



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

O efeito abrasivo da resistência ao impacto de materiais compósitos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Autor

José João Costa

Orientadores

Professora Ana Paula Betencourt Martins Amaro

Professor Altino de Jesus Roque Loureiro

Júri

Presidente Professora Doutora Maria Augusta Neto
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis
Professor Auxiliar da Universidade da Beira Interior

Orientador Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2014

“É fazendo que se aprende a fazer aquilo que se deve aprender a fazer.”

Aristóteles

Ao Meu Pai.

Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível graças ao apoio de algumas pessoas às quais não posso deixar de agradecer.

Em primeiro lugar tenho de agradecer aos meus orientadores, Professora Doutora Ana Paula Amaro e Professor Doutor Altino Loureiro, pela disponibilidade, e incentivo. A sua ajuda imprescindível. Um profundo agradecimento.

O meu agradecimento ao Sr. Fernando, colaborador do DEM, pela ajuda no desenvolvimento do suporte.

O meu agradecimento à *TeandM*, situada em Taveiro, pela disponibilização dos equipamentos necessários para a realização desta dissertação.

O meu agradecimento a todos os professores do DEM pela disponibilidade ao longo da minha vida académica.

Um agradecimento aos meus amigos, Dário Santos, João Vitorino, Renato Carvalho e Ricardo Silva, que me ajudaram na revisão de alguns pontos da dissertação.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas que me ajudaram e apoiaram ao longo desta caminhada por Coimbra.

Por último, um agradecimento especial à minha família. A confiança e o apoio foram essenciais.

A todos um profundo agradecimento.

Resumo

Hoje em dia, devido aos elevados custos energéticos para o transporte de mercadorias e pessoas, é necessário reduzir ao máximo a tara dos equipamentos utilizados, mantendo as propriedades mecânicas por questões de segurança. Para além dos consumos energéticos, também é necessário ter em conta os fatores ambientais.

Neste sentido surgem o investimento no estudo de materiais compósitos para obter alternativas equivalentes aos materiais utilizados tradicionalmente. A indústria aeronáutica é um dos exemplos que mais investe no desenvolvimento deste tipo de materiais.

Quando os equipamentos estão em movimento, ficam expostos muitas das vezes a condições adversas, alterando as suas propriedades mecânicas e colocando em risco a segurança do equipamento. No caso dos aviões, as chuvas de granizo são um bom exemplo real das condições não ideais que atravessam.

O objetivo da dissertação é o estudo das propriedades de laminados de vidro/epóxi, sujeitos previamente a erosão com corindo, para serem analisadas as suas propriedades com ensaio de multi-impactos. Nos testes de erosão altera-se o ângulo de embate, a distância de incidência e a dimensão do corindo.

Em todos os casos existe um provete de teste para se compararem os resultados obtidos através de curvas Força – Tempo, Força – Deslocamento e Energia – Tempo.

A diminuição da distância, aumento do tamanho de grão do corindo e o aumento do ângulo entre o injetor e a placa diminuem a rigidez de flexão ao impacto dos laminados, bem como, a integridade estrutural dos compósitos.

Palavras-chave: Compósitos, Vidro-epoxi, Teste de Erosão, Degradação de Compósitos, Resistência ao Impacto.

Abstract

Nowadays, due to high energetic costs in transportation of goods and people, it is required to reduce to maximum the tare weight of equipments used. This way, the mechanical properties of them are kept, for security matters. In addition to energy consumption, it is also necessary to take into account environmental factors.

To accomplish that, it has appeared the investment in the study of composite materials to find equivalent alternatives to the traditional materials most used. The aeronautic industry is one example where there are more effort and investment in the development of this kind of materials.

When the equipments are in motion, they became several times exposed to hostile and adverse conditions in most of the times. This changes their mechanical properties and put the equipment security/safety at risk. Related to airplanes, the hail rain's are a good real example of the non-ideal situations that they go through.

The aim of the dissertation is the study of the properties of glass/epoxy laminate, previously subjected to erosion with corundum, and tested in multi impact testings. In the erosion tests it's changed some variables such as sock angle, incidence distance (ou height incidence) and corundum mesh.

All the cases have a control specimen that allows to compare the results obtained trough diagrams of Force-Time, Force – Displacement and Energy-Time.

The decrease of the distance, mesh of corundum and the perpendicularity between the injector and the plate reduces the flexion stiffness to impact of the laminates.

Keywords: Glass/epoxy composites, Erosion Test, Composite Degradation, Impact Strength,

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vii
Simbologia e Siglas	viii
Simbologia.....	viii
Siglas	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DE ARTE.....	2
2.1. Introdução	2
2.2. Materiais Compósitos	2
2.3. Aplicações de materiais compósitos	3
2.4. Classificação dos Materiais Compósitos	6
2.4.1. Matriz	7
2.4.2. Reforço	8
2.5. Orientação e empilhamento das Fibras	9
2.5.1. Compósitos laminados.....	9
2.5.2. Compósitos Sanduíche	10
2.6. Degradação em Materiais Compósitos	10
2.6.1. Degradação por partículas sólidas	12
2.7. Impacto em Materiais compósitos	14
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	16
3.1. Introdução	16
3.2. Laminados de Vidro/Epóxi	16
3.3. Erosão das placas	17
3.4. Máquina de impacto.....	20
3.5. Diferença de massa e remoção de material ao centro	22
3.6. Avaliação da área de dano	23
4. RESULTADOS	24
4.1. Introdução	24
4.2. Variação da <i>mesh</i>	24
4.3. Variação do ângulo de incidência	32
4.4. Variação da distância de incidência	41
5. CONCLUSÕES e sugestões para futuros trabalhos	48
5.1. Conclusões da análise de resultados	48
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Evolução Histórica da Utilização de Materiais Compósitos [4].....	3
Figura 2-2 Materiais usados no Boeing 787 [7].	5
Figura 2-3 Vista explodida da Aeronave EMB-170 [8].	5
Figura 2-4 Classificação dos Materiais Compósitos [3].....	6
Figura 2-5 Orientação das Camadas [12]	10
Figura 2-6 Equipamento de Erosão [18].	13
Figura 2-7 Variação da massa em função da quantidade de material erodente e da orientação das fibras. (a) $v=45$ m/s (b) $v=85$ m/s (ângulo de impacto $=60^\circ$; tempo de exposição 160s) [20].....	14
Figura 2-8 Diagrama esquemático do processo erosivo em fibra unidirecional sob condição de impacto paralela e perpendicular [20].	14
Figura 3-1 Ciclo de cura das placas de vidro/epóxico.	17
Figura 3-2 Serra de corte.	17
Figura 3-3 Exemplo de uma placa pós erosão.	18
Figura 3-4 Esquema do suporte utilizado para erosão das placas.	19
Figura 3-5 Suporte de erosão na posição de 45° a 100 mm de distância do bocal.	19
Figura 3-6 Diâmetro do bocal.....	20
Figura 3-7 Máquina de impacto CEAST 9340.....	21
Figura 3-8 Software de aquisição de dados.	21
Figura 3-9 Balança.....	22
Figura 3-10 Comparador.	23
Figura 3-11 Paquímetro.	23
Figura 4-1 (a) Erosão a 20 <i>meshes</i> . (b) erosão a 54 <i>meshes</i>	24
Figura 4-2 Energia -tempo 1º impacto.	25
Figura 4-3 Força - Deslocamento 1º impacto.	26
Figura 4-4 Força - Tempo 1º impacto.	27
Figura 4-5 Força - Tempo Multi - Impacto (Placa de teste).	27
Figura 4-6 Força - Tempo Multi - Impacto (placa de 20 <i>mesh</i>).	28
Figura 4-7 Força Máxima e Deslocamento Máximo em função do número de impactos... ..	29
Figura 4-8 Energia Elástica e Área de dano em função do número de impactos.	30

Figura 4-9 Curva Força – Deslocamento para obtenção da rigidez à flexão ao impacto (5º impacto da placa da variação da <i>mesh</i>).	31
Figura 4-10 Rigidez à flexão ao impacto após Multi-impacto.	32
Figura 4-11 Dano após erosão (a) 10º (b) 90º.	32
Figura 4-12 Energia - tempo para o 1º impacto.	34
Figura 4-13 Força deslocamento para o 1º impacto.	35
Figura 4-14 Força - tempo para o 1º impacto.	35
Figura 4-15 Dano após o 1º impacto (a) Teste (b) 45º.	36
Figura 4-16 Força-tempo multi-impacto para a placa de Teste.	37
Figura 4-17 Evolução da Força Máxima e Deslocamento Máximo em função do n.º de Impactos.	38
Figura 4-18 Energia Elástica e Área de dano em função do número de impactos	38
Figura 4-19 Rigidez à Flexão após multi-impactos.	39
Figura 4-20 Evolução do dano na placa de teste (a) 4º impacto (b) 6 impacto (c) 8º impacto (d) 11º impacto.	40
Figura 4-21 Evolução do dano na placa de 45º (a) 4º impacto (b) 6 impacto (c) 10º impacto.	41
Figura 4-22 Energia tempo em função da variação da distância (1º impacto).	42
Figura 4-23 Força - Deslocamento em função da variação da distância (1º impacto).	43
Figura 4-24 Força - Tempo em função da variação da distância (1º impacto).	43
Figura 4-25 Força - tempo placa de teste (multi-impacto).	44
Figura 4-26 Força máxima e deslocamento máximo em função do número de impactos. .	45
Figura 4-27 Área de dano e Energia dissipada em função do número de impactos.	46
Figura 4-28 Rigidez à flexão após Multi-impactos	47

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Propriedades Mecânicas Gerais da Resina de Epóxico [10]	8
Tabela 2.2 Resultados da Imersão em Água [15].....	11
Tabela 3.1 Variáveis alteradas com o suporte.	19
Tabela 3.2 Características de Impacto.....	22
Tabela 4.1 Propriedades iniciais das placas (alteração da mesh)	25
Tabela 4.2 Número de impactos até à rotura.	28
Tabela 4.3 Área de dano do 1º impacto	29
Tabela 4.4 Rigidez à flexão ao impacto após o 1º impacto.	31
Tabela 4.5 Propriedades iniciais das placas (alteração do ângulo de incidência).	33
Tabela 4.6 Área de dano após o 1º Impacto.	36
Tabela 4.7 Número de impactos até à rotura.	37
Tabela 4.8 Rigidez à flexão ao impacto após o 1º impacto.	39
Tabela 4.9 Propriedades iniciais das placas.....	42
Tabela 4.10 Área de dano 1º impacto.....	44
Tabela 4.11 Número de impactos até a rotura.	45
Tabela 4.12 Rigidez de flexão após o 1º Impacto	46

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

m_e - Massa após a erosão

m_i - Massa inicial

m_r - Massa removida

Siglas

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EUA – Estados Unidos da América.

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra

INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos tem aumentado na última década, devido à conjugação das melhores propriedades dos materiais. A sua utilização é evidente em áreas como a aeronáutica, automóvel, entre outras. Uma das grandes características dos compósitos passa pela redução do peso das estruturas, melhorando as propriedades mecânicas dos materiais tradicionalmente utilizados. Assim é garantida a segurança dos equipamentos.

Esta dissertação surge com o objetivo de conhecer qual o comportamento dos compósitos, no caso vidro /epóxico, quando sujeitos a ambientes agressivos. Como muitas vezes se fala e se trata na vida académica, na vida real os materiais nem sempre se encontram em ambientes ideais. São diversos os choques que sofrem no dia-a-dia. Por exemplo, no caso de carros e outros veículos, quantas vezes não vão, atrás de camiões dos quais vem gravilha que embate nas suas estruturas, muitas vezes com uma certa aceleração imposta pelo movimento do camião e do vento. Quantas vezes chuvas de granizo, não sendo muito este o caso em Portugal, chocam contra aviões, carros, etc. Mas, por exemplo, em zonas como os EUA, este efeito é mais significativo, já que existem diversos furacões que causam danos devastadores. Tendo em conta estas situações pretende-se conhecer qual a vida que os compósitos terão após sofrer degradação. Assim, neste trabalho estuda-se a erosão de placas de vidro/epóxico solicitado com corindo, analisando-se o comportamento que se prevê para o compósito após a referida degradação.

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos, sendo este a Introdução.

No capítulo 2 é feito um enquadramento teórico sobre materiais compósitos, áreas de aplicação, vantagens da utilização de compósitos e estudos semelhantes já elaborados, entre outras.

O capítulo 3 é reservado ao procedimento experimental. Neste são apresentados todos os equipamentos utilizados e os procedimentos efetuados para o estudo.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados com base nos procedimentos anteriores.

No último capítulo 5 são expostas as conclusões referentes ao estudo realizado e apresentadas propostas para trabalhos futuros.

2. ESTADO DE ARTE

2.1. Introdução

Este capítulo é destinado aos materiais compósitos. Começando com uma breve descrição destes, irão também ser indicadas as suas áreas de aplicação e respetivas vantagens/desvantagens. Para terminar são apresentados alguns exemplos de estudos semelhantes ao que se pretende desenvolver.

2.2. Materiais Compósitos

Uma simples definição do que são materiais compósitos é um material que é composto por dois ou mais materiais insolúveis e não mexíveis com diferentes propriedades físicas e químicas [1]. Um dos objetivos desta combinação de vários materiais é o aproveitamento das melhores propriedades de cada um [2].

A utilização de materiais compósitos já é muito antiga. Nos primórdios, os seus descobridores e utilizadores não tinham a sensação que estavam a desenvolver um novo material. Estes construía paredes reforçadas com feixes de palha para aumentar a integridade estrutural, arcos e carroças constituídos pela união de paus, ossos e chifres de animais [3]. Na Figura 2-1 está representada a evolução dos materiais compósitos ao longo dos anos.

Através da Figura 2-1 é possível verificar o aumento crescente, a partir dos anos 60, da utilização de materiais compósitos. A sua utilização veio sempre a diminuir até altura de 1960. Altura em que após terminada a Segunda Guerra mundial era necessário começar a evoluir rapidamente para recuperar dos estragos. Como se pode ver ainda pela mesma figura as previsões são de aumento da utilização de compósitos pelas suas características.

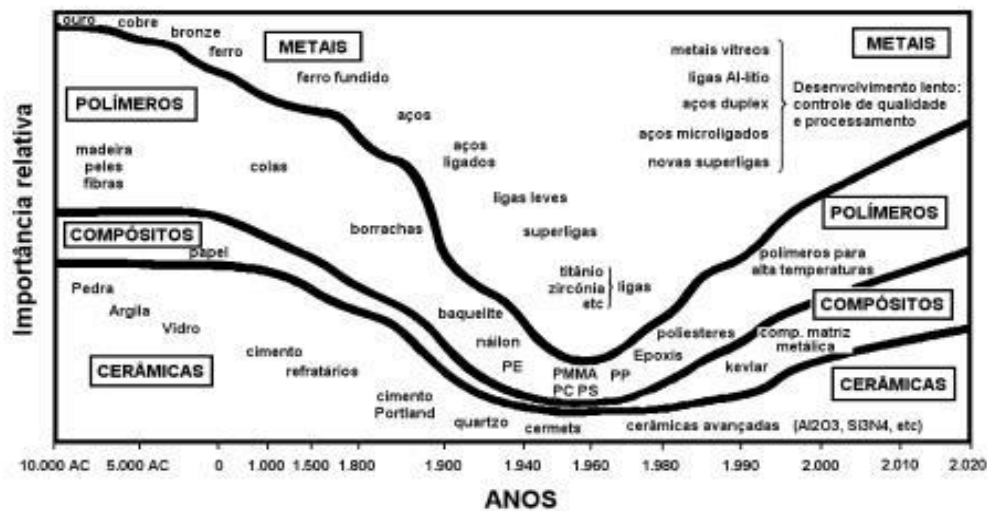


Figura 2-1 Evolução Histórica da Utilização de Materiais Compósitos [4].

2.3. Aplicações de materiais compósitos

Uma das indústrias que mais contribuiu para o desenvolvimento dos materiais compósitos foi, conforme já referido, a indústria aeroespacial. Este tipo de material ganha hoje em dia, cada vez mais mercado devido às suas características. Em seguida apresentam-se algumas das vantagens dos materiais compósitos [5]:

- Baixo peso em relação à maioria dos materiais;
- Alta resistência mecânica devido à combinação das propriedades de vários materiais;
- Boa resistência à corrosão. No caso em estudo, se de um metal se tratasse, após a remoção de uma pequena camada do material podia-se verificar inícios de corrosão no ponto afetado, os quais se iriam propagar por toda a estrutura;
- Flexibilidade de design. Um exemplo concreto é a construção de barcos de recreio com materiais compósitos de fibra de vidro. Um exemplo é a construção de barcos de recreio com materiais compósitos de fibra de vidro.
- Os compósitos de fibra de vidro, podem ser utilizados em estruturas como estufas em que é necessário grande entrada de luz para o interior.

da mesma. Comparando com o tradicionalmente utilizado, filme plástico, o compósito terá uma maior durabilidade. Todavia tem um maior custo inicial;

Em relação às desvantagens podem-se referir, entre outras:

- Baixa tenacidade em relação a outros materiais tipicamente utilizados;
- Temperatura de serviço é limitada.

No caso da indústria automóvel, e com o desenvolvimento de motores elétricos, estes materiais são cada vez mais usados pela redução de peso (referido anteriormente). Assim, com menor peso na estrutura do carro, a potência necessária e, conseqüentemente, o consumo de energia será menor. Em virtude disto, este tipo de equipamentos terá melhor desempenho. Como se refere anteriormente o menor consumo proporcionará uma maior durabilidade das baterias utilizadas, sendo que a autonomia das mesmas não é muito elevada.

Como foi referido nas vantagens enumeradas, com a utilização de materiais compósitos torna-se mais fácil a construção de materiais de elevada complexidade. A área da saúde é, recentemente, uma área em que se tem apostado em grande na aplicação de compósitos para a construção de próteses, por exemplo. Também a medicina dentária tem incrementado o uso de compósitos nos implementos. Uma vez mais devido ao facto de as mesmas serem leves. Outra razão é o facto de se poderem combinar materiais que não afetem a vida do ser humano, ou seja, por exemplo não cause alergias.

Na área da construção, os materiais compósitos também são utilizados. Uma das técnicas mais utilizadas é a colagem de estruturas adicionais podendo as mesmas ser do tipo compósito ou metal [6].

Na Figura 2-2 é apresentada uma imagem do Boeing 787. Como é possível verificar através da mesma figura a utilização dos materiais compósitos é muito elevada. Neste caso 50% do material utilizado é à base de compósitos. Como se sabe os níveis de segurança nesta indústria são muito elevados, o que confere um grande investimento no estudo dos materiais compósitos.

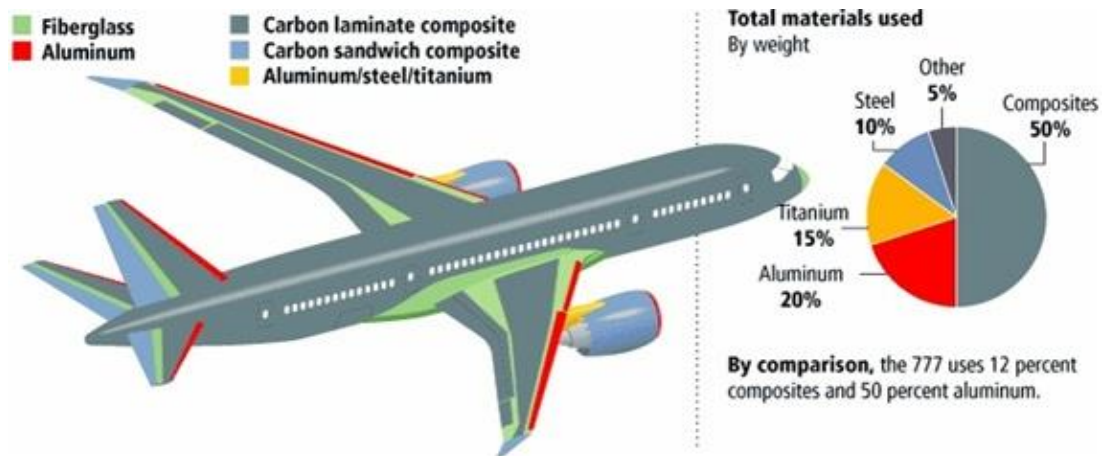


Figura 2-2 Materiais usados no Boeing 787 [7].

A Figura 2-3 é mais um exemplo de aplicação de materiais compósitos, desta vez numa aeronave totalmente construída com compósitos.

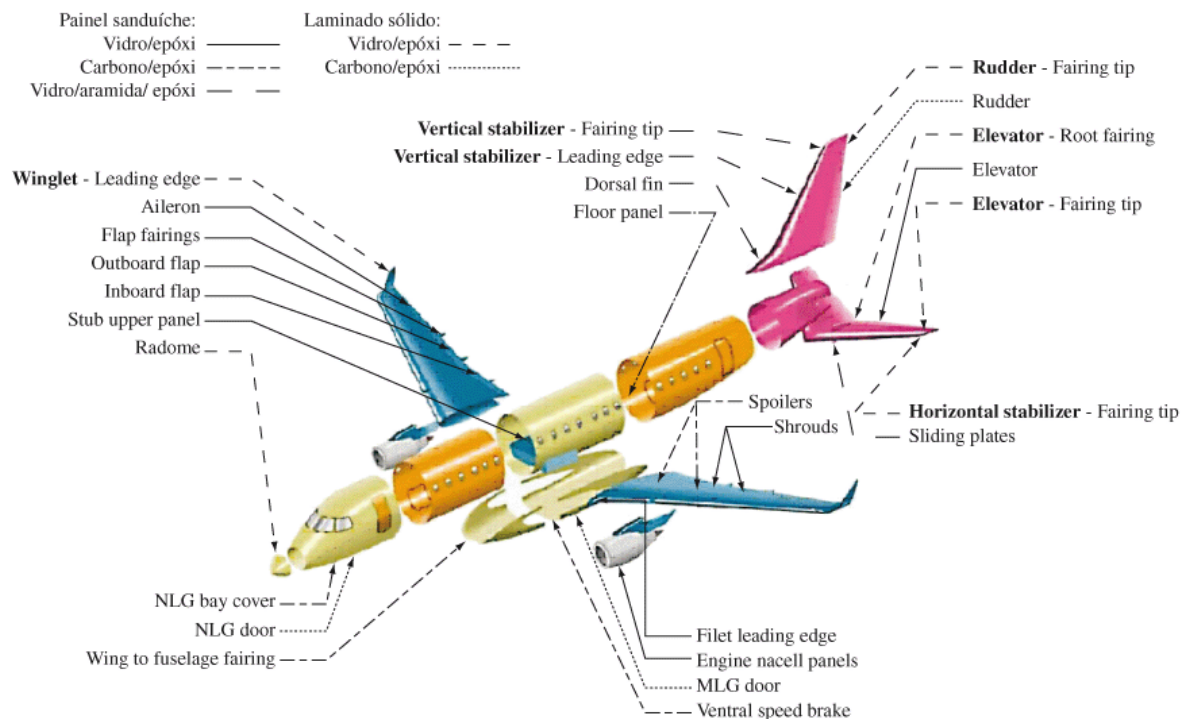


Figura 2-3 Vista explodida da Aeronave EMB-170 [8].

2.4. Classificação dos Materiais Compósitos

Os materiais compósitos são constituídos por dois ou mais materiais com distintas fases e propriedades que se combinam. Um dos materiais garante a ligação (matriz) e o outro a resistência (reforço). Um do exemplo bastante conhecido é o betão armado.

A classificação dos materiais compósitos pode ser feita segundo a Figura 2-4. A classificação é feita em duas categorias: compósitos particulados e compósitos de fibras [3], sendo que estas podem ser contínuas ou descontínuas



Figura 2-4 Classificação dos Materiais Compósitos [3].

2.4.1. Matriz

A matriz de um material compósito deve, entre outras, garantir as seguintes funções:

- Proteger as fibras do meio envolvente;
- Manter a coesão das fibras;
- Distribuir o carregamento pelas fibras em caso de rutura.

Os materiais normalmente utilizados como matriz podem ser de origem polimérica, cerâmica e metálica.

A matriz deve ser ligeiramente deformável para garantir uma boa adesão às fibras.

Em relação à matriz de origem polimérica, a sua classificação pode ser dividida em dois grupos (termoendurecíveis e termoplásticas). Estes últimos têm a vantagem de poderem ser reciclados e utilizados várias vezes, enquanto os termoendurecíveis só podem ser utilizadas apenas uma vez. As matrizes poliméricas assumem principal relevo devido à facilidade de processamento e à baixa densidade dos polímeros.

As resinas de epóxido pertencem ao grupo dos termoendurecíveis. Em seguida são enumeradas algumas das suas vantagens [9]:

- Boas propriedades mecânicas;
- Boa resistência ao calor;
- Excelente resistência química;
- Boa molhabilidade do reforço;
- Excelente aderência aos materiais metálicos.

As desvantagens deste tipo de materiais são, entre outras, o elevado custo de transformação e sensibilidade a fissuração. No presente trabalho utiliza-se a resina de epóxido, uma das resinas de origem polimérica. Na Tabela 2.1 apresenta-se as propriedades mecânicas desta resina.

Tabela 2.1 Propriedades Mecânicas Gerais da Resina de Epóxico [10]

Características Mecânicas	Valor
Resistência à tração	57 MPa
Deformação na tração	2.4%
Modulo à tração	$2.99 \cdot 10^3$ MPa
Resistência à flexão	131 MPa
Modulo à flexão	$3.68 \cdot 10^3$ MPa
Resistência à compressão	81 MPa
Módulo à compressão	$2.56 \cdot 10^3$ MPa

2.4.2. Reforço

O reforço é o componente descontínuo do material compósito. A classificação dos compósitos pode estar relacionada com o tipo de fibra utilizada como se verifica na Figura 2-4.

Num compósito de partículas o reforço apresenta-se sob a forma de partículas. As partículas podem melhorar algumas propriedades, tais como a resistência à temperatura à rigidez e à abrasão.

Nos compósitos fibrosos o reforço é feito sob a forma de fibras, podendo estas ser contínuas ou descontínuas. A orientação das fibras e o número de camadas contribui para melhorar a resistência da mesma. Assim a resistência do “novo” material depende da natureza dos constituintes e sua proporção e da sua orientação.

No caso das fibras de vidro podem distinguir-se três tipos de fibras [11]:

- Vidro C (Chemical)
- Vidro E (Electrical)
- Vidro S (Stiffness)

A fibra de vidro do tipo E é a mais utilizada no reforço estrutural de matriz polimérica e possui boas propriedades dielétricas.

Em seguida são apresentadas algumas das vantagens da utilização das fibras de vidro [2]:

- Económicas;
- Reforço de matrizes plásticas;
- Elevada razão resistência/peso;
- Boa estabilidade dimensional;
- Boa resistência à corrosão;
- Bom desempenho em isolamento térmico;
- Facilidade de fabrico;

Para a utilização desta fibra é necessário ter em conta alguns aspetos menos positivos tais como:

- Módulo de elasticidade reduzido;
- Elevada massa específica;
- Sensibilidade a abrasão;
- Baixa resistência à fadiga.

2.5. Orientação e empilhamento das Fibras

2.5.1. Compósitos laminados

Os compósitos do tipo laminados são compostos por camadas sucessivas de matriz e fibras ou pré impregnados fibra/matriz.

A orientação das fibras deve ter em conta o tipo de carregamento a que a compósito se sujeita. Por exemplo, no caso da força aplicada ser unidirecional e segundo o eixo y, indicado na Figura 2-5, a orientação a 90 graus é preferencial. Deste modo, o carregamento é dividido por todas as fibras. Caso todas as fibras estivessem com a referida orientação, estariam todas sujeitas à tração.

A designação dos laminados é efetuada segundo a disposição das lâminas e a orientação da lâmina em relação ao eixo de referência. No caso da Figura 2-5, a designação é: [45/0/45/90₂/30].

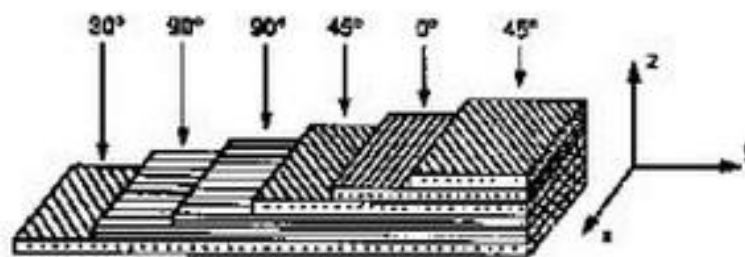


Figura 2-5 Orientação das Camadas [12]

2.5.2. Compósitos Sanduíche

Existem ainda outro tipo de estruturas compósitas, com bastante utilização, as estruturas do tipo sanduíche consistem em colocar um material leve entre duas contraplacas com elevada rigidez. O material central deve ser, em geral com boa resistência à compressão. A estrutura final é leve e rígida.

2.6. Degradação em Materiais Compósitos

Em serviço, os materiais ficam sujeitos a solicitações exteriores. Para prever o comportamento dos materiais em determinadas condições são realizados estudos semelhantes às condições de serviço a que possam ficar sujeitos. Assim prevê-se o comportamento do material e a sua vida útil. Entende-se por vida útil do material o período de tempo, desde a sua entrada em serviço até garantir as condições mínimas de segurança. Como a utilização de materiais compósitos está em crescente (ver Figura 2-1), os estudos sobre os mesmos intensificam-se.

Os laminados de compósitos poliméricos podem sofrer vários tipos de falhas [13]. A falha pode ocorrer na fibra, matriz, ou na interface entre elas.

A rutura nas fibras depende de uma série de fatores tais como: tipo de material, diâmetro e orientação das fibras, fração volumétrica, e dos carregamentos aplicados.

A falha na matriz pode ocorrer a cargas inferiores à da carga de fratura do laminado. As falhas em matrizes classificadas em:

- Intralaminares;
- Translaminares;

- Interlaminares.

A degradação dos materiais compósitos é causada por vários agentes. Por exemplo, no caso de barcos em que o casco é feito com recurso a compósitos, a água salgada é um dos agentes. O contacto com ácidos ou óleos também provoca degradação dos compósitos. No entanto, para a presente dissertação, os estudos com partículas sólidas são os de maior interesse.

Em A. Amaro et al. (2013) [14], foi abordada a influência de soluções ácidas (HCl) e alcalinas (NaOH) na resistência a multi-impactos de vidro/epóxico. Os laminados foram imersos nestas soluções durante vários períodos de tempo. Após a imersão foram sujeitos a impactos a baixa velocidade até a rutura. A comparação dos resultados com os valores da placa de teste controlo permite concluir que as placas imersas nas soluções perdem algumas das suas propriedades na resistência ao impacto. De entre as soluções aplicadas, a solução alcalina é a que conduz a maior perda de resistência ao impacto. Quanto maior for o período de imersão nesta solução maiores serão as perdas. Por exemplo, no caso de uma placa imersa em NaOH durante 12 dias, o deslocamento máximo é superior 27% em relação ao da placa de controlo. No caso de estar em contacto com a solução alcalina durante 36 dias aumento do deslocamento é da ordem de 41%, o que confere um maior decréscimo da força máxima.

A absorção de água tem influência nas propriedades mecânicas de laminados de vidro/poliéster [15]. Após a imersão das placas, em água a 30 °C verifica-se uma alteração das propriedades mecânicas. O tempo de imersão em água também tem influência sobre a integridade estrutural das placas como se pode observar na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Resultados da Imersão em Água [15].

	Força de rotura [N]	Tensão de tração [MPa]	Alongamento à rotura [%]
Amostra original	3246.77	192	3.11
7 dias imersão em água	3098.26	181	3.07
14 dias imersão em água	3002.96	176	3.27
21 dias imersão em água	2754.11	162	3.15

Verifica-se que algumas das alterações podem ser benéficas. Os autores [15] acreditam que com o aumento do tempo de imersão em água, a estrutura do laminado tende a ficar plastificante, aumentando assim a resistência de flexão dos compósitos.

2.6.1. Degradação por partículas sólidas

“O processo de desgaste conhecido como erosão por partículas sólidas ocorre quando uma partícula discreta atinge uma superfície” [16]. No referido artigo estudou-se a erosão de placas após a inserção de uma película adesiva incolor com cerca de 0.03 mm, comparando o tempo até a erosão, com uma placa de teste ou controlo. A aplicação de um filme incolor de poliuretano aumenta a capacidade das placas resistirem a ambientes de degradação.

Em [17] é analisado o comportamento à erosão do material composto de vidro/epóxi com adição de ácido bórico na ordem dos 15% e 30%. Durante o processo de erosão foram alterados dois parâmetros (ângulo e distância).

A erosão das placas é feita com o equipamento representado na Figura 2-6 [18]. O processo de funcionamento do equipamento baseia-se num compressor de o ar seco. Após a pressão ser definida, o material erodente ao entrar em contacto com o ar comprimido ganha uma determinada aceleração e embate na placa. A temperatura do erodente deve ser a temperatura ambiente. A orientação das fibras tem influência na erosão da placa. As taxas de erosão são superiores em placas do tipo [0/90] quando comparadas com placas com orientação do tipo [45/-45].

Tsuda *et al.* [19] estudaram a resposta de compósitos da fibra de vidro com matriz polimérica. A erosão era tanto maior quanto maior era a percentagem de fibra de vidro utilizada na composição do material. A explicação para este facto é que o vidro retira ductilidade ao compósito, ficando este mais frágil. Verificou ainda que a maior taxa de erosão ocorre quando existe perpendicularidade no disparo de partículas responsáveis pela erosão e as placas.

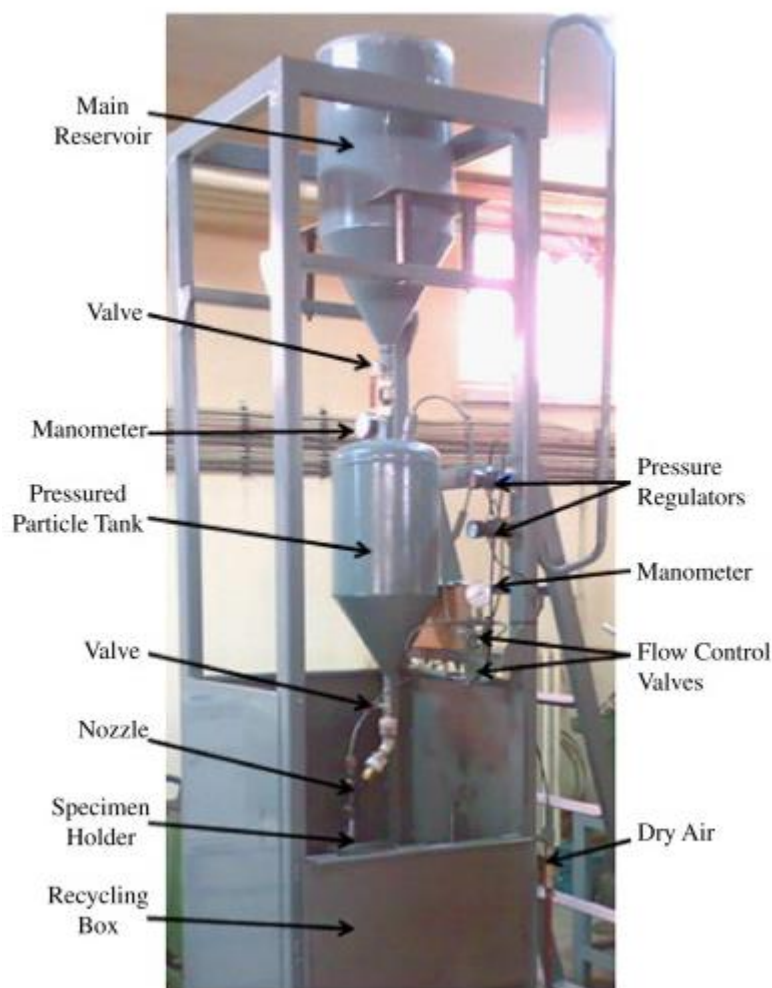


Figura 2-6 Equipamento de Erosão [18].

Tewari *et al* [20] avaliaram a perda de massa em função da quantidade de erodente aplicado e da orientação das fibras. Através da Figura 2-7 verifica-se que a perda de massa é superior em orientações do tipo [90/0]. A velocidade de impacto é um fator determinante na perda de massa das placas. Comparando o gráfico (a) com um gráfico (b) verifica-se que a taxa de erosão aumenta com a velocidade que as partículas atingem a placa de teste. Pode-se concluir que quanto maior for a energia imposta às partículas de erodente maior será o dano provocado na superfície. Para o caso em estudo, um aumento de 47% na velocidade, aumenta 71% a taxa de erosão para as placas com orientação [90/0]. Os valores para as restantes orientações são bastante próximos do referido anteriormente.

A orientação das fibras é, portanto, um fator determinante para a determinação da taxa de erosão, assim como o ângulo de incidência. Neste o caso verificou-se que a taxa

de erosão era superior quando o ângulo de incidência era perpendicular à orientação das fibras (Figura 2-8).

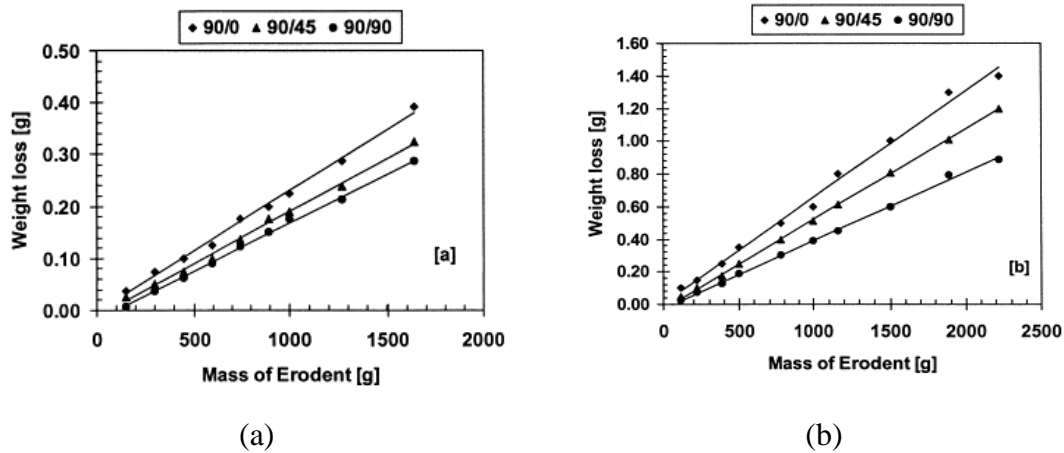


Figura 2-7 Variação da massa em função da quantidade de material erodente e da orientação das fibras. (a) $v=45$ m/s (b) $v=85$ m/s (ângulo de impacto = 60° ; tempo de exposição 160s) [20].

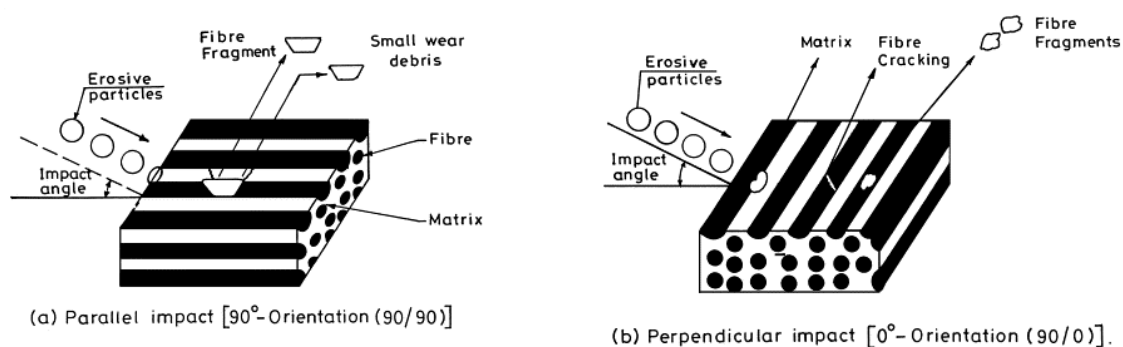


Figura 2-8 Diagrama esquemático do processo erosivo em fibra unidirecional sob condição de impacto paralela e perpendicular [20].

2.7. Impacto em Materiais compósitos

Apesar de não existir concordância na classificação dos impactos a maioria dos autores defende que estes podem ser divididos em dois tipos:

- Impactos de baixa velocidade;
- Impactos a alta velocidade.

No caso dos impactos a baixa velocidade, estes podem reduzir drasticamente as propriedades mecânicas do compósito [21]. Segundo [22], os impactos a baixa velocidade são caracterizados por terem velocidades inferiores a 10 m/s. No entanto, para Abrate [23]

as respostas a baixa velocidade são até 100 [m/s]. O facto de a velocidade ser baixa, impossibilita a visualização de muitos dos danos causados a olho nu. Contudo, as alterações das propriedades mecânicas verificam-se devido ao rompimento de algumas fibras ou degradação da matriz. No impacto a baixa velocidade o dano que surge nos compósitos laminados pode ser dividido em:

- Rutura da matriz;
- Fissura das fibras;
- Delaminado;
- Deslocamento fibra/matriz.

A rutura da matriz resultante das tensões de corte e/ou flexão constitui o dano inicial e está diretamente ligado à delaminação [24].

No caso de impactos a alta velocidade, como é o caso de um disparo de uma pistola, o impacto pode provocar o rompimento da placa. Sendo o cano visível pode-se proceder rapidamente à substituição do componente em causa.

Existem vários dispositivos que podem ser utilizados para promover o impacto. Por exemplo, os ensaios de Charpy e Izod, pertencem ao grupo dos dispositivos pendulares. Neste caso, os impactos são realizados com os provetes na vertical, com recurso a um martelo que contém um acelerómetro. Existe ainda os dispositivos baseados na queda livre de um peso, neste caso a placa está na horizontal e sofre embate de uma massa, com altura, energia e velocidade que podem ser previamente definidos pelo operador. No presente estudo foi este o dispositivo utilizado.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

O presente capítulo destina-se a apresentar os vários procedimentos e equipamentos utilizados na análise experimental. Como já foi referido anteriormente o principal objetivo do trabalho é avaliar a influência do dano na integridade estrutural numa placa de compósito. Neste caso o dano é causado por corindo que ao embater nas placas provoca a remoção de material e, conseqüentemente, a diminuição na capacidade em resistir a multi-impactos.

3.2. Laminados de Vidro/Epóxi

As placas de vidro/epóxi utilizadas no presente estudo foram produzidas no INEGI, Porto. O compósito foi produzido pela sobreposição de camadas de resina e de fibras de vidro, cuja orientação varia de camada para camada, submetido à pressão de 2 bar e ao ciclo de variação de temperatura indicado na Figura 3-1. Este ciclo de pressão temperatura é realizado em autoclave [25]. Os laminados utilizados apresentam as seguintes sequências de empilhamento: $[45_2/90_2/45_2/0_2]_{2s}$, $[0_2/90_2]_{6s}$ e $[45_2/90_2/-45_2/0_2]_{3s}$, com espessura de 4.30, 6.7 e 6.2 [mm] respetivamente.

A taxa de aumento da temperatura é de cerca de $3^\circ\text{C}/\text{min}$ até uma temperatura aproximada de 130°C , sendo esta temperatura mantida constante durante 1 hora, a pressão constante de 2 bar. Após este período, a taxa de decréscimo da temperatura é equivalente à de aquecimento, sendo o limite a temperatura ambiente. O tamanho inicial das placas é de 300×300 [mm]. Para a realização dos ensaios de impacto é necessário cortar as placas. As dimensões finais pretendidas são de 100×100 [mm]. Para tal utiliza-se uma serra com dentes diamantados (Figura 3-2). Esta serra tem a vantagem de não levantar as fibras durante o corte.

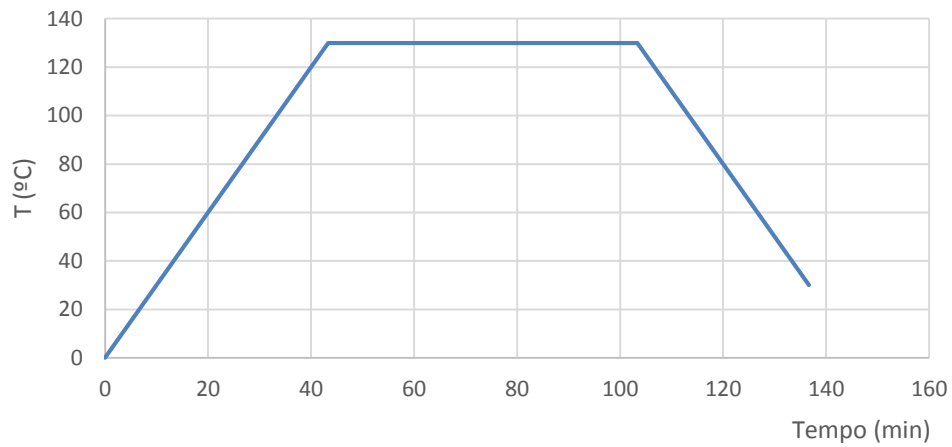


Figura 3-1 Ciclo de cura das placas de vidro/epóxico.



Figura 3-2 Serra de corte.

3.3. Erosão das placas

Para se promover o efeito de erosão das placas contou-se com o apoio da empresa *Teandm*, situada em Taveiro, Coimbra. Esta empresa colocou ao dispor uma das máquinas de decapagem que possuem nas suas instalações. Para a realização dos ensaios das placas foi necessário o desenvolvimento de um equipamento que suporta o bocal da máquina de decapagem e as placas de compósitos.

Na Figura 3-3 apresenta-se o suporte com uma placa após o ensaio de erosão da mesma, em que é visível o dano produzido na mesma. Tradicionalmente, este equipamento de decapagem não utiliza suporte, sendo o operador que segura o bocal para decapar as peças pretendidas. Mas, visto que se pretendem alterar variáveis, é necessário o projeto de um sistema de suporte que permitisse obter com precisão as medidas pretendidas.

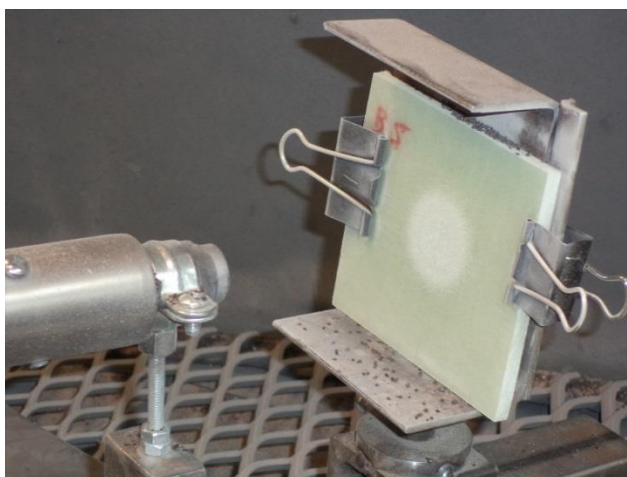


Figura 3-3 Exemplo de uma placa pós erosão.

Na Figura 3-4 é apresentado o exemplo do suporte desenvolvido no programa de CAD (*Inventor*), sendo que na Figura 3-5 encontra-se o equipamento já desenvolvido na posição de 100 [mm] e com um ângulo de incidência de 45°. Na Tabela 3.1 apresentam-se as variáveis que são possíveis alterar com suporte desenvolvido, sendo elas a distância e o ângulo. Na Tabela 3.1 são apresentadas as variáveis que se mantêm constantes para cada tipo de placa. O tamanho do abrasivo é caracterizado pelo número da malha (*mesh*). O número de malha corresponde ao número de malhas por polegada linear. Portanto, quanto mais malhas mais fino grão que passa na malha. Foram ainda realizados ensaios em que se variou o tamanho da *mesh* do abrasivo, mantendo a distância de 100 [mm] e o ângulo de incidência de 90°. Os tamanhos de *mesh* utilizados foram: 20, 24 e 54, sendo que o 54 corresponde à *mesh* de grão mais fino.

Tabela 3.1 Variáveis alteradas com o suporte.

Distância [mm]	Ângulo [°]
75	10
100	45
125	90

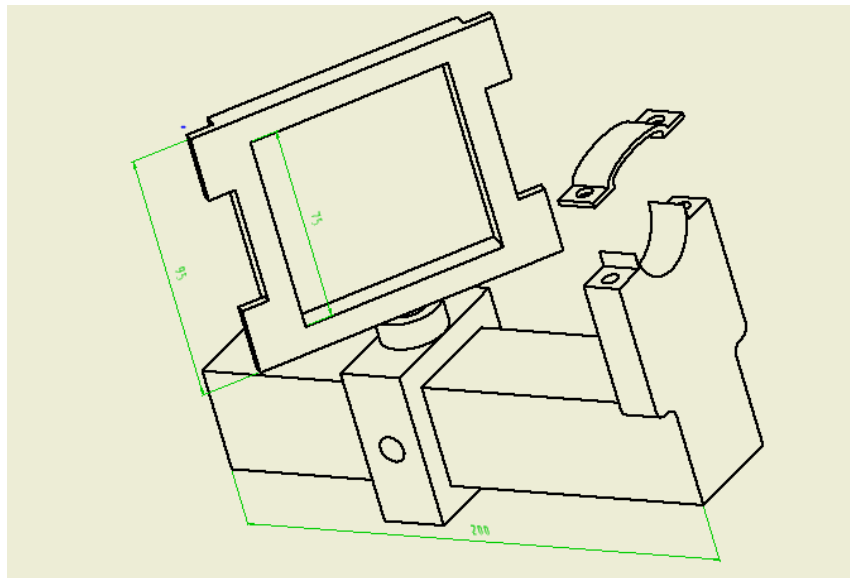


Figura 3-4 Esquema do suporte utilizado para erosão das placas.



Figura 3-5 Suporte de erosão na posição de 45° a 100 mm de distância do bocal.

Bagaci et al [18] utiliza na máquina de erosão, um bocal com diâmetro de 6 mm. Neste caso o diâmetro utilizado é de 4.5 mm, (Figura 3-6). Esta diminuição de diâmetro conduz à diminuição da massa de erodente projetada por segundo, mas proporciona um aumento da velocidade de projeção do mesmo.

De referir ainda que a pressão e tempo aplicados ao equipamento de decapagem por cada placa foi de 2 bar e 20 segundos. O material utilizado para a erosão das placas foi, como já referido, o óxido de alumínio.

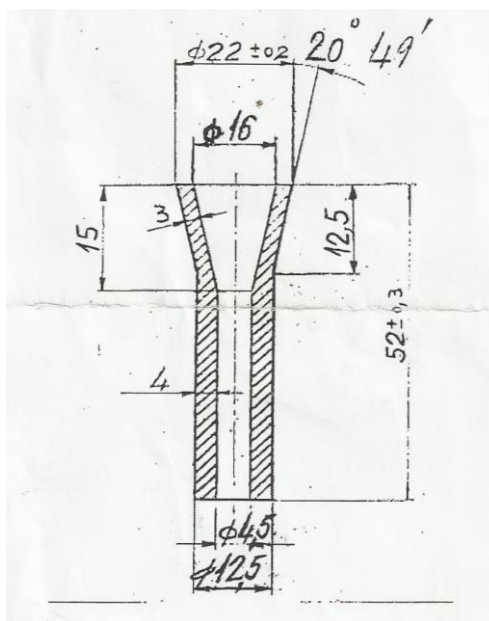


Figura 3-6 Diâmetro do bocal.

3.4. Máquina de impacto

Para realização dos ensaios de impacto foi utilizada uma máquina por queda de peso, do DEM - FCTUC possui. A máquina de impacto foi desenvolvida pela INSTRON, modelo CEAST 9340, apresentado na Figura 3-7 [26]. As placas analisadas foram simplesmente apoiadas, num apoio circular de diâmetro de 70 mm. A máquina dispõe de um sistema de aquisição de dados (Figura 3-8) para futuramente serem tratados. Nos dados recolhidos é possível observar a força exercida durante todo o impacto, deslocamento máximo, energia dissipada e absorvida e também o tempo do ensaio. Segundo o manual do equipamento, é possível fornecer energias numa gama entre 0.30 – 405 J [26]. A energia de impacto varia com a massa e altura do impactor, pois a altura de queda do impactor depende da energia que se pretende para cada ensaio.

A massa do impactor é de 3.4 kg, e o seu diâmetro é de 10 mm. Estas duas propriedades não são alteradas durante o ensaio ao contrário do que acontece com as restantes propriedades do impacto como se pode verificar com a Tabela 3.2. Nesta tabela são apresentadas as características de impacto referentes a cada estudo.



Figura 3-7 Máquina de impacto CEAST 9340.

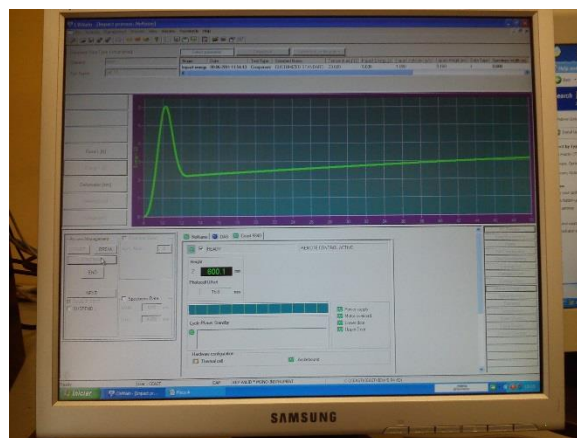


Figura 3-8 Software de aquisição de dados.

Tabela 3.2 Características de Impacto.

Variáveis em estudo	Velocidade de Impacto [m/s]	Energia de Impacto [J]	Altura do Impactor [mm]
Variação do ângulo	2.66	12	360.755
Variação da <i>mesh</i>	3.43	20	599.843
Variação da distância	3.43	20	599.843

3.5. Diferença de massa e remoção de material ao centro

Uma das grandezas, que também foi medida, foi a quantidade de material removido durante os ensaios de erosão, com recurso à perda de massa e profundidade ao centro.

Para a avaliação da quantidade de material removida em termos de massa foram pesadas todas as placas antes e após a erosão. A balança utilizada (Figura 3-9) permite efetuar medições à décima de micrograma. Após recolha de dados e aplicação da equação (3.1), obtém-se a quantidade de material removido pelo teste de erosão.

$$m_r[\%] = \frac{m_i - m_e}{m_i} \times 100 \quad (3.1)$$



Figura 3-9 Balança.

Com a utilização de um comparador (Figura 3-10) foi possível avaliar a profundidade da zona erodida no centro da placa e restantes pontos. Isto é importante, pois assim pode-se verificar se a zona de erosão foi ao centro da placa. Esta zona central é a zona sobre o qual vai embater o impactor referenciado na subsecção 3.4.

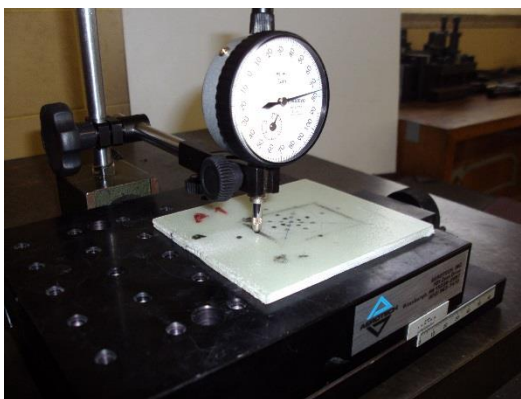


Figura 3-10 Comparador.

3.6. Avaliação da área de dano

No presente estudo ainda é feita a avaliação da área de dano, impacto a impacto. Este estudo é feito com recurso a um paquímetro. De facto, como as placas de vidro/epóxico são translúcidas é possível avaliar a área de dano por análise à contra luz, sem ser necessário recorrer a técnicas de análise não destrutivas, como por exemplo a inspeção por C-Scan ultrassónico. As áreas de dano provocadas só pelo impacto podem ser aproximadas a um quadrado. Existe, contudo, sempre algum erro na medição da área de dano. Na Figura 3-11 apresenta-se um exemplo de medição da área de dano sobre uma placa de compósito após impacto. A área de dano aumenta impacto a impacto, que evidencia que existe a alteração estrutural da placa, em função do número de impactos.



Figura 3-11 Paquímetro.

4. RESULTADOS

4.1. Introdução

No presente capítulo é feita a apresentação e discussão dos resultados experimentais. Este capítulo está dividido em três partes: apresentação dos resultados obtidos pela alteração do ângulo de incidência, alteração da *mesh* e por último a apresentação dos resultados de alteração da distância de incidência.

4.2. Variação da *mesh*

A alteração do tamanho de grão (*mesh*) influencia o tamanho do dano causado nas placas. Como já foi referido na secção 3.3 foram utilizados três tipos de granulometrias, de 20, 24 e 54 *mesh*. A *mesh* é tanto maior quanto menor for o tamanho de grão das partículas de corindo. Na Figura 4-1 apresenta-se duas imagens referentes à erosão com corindo de 20 *mesh* e outra com corindo de 54 *mesh*. Assim, pode-se concluir que o dano causado por uma partícula de menor *mesh* é maior. A energia cinética que a partícula possui é maior devido à maior massa das partículas que incidem sobre a placa, originando dano superior. O empilhamento das placas é $[0_2/90_2]_{6s}$.



(a)



(b)

Figura 4-1 (a) Erosão a 20 *meshes*. (b) erosão a 54 *meshes*.

A Tabela 4.1 apresenta os valores das propriedades iniciais das placas antes de se iniciar os ensaios de impacto. A massa de todas as placas diminuiu em relação à sua massa inicial. A variação de massa não é muito significativa. A profundidade ao centro aumenta com a diminuição da *mesh*.

Tabela 4.1 Propriedades iniciais das placas (alteração da *mesh*)

Varição da <i>mesh</i>	Diferença de massa [%]	Profundidade ao centro [μm]
Teste	0	0
54 <i>mesh</i>	0.11	19
24 <i>mesh</i>	0.17	37
20 <i>mesh</i>	0.36	68

Como se pode constatar pela Figura 4-2, a variação da dimensão da *mesh* não induziu grandes alterações no valor da energia elástica suportada pelas placas após o 1º impacto. A placa de teste apresenta um valor ligeiramente superior às restantes condições de ensaio. Após atingido o valor máximo de energia, este valor desce até um valor constante. Estes valores são respetivamente o valor de energia elástica (E_e) e o valor de energia absorvida pelas placas (E_a)

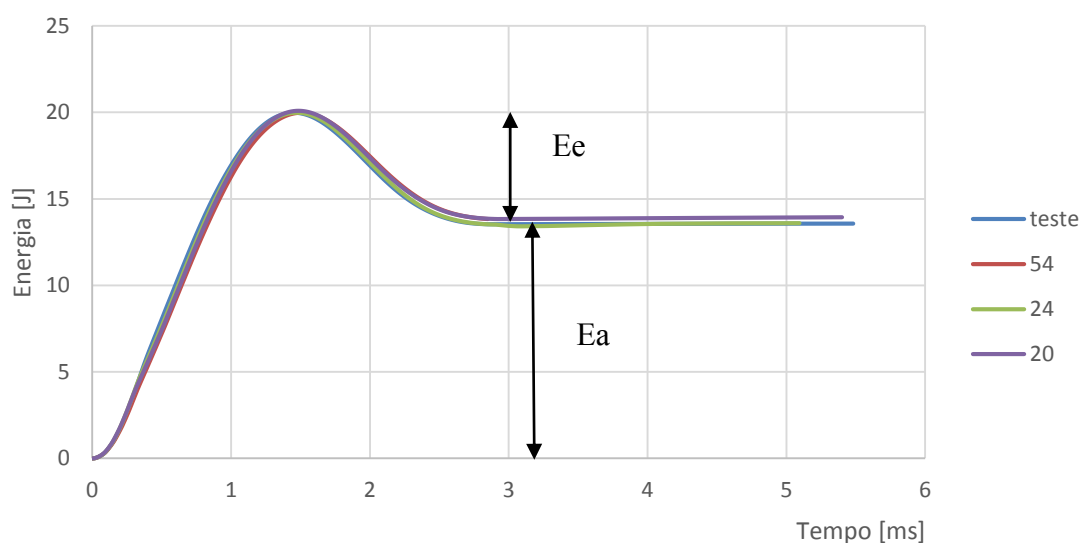


Figura 4-2 Energia -tempo 1º impacto.

Na Figura 4-3 são apresentadas as curvas Força-Deslocamento, após o 1º impacto para os 3 tamanhos de mesh em estudo. De acordo com a Figura 4-3 e Figura 4-4 é possível constatar-se que na obtenção do valor da força, o patamar de segurança da máquina foi atingido não sendo, por isso, possível aferir com exatidão o valor de força máxima para cada caso. Em relação aos deslocamentos, como é possível observar na Figura 4-3 verifica-se que a variação entre os deslocamentos para cada ensaio não é significativa (após o 1º impacto). Existe já alguma alteração estrutural das placas, pois o valor de zero para o deslocamento após o impacto não é atingido.

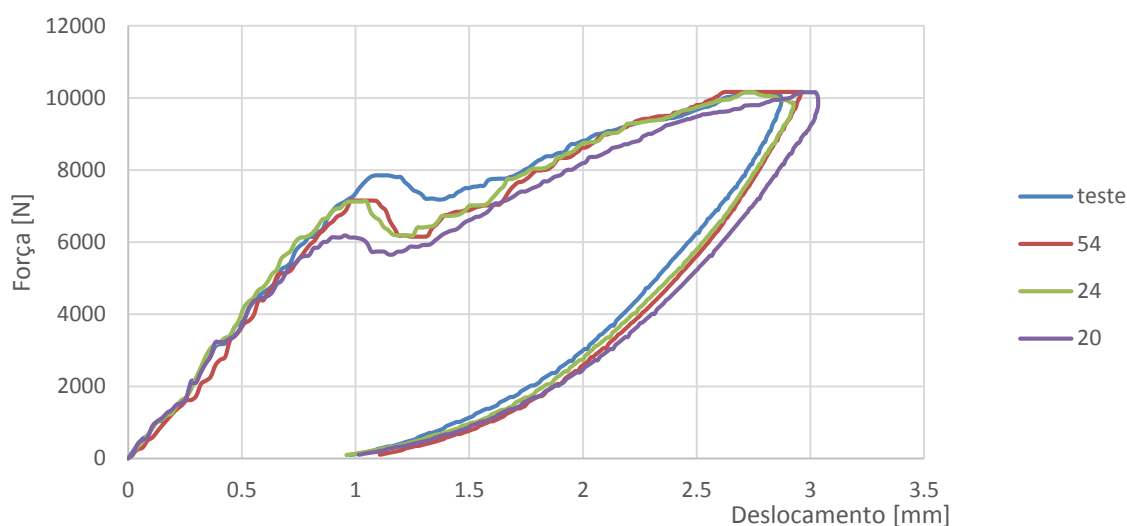


Figura 4-3 Força - Deslocamento 1º impacto.

A Figura 4-4 ilustra a evolução da força em função do tempo de contacto. Pode-se observar, na referida figura que não se obtêm diferenças significativas entre o tempo de contacto verificado para as 3 *mesh* realizadas.

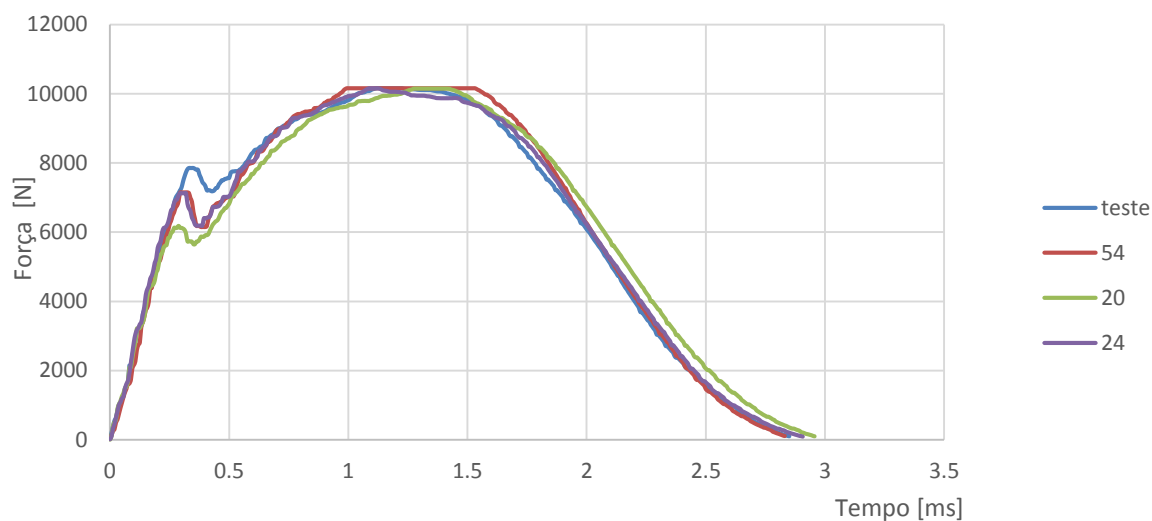


Figura 4-4 Força - Tempo 1º impacto.

Todas as placas foram sujeitas a multi-impactos. Aqui observa-se uma diminuição significativa no valor da força entre o 1º impacto e o último que a placa suporta antes da rotura total. A Figura 4-5 ilustra a alteração da força verificada em função do tempo para ensaio de multi-impacto no caso da placa de teste. Para a placa de teste (Figura 4-5) observa-se um decréscimo acentuado entre o valor de força máxima suportada pela placa para o 1º impacto e o correspondente valor para o 22º impacto. Esse valor é da ordem dos 79%.

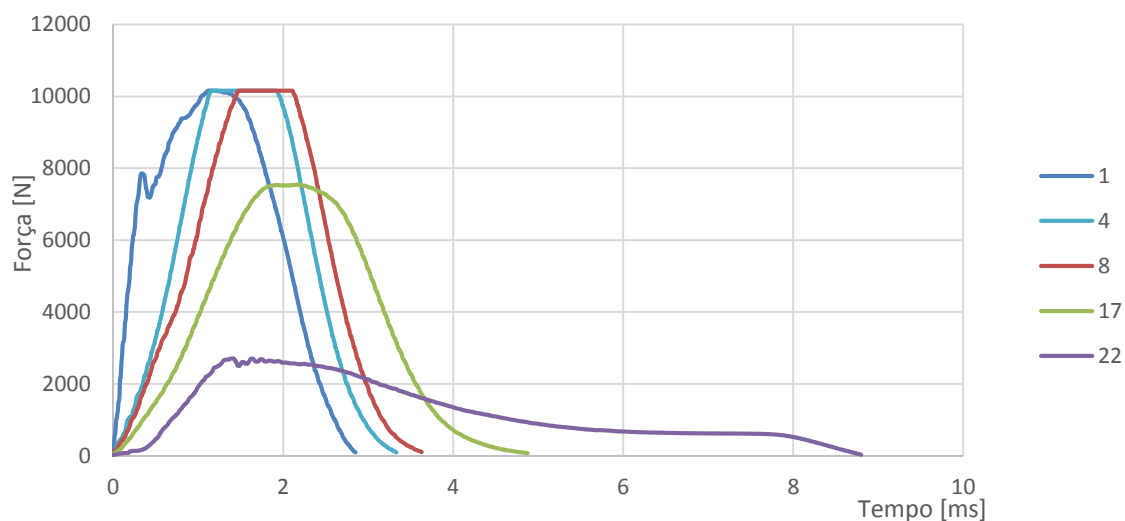


Figura 4-5 Força - Tempo Multi - Impacto (Placa de teste).

Na Tabela 4.2 apresenta-se o número de impactos que cada placa sofre até à rotura. A diminuição do número de impactos entre a placa de teste e a placa com menor *mesh* é de 54%.

Tabela 4.2 Número de impactos até à rotura.

Varição da <i>mesh</i>	Nº de impactos
Teste	22
20 <i>mesh</i>	10
24 <i>mesh</i>	12
54 <i>mesh</i>	14

Para o caso das placas solicitadas com uma *mesh* de 20 (Figura 4-6), a diminuição no valor da força máxima entre o 1º e o 12º impacto é da ordem dos 66%. Para os restantes valores de *mesh*, os valores são de 81% e 80% para as *mesh* de 24 e 54, respetivamente.

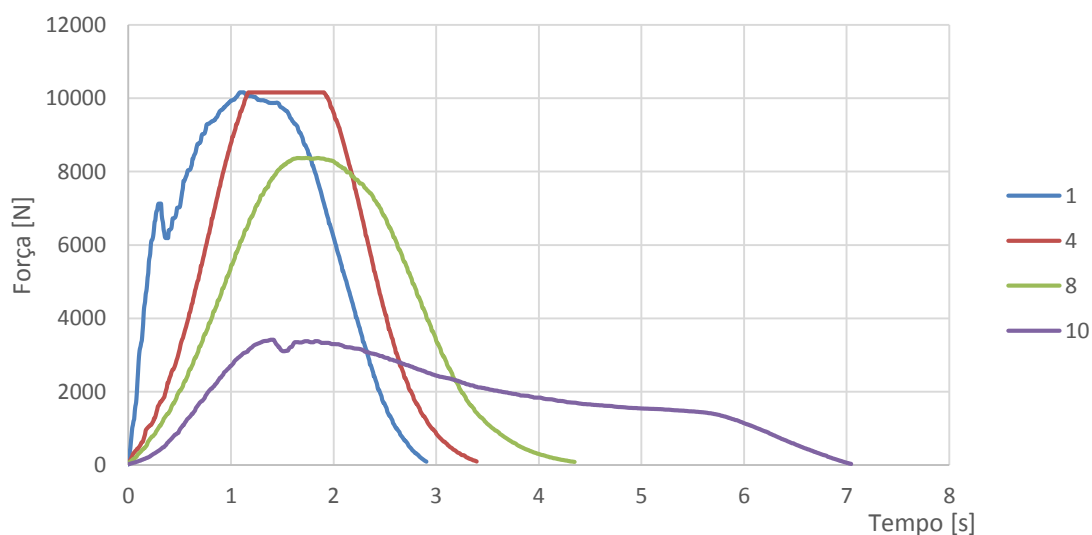


Figura 4-6 Força - Tempo Multi - Impacto (placa de 20 *mesh*).

No caso da avaliação da área de dano para o primeiro impacto, Tabela 4.3, existe aumento da área de dano com menor *mesh* aplicada. Por exemplo, comparando a área de dano placa a placa de 20 *mesh*, com a placa 24 *mesh*, essa variação é pouco significativa.

Mas, comparando com a placa de 54 *mesh*, a placa de 20 *mesh* tem uma área de dano superior 10%. A placa tem a menor área de dano.

Tabela 4.3 Área de dano do 1º impacto

Variação da <i>mesh</i>	Área de dano após o 1º impacto [mm ²]
Teste	795
54 <i>mesh</i>	853
24 <i>mesh</i>	945
20 <i>mesh</i>	958

Comparando a variação da força máxima com o deslocamento em função do número de impactos, constata-se que à medida que o nº de impactos aumenta, a força máxima diminui e o deslocamento máximo aumenta. De acordo com a Figura 4-7 observa-se que a placa de teste suporta um maior nº de impactos do que a placa sujeita a dano, sendo que o valor da força máxima para a placa de teste é sempre superior ao observado para as restantes placas. A Figura 4-7 é ilustrativa do que se observa para os restantes tamanhos de *mesh*.

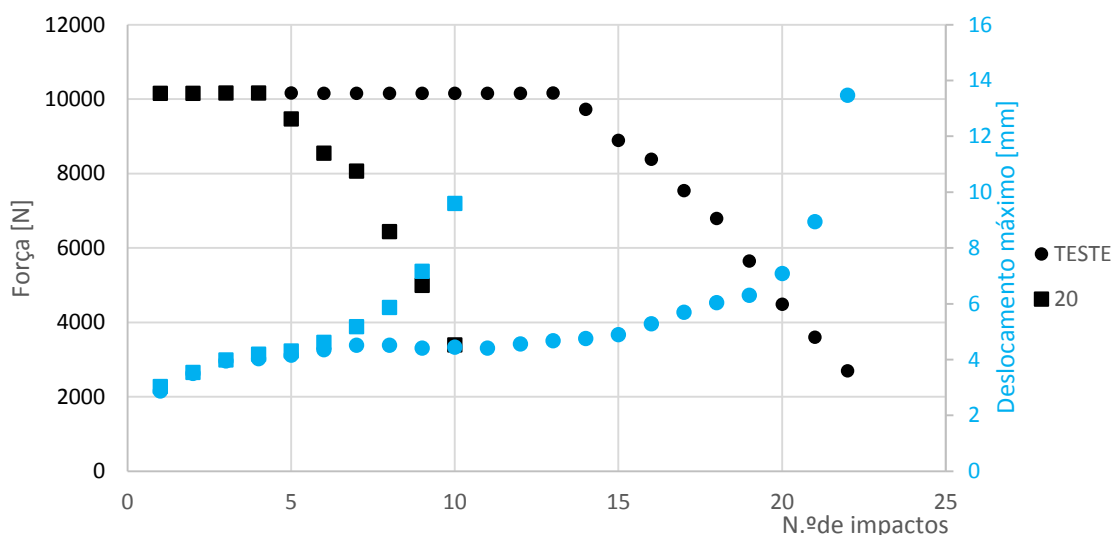


Figura 4-7 Força Máxima e Deslocamento Máximo em função do número de impactos.

Em termos de área de dano e considerando multi-impactos (até se atingir a rotura dos provetes) a Figura 4-8 mostra que as placas que ficam sujeitas a um menor valor de

energia elástica (maior valor de energia absorvida) são as placas sujeitas a solicitações com uma *mesh* de 20, isto é mais grosseira. Consequentemente as mesmas apresentam maior valor de área de dano.

Em termos do número de impactos até à rotura verifica-se uma diminuição dos mesmos em relação à placa de teste. A diminuição do tamanho da *mesh* (aumento do tamanho de grão) corresponde a uma diminuição do número de impactos. No caso em estudo, e com recurso à Figura 4-8, verifica-se que existe uma diminuição do número impactos de 54%, 45% e 36% para as placas de 20 *mesh*, 24 *mesh* e 54 *mesh*.

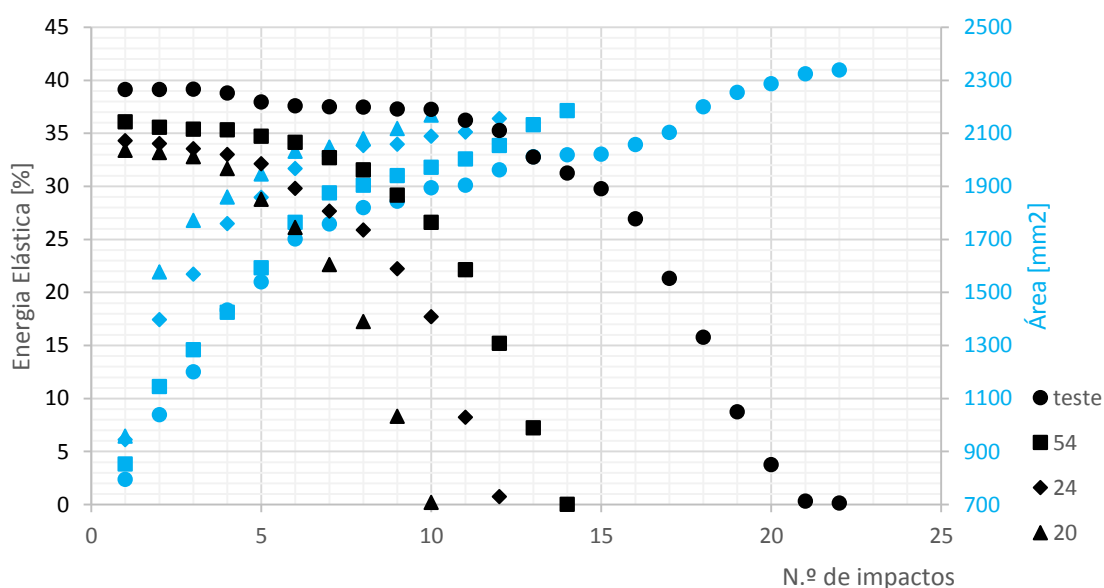


Figura 4-8 Energia Elástica e Área de dano em função do número de impactos.

A rigidez à flexão ao impacto é uma propriedade ótima para se verificar a integridade estrutural da placa. De facto, quando maior o valor da rigidez ao impacto maior a capacidade da placa de responder a solicitações exteriores, consequência da sua melhor integridade estrutural. A rigidez à flexão ao impacto é obtida através da relação entre a força máxima e o deslocamento. Na Figura 4-9 é apresentado um gráfico que ilustra a forma como se obteve o valor da rigidez ao impacto para todas as placas em análise. Através da inclinação da curva força-deslocamento é possível aferir este valor.

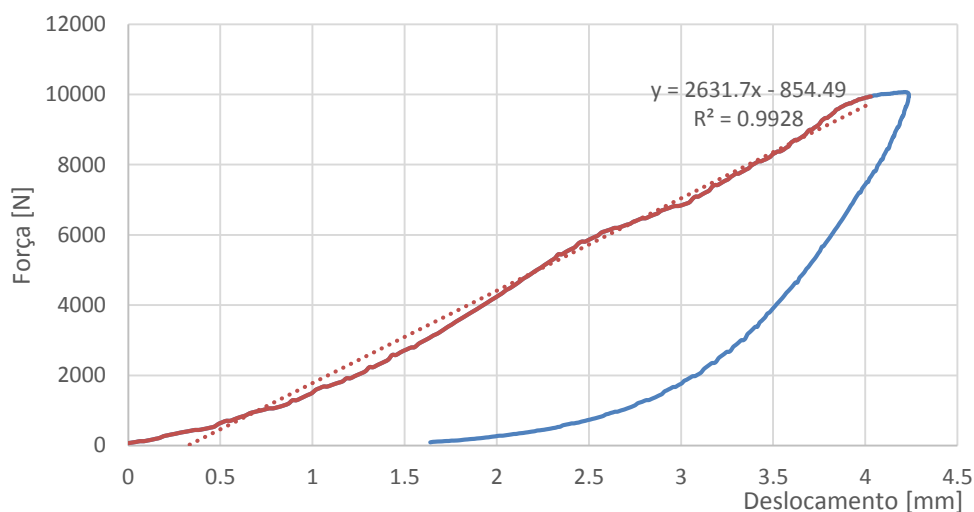


Figura 4-9 Curva Força – Deslocamento para obtenção da rigidez à flexão ao impacto (5º impacto da placa da variação da *mesh*).

Na Tabela 4.4 apresentam-se os valores da rigidez à flexão para o primeiro impacto. A redução do valor foi de 6.9% para a placa sujeita a uma *mesh* menor. Assim sendo e como já foi concluído anteriormente, um aumento do tamanho de grão conduz a uma diminuição do dano provocado. A Figura 4-10 representa a evolução da rigidez à flexão ao impacto. Compara-se então a evolução da placa de teste relativamente a placa com maior dano.

Tabela 4.4 Rigidez à flexão ao impacto após o 1º impacto.

Varição da <i>mesh</i>	Rigidez à flexão ao impacto [N/mm]	Varição em relação à placa de Teste [%]
Teste	7583	-
54	7566	0.22
24	7506	1
20	7057	6.9

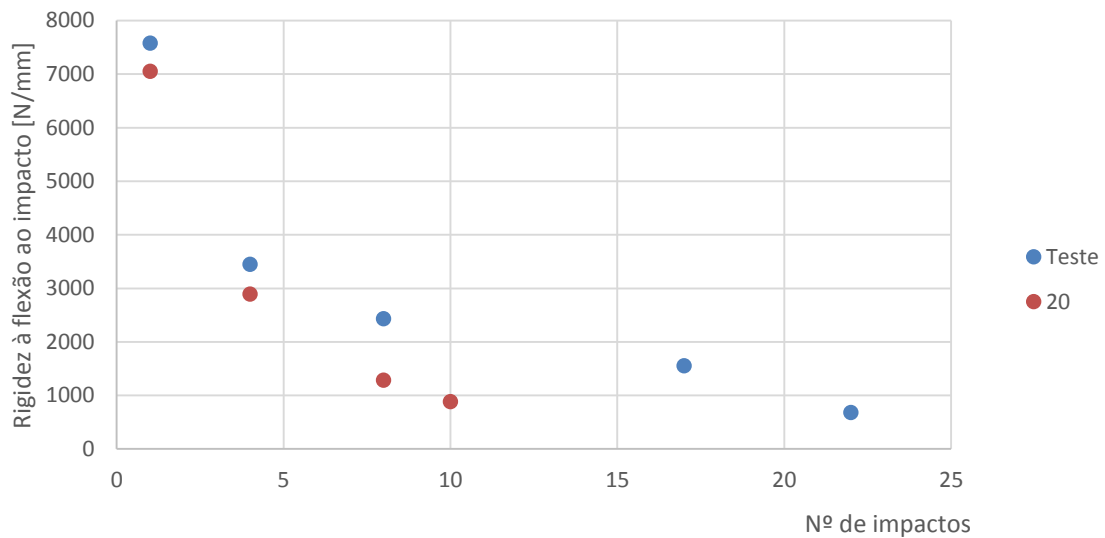
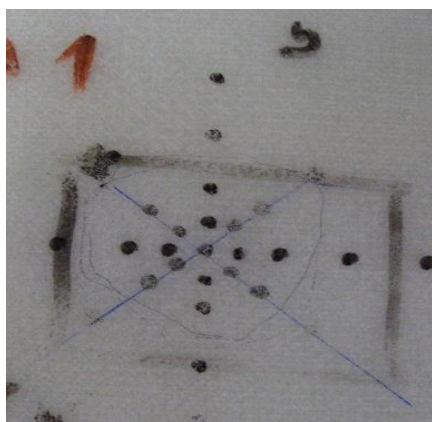


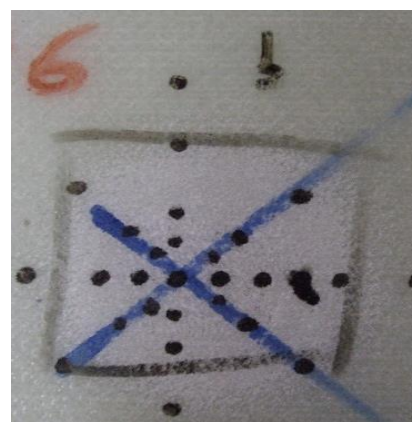
Figura 4-10 Rigidez à flexão ao impacto após Multi-impacto.

4.3. Variação do ângulo de incidência

A variação do ângulo de incidência do injetor com a placa influencia o tamanho e a posição do dano inicial. Como é possível observar através da Figura 4-11 (a) a erosão da placa a 10° não provoca grande dano na placa. Isto acontece porque o corindo, ao embater sobre as placas, percorre toda a área da placa não incidindo com grande profundidade, ao contrário do que acontece no caso a 90° (Figura 4-11 (b)) vê-se já alguma remoção da camada superficial. O empilhamento das placas é $[45_2/90_2/45_2/0_2]_{2s}$.



(a)



(b)

Figura 4-11 Dano após erosão (a) 10° (b) 90° .

Na Tabela 4.5 apresenta-se a relação entre a diferença de massa e a profundidade ao centro em função do tipo de disparo. Entende-se por profundidade ao centro como a quantidade de material removido após a erosão. Como se pode observar com o “disparo” a 90° a placa sofre um decréscimo na sua espessura de 45 mm.

Tabela 4.5 Propriedades iniciais das placas (alteração do ângulo de incidência).

Ângulo de incidência	Diferença de massa [%]	Profundidade ao centro [μm]
Teste	0	0
10°	0.11	1
45°	0.17	10
90°	0.56	45

De acordo com o Figura 4-12, representativa da curva de energia – tempo para o primeiro impacto, observa-se que no primeiro impacto nenhuma das placas é perfurada. De facto, pode-se verificar pela referida figura que a energia absorvida é cerca de 50% da energia total. Após ter sido atingido o valor máximo (12 J) existe um decréscimo até um valor patamar, o qual corresponde ao valor de recuperação elástica após o impacto. A parte inferior do patamar corresponde à energia absorvida (E_a), enquanto a parte superior (correspondente à diferença entre o valor de pico máximo e o valor do patamar) é a energia dissipada ou energia elástica (E_e) após o impacto.

Com a mesma figura, é possível verificar-se que a placa de teste é a que apresenta maior valor de energia elástica, ao contrário da placa que sofreu o embate a 90°, que é a que tem menor valor. A percentagem de energia elástica para a placa de teste é de 44%, superior à da placa com incidência a 90° (37%).

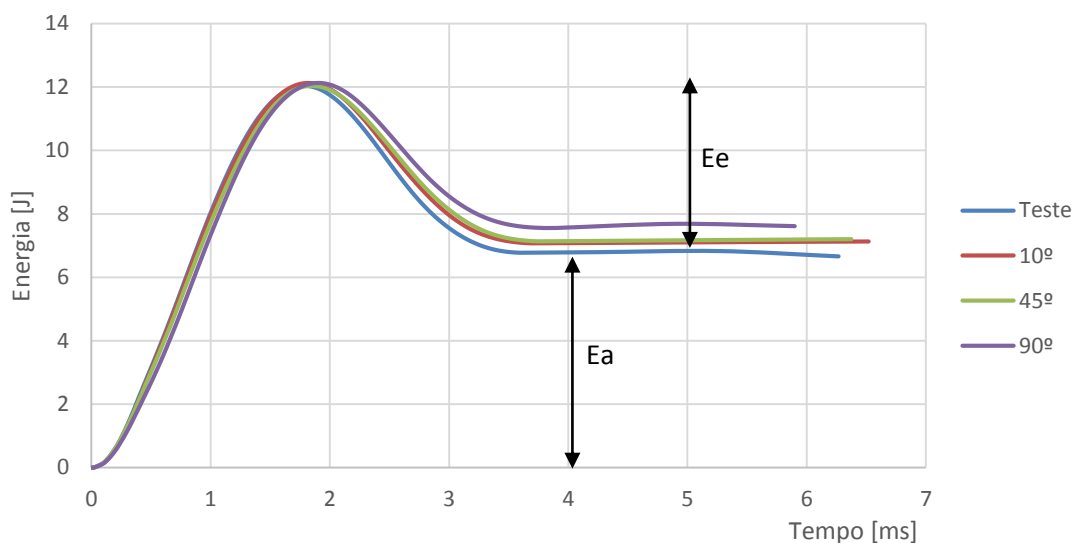


Figura 4-12 Energia - tempo para o 1º impacto.

De acordo com a Figura 4-13, é possível observar-se que a placa de teste é a que apresenta o maior valor da força máxima, na ordem dos 7000 N, e o menor valor de deslocamento, cerca de 2.6 mm. Com a continuidade da degradação exterior imposta à placa é natural que o valor da força máxima vá diminuindo e, conseqüentemente, o valor do deslocamento máximo vá aumentando. Esta afirmação é evidenciada na Figura 4-13, em que a placa que sofreu o dano com a inclinação de 90° apresenta o menor valor de força máxima, na ordem dos 6500 N e o maior valor de deslocamento, 3.1 mm.

Através da mesma figura, é possível comprovar-se que em todas as placas já existe alguma alteração estrutural, visto que, em todas elas o valor de deslocamento final é diferente de zero, isto é, não existe recuperação elástica total. Pode-se ainda constatar que à medida que aumenta o ângulo de incidência diminui o valor de força máxima.

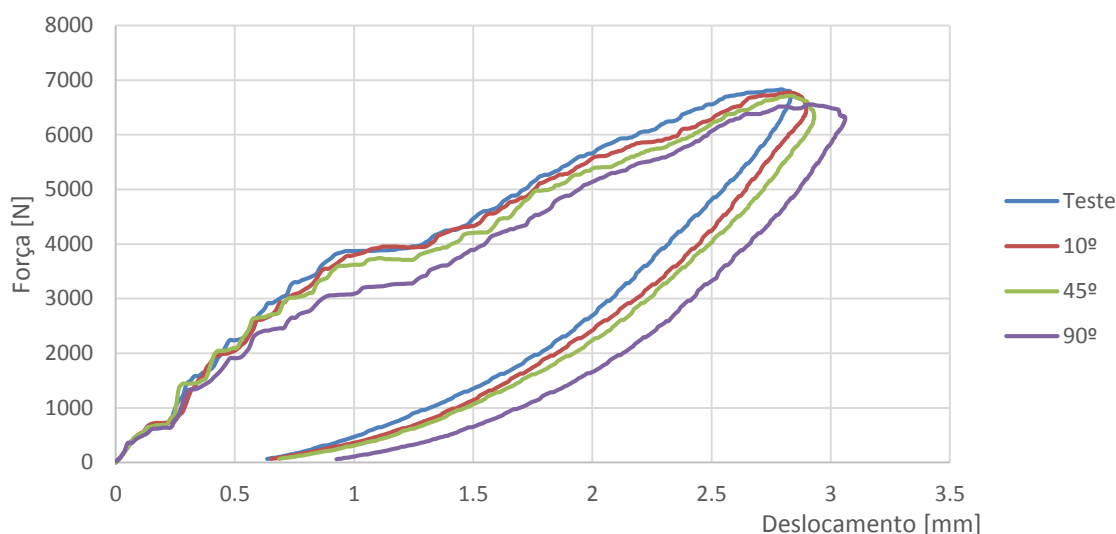


Figura 4-13 Força deslocamento para o 1º impacto.

Através da Figura 4-14, observa-se que a força aumenta em função do tempo até um valor máximo, diminuindo em seguida até ao valor zero, altura em que o impactor deixa de estar em contacto com a placa. A variação no valor do tempo de impacto não é muito significativa, no entanto nota-se uma ligeira diminuição no valor do tempo máximo da placa de teste em relação às restantes em estudo.

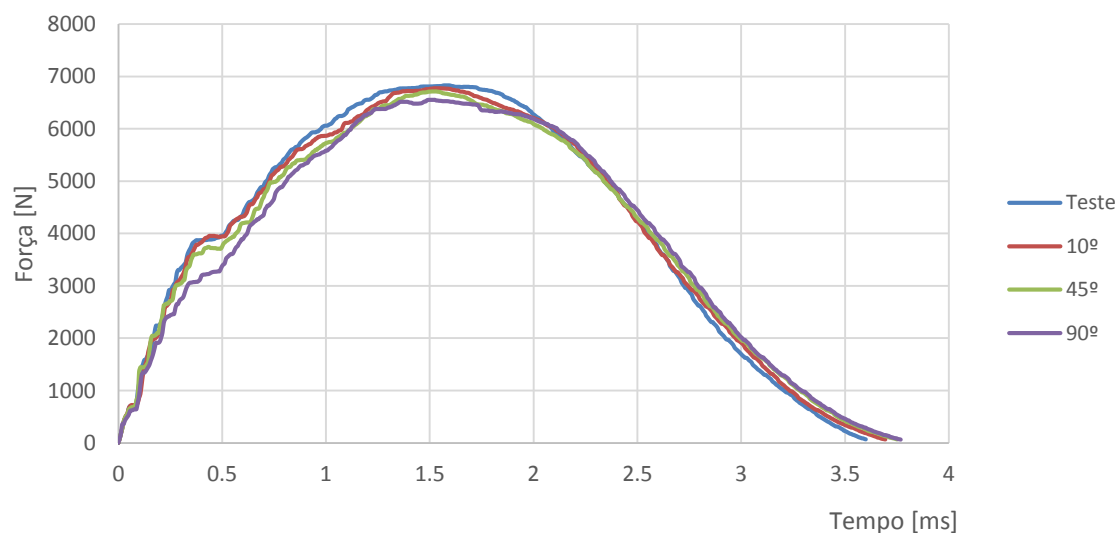


Figura 4-14 Força - tempo para o 1º impacto.

Na Tabela 4.6 apresentam-se os valores da área para cada uma das placas após o primeiro impacto. A área de dano da placa de teste é a menor. Para as restantes verifica-se um aumento da área de dano em função do tipo de ângulo aplicado. A área é de 1430 mm², 1474 mm² e 1516 mm² para as placas que sofreram erosão 10°, 45° e 90°, respetivamente.

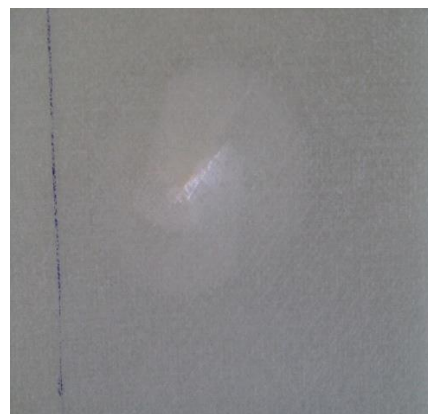
Com auxílio da Figura 4-15 pode-se comparar os diferentes tipos de danos causados após o primeiro impacto. Da análise da figura verifica-se que o 1º impacto já provocou alguma rotura das fibras. Estas imagens são representativas de todos os casos em análise. A zona mais branca da placa é a zona afetada após o primeiro impacto.

Tabela 4.6 Área de dano após o 1º Impacto.

Variação do ângulo de incidência	Área de dano após 1º impacto [mm²]
Teste	1194
10°	1430
45°	1474
90°	1516



(a)



(b)

Figura 4-15 Dano após o 1º impacto (a) Teste (b) 45º.

Com o intuito de analisar a integridade estrutural das placas, as mesmas foram submetidas a multi-impactos, sempre com o mesmo valor de energia, até atingirem a rotura.

A Figura 4-16, para a placa de teste, ilustra o comportamento típico das restantes placas na relação energia/tempo. Assim, observa-se que à medida que o número de impactos aumenta a força máxima diminui e o tempo de contacto aumenta. No caso da placa de teste verifica-se uma diminuição de cerca de 57% no valor da força máxima entre o primeiro impacto e o 11º impacto (ultimo impacto considerado). A diminuição do valor das restantes

forças máximas para as placas com ângulo de incidência de 10°, 45° e 90° foi de 62%, 58% e de 64%, respetivamente.

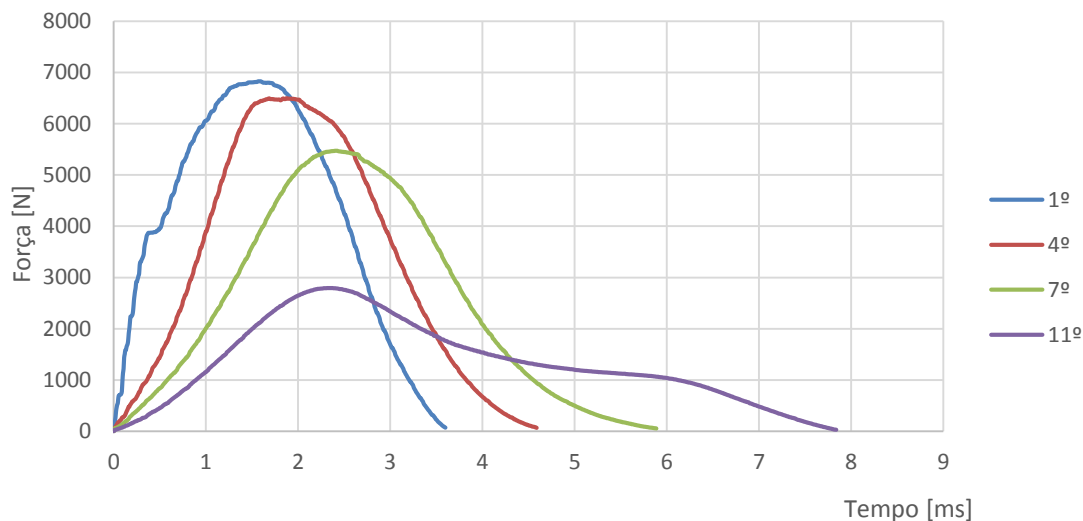


Figura 4-16 Força-tempo multi-impacto para a placa de Teste.

A Tabela 4.7 apresenta o número de impactos em cada placa até à rotura. A placa de teste sofre 11 impactos a uma energia de 12 J. Para as restantes placas a redução do número de impactos até a rotura, em relação à placa de teste, foi de 9%, 9% e 36% para as placas a 10°, 45 e 90°, respetivamente.

Tabela 4.7 Número de impactos até à rotura.

Variação do ângulo de incidência	Nº de impactos
Teste	11
10°	10
45°	10
90°	7

Na Figura 4-17 é possível comparar-se a evolução da força máxima com o deslocamento máximo, confirmando-se, que à medida que a força máxima diminui o deslocamento máximo aumenta. Com o aumento do número de impactos o valor da força máxima vai diminuindo, consequência do maior dano induzido na placa com o aumento do

número de impactos, o que confere à mesma menor rigidez, logo, menor capacidade de responder às solicitações exteriores.

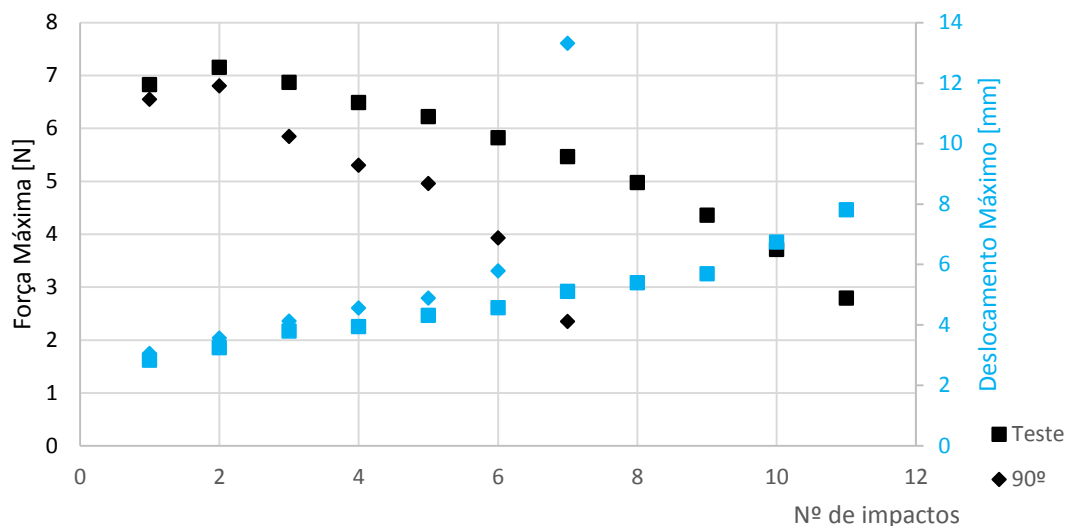


Figura 4-17 Evolução da Força Máxima e Deslocamento Máximo em função do n.º de Impactos.

A Figura 4-18 relaciona o valor da energia dissipada (elástica) pela placa durante os ensaios de impacto com o valor da área de dano. De acordo com a referida figura é possível constatar-se que a energia elástica varia inversamente com a área de dano, o que está de acordo com a literatura [21]. De facto, à medida que a energia elástica diminui a energia absorvida aumenta, o que promove um aumento de dano. Mais uma vez é possível verificar-se que a placa que sofreu maior dano é a que foi submetida a “shot penning” com inclinação de 90°.

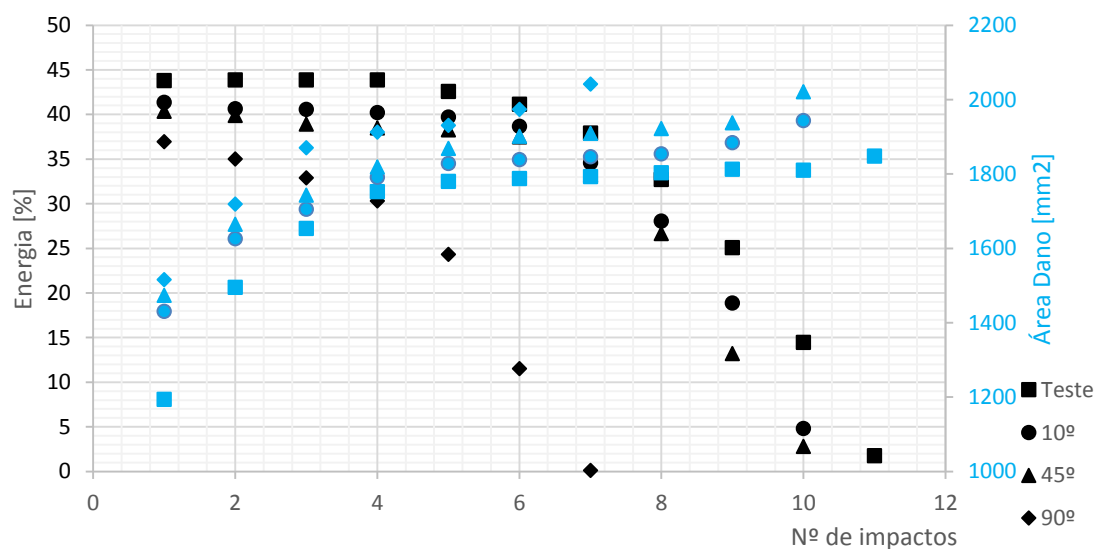


Figura 4-18 Energia Elástica e Área de dano em função do número de impactos

A rigidez à flexão máxima averiguada corresponde à placa de teste. Com a introdução de dano por partículas sólidas esta diminui consideravelmente. Com auxílio da Tabela 4.8, constata-se que a placa que obteve maior diminuição da energia elástica foi a placa a 90°. Tal como se verificou anteriormente esta é a placa que está em condições mais desfavoráveis. Na subsecção 4.2 (Figura 4-10), tem um gráfico representativo da forma como se calcula.

Tabela 4.8 Rigidez à flexão ao impacto após o 1º impacto.

Variação do ângulo de incidência	Rigidez à flexão ao impacto [N/mm]	Variação em relação à placa de Teste [%]
Teste	2351	-
10°	2240	5.4
45°	2154	8.3
90°	2153	8.4

Enquanto a rigidez à flexão ao impacto diminui, a área de dano aumenta com a evolução do número de impactos. Esta afirmação é comprovada quando se compara a evolução do dano (Figura 4-17) com a evolução da rigidez de flexão ao impacto (Figura 4-19).

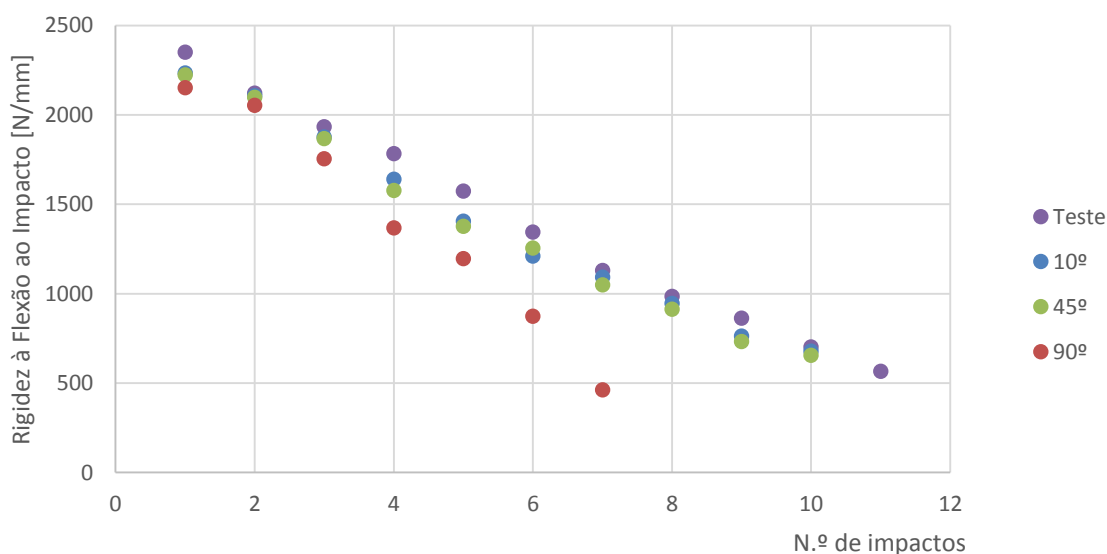


Figura 4-19 Rigidez à Flexão após multi-impactos.

Na Figura 4-20 e Figura 4-21 estão representados alguns exemplos da evolução da área de dano.

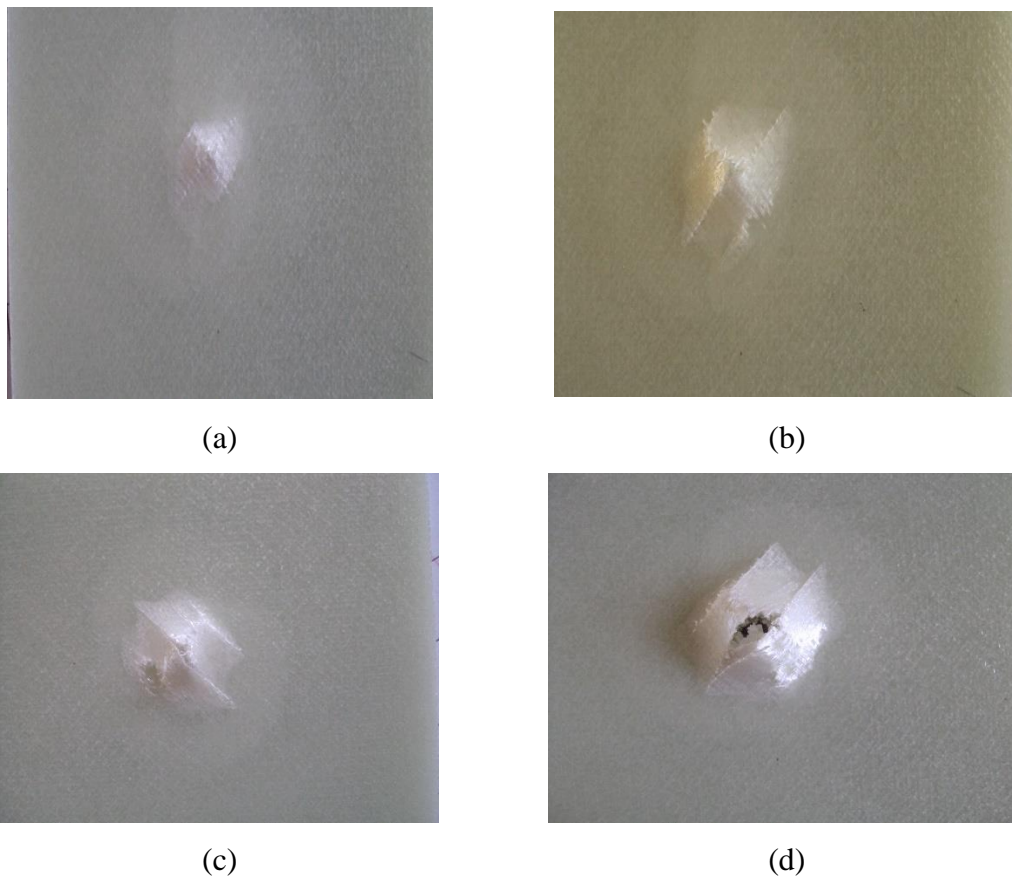


Figura 4-20 Evolução do dano na placa de teste (a) 4º impacto (b) 6º impacto (c) 8º impacto (d) 11º impacto.

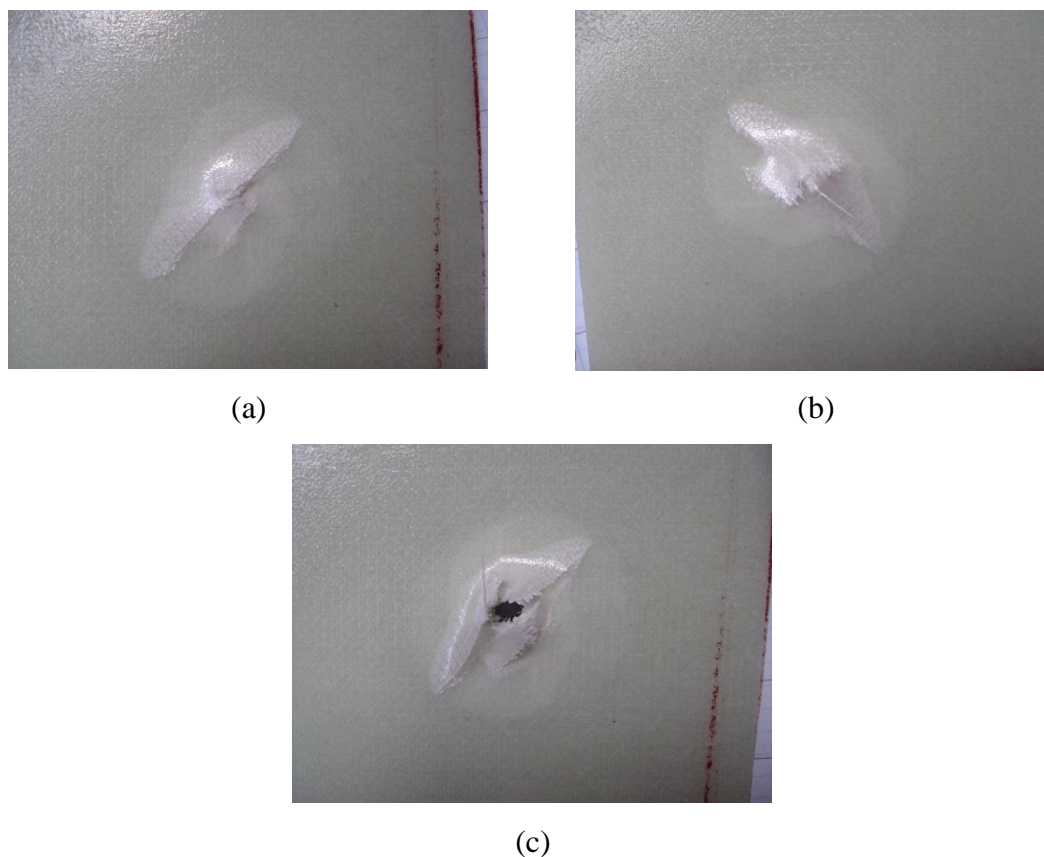


Figura 4-21 Evolução do dano na placa de 45° (a) 4º impacto (b) 6º impacto (c) 10º impacto.

4.4. Variação da distância de incidência

O último teste realizado foi a variação da distância das placas ao bocal. Quanto menor a distância maior será o dano. A variação da distância influencia a energia com que as partículas de corindo embatem sobre as placas. Com um aumento da distância as perdas de energia que as partículas sofrem é maior e, conseqüentemente, a velocidade com que embatem é menor. Neste caso o dano provocado será inferior como se verá nesta subseção. Em casos reais isto pode acontecer no caso de o vento provocar, por exemplo, a aceleração de partículas de areia, aumentando assim a sua energia que ao embater sobre a estrutura de um avião deve causar danos superiores. O empilhamento das placas é $[45_2/90_2/-45_2/0_2]_{3s}$.

Os valores da Tabela 4.9 as propriedades iniciais das placas. Na realidade, verifica-se que as placas que apresentam maior profundidade ao centro são as que foram

sujeitas a “disparo” a 75 mm, logo apresentam maior perda de integridade estrutural. A variação da massa é reduzida

Tabela 4.9 Propriedades iniciais das placas.

Varição da distância	Diferença de massa [%]	Profundidade ao centro [μm]
Teste	0	0
75 mm	0.38	93
100 mm	0.37	66
125 mm	0.33	55

Através da Figura 4-22 verifica-se que no caso da análise da influência da distância do disparo em relação à placa, não se detetam variações significativas no que diz respeito à energia elástica, após o 1º impacto.

Da Figura 4-23 pode-se notar que a placa de teste apresenta um maior valor de força máxima em relação às outras 3 situações de análise. A situação mais desfavorável é com a distância a 75 mm, observando-se um decréscimo no valor da força de cerca de 8% em relação à placa de teste.

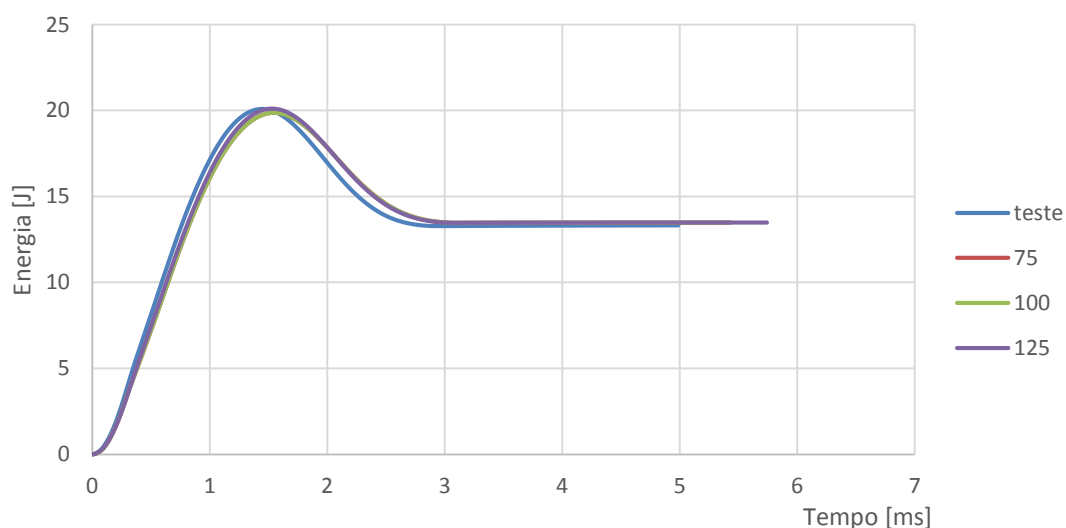


Figura 4-22 Energia tempo em função da variação da distância (1º impacto).

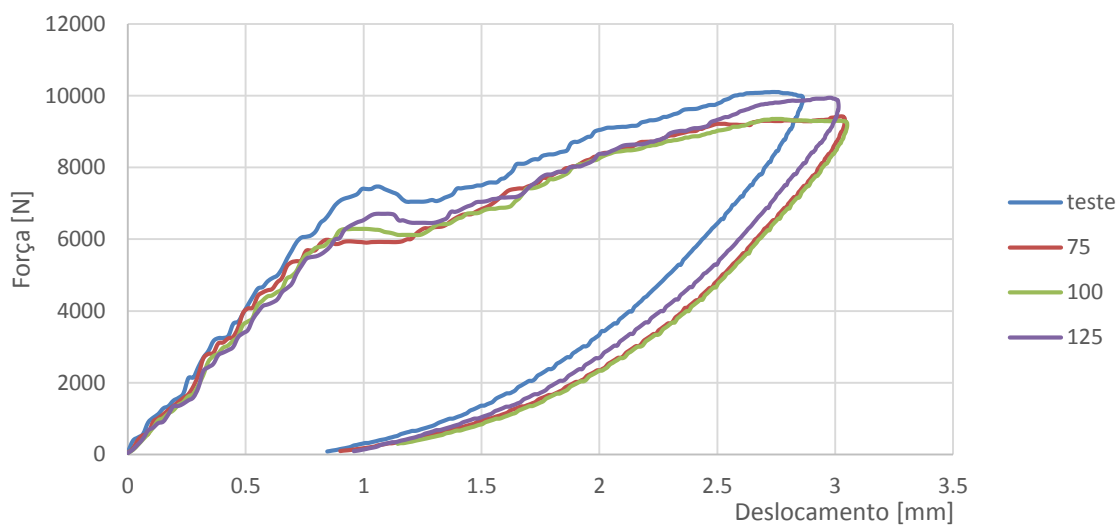


Figura 4-23 Força - Deslocamento em função da variação da distância (1º impacto).

O tempo de contacto determinado para as diversas distâncias em estudo não apresenta, após 1º impacto, diferenças significativas. Da Figura 4-24 constata-se que o maior tempo de contacto ocorre para placas com distância de 75 mm.

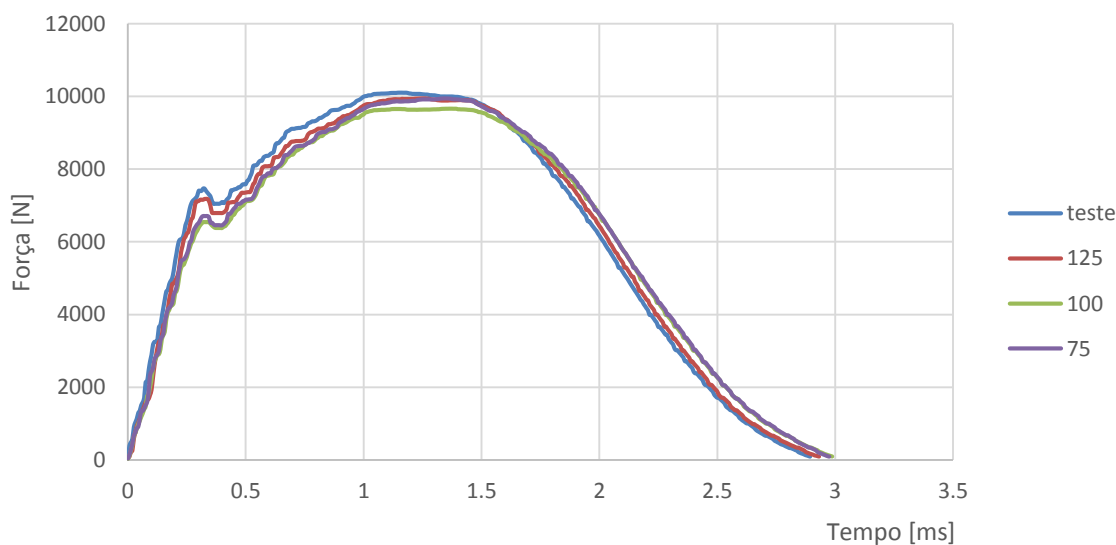


Figura 4-24 Força - Tempo em função da variação da distância (1º impacto).

Na Tabela 4.10 são apresentados os valores da área de dano para o primeiro impacto. Apesar de não existirem grandes diferenças nos resultados até aqui apresentados para a variação da distância, neste caso, há diferenças na área após o primeiro impacto. Como se pode verificar pelos valores obtidos quanto menor for a distância de incidência maior será a área de dano do primeiro impacto.

Tabela 4.10 Área de dano 1º impacto.

Varição da distância	Área de dano 1º impacto [mm ²]
Teste	1012
75 mm	1244
100 mm	1100
125 mm	1058

Também no caso de variação de distância do bocal à placa se procedeu à análise de multi-impacto, comparando a variação da força máxima, através da Figura 4-25, observa-se que no caso da placa de teste existe um decréscimo na ordem dos 70% entre o 1º e 17º impacto. Para as restantes situações essa diminuição foi de 67%, 58% e 70%, para as distâncias de 75 mm, 100 mm e 125 mm, respetivamente.

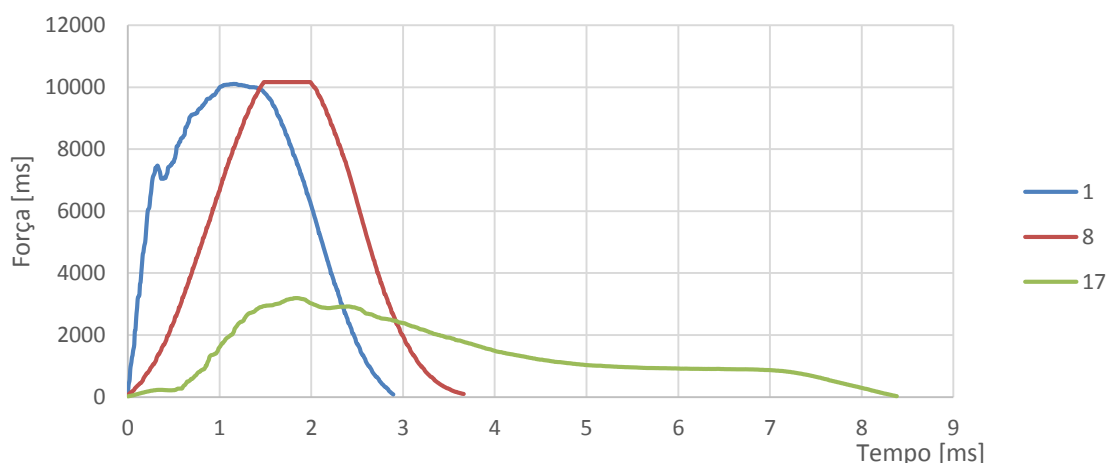


Figura 4-25 Força - tempo placa de teste (multi-impacto).

A Tabela 4.11 apresenta o número de impactos até à rotura da placa. A diminuição entre a placa de teste e a placa mais próximo do bico de erosão é 30%.

Tabela 4.11 Número de impactos até a rotura.

Variação da distância	Nº de impactos
Teste	17
75 mm	12
100 mm	12
125 mm	13

Na Figura 4-26 é possível analisar a evolução da força máxima e do deslocamento em função do número de impactos. Comparando por exemplo a placa de teste com a sujeita a “disparo” a 75 mm, constata-se que a placa de teste aguenta um maior nº de impactos, maior força máxima e menor valor de deslocamento.

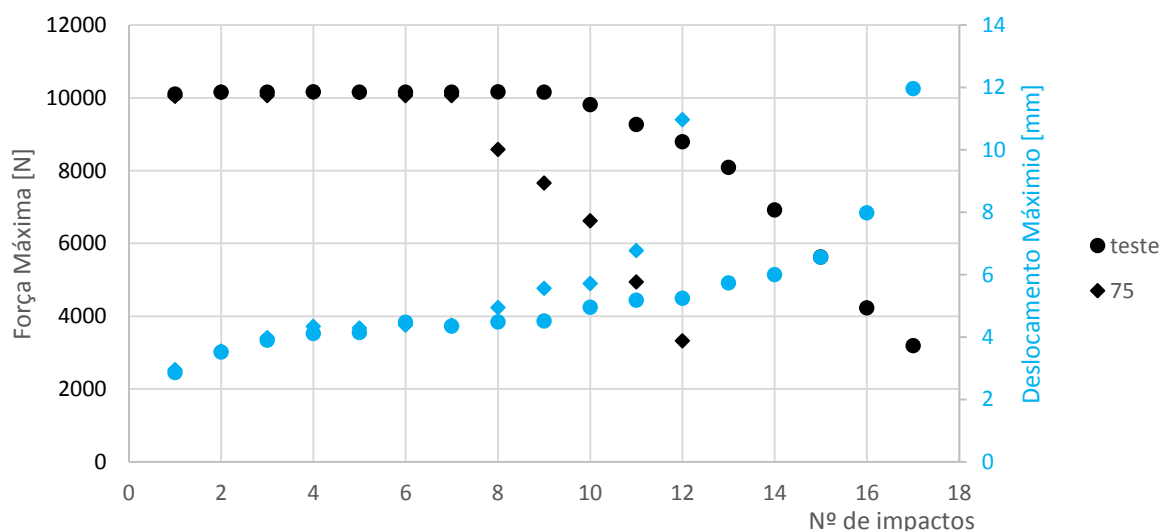


Figura 4-26 Força máxima e deslocamento máximo em função do número de impactos.

Na Figura 4-27 é ilustrada a variação da área de dano e da energia elástica em função do número de impactos, para cada uma das situações, (distâncias de 75, 100 e 125 mm). Analisando a influência do número de impactos no valor da energia elástica e na área de dano, verifica-se que as placas que apresentam pior comportamento são as placas sujeitas a degradação com menor distância, neste caso a 75 mm.

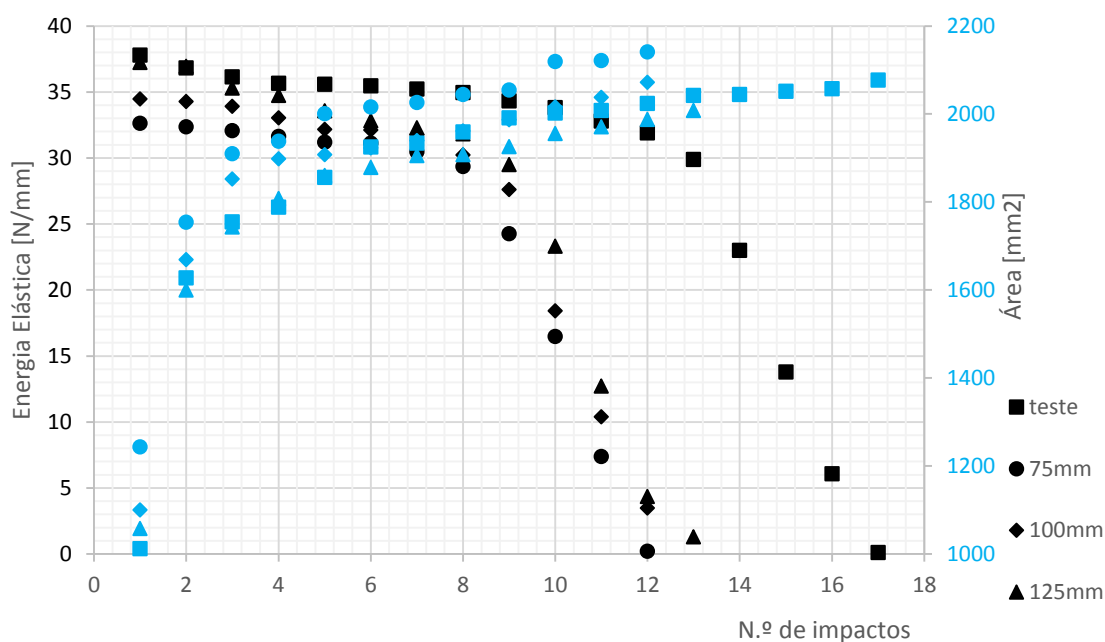


Figura 4-27 Área de dano e Energia dissipada em função do número de impactos

Tal como referido nas outras subsecções a evolução da energia elástica diminui com o aumento da área de dano. De entre os casos expostos anteriormente (variação do ângulo e da *mesh*), a área de dano é maior para o caso em que a placa se encontra mais próxima do projetor de partículas, ou melhor, o dano é mais pequeno (em termos de área) mas maior em no que diz respeito à profundidade. Assim a quantidade de fibras afetadas será maior. No caso do aumento da distância, o ângulo de espalhamento aumenta conduzindo a uma maior área afetada, sendo esta de carácter mais superficial. Na Tabela 4.12 apresentam-se os valores para a rigidez à flexão após o primeiro impacto. A evolução da rigidez é representada na Figura 4-28.

Tabela 4.12 Rigidez de flexão após o 1º Impacto

Varição da distância	Rigidez à flexão ao impacto [N/mm]	Varição em relação à placa de Teste [%]
Teste	7583	-
75	6967	8.1
100	7010	7.6
125	7014	7.5

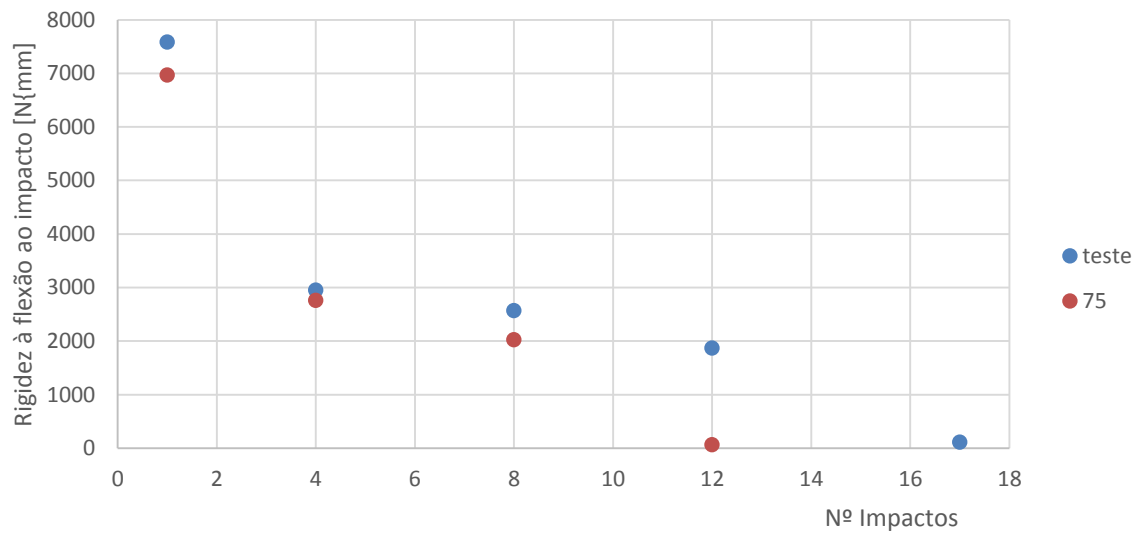


Figura 4-28 Rigidez à flexão após Multi-impactos

A evolução da rigidez à flexão ao impacto para o caso do estudo variação da distância de disparo apresenta a mesma tendência que em ambos os casos anteriores.

Nesta análise verifica-se que a área de dano na placa aumenta com a diminuição da distância de disparo, a energia elástica diminui, pelo que a capacidade de responder elasticamente ao impacto é menor.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Após terminado os ensaios e feita a análise dos resultados de acordo com os objetivos inicialmente traçados é possível retirar algumas considerações mais importantes.

Nesta secção serão ainda indicadas algumas sugestões para trabalhos a realizar no futuro.

5.1. Conclusões da análise de resultados

1. A primeira conclusão que se pode tirar, é independentemente da circunstância em que ocorre, qualquer compósito que sofra “*shoot pinning*” diminui a capacidade de resistir a multi-impactos;
2. O valor da energia elástica diminui com número de impactos;
3. Os danos provocados, por exemplo, pela variação da distância influencia todo o comportamento do compósito quando submetido a multi-impactos;
4. A diferença de massa nas placas é influenciada pelo tipo de dano sofrido pelas mesmas. Quanto mais exposto ficarem os compósitos de vidro/epóxico a pequenos impactos, maior será a sua perda de massa (maior arrancamento) e, conseqüentemente, maior será a alteração das suas propriedades mecânicas;
5. No caso das placas $[0_2/90_2]_{6s}$ em que se alterou a *mesh* do corindo, a placa que sofreu choque com a maior *mesh* sofreu menos 36% dos impactos até à rotura, em relação à placa de teste. Quanto menor a *mesh* utilizada menor o número de impactos que as placas suportam;
6. No caso da variação de distância, a placa a maior distância sofreu menos 23% dos impactos, quando comparada com a placa de teste;

7. Para as placas em que se alterou o ângulo de disparo, a diminuição de impactos até à rotura foi de 10% para os casos de 45° e 10°.
8. É ainda importante referir que, apesar da influência do primeiro impacto para todas as placas ser bastante semelhante, com a evolução do número de impactos começa a sobressair os efeitos provocados pelo corindo nas placas.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

O trabalho realizado colocou em evidência alguns aspetos que seria importante analisar no futuro:

1. Analisar placas de vidro epóxico com empilhamento $[45_2/90_2/45_2/0_2]_{2s}$, visto que, com a utilização de placas mais finas o efeito da erosão a baixa velocidade é mais notório.
2. Em vez da utilização de corindo utilizar, por exemplo, jato de água;
3. Degradar toda a placa de compósito e não apenas localmente;
4. Estudar a influência da pressão e tempo de erosão na degradação das placas;
5. Fazer estudos semelhantes para outro tipo de compósitos;
6. Avaliar o comportamento de placas após erosão em outras situações de carregamento. Como exemplo deixo a flexão em três pontos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Wikipédia, “Compósito,” [Online]. Available: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Comp%C3%B3sito>. [Acedido em 2014 Março 5].
- [2] W. F. Smith, *Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*, McGraw-Hill de Portugal, Lda, 1998.
- [3] A. M. F. M. Ventura, “Os compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas Metálicas,” *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, 2009.
- [4] D. E. F. Prof. Henrique Cezar Pavanati, *Introdução à Tecnologia dos Materiais*, 2010.
- [5] Premix, “Advantages of Composites.” [Online]. Available: <http://www.premix.com/why-composites/adv-composites.php>. [Acedido em 5 Março 2014].
- [6] L. Juvandes, “Aplicações de Compósitos FRP nro reforço de estruturas,” *Jornadas de Materiais de Construção*, vol. 1^a, pp. 239-270, 2011.
- [7] A. Ramos, “Engenharia é:,” 2013 Janeiro 2013. [Online]. Available: <http://www.engenhariae.com.br/tecnologia/materiais-compositos-na-aviacao/>. [Acedido em 30 06 2014].
- [8] [Online]. Available: <http://www.scielo.br/img/revistas/po/v17n3/003f2.gif>.
- [9] T. Nogueira, “Estudo da Influencia do Efeito do Meio Ambiente na resistência ao impacto de laminados de vidro epóxico,” *Tese de Mestrado, FCTUC Coimbra*, 2013.
- [10] “http://lh6.ggpht.com/_W6iQJ1fV5ws/S0zgmJkRCVI/AAAAAAAAABsw/MFTRoTDET9M/image_thumb8.png?imgmax=800,” [Online].
- [11] A. M. Moreira, *Materiais Compósitos*, Tomar, 2008.
- [12] J. C. Pereira, “Materiais compósitos,” [Online]. Available: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAB7kAD/materiais-compositos>. [Acedido em 01 06 2014].
- [13] L. A. Romariz, *Dano em Placas Laminadas devido ao Impacto a Baixas Velocidades*, São Paulo, 2008.
- [14] A. Amaro, P. N. B. Reis, A. Neto e C. Louro, “Effects of alkaline and acid solutions on glass/epoxy composites,” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 98, pp. 853-858, 2013.
- [15] G. Huang e Honxia Sun, “Effect of water absorption on the mechanical properties of glass/polyester composites,” *Materials & Design*, vol. 28, 2007.
- [16] R. A. Silva e M. C. Rezende, “Erosão em Compósitos à Base de Fibras de Vidro/Kevlar e Resina Epóxi de uso Aeronáutico,” em *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 13, 2003, pp. 79-86.

-
- [17] Huseyin Imrek e Mehmet Bagci, "Application of Taguchi method on optimization of testing parameters for erosion of glass fiber reinforced epoxy composite materials," *Materials & Design*, vol. 46, 2013.
- [18] Huseyin Imrek e Mehmet Bagci, "Solid particle erosion behaviour of glass fibre reinforced boric acid filled epoxy resin composites," *Tribology International*, vol. 44, 2011.
- [19] K. Tsuda, M. Kubouchi, T. Sakai, AH Saputra e N. Mi, "General method for predicting the sand erosion rate of GFRP," *Wear*, vol. 260, 2006.
- [20] EUA Tewari , AP Harsha, AM Heron e K Friendrich, "Solid particle erosion of unidirectional carbon fibre reinforced polyetheretherketone composites," *Wear*, vol. 252, 2002.
- [21] L. Ferreira, "Avaliação do Dano em Compósitos Laminados devido a Impactos de Baixa Velocidade.," Tese de Doutorado, FCTUC Coimbra, 2006.
- [22] D. D. Chung, *Carbon Fiber Composites*, Boston: Butterworth - Heinemann, 1994.
- [23] S. Abrate, *Impacte An Composites Structures*, Cambridge: University Press, 1998.
- [24] C. S. C. Jih, "Prediction of Delamination in Composite Laminates Subjected to Low Velocity Impact," *Journal of Composites Materials*, pp. 684-781, 1993.
- [25] G. Ferreira, "Resistência ao Impacto de laminados previamente sujeitos a cargas de flexão," Tese de Mestrado, FCTUC, Coimbra, 2014.
- [26] INSTRON, "CEAST Model 9340," [Online]. Available: <http://www.instron.us/wa/product/CEAST-9340-Drop-Tower.aspx>. [Acedido em 01 06 2014].
- [27] L. C. Pardini, "Preformas para Compósitos Estruturais," 2000. [Online]. Available: <http://www.scielo.br/scielo.php?lng=en>. [Acedido em 2 Junho 2014].

