilonita.....	27
2.3.2. Nanotubos de carbono .....	28
2.4. Mecanismos de falha .....	30
2.4.1. Impacto .....	30
2.4.2. Dano .....	32
2.4.3. Mecanismos de falha no plano .....	33
2.4.4. Mecanismos de falha fora do plano.....	33
2.4.5. Sequência de empilhamento .....	36
2.4.6. Condições de fronteira.....	37
2.5. Análise por <i>C-scan</i> .....	37
3. MATERIAIS E PROCEDIMENTO.....	39
3.1. Material e processos de fabrico .....	39
3.1.1. Para o reforço de nanotubos de carbono.....	39
3.1.2. Para o reforço de <i>nanoclays</i> .....	40
3.2. Ensaios de impacto .....	41
3.3. Análise da área de dano .....	42
3.4. Resistência residual.....	44
4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	45
4.1. Ensaios de impacto .....	45
4.1.1. 8 J de energia de impacto .....	46
4.1.2. 16 J de energia de impacto .....	50
4.1.3. Comparação entre 8 J e 16 J de energia de impacto.....	53
4.2. Áreas de dano.....	60
4.3. Resistência residual.....	62
4.3.1. Resistência residual nas placas com NC.....	62
4.3.2. Resistência residual nas placas com NT .....	65

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	69
ANEXO A .....	73
ANEXO B .....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Montmorilonita : (a) em rocha; (b) depois de processada para ser misturada em resina. ....	27
<b>Figura 2.2.</b> Nanotubos de carbono : (a) representação artística de um nanotubo; (b) nanotubos na superfície de rotura devido a descolagem da matriz .....	29
<b>Figura 3.1.</b> Representação esquemática do processo de fabrico das placas/provetes de fibra de vidro em matriz epóxi com reforço nanométrico. ....	41
<b>Figura 4.1.</b> Gráfico da evolução dos valores médios da carga em função do tempo para 8 J de energia. ....	46
<b>Figura 4.2.</b> Gráfico da evolução dos valores médios da carga em função do deslocamento para 8 J de energia. ....	47
<b>Figura 4.3.</b> Gráfico da evolução típica da energia em função do tempo para 8 J de energia de impacto para os vários tipos de nanoreforços.....	48
<b>Figura 4.4.</b> Gráfico com os valores médios da energia absorvida para os diferentes tipos e quantidades de reforço nanométrico para 8 J de energia.....	49
<b>Figura 4.5.</b> Gráfico da evolução dos valores médios da carga em função do tempo para 16 J de energia. ....	50
<b>Figura 4.6.</b> Gráfico da evolução dos valores médios da carga em função do deslocamento para 16 J de energia. ....	51
<b>Figura 4.7.</b> Gráfico com os valores médios da energia absorvida para os diferentes tipos e quantidades de reforço nanométrico para 16 J de energia.....	52
<b>Figura 4.8.</b> Gráfico comparativo com os valores médios da energia absorvida para os diferentes tipos e quantidades de reforço nanométrico para 8 e 16 J de energia. .	53
<b>Figura 4.9.</b> Gráfico comparativo com os valores médios da absorvida para os diferentes tipos e quantidades de reforço nanométrico para 8 e 16 J de energia. ....	55
<b>Figura 4.10.</b> Gráfico comparativo com os valores médios da carga máxima para os diferentes tipos e quantidades de reforço nanométrico para 8 e 16 J de energia. .	56
<b>Figura 4.11.</b> Gráfico com os valores médios da área de dano lida opticamente e em <i>C-scan</i> para os diferentes tipos e quantidades de reforço nanométrico para 8 e 16 J de energia. ....	60
<b>Figura 4.12.</b> Gráfico com os valores médios da resistência residual para as diferentes quantidades de reforço de <i>nanoclays</i> para 0, 8 e 16 J de energia.....	63
<b>Figura 4.13.</b> Gráfico com os valores médios da resistência residual para as diferentes quantidades de reforço de nanotubos para 0, 8 e 16 J de energia.....	65
<b>Figura 0.1.</b> Exemplo de provetes impactados com dano delimitado por pontos: (a) provete preparado para <i>C-scan</i> ; (b) provete preparado para ensaio de tracção.....	73

<b>Figura 0.2.</b> Exemplo de um provete no qual foi medida a área de dano com uma aplicação de medição do software SolidWorks.....	74
<b>Figura 0.3.</b> Exemplo de um provete marcado para o ensaio de tracção. A meio do defeito está marcada a linha central a partir da qual foram marcados os limites superior e inferior (30 mm de afastamento) para o posicionamento entre as amarras.....	74
<b>Figura 0.4.</b> Provete com nanotubos de carbono depois do ensaio de tracção. ....	75
<b>Figura 0.5.</b> Imagens de <i>C-scan</i> de provetes impactados com 16J.( a) 0% I5; (b) NC 1% I5; (c) NC 3% I5; (d) NT 0,5% I5; (e) NT 1% I4. ....	76
<b>Figura 0.6.</b> Fotografia do reservatório de água no departamento de Electrotecnicia que é usado para fazer os <i>C-scan</i> . No topo está a estrutura que se move para efectuar o varrimento (a preto).....	77
<b>Figura 0.7.</b> Pormenor das duas sondas em transmissão durante um ensaio de <i>C-scan</i> , submersas e suspensas pela estrutura em acrílico em U (à direita). A placa/provete (a preto no meio) está presa pela estrutura de suporte próprio desta. ....	77
<b>Figura 0.8.</b> Vista de cima das estruturas de suporte e da placa durante o <i>C-scan</i> . A cor branca provém da película de protecção do acrílico que não descolou.....	78
<b>Figura 0.9.</b> Máquina usada para os ensaios de tracção INSTRON Model 4206. ....	79
<b>Figura 0.10.</b> Fotografia do impactor usado. Observam-se os 6 pesos com uma massa total de 5 Kg. A estrutura de suporte tem uma massa de 0,5 Kg e o impactor de 0,4 Kg. O impactor tem uma ponta semi-esférica com um diâmetro de 10 mm.....	79
<b>Figura 0.11.</b> Torre de impactos INSTRON Model CEAST 9340. ....	80

---

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 3.1.</b> Distribuição dos nanoreforços pelas placas testadas. ....	40
<b>Tabela 4.1.</b> Parâmetros de impacto médios e desvios padrão relativos a cada tipo de placas impactadas. ....	45
<b>Tabela 4.2.</b> Dados da resistência residual das placas ensaiadas. ....	62
<b>Tabela 0.1.</b> Dados de impacto relativos a cada uma das placas impactadas. ....	81
<b>Tabela 0.2.</b> Áreas de dano obtidas opticamente para os provetes sem reforço nanométrico impactados com 8 J de energia. ....	83
<b>Tabela 0.3.</b> Áreas de dano obtidas opticamente para os provetes reforçados com NC1% impactados com 8 J de energia. ....	83
<b>Tabela 0.4.</b> Áreas de dano obtidas opticamente para os provetes reforçados com NC3% impactados com 8 J de energia. ....	83
<b>Tabela 0.5.</b> Áreas de dano obtidas opticamente para os provetes sem reforço nanométrico impactados com 16 J de energia. ....	83
<b>Tabela 0.6.</b> Áreas de dano obtidas opticamente para os provetes reforçados com NC1% impactados com 16 J de energia. ....	84
<b>Tabela 0.7.</b> Áreas de dano obtidas opticamente para os provetes reforçados com NC3% impactados com 16 J de energia. ....	84
<b>Tabela 0.8.</b> Áreas de dano obtidas através de <i>C-scan</i> para vários provetes impactados com 16 J de energia. ....	84
<b>Tabela 0.9.</b> Resultados médios e desvios padrão da tensão de tracção de provetes com e sem impacto. ....	84



## **SIMBOLOGIA E SIGLAS**

### **Simbologia**

*k* – Rigidez

### **Siglas**

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

EPA - *United States Environmental Protection Agency*

ISO - *International Organization for Standardization*

MMT - Montmorillonita

MWCNT - *Multi-walled carbon nanotube*

MWNT - *Multi-walled nanotube*

NC - *Nanoclays*

NT - Nanotubos

SEM - *Scanning Electron Microscope*

SWCNT - *Single-walled carbon nanotube*

SWNT - *Single-walled nanotube*

UC - Universidade de Coimbra



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

Cada vez mais existe a necessidade do uso de componentes leves e resistentes de forma a reduzir nos custos de energia no caso de transportes ou conseguir boas propriedades mecânicas, em aplicações particulares como canas de pesca, esquis de neve, capacetes e tantas outras onde é necessária grande resistência mecânica e térmica sem aumento de peso. Acontece que muitas vezes a única solução para se conseguir um componente ou estrutura leve e resistente é com o recurso a materiais compósitos mais concretamente, compósitos laminados de matriz polimérica com reforço de uma fibra.

Embora estes materiais tenham boas propriedades mecânicas no plano das fibras (tensão de cedência, módulo de Young, resistência à fadiga), transversalmente àquelas, estas propriedades não são tão notáveis. Devido ao facto de as técnicas actuais não conseguirem orientar fibras na direcção da espessura do laminado [1], é necessário um trabalho de investigação significativo para se obter melhorias das propriedades transversais dos laminados. Além do mais, existem propriedades que são uma desvantagem ao uso destes materiais; por exemplo, o custo de fabrico e a dificuldade em se conseguir uma automatização de fabricação onde, na maior parte dos casos, as peças são feitas à mão como se de uma produção limitada se tratasse, o que inevitavelmente sobe os custos de produção, tempo de fabrico e de espera bem como dificuldade na encomenda de peças de substituição. Por outro lado, estes materiais são altamente anisotrópicos o que dificulta a determinação das suas propriedades mecânicas e o que pode originar modos de falha difíceis de prever devido aos complexos estados de tensão no seu interior.

Quando uma peça fica sujeita a impactos durante a sua vida é importante ter em conta que o impacto pode danificar a peça de uma forma muitas vezes imperceptível, alterando localmente o estado de tensão o que pode conduzir à rotura e comprometendo a funcionalidade ou estabilidade do projecto onde se encontra. O impacto pode subdividir-se em impacto de alta e baixa velocidade. O de alta velocidade, associado normalmente à balística cria por norma um dano localizado e claramente visível a olho nu. O impacto a

baixa velocidade, muitas vezes associado a quedas acidentais, resulta num dano extenso, muitas vezes somente interno e sem a possibilidade de ser observado à vista desarmada originando situações em que se julga tudo apto a funcionar e que podem acabar numa rotura drástica.

Muitos investigadores têm tentado ao longo dos anos melhorar as propriedades de resistência ao impacto através de modificações na matriz dos compósitos, umas vezes com mais sucesso que outras. Um dos estudos pioneiros sobre a aplicação de nanopartículas em compósitos foi levada a cabo pelo grupo de investigação da Toyota no início dos anos 90 [2]. Foi reportado que existiu de facto um aumento de 100% na recuperação elástica quando a concentração de nanopartículas de argila baseadas em nylon-6 era de 8% em peso em comparação com a matriz de nylon-11. Ao longo dos anos vários estudos têm sido feitos no mesmo sentido, no entanto nem todos apontam na mesma direcção; enquanto uns reconhecem que a adição de nanopartículas pode ter efeitos benéficos em termos das propriedades mecânicas, outros sugerem o contrário. Veja-se por exemplo o caso de Allaoui *et al.* [3] que conseguiu duplicar o módulo de Young e tensão de cedência em compósitos de matriz epóxi com 1% em peso de nanotubos de carbono multi-parede (MWNT). Também Montazeri *et al.* [4] obteve de significativas melhorias no módulo de Young e na tensão de cedência depois da adição de 0,5% em peso de MWNT na matriz epóxi. Contudo, Lau [5] obteve efeitos negativos nas propriedades mecânicas do compósito depois da adição de MWNT na matriz. É conveniente que os nanoreforços fiquem com uma disposição transversal à direcção das fibras de forma a reforçar a ligação interlaminar daquelas como demonstrado por Fan *et al* [6].

De acordo com Luo *et al.* [7] o dano em estruturas compósitas é um dos aspectos mais importantes a ter em consideração no desenho e aplicação de materiais compósitos e é nesta base que se propõe a realização deste trabalho.

## 1.2. Objectivos

A avaliação do dano em compósitos (no caso deste trabalho, em placas) é de importância capital. Importante também é perceber que soluções existem para evitar a ocorrência ou propagação do dano nos compósitos. No sentido de reforçar as propriedades interlaminares é proposto de há uns anos a esta data que se utilizem nanopartículas que

consigam criar uma união entre as camadas do laminado bem como a união entre o reforço e a matriz. É no sentido de testar as vantagens do uso destas nanopartículas (de argila e nano tubos de carbono) em compósitos laminados que é realizado este trabalho, mais precisamente no que toca às propriedades de tenacidade ao impacto de placas de fibra de vidro em matriz de resina epóxi reforçadas com as nanopartículas atrás descritas. Para isso foram maquinadas placas com 10x10 cm e aproximadamente 4,2 mm de espessura que depois foram impactadas em duas gamas de energia (8 e 16 J) com recurso a uma torre de impacto da INSTRON modelo Drop Tower CEAST 9350. Mais tarde as placas foram examinadas em termos de área de dano criado, com uma leitura óptica e através de *C-scan*.

Por fim, foram feitos ensaios de tracção com vista a perceber qual a resistência residual das placas pós impacto.

### **1.3. Organização**

No capítulo 2 são abordados temas de revisão bibliográfica, entre os quais uma explicação do conceito de materiais compósitos, reforços e nanoreforços, mecanismos de falha e uma breve explicação de testes por *C-scan*. São abordados assuntos como nanotubos de carbono, *nanoclays*, delaminação, rotura de fibras, empilhamento, etc.

O capítulo 3 aborda os materiais e procedimentos usados. Aqui é falado desde o processo de fabrico dos provetes até à análise de dano e ensaios de tracção, passando pelos ensaios de impacto a que foram sujeitos.

O capítulo 4 é o capítulo da discussão de resultados que está dividido em cinco subcapítulos sendo que o primeiro discute os resultados dos impactos com 8 J de energia, o segundo com 16 J de energia, o terceiro compara os valores de impactos das duas gamas de energia, o quarto aborda as questões relacionadas com as áreas de dano comparando esses resultados com os resultados dos subcapítulos anteriores e o ultimo subcapítulo discute os resultados dos ensaios de tracção, confrontando-os com todos os subcapítulos antecedentes.

O quinto e último capítulo aborda as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.



## 2. MATERIAIS COMPÓSITOS

### 2.1. O que são materiais compósitos

O uso de componentes em material compósito polimérico é uma mais-valia atendendo às elevadas propriedades mecânicas como sejam a relação rigidez/peso ou resistência/peso; tal como características como a capacidade de modelação e reparação.

Nos compósitos existe uma fase em maior quantidade e é contínua a qual é chamada de matriz. É comumente aceite que são as propriedades da matriz que vão ser melhoradas com a adição da segunda fase (que criará em última análise o compósito). A matriz de um compósito pode ser metálica, cerâmica ou polimérica. Regra geral, os compósitos com matriz cerâmica possuem o mais elevado módulo de Young e tensão de ruptura mas são frágeis, os com matriz polimérica situam-se no lado oposto do espectro com o módulo de Young e tensão de ruptura/cedência mais baixos. Com propriedades intermédias estão os compósitos de matriz metálica.

O segundo constituinte do compósito é referido como a fase de reforço ou reforço somente já que reforça as propriedades da matriz onde se encontra. Na maior parte dos casos o reforço é mais resistente e mais rígido que a matriz. Pelo menos uma das dimensões do reforço é pequena, diga-se na ordem do micron. A geometria do reforço é uma das características-chave na concepção de um compósito. Por outras palavras, o comportamento do compósito vai ser função da forma e dimensão do reforço que geralmente tem forma de fibras ou pequenas partículas dispostas de forma aleatória ou segundo uma direcção ou mais, mas definidas.

Segundo Berthelot [8], os materiais compósitos podem classificar-se quanto à forma e quanto à natureza dos seus constituintes. Quanto à forma podem ser compósitos de partículas ou compósitos de fibras. Nos compósitos de fibras, estas podem ser contínuas ou descontínuas. No caso das partículas, estas podem ser utilizadas para melhorar as propriedades do compósito, por exemplo, aumentado a sua rigidez, a resistência à abrasão ou para diminuição da dilatação térmica. Em relação à natureza, os compósitos podem ter matriz orgânica (materiais poliméricos), matriz metálica (ligas leves e ultra-leves) ou

matriz mineral (cerâmica) e podem ter reforço de fibras ou partículas de diferentes naturezas. Por exemplo, uma matriz orgânica pode ter reforços minerais (vidro, carbono, etc), orgânicos (kevlar, poliamidas, etc.) ou metálicos (boro, alumínio, etc.). No caso de a matriz ter natureza metálica, pode ter reforços minerais como o carbono ou carboneto de silício ou metálicos como boro. Sendo a matriz mineral, o seu reforço pode ser metálico como boro ou *cermets*, ou mineral como carbonetos e nitratos.

Segundo F. L. Matthews *et al.* [9], um compósito é uma mistura de dois ou mais constituintes ou fases. Afirma também que esta definição não é suficiente, sendo necessário acrescentar mais três critérios: a primeira é que ambos os constituintes têm de estar presentes em proporções razoáveis, diga-se, maior que 5%. A segunda é que as fases do compósito têm de ter propriedades bastante diferentes para que as propriedades finais do compósito sejam diferentes de cada uma das suas fases independentemente. Por fim, um compósito feito pelo Homem (existem compósitos naturais como a madeira e ossos) é geralmente obtido misturando de várias formas as suas duas ou mais fases. Acontece que, por exemplo, uma liga metálica como o aço não pode ser considerada um compósito devido à sua constituição homogênea de duas fases que estavam inicialmente em estado líquido que depois se tornaram uma liga sólida. Contudo, se houver a presença de partículas de cerâmica dispersas nessa mesma liga de aço, agora sim pode ser considerado como um compósito.

As fibras podem ter uma relação de comprimento/secção transversal muito grande no caso das fibras contínuas enquanto nas fibras descontínuas e dispersas pela matriz esta relação é muito mais pequena. Regra geral, a direcção encontrada em fibras contínuas é unidireccional e no caso de fibras mais curtas a disposição já é de duas ou mais direcções.

Os compósitos multicamadas consistem em empilhamentos sucessivos de camadas normalmente unidireccionais, numa sequência específica. Um empilhamento típico pode variar entre 3 e 40 camadas e a direcção de cada camada vai-se alterando estrategicamente de forma a se otimizar a resistência do compósito.

A quantidade de reforço presente numa matriz é limitada por alguns factores. Por exemplo, em metais reforçados com partículas a quantidade limite de reforço é de 40% do volume. Isto porque com quantidades maiores são criados problemas de processamento e de elevada fragilidade. No caso de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras,

o limite superior é de 70% do volume porque existem problemas de contacto directo dos filamentos das fibras, o que pode resultar em dano da matriz.

Por fim interessa salientar que embora as cargas sejam suportadas pela matriz e pelo reforço, é este que suporta a maior parte daquelas já que é o mais resistente e rígido dos constituintes. Desta forma, a matriz transfere a carga para o reforço através da interface de ligação.

Quando se analisam propriedades de compósitos de matriz polimérica e depois se comparam com as propriedades das ligas metálicas, do ponto de vista de tensão de cedência ou rigidez sozinhas é difícil perceber que vantagens trazem ao mercado estes compósitos. Esta análise torna-se principalmente difícil quando se pensa que o alongamento até fractura dos compósitos é muito inferior ao das ligas metálicas para semelhantes tensões de cedência. Só quando se presta atenção à densidade dos compósitos é que se percebe de facto a vantagem do uso destes. Com o mesmo volume de material e resistência mecânica, conseguem-se peças com muito menor peso final, factor como já antes explicado, com fundamental importância na indústria dos transportes ou desporto, por exemplo.

## **2.2. Reforço**

Como já falado anteriormente, existem vários tipos de reforços para compósitos sendo que um deles é através de elementos fibrosos. Estes podem ter origens orgânicas ou sintéticas sendo que os últimos são os mais correntes. Dentro da categoria de fibras sintéticas encontram-se, por exemplo, as aramidas. No mercado existem vários tipos de aramidas comerciais, como Kevlar (DuPont), Twarlon (Azko) e Technora (Teijin); sendo o Kevlar o mais usado. Pode ver-se as aramidas como uma forma de nylon com um grupo extra de anéis de benzeno na cadeia do polímero para maior rigidez.

O polietileno é outra fibra comercializada desde o final da década de 80. São exemplos de designações comerciais a Spectra (Allied Signal) e Dyneema (Dutch State Mines, DSM). A sua molécula com ligação principal de carbono-carbono (C-C) é mais simples que a molécula de aramida. Possui um módulo de elasticidade na ordem dos 172 GPa e tem a densidade mais baixa de qualquer fibra actual o que torna as suas propriedades

específicas melhores que as fibras de Kevlar, por exemplo. No entanto, o seu ponto de fusão relativamente baixo (135°C) limita-o a muitas aplicações.

As fibras sintéticas inorgânicas são, por exemplo, as fibras de vidro (a qual será discutida por último), de silício e de carbono.

As fibras de silício são um produto relativamente recente e pouco se sabe acerca da sua efectividade como reforço. São constituídas por Si, C, O, e N, sendo um material não-cristalino. As fibras mais recentes desta classe são designadas por MPDZ e HPZ.

Melhor estabelecido que as últimas estão as fibras de carboneto de silício, SiC que atraem actualmente interesse para reforço em cerâmicos com ligações covalentes e comportamento um tanto frágil mas com um elevado módulo de Young.

As fibras de carbono são talvez o reforço em que se pensa em primeiro lugar quando se pensa em fibras já que, [10] é o mais usado numa variedade de aplicações: aeroespacial, transportes, desportos com um uso cada vez mais difundido devido ao ciclo de comercialização/redução de preço. Estas fibras têm, no mínimo, 92% em peso de carbono na composição, podem ser contínuas ou curtas e podem ter estrutura amorfa, cristalina ou parcialmente cristalina. A estrutura cristalina corresponde à grafite que corresponde a átomos de carbono dispostos em hexágono no plano x-y por forças covalentes e metálicas o que faz com que a grafite seja boa condutora térmica e eléctrica neste plano como também tenha elevado módulo. A união entre camadas (planos) é feita por forças de van der Waals que permite propriedades mecânicas, eléctricas e térmicas muito inferiores às forças dentro de um plano x-y. Desta forma a grafite é altamente anisotrópica. O objectivo principal para se conseguirem fibras de qualidade está em manter os planos x-y o mais alinhados possível.

O vidro é um material não-cristalino, sem microestrutura distinta e com propriedades mecânicas que dependem principalmente da composição e acabamento da superfície. Existem vários grupos de vidros, de entre os quais sílica, fosfato e haleto de vidro. Neste trabalho, que estuda compósitos, interessa somente os vidros feitos à base de sílica. As fibras são obtidas através de vidro fundido que é extrudido por gravidade através de pequenos orifícios, com cerca de 10 µm de diâmetro. É na ordem dos 200 filamentos de vidro que são extraídos do mesmo tanque que logo são passados por uma imersão de óleo de amido para minimizar os danos na superfície e que depois são enrolados num tambor em velocidades até 50 m/s.

Podem ser aplicados à superfície revestimentos activos que melhoram o molhamento e colagem/aderência entre a fibra e a matriz. São conhecidos como agentes de acoplamento e são organossilanos complexos cuja estrutura é feita a pensar na matriz onde são supostos trabalhar.

Destaque para duas variantes das fibras de vidro, a *E-glass*, usada com fins eléctricos (E de *electric*) e para a *S-glass* ou *R-glass* (S de *strength* e *stiffness*). A *S-glass* tem maior rigidez e tensão de cedência bem como a capacidade de manter as propriedades a mais elevadas temperaturas que a *E-glass*. No entanto, a *S-glass* é obtida por um processo mais complicado que o descrito atrás e embora o intuito inicial da *E-glass* fosse de isolamento eléctrico, mais tarde percebeu-se que tinha igualmente propriedades excelentes para ser usada como reforço em matriz polimérica sendo actualmente a fibra mais usada, deixando a *S-glass* para casos mais particulares. Embora as propriedades da *E-glass* sejam satisfatórias em soluções aquosas neutras, degrada-se em soluções ácidas ou básicas. Daí que tenham sido criadas mais variantes de fibra de vidro, a *C-glass* (C de *chemical*), *E-CR-glass* (*electrical-corrosion resistant*) e *AR-glass* (*alkali resistant*) que foi também desenvolvida como substituição para amianto.

### 2.3. Nanoreforços

Nano vem do grego, que significa anão. Um nanómetro (nm) é uma unidade de comprimento do SI que representa o milionésimo do milímetro ou seja,  $1 \times 10^{-9}$  metros.

As partículas podem ser classificadas de acordo com o seu tamanho. Segundo a EPA (*United States Environmental Protection Agency*) [11], as partículas podem ser classificadas em: grosseiras (diâmetro 2.500 e 10.000 nanómetros), partículas finas (entre 100 e 2.500 nanómetros de diâmetro), partículas ultrafinas ou nanopartículas (diâmetro entre 1 e 100 nanómetros). Embora as moléculas se possam enquadrar na descrição atrás, geralmente moléculas individuais não são referidas como nanopartículas.

O crescente interesse científico em torno das nanopartículas deriva da gradual capacidade de criá-las de forma mais económica e em mais variedades já que estas são uma óptima ponte entre o material onde se encontram (matriz) como um todo e as estruturas mais pequenas, de nível molecular ou atómico. À partida, um material tem determinadas características; por exemplo, uma liga de titânio tem melhores propriedades

mecânicas que uma liga de alumínio. Acontece que na verdade, à medida que se vai diminuindo o tamanho de uma peça de dado material, as suas características vão sendo mais dependentes do seu tamanho e forma e menos do material de que é feita. Isto acontece quando a quantidade de átomos na sua superfície é considerável quando comparada com a quantidade de átomos presentes no seu interior. Por outras palavras, à medida que o tamanho da partícula decresce, a percentagem de átomos da superfície aumenta (elevada razão área/volume). A verdadeira "arma" das nanopartículas reside especialmente no seu tamanho. Não obstante, muitas delas isoladamente exibem propriedades à partida excelentes, olhe-se para o exemplo dos nanotubos que por si só são estruturas fantásticas que se espera que num futuro próximo sejam usados como reforço principal em compósitos.

Quando as nanopartículas são dispersas numa matriz, pelo facto de terem dimensão nanométrica, permitem uma dispersão muito melhor (quando usado o método adequado) do que se fossem micrométricas, por exemplo, permitindo criar condições de uniformidade óptimas no material onde se encontram (como exemplo tome-se a melhor distribuição de tensões ao longo do volume de um material compósito de forma que se diminua a hipótese de concentração de tensões e conseqüente fractura).

Ao trabalhar numa escala tão reduzida importa perceber-se que estas partículas exibem muitas vezes propriedades inesperadas. Por exemplo, as nanopartículas de ouro aparentam uma cor vermelha escura em solução uma vez que são pequenas o suficiente para confinar os seus electrões e criar efeitos quânticos. [12] Estas partículas também derretem a uma temperatura muito mais baixa ( $\sim 300^{\circ}\text{C}$  para 2,5 nm de tamanho) que os lingotes de ouro ( $1064^{\circ}\text{C}$ ). Por outro lado, a absorção de radiação solar em painéis fotovoltaicos constituídos por nanopartículas é muito mais eficiente do que se os mesmos fossem revestidos com folhas do mesmo material.

Outras vantagens inerentes ao tamanho destas partículas são a elevada difusão destas devido ao seu rácio área/volume e a sua sinterização que pode ser feita a temperaturas mais baixas em períodos de tempo mais curtos. Simultaneamente existe a possibilidade destas partículas se aglomerarem, criando *clusters* que comprometem todo o propósito do uso destas sendo importante o uso de um bom método de dispersão.

Têm sido usadas nanopartículas nos mais variados campos, como de argila no reforço de polímeros, aumentando-lhes a temperatura de transição vítrea e melhorando

geralmente as suas propriedades mecânicas; têm sido usadas em fibras têxteis de forma a criar vestuário inteligente e funcional [13] ou em cremes de protecção solar

### 2.3.1. Montmorilonita

A montmorilonita é o principal produto das cinzas vulcânicas e foi descoberto pela primeira vez em Montmorillon em França, no entanto, é uma argila comum um pouco por todo o mundo. É translúcido e pode ter cor branca, rosa claro, amarelo, amarelo claro, vermelho ou verde. Tem clivagem cúbica {001} e fractura irregular e dureza 1-2 em escala de Mohs e uma densidade de 1700-2000 Kg/m<sup>3</sup> [14].



**Figura 2.1.** Montmorilonita : (a) em rocha; (b) depois de processada para ser misturada em resina.

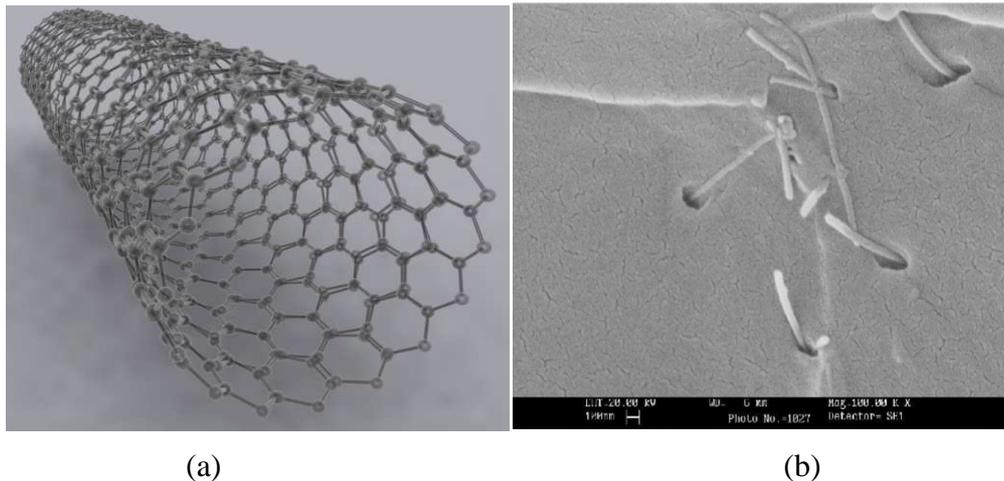
Embora os complexos de organo-clay sejam reconhecidos desde há bastante tempo [15], o interesse da sua aplicação e estudo como agentes de reforço só agora começa a assumir grande interesse. Em teoria, a introdução de uma percentagem entre 1 e 5% em peso deste material, consegue melhorar de forma significativa as propriedades mecânicas do material onde se encontra devido às dimensões nanométricas e à razão área/volume elevadíssima. As melhorias de propriedades principais são por exemplo, rigidez, resistência ao impacto, retardamento de chama, condução de iões e estabilidade térmica [16]. Os silicatos mais importantes para este propósito são a mica, flúoromica, hectorita, flúorohectorita, saponita, etc., mas o que tem maior interesse comercial é o montmorilonita (MMT) que pertence à família estrutural conhecida como os filossilicatos 2:1. A sua

estrutura cristalina consiste em camadas feitas de duas folhas tetraédricas de sílica fundidas numa folha octaédrica de hidróxido de alumínio ou de magnésio com a qual partilham uma aresta [16,17]. A montmorilonita natural é uma argila hidrófila mas com uma modificação à superfície consegue-se que seja organófila e, por conseguinte, compatível com os polímeros orgânicos convencionais. Contudo, o primeiro obstáculo ao uso destas nanopartículas é a sua dispersão na matriz. Dependendo do estado físico do polímero, podem ser adoptados alguns métodos de processamento tais como polimerização *in situ*, com um misturador rotativo de lâminas, laminador de três rolos e extrusão com fusos gémeos [18]. Mesmo assim, novos processos de mistura são inventados de forma a conseguir melhores resultados. Por exemplo, um método que consegue nanopartículas de argila bem dispersas pela matriz é um método desenvolvido por Hoa *et al.* [19] em que uma suspensão de acetona e MMT é tratada sob uma pressão extremamente alta (100-138 MPa) até formar uma pasta de *nanoclay* com aspecto cremoso. Esta pasta é depois misturada com um agitador mecânico com a resina sendo mais tarde desgaseificada em vácuo.

### **2.3.2. Nanotubos de carbono**

Os nanotubos de carbono são estruturas de dimensão nanométrica constituídas somente por átomos de carbono e podem ter um rácio de comprimento/diâmetro de 132.000.000:1 [20]. Exibem muitas características mecânicas e eléctricas únicas dependendo do seu tamanho, quiralidade e orientação. Recentemente os nanotubos de carbono têm sido usados como reforço em nanocompósitos tal como as fibras são usadas em compósitos [21-23] com propriedades mecânicas excepcionais. Devido às propriedades inerentes aos nanotubos de carbono e devido à sua escala nanométrica, o seu uso para aumentar as propriedades tênsis e aumentar a energia de fractura é tentador. Pesquisas recentes demonstram que o uso de nanotubos que estejam alinhados perpendicularmente com a fenda conseguem abrandar a sua propagação porque criam uma ponte entre as duas faces daquela [24,25]. Idealmente, os nanotubos reforçam a matriz polimérica interlaminarmente e fora do plano do reforço usado através de pequenas estruturas tipo pino. Em suma, espera-se que os nanotubos de carbono evitem problemas típicos dos compósitos tais como a delaminação, fragilidade ao impacto, fraca interface entre fibra e matriz e baixas propriedades transversais ao laminado. No entanto, para que isto aconteça

com sucesso é necessário que exista colagem entre os nanotubos e a matriz porque caso contrário, a elevada tensão de rotura de 200 GPa para nanotubos de parede simples e de até 1 TPa para nanotubos multi-parede não são aproveitadas. Na fig. 2.2 (b) pode-se observar uma fotografia de SEM (*Scanning Electron Microscope*) feita na superfície de rotura de um provete de flexão em três pontos onde se observam os nanotubos "soltos" por descolagem com a matriz.



**Figura 2.2.** Nanotubos de carbono : (a) representação artística de um nanotubo; (b) nanotubos na superfície de rotura devido a descolagem da matriz

À partida isto será sempre um problema já que a tensão última destes é muito superior à tensão da matriz onde se encontram sendo que o primeiro elo a ceder será mesmo o grau de aderência entre as superfícies dos dois materiais.

Outro assunto relevante prende-se com a questão do uso de nanotubos multi-parede ou não. Na verdade, nanotubos multi-parede são nanotubos de parede simples concêntricos em que as forças que unem as paredes são forças de van der Waals que são bastante fracas [26]. Isto levanta a questão da efectividade do uso de nanotubos multi-parede uma vez que à partida o reforço destes não é superior ao reforço fornecido pelos de parede simples se se pensar que a matriz adere somente à parede exterior dos primeiros enquanto as paredes interiores deslizam e giram quase livremente quando comparado com as forças que estão associadas às paredes exteriores. Contudo, segundo [27] os nanotubos de carbono multi-parede (MWCNT -*multi-walled carbon nanotubes*) são mais vulgares que os nanotubos de parede simples (SWCNT -*single-walled carbon nanotubes*). Os primeiros têm sido mais amplamente usados na indústria para reforço de compósitos laminados devido ao seu baixo custo, facilidade de serem encontrados em grande quantidade e facilidade de dispersão na

matriz. Desta forma, os SWCNT acabam por não ter as suas propriedades tão conhecidas como os de parede múltipla. No entanto, alguns estudos mostram que os SWCNT têm melhores performances devido ao seu menor diâmetro (cerca de 1 nanómetro), maiores rácios comprimento/diâmetro, maior eficiência de transferência de carga e melhores propriedades mecânicas devido à sua maior cristalinidade [28,29].

## 2.4. Mecanismos de falha

### 2.4.1. Impacto

Interessa antes de mais compreender o que é o impacto e quais as suas diferenças para um carregamento *quasi-estático*. O fenómeno de impacto pode ser definido como sendo uma solicitação ou um carregamento repentino. É tipicamente dinâmico, ocorrendo quando um objecto atinge outro e existe o desenvolvimento de grandes esforços num período de tempo muito curto.

O impacto pode ser classificado em duas categorias:

1. Impacto a baixa velocidade, com uma resposta quasi-estática;
2. Impacto a alta velocidade com resposta de natureza dinâmica, associada à balística.

Neste trabalho os testes foram feitos a velocidades que os enquadram como impactos a baixa velocidade. Segundo Naik and Shrirao [30], impactos a baixa velocidade ocorrem quando o período de tempo em que o impactor está em contacto com o provete é superior ao período do menor modo de vibração daquele. Quando o impacto se dá a alta velocidade, o contacto entre o impactor e o provete dá-se num espaço de tempo muito mais curto que o período do mais baixo modo de vibração da estrutura, o que leva a que a resposta do elemento estrutural seja ditada pelo comportamento da placa na vizinhança imediata da zona de impacto sendo que a resposta do elemento vai ser pouco dependente das condições de fronteira i.e. *clamping*.

Ao invés de duas categorias, Ruiz e Harding [31] sugerem três categorias de velocidade de impacto:

1. Impactos com velocidades na ordem dos 300 m/s em que há perfuração do provete e um dano muito localizado;

2. Impacto com velocidade entre 50 e 300 m/s em que são criadas ondas de tensão que transmitem carga à estrutura existindo a necessidade de uma análise dinâmica;
3. Impacto a velocidades inferiores a 50 m/s no qual ocorrerão várias reflexões nas fronteiras até que se atinja o equilíbrio quasi-estático.

Como explicado por Hu *et al.*[32], os impactos a baixa velocidade produzem múltiplas delaminações entre as várias camadas do compósito que reduzem de forma drástica a resistência e rigidez do material, sendo de importância capital a compreensão destes mecanismos de dano. Foram criados, ao longo do tempo, vários modelos que relacionam as variáveis de impacto (energia, massa, velocidade, tipo de impactor) e as variáveis de objecto impactado (espessura, tipo de compósito, condições de fronteira) de forma a perceber a progressão do dano no provete. Exemplo disso é o trabalho realizado por Moura and Gonçalves [33] onde é relacionada a fenda e a delaminação para impactos de baixa velocidade. No trabalho vertente, por outro lado, vai ser relacionada a energia de impacto e suas variáveis (massa e velocidade) com o dano criado na placa, seja ele fenda, delaminação ou outro.

Um determinado material (metálico, cerâmico, polimérico ou compósito) será resistente ao impacto se tiver uma grande tenacidade (ou resiliência no caso de material frágil), sendo assim a tenacidade de importância vital. Explica-se isto com o facto de o impacto ser um fenómeno repentino, fornecendo pouco tempo ao material para se deformar plasticamente, podendo assim surgir localmente um defeito (fissura) que perante uma nova solicitação pode crescer e levar o material à rotura.

Alguns factores podem fazer variar o comportamento ao impacto, como a temperatura e a velocidade. Quanto mais elevada a velocidade e mais baixa a temperatura, mais frágil se torna o material e, por conseguinte, maior risco tem de sofrer dano com o impacto.

A resiliência é a capacidade de um material absorver energia quando é deformado elasticamente e depois, durante o descarregamento, ter essa energia recuperada. A tenacidade representa uma medida de habilidade de um material absorver energia até à sua fractura.

O dano nos materiais compósitos laminados resultante de um impacto é a consequência da libertação/dissipação da energia de impacto no próprio material. Pode

resultar em dano na matriz, rotura de fibras e descolagem fibra-matriz, separadamente ou em conjunto [34].

### **2.4.2. Dano**

A colisão de objectos, queda accidental ou queda de ferramentas induz tensões elevadas na vizinhança da área de contacto que podem induzir dano. Um dano resultante de um impacto a baixa velocidade num material compósito, embora muitas vezes imperceptível, pode reduzir a resistência à compressão até cerca de 70% [35,36].

Interessa distinguir dois aspectos distintos relativamente ao dano em materiais compósitos. O primeiro é a resistência ao dano que é a capacidade do material resistir ao dano ou seja, a capacidade que o material tem de não permitir a existência de dano com uma certa força de impacto ou de minimizar a existência daquele. Por outro lado, a tolerância ao dano é a capacidade do material continuar a suportar os esforços para os quais foi projectado depois da presença do dano. Neste trabalho estuda-se essencialmente o primeiro aspecto.

Na direcção transversal às fibras o principal suporte de carga é a matriz. No caso do impacto afectar a integridade da ligação matriz/reforço ou somente a matriz e esta ceder às forças a que a peça está sujeita no momento, existe microfissuração interna e delaminação na camada afectada e possível falha de todo o sistema.

Para além da delaminação em compósitos laminados, existe também a fissuração de matriz, descolagem fibra-matriz e rotura de fibras.

O dano nos materiais compósitos divide-se em dano local e em dano global. O primeiro é essencialmente a indentação/perfuração provocada pelo impactor no material e depende directamente das características deste. O dano global é um dano que se estende por uma área muito maior que a área de contacto entre o impactor e o compósito e consiste principalmente em delaminação sendo que esta é a forma de dano que mais diminui a resistência à compressão pós-impacto.

Principalmente no dano global, suas causas e efeitos são difíceis de analisar já que envolvem muitas variáveis relacionadas com o impactor (massa, velocidade e forma da extremidade) e com a amostra a ser testada (geometria, sequência de empilhamento do reforço e condições de fronteira). As combinações possíveis destas características tornam a

análise do seu comportamento algo complexo. Destacam-se dois tipos de falhas nos compósitos laminados: falha no plano devido às tensões no plano e falha fora do plano devido às tensões interlaminares [37].

### **2.4.3. Mecanismos de falha no plano**

#### **2.4.3.1. Devido à compressão**

A compressão é talvez a solicitação mais severa para os compósitos laminados uma vez que força a separação ou deslocamento relativo das camadas que o constituem, levando-o à fractura e colapso. Segundo M. Ashizawa [37], a compressão cria cinco modos de falha em laminados:

1. Falha por tracção transversal induzida pelo efeito de Poisson;
2. Falha por delaminação em compressão;
3. Falha por encurvadura global;
4. Falha por microencurvadura;
5. Falha de resistência.

#### **2.4.3.2. Devido à tracção**

Sob a acção de um carregamento de tracção longitudinal à orientação das fibras (orientação de interesse de estudo), podem ocorrer três tipos de falha:

1. Rotura frágil: quando o provete se separa transversalmente com quebra de fibras;
2. Arrancamento de fibras: pode acontecer quando existem variações da resistência da ligação fibra-matriz com mecanismos de transferência de carga da matriz para a fibra;
3. Descolagem da fibra-matriz ou corte da matriz: podem acontecer separadas ou em simultâneo. A origem de ambas está no ajuntamento de fissuras de diferentes secções numa fractura [38].

### **2.4.4. Mecanismos de falha fora do plano**

Os compósitos laminados têm como principal característica e vantagem a possibilidade de orientação das fibras na direcção desejada, com o empilhamento e na

sequência desejada. Contudo, estes compósitos podem ter ótimas propriedades no plano mas pecar por terem propriedades muito inferiores interplanarmente. A própria sequência e direcção de empilhamento das camadas de reforço cria comportamentos diferentes de camada para camada, criando tensões interlaminares que podem levar à iniciação e propagação da delaminação no compósito. Assim, geralmente atribuem-se como causas da delaminação as tensões normais ao plano e perpendiculares a este. O impacto é geralmente o precursor deste tipo de falha.

É habitual numa placa que foi impactada a baixa velocidade a presença de um gradiente de tensões ao longo da espessura que vai desde a compressão máxima na face de impacto até à tracção máxima na face oposta, passando pela zona neutra. A amplitude das tensões é tanto maior quanto maior for a espessura da placa. Assim sendo, existem danos locais resultantes da indentação do impactor, danos de tracção, corte, compressão, etc.; não sendo um fenómeno isolado, daí o seu estudo ser deveras complexo.

#### **2.4.4.1. Deformação da matriz**

A deformação da matriz é um aspecto muito importante no comportamento ao impacto. Grande parte da energia de impacto é absorvida pela matriz portanto, quanto mais flexível esta for, mais vai conseguir restituir a sua forma inicial sem que se danifique. Não pode ser contudo, flexível em demasia já que é a matriz que fornece a forma ao compósito e parte da sua rigidez. As matrizes termoplásticas ganham cada vez mais importância devido à ductilidade relativamente mais elevada [39].

#### **2.4.4.2. Descolagem fibra-matriz**

A descolagem entre a fibra e a matriz é um processo de falha que decorre essencialmente da superfície da fibra ou melhor, da capacidade que esta tem em facilitar a aderência por parte da matriz. Conseguem-se uma melhor aderência entre a fibra e a matriz com um tratamento superficial adequado à fibra durante o seu fabrico. Regra geral, o comportamento inerente à descolagem começa por um aumento de carga na fibra e uma deformação elástica daquela até um valor máximo, altura em que começa a descolagem. Seguidamente a carga volta a aumentar, resultado da perda de correlação geométrica, associado às novas posições ocupadas pela fibra. No entanto, a força volta a diminuir à

medida que o comprimento de contacto entre a fibra e a matriz diminui. A descolagem da fibra é um fenómeno difícil de detectar pelas técnicas convencionais.

#### **2.4.4.3. Fissuração da matriz**

A fissuração da matriz é um dano muitas vezes difícil de detectar já que ocorre numa zona muito localizada. Regra geral, a fissuração da matriz não leva à ruína dos componentes directamente, mas pode induzir em delaminação que agora sim, podem ser a causa de um dano grande o suficiente para a fractura. Normalmente a fissuração começa na superfície oposta à zona do carregamento se o impacto for feito numa amostra minimamente flexível. Estudos demonstram que melhorando a matriz se consegue absorver mais energia de deformação e ter mais resistência à fractura por corte, reduzindo também o efeito da concentração de tensões [40,41]. Os compósitos de matriz termoplástica, regra geral, apresentam menos fissuras e menor extensão de dano [39].

#### **2.4.4.4. Delaminação**

A delaminação é talvez o modo de dano mais importante em compósitos laminados e ao mesmo tempo o mais difícil de quantificar e analisar. Ao longo dos anos vários estudos têm sido feitos com o objectivo de perceber melhor a delaminação em compósitos laminados dada a sua importância no âmbito do dano. Choi *et al* [39] sugerem que existe uma sequência para a formação da delaminação em laminados sujeitos a impacto:

1. Dano inicial que se revela pela fissuração da matriz provocada pelas tensões de corte e de flexão;
2. As fissuras propagam-se até às interfaces constituídas por lâminas com fibras orientadas em diferentes direcções;
3. A delaminação começa a formar-se nas respectivas interfaces;
4. Criam-se mais fissuras na matriz, que mais uma vez vão provocar novas delaminações.

Sendo que a lâmina no interior do laminado, onde surgem as fissuras, dita o tamanho da delaminação. Segundo Kim *et al* [42], as tensões normais são as principais responsáveis pelo aparecimento da delaminação embora reconheçam que as tensões de corte também contribuam a isso.

Dois factores que desempenham um papel importante no que diz respeito à delaminação são o estado de tensão e a resistência interlaminar das placas. A resistência interlaminar está directamente ligada com propriedades do material como a resistência à fractura da matriz e resistência da colagem entre a fibra e a matriz. O estado de tensão por outro lado, é afectado pela sequência de empilhamento.

#### **2.4.4.5. Rotura das fibras**

Este é um modo de falha muito importante e o que envolve maior energia para a sua realização visto que são as fibras os principais portadores da carga nos compósitos laminados e pode ocorrer por vários motivos. Um impacto transversal ao plano das fibras causa por norma uma rotura localizada daquelas, resultante da indentação do impactor. Depois, devido à existência de extremidades livres de fibras na matriz, resultantes da sua rotura e com o consequente aumento de tensões de corte na interface fibra-matriz, existe descolagem entre as duas.

#### **2.4.4.6. Combinação dos diferentes tipos de falha**

Será difícil um modo de falha ocorrer isoladamente até porque vezes, um modo de falha pode ser consequência de outro que aconteceu previamente. Assim os modos de falha interagem entre si, formando fenómenos mais complexos e de difícil estudo. Com isto não se quer dizer que todos têm a mesma importância. Dependendo das circunstâncias e do material usado, um modo de falha pode assumir a principal responsabilidade pela rotura do compósito.

#### **2.4.5. Sequência de empilhamento**

Segundo Ross *et al.* [43], a sequência de empilhamento tem um papel fundamental na resistência ao dano uma vez que é fundamental para a rigidez do compósito laminado. Por exemplo, um impacto numa amostra flexível gera grandes tensões de tracção na lâmina inferior (oposta ao impacto), que leva a uma falha na interface fibra-matriz. As fissuras que aqui aparecem, propagam-se e originam a delaminação. Quando o impacto é forte o suficiente para causar dano local (indentação), existe falha na interface fibra-matriz na

vizinhança do impacto. Esta falha propaga-se desde este local para o resto do laminado, através de delaminação.

A sequência de empilhamento entra aqui já que a delaminação ocorre com maior facilidade entre lâminas com orientações diferentes (diga-se 0° e 45°, por exemplo) e não para lâminas adjacentes com orientações paralelas.

#### **2.4.6. Condições de fronteira**

Assunto ainda a ter relevância é a relação entre a condição de fronteira das placas e a resposta do impacto. Foi verificado por Tan *et al.* [44] que placas encastradas sofrem deflexão e extensão durante o impacto enquanto placas simplesmente apoiadas sofrem somente deflexão, como seria de esperar. Como consequência disto, as placas encastradas sofrem mais dano. Lin *et al.* [45] reconheceram que para evitar falhas interlaminares como delaminações, o uso de nanopartículas na matriz poderia ajudar a melhorar a resistência ao impacto uma vez que a formação de falhas sub-críticas enunciadas por Elder *et al.* [46] seria reduzida.

### **2.5. Análise por C-scan**

Após o dano num material interessa saber qual a extensão e forma do dano naquele. Acontece que frequentemente é impossível a olho nu conseguir-se uma leitura precisa e muitas vezes sequer, observar o dano. Para estas situações existe o processo de varrimento por *C-scan*.

É um processo ultra-sono que funciona essencialmente pelo princípio de *pulso-eco* existindo três tipos de inspecção: A, B e *C-scan*.

Com o método *A-scan* consegue-se uma informação unidimensional referente ao trajecto do feixe ultra-sonoro no interior do material. Consegue-se obter a profundidade no material a que se encontra esse defeito através do tempo de propagação das ondas. O tamanho do defeito é conseguido pela análise da amplitude do sinal recebido.

O *B-scan* inspeciona o material ao longo de um eixo através do movimento mecânico do transdutor o que produz um corte paralelo à direcção de propagação. Este

método é amplamente usado em diagnóstico médico devido à necessidade de visualização de secções.

O *C-scan* por outro lado faz um varrimento perpendicular à direcção de propagação enquanto recolhe os sinais referentes a cada ponto de um plano predeterminado e construindo uma imagem num computador que também controla o seu movimento e adquire os sinais. Geralmente o *C-scan* é utilizado submerso em água, como meio de acoplamento (vulgarmente conhecido por *pulso-eco* por imersão) e tem uma gama de frequências que varia tipicamente entre os 500 kHz e os 25 MHz. Pode também usar-se gamas de frequências até na ordem de 1 GHz em que se passa a chamar microscopia ultrasonora. Neste trabalho é utilizada a primeira gama de frequências.

Porém, devido a problemas de refacção e reflexão das ondas por parte da natureza do reforço das placas ensaiadas houve a necessidade de alterar tanto as placas (lixadas finas) como o sistema de varrimento por *C-scan*. Assim, foram colocadas duas sondas alinhadas e em faces opostas da placa de forma que uma fosse a emissora e outra a receptora do sinal. Desta forma evitou-se a necessidade do uso de *pulso-eco* para se conseguir obter uma melhor imagem, através de sondas *em transmissão*.

### **3. MATERIAIS E PROCEDIMENTO**

#### **3.1. Material e processos de fabrico**

Foi usada para matriz a resina Biresin CR120, formulada com bisfenol A, combinado com o endurecedor CH120-3 (10 partes de resina + 3 partes de endurecedor), ambos fornecidos pela Sika.

O reforço de fibra de vidro consiste em tecidos multiaxiais com a referência ETX 800, *E-glass*, com orientações de 0° (400 filamentos), +45° (200 filamentos) e -45° (200 filamentos). A união está ao encargo de 12 filamentos, num total de 812 filamentos.

##### **3.1.1. Para o reforço de nanotubos de carbono**

Os nanotubos de carbono usados são multiparede (MWNT) com 98% de pureza, fornecidos pela Sigma-Aldrich com diâmetro de 9 nm e comprimento de 5 µm. O processo de fabrico foi o seguinte:

1 - Preparação do molde (superfície moldante plana), preparação do material para a realização do saco de vácuo e corte do tecido nas dimensões pré-defenidas;

2 - Mistura da resina com os nanotubos de carbono (0; 0,5 e 1%). Neste processo foi utilizado para misturar a varinha (cerca de 15 min). A mistura foi depois colocada em vácuo durante cerca de 5 min.

3 - Adição do endurecedor e mistura com recurso à varinha (cerca de 5 min). A mistura foi novamente colocada em vácuo durante cerca de 5 min.

4 - As várias camadas de fibra (10 camadas) são colocadas uma a uma sobre a superfície moldante e impregnadas com a mistura de resina + nanotubos com uma trincha.

5 - Após esta fase, o material a processar é colocado dentro de um saco de vácuo (2 tomadas a 0° e 2 tomadas a 90°). O processo de cura é realizado em vácuo durante cerca de 8 horas.

6 - Pós cura. Nesta fase o material processado é sujeito a 3 ciclos de temperatura: 55° C durante 16 horas, 75° C durante 3 horas e 120° C durante 12 horas.

### 3.1.2. Para o reforço de *nanoclays*

Foram usadas como nanoargilas (*nanoclays*), organo-montmorilonita (OMMT), comercial Nanomer I30 E, com a superfície modificada através de octadecilamina modificada (25 a 30% em peso), fornecido pela Nanocor Inc., produzidas para serem facilmente dispersas pela matriz.

O processo de fabrico é muito semelhante ao anterior:

1 - "Igual ao passo para NT"

2 - Mistura da resina com os *nanoclays* (0, 1 e 3%). Neste processo foi utilizado para misturar a varinha (cerca de 60 min). A mistura foi depois colocada em vácuo durante cerca de 5 min.

3 - Adição do endurecedor e mistura com recurso à varinha (cerca de 5 min). A mistura foi novamente colocada em vácuo durante cerca de 5 min.

4 - As várias camadas de fibra (10 camadas) são colocadas uma a uma sobre a superfície moldante e impregnadas com a mistura de resina + *nanoclays* com uma trincha.

5 - "Igual ao passo para NT"

6 - "Igual ao passo para NT"

Foram fabricados 5 lotes de materiais para este trabalho nos quais se faz variar o tipo e percentagem de nanopartículas, conforme indicado na tabela 3.1.

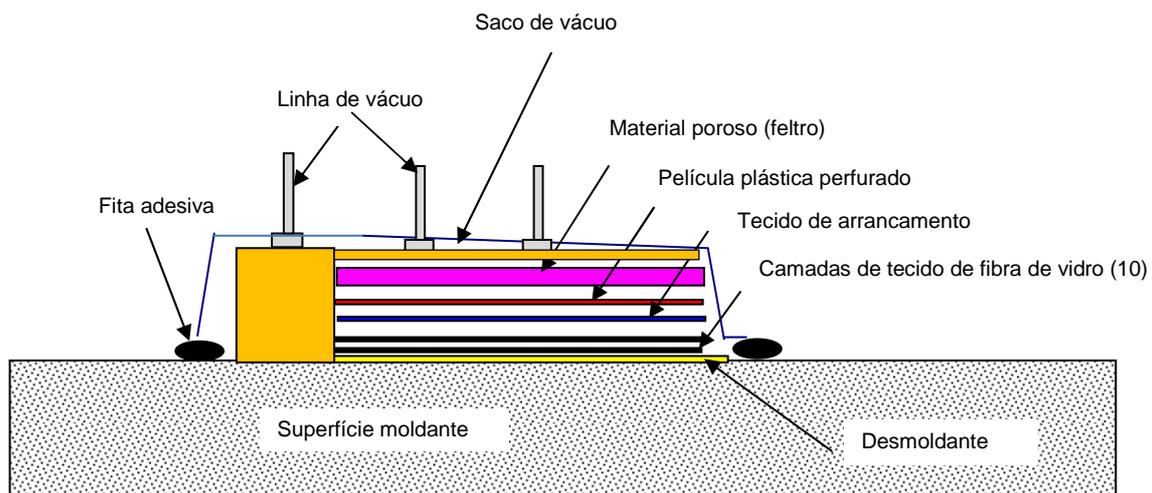
**Tabela 3.1.** Distribuição dos nanoreforços pelas placas testadas.

Compósito	MMT (% peso)	MWNT (% peso)
F. Vidro/ Epóxi	0	0
F. Vidro/ Epóxi + NC	1	0
F. Vidro/ Epóxi + NC	3	0
F. Vidro/ Epóxi + NT	0	0,5
F. Vidro/ Epóxi + NT	0	1

As placas testadas foram cortadas com dimensão 10x10 cm de forma a assentarem completamente na base de suporte da torre de impacto, com 4,2 cm de espessura média, a partir de placas-mãe com aproximadamente 40x40 cm.

Para facilitar a descolagem das placas, foi adicionado um filme de descolagem entre o molde e a primeira camada de resina bem como um tecido de arrancamento por cima de todas as camadas que não é mais do que um pano de fibra de vidro poroso e revestido por um material desmoldante. Por cima deste tecido é ainda colocada uma película plástica para que o excesso de resina seja absorvido durante a fase de vácuo. Ainda acima desta camada é colocada uma manta de material poroso (feltro) para que o vácuo seja uniformemente distribuído.

Na fig. 3.1, um esquema mostra a disposição dos constituintes necessários à compactação e cura.



**Figura 3.1.** Representação esquemática do processo de fabrico das placas/provetes de fibra de vidro em matriz epóxi com reforço nanométrico.

### 3.2. Ensaios de impacto

Os ensaios de impacto foram efectuados numa coluna de impacto da Instron, modelo CEAST 9350. É uma torre de chão com uma gama de energia de impacto de 0,59-757 J. Possui câmara pressurizada e térmica, sistema *anti-rebound* (para evitar impacto múltiplo) e uma frequência de aquisição de informação na ordem dos 2 MHz.

Cumpram com as normas ASTM D3763; ASTM D7136; ASTM D7192; Boeing BSS 7260; Airbus AITM 1.0010; ISO 6603; ISO 11343; ISO 8256 entre outras similares.

Os impactos foram realizados com um impactor de ponta semi-esférica, com uma massa 3,4 Kg (2,5 Kg pesos + 0,5 Kg estrutura de suporte + 0,4 Kg do impactor) e com uma velocidade de 2,16 m/s para 8J de energia e uma velocidade de 3,06 m/s para 16 J de energia de impacto. As placas/provetes foram colocados na base de ensaios sem qualquer encastramento já que a máquina não consegue fazer o *clamping* dos provetes na altura do impacto. Começa por fazer o *clamping* mas quando o impactor está na fase ascendente (ganhando energia potencial), a máquina destranca o provete, ficando este simplesmente apoiado.

Os impactos realizados foram divididos em primeiro lugar, por energia de impacto (8 e 16 J), depois por tipo de nanoreforço (nanotubos de carbono, *nanoclays* ou sem reforço). Foram ensaiados três provetes de cada tipo num total de 30 provetes/placas.

### 3.3. Análise da área de dano

Para a medida das áreas de dano foi feito em primeiro lugar uma leitura óptica nas placas sem reforço nanométrico e com reforço de *nanoclays*, que são semi-transparentes à luz ambiente ou luz de um simples candeeiro. As placas reforçadas com NT (e algumas sem reforço e com reforço de NC, com o objectivo de comparação com a leitura óptica) tiveram as respectivas áreas de dano analisadas através de *C-scan*, o que será abordado mais à frente. Para já, a explicação da leitura por meios ópticos das placas semi-transparentes, onde em primeiro lugar foram todas expostas à luz de um candeeiro do lado oposto onde iria ser feita a leitura e depois, com atenção ao detalhe do limiar do defeito foram traçados pontos ao longo daquele com caneta de acetato. A par com os pontos de limite do defeito foi também colocada uma escala com 2 cm num canto de cada uma das placas. Depois de todas as placas marcadas, o passo seguinte foi fazer uma digitalização destas num *scanner* comum de computador. Só assim se conseguiria garantir uma total perpendicularidade da placa à direcção de observação, evitando efeitos de perspectiva que iriam mais tarde alterar a medição da área de dano. Depois de todas as digitalizações feitas, foram abertas como “*Sketch Image*” no software Solidworks 2011 da Dassault Systèmes onde no plano dessa imagem foi feito um esboço onde uma *spline* passa por cada um dos pontos marcados na placa. Foi optado pelo uso de uma *spline* já que esta adapta a sua curvatura constantemente de uma forma natural (entenda-se natural como automática mas

também como a forma mais óbvia, instintiva por assim dizer) por todos os pontos marcados. Depois foi criada uma superfície delimitada por estes pontos e a sua área foi retirada, registada e tratada em Excel.

Para o *C-scan*, ao qual se teve de recorrer devido à opacidade dos provetes reforçados com NT 1% e 0,5%, recorreu-se ao laboratório de ultra-sons e ressonância do departamento de Electrotecnia da UC com a pronta assistência do professor Mário Santos. No início tentou-se fazer um varrimento em *C-scan* com *pulso-eco* das placas mas sem êxito já que tanto o material (reforço de fibra de vidro) como a superfície das placas refractavam as ondas não se conseguindo perceber qual a frequência a usar (porque de facto nenhuma permitia o “lock” da “gate” no software de aquisição de dados das sondas). Também se tentou usar o *B-scan* mas novamente sem êxito já que o contacto com a superfície das placas não era regular o suficiente para existir um contacto constante e uniforme entre a sonda e a superfície, mesmo com o gel de contacto. A solução adoptada foi, em primeiro lugar, lixar com lixa fina as placas a serem analisadas e depois montar uma estrutura que servisse de suporte e guia para duas sondas de ultra-sons que trabalhariam sincronizadas em transmissão de forma a conseguir uma medição do defeito nas placas. Esta estrutura foi inteiramente feita de acrílico com 1 cm de espessura pelo autor deste trabalho. Foi também criada uma estrutura auxiliar que suporta as placas dentro de água e que permite a total liberdade da primeira tanto por cima como por baixo das placas. Aparentemente, no departamento de Electrotecnia nunca se tinha conseguido fazer estes testes em placas reforçadas com fibra de vidro pela natureza do próprio reforço mas depois desta adaptação feita conseguem-se imagens bastante boas podendo-se agora medir o defeito em placas de fibra de vidro reforçadas com nano tubos de carbono. As fig. 0.6, 0.7 e 0.8 dos Anexos mostram esta adaptação e os testes.

Os testes em *C-scan* foram não só realizados em placas reforçadas com NT mas também com NC por uma questão de comparação futura de resultados, mas todas as placas tinham sido impactadas com 16 J de energia já que o defeito é maior e mais visível conseguindo-se consequentemente um erro de medição de área mais baixo. Desta forma e depois das imagens do *C-scan* terem sido retiradas do computador original, foram tratadas como se da superfície digitalizada das lidas opticamente se tratasse, com pontos na margem do defeito e uma *spline* que os une. Não foi necessário acrescentar uma escala já

que as imagens tinham todas 6,5x6,5 cm. A fig. 0.5 dos Anexos mostra as imagens resultantes do *C-scan*.

### **3.4. Resistência residual**

Para se analisar a tensão que as placas ainda eram capazes de suportar depois de impactadas foram efectuados ensaios de tracção em todas à excepção daquelas estudadas em *C-scan* (como tinham sido lixadas finas o seu comportamento poderia vir a ser diferente das restantes e a sua análise era facultativa).

Em primeiro lugar foram tiradas medidas genéricas do diâmetro do defeito máximo. Depois, todas as placas impactadas foram cortadas com uma medida de largura um pouco superior ao diâmetro máximo do defeito maior, de forma a conter todo o defeito nelas. Caso contrário não faria sentido algum esta análise porque nem se estaria a lidar com o dano que ficou de fora da análise como pelo facto de cortar na zona do dano, em si, pode ser completamente alterador de resultados.

Mais tarde as placas foram rectificadas e lixadas finas lateralmente de forma a se conseguirem provetes de tracção o mais viáveis e fiáveis possível.

Foi demarcada uma área de aperto nos provetes, deixando sempre a mesma área livre e foram traccionados. Os resultados foram retirados e depois comparados com provetes feitos no mesmo material mas sem qualquer tipo de dano propositadamente criado. A máquina usada foi uma Instron 4206 com uma célula de carga de 100 kN. As fig. 0.1, 0.2 e 0.3 dos Anexos mostram os provetes nas suas fases de preparação.

## 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. Ensaio de impacto

Para consulta dos valores médios e dos desvios padrão dos parâmetros de impacto durante a discussão dos resultados, mostra-se abaixo a tabela 4.1 onde todos os valores relevantes são mostrados. A tabela mais detalhada correspondente é mostrada nos Anexos como tabela 0.1.

**Tabela 4.1.** Parâmetros de impacto médios e desvios padrão relativos a cada tipo de placas impactadas.

8 J	Material	Carga máxima [N]	Deslocamento [mm]	Energia absorvida [J]	Energia máxima [J]	Energia elástica [J]	Energia dissipada [%]	Espessura média [mm]	Rigidez K [N/m]	Rigidez/espessura [N/mm <sup>2</sup> ]	E. elástica/ess. [J/mm]		
												Méd	Desv.
16 J	0%	Méd	5353	2,75	3,7	8,1	4,4	54,4	4,40	1948,9	443,1	1,0	
		Desv.											
	NC 1%	Méd	5220	2,96	3,6	8,0	4,4	54,6	3,98	1768,6	444,3	1,1	
		Desv.											
	NC 3%	Méd	5097	2,93	3,8	8,0	4,2	52,4	4,22	1741,0	413,1	1,0	
		Desv.											
	NT 0,5%	Méd	5285	2,88	3,5	8,0	4,6	56,9	3,95	1834,5	464,3	1,2	
		Desv.											
	NT 1%	Méd	5043	3,00	3,9	8,1	4,1	51,1	4,31	1680,8	390,9	1,0	
		Desv.											
	16 J	0%	Méd	7510	3,94	8,6	16,0	7,4	46,3	4,36	1906,4	437,5	1,7
			Desv.										
NC 1%		Méd	7231	4,14	8,9	16,1	7,2	44,7	4,03	1745,2	432,6	1,8	
		Desv.											
NC 3%		Méd	7112	4,15	9,0	16,1	7,0	43,7	4,30	1715,1	398,7	1,6	
		Desv.											
NT 0,5%		Méd	7750	4,01	8,3	16,0	7,7	48,2	4,09	1936,1	473,2	1,9	
		Desv.											
NT 1%		Méd	5043	3,00	3,9	8,1	4,1	51,1	4,31	1680,8	390,9	1,0	
		Desv.											
NT 3%	Méd	5097	2,93	3,8	8,0	4,2	52,4	4,22	1741,0	413,1	1,0		
	Desv.												

NT 1%	Méd	7413	4,13	8,7	16,1	7,3	45,6	4,31	1798,5	417,2	1,7
	Desv. Pad.	254	0,15	0,3	0,0	0,3	2,1	0,06	128,4	24,2	0,1

### 4.1.1. 8 J de energia de impacto

O primeiro ensaio ao qual as placas foram submetidas foi o ensaio de impacto.

A fig. 4.1 mostra as médias dos resultados da carga [N] em função do tempo [ms] para 8 J de energia de impacto. Os provetes que sofrem mais carga de impacto são os que não têm reforço de nanopartículas (0%) com um valor de aproximadamente 5300 N. Não se trata neste caso de estas serem as placas com melhores propriedades mecânicas específicas mas sim porque são mais espessas que as restantes tornando-se inevitavelmente mais rígidas e, por conseguinte, aumentando a sua carga máxima durante o impacto. Para se comparar verdadeiramente os resultados de carga máxima sofrida entre diferentes provetes, ter-se-ia de adimensionalizar os resultados de rigidez obtidos em função da espessura ou volume da placa. Esta análise que será feita mais à frente.

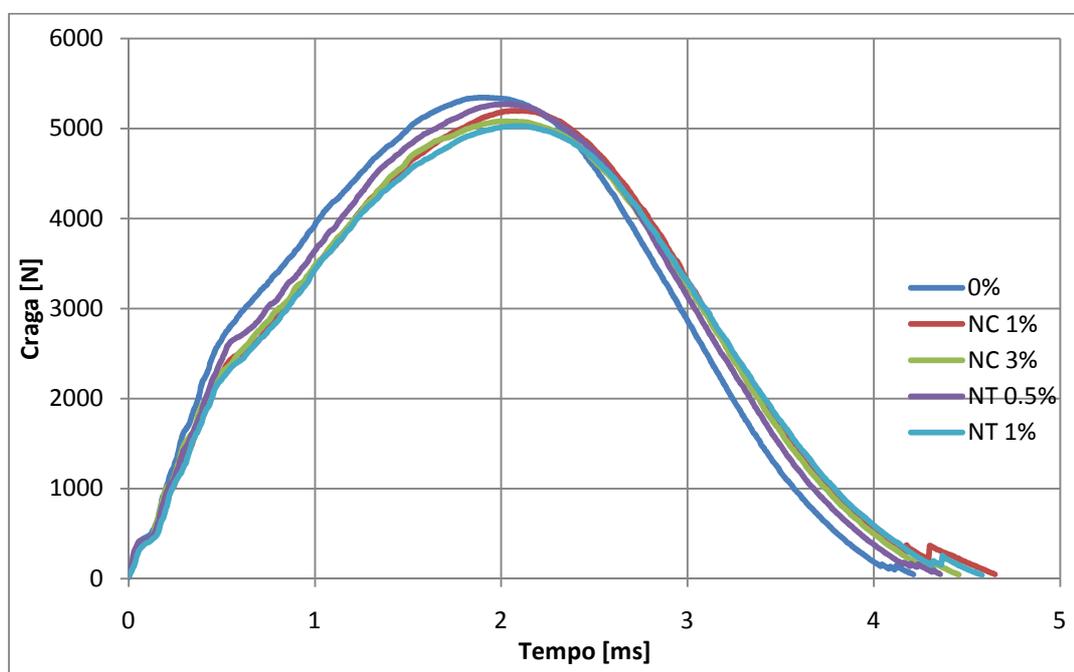
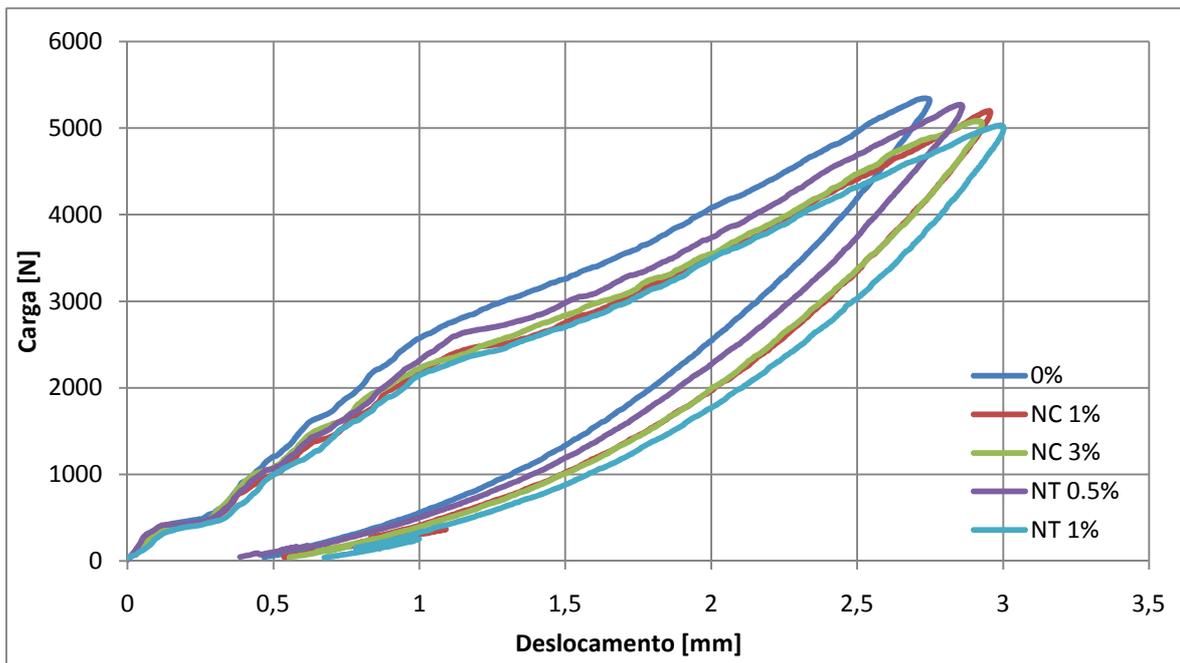


Figura 4.1. Gráfico da evolução dos valores médios da carga em função do tempo para 8 J de energia.

Para consulta dos valores individuais, consulte-se a 0.1 dos Anexos.

Com resultados abaixo da média de 0% de reforço (entenda-se a partir daqui que com *reforço* se pretende dizer reforço de nanopartículas até que o contrário seja dito) estão os provetes com NT 0,5%, seguida da média dos resultados das placas com 1% de NC, pela média de NC 3% e por fim e logo a seguir, pela média de NT 1% com um valor de aproximadamente 5000N. Note-se que a diferença de valores, embora não seja muito grande, será necessário mais tarde entrar com as espessuras das placas para a interpretação destes resultados.



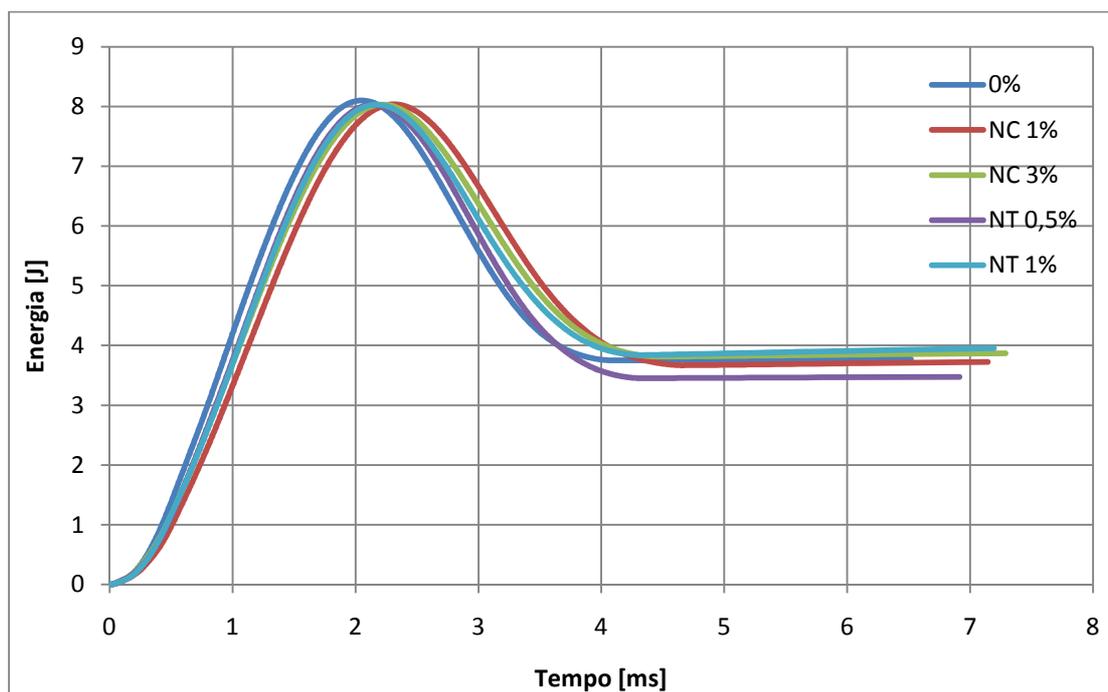
**Figura 4.2.** Gráfico da evolução dos valores médios da carga em função do deslocamento para 8 J de energia.

No que diz respeito à deformação máxima atingida pelos provetes (fig. 4.2), tem-se como resultados médios máximos os pertencentes às placas com NT 1%, com uma carga de 5030 N aproximadamente, o que quer dizer que as placas com 1% de reforço de nanotubos de carbono foram as que tiveram mais deformação e as que precisaram de menos força para a atingir. No extremo oposto do gráfico, com mais carga e menos deformação estão as placas sem reforço, naturalmente.

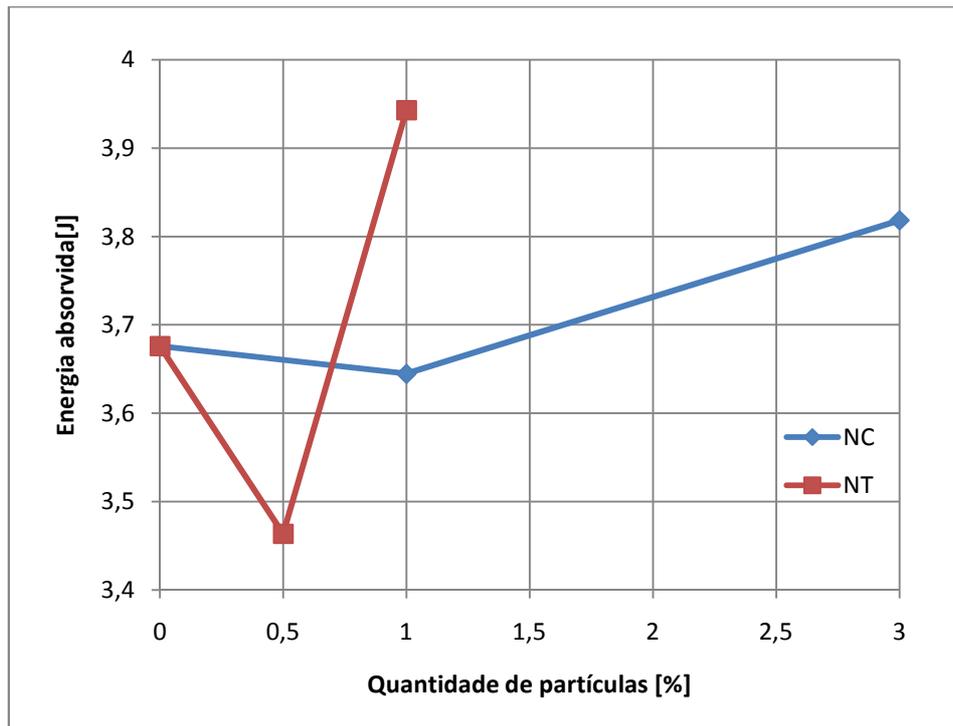
Os dois gráficos explicados atrás complementam-se. Ambos têm no eixo das ordenadas a carga como valor e ambos expressam esse mesmo valor em função de outra incógnita, daí que exprimam coisas semelhantes. No entanto e talvez mais interessante é o

gráfico que mostra a carga em função da deformação já que a carga em função do tempo não transmite uma ideia de rigidez tão grande como a primeira. Com a carga em função da deformação consegue-se perceber *quanto* é que deformou e a carga associada ou seja, ter a noção de rigidez.

O comportamento típico de uma placa sujeita a impacto, em termos de energia/tempo é algo que se assemelha à fig. 4.3 onde existe uma primeira zona onde a energia cresce até um ponto de energia máxima (energia escolhida para impacto - 8 ou 16J), uma segunda zona onde a energia aplicada à placa decresce resultado da recuperação elástica e uma terceira zona (planalto) onde a energia não varia (ou muito pouco) em função do tempo. É nesta zona que se conclui a quantidade de energia absorvida (energia na qual coincide a recta) pela placa/provete. Para simplificação dos resultados obtidos, optou-se por usar um gráfico que compare as médias de energias absorvidas como o representado na fig. 4.4.



**Figura 4.3.** Gráfico da evolução típica da energia em função do tempo para 8 J de energia de impacto para os vários tipos de nanoreforços.



**Figura 4.4.** Gráfico com os valores médios da energia absorvida para os diferentes tipos e quantidades de reforço nanométrico para 8 J de energia.

A fig. 4.4 representa a média da energia absorvida. Observa-se que os provetes que absorveram mais energia foram os de NT 1%, com uma média de energia absorvida de 3,94 J, seguidos dos provetes de NC 3% com 3,81 J, seguidos de 0% de reforço com 3,68 J logo acima de NC 1% com 3,63 J. Por último e com grande afastamento ainda assim dos restantes estão os provetes reforçados com NT 0,5%. Isto mostra que os provetes que sofreram mais dano (seja ele de que tipo for) foram os que estavam reforçados com 1% de nanotubos e, curiosamente os que sofreram menos dano foram os reforçados com 0,5% de nanotubos. Conclui-se que a diferença de meio por cento deste reforço faz toda a diferença. Claro está que se fala de quantidades em peso e não em volume mas ainda assim, meio por cento é uma quantidade muito pequena. De qualquer forma é interessante salientar desde já que, embora o máximo de *performance* se situe perto de 0,5%, caso se quisesse aperfeiçoar as quantidades ideais de reforço, ter-se-iam de fazer mais provetes com variações de, digase, uma ou duas décimas de percentagem antes e depois dos 0,5% supostamente ideais, o que iria proporcionar um estudo interessante e mais detalhado, conseguindo-se interpolar a percentagem de reforço ideal.

Assim, os reforços com melhor desempenho foram os de NT 0,5% e os piores os de NT 1%.

#### 4.1.2. 16 J de energia de impacto

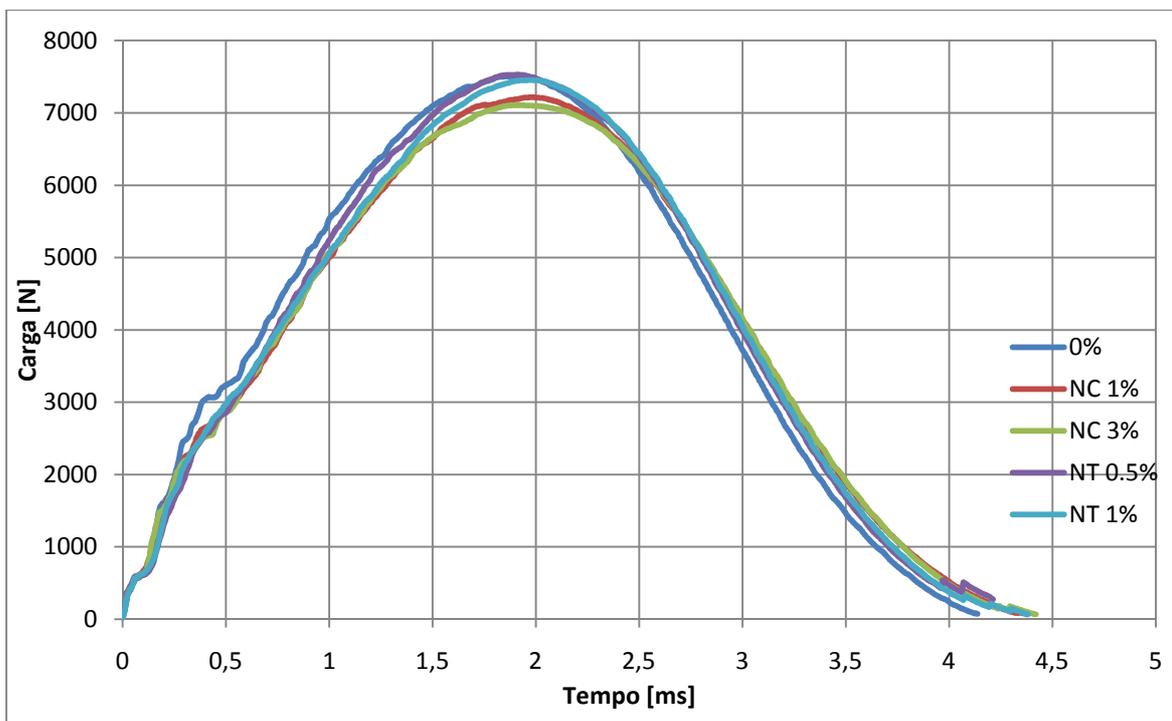
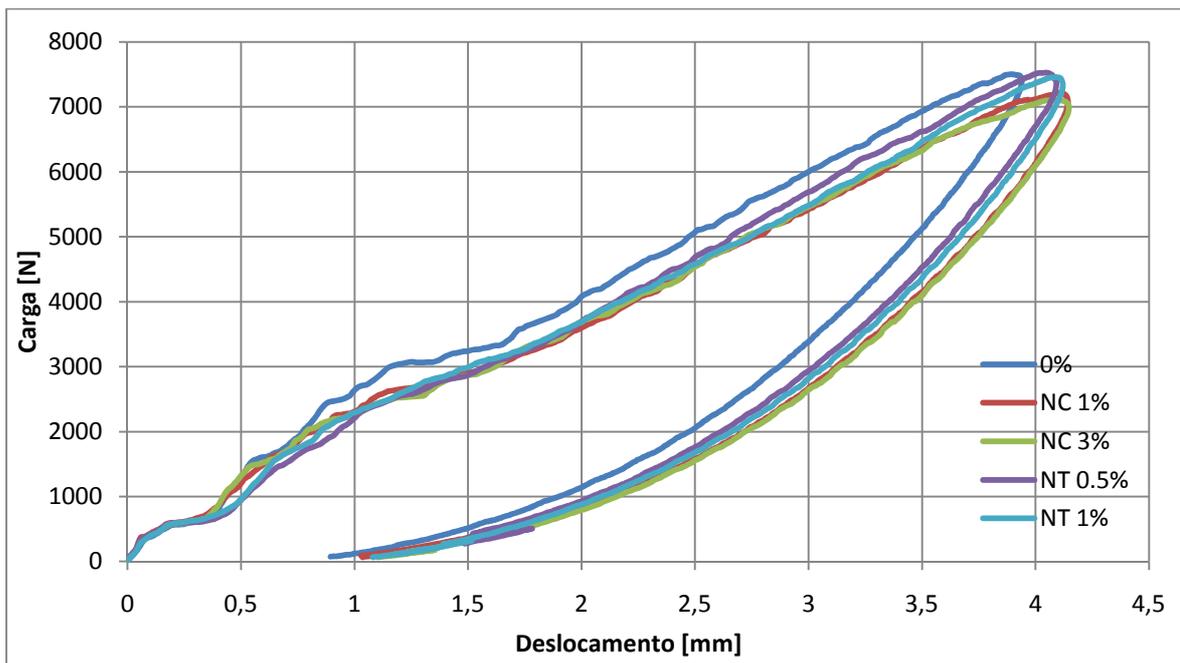


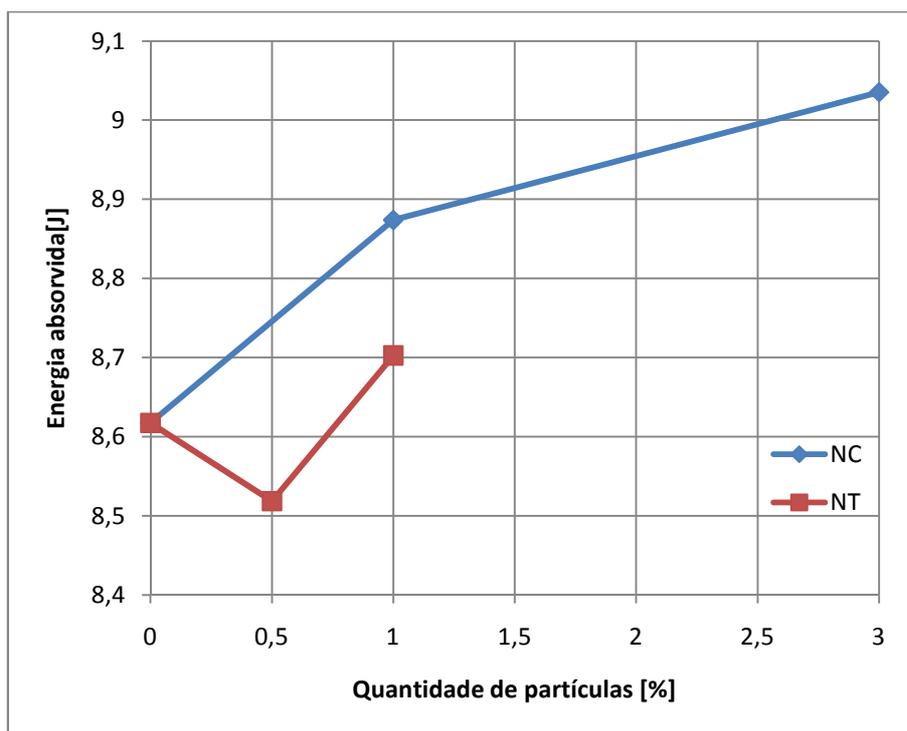
Figura 4.5. Gráfico da evolução dos valores médios da carga em função do tempo para 16 J de energia.

Passando agora a discutir os resultados dos ensaios para 16J de energia de impacto na fig. 4.5 representam-se as curvas médias de carga em função do tempo. Neste gráfico destacam-se dois grupos, o primeiro que é constituído pelos valores médios das placas reforçadas com: NT 1%, 0,5% e 0% com valores a rondar os 7500N e o segundo, constituído pelas placas reforçadas com NC 1% e NC 3% com valores próximos de 7150N. Isto mostra que, esquecendo por momentos as espessuras das placas, as que constituem os provetes do primeiro grupo são mais rígidas que as do segundo grupo.



**Figura 4.6.** Gráfico da evolução dos valores médios da carga em função do deslocamento para 16 J de energia.

Na fig. 4.6 representa-se a carga em função da deformação. Neste caso observa-se que existem três grupos ao invés de dois como acontecia no anterior. O grupo mais rígido, constituído pelos valores médios das placas sem qualquer reforço, com 3,8 mm de deformação máxima e uma força necessária de 7500 N; o segundo grupo constituído pela média dos valores dos provetes reforçados com NT 1% e 0,5% com valores que se aproximam dos 4,1 mm e dos 7500 N de força e, por fim, o terceiro grupo e o menos rígido, com um deslocamento máximo de 4,2 mm e uma força máxima de pouco mais de 7000 N, constituído pelos provetes reforçados com NC 1% e 3%. Este gráfico permite confrontar os valores com o gráfico anterior e permite tirar como conclusão que o único motivo para existirem três grupos neste último gráfico é somente a separação dos valores médios das placas sem reforço por motivos de menor deformação. De resto, o valor da força correspondente a estas placas é o mesmo do valor da força correspondente às placas reforçadas com os nanotubos (que pertenciam ao mesmo grupo no primeiro gráfico).

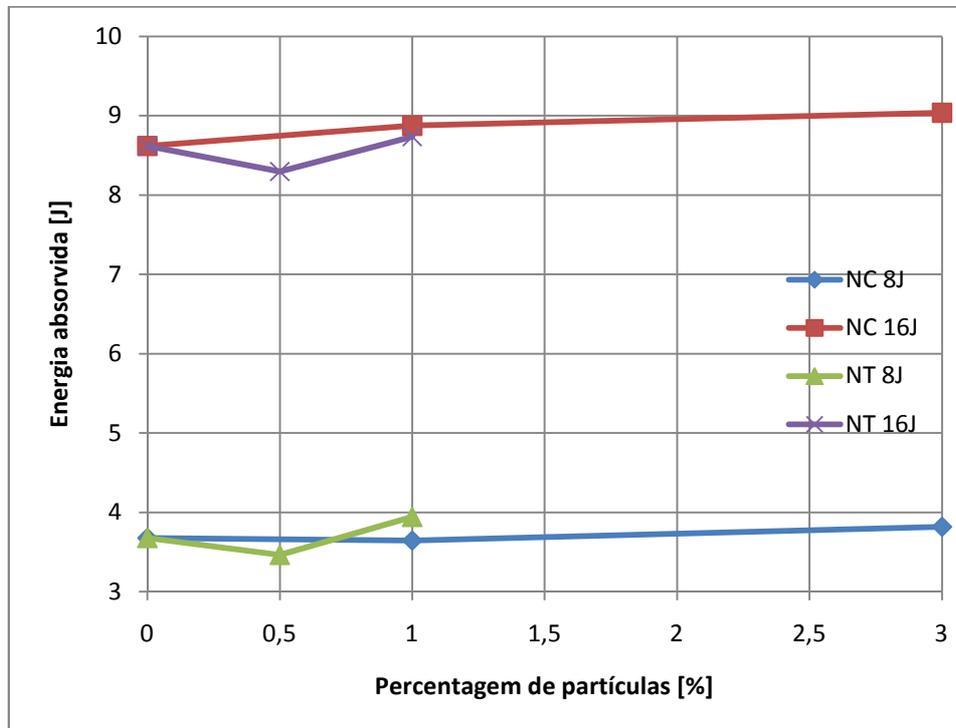


**Figura 4.7.** Gráfico com os valores médios da energia absorvida para os diferentes tipos e quantidades de reforço nanométrico para 16 J de energia.

Por fim, fazendo uma análise aos valores da energia absorvida (fig. 4.7), logo se percebe que os provetes que sofreram mais com o impacto foram os reforçados com NC 3% e os que melhor resistiram foram os reforçados com NT 0,5%. Os restantes ficaram-se com *performances* intermédias. O que interessa destacar é mesmo o resultado médio dos provetes com NT 0,5% que mais uma vez provaram ser melhores que os restantes.

Conclusivamente tira-se que novamente o melhor reforço é NT 0,5% e o reforço com pior desempenho é NC 3%.

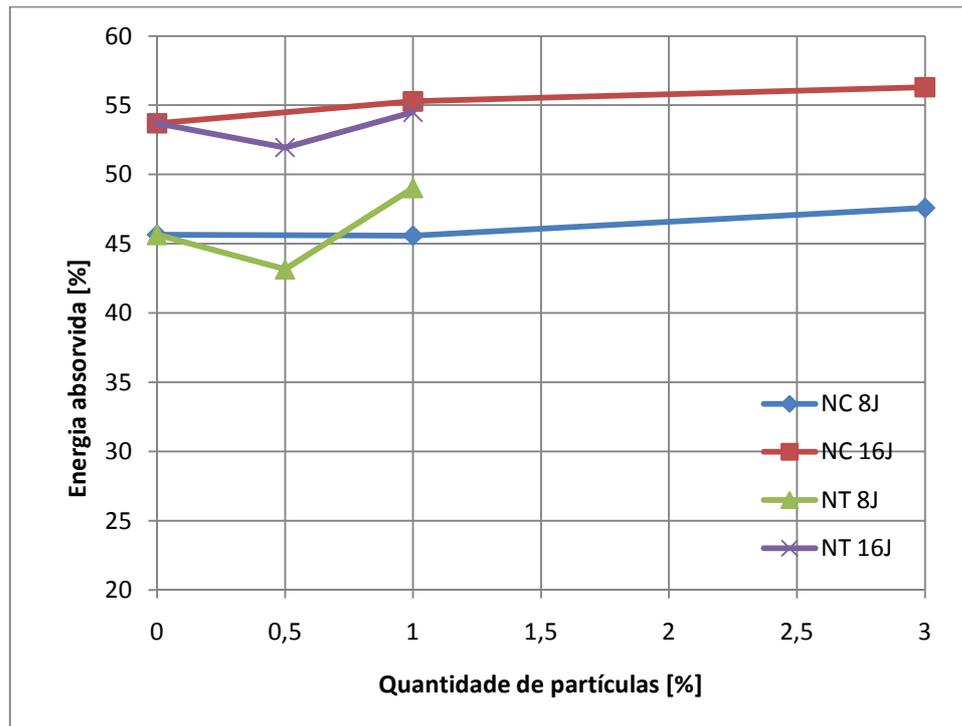
### 4.1.3. Comparação entre 8 J e 16 J de energia de impacto



**Figura 4.8.** Gráfico comparativo com os valores médios da energia absorvida para os diferentes tipos e quantidades de reforço nanométrico para 8 e 16 J de energia.

Faz-se agora uma retrospectiva e analisam-se os resultados correspondentes aos ensaios de 8J e comparando-os com os resultados obtidos com os impactos de 16J (fig. 4.8). As placas que melhor se comportaram ao impacto, para já e nas duas gamas de energia, são as que são reforçadas com NT 0,5% indiscutivelmente. Para 8J de energia, as placas com NC comportaram-se de forma muito semelhante entre si e entre si e as placas sem reforço, com resultados de energia absorvida muito semelhantes. O mesmo já não acontece para os 16 J de energia de impacto, percebendo-se bastante bem que embora as placas com NC 1% e 3% sejam semelhantes (9 J absorvidos), são piores que as placas sem qualquer reforço (8,7 J), sendo que as discrepâncias de energia já são mais visíveis. Mais uma vez, as placas com NT 0,5% absorveram a menor quantidade de energia (8,3 J) mantendo a sua posição relativa na passagem de 8 J de energia de impacto para 16 J (a maior diferença notou-se nas placas com NC). Isto leva a crer que as placas com NT “conservem” o seu comportamento melhor com o aumento de energia, mostrando mais tolerância ao dano; são mais imunes às variações de energia a que são solicitadas e não tão

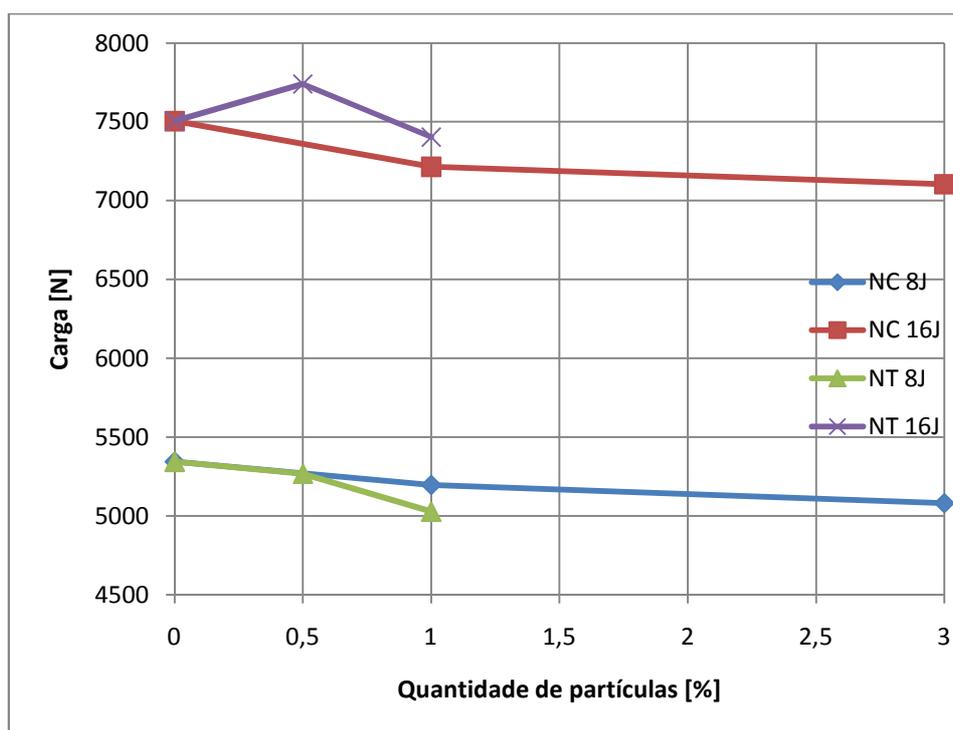
reactivas como as placas reforçadas com NC. Uma curiosidade a relevar contudo, é a diferença de comportamento relativo entre as placas com 1% de cada reforço, para cada uma das energias: enquanto com 8 J de impacto as placas reforçadas com NT 1% tenham absorvido mais energia que as placas com NC 1%, para 16J a situação inverteu-se e, quando muito, absorveram sensivelmente a mesma energia. Se se observar com atenção, esta divergência de comportamentos deve-se essencialmente ao comportamento alterado que as placas com NC 1% tiveram na passagem de 8J de energia para 16J, em que na primeira situação absorveram aproximadamente a mesma energia que as restantes com 3% e 0% enquanto com 16J já absorveram mais energia, passando para cima das placas reforçadas com NT 1%. O comportamento destas placas pode comprometer os resultados para energias maiores ou seja, quanto maior for a energia a que são sujeitas, mais danificadas ficam, e não de uma forma linear mas exponencial de alguma forma, o que dificulta a compreensão do seu comportamento. De facto existe a ideia que a forma da linha traçada pelos pontos de energia das placas de NT tanto para 8 J como para 16 J de energia de impacto é exactamente a mesma somente deslocada 6 J de energia para cima. O mesmo já não se pode dizer que acontece com as linhas das placas com NC. Como quando se pretende projectar um componente de um material, pretende-se que este tenha um comportamento previsível, até agora, as placas reforçadas com NC não dão a confiança necessária. Há que distinguir contudo, este comportamento descrito atrás com o comportamento generalizado das placas. Acontece que com o aumento da energia a recuperação elástica diminui.



**Figura 4.9.** Gráfico comparativo com os valores médios da absorvida para os diferentes tipos e quantidades de reforço nanométrico para 8 e 16 J de energia.

Assim, na fig. 4.9 onde é mostrada a energia absorvida em porcentagem pode-se observar que as placas que foram sujeitas a 8 J de energia de impacto absorveram cerca de 45% da energia de impacto enquanto as placas sujeitas a 16 J absorveram uma energia de 54%. Isto quer simplesmente dizer que o dano aumenta nas placas com o aumento de energia de impacto, mas a forma descrita pelas linhas que unem os pontos de energia continuam inalteradas porque as proporções de dano à partida se mantêm.

Tem-se assim que as placas que mostraram um melhor comportamento foram as reforçadas com NT 0,5% e as com pior as reforçadas com NC 3%.



**Figura 4.10.** Gráfico comparativo com os valores médios da carga máxima para os diferentes tipos e quantidades de reforço nanométrico para 8 e 16 J de energia.

Quando se faz uma análise da carga máxima em função da quantidade e tipo de partículas de reforço (fig. 4.10), percebem-se resultados um tanto diferentes dos resultados de energia discutidos anteriormente. A principal diferença está nas placas reforçadas com 0,5% de nanotubos de carbono que, com 8J de energia de impacto sofrem uma força máxima que se aproxima do alinhamento da força máxima sofrida pelas placas reforçadas com NC. O mesmo já não acontece para 16 J de energia de impacto em que as placas com reforço de NT 0,5% sofrem uma força máxima de impacto bastante superior a todas as outras placas. A par com este movimento relativo das placas com NT, também as placas sem reforço alteraram o seu comportamento, sofrendo mais força de impacto. Com esta análise do gráfico consegue-se perceber que à medida que a energia de impacto aumenta a rigidez das placas com reforço de NT é mais proeminente ao contrário do que acontece com as placas reforçadas com NC que vêm os seus valores de carga sempre abaixo dos restantes.

Desta vez, embora as placas com NT 0,5% tenham apresentado o melhor comportamento e as com NC 3%, como anteriormente, o pior, as reforçadas com NT 0,5%

apresentaram também uma alteração no seu comportamento de 8 J para 16 J de impacto tornando-as assim pouco previsíveis para energias diferentes das ensaiadas.

Pela observação das fig. 4.2 e 4.6 conclui-se, atendendo à relação carga/deslocamento que se o objectivo de uma peça for conseguir deformar-se sem que a força seja muito elevada para minimizar os danos das restantes peças (exemplo da estrutura de deformação frontal num automóvel), talvez o material indicado para isso seja a fibra de vidro em matriz epóxi com reforço nanométrico de NC 3%. Se por outro lado o que se pretende é uma placa/peça que consiga suportar grandes impactos com o mínimo de deformação (não necessariamente de dano), o que as figuras mostram é que as placas com mais força de impacto e menor deformação são as melhores, que são portanto as reforçadas com NT 0,5% ou sem reforço, embora o motivo destas (0% de reforço) estejam neste pódio esteja directamente ligado com a espessura das placas, o que será abordado mais à frente. As restantes placas têm resultados intermédios e sem diferenças significantes o suficiente que mereçam destaque.

Da análise anterior resulta que as placas que melhor resistem ao impacto são as reforçadas com NT 0,5% e logo a seguir as que não têm qualquer reforço. Contudo, esta conclusão pode ser precipitada já que a carga máxima e a deformação máxima estão directamente ligadas com a espessura das placas, bem como a energia absorvida o que leva à necessidade de uma análise mais aprofundada sobre esta questão. As placas com "pior" *performance* voltam a ser as reforçadas com NC 3%.

Um bom critério de análise da resistência das placas ao impacto será a rigidez destas. É claro que uma placa que tem maior rigidez (N/mm) é uma placa à qual a energia de impacto não criou tanto deslocamento/deformação na placa, como se a placa sofresse menos perturbações com aquela quantidade de energia do que uma placa menos rígida, que se deforma muito. Contudo, a rigidez não é um critério de análise isolado já que mostra simplesmente a relação entre a força e o deslocamento, não mostra por exemplo o dano que aquela cria na placa. Uma placa pouco rígida até pode ter pouco dano de impacto uma vez que a energia de impacto foi dissipada na deformação elástica (tem de ser elástica) da placa e não em criar-lhe dano. Por outro lado, não se sabe se uma placa não é tão rígida como outra porque já o era antes de impacto por motivos como baixa espessura ou comportamento inerente ao compósito ou porque de facto o impacto que sofreu lhe causou um dano que a levou a deformar mais. Exemplo disto é o dano de perfuração total ou

parcial em que a ponta do impactor desce abaixo do nível da superfície de impacto da placa, o que dá a ideia que a placa se deformou toda a medida máxima indicada no *RawData* quando na verdade parte foi o próprio impactor a indenta-la. O dano, ou a sua quantidade melhor dizendo, pode ser verificado pela recuperação elástica da placa (ou a falta dela). Pode ser medido manualmente através de *C-scan* ou opticamente e depois retiradas conclusões acerca de qual placa foi mais danificada. Tudo isto será feito gradualmente até que depois, de todos os parâmetros analisados, se retire uma conclusão.

Em primeiro lugar far-se-á a análise da rigidez das placas já que este parâmetro é importante (mas não determinante) *de per si*, mas também servirá como termo de comparação com outros parâmetros. Assim, de forma a não comparar todas as placas, comparar-se-ão as placas reforçadas com NT 0,5% e sem reforço já que até agora são as que melhores resultados apresentaram. Isto não invalida que, caso se justifique, se aborde outros reforços a dada altura. Então (veja-se na tabela 0.1 dos Anexos), para 8 J de energia de impacto, as placas com mais rigidez (k) são as que não possuem reforço, com uma rigidez média de 1948,86 N/mm contra 1834,53 N/mm das placas reforçadas com NT 0,5%. Como uma das dúvidas acerca da origem da rigidez elevada das placas sem reforço estava precisamente na sua espessura elevada, depois de adimensionalizar a rigidez em função da espessura, obtém-se que a  $k/esp.$  [N/mm<sup>2</sup>] das placas sem reforço é de 443,10 N/mm<sup>2</sup> e a rigidez específica das placas com NT 0,5% é de 464,33 N/mm<sup>2</sup>. Desta forma a situação inverte-se de forma drástica deixando claro que, sem contar com mais factores, o reforço de NT 0,5% torna as placas bastante mais rígidas. Isto para não contar com o facto de as placas sem reforço serem mais espessas, o que limita a perfuração destas pelo impactor. Assim, a perfuração parcial ou indentação na placa pelo impactor é maior nas placas mais finas, de NT 0,5% o que leva a concluir que mesmo com indentação, as placas de NT 0,5% conseguem ter menos deslocamento que as suas rivais nesta análise.

A análise óptica e através de *C-scan* do dano será feita num capítulo mais à frente por uma questão de organização mas a discussão que está a decorrer nestes parágrafos será retomada nessa altura, com nova análise. Para já resta analisar o que sobra do que se retira do sistema de aquisição de dados da torre de impacto CEAST. Assim, falta olhar para a energia de recuperação elástica dos provetes, mais concretamente a energia elástica específica ou energia elástica/espessura. Desta forma, para o caso de 8 J de impacto ainda e para os provetes sem reforço, estes têm uma  $E. elást./esp.$  que ronda os 0,998 J/mm

---

enquanto o mesmo parâmetro para NT 0,5% assume o valor de 1,155 J/mm. Quanto maior o valor melhor, e o maior valor pertence, mais uma vez, aos provetes reforçados com NT 0,5%. Existe entre eles (0% e NT 0,5%) uma diferença de 13,6%. Já na rigidez específica existe entre estes dois tipos de provetes uma diferença de 4,57%. Isto mostra que no factor que tem maior interesse (energia elástica espec.) a diferença é mais acentuada de forma que não pode ser ignorada. Uma diferença de 14% é suficientemente grande para que praticamente não restem dúvidas na escolha do material a usar numa situação de impacto; é uma diferença suficientemente grande para se sobrepor a muitos outros factores de escolha, muitas vezes até do preço da peça que vai ser fabricada.

Na situação de impacto com 16 J de energia e passando logo para a avaliação da rigidez específica, tem-se que as placas com 0% de reforço têm um valor de 437,51 N/mm<sup>2</sup> enquanto as placas com NT 0,5% têm um valor de 473,21 N/mm<sup>2</sup>. Isto dá uma diferença de 7,55%. No tocante à energia elástica/recuperada tem-se o valor de 1,71 J/mm para as placas sem reforço algum e o valor de 1,88 J/mm para as placas com reforço de NT 0,5%. Isto dá uma diferença em percentagem de 9,05%. Sem dúvida que estes valores estão mais próximos um do outro que na situação anterior, para 8 J de energia de impacto. Para se ter uma ideia porquê, tem de se olhar para os valores de rigidez absolutos. Assim, enquanto antes a rigidez média das placas sem reforço era de 1948,86 N/mm e a das placas com reforço de NT 0,5% era de 1834,53 N/mm, o que dava uma diferença de 5,87%; agora, com o valor de 1906,40 N/mm para as placas sem reforço e o valor de 1936,10 N/mm, a diferença fica com o valor de 1,53%, o que é 3,8 vezes inferior. Assim, a discrepância entre os valores específicos estudados para os impactos com 16J é obrigatoriamente menor, simplesmente porque as placas ensaiadas com 16J de impacto tinham espessuras semelhantes. No entanto, embora a diferença relativa de valores seja menor que no caso anterior, as diferenças entre os valores de energia elástica das placas reforçadas com NT 0,5% e de energia elástica das placas sem reforço são menores que no caso anterior, ao contrário do que era evidenciado nos gráficos da energia de recuperação elástica. Nessa altura, os provetes com 0,5% de NT eram melhores que os restantes durante os impactos com 8 J mas sobressaíam ainda mais durante os impactos de 16 J. Nesta análise com valores específicos, para 16J, o reforço de NT 0,5% destaca-se menos perante as placas sem reforço.

Seria interessante verificar para mais energia de impacto o que sucede com o comportamento relativo das placas reforçadas com NT 0,5%; se continua a decrescer a diferença de energia elástica entre aquelas e as placas sem reforço, se permanece igual ou se por outro lado, aumenta. Para isso seriam necessários três gamas de energias para ensaiar as placas e neste trabalho foram usadas somente duas, o que impede uma conclusão sólida devida à exclusão (ou não) de um dos três resultados que não obedeça à mesma tendência dos restantes dois. Com duas gamas de energia o grau de certeza acerca da tendência/comportamento é menor.

Conclui-se então que para a análise feita, mais uma vez as placas com NT 0,5% são as que tiveram melhores resultados mas que por outro lado, as placas sem reforço algum apresentaram um comportamento mais previsível à medida que o reforço de NT 0,5% suscitou por vezes um comportamento alterado conforme a quantidade de energia aplicada.

## 4.2. Áreas de dano

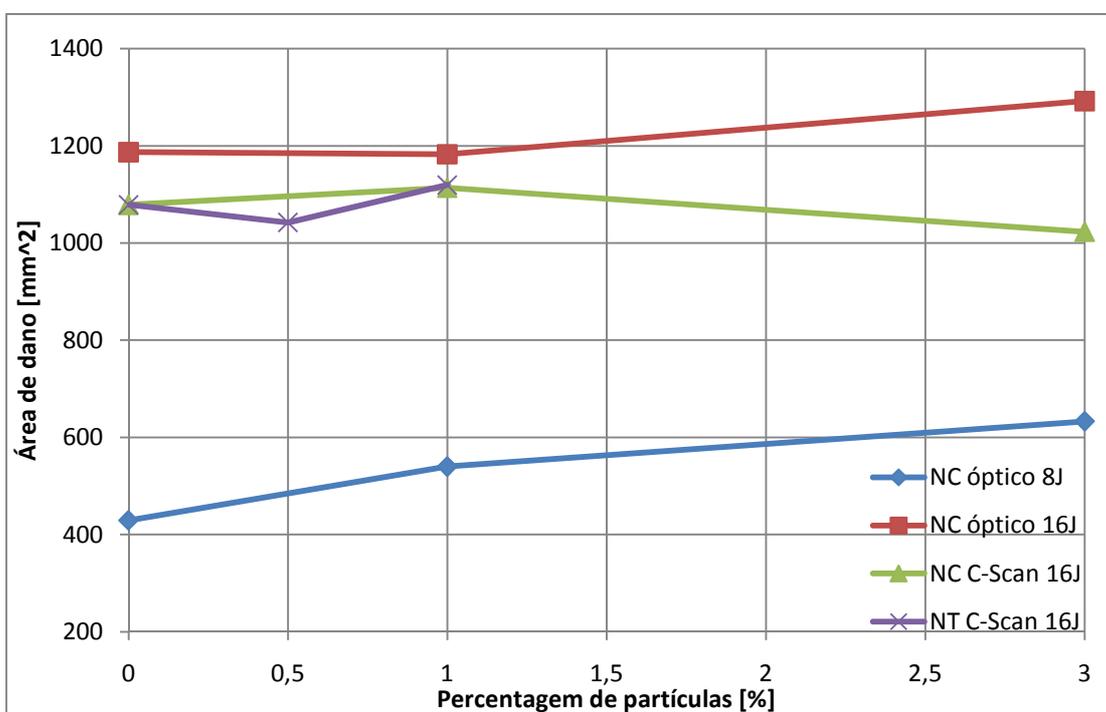


Figura 4.11. Gráfico com os valores médios da área de dano lida opticamente e em C-scan para os diferentes tipos e quantidades de reforço nanométrico para 8 e 16 J de energia.

Depois de todas as áreas confrontadas no mesmo ficheiro de Excel conclui-se que as placas que ficaram mais danificadas foram todas as que sofreram impactos de 16 J naturalmente e entre estas, as que mais área de dano possuem são as reforçadas com NC 3% e através de leitura óptica (fig. 4.11). A seguir a estas são as placas sem reforço com leitura óptica e por fim as reforçadas com NC 1% através de leitura óptica também. Contradição existe quando se comparam estes resultados de leitura óptica com os resultados obtidos através de *C-scan* que dão uma área de dano menor para precisamente o mesmo reforço nas mesmas placas. Além do mais, se de entre as placas reforçadas com NC, a que tem maior defeito com leitura óptica é a reforçada com 3%, esta é a que tem menor defeito segundo o varrimento por *C-scan*. Aparentemente a razão por detrás desta diferença de áreas tem a ver com fenómenos de luz (na leitura óptica) e directamente relacionado com a marcação dos pontos pelos quais passam as *splines*. Os pontos marcados através da leitura óptica foram menos que os pontos usados para marcar as *splines* no varrimento por *C-scan*. Assim, na leitura óptica o traçado dos pontos permite às *splines* passar na maior parte das vezes pelo lado de fora do limiar do defeito, aumentando a área final do defeito. Nas imagens dos *C-scan*, por outro lado, com uma quantidade de pontos superior consegue-se, ao mesmo tempo que uma área menor, uma área mais precisa. No entanto, se se olhar para o gráfico das áreas de dano, percebe-se que à medida que as percentagens de reforço de NC aumentam, aumenta a área de dano, à excepção da leitura feita por *C-scan* em que diminui. Precisamente a imagem que representa o dano em questão (fig. 0.5 (c)) levanta a ideia que a sensibilidade do *C-scan* estava muito baixa, levando a um contorno muito definido quando na realidade a área danificada é um pouco maior devido ao efeito de projecção radial de “braços” ou enraizamento do defeito, o que torna a área maior. Visto isto, opta-se por se considerar os resultados ópticos os mais correctos, até porque são os que têm maior coerência entre eles, fornecendo áreas relativamente mais consistentes. Com isto não se quer dizer que os resultados de *C-scan* serão ignorados, muito antes pelo contrário, são necessários para a avaliação de dano nas placas com NT.

Mais uma vez o reforço de NT 0,5% prova ser superior, ou melhor, confirma o que atrás foi concluído com parâmetros diferentes, que é o reforço que mais impede o dano nas placas de resina epóxi reforçadas com fibra de vidro. Uma outra conclusão é que aparentemente para 8 J de energia de impacto o dano nas placas com NC 1% é maior que

nas placas sem reforço enquanto para 16 J a área de dano é muito semelhante. A inclinação da linha que une os pontos de NC 1% e 3% é a mesma para 8 J e 16 J de energia de impacto. Isto mostra que uma placa sem reforço impactada sofre, sem ser de forma linear, mais dano para maior energia do que uma placa com reforço de NC.

Confrontando estes resultados com os resultados obtidos antes através do estudo dos dados de impacto, novamente se confirma que o melhor reforço é o de NT 0,5% e o pior permanece o reforço de NC 3%.

### 4.3. Resistência residual

#### 4.3.1. Resistência residual nas placas com NC

Antes de mais apresenta-se a tabela 4.2 onde é mostrado um resumo dos valores de resistência residual das placas testadas de forma a consulta auxiliar dos gráficos que se seguem.

**Tabela 4.2.** Dados da resistência residual das placas ensaiadas.

Valores de Resistência residual [Mpa]							
Material	Sem impacto		E.I. = 8 J		E.I. = 16 J		
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	
0%	332,54	21,59	282,49	6,73	243,73	6,73	
NC 1%	286,33	17,59	271,75	12,24	271,75	0,02	
NC 3%	255,34	15,53	270,24	3,75	226,99	5,24	
NT 0,5%	336,56	11,00	307,98	5,54	241,62	3,36	
NT 1%	299,80	14,69	256,37	22,24	248,62	23,01	

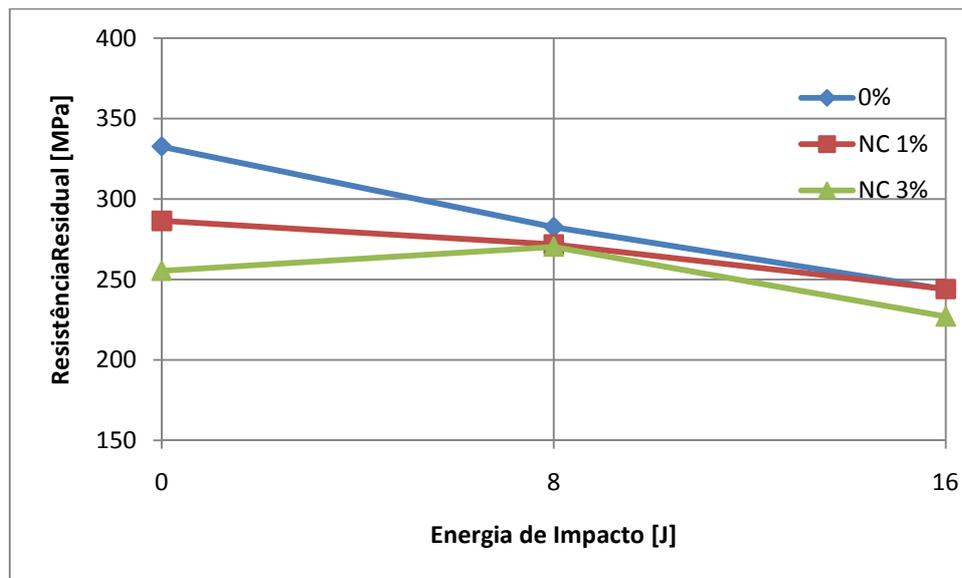


Figura 4.12. Gráfico com os valores médios da resistência residual para as diferentes quantidades de reforço de *nanoclays* para 0, 8 e 16 J de energia.

Na fig. 4.12 representa-se a média do valor da resistência residual em função da energia de impacto e da percentagem de *nanoclays*. Assim, para 0% de reforço, as placas ordenam-se da mais resistente para a menos resistente da seguinte forma (veja-se a tabela 4.2 para auxílio): sem reforço, com 332,54 MPa de tensão máxima; 1 % de reforço, com 286,33 MPa de tensão à rotura e por fim, com 3% de reforço, com 255,34 MPa de tensão. Referente a este subcapítulo, consulte-se a tabela 0.9 dos Anexos. Embora as placas restantes tenham uma resistência residual inferior (a máxima é de 282,48 MPa para 8 J de impacto), a ordem mantém-se de grosso modo, sendo que as placas que têm melhor desempenho (menor dano) são as que não têm reforço. Todavia, isto não quer dizer que sejam estas que têm a melhor tolerância ao dano. Na verdade são que menos toleram o dano já que para a área de dano das placas sem reforço (vejam-se as tabelas 0.2, 0.3 e 0.4 dos Anexos) é a menor das áreas para a série impactada com 8 J e, no entanto, no gráfico da resistência residual a sua tensão para 8 J está muito próxima das outras o que quer dizer que se tivesse a mesma área de dano provavelmente teria menos resistência residual. Este é um bom exemplo da distinção entre resistência ao dano e tolerância ao dano. Embora estas placas até tenham alguma resistência ao dano, a sua tolerância àquele é baixa.

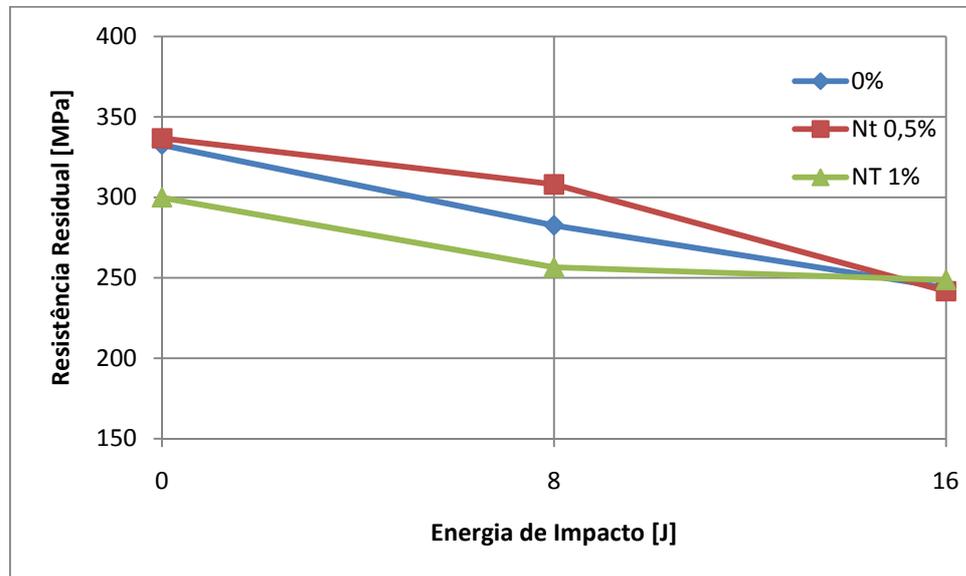
Para 16 J de energia de impacto, o comportamento é um pouco diferente, havendo agora coincidência entre as placas reforçadas com 1% de *nanoclays* e as placas sem reforço, ficando as reforçadas com 3% de NC abaixo das duas anteriores. Se se observar

novamente o gráfico que mostra a área de dano por percentagem de nanoreforço (fig. 4.11), relativamente à linha traçada pelos valores de dano obtidos opticamente das placas reforçadas com *nanoclays*, percebe-se que as placas mais danificadas são as reforçadas com 3%. Assim, e passando para o gráfico da resistência residual (fig. 4.12), percebe-se a causa de serem estas as que têm menor valor. De resto, as placas com 0% de reforço e com 1% têm danos idênticos e tensões residuais idênticas também (ver tabelas 0.5 e 0.6). Isto leva a crer que para 16 J de energia de impacto não interessa tanto a tolerância ao dano de um dado material mas sim efectivamente o dano que possui (resistência, portanto). Em parte isto deve-se à diminuição das características intrínsecas ao material (associado à tolerância de dano à tracção) perante um dano grande o suficiente para que seja mais intenso o carregamento nas fibras e não tanto na ligação fibra-matriz ou na matriz já que esta foi alvo de delaminações e possivelmente fissuras até. Como as fibras são comuns a todas as placas, independentemente da energia, o comportamento das primeiras é evidenciado para 16J, o que torna os resultados mais coerentes com a área de dano.

Para concluir e em suma, independentemente da origem do comportamento das placas, todas elas vêm a sua tensão residual decrescer à medida que aumenta a energia de impacto à excepção dos provetes reforçados com 3% de *nanoclays* que têm um valor de resistência residual superior com impacto, relativamente ao provete não impactado, o que não faz sentido (um impacto não melhora as propriedades de um material). Contudo, o valor que à partida está errado é o primeiro, para o provete não impactado. Algo semelhante sucedeu com os provetes de nanotubos de carbono em que depois de repetidos os ensaios para um provete sem dano, os valores de tensão subiram para o esperado. Além do mais, o paralelismo observado nas linhas descritas pela união dos pontos de tensão residual para 8 e 16 J dos três provetes revela uma linearidade que não existe para os valores dos provetes com NC 3% sem impacto.

Atendendo a que os provetes sem reforço são os que menos toleram o defeito e os que têm reforço de 1% têm resultados mais sólidos e pouco abaixo dos primeiros, a opção de escolha entre os três tipos recairia para os provetes com NC 1%.

### 4.3.2. Resistência residual nas placas com NT



**Figura 4.13.** Gráfico com os valores médios da resistência residual para as diferentes quantidades de reforço de nanotubos para 0, 8 e 16 J de energia.

No caso das placas reforçadas com nanotubos de carbono, o gráfico (fig. 4.13) tem um aspecto em parte invertido relativamente ao anterior. Enquanto na fig. 4.12, para 0 J de impacto (provetes sem impacto) os valores estavam afastados, para 8 J estavam relativamente juntos e para 16 J mantinham esse afastamento, neste gráfico o paralelismo das linhas ocorre no início sendo que convergem para o mesmo valor no fim (ao invés de se afastarem, como seria de esperar se fosse absolutamente o inverso). Destaque em primeiro lugar para a linha das placas sem reforço, igual ao gráfico anterior. Acima dela situa-se a linha composta pelos pontos das placas com NT 0,5% e abaixo (com uma pequena troca no final) a linha de NT 1%. Sem qualquer esforço tira-se que os melhores resultados de tensão residual quer de entre as placas reforçadas com nanotubos quer entre todas, são obtidos pelas placas com reforço de NT 0,5%. Entre as placas reforçadas com NT 1% e as reforçadas com NC 3%, embora com concavidades opostas, os seus valores são relativamente próximos e são os mais baixos de todos (NC3% é o mais baixo). Seriam portanto, as últimas escolhas. No entanto o gráfico dá a ideia que se existisse mais uma "oportunidade" das placas de NT 1% provarem o seu valor, com uma energia de impacto superior, mais 8 J por exemplo, o resultado à partida seria o inverso dos resultados das placas com NT 1% e NT 0,5% para 8 J. Contudo, isto é uma mera especulação sem valor

factual mas levanta algumas dúvidas em termos da eficácia das placas com NT 0,5% para energias maiores que 16 J. Na verdade as placas com NT 1% são um pouco melhores para um impacto de 16 J que as com NT 0,5% mas para todas as energias menores são inferiores.

Em termos de comportamento relativo, sabe-se que as placas reforçadas com NT 1% são tão tolerantes (ou resistentes) ao dano para 16 J como as placas com NC 1% ou ainda como as placas sem reforço; isto porque o valor de resistência residual é o mesmo e a área de dano também (vejam-se as tabelas 0.5 e 0.6 dos Anexos). Mais uma vez, aparentemente para 16 J de energia de impacto as propriedades da matriz e dos nanoreforços pouca diferença fazem. Por outro lado, para esta energia de impacto as placas reforçadas com NT 0,5% apresentam uma área (tabela 0.8 dos Anexos) visivelmente menor e uma tensão um pouco menor. Isto mostra que estas, além de menos resistentes ao dano resultante de 16 J de energia, são menos tolerantes. Com isto, as placas com NT 0,5% têm provado ser as melhores ao longo dos vários ensaios mas quando menos se espera apresentam resultados que, se forem analisados com alguma atenção, deixam algum receio em relação à existência de facto de um comportamento linear, previsível e de confiança, o que torna difícil a escolha do melhor material como reforço. Se se pretende linearidade ou segurança na previsão de resultados, com uma opção mais segura e confiável, neste teste a melhor escolha recai nas placas sem reforço. Por outro lado, as reforçadas com NC 3% devem ser a última opção desta panóplia.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos parâmetros analisados neste trabalho é difícil perceber qual é o melhor reforço nanométrico para este compósito laminado. Se por um lado o reforço de NT 0,5% teve um papel principal na maior parte dos ensaios, também mostrou ter um comportamento instável conforme o tipo ou intensidade da solicitação em algumas situações. Em contrapartida, o reforço com NC 1% ou as placas sem reforço provaram ter um comportamento mais expectável em alguns casos, embora geralmente não tivessem os melhores resultados à partida.

Provavelmente o melhor reforço nanométrico para os compósitos de matriz epóxi e reforço de fibra de vidro são os nanotubos de carbono com 0,5% de quantidade em peso, sendo em suma o que proporciona os melhores resultados.

Os reforços a evitar são os de *nanoclays*, por terem resultados pouco lineares (NC 1%) ou por terem resultados indubitavelmente maus (NC 3%).

Se se quiser jogar pelo seguro então a opção mais sensata será o uso do compósito sem qualquer reforço nanométrico. Além do mais, esta opção tem um custo muito mais reduzido.

Como sugestão para trabalhos futuros fica a ideia de que o modelo deste trabalho podia ou pode ser mais aperfeiçoado ao se utilizarem mais gamas de energia (pelo menos mais uma - 24J, p. ex.) e mais quantidades de reforços de nanopartículas. Pode-se por exemplo usar para nanotubos quantidades de 0,3; 0,5; 0,7 e 1% e para *nanoclays* 0,5; 1; 1,5; 2 e 2,5%. 3% deste reforço é claramente demasiado. Desta forma conseguiam-se resultados mais concretos acerca das quantidades ideais bem como se teria uma ideia do comportamento destes para além dos 16J estudados.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rosselli F, Santare MH. (1997), “Comparison of the short beam shear (SBS) and interlaminar shear device (ISD) tests”. *Compos Pt A: Applied Science and Manufacture*, 28(6), 587–594.
- [2] Liu T, Lim KP, Tjiu WC, Pramoda KP, Chen Z-K. (2003), “Preparation and characterization of nylon 11/organoclay nanocomposites”, *Polymer*; 44(27), 3529–35.
- [3] Allaoui A, Bai S, Cheng HM, Bai JB. (2002), “Mechanical and electrical properties of a MWNT/epoxy composite”, *Matrix*, 62, 1993–8.
- [4] Montazeri A, Khavandi A, Javadpour J, Tcharkhtchi A. (2010), “Viscoelastic properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites using two different curing cycles”, *Materials and Design*, 31, 3383–8.
- [5] Lau K-tak, Hui D. (2002), “Effectiveness of using carbon nanotubes as nanoreinforcements for advanced composite structures”, *Mechanical Engineering*, 40, 1605–6.
- [6] Fan. Z., Santari M.H., Advani S.G., (2008), "Interlaminar shear strength of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with multi-walled carbon nanotubes", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39, 540–554.
- [7] Luo RK, Green ER, Morrison CJ. (1999), “Impact damage analysis of composite plates”, *International Journal of Impact Engineering*, 22(5), 435–47.
- [8] Berthelot J. M., (1992), “Matériaux Composites, Comportement mécanique et analyse des structures”, 4<sup>a</sup> Ed., Springer, New York, 5-6.
- [9] Matthews, F.L. & Rawlings, R.D. (1999), “Composite Materials: Engineering and Science”, Woodhead Publishig, Cambridge, 1-15.
- [10] Deborah D. L. Chung (1994), “Carbon Fiber Composites”, Butterworth-Heinemann, Newton, 1-4.
- [11] U.S. Environmental Protection Agency (2010), “BCES: Module 3 -Characteristics of Particles”, Acedido em: sexta-feira, 29 de Janeiro de 2010: <http://www.epa.gov/apti/bces/module3/category/category.htm>

- [12] Buffat, Ph.; Borel, J.-P. (1976), "Size effect on the melting temperature of gold particles". *Physical Review A*, 13 (6), 2287.
- [13] Hinestroza, Juan P. (2011), "Welcome to the Textiles Nanotechnology Laboratory", Acedido em: 2011: <http://nanotextiles.human.cornell.edu/>
- [14] Anthony, John W.; Bideaux, Richard A.; Bladh, Kenneth W. and Nichols, Monte C. (2011), "Montmorillonite" *Handbook of Mineralogy. II (Silica, Silicates)*, Chantilly, US: Mineralogical Society of America, Acedido em: 5 de Dezembro de 2011: [rruff.geo.arizona.edu/doclib/hom/montmorillonite.pdf](http://rruff.geo.arizona.edu/doclib/hom/montmorillonite.pdf)
- [15] S.B. Hendricks, J. Phys. (1941), "Base Exchange of the Clay Mineral Montmorillonite for Organic Cations and its Dependence upon Adsorption due to van der Waals Forces", *Chem.*, 45, 65-81.
- [16] Utracki LA. (2004), "Clay-containing polymeric nanocomposites". *Smithers Rapra Technology*, Shawbury UK, 1, 1.
- [17] J. Njuguna, K. Pielichowski, (2003), "Advanced Engineering Materials", 5, 769.
- [18] Koo JH, Pilato LA. (2005), "Polymer nanostructured materials for high temperature applications", *Sampe Journal*, 41(2), 7–19.
- [19] Hoa SV, Liu WP, Pugh M, Ton-That M.-T. (2004), "Method and system for making high performance epoxies and high performance epoxies obtained herein", Patent: PCT/CA/002184.
- [20] Wang, X. et al. (2009), "Fabrication of Ultralong and Electrically Uniform Single-Walled Carbon Nanotubes on Clean Substrates", *Nano Letters* 9 (9), 3137–3141.
- [21] Schadler LS, Giannaris SC, Ajayan PM. (1998), "Load transfer in carbon nanotube epoxy composites", *Applied Physics Letters*, 73(26):3842–4.
- [22] Lau KT, Hui D. (2002), "The revolutionary creation of new advanced materials—carbon nanotube composites", *Composites Part B: Engineering*, 33(4), 263-277.
- [23] Jin L, Bower C, Zhou O. (1998), "Alignment of carbon nanotubes in a polymer matrix by mechanical stretching", *Applied Physics Letters*; 73(9), 1197–9.
- [24] Qian D, Dickey EC, Andrews R, Rantell T. (2000), "Load transfer and deformation mechanism in carbon nanotube–polystyrene composites", *Applied Physics Letters*, 76(20), 2868–70.
- [25] Bower C, Rosen R, Jin L, Han J, Zhou O. (1999), "Deformation of carbon nanotubes in nanotube–polymer composites", *Applied Physics Letters*; 74(22), 3317–9.

- 
- [26] Cumings J, Zettl A. (2000), “Low fraction nanoscale linear bearing realized from multiwall carbon nanotubes”, *Science*, 289, 602–4.
- [27] Qian H, Greenhalgh ES, Shaffer MSP, Bismarck A. (2010), “Carbon nanotube-based hierarchical composites: a review”, *Journal of Materials Chemistry*, 20, 4751–62.
- [28] Ma P, Siddiqui NA, Marom G, Kim J. (2010), “Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review”, *Composites Part A-Applied Science and Materials*; 41, 1345–67.
- [29] Cui S, Kinloch IA, Young RJ, Noe L, Monthieux M. (2009), “The effect of stress transfer within double-walled carbon nanotubes upon their ability to reinforce composites”, *Advanced Materials*; 21, 1–5.
- [30] Naik NK, Shrirao P. (2004), “Composite structures under ballistic impact”, *Composite Structures*, Elsevier; 66(8), 578–90.
- [31] Ruiz e J. Harding, (1992), “Modelling impact of composite structures using small specimens”, *Composites Engineering*, 2, 164-7.
- [32] Hu N, Sekine H, Fukunaga H, Yao ZH. (1999), “Impact analysis of composite laminates with multiple delaminations”. *International Journal of Impact Engineering*; 22(7), 633–48.
- [33] Moura MFSF, Gonçalves JPM. (2004), “Modeling the interaction between matrix cracking and delamination in carbon–epoxy laminates under low velocity impact”, *Compos Science and Technology*; 64(9), 1021–7.
- [34] Reis L. e Freitas M., (1997), “Damage Growth Analysis of Low Velocity Impacted Composite Panels”, *Composite Structures*, Elsevier; 38(1), 509-7.
- [35] Rhodes M.B., (1987), “Damage Tolerance Research on Composite Panels”, *Selected NASA Research in Composite Materials and Structures*, NASA CP-2142.
- [36] Olsson R., (1992), “Impact response of orthotropic composites plates predicted from a one parameter differential equation”, *AIAA Journal*; 30(6), 1587-1596.
- [37] Ashizawa M., (1981), “Fast Interlaminar Fracture of a Compressively Loaded Composite Containing a Defect”, *Proceeding of the Fifth NASA/DoD Conference on Fibrous Composites in Structural Design*, New Orleans, 1-269.
- [38] Takeda N., Sierakowski R. L., e Malvern L. E., (1982), “Microscopic Observations of Cross Sections of Impacted Composite Laminates”, *Journal of Composites Technology and Research*, 4, 4-10.

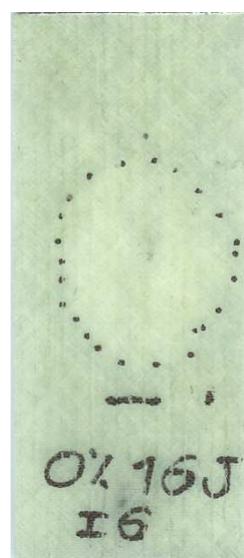
- [39] Choi H. Y. e Chang F. K., (1992), “A Model for Predicting Damage in Graphite/Epoxy Laminated Composites Resulting from Low-Velocity Point Impact”, *Journal of Composite Materials*, 26, 2134-2169.
- [40] Bishop, (2000), “The mechanical performance and impact behavior of carbon fiber reinforced PEEK”, *Composite Structures*, 3, 295-318.
- [41] Butcher, (2001), “The impact resistance of unidirectional CFRP under tensile stress”, *Fiber Science and Technology*, 12, 295-326.
- [42] Kim R.Y., Soni S.R., (1984), “Experimental and Analytical Studies on the Onset of Delamination in Laminated Composites”, *Journal of Composite Materials*, 18, 70-11.
- [43] Ross C.A. e Sierakowski R.L., (1973), “Studies on the impact resistance of composite plates”, *Composites*, 4, 157-161.
- [44] Tan VBC, Shim VPW, Tay TE. (2003), “Experimental and numerical study on response of flexible laminates to impact loadings”, *International Journal of Solids and Structures*; 40(22), 6245–66.
- [45] Lin J- C, Chang LC, Nien MH, Ho HL. (2006), “Mechanical behavior of various nanoparticle filled composites at low-velocity impact”, *Composite Structures*, Elsevier; 74(1), 30-6.
- [46] Elder DJ, Thomson RS, Nguyen MQ, Scott ML. (2004), “Review of delamination predictive methods for low speed impact of composite laminates”, *Composite Structures*, Elsevier; 66(7), 677–83.

## ANEXO A

Aqui encontram-se fotografias que ilustram as máquinas usadas, provetes ou varrimentos de áreas.

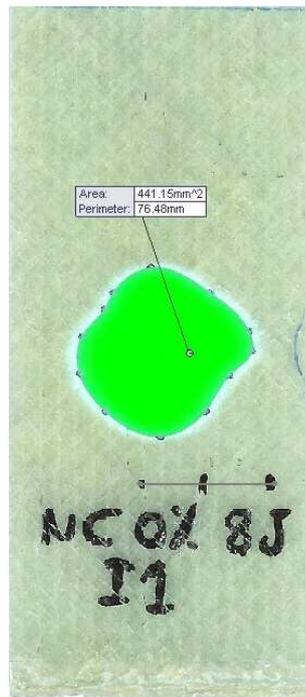


(a)

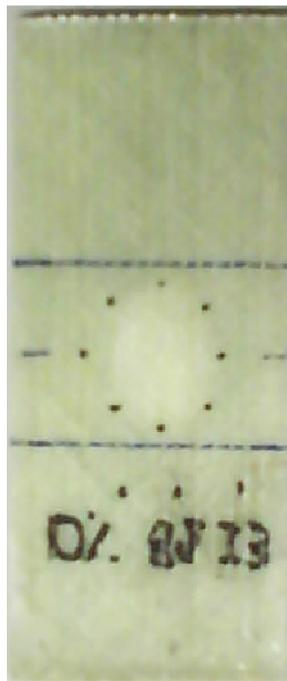


(b)

**Figura 0.1.** Exemplo de provetes impactados com dano delimitado por pontos: (a) provete preparado para *C-scan*; (b) provete preparado para ensaio de tracção.



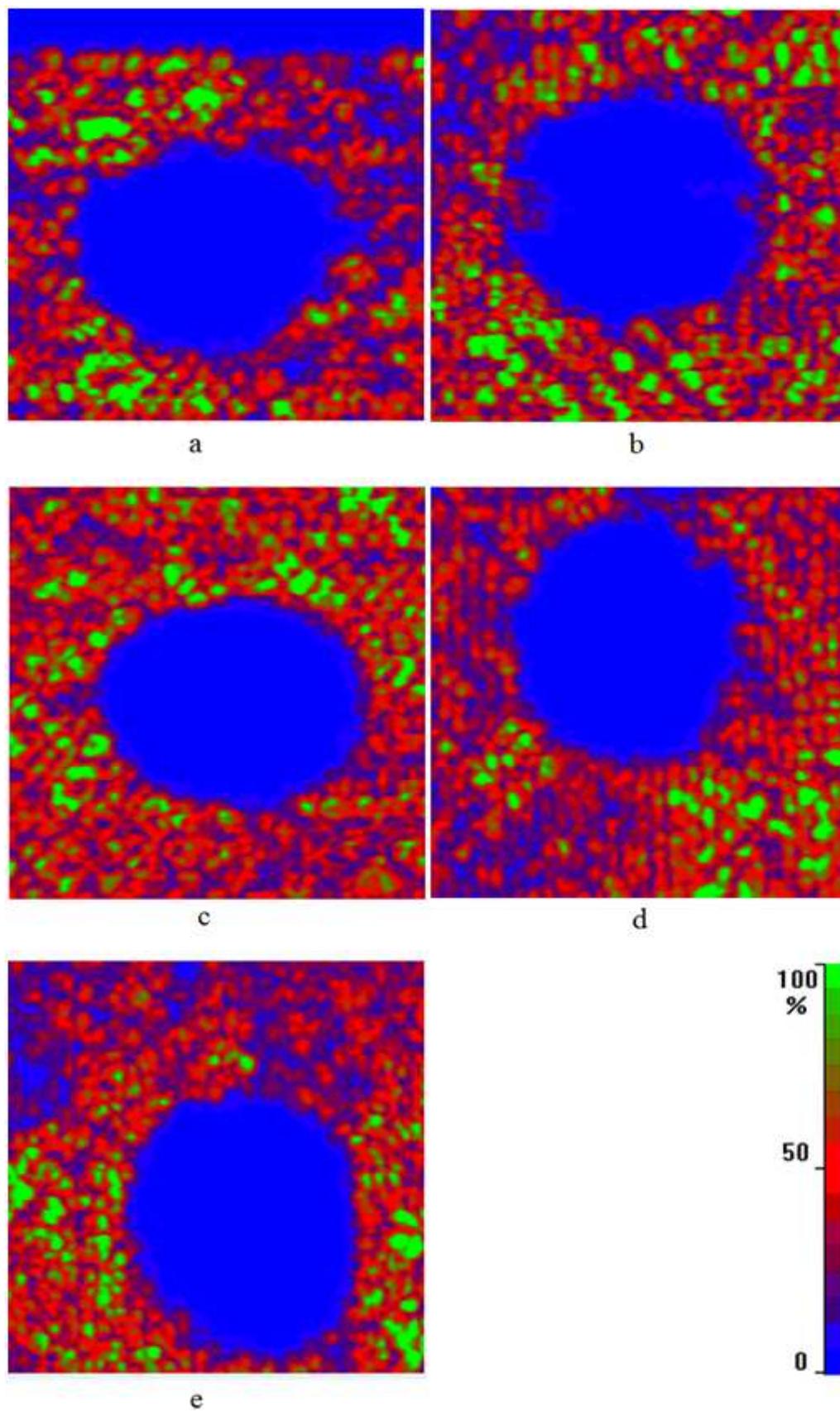
**Figura 0.2.** Exemplo de um provete no qual foi medida a área de dano com uma aplicação de medição do software SolidWorks.



**Figura 0.3.** Exemplo de um provete marcado para o ensaio de tracção. A meio do defeito está marcada a linha central a partir da qual foram marcados os limites superior e inferior (30 mm de afastamento) para o posicionamento entre as amarras.



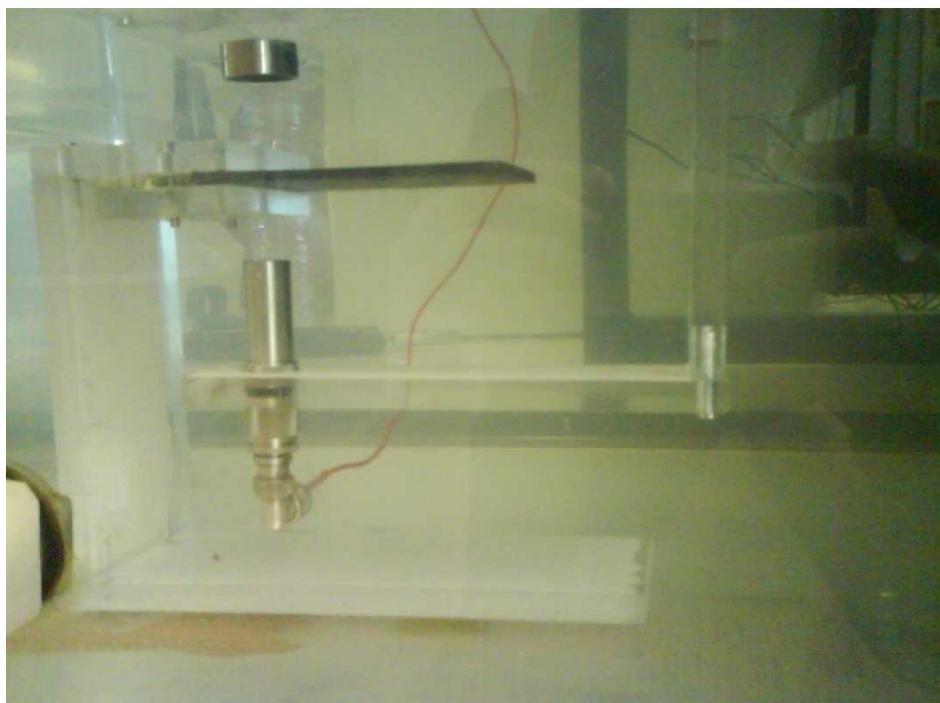
**Figura 0.4.** Provete com nanotubos de carbono depois do ensaio de tracção.



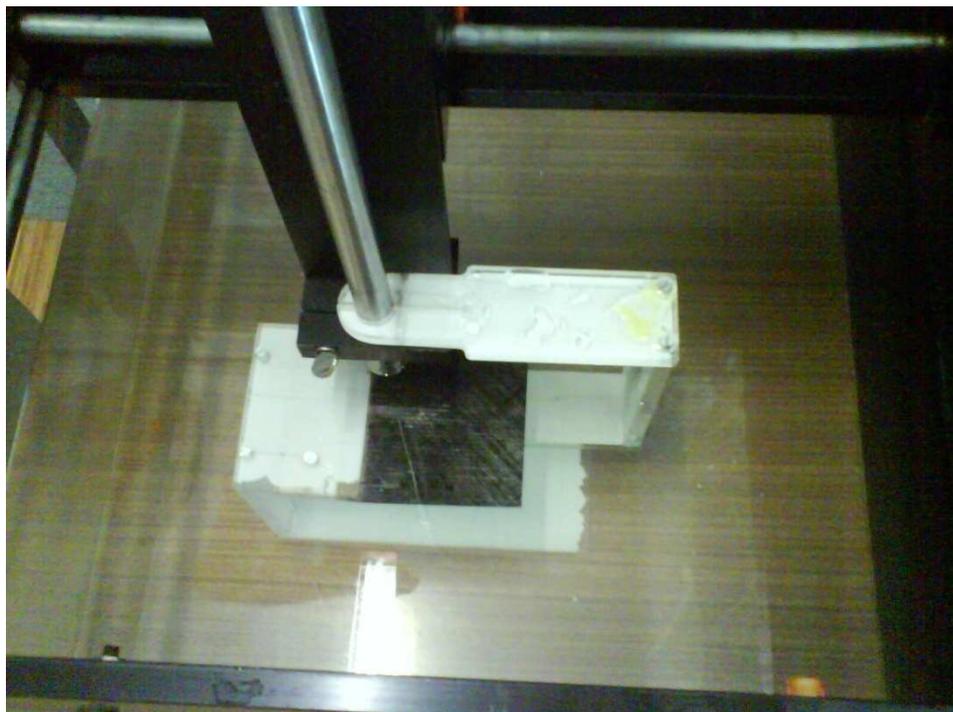
**Figura 0.5.** Imagens de *C-scan* de provetes impactados com 16J. (a) 0% I5; (b) NC 1% I5; (c) NC 3% I5; (d) NT 0,5% I5; (e) NT 1% I4.



**Figura 0.6.** Fotografia do reservatório de água no departamento de Electrotecnicia que é usado para fazer os *C-scan*. No topo está a estrutura que se move para efectuar o varrimento (a preto).



**Figura 0.7.** Pormenor das duas sondas em transmissão durante um ensaio de *C-scan*, submersas e suspensas pela estrutura em acrílico em U (à direita). A placa/provete (a preto no meio) está presa pela estrutura de suporte próprio desta.



**Figura 0.8.** Vista de cima das estruturas de suporte e da placa durante o *C-scan*. A cor branca provém da película de protecção do acrílico que não descolou.



**Figura 0.9.** Máquina usada para os ensaios de tracção INSTRON Model 4206.



**Figura 0.10.** Fotografia do impactor usado. Observam-se os 6 pesos com uma massa total de 2,5 Kg. A estrutura de suporte tem uma massa de 0,5 Kg e o impactor de 0,4 Kg. O impactor tem uma ponta semi-esférica com um diâmetro de 10 mm.



**Figura 0.11.** Torre de impactos INSTRON Model CEAST 9340.

## ANEXO B

Neste anexo mostram-se os dados usados na discussão dos resultados. Os dados relativos aos primeiros gráficos de impacto são praticamente impossíveis de mostrar já que são milhares de pontos (linhas) e dezenas de colunas dos quais o *RawData* é constituído.

Das restantes operações e raciocínios, os dados são apresentados neste anexo.

### 1. Dados relativos ao impacto

**Tabela 0.1.** Dados de impacto relativos a cada uma das placas impactadas.

		Prove	Carga	Deslocame	Energia	Energ	Energ	Energ	Espess	Rigidez	Rigidez/espes	E.
		te	máxima	nto [mm]	absorvi	ia	ia	a	ura	K	sura	elástica/esp
			[N]		da [J]	máxi	elásti	dissipa	média	[N/mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	ess. [J/mm]
						ca [J]	ca [J]	da [%]	[mm]			
1	8J	1 0%	5416,10	2,77	3,76	8,10	4,33	53,53	4,39	1954,19	444,89	0,99
2		2 0%	5249,93	2,73	3,81	8,10	4,28	52,89	4,49	1926,11	429,46	0,95
3		3 0%	5401,11	2,65	3,59	8,02	4,43	55,29	4,51	2037,10	452,10	0,98
4		4 0%	5343,64	2,85	3,54	8,03	4,48	55,87	4,21	1878,03	445,91	1,06
Desv.P												
ad.			75,29	0,08	0,13	0,04	0,09	1,41	0,13	66,70	9,63	0,05
Média			5352,70	2,75	3,68	8,06	4,38	54,40	4,40	1948,86	443,09	1,00
5		NC 1 1%	4987,56	3,16	3,70	8,04	4,33	53,93	3,96	1580,21	398,79	1,09
6		NC 2 1%	5347,39	2,92	3,53	8,03	4,50	56,05	3,94	1829,21	464,36	1,14
7		NC 3 1%	5326,15	2,81	3,70	8,03	4,32	53,86	4,04	1896,27	469,66	1,07
Desv.												
Pad.			201,89	0,18	0,10	0,01	0,10	1,24	0,05	166,53	39,48	0,04
Média			5220,37	2,96	3,64	8,03	4,39	54,61	3,98	1768,56	444,27	1,10
8		NC 1 3%	5018,80	2,99	3,85	8,03	4,18	52,06	4,25	1677,06	394,37	0,98
9		NC 2 3%	5144,99	2,87	3,65	8,03	4,37	54,47	4,17	1792,30	429,89	1,05
10		NC 3 3%	5127,49	2,92	3,95	8,03	4,08	50,80	4,23	1753,66	414,90	0,97
Desv.												
Pad.			68,37	0,06	0,15	0,00	0,15	1,86	0,04	58,66	17,83	0,04
Média			5097,09	2,93	3,82	8,03	4,21	52,45	4,22	1741,01	413,06	1,00
11		NT 1 0,5%	5337,39	2,91	3,46	8,03	4,56	56,85	4,04	1831,38	453,87	1,13
12		NT 2 0,5%	5125,00	2,87	3,60	8,03	4,43	55,16	3,84	1785,46	464,56	1,15
13		NT 3 0,5%	5391,12	2,86	3,33	8,03	4,70	58,56	3,98	1886,75	474,56	1,18
Desv.												
Pad.			140,72	0,03	0,14	0,00	0,14	1,70	0,10	50,72	10,34	0,03

Estudo do impacto a baixa velocidade em compósitos epóxi/fibra de vidro nanoreforçados

Média			5284,50	2,88	3,46	8,03	4,56	56,85	3,95	1834,53	464,33	1,16
14	NT 1 1%		5151,23	2,95	3,91	8,03	4,12	51,26	4,29	1748,43	407,16	0,96
15	NT 2 1%		4831,39	3,11	4,11	8,11	4,00	49,33	4,43	1552,59	350,74	0,90
16	NT 3 1%		5144,99	2,95	3,81	8,03	4,22	52,60	4,20	1741,52	414,89	1,01
Desv Pad.			182,89	0,09	0,15	0,05	0,11	1,65	0,12	111,13	35,02	0,05
Média			5042,54	3,00	3,94	8,06	4,11	51,06	4,31	1680,85	390,93	0,96
17	<b>16</b> J 5 0%		7531,32	3,96	8,38	16,05	7,67	47,81	4,33	1901,02	438,70	1,77
18	6 0%		7692,49	3,97	8,53	16,05	7,52	46,88	4,35	1939,35	446,25	1,73
19	7 0%		7305,18	3,89	8,95	16,05	7,10	44,23	4,39	1878,82	427,57	1,62
Desv Pad.			194,56	0,04	0,30	0,00	0,30	1,86	0,03	30,62	9,40	0,08
Média			7509,66	3,94	8,62	16,05	7,43	46,31	4,36	1906,40	437,51	1,71
20	NC 4 1%		7425,12	4,15	8,51	16,06	7,54	46,98	4,05	1788,48	441,51	1,86
21	NC 5 1%		7151,50	4,20	8,89	16,06	7,17	44,63	4,03	1702,42	422,61	1,78
22	NC 6 1%		7115,27	4,08	9,22	16,05	6,84	42,58	4,02	1744,59	433,71	1,70
Desv Pad.			169,40	0,06	0,35	0,00	0,35	2,20	0,01	43,03	9,50	0,08
Méd			7230,63	4,14	8,87	16,06	7,18	44,73	4,03	1745,17	432,61	1,78
23	NC 4 3%		6950,35	4,23	9,17	16,06	6,89	42,90	4,29	1641,58	382,80	1,61
24	NC 5 3%		7330,17	4,11	8,77	16,06	7,28	45,35	4,26	1782,69	418,15	1,71
25	NC 6 3%		7055,30	4,10	9,16	16,05	6,89	42,92	4,35	1721,07	395,27	1,58
Desv. Pad.			196,14	0,07	0,23	0,00	0,23	1,41	0,05	70,75	17,93	0,07
Média			7111,94	4,15	9,04	16,06	7,02	43,73	4,30	1715,11	398,74	1,63
26	NT 4 0,5%		7759,96	3,91	8,38	15,94	7,57	47,45	4,14	1986,83	480,10	1,83
27	NT 5 0,5%		7422,62	4,23	8,32	16,06	7,74	48,19	4,05	1756,05	434,13	1,91
28	NT 6 0,5%		8066,06	3,91	8,19	16,05	7,86	48,96	4,09	2065,35	505,39	1,92
Desv. Pad.			321,84	0,19	0,10	0,06	0,15	0,76	0,05	160,77	36,13	0,05
Média			7749,55	4,01	8,30	16,02	7,72	48,20	4,09	1936,08	473,21	1,89
29	NT 4 1%		7391,39	4,17	9,03	16,06	7,03	43,79	4,29	1771,69	413,06	1,64
30	NT 5 1%		7677,50	3,96	8,36	16,05	7,69	47,92	4,37	1938,20	443,27	1,76
31	NT 6 1%		7171,49	4,25	8,82	16,06	7,24	45,10	4,26	1685,63	395,38	1,70
Desv. Pad.			253,72	0,15	0,34	0,01	0,34	2,11	0,06	128,40	24,22	0,06
Média			7413,46	4,13	8,73	16,06	7,32	45,60	4,31	1798,51	417,24	1,70

## 2. Dados relativos às áreas de dano

**Tabela 0.2.** Áreas de dano obtidas opticamente para os provetes sem reforço nanométrico impactados com 8 J de energia.

0% 8J Área em mm <sup>2</sup>				
0% I1 8J	0% I2 8J	0% I3 8J	0% I4 8J	Média
441,15	382,56	389,55	503,9	429,29
Desv.Pad.		56,18		

**Tabela 0.3.** Áreas de dano obtidas opticamente para os provetes reforçados com NC1% impactados com 8 J de energia.

NC1% 8J Área em mm <sup>2</sup>			
NC1% I1 8J	NC1% I2 8J	NC1% I3 8J	Média
494,17	547,75	577,7	539,87
Desv.Pad.		42,32	

**Tabela 0.4.** Áreas de dano obtidas opticamente para os provetes reforçados com NC3% impactados com 8 J de energia.

NC3% 8J Área em mm <sup>2</sup>			
NC3% I1 8J	NC3% I2 8J	NC3% I3 8J	Média
610,1	631,84	657,04	632,99
Desv.Pad.		23,49	

**Tabela 0.5.** Áreas de dano obtidas opticamente para os provetes sem reforço nanométrico impactados com 16 J de energia.

0% 16J Área em mm <sup>2</sup>			
0% I5 16J	0% I6 16J	0% I7 16J	Média
1247,04	991,53	1322,29	1186,95
Desv.Pad.		173,37	

**Tabela 0.6.** Áreas de dano obtidas opticamente para os provetes reforçados com NC1% impactados com 16 J de energia.

NC1% 16J Área em mm <sup>2</sup>			
NC1% I4 16J	NC1% I6 16J	NC1% I5 16J	Média
1182,3	1002,49	1363,41	1182,73
Desv.Pad.		180,46	

**Tabela 0.7.** Áreas de dano obtidas opticamente para os provetes reforçados com NC3% impactados com 16 J de energia.

NC3% 16J Área em mm <sup>2</sup>			
NC3% I4 16J	NC3% I5 16J	NC3% I6 16J	Média
1406,89	1187,96	1281,3	1292,05
Desv.Pad.		109,86	

**Tabela 0.8.** Áreas de dano obtidas através de *C-scan* para vários provetes impactados com 16 J de energia.

C-scan 16J Áreas em mm <sup>2</sup>				
0% I5 16J	NC1% I5 16J	NC3% I5 16J	NT0,5% I5 16J	NT1% I4 16J
1078,55	1113,73	1023,01	1042,36	1119,29

### 3. Dados relativos à resistência residual

**Tabela 0.9.** Resultados médios e desvios padrão da tensão de tracção de provetes com e sem impacto.

Sem impacto	Provete	Tensão máxima [Mpa]
	1 0%	344,87
2 0%	307,61	
3 0%	345,13	
	Média	332,54
	Desv. Pad.	21,59
	1 NC 1%	273,87
	2 NC 1%	278,68
	3 NC 1%	306,45
	Média	286,33
	Desv. Pad.	17,59
	1 NC 3%	241,38
	2 NC 3%	252,56
	3 NC 3%	272,07
	Média	255,34

	Desv. Pad.	15,53
	1 NT 0,5%	348,76
	2 NT 0,5%	327,40
	3 NT 0,5%	333,52
	Média	336,56
	Desv. Pad.	11,00
	1 NT 1%	313,97
	2 NT 1%	284,64
	3 NT 1%	300,78
	Média	299,80
	Desv. Pad.	14,69
<b>8 J</b>	1 0%	280,18
	2 0%	291,65
	3 0%	275,65
	4 0%	282,46
	Média	282,49
	Desv. Pad.	6,73
	NC 1 1%	263,09
	NC 3 1%	280,41
	Média	271,75
	Desv. Pad.	12,24
	NC 1 3%	274,21
	NC 2 3%	269,75
	NC 3 3%	266,76
	Média	270,24
	Desv. Pad.	3,75
	NT 8 0,5%	304,07
	NT 9 0,5%	311,90
	Média	307,98
	Desv. Pad.	5,54
	NT 3 1%	272,10
	NT 4 1%	240,64
	Média	256,37
	Desv. Pad.	22,24
<b>16 J</b>	6 0%	245,62
	7 0%	241,84
	Média	243,73
	Desv. Pad.	2,67
	NC 4 1%	243,95
	NC 6 1%	243,92
	Média	243,93
	Desv. Pad.	0,02
	NC 4 3%	223,29
	NC 5 3%	230,70

Média	226,99
Desv. Pad.	5,24
NT 6 0,5%	244,00
NT 7 0,5%	239,24
Média	241,62
Desv. Pad.	3,36
NT 1 1%	264,89
NT 7 1%	232,34
Média	248,62
Desv. Pad.	23,01