



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Avaliação do dano de placas de carbono epóxico submetidas a impacto**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

**Autor**

**Marco António Ângelo de Melo**

**Orientadores**

**Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro**

**Professor Doutor Mário João Simões Ferreira dos Santos**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor José Maria Osório de Sousa Cirne  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro  
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra  
Professor Doutor Mário João Simões Ferreira dos Santos  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra  
Professor Doutor Jaime Baptista dos Santos  
Professor Associado da Universidade de Coimbra

**Coimbra, Julho 2013**



“Nós somos o que fazemos repetidamente.  
A excelência portanto, não é um acto, mas um hábito!”

Aristóteles.

Aos meus pais, família e amigos.



## **Agradecimentos**

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores, Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro e Professor Doutor Mário João Simões Ferreira dos Santos pela orientação, pela enorme disponibilidade e por todo o auxílio prestado no esclarecimento de dúvidas e resolução de problemas.

Ao Professor Doutor Jaime Baptista dos Santos pela disponibilidade na resolução de algumas questões ao longo do trabalho.

Ao Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis pelo incentivo à expansão do conhecimento para além do tema inicial e pelo fornecimento do material para que tal acontecesse.

A toda a minha família por todo o apoio prestado durante os últimos cinco anos e cujo apoio foi fundamental, sobretudo à minha Avó Fernanda e especialmente à minha incansável Mãe pelo enorme esforço e trabalho extra a que se submeteu para me proporcionar esta oportunidade.

Aos meus colegas e amigos que estiveram presentes nos bons e nos maus momentos, por todas as experiências que me proporcionaram, e sem os quais a caminhada até este ponto não teria sido tão interessante como foi.



## Resumo

Devido ao crescente uso de materiais compósitos em aplicações correntes que vão desde simples canetas à indústria aeronáutica, onde a utilização de materiais que associem leveza a elevada rigidez é um factor de capital importância, torna-se cada mais necessário saber até que ponto é que estes materiais suportam as solicitações a que vão ser sujeitos.

Uma das solicitações mais críticas a que um material compósito pode ser sujeito é um impacto de baixa velocidade. Quando são submetidos a este tipo de impacto, os materiais podem aparentar não ter sofrido dano, por este não ser visível à vista desarmada, mas podem apresentar um dano significativo no seu interior. No caso de o defeito não ser detectado a tempo, o material pode ser deixado em funcionamento, ficando sujeito a solicitações que pode já não estar em condições de suportar.

Devido à dificuldade de detecção de alguns defeitos em materiais compósitos, foram sendo desenvolvidos vários métodos de detecção de defeitos nestes materiais, entre os quais está o C-Scan ultra-sónico. Este sistema de detecção de defeitos é utilizado para fazer uma análise estrutural de materiais compósitos, pois os ultra-sons, ao propagarem-se no seu interior, permitem obter informação sobre a sua integridade.

O C-Scan convencional, que usa como meio de acoplamento a água, é muito utilizado na análise não destrutiva de materiais compósitos pois, apesar das suas desvantagens, como o facto de necessitar de um meio de propagação, geralmente aquoso, apresenta algumas vantagens consideráveis para a inspecção deste tipo de materiais, como o facto de não reagir com os mesmos, ou o facto de permitir determinar a localização, a forma e o tamanho dos defeitos com um elevado grau de fiabilidade. O meio de acoplamento entre o transdutor e o material a inspeccionar é um factor muito importante, pois na análise por C-Scan ultra-sónico a eficiência da propagação do sinal depende directamente do meio no qual este se propaga. No entanto, devido ao crescente número de aplicações dos materiais compósitos, pode-se dar o caso de, por algum motivo, não ser possível ter o material a analisar em contacto com água, o que leva a que seja necessário

desenvolver sistemas que não necessitem de água para poder realizar a inspeção, como é o caso de um sistema C-Scan no ar também utilizado neste trabalho.

A principal motivação deste trabalho foi precisamente a comparação entre os resultados obtidos com ambos os sistemas (C-scan por imersão e C-scan no ar) no estudo de defeitos em materiais compósitos laminados sujeitos a impactos de baixa velocidade. Dado que o sistema C-Scan no ar funciona com uma frequência mais baixa do que o sistema C-Scan por imersão, e a frequência é uma das características com alguma importância na transmissão de sinal em sistemas ultra-sônicos.

**Palavras-chave:** Compósito, C-Scan no ar, C-Scan por imersão, Dano, Fibra de carbono.



## Abstract

Due to the increasing use of composite materials in current applications such as pens up to the aircraft industry, where the use of materials which combine lightweight with high stiffness is a factor of major importance, it becomes ever more necessary to know the extent to which these materials can withstand the stresses to which they will be subjected.

One of the most critical solicitations that a composite material can be subjected to is a low-speed impact, since apparently the material may have not suffered damage, for not being visible to the naked eye but may present significant damage on the inside that if not detected in time can result in the material to be let in operation, being subjected to loads that it may no longer be able to withstand.

Due to some difficulty in defect detection in composite materials, various methods have been developed to detect defects in these materials, among which is the ultrasonic C-scan. This system of defect detection is used to make a structural analysis of composite materials, because the propagation of ultrasounds on the inside, allow us to obtain information about its integrity.

The conventional C-scan, which uses water as a means of coupling is widely used in non-destructive analysis of composite materials because, despite its disadvantages, such as requiring a medium of propagation, usually aqueous, it has some considerable advantages for the inspection of such materials, as not reacting with it, or allowing the determination of the location, shape and size of the defect with a high degree of reliability. The coupling medium between the transducer and the material to be inspected is a very important factor, since the efficiency of signal propagation in the analysis by ultrasonic C-Scan directly depends on the medium in which it propagates. However, due to the growing number of applications of composite materials, it may be the case that, for some reason, it is not possible to have the material to be analyzed into contact with water, which means that it is necessary to develop systems that do not require water in order to perform the inspection, as in the case of the C-scan system in the air also used in this work.

The main motivation of this work was to precisely compare the results obtained with both systems (C-scan by immersion and C-scan in air) in the study of defects in

laminated composites subjected to low velocity impact. Given that the airscan system operates at a lower frequency than the immersion C-scan, and the frequency is a characteristic of some importance in signal transmission in ultrasonic systems.

**Keywords** Composite, Air-Scan, C-Scan, Damage, Carbon fiber

## Índice

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xv
Simbologia e Siglas .....	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas .....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objectivos .....	4
1.3. Organização .....	5
2. Materiais Compósitos.....	6
2.1. O que é um compósito .....	6
2.2. Reforço.....	8
2.3. Mecanismos de Falha.....	11
2.3.1. Impacto .....	11
2.3.2. Mecanismos de Falha no Plano .....	13
2.3.3. Mecanismos de Falha Fora do Plano .....	14
2.3.4. Sequência de Empilhamento .....	18
2.3.5. Condições de Fronteira.....	18
2.4. Análise por ultra-sons .....	18
3. Materiais e procedimento .....	23
3.1. Materiais Utilizados.....	23
3.1.1. Placas de carbono-epóxico $[0_i;90_i]_s$ .....	23
3.1.2. Compósitos imersos em meios agressivos .....	25
3.1.3. Compósitos híbridos.....	27
3.2. Ensaios de Impacto .....	27
3.3. Inspeção não destrutiva .....	28
4. Discussão de resultados .....	33
4.1. Ensaios de Impacto .....	33
4.2. Detecção de Defeitos .....	35
4.2.1. Placas de carbono-epóxico $[0_i;90_i]_s$ .....	35
4.2.2. Placas submetidas a meios agressivos.....	45
4.2.3. Placas híbridas .....	46
5. Conclusões.....	47
6. Sugestões para trabalhos futuros .....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	51
ANEXO A .....	55
ANEXO B .....	59
ANEXO C .....	63



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplo de utilização de compósitos na indústria automóvel .....	1
Figura 1.2. Exemplo de utilização de compósitos na antiguidade. ....	2
Figura 1.3. Evolução da utilização de compósitos na indústria aeronáutica. ....	3
Figura 2.1. Funcionamento do C-Scan em pulso-eco.....	20
Figura 2.2a. Funcionamento do C-Scan em transmissão. ....	21
Figura 2.2b. Gráfico sinais recebidos em transmissão. ....	21
Figura 3.1. Serra de disco de dentes diamantados. ....	25
Figura 4.1. Gráfico energia-tempo para o primeiro impacto.....	34
Figura 4.2. Placa8_2 controlo C-Scan no ar.....	36
Figura 4.3. Placa8_2 controlo C-Scan por imersão. ....	36
Figura 4.4. Placa 8_2 1ºimpacto C-Scan no ar. ....	36
Figura 4.5. Placa 8_2 1ºimpacto C-Scan por imersão. ....	36
Figura 4.6. Placa 8_2 2ºimpacto C-Scan no ar. ....	37
Figura 4.7. Placa 8_2 2ºimpacto C-Scan por imersão. ....	37
Figura 4.8. Placa 8_2 3ºimpacto C-Scan no ar. ....	37
Figura 4.9. Placa 8_2 3ºimpacto C-Scan por imersão. ....	37
Figura 4.10. Placa 12_2 controlo C-Scan no ar.....	38
Figura 4.11. Placa 12_2 controlo C-Scan por imersão. ....	38
Figura 4.12. Placa 12_2 1ºimpacto C-Scan no ar. ....	38
Figura 4.13. Placa 12_2 1ºimpacto C-Scan por imersão. ....	38
Figura 4.14. Placa 12_2 2ºimpacto C-Scan no ar. ....	38
Figura 4.15. Placa 12_2 2ºimpacto C-Scan por imersão. ....	38
Figura 4.16. Placa 12_2 3ºimpacto C-Scan no ar. ....	39
Figura 4.17. Placa 12_2 3ºimpacto C-Scan por imersão. ....	39
Figura 4.18. Placa 16_4 controlo C-Scan no ar.....	40
Figura 4.19. Placa 16_4 controlo C-Scan por imersão. ....	40
Figura 4.20. Placa 16_4 1ºimpacto C-Scan no ar. ....	40
Figura 4.21. Placa 16_4 1ºimpacto C-Scan por imersão. ....	40
Figura 4.22. Placa 16_4 2ºimpacto C-Scan no ar. ....	40

Figura 4.23. Placa 16_4 2ºimpacto C-Scan por imersão. ....	40
Figura 4.24. Placa 16_4 3ºimpacto C-Scan no ar. ....	41
Figura 4.25. Placa 16_4 3ºimpacto C-Scan por imersão. ....	41
Figura 4.26. Placa 20_3 controlo C-Scan no ar. ....	41
Figura 4.27. Placa 20_3 controlo C-Scan por imersão. ....	41
Figura 4.28. Placa 20_3 1ºimpacto C-Scan no ar. ....	42
Figura 4.29. Placa 20_3 1ºimpacto C-Scan por imersão. ....	42
Figura 4.30. Placa 20_3 2ºimpacto C-Scan no ar. ....	42
Figura 4.31. Placa 20_3 2ºimpacto C-Scan por imersão. ....	42
Figura 4.32. Placa 20_3 3ºimpacto C-Scan no ar. ....	42
Figura 4.33. Placa 20_3 3ºimpacto C-Scan por imersão. ....	42
Figura 4.34. Placa 20_4 controlo C-Scan no ar. ....	43
Figura 4.35. Placa 20_4 controlo C-Scan por imersão. ....	43
Figura 4.36. Placa 20_4 1ºimpacto C-Scan no ar. ....	43
Figura 4.37. Placa 20_4 1ºimpacto C-Scan por imersão. ....	43
Figura 4.38. Placa 20_4 2ºimpacto C-Scan no ar. ....	44
Figura 4.39. Placa 20_4 2ºimpacto C-Scan por imersão. ....	44
Figura 4.40. Placa 20_4 3ºimpacto C-Scan no ar. ....	44
Figura 4.41. Placa 20_4 3ºimpacto C-Scan por imersão. ....	44
Figura A1. Máquina de impacto INSTRON CEAST 9340. ....	55
Figura A2. Sistema de C-Scan por imersão. ....	55
Figura A3. Máquina de impacto IMATEK-IM10. ....	56
Figura A4. Sistema de C-Scan no ar. ....	56
Figura A5. Sonda 007CX AIRSCAN. ....	57
Figura A6. Vista lateral da estrutura de apoio em acrílico em uso. ....	57
Figura A7. Vista de cima da estrutura de apoio em acrílico em uso. ....	57
Figura B1. Carbono-epóxico controlo ar. ....	59
Figura B2. Carbono-epóxico ar NaOH 15%. ....	59
Figura B3. Kevlar <sup>®</sup> ar HCl 15%. ....	59
Figura B4. Carbono-epóxico ar HCl 15%. ....	59
Figura B5. Carbono-epóxico ar HCl 35%. ....	59
Figura B6. Carbono-epóxico ar NaOH 35%. ....	59
Figura B7. Kevlar <sup>®</sup> controlo ar. ....	60
Figura B8. Kevlar <sup>®</sup> ar NaOH 15%. ....	60

---

Figura B9. Kevlar <sup>®</sup> ar NaOH 35%.....	60
Figura B10. Kevlar <sup>®</sup> ar HCl 35%.....	60
Figura B11. Carbono-epóxido controlo imersão.....	60
Figura B12. Carbono-epóxido NaOH 15% imersão.....	60
Figura B13. Carbono-epóxido HCl 15% imersão.....	61
Figura B14. Kevlar <sup>®</sup> controlo imersão.....	61
Figura B15. Kevlar <sup>®</sup> NaOH 15% imersão.....	61
Figura B16. Kevlar <sup>®</sup> NaOH 35% imersão.....	61
Figura C1. impacto 3J sem reforço imersão.....	63
Figura C2. impacto 3J 3% de nanoclays imersão.....	63
Figura C3. impacto 6J sem reforço imersão.....	63
Figura C4. impacto 6J 3% de nanoclays imersão.....	63
Figura C5. impacto 3J sem reforço ar.....	64
Figura C6. impacto 3J 3% de nanoclays ar.....	64
Figura C7. impacto 6J sem reforço ar.....	64
Figura C8. impacto 6J 3% de nanoclays ar.....	64





## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Placas carbono-epóxico [0 <sub>i</sub> ;90 <sub>i</sub> ] <sub>s</sub> .....	24
Tabela 3.2 –Propriedades das placas carbono-epóxico [0 <sub>i</sub> ;90 <sub>i</sub> ] <sub>s</sub> .....	25
Tabela 3.3 – Composição Laminados submetidos a meios agressivos .....	25
Tabela 3.4 – Meios agressivos.....	26
Tabela 3.5 – Dados do C-Scan no ar .....	30
Tabela 4.1 – Dados resultantes dos impactos .....	33
Tabela 4.2 – Ganho C-Scan no ar.....	44
Tabela 4.3 – Comprimento dos defeitos nas placas carbono-epóxico [0 <sub>i</sub> ;90 <sub>i</sub> ] <sub>s</sub> .....	45



## **SIMBOLOGIA E SIGLAS**

### **Simbologia**

$E$  – Módulo de Elasticidade

$G$  – Módulo de Elasticidade Transversal

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

$\sigma$  - Tensão

### **Siglas**

ASTM – American Society for Testing and Materials

DEEC - Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

NDT – Nondestructive Testing

UBI – Universidade da Beira Interior

UC – Universidade de Coimbra



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

Embora os compósitos sempre tenham existido na natureza como, por exemplo na madeira que é constituída por fibras de um material de base, a celulose, e um aglutinante, a lignina, ou até mesmo no corpo humano, sendo os ossos um bom exemplo disso, dado que são constituídos por uma matriz de colagénio (dúctil) e um reforço de hidroxiapatite (material rígido formado basicamente por fosfato de cálcio), só começariam a ser introduzidos na indústria por volta de 1930, na indústria automóvel, embora a sua aplicação só tenha começado a ter sucesso conhecido na década de 50. Dado que, na indústria aeronáutica, a utilização de materiais compósitos só começaria por volta dos anos 60 sendo esta um tipo de indústria com maiores exigências, onde os custos de produção podem ser compensados por ganhos obtidos noutros campos, nomeadamente em termos de peso.

Actualmente os materiais compósitos são muito utilizados na indústria automóvel, havendo automóveis que contêm uma grande percentagem de materiais compósitos na sua constituição, como no exemplo apresentado na figura 1.1:



Figura 1.1 - Aston Martin V12 Vanquish

<http://fanaticars.com/wp-content/uploads/2011/08/Aston-Martin-V12-Vanquish-composite-view.jpg>

O Homem desde cedo recorreu à utilização de materiais compósitos, existindo relatos no Antigo Testamento da utilização de tijolos feitos de argila misturada com palha, ou seja, um bom exemplo de um compósito reforçado com fibras. Pode-se ver um exemplo deste material na figura 1.2.



**Figura 1.2 - Tijolos de argila e palha**

(<http://kdcs.files.wordpress.com/2009/07/tijolos-secando.jpg?w=570>)

Este tipo de materiais tem agora um papel muito importante na indústria devido às suas características, que permitem a obtenção de materiais de elevada resistência associada a baixo peso. Sendo que, hoje em dia, a utilização destes materiais é já significativa.

Um bom exemplo do aumento da utilização de materiais compósitos na indústria aeronáutica é dado pela Boeing que utiliza cerca de 12% de materiais compósitos no modelo 777, que começou a operar em 1995, enquanto, no modelo 787, que teve o seu voo inaugural em Dezembro de 2007, a utilização de materiais compósitos passou para 50%, como se pode ver na figura 1.3.

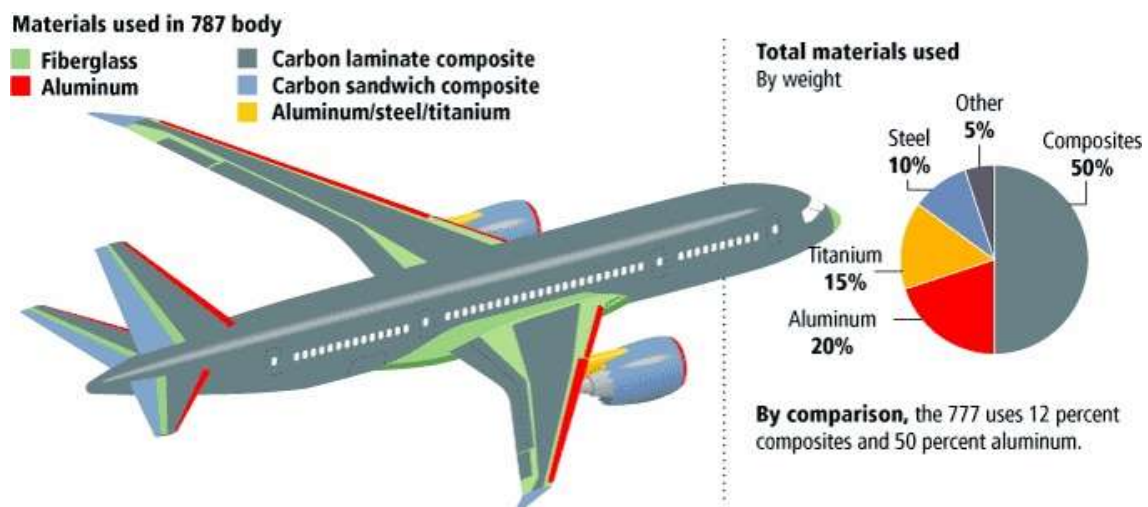


Figura 1.3 - Boeing 777 vs. 787

(<http://siag.project.ifi.uio.no/problems/grandine/Composites01.jpg>)

Actualmente, os materiais compósitos são muito importantes porque, cada vez mais, existe a necessidade de eficiência energética e redução de custos que pode ser alcançada através da utilização deste tipo de materiais pois, por exemplo na indústria dos transportes, permitem reduzir o peso dos veículos e, como consequência disto, reduzir os consumos energéticos.

Por vezes, quando os materiais compósitos sofrem impacto, pode parecer que não apresentam dano, dado que a olho nu não é possível visualizar a existência de defeitos, dado que estes danos ocorrem no interior do material (abaixo da superfície) e se, para materiais compósitos como fibra de vidro é possível verificar a existência do defeito em contraluz, para outros materiais como a fibra de carbono tal não é possível. Isto leva a que seja importante existirem métodos de detecção de defeitos no interior do material que preservem a sua integridade, métodos não destrutivos como o C-Scan ultra-sónico, que permite a detecção de defeitos.

A inspecção por C-Scan é normalmente feita por imersão do material a inspeccionar em água, de modo a garantir o acoplamento entre a sonda e a peça a ser inspeccionada. No entanto, e devido a alguns materiais serem susceptíveis de dano quando na presença de um meio aquoso, surge a necessidade de encontrar um método que permita a detecção de defeitos sem ser necessário inseri-los em água. Neste trabalho pretende-se comparar a técnica de C-Scan por imersão, técnica essa que é amplamente utilizada, cujos resultados já foram validados e que é recorrentemente utilizada, já tendo sido até usada

noutros trabalhos e até em vários artigos científicos [1], e a técnica de C-Scan no ar, que utiliza o ar como meio de propagação.

É feita uma comparação entre ambas as técnicas com o objectivo de verificar até que ponto são válidos ou não os resultados obtidos pela técnica de C-Scan em ar, para que se possam efectuar as melhorias necessárias e, assim, passar a aplicar esta técnica na detecção de defeitos em materiais que, por alguma razão, não possa ser aplicada a técnica de C-Scan por imersão.

## **1.2. Objectivos**

Este trabalho tem como objectivo efectuar a análise da evolução do dano em materiais compósitos laminados submetidos a vários impactos sucessivos de baixa velocidade.

Neste trabalho é feita a comparação da detecção de defeitos através de dois sistemas de ensaio não destrutivo (NDT). São utilizados sistemas de NDT de C-Scan por imersão, que produz bons resultados na detecção de defeitos em materiais compósitos. O outro sistema de NDT a ser utilizado vai ser o C-Scan no ar que foi desenvolvido no DEEC da UC e cujos resultados não foram ainda comparados aos de outro sistema de modo a verificar a sua qualidade, pois o método de C-Scan necessita, geralmente, de um meio para que as ondas sejam transmitidas do transdutor ao material a analisar. Normalmente, para fazer a transmissão das ondas é utilizada água, pois os ultra-sons propagam-se bem nestes meios, já no ar a propagação dos ultra-sons tem maiores limitações.

Para fazer a comparação de resultados entre os dois sistemas foram utilizadas placas de material compósito laminado sujeitas a impacto para as quais foi feita uma avaliação do dano através dos dois sistemas de C-Scan.

As placas utilizadas para verificar a evolução do dano são laminados de carbono-epóxico de 100 x 100 mm que foram sujeitas a impactos consecutivos de baixa velocidade para desta forma se avaliar como é que o defeito se comporta à medida que a placa vai acumulando dano.

São também utilizadas placas de outros materiais compósitos nas quais se pretende estudar a relação do dano com a degradação sofrida por estes materiais quando os mesmos se encontram em contacto com ácidos ou bases durante um determinado período de tempo. Depois de terem sido imersas durante o tempo desejado, estas placas foram



sujeitas a impacto e foi observado o dano que surgiu nas mesmas que, posteriormente, vai ser comparado com o dano que surge em placas do mesmo material, mas que não estiveram em contacto com o meio adverso.

O estudo do dano em todas as placas foi feito com recurso a ambos os sistemas de C-Scan para, deste modo, observar os resultados obtidos por ambos os sistemas de C-Scan e compará-los. Dado o aumento da utilização de materiais compósitos, a obtenção de resultados válidos e de boa qualidade é um importante passo na evolução da tecnologia de análise não destrutiva. Nesse caso, pode-se passar a utilizar o método de C-Scan no ar para inspeccionar materiais compósitos nos casos em que exista susceptibilidade do material à água.

### **1.3. Organização**

No capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica, onde se fala do conceito de material compósito, reforços, mecanismos de falha e descreve-se o ensaio não destrutivo por C-Scan e os seus modos de funcionamento.

No capítulo 3 são descritos os materiais e os procedimentos utilizados. Fala-se do processo de fabrico das placas, dos ensaios de impacto e da análise não destrutiva por C-Scan.

No capítulo 4 são discutidos os resultados obtidos, fazendo-se uma pequena referência aos resultados dos ensaios de impacto e, falando em seguida dos ensaios obtidos através de C-Scan por imersão e de C-Scan no ar para todos os materiais analisados.

No capítulo 5 são abordadas as conclusões resultantes do trabalho desenvolvido.

No capítulo 6 são feitas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

## **2. MATERIAIS COMPÓSITOS**

### **2.1. O que é um compósito**

De acordo com Moura [2], um material diz-se compósito quando resulta da combinação de dois ou mais materiais distintos. Já segundo F.L. Matthews et al. [3], para além de ser uma mistura de dois constituintes ou fases, são necessários mais três critérios para definir um material compósito, sendo o primeiro que ambos os constituintes têm que estar presentes em proporções razoáveis, ou seja, a percentagem de cada um tem que ser superior a 5%. O segundo critério apresentado é que as fases do compósito têm que ter propriedades bastante diferentes de modo a que as propriedades finais do compósito sejam diferentes de cada uma das suas fases independentemente. Dado que existem também materiais compósitos naturais de que são exemplo a madeira e os ossos, o terceiro e último critério é que, um compósito feito pelo Homem é obtido misturando as suas fases de várias formas.

Os materiais compósitos fibrosos são um bom exemplo de um material compósito. No caso deste tipo de material, são dispostas fibras num outro material, geralmente uma resina, que se designa por matriz, sendo que as fibras são denominadas de reforço, pois vão contribuir para melhorar certas características da matriz, nomeadamente a rigidez.

Por norma, os compósitos de matriz cerâmica são os que possuem os valores mais elevados de tensão de ruptura mas, devido à sua fragilidade, a sua aplicação pode ser desaconselhada. Os compósitos de matriz polimérica, no entanto, apresentam, geralmente, a situação inversa, pois apresentam os mais baixos valores de tensão de ruptura, no entanto, devido às baixas densidades apresentadas geralmente por estes materiais, conseguem-se pesos bastante menores do que utilizando materiais ditos convencionais, como é o caso dos aços.

No caso compósitos de fibras longas, devido a serem fabricados por dispersão de fibras numa matriz, tendem a apresentar muito boas características numa, ou até duas direcções. Contudo, se forem solicitados numa direcção diferente daquelas em que se

encontram orientadas as fibras, as suas propriedades mecânicas podem decrescer drasticamente, pois nesta situação o material de reforço não está a suportar as solicitações a que o material se encontra sujeito, daí que não se utilizem frequentemente materiais compósitos para aplicações estruturais como as vigas de suporte de uma estrutura.

Os materiais compósitos podem ser classificados de várias maneiras diferentes, sendo as mais comuns quanto à forma e quanto à natureza da matriz.

Classificando-os quanto ao tipo de matriz, os materiais compósitos dividem-se em três grandes grupos, sendo eles os compósitos de matriz polimérica, os compósitos de matriz metálica e os compósitos de matriz cerâmica.

Quanto à forma, os materiais compósitos podem-se designar por compósitos de partículas ou por compósitos de fibras, sendo que as fibras podem ser contínuas ou descontínuas.

Uma liga metálica por exemplo, apesar de ter vários constituintes, não pode ser considerada um material compósito, dado que é uma mistura homogénea de várias fases líquidas que, após solidificarem, criam uma liga sólida homogénea. No entanto, o betão armado pode ser considerado um material compósito pois é constituído por uma matriz, neste caso o betão, e um material de reforço inserido na matriz, neste caso barras de aço que asseguram uma melhor resistência a solicitações de tracção por parte do material.

Os materiais compósitos podem ser multicamadas e, assim sendo, são compostos por empilhamentos sucessivos de camadas, geralmente unidireccionais, numa sequência bem definida. O número de camadas do empilhamento pode variar, assim como a orientação de cada camada, de modo a otimizar o comportamento do material quando solicitado.

Um material compósito não pode conter uma quantidade qualquer de reforço disposta sem regras havendo, por isso, algumas considerações a ter quanto à quantidade de reforço que se pode inserir num material compósito dado que, se inserirmos demasiado reforço podemos estar a piorar as propriedades mecânicas do material ao invés de as melhorar. Por outro lado, se não for inserido reforço suficiente, as propriedades obtidas podem não apresentar os melhoramentos pretendidos. No caso de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras (dado que este trabalho se vai focar essencialmente neste tipo de materiais), não se pode inserir reforço de tal forma que este ocupe um volume superior a 70% do volume total do compósito pois, se tal acontecer, vão

ocorrer problemas de contacto directo das fibras, o que, por sua vez, pode levar à ocorrência de dano da matriz.

Num material compósito, é dito que os esforços são suportados pelo reforço e pela matriz, no entanto, esta suporta uma parte muito pequena dos esforços a que o material está sujeito quando se encontra solicitado de acordo com as direcções em que foram dispostas as fibras, no caso de um compósito com reforço por fibras. A matriz é, geralmente, um material com baixas tensões de ruptura e que serve como aglutinante para o reforço, daí que, se o material for solicitado numa direcção diferente da de projecto, isto é, uma direcção diferente daquelas em que foram orientadas as fibras no caso de um compósito de fibras longas, vai normalmente apresentar propriedades mecânicas muito piores do que o esperado.

Comparando os materiais compósitos de matriz polimérica com ligas metálicas e analisando ambos os materiais em termos de tensão de cedência, rigidez e capacidade de alongamento torna-se especialmente complicado perceber qual é o benefício obtido ao aplicar materiais compósitos em vez de ligas metálicas dado que para valores semelhantes de tensão de cedência as ligas metálicas apresentam uma maior capacidade de alongamento. Mas, se olharmos para ambos os materiais em termos de densidade percebemos que os materiais compósitos de matriz polimérica apresentam valores mais baixos do que as ligas metálicas, o que significa que, para obter uma peça com a mesma resistência mecânica, conseguimos uma peça mais leve quando fabricada em materiais compósitos do que em ligas metálicas.

Como, para muitas aplicações como é o caso da indústria aeronáutica, o peso é um factor muito importante, a utilização de materiais compósitos ao invés de ligas metálicas ganha uma grande relevância.

## **2.2. Reforço**

Dentro do reforço, como já foi anteriormente referido, existem vários tipos, sendo as fibras um dos mais comuns, podendo estas ser de origem orgânica ou sintética, sendo estas últimas as mais utilizadas.

Os tipos de fibras mais recorrentemente utilizados como reforço em materiais compósitos são as fibras de vidro, as fibras de aramida (genericamente designadas por

Kevlar<sup>®</sup>, embora este seja um nome comercial pertencente à DuPont) e as fibras de carbono.

As fibras de vidro encontram-se divididas em vários grupos consoante as suas propriedades devido ao facto de o vidro ser um material amorfo, ou seja, não-cristalino, sem microestrutura definida e cujas propriedades dependem fortemente da composição e acabamento superficial.

Dos vários tipos de fibras de vidro, as mais utilizadas comercialmente são as fibras de vidro dos tipos E, S e R, sendo as duas últimas muito usadas na indústria aeronáutica devido a serem produzidas a partir de vidros de alta resistência e, assim, apresentarem boas propriedades mecânicas [4].

As fibras de aramida são produzidas a partir de poliamidas aromáticas, podendo ser vistas como um nylon com grupo extra de anéis de benzeno na cadeia polimérica, o que lhes vai conferir uma maior rigidez [5].

Dentro das fibras de aramida existem dois tipos, sendo eles as fibras standard, que são utilizadas em materiais de baixo coeficiente de atrito e em cabos, e as fibras de elevado módulo, que são utilizadas em coletes à prova de bala e em cascos de navios por exemplo.

No caso das fibras de carbono, estas são aplicadas em compósitos de elevado desempenho mecânico e subdividem-se em dois grandes grupos, sendo eles as fibras de carbono propriamente ditas, onde se enquadram as fibras com uma composição percentual de carbono entre 80% a 95%. O outro grupo é o das fibras de grafite, que podem ter uma composição percentual de até 99% de carbono [2].

Ainda sobre as fibras de carbono, estas podem ser também classificadas de acordo com a sua resistência mecânica, subdividindo-se em cinco grandes grupos (fibras de módulo ultra elevado, fibras de elevado módulo, fibras de módulo intermédio, fibras de baixo módulo e fibras de elevada resistência) que têm também em conta outros factores como o seu módulo de elasticidade [6]. Este tipo de fibra apresenta uma característica importante, que é o facto de ter um coeficiente de expansão negativo ou quase nulo, sendo que, se houver uma cuidadosa conjugação entre a matriz e a fibra pode levar à obtenção de materiais com coeficiente de expansão nulo, o que para algumas aplicações aeroespaciais e de óptica é de importância capital.

Existem ainda outros tipos de reforço menos utilizados como as fibras de boro e as fibras de poliéster que vão ser apenas mencionados devido à sua baixa aplicabilidade actual.

Este trabalho incide sobre compósitos cujo reforço é maioritariamente feito com fibras de carbono, sendo também utilizadas fibras de aramida.

Os reforços podem-se apresentar de várias formas como o *roving*, ou seja, bobines de filamentos contínuos enrolados helicoidalmente, ou mantas, em que as fibras são distribuídas aleatoriamente e ligadas com um aglutinante especial que lhe confere estabilidade e é, normalmente, solúvel na impregnação. Existem também tecidos 2D ou 3D, que consistem na ligação entre feixes de fibras longas de reforço para aplicações que exigem elevadas propriedades mecânicas, os tecidos 3D distinguem-se dos tecidos 2D por terem também fibras orientadas na direcção da espessura, algo que os tecidos 2D não possuem [2].

Os reforços podem ainda apresentar-se na forma de malhas, que são produzidas ligando sucessivamente camadas de fibras alinhadas sendo as camadas consecutivamente cosidas em conjunto, entrelaçadamente, o que fica normalmente mais caro do que as mantas devido a possuir uma resistência específica mais elevada [7].

Por fim, existem também as pré-formas, que podem resultar do corte e sobreposição manual de mantas ou da projecção de fibras e um aglutinante sobre uma armação perfurada.

Ainda relativamente aos reforços, os materiais compósitos podem conter também nano-reforços, que, como o próprio nome indica, a utilização de um nano-reforço num material compósito pode dar-se através da dispersão de partículas muito pequenas, na ordem dos nanómetros ( $1 \text{ nanómetro} = 1 \times 10^{-9} \text{ metros}$ ), na matriz do material. A utilização de nano-reforços pode levar a que o material apresente uma melhoria significativa das suas propriedades mecânicas, como um aumento da resistência ao impacto. No entanto, a utilização destes deve ser feita de forma muito cuidada [2]. Em alguns trabalhos, demonstrou-se que para certos materiais compósitos a adição de alguns nano-reforços em nada alterou as suas propriedades mecânicas, tendo havido, inclusive, casos em que as propriedades mecânicas do material pioraram após a inserção dos nano-reforços. Para ambos os casos anteriores não há interesse em adicionar nano-reforços ao material compósito dado que, mesmo que as propriedades do material não piorem, com a adição do

nano-reforço vamos estar a encarecer a produção do material, o que do ponto de vista económico não faz sentido.

Nos casos em que a utilização de nano-reforços leva a melhorias das propriedades mecânicas dos materiais compósitos, estas podem estar relacionadas com o facto de as partículas de nano-reforço terem uma elevada difusibilidade devido ao seu muito pequeno tamanho, permitindo que estas tenham uma boa distribuição ao longo da matriz e, assim, criando condições de maior uniformidade no material como, por exemplo, uma melhor distribuição das tensões ao longo do volume do material, reduzindo a hipótese de haver concentração de tensões.

## **2.3. Mecanismos de Falha**

### **2.3.1. Impacto**

O impacto é definido como sendo um fenómeno de solicitação ou carregamento repentino, tipicamente dinâmico.

Um impacto ocorre quando um objecto é atingido por outro havendo o desenvolvimento de esforços num curto período de tempo, ou seja, a carga aplicada é instantânea. Através de ensaios de impacto podemos estudar o comportamento dos materiais quando estes se encontram sujeitos à aplicação de cargas dinâmicas e, no caso de impactos a baixa velocidade, quase-estáticas. Num ensaio de impacto não é só a força que conta, mas também a velocidade com que esta mesma força é aplicada, dado que a associação de força e velocidade dá uma energia. Neste tipo de ensaio podemos medir a quantidade de energia absorvida pelo material quando este é submetido à acção de um choque.

Segundo Morais [3], os impactos podem-se dividir em duas categorias conforme a sua velocidade:

- Impacto de baixa velocidade, caracterizado por uma extensa zona danificada e por uma resposta global da estrutura;
- Impacto de alta velocidade ou balístico, caracterizado por uma solicitação transitória que provoca uma resposta localizada, podendo haver ou não perfuração.

Nos impactos a elevada velocidade a resposta por parte do sistema é muito localizada, pois o tempo de impacto é tão curto que não permite que a tensão seja transmitida a zonas mais afastadas do ponto de impacto.

O estudo efectuado neste trabalho incide sobre impactos a baixa velocidade ( $v = 0,94$  m/s) e com energias igualmente baixas ( $E = 1,5$  J).

Os impactos de baixa velocidade são os que maior perigo apresentam pois produzem roturas da matriz que precedem delaminações entre camadas do material, zonas de dano mais extensas do que as produzidas pelos impactos a alta velocidade, nomeadamente entre camadas com orientações diferentes, o que, conseqüentemente, leva a uma grande redução da rigidez e resistência do material. Este tipo de impacto pode também levar à ocorrência de fissuração de fibras e afastamento na interface fibra-matriz. O dano introduzido no material após um impacto a baixa velocidade pode levar a uma diminuição de resistência à compressão do mesmo até 70% [8 e 9].

Outro dos factores que tornam os impactos de baixa velocidade mais perigosos do que os impactos de alta velocidade é que, os primeiros produzem defeitos que podem não ser visíveis a olho nu, como as delaminações referidas anteriormente, o que leva à necessidade de utilização de técnicas ultra-sónicas ou radiográficas de detecção de defeitos, entre outras, sem as quais o defeito poderia passar despercebido, podendo a peça impactada continuar em serviço sem ter condições de segurança para o fazer.

Para simular os impactos reais existem vários métodos de ensaio que podem ser agrupados em dois grupos principais, sendo eles os ensaios pendulares e os ensaios de queda de peso [2].

Dentro dos dispositivos pendulares incluem-se os ensaios Charpy e Izod que, como não vão ser alvo de estudo deste trabalho não iremos proceder ao aprofundamento da sua descrição. Por outro lado, o dispositivo de queda de peso é o mais universal e de mais fácil utilização pois não requer calibração de tantos parâmetros como os outros ensaios.

O ensaio de impacto por queda de peso consiste na queda de uma massa bem conhecida a partir de uma altura pré-determinada e que vai solicitar o provete colocado num plano horizontal. Neste tipo de ensaio, é necessário ter alguns cuidados como, por exemplo, com o ressalto do impactor caso não haja destruição total do provete. Para tal, algumas máquinas para a realização deste tipo de ensaio encontram-se equipadas com



equipamento anti-ressalto que impede que o impactor ressalte e, conseqüentemente, volte a impactar o provete.

Para ensaios deste tipo, a energia cinética é um factor importante. Uma determinada energia cinética pode ser obtida por duas vias, sendo uma delas uma velocidade elevada e uma massa baixa e a segunda exactamente o oposto, uma velocidade baixa e uma massa elevada. Enquanto no primeiro caso a solicitação a que o corpo vai estar sujeito é localizada (impacto a alta velocidade), no segundo caso a resposta vai-se dar ao longo de uma maior área do corpo (impacto de baixa velocidade). Deve-se ter muita atenção a estes parâmetros de modo a garantir que a solicitação que o corpo sofre durante o ensaio é semelhante às condições de serviço do mesmo.

O dano resultante de um impacto nos materiais laminados é a consequência da libertação/dissipação da energia de impacto no próprio material. Pode resultar em dano da matriz, rotura de fibra e descolagem fibra-matriz, separadamente ou em conjunto [10].

Diz-se que um material é resistente ao impacto se o mesmo tiver uma grande tenacidade, logo esta é uma característica de elevada relevância no que respeita a materiais sujeitos a impactos. No caso de materiais frágeis, estes dizem-se resistentes ao impacto se apresentarem uma elevada resiliência.

Define-se tenacidade como a capacidade de um material absorver energia até à ruptura. Já resiliência é definida como sendo a capacidade de um material absorver energia quando é deformado plasticamente e, seguidamente, recuperar essa energia.

Existem alguns factores como a velocidade e a temperatura que podem fazer variar o comportamento do material quando sujeito a impacto sendo que, para temperaturas baixas, assim como para velocidades mais elevadas, o material vai ter um comportamento mais frágil, no entanto estes aspectos não vão ser alvo de estudo deste trabalho.

Dos modos de falha que podem ocorrer nos compósitos laminados destacam-se dois tipos, sendo estes as falhas no plano que ocorrem devido às tensões no plano do material e as falhas fora do plano que ocorrem devido às tensões interlaminares [11].

### **2.3.2. Mecanismos de Falha no Plano**

A falha de um material devido a solicitações no plano pode dar-se devido a mecanismos de compressão ou de tracção.

Para um esforço de tracção, se for aplicado um carregamento na direcção em que as fibras se encontram orientadas, a falha pode-se dar essencialmente de três formas:

- Ruptura frágil – ocorre quando o provete se separa transversalmente com quebra de fibras;
- Arrancamento de fibras – pode acontecer quando existem variações de resistência da ligação fibra-matriz com mecanismos de transferência de carga da matriz para a fibra;
- Descolamento fibra-matriz ou corte da matriz – podem acontecer separadamente ou em simultâneo. A origem de ambos está no ajustamento de fissuras de diferentes secções numa fractura [11].

Se falarmos de compressão, M.Ashizawa [12] enuncia que a esta cria cinco modos de falha em laminados:

- Falha por tracção transversal induzida pelo efeito de Poisson;
- Falha por delaminação em compressão;
- Falha por encurvadura global;
- Falha por microencurvadura;
- Falha de resistência.

A compressão é um método muito severo de solicitação para os materiais compósitos laminados dado que tende a forçar a separação ou o deslocamento relativo das suas camadas constituintes.

### **2.3.3. Mecanismos de Falha Fora do Plano**

Os materiais compósitos laminados têm na possibilidade de orientação das fibras uma grande vantagem pois, deste modo estas podem ser colocadas de forma a maximizar a percentagem do carregamento que vão suportar se soubermos de antemão as solicitações a que o material vai estar sujeito, o que leva a que este tipo de materiais apresente muito boas características no plano. Mas, por outro lado, se sobrepusermos camadas diferentemente orientadas, vão haver tensões interlaminares que, por sua vez, vão ser um dos factores que ajuda a provocar delaminações quando o laminado é sujeito a uma solicitação externa.

### **2.3.3.1. Deformação da Matriz**

Dado que é a matriz que dá, essencialmente, forma ao compósito, convém abordar o tema da deformação sofrida pela mesma, aspecto que é muitas vezes descurado.

Uma boa parte da energia de impacto é absorvida pela matriz, o que leva a que seja importante que esta tenha uma rigidez e resistência ao impacto adequadas, sendo necessário que esta seja suficientemente flexível de modo a que consiga voltar à forma inicial após ser impactada. No entanto, não deve ser demasiadamente flexível, sob pena de levar a que o compósito tenha uma baixa rigidez.

### **2.3.3.2. Descolamento Fibra-Matriz**

O descolamento fibra-matriz influencia grandemente os modos de falha de grande parte dos materiais compósitos laminados dado que estes são influenciados pelo desempenho das interfaces fibra-matriz. Este processo depende muito da capacidade de aderência da superfície da fibra à matriz. Consegue-se melhorar a adesão fibra-matriz controlando muito cuidadosamente o processo produtivo por forma a garantir que a superfície da fibra produzida apresente as características requeridas ou, caso isto não se verifique, fazendo seguidamente um tratamento superficial adequado à mesma.

O descolamento fibra-matriz ocorre porque, geralmente, para um baixo valor de carga aplicada dá-se início a uma fissura de pequena dimensão no ponto de concentração de tensões da matriz. No entanto, quando esta fissura encontra a fibra é obrigada a parar ou a contornar a mesma sem que haja destruição da ligação fibra-matriz. Isto leva a que, à medida que a carga aumenta, haja o desenvolvimento de elevadas tensões de corte na interface até que seja atingida a tensão limite de corte interfacial, sendo que, quando este valor é atingido, vai-se dar localmente descolamento entre a fibra e a matriz que, posteriormente se vai estender ao longo de toda a fibra. [13]

Apesar de ser um modo de falha importante, devido a ser localizado e ocorrer no interior do material, é de difícil detecção quando são utilizadas técnicas convencionais.

O nível de incidência deste tipo de falha num material depende do nível de tratamento superficial aplicado às fibras, sendo que quanto maior for o nível de tratamento superficial aplicado menor será a tendência para a ocorrência deste fenómeno.

### **2.3.3.3. Fissuração da Matriz**

A fissuração da matriz é um modo de falha que, para além de ser comum nos materiais compósitos e de conduzir a um dano significativo, é muito localizado e, conseqüentemente, de difícil detecção.

A fissuração da matriz por si só, normalmente não leva à ruína do material, mas pode actuar como precursor de delaminações que, essas sim, podem levar a um dano suficientemente elevado para causar fractura do material.

No caso de o material ser sujeito a impacto, a fissuração da matriz começa, regra geral, na superfície contrária à de aplicação da carga propagando-se posteriormente ao longo da espessura do laminado.

Alguns estudos efectuados mostraram que ao melhorar as propriedades da matriz se consegue uma maior absorção da energia de deformação e uma maior resistência à fractura por corte, assim como uma redução do efeito da concentração de tensões [14,15].

Os compósitos de matriz termoplástica, por norma, apresentam menos fissuras e menor extensão de dano [16].

### **2.3.3.4. Delaminação**

A delaminação é um tipo de dano cuja análise e quantificação são muito difíceis, no entanto torna-se importante fazê-lo pois este é um modo de falha de grande relevância para os materiais compósitos, o que justifica a investigação que tem vindo a ser feita neste campo.

Segundo Choi et al. [17], existe uma sequência que leva à formação de uma delaminação em compósitos laminados submetidos a impacto, sendo esta:

- Dano inicial que se revela pela fissuração da matriz provocada pelas tensões de corte e de flexão;
- Seguidamente as fissuras propagam-se até às interfaces constituídas por lâminas com fibras orientadas em diferentes direcções;
- Conseqüentemente a delaminação começa a formar-se nas respectivas interfaces;
- Posteriormente criam-se mais fissuras na matriz que, uma vez mais, vão provocar delaminações.

A camada no interior do material onde ocorrem as fissuras é a principal responsável por ditar o tamanho da delaminação.

Takeda et al. [18] observaram que, no caso de não ocorrência de delaminação as fissuras tendem a desenvolver-se perpendicularmente às interfaces fibra-matriz e que, no caso de haver delaminação, estas tendem a formar-se obliquamente às interfaces entre as fibras e a resina. Tendo observado também que as delaminações, assim como as fissuras, se formam e propagam nas interfaces fibra-matriz.

Kim et al. [19] verificaram que as principais tensões responsáveis pelo surgimento de delaminação são as tensões normais, admitindo que as tensões de corte nas interfaces também contribuem para este fenómeno.

Segundo Liu et al. [20], a sequência de empilhamento desempenha um papel importante na área de delaminação.

Dois factores de elevada importância no estudo de delaminações são o estado de tensão e a resistência interlaminar do material. O estado de tensão é afectado pela sequência de empilhamento, sendo que a resistência interlaminar se relaciona com as propriedades de material como a resistência à fractura da matriz.

#### **2.3.3.5. Rotura de Fibras**

Dado que as fibras é que suportam a maior parte do esforço a que os laminados são sujeitos, a rotura das mesmas é de uma gravidade assinalável, podendo-se reflectir na perda de resistência e rigidez do laminado.

A rotura de fibras pode ocorrer por várias razões sendo, conforme já referido, o impacto uma delas.

Um impacto transversal ao plano das fibras pode levar à ocorrência de rotura localizada das mesmas, o que devido à existência de extremidades livres de fibras, leva a um aumento das tensões de corte na interface fibra-matriz que, por sua vez, conduz a um descolamento entre ambas.

#### **2.3.3.6. Combinação dos Diferentes Tipo de Falha**

Devido às suas características, dificilmente um modo de falha ocorre isoladamente.

Normalmente há uma tendência para os vários tipos de defeito interagirem entre si, podendo o aparecimento de um levar à ocorrência de outro. Mas, não quer isto

dizer que todos eles tenham a mesma importância pois, dependendo do material e da situação a que este esteja sujeito, um dos modos de falha assume normalmente a responsabilidade principal pela rotura do material.

#### **2.3.4. Sequência de Empilhamento**

Segundo Ross et al. [21], a sequência de empilhamento desempenha um papel preponderante na resistência ao dano dos compósitos laminados uma vez que dela depende a rigidez do material.

O defeito pode-se desenvolver do lado do impacto até ao lado oposto, no caso de um material rígido, ou do lado oposto ao impacto até ao lado do impacto se o material for flexível. A sequência de empilhamento desempenha aqui um papel importante pois, uma delaminação ocorre mais facilmente entre lâminas diferentemente orientadas do que entre lâminas com a mesma orientação, o que ocorre somente em casos muito excepcionais.

#### **2.3.5. Condições de Fronteira**

Um aspecto que também tem alguma relevância é a relação entre a condição de fronteira do material e a forma como este responde quando solicitado por impacto.

Tan et al. [22] verificaram que, enquanto placas simplesmente apoiadas sofrem apenas deflexão durante o impacto, placas encastradas sofrem deflexão e extensão, o que leva a que, conseqüentemente, as placas encastradas sofram um maior dano do que as placas simplesmente apoiadas.

### **2.4. Análise por ultra-sons**

Muitas vezes, após um material sofrer um impacto, não se consegue ver a o defeito existente a olho nu e, muito menos se consegue saber a extensão e forma do dano. É aqui que entra a análise por C-scan, pois permite, eventualmente, detectar o defeito existente no interior do material recorrendo à utilização de ultra-sons.

O C-scan é definido como sendo uma técnica de inspeção não destrutiva de materiais na qual um impulso de energia incide numa amostra. A medição do impulso

transmitido indica a atenuação do mesmo produzida pelo material. A atenuação do impulso é influenciada por vazios, delaminações, diferentes estados de cura da resina, a fracção em volume de fibras, a condição da interface fibra-matriz e qualquer inclusão presente [23].

Segundo a norma BS EN 1330-4:2000, C-Scan é definido como sendo a imagem resultante de uma inspecção ultra-sonora que mostra uma secção transversal do objecto de teste paralela à superfície de inspecção.

Existem, pelo menos, quatro modos de inspecção utilizando ultra-sons, sendo eles o A, o B, o C e o D-Scan.

Pelo método de A-Scan consegue-se obter informação unidimensional relativamente à quantidade de energia recebida em função do tempo. Este método permite obter informação sobre a profundidade a que se encontra o defeito através do tempo de propagação das ondas. O tamanho dos defeitos pode ser obtido analisando a amplitude do sinal recebido.

O B-Scan apresenta uma vista em corte transversal do corpo inspeccionado ao fazer um varrimento unidireccional através do material ao longo de uma linha, mostrando depois o índice de propagação no material ao longo da linha. Através deste método, obtém-se um corte paralelo à direcção de propagação do feixe ultra-sonoro, sendo este o método utilizado nos sistemas de diagnóstico médico, pois nestes sistemas é necessário visualizar secções [26].

O C-Scan permite obter uma vista planar do local e forma do defeito pois faz um varrimento perpendicular à direcção de propagação das ondas enquanto recolhe sinais referentes a cada ponto de um determinado plano, o que permite a obtenção de uma imagem através de um computador que controla também o seu movimento e adquire sinais.

O D-Scan apresenta uma vista perpendicular ao B e ao C-Scan. No entanto, tal como o C-Scan, o D-Scan apresenta geralmente dados recolhidos através da totalidade ou parte do volume de controlo. O D-Scan permite uma rápida discriminação de indícios ao longo de uma soldadura, apresentando a sua posição em profundidade a partir da superfície de varrimento.[25]

A inspecção por C-Scan é normalmente feita por imersão, ou seja, submergindo a peça a inspeccionar e utilizando a água como meio de propagação. No entanto, para a elaboração deste trabalho vai também ser utilizado um sistema de C-Scan no ar, ou seja, sem recurso a outro meio de acoplamento e, seguidamente vai-se fazer a

comparação dos resultados obtidos por ambos os sistemas a funcionar em transmissão para a detecção de defeitos em placas de materiais compósitos sujeitas a impacto.

Este processo pode funcionar por pulso-eco ou em transmissão, sendo que no primeiro caso é apenas necessária uma sonda em que esta emite e recolhe o sinal, enquanto no modo de transmissão são utilizadas duas sondas em que uma emite o sinal e a outra recolhe-o, sendo necessário que ambas as superfícies da peça estejam acessíveis de modo a fazer a inspeção, enquanto por pulso-eco é apenas necessário que esteja acessível um dos lados da peça a inspeccionar.

Na técnica de pulso-eco são recebidos sinais provenientes do defeito e do fundo da peça a ser inspeccionada, como se mostra na figura 2.1

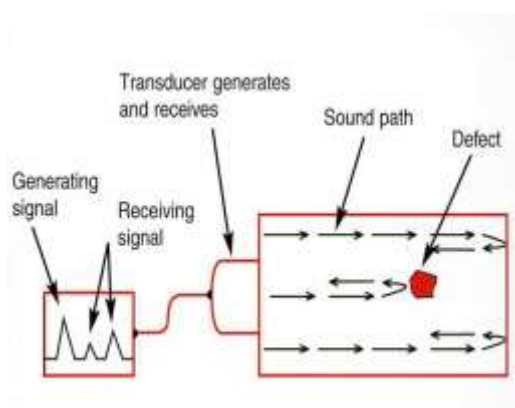


Figura 2.1- Trajecto do sinal em pulso-eco

No caso de o sistema funcionar em pulso-eco, o sinal recebido é a parte do sinal emitido que foi reflectido pelo defeito, caso não hajam outras reflexões de sinal. Por outro lado, quando o sistema funciona em transmissão, o sinal recebido é a parte do sinal que atravessou toda a espessura do material e chegou ao transdutor que está a receber o sinal, podendo também ser recebidos sinais duplamente reflectidos, por exemplo, um sinal que seja reflectido pela superfície inferior da peça e volte a ser reflectido pela superfície superior.

No método de transmissão, são utilizados dois transdutores, um que funciona como emissor e outro que funciona como receptor, sendo medido o sinal que atravessa completamente a peça. Ao atravessar a peça o sinal vai sofrer uma atenuação, sendo que, no caso de existir um defeito no interior da peça a atenuação do sinal vai ser maior, pois este vai ter que atravessar uma descontinuidade, necessitando para isso de uma maior quantidade de energia. Como, neste caso, o sinal vai atravessar a toda a peça, ao funcionar



desta maneira, não se consegue determinar a profundidade a que se encontra o defeito, ao contrário de quando se faz a inspeção por pulso-eco, pois aí, devido a o sinal ser reflectido quando atinge o defeito, conseguimos determinar a profundidade a que este se encontra no material.

Através das figuras 2.2 a e b podemos ter uma ideia de como se processa a inspeção feita pelo método de C-Scan em transmissão.

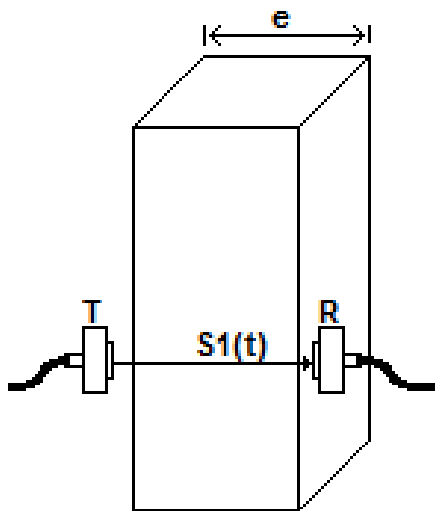


Figura 2.2a- Sistema em transmissão

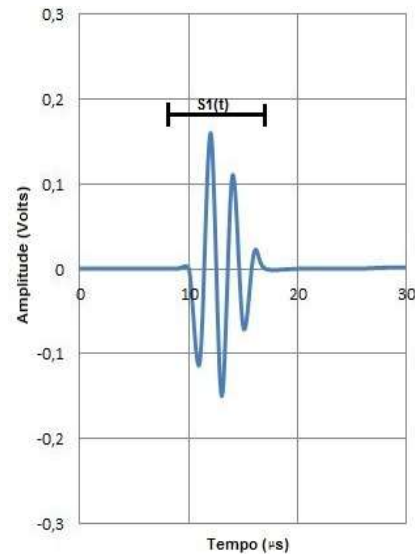


Figura 2.2b- Sinais recebidos em transmissão

A necessidade de utilização da inspeção por C-Scan sem recurso a água surge da elevada aplicabilidade que os materiais compósitos têm actualmente, sendo que algumas peças podem ser susceptíveis de degradação quando na presença desta.

O método de C-Scan no ar apresenta no entanto algumas desvantagens como a maior limitação a nível da frequência utilizada. Segundo Wang et al. [27], nos materiais compósitos as ondas sofrem uma grande dispersão que resulta na dissipação de uma parte da energia incidente no material. De acordo com Batra [24], a propagação das ondas ultrasónicas num material heterogéneo, como os compósitos, sofre perdas de energia por dispersão, podendo estas perdas ser causadas por variações espaciais das propriedades do material. Assume-se que a atenuação de um sinal que se propaga ao longo de um material que provoca tal dispersão é dependente da frequência, definindo-se pela equação 2.1:

$$\alpha(f) = \alpha_0 f^n \quad (2.1)$$

Em que  $\alpha_0$  e  $n$  são características do material [24].

A transmissão de ondas mecânicas no interior dá-se devido à vibração das partículas dos materiais e ocorre mais facilmente quando estes são mais homogêneos, pois a transmissão de movimento das partículas de umas para as outras dá-se com maior facilidade quanto mais próximas estas estiverem entre si.

Quando um material não contém defeitos, a onda é transmitida com maior facilidade do que quando o material tem um defeito no seu interior, pois os defeitos vão originar uma descontinuidade que, por sua vez, vai gerar uma atenuação do sinal devido à maior dificuldade da transmissão do movimento das partículas e à maior reflexão originada pela existência de uma heterogeneidade. É com base nesta atenuação que o C-Scan detecta a presença de defeitos no interior da peça.

## 3. MATERIAIS E PROCEDIMENTO

### 3.1. Materiais Utilizados

Neste trabalho foram utilizados materiais compósitos laminados reforçados com fibras de carbono que foram submetidos a impactos sucessivos. Estes materiais foram analisados por C-Scan por imersão e no ar quer antes, quer após cada impacto, de modo a observar os defeitos neles existentes e a sua evolução a fim de comparar ambos os sistemas C-Scan. Desta forma, pretendia-se verificar a qualidade dos resultados obtidos por C-Scan no ar, dado que o sistema de C-Scan por imersão utilizado já no âmbito de vários trabalhos.

Como complemento ao trabalho realizado, foram também utilizados outros materiais compósitos laminados reforçados com fibras de aramida e materiais com reforço de fibras de carbono com uma disposição diferente dos primeiros. O objectivo da utilização destes materiais foi verificar a diferença do defeito obtido após impacto nestes depois de terem estado imersos em meios agressivos durante um certo período de tempo.

Foram ainda utilizados laminados híbridos de carbono/Kevlar<sup>®</sup>/carbono contendo uma certa percentagem de nanoclays. Deste modo pretendia-se avaliar a diferença de dano ocorrido nos materiais com e sem nanoclays de modo a verificar se é ou não vantajosa a sua inclusão neste tipo de materiais.

#### 3.1.1. Placas de carbono-epóxico $[0_i;90_i]_s$

De modo a comparar os dois sistemas C-Scan usados neste trabalho, foram utilizadas inicialmente placas de compósito laminado de carbono-epóxico com orientação  $[0_i;90_i]_s$  cujas características se mostram na tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Placas carbono-epóxico  $[0_i;90_i]_s$ 

Nome da placa	Nº de camadas	Orientação	Espessura [mm]
8_2	8	$[0_2;90_2]_s$	1,2
12_2	12	$[0_3;90_3]_s$	1,8
16_4	16	$[0_4;90_4]_s$	2,4
20_3	20	$[0_5;90_5]_s$	3,0
20_4	20	$[0_5;90_5]_s$	3,0

Dado que o processo de fabrico pode influenciar as propriedades do laminado, ou seja, este pode não ficar homogéneo, as suas propriedades podem variar ao longo do mesmo. Estas placas foram fabricadas pelo processo de autoclave em vácuo, que combina a moldação por pressão com a moldação por vácuo, tendo como objectivo eliminar alguma bolsa de ar que eventualmente possa estar contida no laminado.

Este é um processo que se aplica para fabricar compósitos laminados de elevado desempenho e sistema de fibras-resina epóxida como é o caso do material em estudo.

As placas utilizadas tinham dimensões 100 x 100 [mm], no entanto não foram fabricadas com estas dimensões, foram fabricadas com 300 x 300 [mm], tendo sido cortadas posteriormente.

Para efectuar o corte das placas foi utilizada uma serra de disco com rebordo diamantado e com ranhuras representada na figura 3.1.



Figura 3.1 - Serra de disco de dentes diamantados

A utilização de ranhuras serve para que ocorra dissipação de calor durante o processo de corte, sendo que o rebordo diamantado se utiliza para tentar que o corte fique o

mais perfeito possível sem que este induza defeitos tais como o arrancamento de fibras que poderia levar ao enfraquecimento do laminado.

Após o corte, e antes de serem impactadas pela primeira vez, as placas foram inspeccionadas por C-Scan, tendo-se verificado que as mesmas não continham qualquer defeito como delaminações.

As propriedades mecânicas gerais das placas foram obtidas pela Professora Ana Paula Amaro [28] e encontram-se apresentadas na tabela 3.2:

**Tabela 3.2 – Propriedades das placas carbono-epóxico  $[0_i;90_i]_s$**

<b>E1 [MPa]</b>	<b>E2=E3 [MPa]</b>	<b>G12=G13 [MPa]</b>	<b>G 23 [MPa]</b>	<b><math>\nu_{23}</math></b>	<b><math>\nu_{13} =</math> <math>\nu_{12}</math></b>	<b>YT [MPa]</b>	<b><math>\sigma_i</math> [MPa]</b>
101377	8396	5641,6	3200	0,52	0,3344	11,164	60,86

Estas placas foram impactadas várias vezes com 1,5 J e foi feito um estudo da evolução do defeito apresentado após cada impacto.

### 3.1.2. Compósitos imersos em meios agressivos

Neste trabalho, para além da placas de carbono-epóxico com orientação  $[0_i;90_i]_s$ , foram também estudados os defeitos que surgiam em placas de materiais compósitos laminados sujeitas a impacto após imersão em meios agressivos. Para tal, foram utilizados materiais compósitos de carbono/epóxi e Kevlar<sup>®</sup>/epóxi.

A constituição destes laminados é apresentada na tabela 3.3:

**Tabela 3.3 – Composição Laminados imersos em meios agressivos**

<b>Laminados</b>	<b>Matriz</b>	<b>Endurecedor</b>	<b>Fibra</b>
Carbono/epóxi	Resina epóxi AMPREG 22 (*) (1,147 g/m <sup>2</sup> )	AMPREG 22 Hardener Standard (**)	Carbono (200 g/m <sup>2</sup> )
Kevlar <sup>®</sup> /epóxi			Kevlar <sup>®</sup> (200 g/m <sup>2</sup> )

(\*) Fornecido pela SP Company

(\*\*) Percentagem em peso do respectivo valor da resina mais endurecedor.

Para fabricar estes laminados as nove camadas de tecido foram impregnadas uma a uma, manualmente, de modo a promover uma distribuição uniforme da matriz no tecido. Na face superior era colocada uma película plástica perfurada e uma manta em

tecido absorvente sendo, posteriormente, o conjunto colocado num saco selado com silicone e sujeito a vácuo durante quarenta e oito horas. O fabrico dos laminados foi concluído com uma cura, ainda em vácuo, num forno à temperatura de  $45 \pm 2$  [°C] durante quarenta e oito horas.

Tal como os laminados de carbono-epóxico  $[0_i;90_i]_s$ , estas placas não foram fabricadas com as dimensões necessárias para as testar, tendo sido produzidas com dimensões  $2000 \times 500 \times 3$  [mm], sendo posteriormente cortadas em provetes com  $100 \times 100$  [mm].

Por forma evitar que ocorressem defeitos, como delaminações, durante o processo de corte das placas, este foi semelhante ao utilizado para as placas de carbono-epóxico  $[0_i;90_i]_s$ .

Estas placas foram imersas em diferentes meios agressivos, mantendo-se sempre uma como amostra de controlo, de modo a que se pudesse comparar o efeito da solução agressiva com uma placa em condições ditas normais.

Depois de terem estado imersas durante vinte dias em soluções agressivas de Hidróxido de Sódio (NaOH) ou de Ácido Clorídrico (HCl) cujas descrições se apresentam na tabela 3.4. As placas foram impactadas com uma energia de 10 J por forma a criar um defeito visível à vista desarmada. Posteriormente, estas placas foram analisadas por C-Scan para verificar o defeito que surgia em cada uma delas e avaliar o efeito que o meio agressivo teve na resistência ao impacto das mesmas.

**Tabela 3.4 – Imersão em meios agressivos**

<b>Meio de imersão</b>	<b>Composição percentual em volume</b>	<b>Tempo de imersão</b>
NaOH15	15% NaOH + 85% Água	20 dias
NaOH35	35% NaOH + 65% Água	20 dias
HCl15	15% HCl + 85% Água	20 dias
HCl35	35% HCl + 65% Água	20 dias

### 3.1.3. Compósitos híbridos

Foi efectuado também o estudo do efeito da inclusão de nanoclays na resistência ao impacto de materiais compósitos híbridos de carbono/Kevlar<sup>®</sup>/carbono.

As placas de compósitos híbridos foram fabricadas com nove camadas, todas na mesma direcção, de tecido bidireccional Kevlar<sup>®</sup> 170-1000P (170 g/m<sup>2</sup>) e tecidos de carbono bidireccional 195-1000P (195 g/m<sup>2</sup>), por laminação manual (“hand lay-up”).

A sequência de empilhamento utilizada foi 3C+3K+3C (em que o algarismo representa o número de camadas usado, C = fibra de carbono e K = fibra de Kevlar<sup>®</sup>) e as dimensões globais das placas foram 330x330x2.1 [mm]. Foi usada uma resina epóxi SR 1.500 e endurecedor SD 2503, fornecido pela SICOMIN. O sistema foi colocado dentro de um saco de vácuo e foi aplicada uma carga de 2,5 kN, durante 24 horas, a fim de manter uma fracção de volume de fibra de espessura constante e laminado uniforme. Durante as primeiras 10 horas o saco permaneceu ligado a uma bomba de vácuo para eliminar as bolhas de ar existentes no composto. O pós-tratamento foi seguido de acordo com as especificações do fabricante (resina epóxi) num forno a 40 ° C durante 24 horas.

Os compósitos laminados com reforço por nanoclays Cloisite 30B foram produzidos pelo mesmo processo. A fim de melhorar a dispersão e a adesão da interface matriz / nanoclay, os nanoclays foram previamente submetidos a um tratamento especial apropriado para a resina epóxi.

A quantidade de nanoclays utilizada foi de 3% em peso.

## 3.2. Ensaio de Impacto

Os ensaios de impacto realizados no âmbito deste trabalho para as placas de carbono-epóxido  $[0_i;90_i]_s$  foram feitos com recurso a uma máquina de impacto da Instron, modelo CEAST 9350 ligada a um sistema de aquisição de dados e a um computador para fazer o tratamento dos dados obtidos. A máquina de impacto está representada na figura A1 do ANEXO A.

Esta máquina é uma torre de chão e possui uma gama de energia entre 0.59 J e 757 J. Contém também uma câmara pressurizada e térmica, frequência de aquisição na

ordem dos 2 MHz e possui um sistema de anti-ressalto que é muito importante para evitar que a peça seja impactada mais do que uma vez.

Esta máquina cumpre, entre outras, as normas ASTM D3763; ASTM D7136; ASTM D7192; Boeing BSS 7260; Airbus AITM 1.0010; ISO 6603; ISO 11343 e ISO 8256.

Os impactos foram realizados com impactor de ponta semiesférica, com massa de 3,4 kg (2,5 kg de pesos + 0,5 kg da estrutura de suporte + 0,4 kg do impactor), com uma velocidade de 0,94 m/s e uma altura de 45,051 mm de modo a obter uma energia de impacto de 1,5 J.

As placas foram analisadas após cada impacto, tentando-se garantir, dentro do possível, que a máquina fizesse todos os impactos na mesma zona de cada placa por forma a haver uma acumulação de dano nessa zona, para permitir o estudo correcto da evolução do dano em placas sujeitas a impactos sucessivos. Cada uma destas placas foi impactada 3 vezes, perfazendo um total de 15 impactos (5 placas).

As placas sujeitas ao meio agressivo foram testadas numa máquina de impacto IMATEK-IM10 (apresentada na figura A3 do ANEXO A) à temperatura ambiente e segundo o procedimento descrito na norma EN ISO 6603-2. Neste caso a energia aplicada foi de 10 J.

### **3.3. Inspeção não destrutiva**

Para analisar os danos apresentados pelas placas, de modo não destrutivo, por forma a poder impactá-las depois de cada inspeção, recorreu-se à técnica de C-Scan, tanto por imersão como no ar.

Estes ensaios foram feitos no Laboratório Materiais Electrónicos e Ultra-sons do DEEC da UC, sob a supervisão do Professor Doutor Mário Santos e com a assistência do Professor Doutor Jaime Santos.

Ambos os sistemas foram utilizados no modo de transmissão, recorrendo à utilização de dois transdutores, sendo que um fazia a emissão do sinal e o outro recolhia-o depois deste ter atravessado a placa, o que iria gerar atenuações de sinal que seriam tanto maiores quanto maior fosse o dano contido na placa.



As duas grandes diferenças entre os dois sistemas são o meio de propagação das ondas, que no sistema por imersão se faz em água e no outro se faz no ar, assim como as frequências utilizadas, sendo que o sistema por imersão pode utilizar frequências até aos 35 MHz, enquanto o sistema no ar vai até aos 400 kHz. Esta diferença de frequências pode levar a diferentes capacidades de detecção de defeitos nos materiais, sendo que, de trabalhos anteriores, se sabe que o sistema de C-Scan por imersão utilizado tem alguma dificuldade na detecção de materiais compósitos com fibras amorfas como fibra de vidro.

Como foi referido, na presença de defeitos como delaminações, ou diferentes condições da interface fibra-matriz, entre outros, o sinal iria sofrer uma atenuação que indicaria a presença de um defeito que apareceria posteriormente na imagem gerada pelo sistema. No entanto, a existência de outros factores como diferentes estados de cura da resina ou variações da espessura do material também iriam gerar uma atenuação de sinal que iria ser apresentada como um defeito na imagem gerada.

Os sistemas de C-Scan utilizados baseiam-se na propagação de ondas mecânicas nos materiais.

Nesta técnica, ondas ultra-sónicas são enviadas para o material, viajando através deste e sendo depois recebidas pelo mesmo ou por outro transdutor. A quantidade de energia e o tempo que esta demora a ser recebida pelo transdutor vão ser analisados para determinar a existência de defeitos. Este método pode ser afectado por várias propriedades do material como a espessura do compósito e a sua densidade, que podem levar a dificuldades na propagação do sinal [29].

Para a utilização do sistema de C-Scan por imersão recorreu-se a uma estrutura em acrílico desenvolvida no âmbito de outro trabalho anteriormente realizado naquele laboratório e que se mostra nas figuras A5 e A6 do ANEXO A. Esta estrutura permite utilizar o sistema em transmissão, pois recorrendo a ela podemos apoiar ambos os transdutores alinhados, podendo também apoiar a placa a estudar entre eles e, assim fazer o seu estudo.

Segundo Smith [30], se o defeito for muito pequeno comparativamente ao comprimento da onda, a parte da energia que vai ser reflectida é muito pequena, havendo dispersão de energia em todas as direcções, sendo o resto da onda transmitida.

Quando o sistema funciona em pulso-eco o sinal recebido é parte do sinal que é reflectida pelo defeito. Como iria haver uma pequena degradação das fibras, o sinal

reflectido iria ser muito pequeno, havendo também o facto de os materiais compósitos originarem uma elevada atenuação do sinal, o que poderia fazer com que o sinal não fosse detectado pelo sistema, daí que se tenha optado pela utilização do sistema em transmissão, pois o sinal transmitido iria ser muito maior que o sinal reflectido.

O sistema de C-Scan no ar utilizado pode ser visto nas figuras A4 e A5 do ANEXO A e é constituído por:

- Sonda-007CX AIRSCAN
- Transdutor emissor (400 kHz)
- Transdutor receptor (400 kHz)
- Plataforma móvel de dois eixos
- Computador de bancada (Windows 98® +LabVIEW® v5.1)

Este sistema, desenvolvido no âmbito de um trabalho por alunos do DEEC da UC, permite fazer um varrimento das peças a estudar ao longo dos eixos X e Y, gerando em seguida ficheiros de texto com um conjunto de pontos correspondentes ao sinal recebido. Este ficheiros iriam posteriormente ser tratados com recurso a MatLab® de modo a obter imagens que evidenciem os defeitos presentes na peça inspeccionada [31].

Para todos os ensaios realizados com este sistema foram utilizados os valores da tabela 3.5 em cada um dos eixos, variando os valores do ganho por forma a obter a melhor imagem possível, pois podiam existir variações da posição dos transdutores relativamente à peça, assim como alguma inclinação quer dos transdutores, quer do material a inspeccionar.

**Tabela 3.5 – Dados do C-Scan no ar**

<b>Eixo</b>	<b>Aceleração</b>	<b>Avanço</b>	<b>Resolução</b>
X	2,5 step/s <sup>2</sup>	3step/s	3 Pixéis
Y	2 step/s <sup>2</sup>	2step/s	2 Pixéis

O sistema de C-Scan por imersão pode ser visto na figura A2 do ANEXO A e é constituído por:

- Plataforma móvel de três eixos
- Transdutor emissor (20 MHz)
- Transdutor receptor (20 MHz)
- Computador de bancada (Windows 98® +PACWIN®)

O sistema de C-Scan por imersão foi utilizado para fazer um varrimento das peças ao longo dos eixos X e Y, embora também permitisse movimento segundo o eixo Z. Tal como acontece para o sistema C-Scan no ar, deste varrimento resultaram imagens através das quais foi possível ver a forma e o tamanho do defeito, sendo estas obtidas directamente pelo sistema, ou seja, sem recurso a tratamento para de outro tipo de ficheiro para obter a imagem.

Como se pode verificar, os dois sistemas usados são muito semelhantes, estando as principais diferenças no meio de propagação e nas frequências utilizadas.

Ambos os sistemas permitiam variar alguns dos parâmetros como a atenuação e o ganho do sinal, assim como o atraso relativo do sinal a visualizar e a largura da Gate, para que a detecção de defeitos fosse feita da melhor forma possível. Sendo que a alteração da largura da Gate é o parâmetro que permite definir a porção de sinal que vai ser processado pelo sistema.



## 4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 4.1. Ensaio de Impacto

Neste ponto vamos falar apenas das placas de carbono-epóxico  $[0_i;90_i]_s$ , dado que as outras foram disponibilizadas já depois de terem sido impactadas, não tendo acesso aos resultados destes ensaios.

As placas de carbono-epóxico  $[0_i;90_i]_s$  foram impactadas 3 vezes cada uma.

Os dados obtidos do primeiro impacto de cada placa encontram-se apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dado resultantes dos impactos

Placa	Tempo de contacto [ms]	F max [N]	Desl. Máx. [mm]	Energia dissipada [%]
8_2	8,48	1438,05	2,61	81,24
12_2	6,87	1454,91	1,86	75,14
16_4	5,23	1741,65	1,45	60,32
20_3	5,74	1610,46	1,61	58,38
20_4	5,82	1567,98	1,64	55,61

Podemos observar por esta tabela que o deslocamento máximo decresce com o aumento do número de camadas do laminado, havendo uma discrepância pois a placa de 16 camadas apresenta o menor deslocamento máximo quando seria espectável que fossem as placas de 20 camadas a apresentar esse valor. Esta variação pode-se dever a uma falha no sistema de aquisição de dados, ou a uma placa com propriedades acima da média.

Podemos ver no gráfico da figura 4.1, a variação da energia ao longo do primeiro ensaio de impacto para cada uma das placas em estudo. Este gráfico apresenta três zonas distintas, sendo elas uma primeira zona em que a energia cresce até atingir o valor máximo, uma segunda zona onde ocorre um decrescimento da energia aplicada à

placa, resultado da recuperação elástica do material, e uma terceira zona denominada de zona de planalto, ou de patamar, onde a energia varia muito pouco ou não varia de todo.

A energia de patamar corresponde à quantidade de energia de impacto que foi absorvida pelo laminado.

Quanto maior for a energia dissipada maior vai ser a energia absorvida pela placa e aqui, como seria de esperar a placa “8\_2”, que apresenta o menor número de camadas, é precisamente a que apresenta o maior valor de energia dissipada, o que também se verifica no gráfico da figura 4.1. Inversamente, uma das placas com o maior número de camadas, neste caso a placa “20\_4” com 20 camadas, é a que apresenta o menor valor de energia dissipada, logo é a que absorve a maior percentagem de energia durante o impacto.

Para os restantes impactos a tendência a verificar seria a mesma, portanto são apenas apresentados os relativos ao primeiro impacto de cada placa.

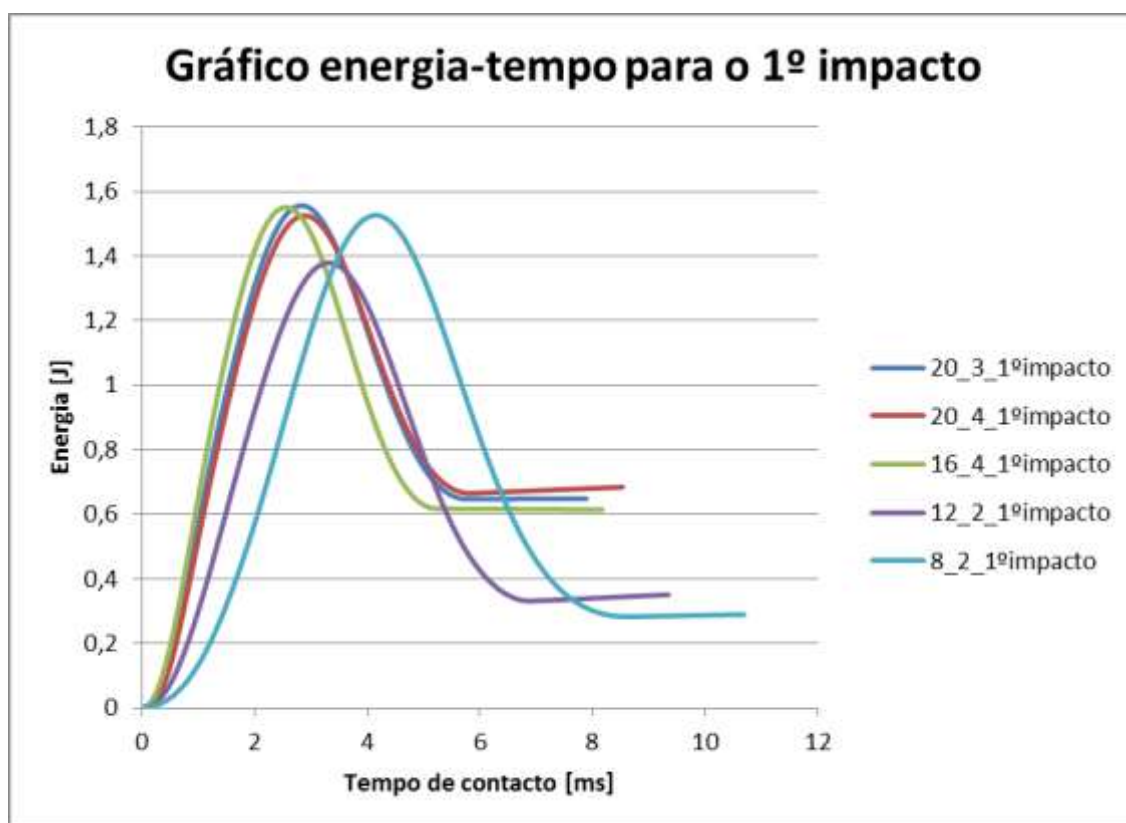


Figura 4.1 - Gráfico energia-tempo

## 4.2. Detecção de Defeitos

Nesta secção vamos apresentar os resultados obtidos por ambos os sistemas de C-Scan e analisar os mesmos para chegar a uma conclusão sobre a validade dos resultados obtidos pelo sistema de C-Scan no ar, mas também para averiguar como evolui o dano nas placas sujeitas a vários impactos.

Veremos também qual é a diferença de defeito nas placas submetidas a diferentes meios agressivos e impactadas posteriormente, assim como iremos comparar o tamanho dos defeitos obtidas em placas híbridas de carbono/kevlar<sup>®</sup>/carbono com uma pequena percentagem de nanoclays relativamente a placas do mesmo material sem nanoclays.

### 4.2.1. Placas de carbono-epóxico [0<sub>i</sub>;90<sub>i</sub>]<sub>s</sub>

Estas placas foram analisadas por ambos os sistemas de C-Scan antes de serem impactadas com o objectivo de averiguar se as mesmas continham algum defeito para posteriormente se proceder aos ensaios de impacto, pois caso as placas contivessem algum defeito que não fosse detectado, os resultados dos ensaios de impacto poderiam ser adulterados sem que se soubesse a razão.

Após análise por ambos os sistemas de C-Scan, através da qual não se verificou a existência de defeitos em qualquer das placas. Estas foram sujeitas a três impactos, tendo sido analisadas tanto por C-Scan por imersão, como também por C-Scan no ar, após cada impacto.

Importa também referir que uma das diferenças das imagens apresentadas por ambos os sistemas é que o sistema de C-Scan por imersão apresenta a imagem rodada de noventa graus no sentido horário relativamente à posição em que se encontra a placa, enquanto o sistema de C-Scan no ar cria uma imagem da peça na posição em que esta se encontra. Quer isto dizer que todas as imagens obtidas pelo sistema de C-Scan por imersão vão estar rodadas noventa graus no sentido horário em relação às imagens para a mesma peça obtidas pelo sistema de C-Scan no ar.

Através das figuras 4.2 a 4.9 relativas à placa “8\_2”, sendo as figuras 4.3, 4.5, 4.7 e 4.9 relativas ao sistema de C-Scan no ar e as figuras 4.2, 4.4, 4.6 e 4.8 relativas ao

sistema de C-Scan por imersão, podemos observar um aumento do dano após cada impacto na placa, podendo reparar também que o tamanho de defeito apresentado na imagem obtida por C-Scan no ar é um pouco mais pequeno do que o tamanho do defeito relativo ao mesmo impacto na mesma placa analisado pelo sistema de C-Scan por imersão. Esta pequena discrepância já era expectável, uma vez que o sistema de C-Scan no ar funciona com uma frequência mais baixa do que o sistema de C-Scan por imersão e, como tal, tem uma menor capacidade de detecção de defeitos. No entanto, esta diferença é pequena, sendo que o sistema apresenta imagens com boa resolução.

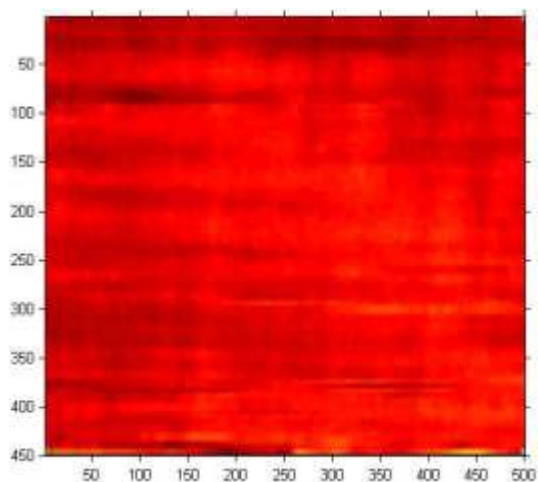


Figura 4.2 - Placa 8\_2 controlo C-Scan no ar

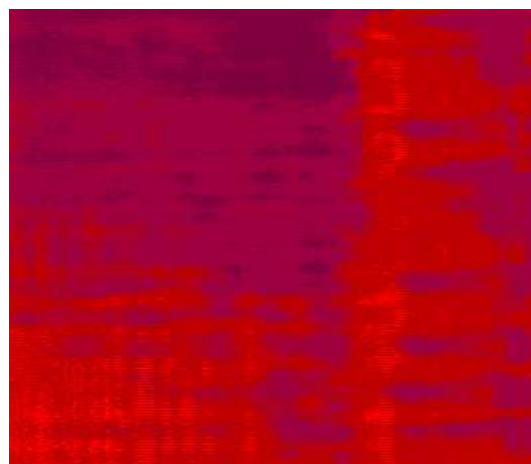


Figura 4.3 - Placa 8\_2 controlo C-Scan por imersão

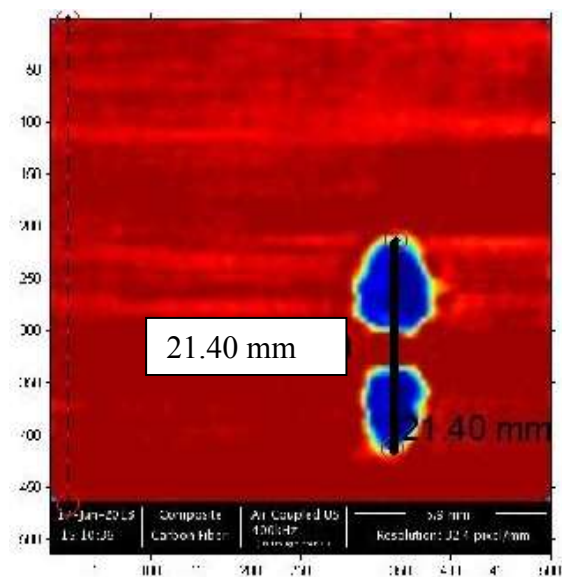


Figura 4.4 - Placa 8\_2 1º impacto ar

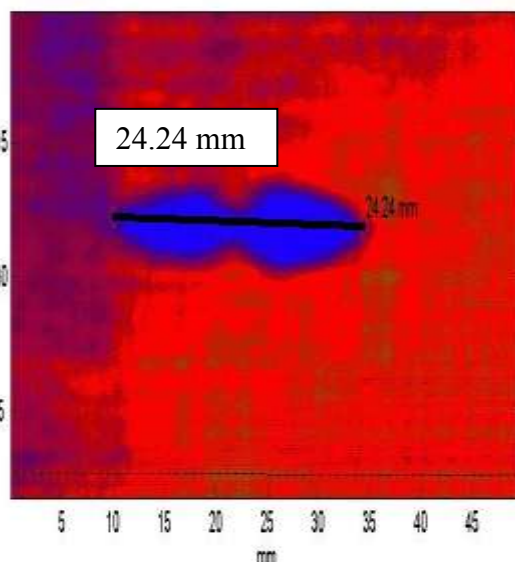


Figura 4.5 - Placa 8\_2 1º impacto imersão



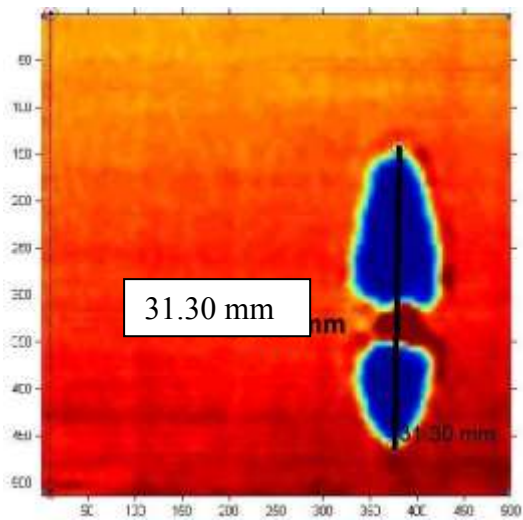


Figura 4.6 - Placa 8\_2 2º impacto ar

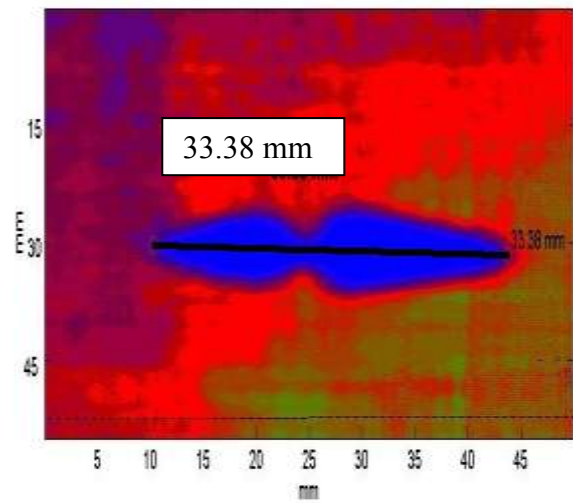


Figura 4.7 - Placa 8\_2 2º impacto imersão

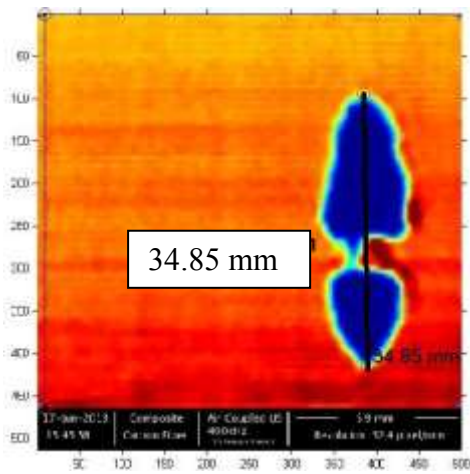


Figura 4.8 - Placa 8\_2 3º impacto imersão

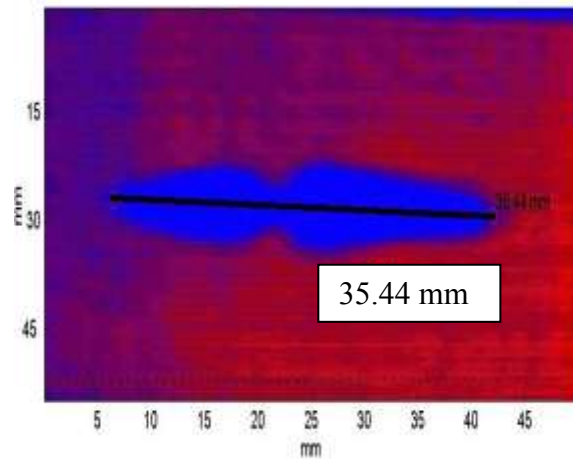


Figura 4.9 - Placa 8\_2 3º impacto

Pode-se verificar a evolução do dano com os sucessivos impactos na placa “12\_2” através das figuras 4.10 a 4.17, sendo as figuras 4.10, 4.12, 4.14 e 4.16 relativas ao sistema de C-Scan no ar e as figuras 4.11, 4.13, 4.15 e 4.17 relativas ao sistema de C-Scan por imersão.

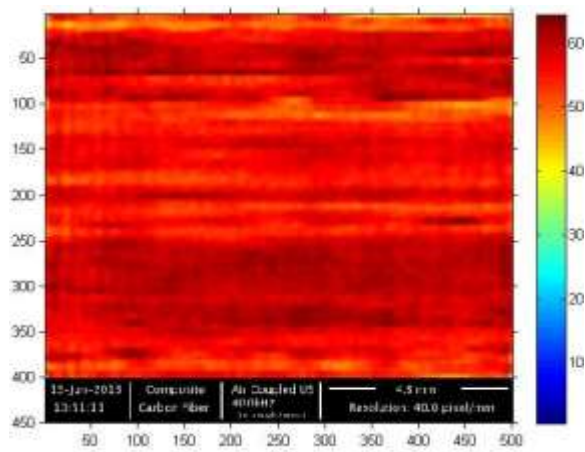


Figura 4.10 - Placa 12\_2 controlo imersão

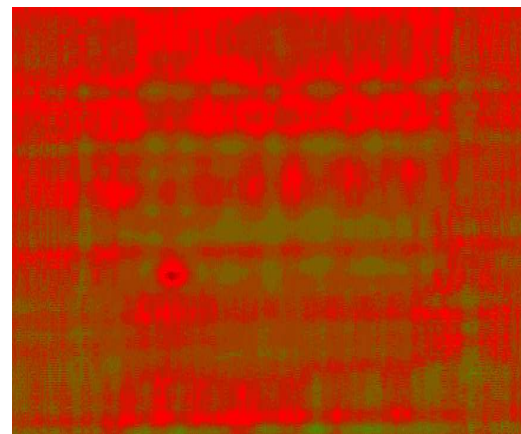


Figura 4.11 - Placa 12\_2 controlo ar

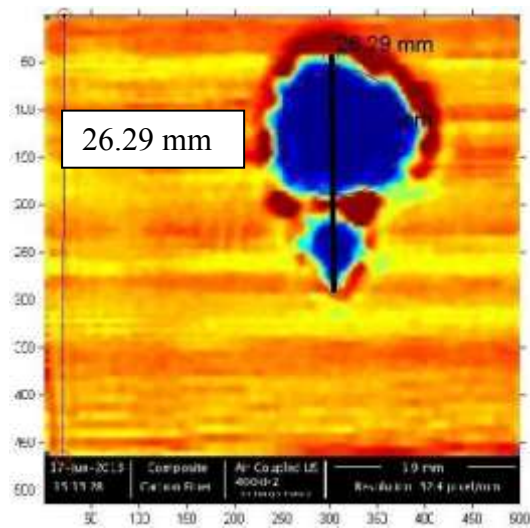


Figura 4.12 - Placa 12\_2 1º impacto imersão

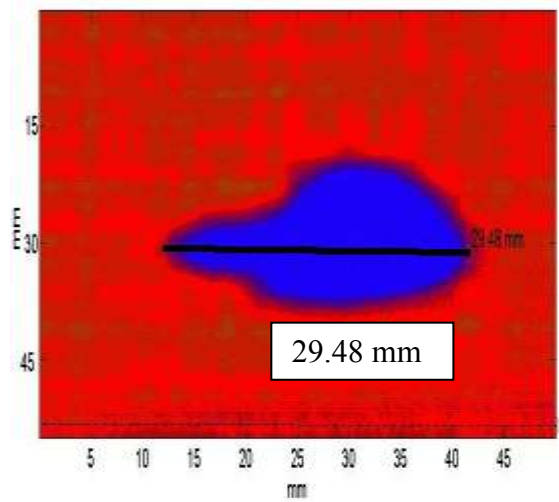


Figura 4.13 - Placa 12\_2 1º impacto ar

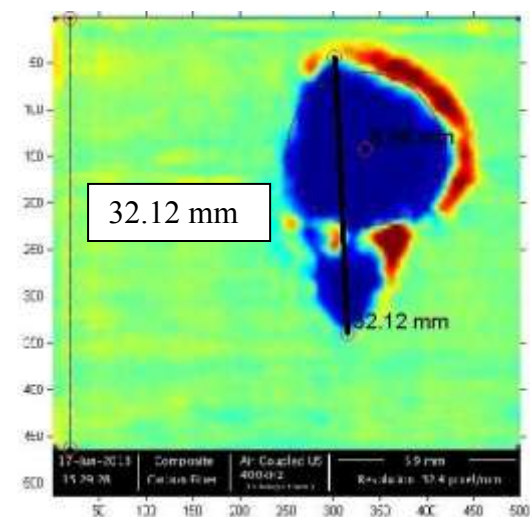


Figura 4.14 - Placa 12\_2 2º impacto imersão

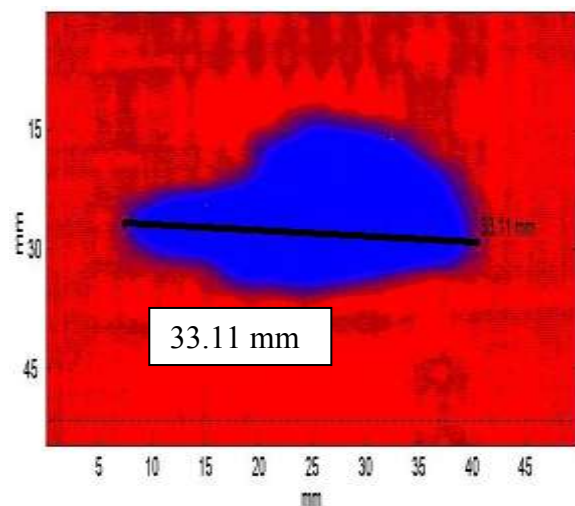


Figura 4.15 - Placa 12\_2 2º impacto ar

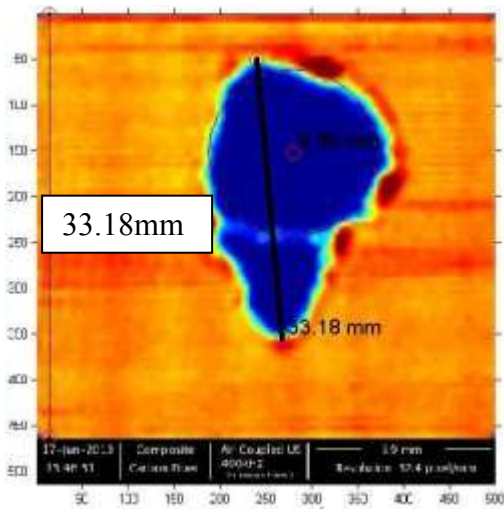


Figura 4.16 - Placa 12\_2 3º impacto imersão

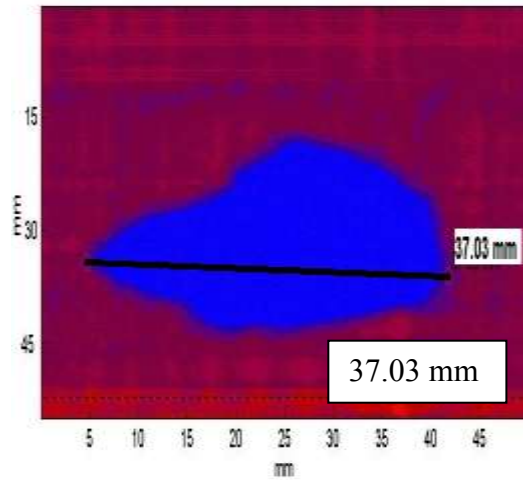


Figura 4.17 - Placa 12\_2 3º impacto ar

Pode-se verificar que há um aumento do dano à medida que o número de impactos cresce, ocorrendo um maior aumento do defeito de um dos lados, o que se pode associar ao facto de os sucessivos impactos poderem não ter sido feito exactamente no mesmo local, podendo ter existido um ligeiro desvio, o que levaria a que se verificasse o tal maior aumento de dano do lado para o qual se desviou o impacto. Este ligeiro desvio pode ter ocorrido devido ao facto de a máquina de impacto não ter um sistema de fixação das placas, o que levou a que o posicionamento das mesmas fosse feito visualmente, tentando-se posicionar as placas no mesmo local, embora isso seja quase inexequível.

Observando as figuras 4.18 a 4.25 é possível ver a forma como evolui o dano na placa “16\_4”, sendo as figuras 4.18, 4.20, 4.22 e 4.24 relativas ao sistema de C-Scan no ar e as figuras 4.19, 4.21, 4.23 e 4.25 relativas ao sistema de C-Scan por imersão. Através da análise de todas as imagens para as placas  $[0_i;90_i]_s$  é possível verificar que, o defeito aumenta após cada impacto. Nas figuras relativas às imagens do sistema C-Scan por imersão pode-se verificar uma variação de cor, o que se deve a uma inclinação dos transdutores relativamente à peça durante o ensaio.



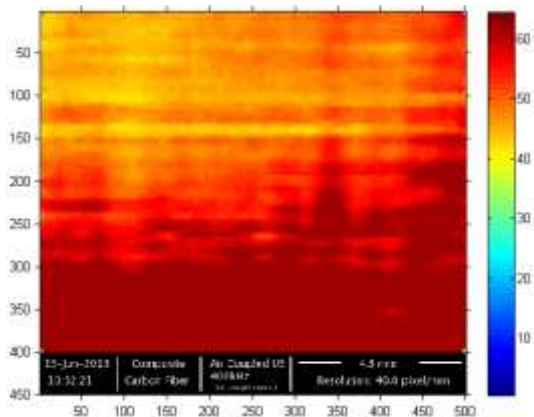


Figura 4.18 - Placa 16\_4 controlo imersão

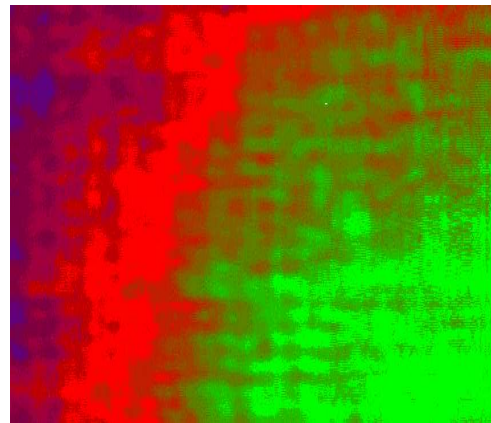


Figura 4.19 - Placa 16\_4 controlo ar

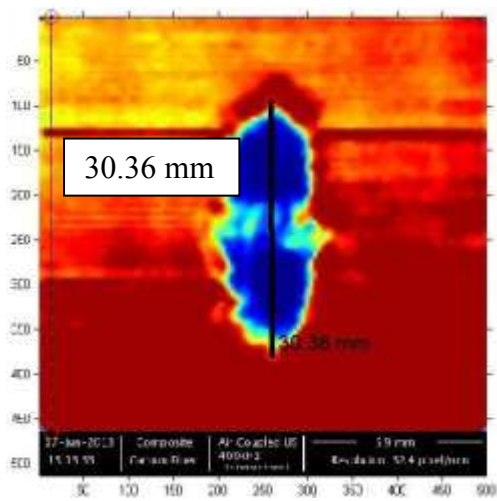


Figura 4.20 - Placa 16\_4 1º impacto ar

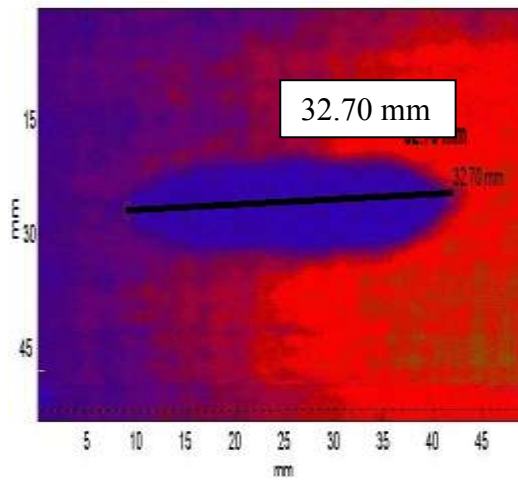


Figura 4.21 - Placa 16\_4 1º impacto imersão

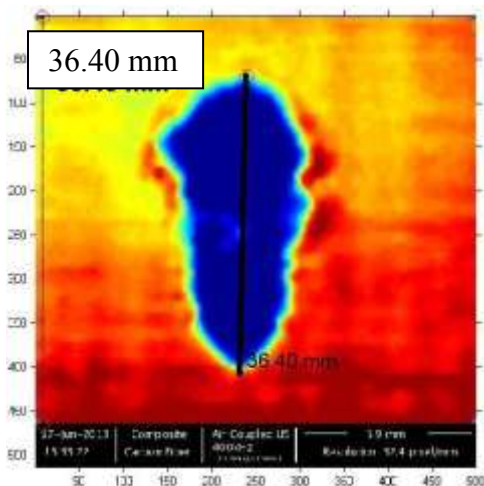


Figura 4.22 - Placa 16\_4 2º impacto ar

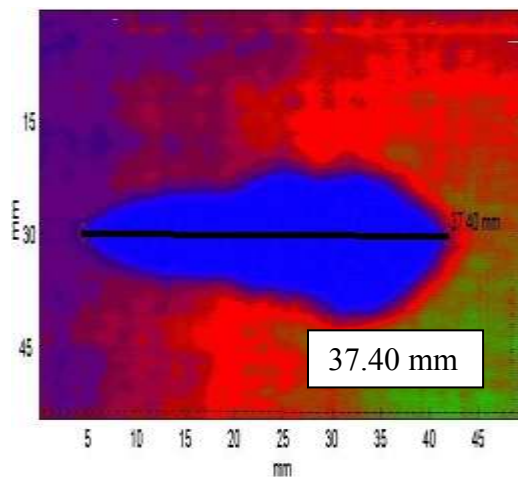


Figura 4.23 - Placa 16\_4 2º impacto imersão

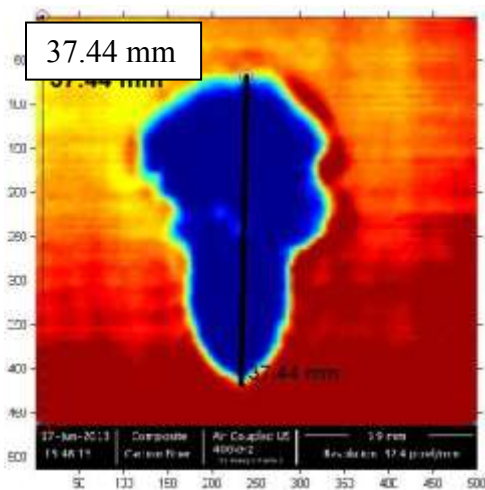


Figura 4.24 - Placa 16\_4 3º impacto imersão

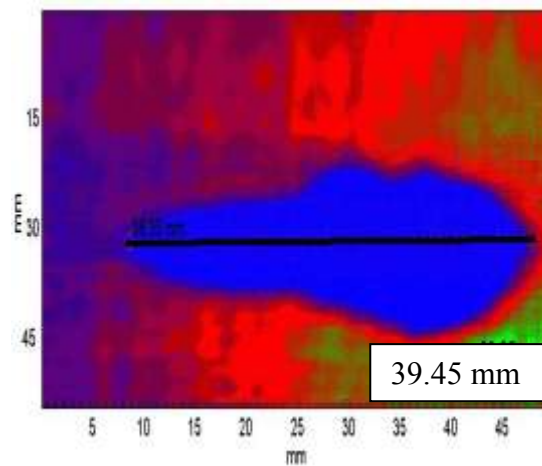


Figura 4.25 - Placa 16\_4 3º impacto ar

Verifica-se que ocorre um grande aumento do primeiro para o segundo impacto, havendo um aumento menor do segundo para o terceiro impacto, o que se pode justificar devido à diminuição da capacidade de absorção de energia por parte da placa de impacto para impacto, ou seja, deve-se ao acumular de dano.

Pode-se ainda verificar que, à semelhança do que se passou com a placa “12\_2”, ocorre um maior aumento do defeito de um dos lados, o que se pode associar também ao facto de os sucessivos impactos poderem não ter sido feito exactamente no mesmo local.

Através da análise das figuras 4.26 a 4.33 é possível ver a forma como evolui o dano na placa “20\_3”, sendo as figuras 4.26, 4.28, 4.30 e 4.32 relativas ao sistema de C-Scan no ar e as figuras 4.27, 4.29, 4.31 e 4.33 do sistema de C-Scan por imersão.

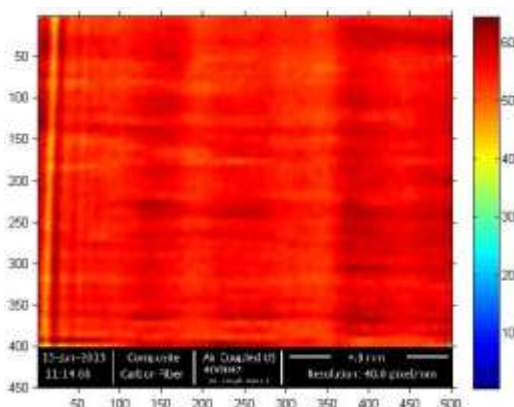


Figura 4.26 - Placa 20\_3 controlo imersão



Figura 4.27 - Placa 20\_3 controlo ar

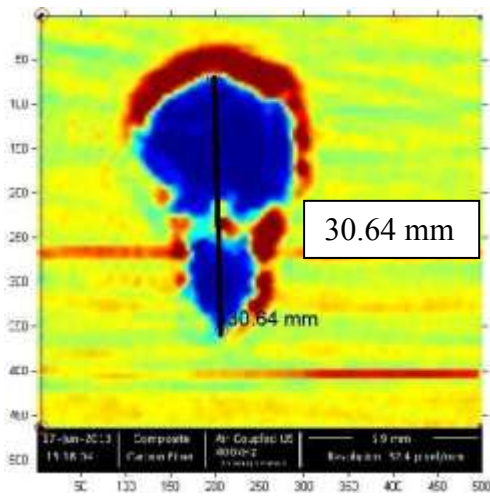


Figura 4.28 - Placa 20\_3 1º impacto imersão

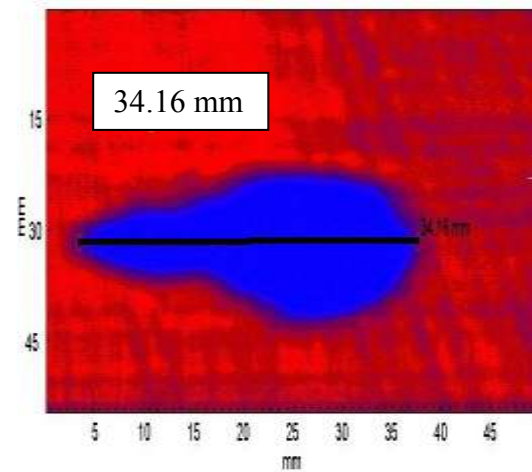


Figura 4.29 - Placa 20\_3 1º impacto ar

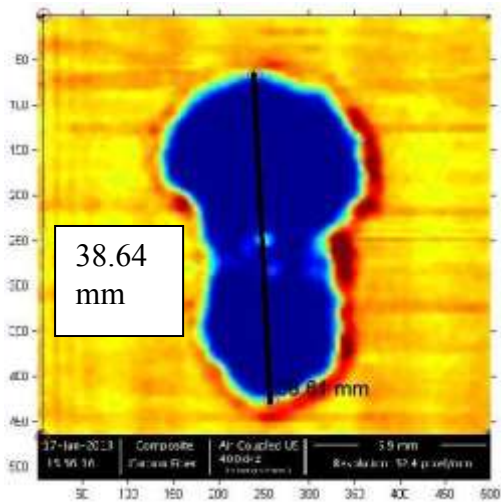


Figura 4.30 - Placa 20\_3 2º impacto imersão

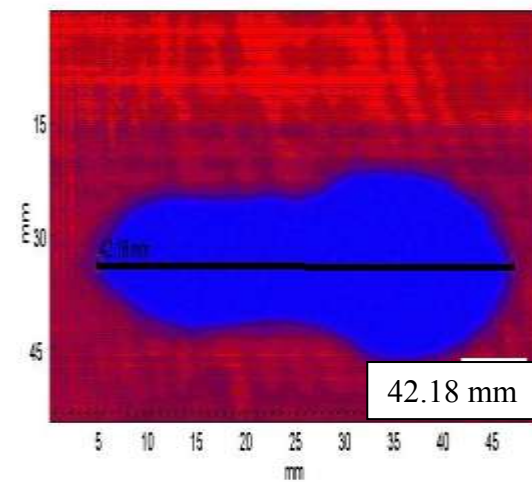


Figura 4.31 - Placa 20\_3 2º impacto ar

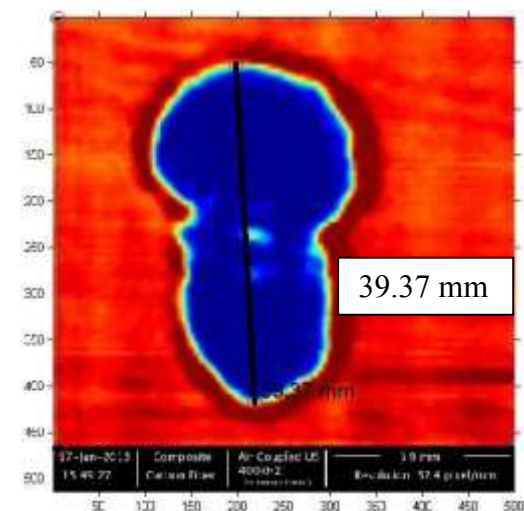


Figura 4.32 - Placa 20\_3 3º impacto imersão

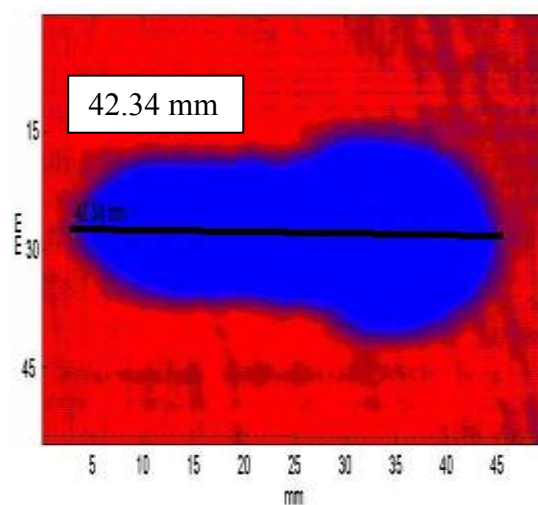


Figura 4.33 - Placa 20\_3 3º impacto ar

Verifica-se que existe uma evolução do defeito, sendo o defeito após o primeiro impacto maior de um dos lados do que do outro mas, nos impactos seguintes,



tende a evoluir para a forma comum dos defeitos detectados nos laminados após impacto, ou seja, tende a aproximar-se da forma de um amendoim, havendo um menor aumento do defeito do segundo para o terceiro impacto do que do primeiro para o segundo.

Na placa “20\_4”, o defeito final é algo semelhante ao da placa “20\_3” como seria de esperar, uma vez que estas duas placas foram obtidas da mesma placa inicial, sendo assim esperado que tivessem as mesmas propriedades. As diferenças verificadas podem ser atribuídas ao facto de os materiais compósitos serem materiais heterogéneos, ou seja, as suas propriedades variam de um local para o outro do material, o que vai por vezes causar algumas alterações de comportamento, como as verificadas ao longo deste estudo.

A evolução do defeito nesta placa pode ser verificada através das figuras 4.34 a 4.41, sendo as figuras 4.34, 4.36, 4.38 e 4.40 relativas ao sistema de C-Scan no ar e as figuras 4.35, 4.37, 4.39 e 4.41 relativas ao sistema de C-Scan por imersão.

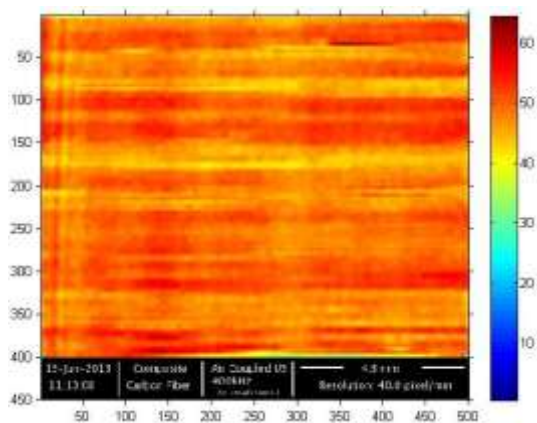


Figura 4.34 - Placa 20\_4 controlo imersão

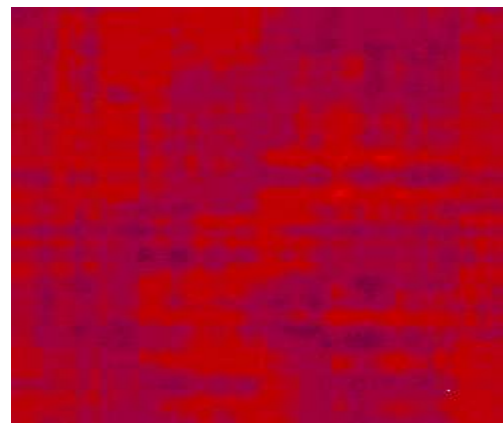


Figura 4.35 - Placa 20\_4 controlo ar

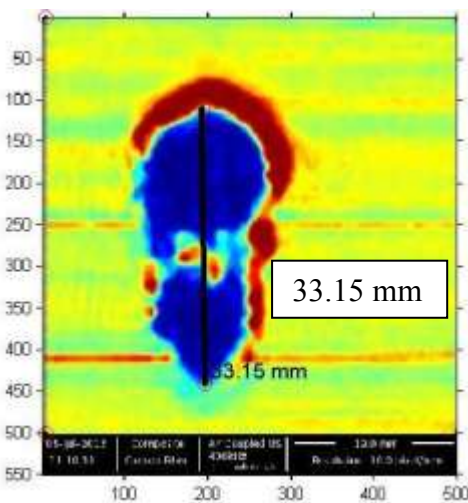


Figura 4.36 - Placa 20\_4 1º impacto ar

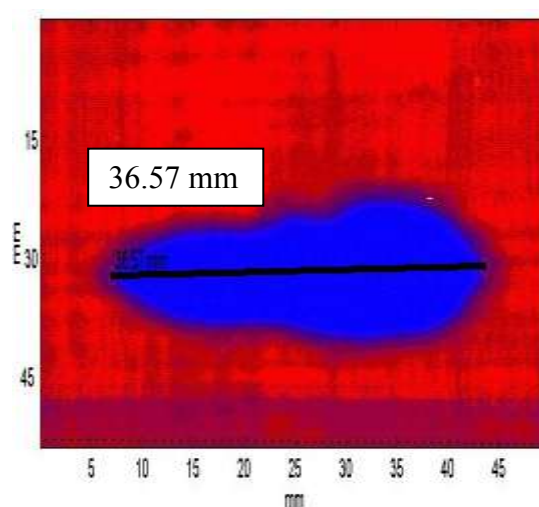


Figura 4.37 - Placa 20\_4 1º impacto imersão

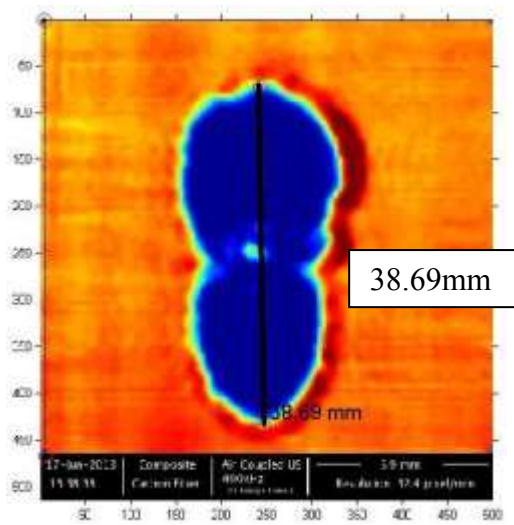


Figura 4.38 - Placa 20\_4 2ºimpacto ar

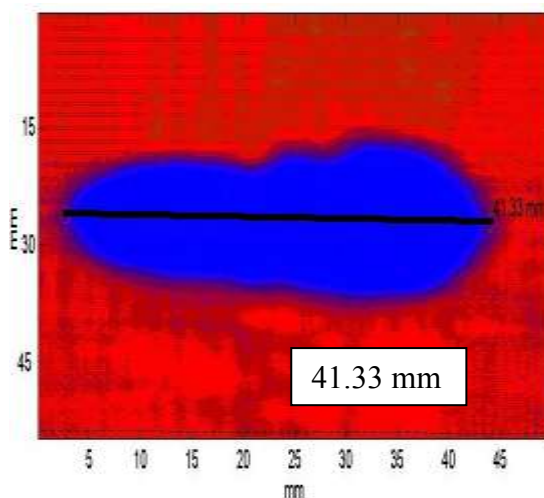


Figura 4.39 - Placa 20\_4 2ºimpacto imersão

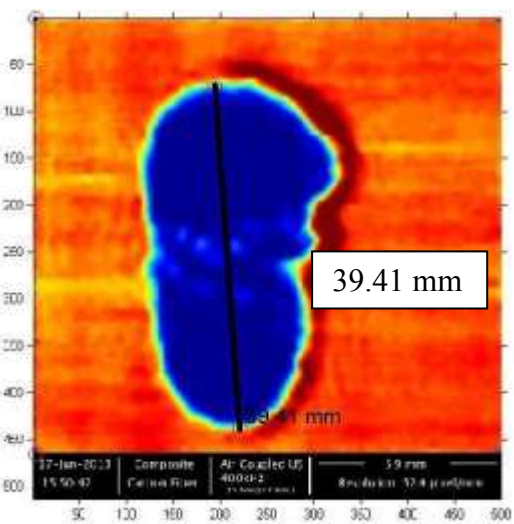


Figura 4.40 - Placa 20\_4 3ºimpacto imersão

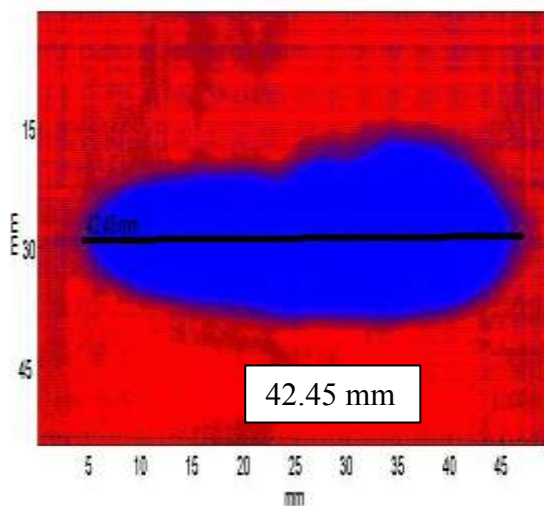


Figura 4.41 - Placa 20\_4 3ºimpacto ar

É possível verificar a influência de diferentes níveis de ganho nas imagens obtidas, se observarmos, por exemplo as figuras 4.26, 4.28, 4.30, 4.32, 4.34, 4.36, 4.38 e 4.40, reparamos que, nas imagens obtidas pelo sistema de C-Scan no ar temos variações nas cores das placas de uns ensaios para os outros. Tal fenómeno deve-se á alteração do ganho utilizado para obter cada uma das imagens, estando cada nível apresentado na tabela 4.2. Procedeu-se a uma alteração de dano ao longo dos ensaios para tentar obter a maior quantidade de sinal possível, dado que havia variação da posição da peça devido ao sistema de fixação utilizado permitir muita liberdade.

Em alguns ensaios foi alterado o nível de ganho utilizado por forma a tentar obter melhores resultados na visualização dos defeitos presentes nas peças.



**Tabela 4.2 - Ganho C-Scan no ar**

Placa	Ganho [dB]
Fig. 4.26 - 20_3 controlo	44,1
Fig. 4.28 - 20_3 1ºimpacto	29,5
Fig. 4.30 - 20_3 2ºimpacto	45
Fig. 4.32 - 20_3 3ºimpacto	48,7
Fig. 4.34 - 20_4 controlo	48
Fig. 4.36 - 20_4 1ºimpacto	29,5
Fig. 4.38 - 20_4 2ºimpacto	51
Fig. 4.40 - 20_4 3ºimpacto	51

Podemos também observar que o tamanho do defeito vai ser maior quanto maior for o número de camadas da placa, pois quanto maior for o número de camadas maior é a capacidade de absorção de energia por parte do laminado e, conseqüentemente, maior é o defeito apresentado. Os comprimentos finais do maior lado do defeito obtidos por cada um dos métodos de C-Scan podem ser observados na tabela 4.3.

**Tabela 4.3 – Comprimento dos defeitos nas placas carbono-epóxico [0i;90i]s**

Placa	Comprimento final do defeito [mm]	
	C-Scan imersão	C-Scan ar
<b>8_2</b>	35,44	34,85
<b>12_2</b>	37,03	33,18
<b>16_4</b>	39,35	37,44
<b>20_3</b>	42,34	39,37
<b>20_4</b>	42,45	39,41

Reparamos, observando a tabela anterior, que o comprimento do defeito tende a aumentar com o número de camadas.

#### **4.2.2. Placas submetidas a meios agressivos**

Os dados, assim como as imagens relativas a estas placas podem ser encontradas no ANEXO B.

Através do estudo destas placas notámos que deve haver degradação da matriz dos laminados quando sujeitos a substâncias agressivas como Hidróxido de Sódio (NaOH)

e Ácido Clorídrico (HCl), pois após terem sido imersas em soluções com diferentes percentagens destas substâncias durante vinte dias, estas placas foram impactadas e analisadas por C-Scan.

Após analisar as placas por C-Scan por imersão e no ar, foram observados vários aspectos, como a diferença do tamanho do defeito consoante a solução em que tinha sido imersa a placa.

É de salientar, o facto de não terem sido detectados os defeitos apresentados pelas placas de Kevlar<sup>®</sup> que estiveram imersas em HCl pelo sistema de C-Scan por imersão, tendo sido apenas possível observá-los no sistema de C-Scan no ar. Dado que as placas de Kevlar<sup>®</sup> que tinham sido imersas em NaOH, assim como a placa de controlo, foram detectadas por este sistema, suspeita-se que tenha havido um processo de erosão a nível da matriz do interior do material que possa ter levada a uma alteração microestrutural que tenha levado a que o defeito não fosse detectado pelo sistema C-Scan por imersão, pois estas placas foram detectadas pelo sistema de C-Scan no ar, tendo sido possível ver o tamanho do defeito, vendo que este aumenta com o aumento da percentagem de HCl da solução.

Nota-se que, genericamente, há um aumento do tamanho do defeito conforme se aumenta a percentagem de substância agressiva na solução.

#### **4.2.3. Placas híbridas**

Neste caso foram utilizadas placas de fibra de carbono reforçadas com nanoclays Cloisite 30B (3% em peso).

Duas destas placas foram impactadas com 3 J e as outras duas com 6 J, tendo depois sido analisados os defeitos que surgiam no seu interior e comparados aos defeitos que surgiam em placas do mesmo material mas sem o nano-reforço.

A nível de defeito, não se nota grande diferença do defeito que surge nas placas com nanoclays e nas que sem nanoclays, sendo obtidos defeitos de dimensões semelhantes, tanto para impactos de 3 J, como para de 6 J.

Quer o sistema de C-Scan por imersão, quer o sistema de C-Scan no ar não tiveram problemas em detectar as placas e os respectivos defeitos.

As imagens relativas à análise destas placas podem ser consultadas no ANEXO C.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos conclui-se que o sistema de C-Scan no ar permite obter bons resultados na detecção de defeitos desde que estes não tenham uma dimensão muito pequena.

Conclui-se também que para certos materiais, o sistema de C-Scan no ar apresenta melhores resultados do que o sistema de C-Scan por imersão, como foi o caso das placas de Kevlar<sup>®</sup> imersas em soluções de Hidróxido de Sódio e posteriormente sujeitas a impacto.

É possível concluir que laminados de carbono-epóxico sujeitos a impactos consecutivos vão sofrer aumentos graduais de defeitos não visíveis a olho nu que, se não forem detectados a tempo podem levar à falha do material.

Suspeita-se que a imersão de compósitos laminados em meios agressivos contendo Hidróxido de Sódio e Ácido Clorídrico promove a degradação dos materiais o que, por sua vez, leva a um aumento do tamanho do defeito apresentado por estes materiais.

Não se verifica que, no caso das placas utilizadas, seja benéfico incluir pequenas percentagens em peso de nanoclays em compósitos laminados de carbono/Kevlar<sup>®</sup>/carbono, dado que os defeitos resultantes de impacto são semelhantes aos apresentados por laminados de fibra de carbono sem o nano-reforço.



## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros fica a ideia de se fazer a verificação do que ocorre a nível microestrutural em materiais compósitos imersos em substâncias agressivas para deste modo justificar a perda de resistência ao impacto que se verificou no presente trabalho.

Em futuros trabalhos pode-se também estudar a resistência ao impacto de laminados de carbono epóxico sujeitos a impactos balísticos e tentar sugerir possíveis melhorias, dado que estes materiais são muito utilizados na indústria aeronáutica e um dos problemas recorrentes nos aeroportos é o impacto de aviões com pássaros, sendo que na altura de descolagem ou de aterragem um avião circula, geralmente, acima dos 200 km/h.

Mais relacionado com a parte de Engenharia Electrotécnica, sugeria talvez o desenvolvimento de uma interface que permitisse a gravação directa dos ficheiros obtidos pelo sistema de C-Scan no ar como ficheiro de imagem, pois iria permitir uma poupança significativa de tempo ao analisar os resultados, dado que evitaria ter que recorrer a programas de tratamento de dados, como foi o caso deste trabalho, para converter o ficheiro obtido através do sistema de C-Scan num ficheiro de imagem. Dado que, no presente trabalho, foi utilizada uma interface desenvolvida por alunos do DEEC da UC, através do software LabView<sup>®</sup>, que permitia a obtenção de imagens e a sua gravação como um conjunto de pontos num ficheiro de texto. Após a gravação do ficheiro como texto, iríamos abrir o ficheiro de texto com recurso ao software MatLab<sup>®</sup> e, através de ferramentas de tratamento de dados desenvolvidas por alunos do DEEC da UC, obteríamos a imagem resultante da inspecção da peça.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – Santos, D.S.C, (2012), “Estudo do impacto a baixa velocidade de compósitos epóxi/fibra de vidro nanoreforçados”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Projecto Mecânico, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [2] – de Moura M.F.S.F., Morais A.B., Magalhães A.G., (2011), “Materiais Compósitos. Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico”, 2ªEd.,Publindústria.
- [3] - Matthews, F.L. & Rawlings, R.D., (1999), “Composite Materials: Engineering and Science”, Woodhead Publishig, Cambridge, 1-15.
- [4] – Diez, J.L.G., (1995),“Materiales Compuestos: tecnología de los plásticos reforzados”. Fondo Editorial de Ingeniería Naval, Madrid.
- [5] – (1989),“Matériaux composites. Introduction à lúsage des inegénieurs et technicians”, Teknea.
- [6] – Donnet, J.B., Bansal, R.C., (1990), “Carbon Fibers”, Marcel Dekker, INC.
- [7] – <http://favonius.com/soaring/materials/material.htm>.
- [8] – Moura MFSSF, 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.
- [9] – Olsson R., (1992), “Impact response of orthotropic composites plates predicted from a one parameter differential equation”, AIAA Journal; 30(6), 1587-1596.
- [10] – Morais, A.B., (2000), “Open-hole tensile strength of quasi-isotropic laminates. Composites Science and Technology”,30:1997-2004.
- [11] - Reis L. e Freitas M., (1997),“Damage Growth Analysis of Low Velocity Impacted Composite Panels”, Composite Structures, Elsevier; 38(1), 509-7.
- [12] – 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.
- [13] Mackin T.J.,Warren P.D., Evans A.G., (1992), “Effects of Fiber Roughness on Interface Sliding in Composites”, Acta Metall. Vol 40, pp 1251-1257.

- [14] – 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.
- [15] – Bishop, (2000), “The mechanical performance and impact behavior of carbon fiber reinforced PEEK”, *Composite Structures*, 3, 295-318.
- [16] – Butcher, (2001), “The impact resistance of unidirectional CFRP under tensile stress”, *Fiber Science and Technology*, 12, 295-326. [x] – 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.
- [17] – 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.
- [18] – 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.
- [19] – 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.
- [20] – Liu D. e Malvern L. E., “*Matrix Cracking in Impacted Glass/Epoxy Plates*”, *Journal of Composite Materials*, 1987.
- [21] – Ross C.A. e Sierakowski R.L., (1973), “Studies on the impact resistance of composite plates”, *Composites*, 4, 157-161.
- [22] – 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.
- [23] – 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.
- [24] – Batra N.K., (1992), “Ultrasonic characterization of highly attenuative thick composites”, *Naval Research Laboratory, United States Navy*.
- [25] “D-Scan”, em [http://www.ndtnews.org/On\\_The\\_Job/What\\_the\\_Hec?!/D-Scan.html](http://www.ndtnews.org/On_The_Job/What_the_Hec?!/D-Scan.html).
- [26] – “NDT-TESTING”, em <http://www.ndted.org/GeneralResources/MethodSummary/MethodSummary.htm>
- [27] –Wang G.F., Feng X.Q., Yu S.W., (2007), “Interface effects on the diffraction of plane compressional waves by a nanosized spherical inclusion”, *Journal of Applied Physics*, 102:043533.



- 
- [28] – Amaro, A.P.B.M., (2004), “Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos: utilização conjugada do método dos elementos finitos e de técnicas de interferometria holográfica e ultra-sons”, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [29] – “Ultrasonic C-Scan”, em <http://composite.about.com/library/glossary/u/bldef-u5795.htm>
- [30] – Smith R.A., (2009), “Composite defects and their detection”, Structural Materials Centre, QinetiQ Ltd, Cody Technology Park, Farnborough, UK
- [31] – Silva, M., Machado, F., (2012), “Análise de materiais compósitos através de C-Scan”, Trabalho realizado no Laboratório de Tecnologia dos Materiais Electrónicos e Ultrassons do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra no âmbito da unidade curricular de Controlo Não Destrutivo, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [32] – Berthelot J. M., (1992), “Matériaux Composites, Comportement mécanique et analyse des structures”, 4ª Ed., Springer, New York, 5-6.
- [33] – Wang C.Y., Yew C.H., (1990), “Impact Damage in Composite Laminates, Computers & Structures”, 37:6, 976-982.
- [34] – Abrate S., (1991), “Impact on Laminated Composite Materials, Applied Mechanics Review”, 44:155-190.
- [35] – Rhodes M.B., (1987), “Damage Tolerance Research on Composite Panels”, Selected NASA Research in Composite Materials and Structures, NASA CP-2142.
- [36] – Xiaosong, H., (2009), “Fabrication and Properties of Carbon Fibers”, Journal Materials, 2370-2382
- [37] – Dato, M, H., (1991), “Mechanics of Fibrous Composites”, Elsevier Science Publishers Ltd, England UK.
- [38] – Hollaway, L., (1990), “Polymers and Polymer Composites in Construction”, Thomas Telford Ltd., London UK, 31
- [39] – Herakovich, C.T. “Mechanics of Fibrous Composites”, University of Virginia. 1998.
- [40] – Gao, S.-L.; Kim, J.-K. “Scanning acoustic microscopy as a tool for quantitative characterization of damage in CFRPs”. Composite Science and Technology. 1999: 59; 345-354.



## ANEXO A

Neste anexo mostram-se as máquinas de impacto utilizadas e os sistemas de C-Scan, assim como a estrutura de apoio em acrílico utilizada no sistema de C-Scan por imersão para poder utilizar o sistema em transmissão.



Figura A 1 - Máquina de impacto INSTRON CEAST 9340



Figura A 2 - Sistema de C-Scan por imersão



**Figura A 3 - Máquina de impacto IMATEK-IM10**



**Figura A 4 - Sistema de C-Scan no ar**



Figura A 5 - Sonda 007CX AIRSCAN

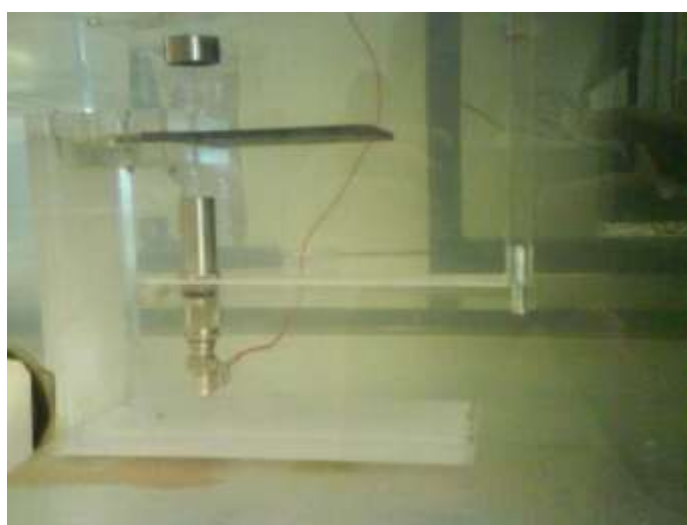


Figura A 6 - Vista lateral da estrutura de apoio em acrílico em uso



Figura A 7 - Vista de cima da estrutura de apoio em acrílico em uso





## ANEXO B

Neste anexo apresentam-se as imagens obtidas através da análise por C-Scan por imersão e no ar das placas que foram submetidas a ambientes agressivos e posteriormente impactadas e as placas de controlo que não foram imersas antes de impacto.

As figuras B1 a B10 foram obtidas pelo sistema de C-Scan no ar, enquanto as figuras B11 a B14 foram obtidas pelo sistema de C-Scan por imersão, e mostram os defeitos nas placas que estiveram submetidas a meios agressivos.

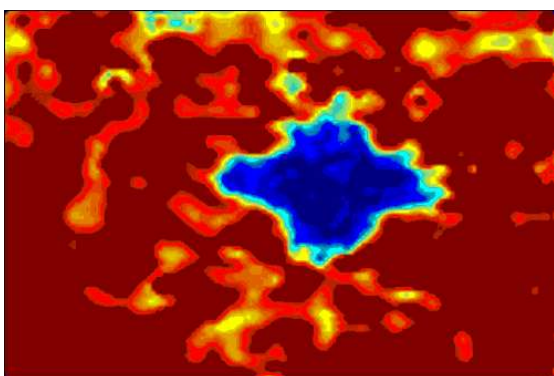


Figura B 1 - Carbono-epóxico controlo ar

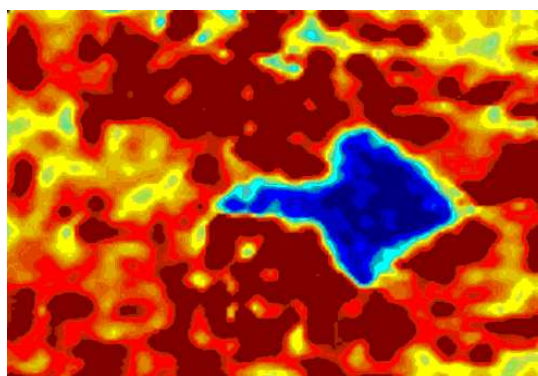


Figura B 2 - Carbono-epóxico ar NaOH 15%

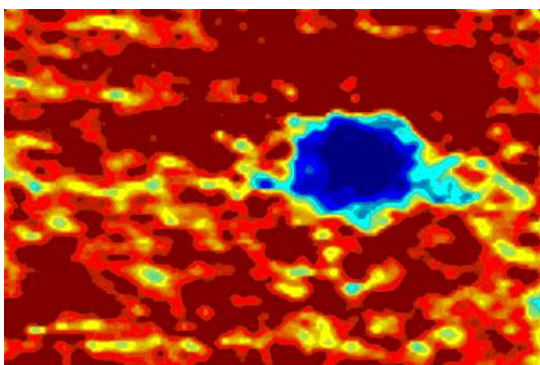


Figura B 3 - Kevlar<sup>®</sup> ar HCl 15%

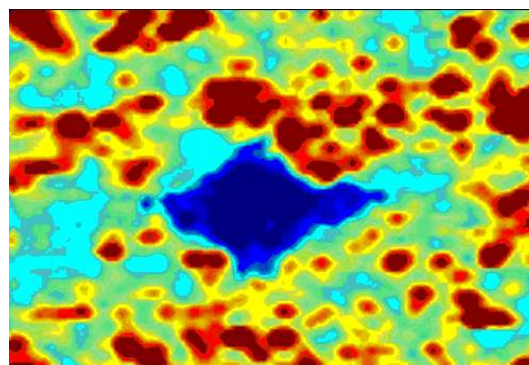


Figura B 4 - Carbono-epóxico ar HCl 15%

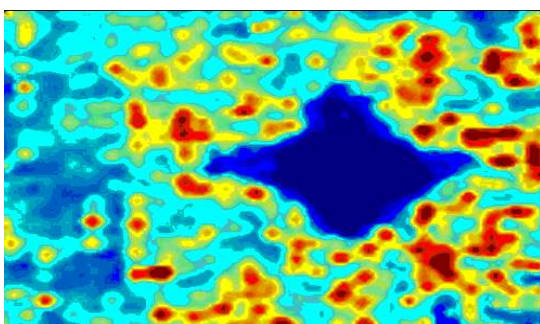


Figura B 5 - Carbono-epóxico ar HCl 35%

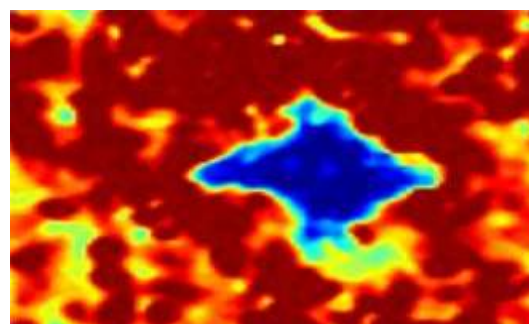


Figura B 6 - Carbono-epóxico ar NaOH 35%

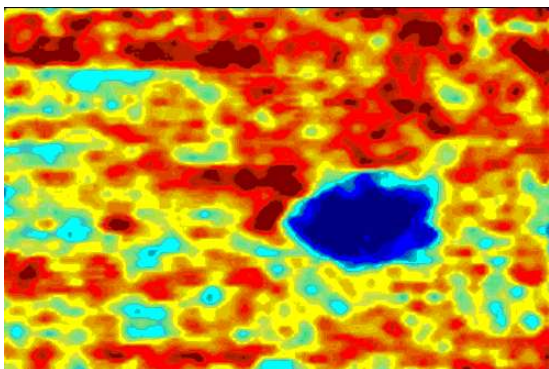


Figura B 7 - Kevlar<sup>®</sup> controlo ar

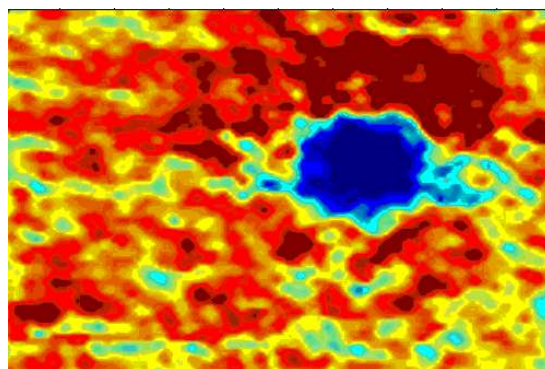


Figura B 8 – Kevlar<sup>®</sup> ar NaOH 15%

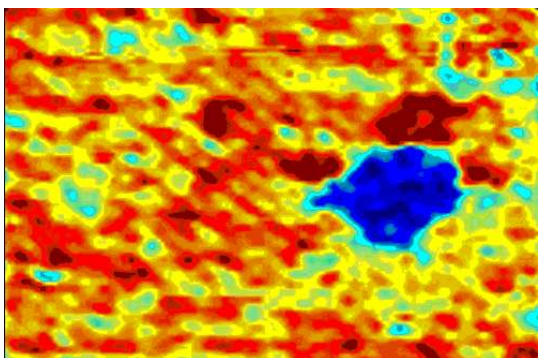


Figura B 9 - Kevlar<sup>®</sup> ar NaOH 35%

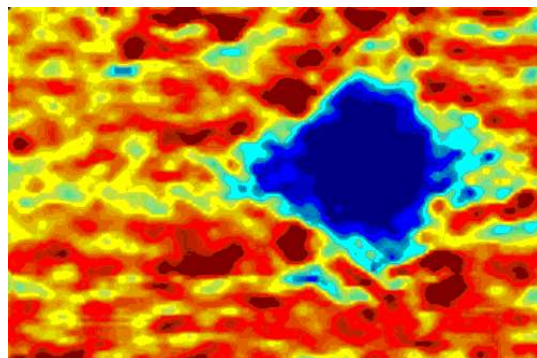


Figura B10– Kevlar<sup>®</sup> ar HCl 35%

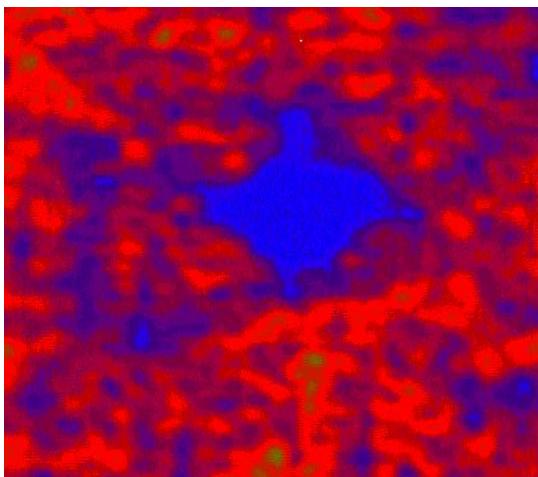


Figura B 11 - Carbono-epóxico controlo imersão

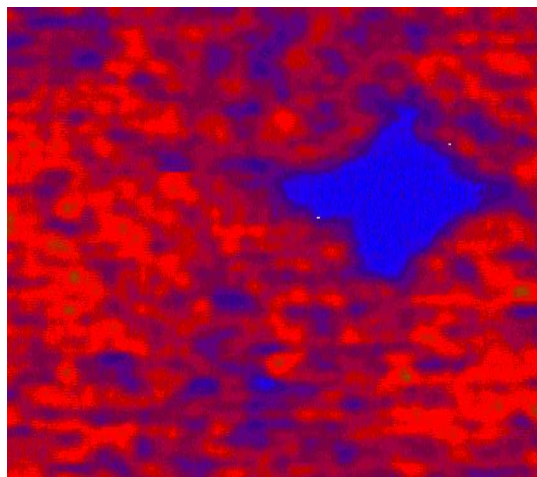


Figura B 12 - Carbono-epóxico NaOH 15% imersão



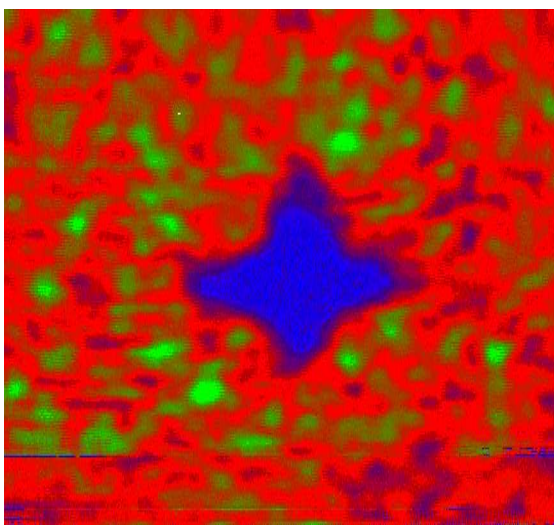


Figura B 13 - Carbono-epóxico HCl 15% imersão

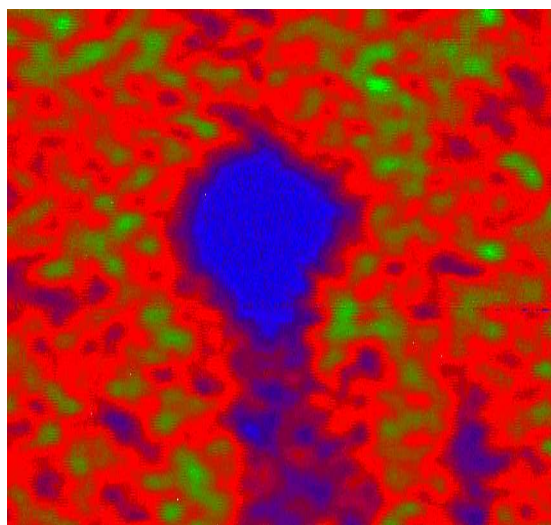


Figura B 14 - Kevlar® controlo imersão

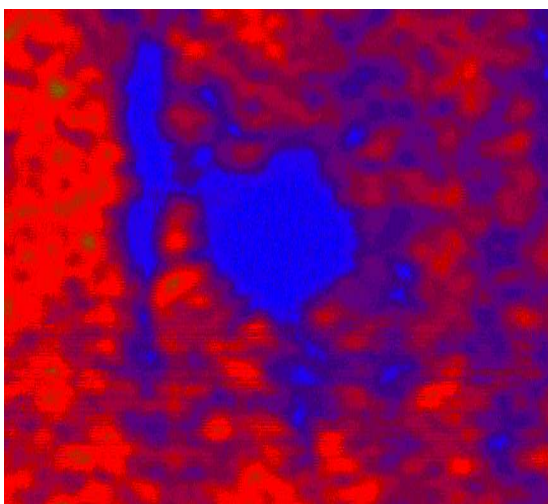


Figura B 15 - Kevlar NaOH 15% imersão

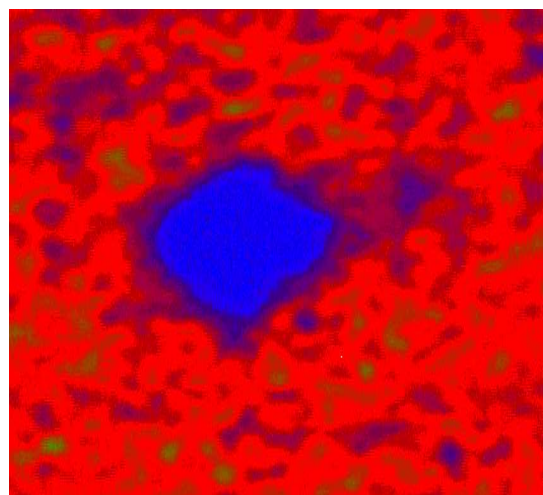


Figura B 16 - Kevlar® NaOH 35% imersão

Como já tinha sido anteriormente referido, não foi possível obter as imagens para certas placas através do sistema de C-Scan por imersão, suspeitando-se que este facto se deva a alterações microestruturais dos materiais a ser analisados.



## ANEXO C

Neste anexo são apresentadas as imagens relativas à inspeção das placas com nanoclays por ambos os métodos de C-Scan utilizados neste trabalho.

As imagens C1 a C4 foram obtidas pelo sistema de C-Scan por imersão, enquanto as imagens C5 a C8 foram obtidas utilizando o sistema de C-Scan no ar.

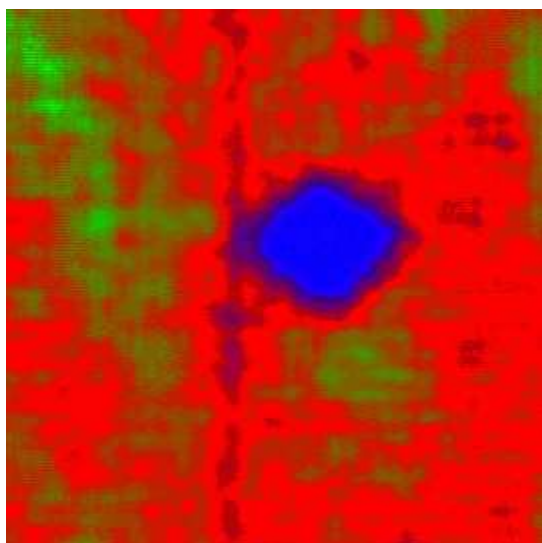


Figura C 1 - impacto 3J sem reforço imersão

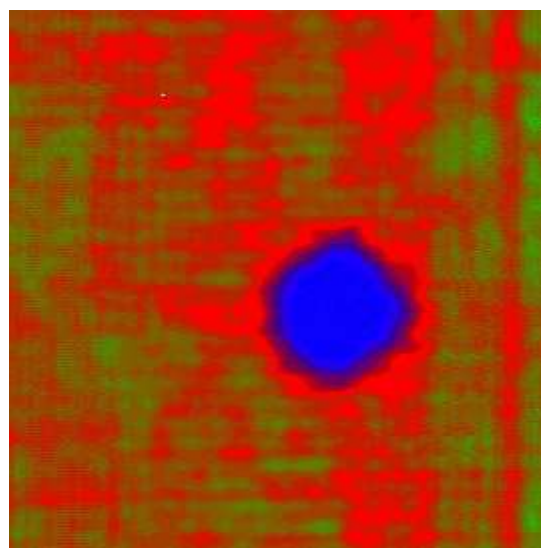


Figura C 2 - impacto 3J 3% de nanoclays imersão

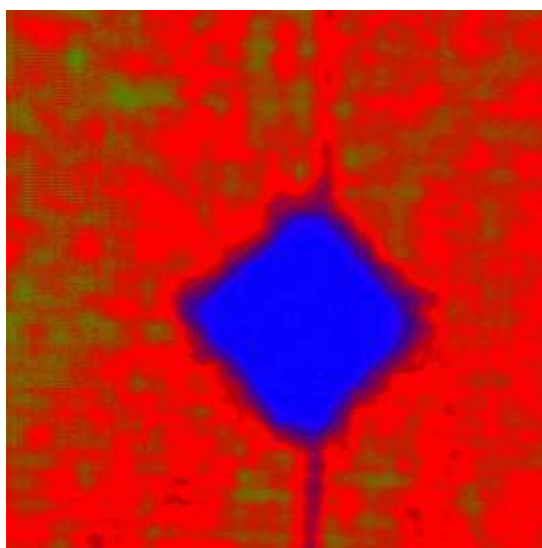


Figura C 3 - impacto 6J sem reforço imersão

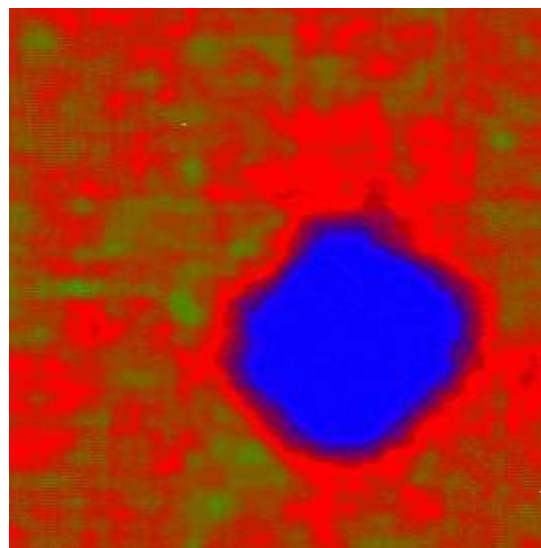


Figura C 4 - impacto 6J 3% de nanoclays imersão

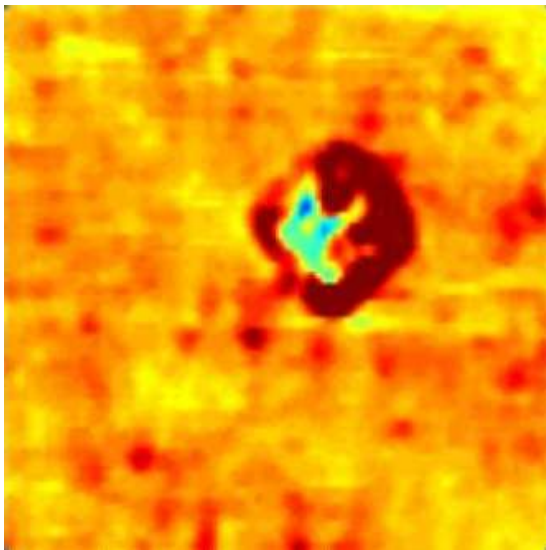


Figura C 5 - impacto 3J sem reforço ar

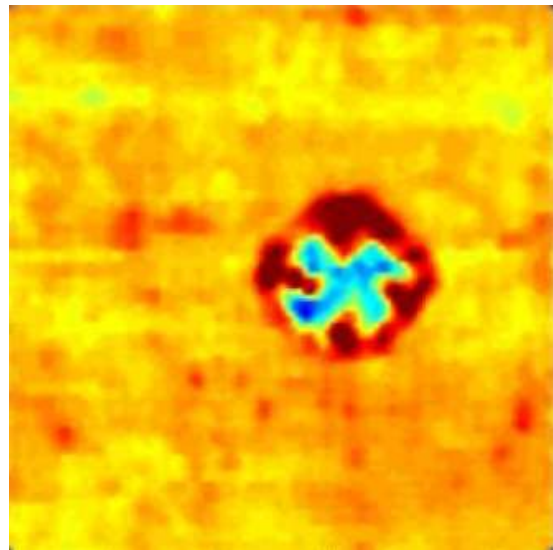


Figura C 6 - impacto 3J 3% de nanoclays ar

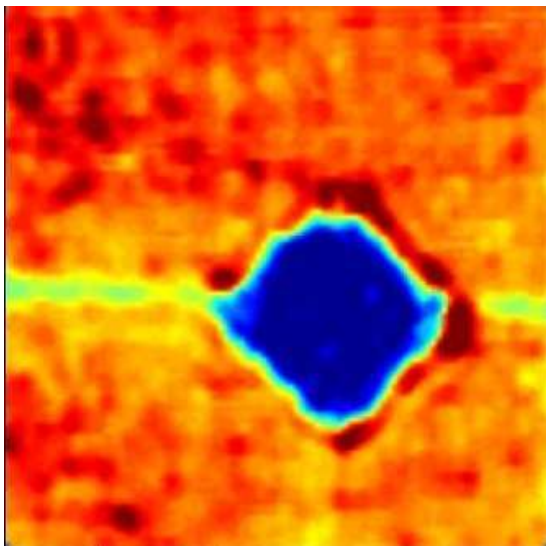


Figura C 7 - impacto 6J sem reforço ar

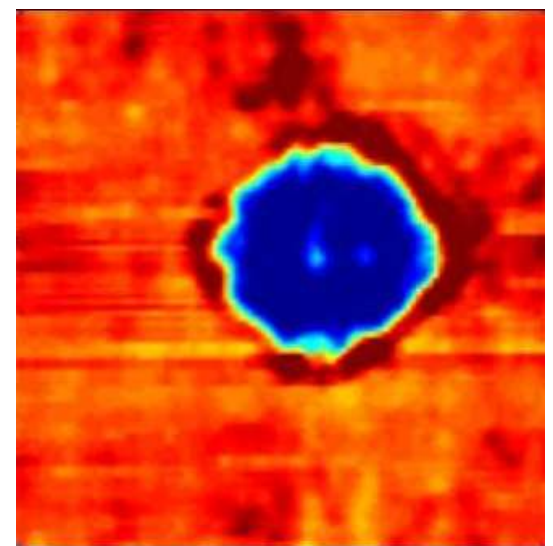


Figura C 8 - impacto 6J 3% de nanoclays ar