



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Compressão de placas compósitas após submetidas a impacto a baixa velocidade

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

Autor

Ludgero Gomes dos Santos Guimarães

Orientador

Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro

Júri

Presidente Professor Doutor José Maria O. Sousa Cirne
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogal Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro
Professor Associado da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2010

Agradecimentos

Este espaço é dedicado a todos aqueles que deram a sua contribuição para que esta dissertação pudesse ser realizada. A todos deixo aqui o meu agradecimento sincero.

Em primeiro lugar, agradeço à Professora Doutora Ana Paula Amaro pela forma como orientou o meu trabalho e pela paciência que demonstrou ao longo de todo o tempo em que necessitei da sua ajuda. As suas recomendações na forma de redigir esta dissertação e a extrema cordialidade com que sempre me recebeu foram fundamentais. Estou grato por ambas e também pela liberdade de acção que me permitiu e que foi decisiva para que este trabalho contribuísse para o meu desenvolvimento pessoal.

Em segundo lugar, agradeço ao Professor Doutor Altino Loureiro pela disponibilidade e ajuda na realização dos ensaios experimentais de compressão.

Gostaria ainda de agradecer ao Sr. João Moreira pela ajuda na concepção do equipamento para a realização dos ensaios experimentais.

Quero agradecer à minha família pelo estímulo, carinho, e paciência demonstrada ao longo de todos estes anos de estudo e formação. Agradeço fundamentalmente à minha mãe que me demonstrou que a coragem e a força de vontade são os ingredientes fundamentais para atingirmos qualquer objectivo na vida. Expresso aqui também um profundo agradecimento ao meu tio Luís Miguel pela sua magnífica oferta que foi imprescindível para a elaboração desta dissertação.

Quero agradecer também aos meus amigos e colegas que, com as suas opiniões e críticas ao meu trabalho, me ajudaram e que participaram comigo nesta aventura ao longo dos anos. De entre todos estes, expresso o especial contributo ao Frederico pela sua disponibilidade e ajuda na preparação desta tese.

E, por fim, a todos os que directa ou indirectamente contribuíram para a realização deste trabalho e que, por alguma falha de memória, não tenham sido citados.

A todos o meu profundo agradecimento.

Resumo

As propriedades mecânicas de um material compósito podem ser significativamente reduzidas por solicitações de impacto a baixa velocidade. A resistência do material à compressão pode diminuir consideravelmente em relação ao seu valor inicial, devido à presença de defeitos provocados pelo impacto.

O objectivo desta dissertação é a análise experimental da resistência residual à compressão após impacto (CAI), em placas compósitas de matriz epóxida reforçada com fibras de carbono, sujeitas a impacto a baixa velocidade. Este estudo é de extrema importância pelo facto de conduzir ao aparecimento prematuro de instabilidade estrutural e à consequente restrição do uso deste tipo de materiais, reforçada pelo facto do dano interno ser de difícil detecção.

Antes de se proceder aos ensaios de compressão, houve a necessidade de melhoramento do equipamento anteriormente desenvolvido, consequência deste se ter deformado por não suportar os esforços envolvidos. O equipamento de compressão foi concebido com base nas normas ASTM D 3410M-95.

A análise experimental dos ensaios de compressão foi realizada para se avaliar o comportamento das placas compósitas, com e sem defeito. Assim, poder-se-ia retirar alguma conclusão acerca da influência do defeito na alteração das propriedades do material compósito.

Após a realização dos ensaios observou-se que o defeito provocado por impacto a baixa velocidade reduz a capacidade de sustentação da carga de compressão aplicada, relativamente aos provetes que não foram sujeitos a impacto, sendo a redução máxima observada de 48%. Esta perda de integridade pode ser justificada pela ocorrência de delaminagens nas interfaces onde os laminados têm diferentes orientações. A orientação das camadas constituintes dos compósitos laminados influencia o seu comportamento na resistência à compressão, sendo que nos compósitos multidireccionais, esta resistência é superior aos unidireccionais.

Palavras-chave: Compósitos de Carbono/Epóxido, Compressão Após Impacto (CAI), Delaminação, Impacto a Baixa Velocidade.

Abstract

The mechanical properties of a composite material can be significantly reduced by low velocity impact. The material's ability to withstand compression can decrease considerably when compared to its initial state due to defects caused by the impact.

The aim of this dissertation is the experimental analysis of the residual strength in compression after impact (CAI) on carbon/epoxy laminate under low velocity impact. This kind of study is extremely important due to the fact that low velocity impact leads to a premature structural instability and consequently restrict the usage of these composite materials. Furthermore, this importance is reinforced by the fact that the internal damage is very difficult to detect.

Before the start of testing it was necessary to make changes to existing equipment, because it suffered large deformation during previous tests, due to the high effort required in compression tests. The compression apparatus was built based on the standards ASTM D 3410M-95.

The experimental analysis was made to study the behaviour of the composite plates, both undamaged and damaged, in order to evaluate if the presence of damage cause some modification in the properties of the composite material.

Results show that damage caused by low velocity impact decrease the capacity to sustain the applied compression load, relatively to the composites that are non-impacted, being the maximum reduction of 48%. This loss of strength can be caused by delaminations, which occur in the interfaces where the laminates change orientation. The stacking sequence of the carbon/epoxy laminate influences its compression strength behaviour, being this strength higher in multidirectional laminates than in the unidirectional ones.

Keywords: Carbon/Epoxy Composites, Compression After Impact (CAI), Delamination, Low Velocity Impact.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vi
Simbologia e Siglas	vii
Simbologia.....	vii
Siglas	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DE ARTE.....	3
2.1. Resumo	12
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	13
3.1. Processamento das placas de material compósito laminado.....	13
3.2. Placas ensaiadas	15
3.3. Propriedades mecânicas do laminado de carbono-epóxico unidireccional	18
3.4. Ensaio de impacto a baixa velocidade	18
3.5. Análise por <i>C-Scan</i>	20
3.6. Provetes ensaiados	23
4. ANÁLISE EXPERIMENTAL	26
4.1. Equipamento utilizado	26
4.2. Ensaios de compressão	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1. Resultados	36
5.2. Discussão	39
6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	46
6.1. Conclusões	46
6.2. Propostas para futuros trabalhos	48
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
8. ANEXOS	51
8.1. Partes do equipamento de compressão	51
8.1.1. Parte inferior	51
8.1.2. Parte superior.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Classificação dos compósitos segundo a natureza dos seus constituintes.	4
Figura 2. Compósito laminado.	5
Figura 3. Pêndulo <i>Charpy</i> e pormenor de fixação do provete nestes ensaios.	7
Figura 4. Dispositivo de ensaio por queda de peso.	8
Figura 5. Modos de colapso possíveis de uma estrutura compósita.	9
Figura 6. Autoclave.	14
Figura 7. Serra de disco de dentes diamantados.	14
Figura 8. Esquema de empilhamento da placa de sequência de empilhamento $[0_{16}]$	16
Figura 9. Esquema de empilhamento da placa de sequência de empilhamento $[0,90]_8$	16
Figura 10. Esquema de empilhamento da placa de sequência de empilhamento $[0,90,0,90]_{2S}$	17
Figura 11. (a) – Esquema de empilhamento da placa com arranjo $[0_4, 90_4]_S$; (b) – Secção transversal desta placa observada ao microscópio com ampliação de 10x.	17
Figura 12. Máquina de ensaio ao impacto IMATEK-IM10.	19
Figura 13. Impactor de cabeça hemisférica utilizado.	19
Figura 14. Dispositivo de suporte das placas simplesmente apoiadas.	20
Figura 15. Escala de cores para analisar por <i>C-Scan</i>	21
Figura 16. Imagens de <i>C-Scan</i> de placas com diferentes sequências de empilhamento.	22
Figura 17. Representação dos diferentes tipos de defeito.	24
Figura 18. Esquema do sistema de fixação Celanese (Moura, 1995).	27
Figura 19. Sistema de fixação Celanese (Moura, 1995).	27
Figura 20. Esquema do sistema de fixação IITRI (Moura, 1995).	28
Figura 21. Sistema de fixação IITRI (Moura, 1995).	28
Figura 22. Força aplicada no equipamento.	30
Figura 23. Imagem do novo equipamento.	32
Figura 24. Imagem do equipamento anterior.	32
Figura 25. Máquina de ensaios INSTRON 4206.	33
Figura 26. Programa utilizado para os ensaios (BLUEHILL 2).	34
Figura 27. Vista transversal do provete 16SD1_S após ser submetido ao ensaio de compressão.	37
Figura 28. Vista transversal do provete 16DE3_S após ser submetido ao ensaio de compressão.	38
Figura 29. Relação da tensão de rotura à compressão [MPa] para cada tipo de empilhamento do laminado.	42

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades mecânicas do laminado carbono/epóxico unidireccional.	18
Tabela 2. Propriedades geométricas dos provetes.	25
Tabela 3. Valores obtidos para todos os provetes sem defeito.	36
Tabela 4. Valores obtidos para todos os provetes com defeito.	37
Tabela 5. Valores obtidos para os provetes sem defeito de orientação $[0_4, 90_4]_s$	39
Tabela 6. Valores obtidos para os provetes com defeito embebido de orientação $[0_4, 90_4]_s$	39
Tabela 7. Valores obtidos para os provetes sem defeito de orientação $[0,90,0,90]_{2s}$	40
Tabela 8. Valores obtidos para os provetes com defeito embebido de orientação $[0,90,0,90]_{2s}$	40
Tabela 9. Valor obtido para o provete sem defeito de orientação $[0,90]_8$	40
Tabela 10. Valores obtidos para o provete com defeito embebido de orientação $[0,90]_8$	40
Tabela 11. Valores obtidos para os provetes sem defeito de orientação $[0_5, 90_5]_s$	41
Tabela 12. Valores obtidos para os provetes com defeito embebido de orientação $[0_5, 90_5]_s$	41
Tabela 13. Aumento de resistência à compressão em função da orientação do material compósito.	43
Tabela 14. Diminuição de resistência à compressão em função da presença de defeito.	44

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

α – Ângulo de inclinação

σ – Tensão normal exercida no equipamento

$\sigma_{m\acute{a}x}$ – Tensão normal máxima admissível exercida no equipamento

b – Largura do equipamento

d – Distância do ponto de aplicação da força até ao centro geométrico da peça

h – Espessura da base do equipamento

z – Distância máxima ao ponto crítico

F – Carga aplicada na amarra

I_y – Momento de inércia de área em relação ao eixo dos yy

M_y – Momento flector em torno do eixo dos yy

Siglas

ASTM – American Society for Testing and Materials

CAI – Compressão Após Impacto

CEPEM – Centro de Estudos e Projectos de Engenharia Mecânica

ESTA – Escola Superior de Tecnologia de Abrantes

IITRI – Illinois Institute of Technology Research Institute

INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

1. INTRODUÇÃO

A designação de material compósito refere-se ao resultado da combinação de dois ou mais materiais distintos. O objectivo desta combinação é obter-se um material final com propriedades mecânicas superiores à dos seus constituintes quando considerados em separado. Os compósitos fibrosos são um exemplo clássico e comum, que resulta da dispersão de fibras num material aglomerante, designado este por matriz. Um dos primeiros exemplos do uso de compósitos começou nos primórdios da antiguidade, com os tijolos de argila reforçados com fibras de palha. A combinação de materiais com diferentes propriedades é hoje prática corrente num vasto leque de aplicações, desde o vulgar betão armado, até aos materiais de elevado desempenho, à base de resinas de epóxico reforçadas com fibras contínuas de carbono.

O uso destes materiais compostos por mais do que um material tem-se generalizado, e presentemente é vulgar encontrá-los, não só nas indústrias, designadamente aeronáutica, aeroespacial, naval, automóvel e construção civil, como em aplicações desportivas e objectos de uso corrente.

Pode-se classificar os materiais compósitos segundo diferentes critérios, sendo um dos mais relevantes, o tipo de matriz. De entre os materiais compósitos é possível distinguir os de matriz metálica, cerâmica, cimentosa e polimérica, sendo estes últimos os mais importantes, devido à sua facilidade de processamento e baixa densidade. Os compósitos modernos de matriz polimérica têm demonstrado excelentes propriedades, destacando-se a elevada resistência específica à rotura, à rigidez e à fadiga sob cargas cíclicas, tendo também boa resposta à corrosão, aliados ao seu reduzido peso. Os materiais compósitos de matriz polimérica têm como desvantagens a fraca resistência ao calor, problemas de reciclagem e o seu elevado custo.

Um dos aspectos ligados à caracterização dos compósitos laminados em carbono, que tem sido alvo de maior atenção por parte dos investigadores, é o seu comportamento a solicitações de impacto. Estas alteram a sua resistência residual à flexão, compressão, tracção, corte e fadiga. De entre as diversas solicitações por impacto, o impacto a baixa velocidade ocorre com mais frequência, sendo também este tipo de

impacto o mais perigoso, devido a criar um tipo de dano normalmente não detectável a olho nu, que pode conduzir ao aparecimento prematuro de instabilidade estrutural e à consequente restrição no uso deste tipo de materiais.

O objectivo desta dissertação é a avaliação da redução da resistência residual à compressão de placas compósitas sujeitas a impacto a baixa velocidade, com diferentes orientações de fibras e diferentes espessuras. Neste trabalho são utilizados provetes de carbono-epóxico de 20 camadas com orientação simétrica de $[0_5,90_5]_s$ e provetes de 16 camadas com orientações simétricas de $[0_4,90_4]_s$, $[0,90,0,90]_{2s}$ e anti-simétrica de $[0,90]_8$.

Os resultados obtidos são comparados aferindo-se a influência da orientação e da espessura na redução da resistência à compressão das placas de carbono-epóxico.

A presente tese encontra-se organizada em seis capítulos, sendo este, *Introdução*, o primeiro.

O segundo capítulo, *Estado da Arte*, é dedicado à definição de material compósito. Neste será realizada uma breve introdução sobre as áreas onde existe a utilização de materiais compósitos. Será feito um breve paralelismo entre materiais metálicos e compósitos, justificando a crescente utilização dos últimos. Também serão abordados os vários tipos de ensaios de impacto, com maior incidência sobre o impacto de baixa velocidade, pois este é objecto de análise nesta dissertação. Por fim, será feita uma análise ao comportamento dos materiais compósitos à compressão após impacto.

No terceiro capítulo, *Procedimento Experimental*, proceder-se-á a uma descrição do estudo experimental realizado, onde se abordará o fabrico e a caracterização do material ensaiado, bem como as circunstâncias de impacto a que foram sujeitos.

No quarto capítulo, *Análise Experimental*, desenvolver-se-á o procedimento para realização dos ensaios e o aperfeiçoamento e concepção do equipamento de compressão.

No quinto capítulo, *Resultados e Discussão*, serão apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos experimentalmente.

No sexto capítulo, *Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros*, realizar-se-á uma síntese das conclusões globais respeitantes aos ensaios realizados. Serão ainda apresentadas sugestões para futuros trabalhos.

Por fim, são apresentados como *Anexos* os desenhos de concepção do equipamento de compressão realizados no programa *SolidWorks*.

2. ESTADO DE ARTE

Um material compósito resulta da combinação de dois ou mais materiais distintos. As suas propriedades são, por isso, consequência das propriedades dos materiais constituintes, da sua distribuição geométrica e das suas interações.

A aplicação dos materiais compósitos envolve diferentes áreas de actividade que incluem a aeronáutica, transportes (com particular destaque para a indústria automóvel), artigos desportivos, componentes eléctricos e electrónicos e a construção civil, segundo de Moura (2005).

A indústria aeronáutica tem optado por materiais compósitos de forma a conseguir estruturas onde a elevada resistência específica e a grande leveza se associam a uma enorme liberdade de concepção do produto. Em substituição da utilização inicial de materiais metálicos, podem ser encontrados compósitos em aviões na parte da fuselagem, portas de sistema de aterragem, portas internas, entre outras. Na indústria espacial a utilização de estruturas em compósitos de carbono-epóxico, que podem apresentar coeficientes de expansão térmica nulos, são particularmente úteis na fabricação de antenas incorporadas em veículos espaciais expostas directamente aos raios solares.

Na indústria automóvel, a utilização de matrizes de poliéster reforçadas com fibras de vidro foi iniciada nos anos 30 pela *Ford*. Ainda pela referida marca, foi demonstrado que a produção em grande escala de cerca de meia centena de peças a incorporar na estrutura dos seus veículos, proporcionava uma economia de cerca de 60% em relação à utilização de chapa embutida. No sector mais restrito como é o da competição, visto o custo ter um peso bastante reduzido custo final, começaram pela utilização de fibras de vidro em matriz de poliéster que se adaptavam à fabricação de peças de geometria complexa. Por exemplo, a utilização de compósitos de carbono no chassis de um modelo da *McLaren* permitiu uma considerável redução de peso.

A indústria de componentes electrónicos e eléctricos representa actualmente 15% do mercado de materiais compósitos a nível mundial. O uso destes em blindagens, circuitos impressos ou baterias, deve-se a exigências de segurança relacionadas com isolamento térmico.

Em aplicações desportivas, cada vez mais se exige redução do peso do equipamento utilizado. Actualmente pode-se ver compósitos de carbono-epóxico em tacos de golfe, pranchas de surf, raquetes de ténis, bicicletas com combinações de compósitos de fibra de vidro sob a forma de entrançado e fibra de carbono, entre outros equipamentos.

Na construção civil estão presentes aplicações de compósitos, por exemplo, no reforço de colunas de pontes em regiões sismicamente activas.

Segundo Berthelot (1992), os materiais compósitos podem classificar-se quanto à forma e quanto à natureza dos seus constituintes. Em relação à forma, estes podem ser compósitos de partículas ou compósitos de fibras. Os compósitos de fibras reforçam a matriz e as fibras podem ser contínuas ou descontínuas. Nos compósitos de partículas, estas são utilizadas para aumentar a resistência à abrasão, diminuir a dilatação de origem térmica ou como carga e enchimento para reduzir custos. Em relação à natureza dos constituintes, existem compósitos de matriz orgânica (materiais poliméricos), de matriz metálica (ligas leves e ultra leves de alumínio, magnésio, titânio, etc.) e de matriz mineral (cerâmica), sendo reforçados com materiais de natureza diversa, em forma de fibras ou partículas, de acordo com a Figura 1 (Ferreira, 2006).

		NATUREZA DA MATRIZ		
		ORGÂNICA	METÁLICA	MINERAL
REFORÇOS	Minerais (Vidro, Carbono, etc.)	Minerais: Carbono, Carboneto Silício (SiC), etc.	Metálicas: Boro	Metálicas: Boro
	Orgânicas (Kevlar, Poliamidas, etc.)	Metálicas: Boro	Partículas Metálicas: Cermets.	Partículas Metálicas: Cermets.
	Metálicas (Boro, Alumínio, etc.)	Metalo-minerais: Boro revestido a Carboneto Silício, (BorSiC)	Minerais Carbonetos, Nitratos, etc.	Minerais Carbonetos, Nitratos, etc.

Figura 1. Classificação dos compósitos segundo a natureza dos seus constituintes.

Nos compósitos reforçados por fibras, a orientação destas determina a sua anisotropia. Consoante os objectivos e propriedades pretendidas, é possível controlar a anisotropia do compósito e a proporção dos constituintes no projecto e fabricação, podendo criar-se um compósito laminado com diferentes propriedades em cada direcção, Figura 2 (Ferreira, 2006).

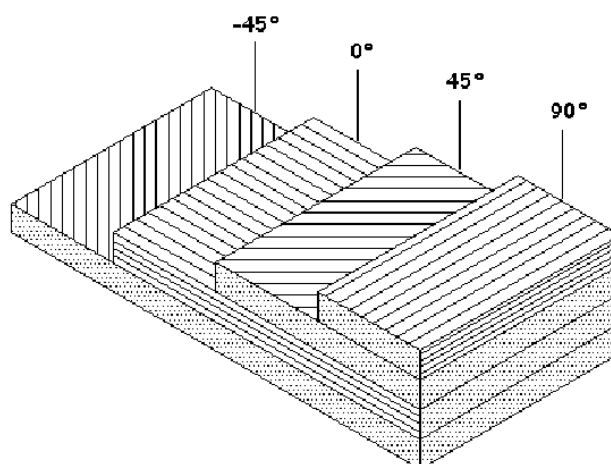


Figura 2. Compósito laminado.

Um compósito laminado é constituído por fibras e pela matriz de suporte. As fibras são responsáveis pela maior parte da resistência à rotura, rigidez, entre outras, suportando as cargas aplicadas ao compósito. Os materiais mais usados em fibras são o vidro, carbono, boro ou aramida (kevlar). Nesta dissertação foram utilizadas as fibras de carbono. A matriz tem como objectivo proteger as fibras do meio ambiente, envolvendo-as, garantindo assim a arquitectura do empilhamento e actuando também como elemento de transferência das cargas entre as fibras. Os materiais constituintes das matrizes mais utilizados são as resinas poliméricas. Dentro destas, as mais vulgares são as de poliéster, vinilo, éster, epóxicas e fenólicas. A matriz utilizada nesta dissertação pertence à categoria de resinas epóxicas. As resinas epóxicas proporcionam um excelente isolamento térmico e são menos afectadas pela água e calor em comparação com os outros tipos de resina.

A utilização dos materiais compósitos prende-se com factores de ordem geral, tais como, a sua elevada resistência específica à rotura, resistência à corrosão e baixa densidade. Ainda como vantagem adicional, advindo do facto de serem materiais heterogéneos, existe a possibilidade de construir uma resistência localizada pela escolha e disposição das fibras que constituem os compósitos. Isto conduz a uma importante economia de material e consequentemente redução de peso, sem perda da capacidade de resistência exigida no projecto.

A utilização dos materiais compósitos em substituição dos metálicos tem sido cada vez mais evidente ao longo dos anos. As características destes materiais são significativamente diferentes. Os metais podem ser considerados isotrópicos e os compósitos são anisotrópicos. Dependendo da orientação da fibra de reforço, a resistência

e a rigidez no plano são variáveis, mas geralmente elevadas. Estas características são comparativamente mais baixas quando não beneficiam do reforço das fibras, como acontece no caso da resistência à tracção através da espessura. Os metais têm considerável ductilidade e tenacidade, podendo alongar ou comprimir sem falha, proporcionando desta forma o alívio da carga local distribuindo o excesso para o material adjacente ou para a restante estrutura, conseguindo desta forma uma maior absorção de energia. Contrariamente, os materiais compósitos possuem relativa fragilidade, reflectindo-se numa mais fraca capacidade de suportar concentração de tensões e resistência ao dano provocado por impacto.

As vantagens dos materiais compósitos em relação aos metálicos são postas em causa quando o impacto é um importante factor a ser considerado. Isto justifica-se pelo facto do dano causado pelo impacto ser responsável pela alteração da distribuição interna de forças, diminuição da capacidade de carga na estrutura e introdução de defeitos no material que levam à rotura do compósito. Isto deve-se também à fraca resistência ao longo da espessura e a uma baixa deformação limite.

O impacto pode ser classificado segundo três categorias conforme o valor da sua velocidade, embora as fronteiras entre estas não estejam bem definidas. O dano e os seus efeitos são complicados e difíceis de analisar, uma vez que envolvem muitas variáveis afectas ao impactor (massa, velocidade, energia cinética e forma da extremidade de contacto) e à amostra (geometria, sequência de empilhamento e condições de fronteira). Isto provoca respostas muito diferentes na amostra que dependem ainda das interacções entre estas variáveis. O impacto pode ser classificado em:

- Impacto a alta velocidade, caracterizado por um dano facilmente identificável, ocorrendo perfuração completa da placa, produzindo um furo onde a resistência residual se mantém constante para velocidades de impacto crescentes;
- Impacto a média velocidade, deixa de ser imediatamente identificável e apresenta alguma deformação da estrutura perto da zona de impacto;
- Impacto a baixa velocidade, caracteriza-se por uma extensa zona danificada não identificável, coincidindo, geralmente, a máxima redução de resistência com a máxima dimensão do dano.

O dano por impacto a baixa velocidade é o mais comum porque resulta, por exemplo, da queda accidental de objectos ou ferramentas num elemento de material compósito. Este tipo de impacto induz tensões elevadas na vizinhança da área de contacto, podendo conduzir a um dano susceptível de afectar a sua integridade estrutural, sendo por isso o mais crítico. Este tipo de solicitação é de difícil detecção pois não provoca dano visível a olho nu, ou seja, não aparenta qualquer fissuração ou indentação superficial. Outro dos factores a ter em consideração na solicitação por impacto a baixa velocidade, nos materiais compósitos laminados, está relacionado com as extensas zonas danificadas que provoca e pelo tipo de dano que origina, designadamente as delaminagens entre camadas diferentemente orientadas e a rotura da matriz.

Com o objectivo de simular o impacto de objectos com o material compósito, foram desenvolvidos vários métodos de ensaio, agrupando-se estes em dois tipos: os dispositivos pendulares e os de queda de peso.

Um dos dispositivos pendulares mais utilizados é o ensaio *Charpy* (Figura 3). Tem como objectivo obter a energia necessária para a rotura de um provete com geometria específica. Devido ao facto deste tipo de ensaios ser destrutivo e a geometria do provete não retratar as estruturas geralmente utilizadas, procuraram-se soluções alternativas, segundo de Moura (2005).

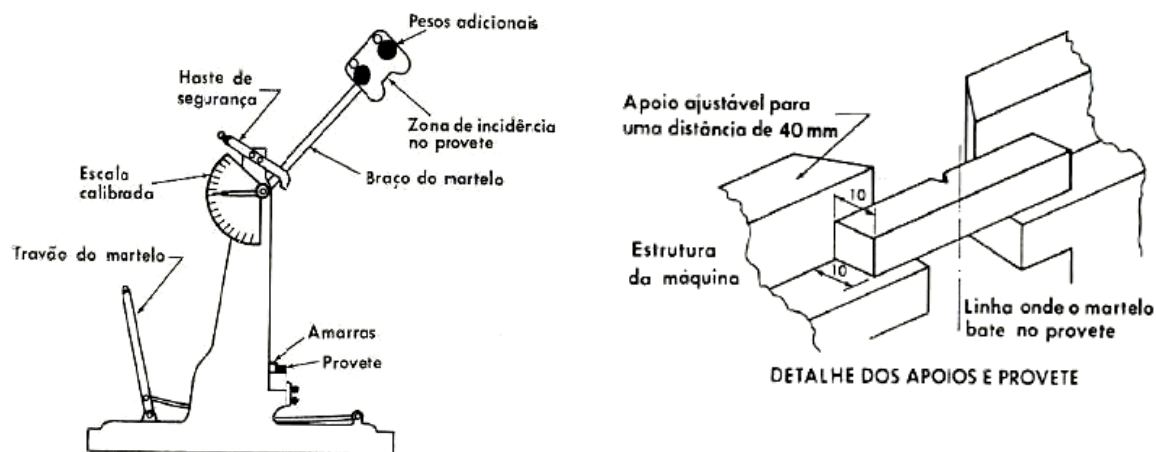


Figura 3. Pêndulo *Charpy* e pormenor de fixação do provete nestes ensaios.

Como o ensaio *Charpy* apresenta algumas dificuldades de calibração, tem-se recorrido ao ensaio de queda de peso, tornando-se este geralmente mais utilizado. O ensaio de queda de peso consiste na queda de uma massa conhecida, a partir de uma altura predeterminada, solicitando o provete, colocado num plano horizontal (Figura 4). De um modo geral consegue-se o impacto sem perfuração do provete. De referir que todo o

impacto origina destruição do provete. A diferença é que nuns casos há perfuração, por exemplo a altas velocidades, ou quando o dispositivo permite mais que um impacto, e noutros casos o dano é praticamente invisível.

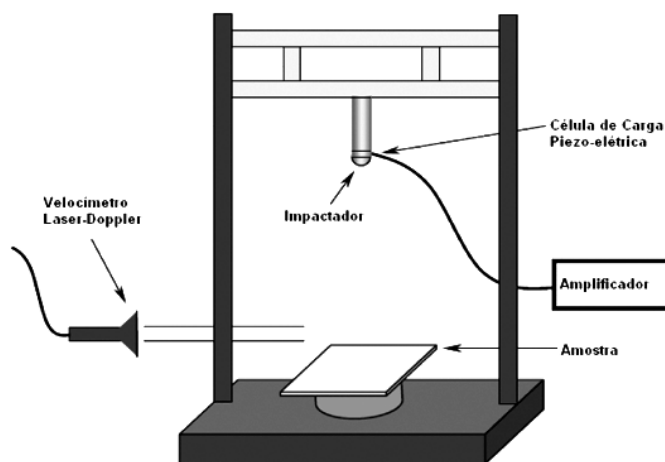


Figura 4. Dispositivo de ensaio por queda de peso.

Como foi anteriormente referido, o dano provocado por impacto a baixa velocidade não é de fácil detecção, recorrendo-se por isso a ensaios não destrutivos para avaliação do dano provocado no laminado. Os métodos não destrutivos para análise de laminados de carbono-epóxico mais utilizados são as radiografias por raios X e a inspeção por ultra-sons (*C-Scan*). Estes métodos permitem a detecção de defeitos superficiais e não superficiais. O método usado nesta dissertação foi o *C-Scan*.

As publicações iniciais deste tipo de solicitação à compressão após impacto datam do início da década de 80.

Guynn *et al.* (1985) fizeram pesquisa ensaiando laminados de 16, 32 e 64 camadas utilizando um sistema de fixação com guias anti-encurvatura para os ensaios de compressão. Estes concluíram que nos últimos dois laminados não ocorreu o efeito flexão e verificaram que laminados mais espessos têm maiores deformações à rotura do que os laminados mais finos para impactos de igual energia.

G. Steinmetz *et al.* (1990) fizeram o estudo de placas compósitas contendo delaminagens submetidas à compressão. Usando dois processos diferentes, o método Rayleigh – Ritz e o método dos elementos finitos, e após várias placas laminadas estudadas, os autores concluíram que a carga de encurvatura das placas contendo delaminagens é muito sensível ao tamanho e à localização do dano. Identificaram três modos de rotura dos laminados podendo estes ser do tipo local, que corresponde à

encurvadura do sublaminado delaminado; global, quando a instabilidade se estende a toda a estrutura e misto em que ambas as situações acontecem em simultâneo (Figura 5). Devido ao facto dos autores não considerarem a delaminação, ou seja, a propagação do dano, nada concluíram em relação à resistência à compressão dos laminados.

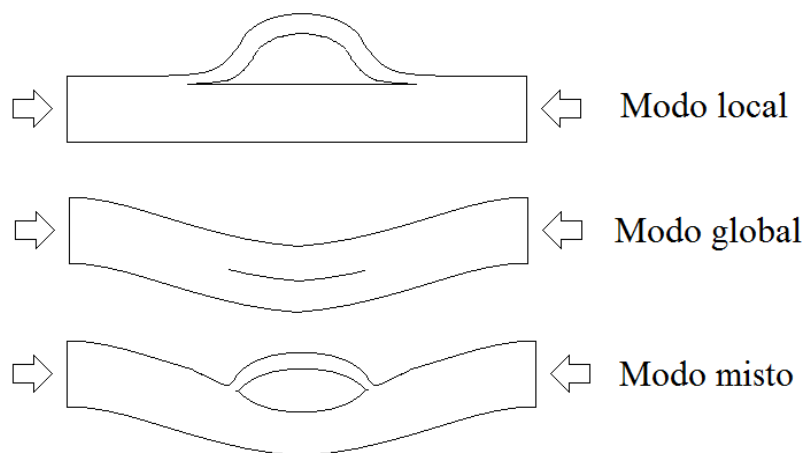


Figura 5. Modos de colapso possíveis de uma estrutura compósita.

Choi e Chang (1992) dirigiram o seu estudo para o dano causado em compósitos laminados de carbono-epóxico devido ao impacto de um objecto estranho. Este defeito induzido é responsável pela formação de delaminações. A delaminação ocorre devido a dois tipos de fractura: separação das fibras com consequente rotura destas por esforço cortante; e encurvadura das lâminas despoletando fissuras na matriz. O crescimento da delaminação tende a orientar-se pela direcção paralela às fibras da camada abaixo da interface onde ocorre a delaminação, podendo explicar assim a sua aparência em forma de “amendoim”. O aumento da velocidade de impacto, associado a um acréscimo da energia de impacto, promove o aumento da área delaminada.

Yeh *et al.* (1994) estudaram a encurvadura de laminados com delaminações do tipo elípticas sujeitas a solicitações de compressão, concluindo que a carga de encurvadura diminui com o aumento do tamanho de delaminação e o modo de rotura passa de global a misto.

Hitchen e Kemp (1995) estudaram o efeito das sequências de empilhamento no defeito provocado por impacto em carbono-epóxico. O tipo de dano mais observado foi a delaminação. A energia absorvida na iniciação da delaminação foi influenciada pela sequência de empilhamento, aumentando quando eram colocadas fibras a 45° nas camadas

da superfície e aumentando as interfaces que possuíam sublaminados com diferente orientação. Estes autores verificaram que a energia absorvida na propagação da delaminação aumentava linearmente com o aumento da área total delaminada. A resistência à compressão após impacto está relacionada com a área máxima delaminada. A forma da delaminação é influenciada pela separação e fractura das fibras da camada que se encontra por baixo da delaminação.

P. Berbinau *et al.* (1999) estudaram o comportamento à compressão estática de placas compósitas unidireccionais e multi-direccionais de carbono-epóxico. O modo de falha destas placas deu-se por microencurvatura de fibras orientadas a 0° iniciada através de desalinhamento de fibras, espaços vazios dos laminados e outras imperfeições do material. A precisão dos resultados previstos teoricamente encontra-se entre 10-15%. A rotura da matriz e a fronteira da delaminação pode despoletar a microencurvatura das fibras para baixas solicitações de tensão, sendo mais crítica a selecção da orientação das camadas do que no caso da solicitação por carregamento estático.

Habib (2002) concentrou o seu estudo em laminados unidireccionais comprimidos após impacto com espessura de 4, 6 e 8 milímetros, onde verificou que quanto maior for a energia de impacto menor será a força de compressão máxima suportada pela placa.

Aslan *et al.* (2003) fizeram a análise experimental e numérica de placas compósitas após impacto com vários tamanhos e concluíram que o comportamento mecânico da estrutura compósita sob impacto de baixa velocidade depende das dimensões da zona central do laminado. Os autores observaram que quanto menor for a largura da zona central dos compósitos laminados, maior é a duração do contacto e a resposta do impacto depende da geometria da placa.

X. W. Wang *et al.* (2004) levaram a cabo um estudo do efeito de múltiplas delaminações no ensaio de compressão de fibras de vidro em matriz plástica. As múltiplas delaminações resultam numa maior redução na resistência à compressão e numa maior complexidade no comportamento à encurvatura comparando com as delaminações simples. Os resultados dos modelos de elementos finitos foram razoavelmente coincidentes com os experimentais, mas ainda assim os resultados numéricos tendem para uma previsão abaixo dos valores experimentais.

S. Sanchez – Saez *et al.* (2005) fizeram testes CAI (compressão após impacto) em diferentes tipos de carbono-epóxico (*quasi-isotropic*, *cross-ply* e *woven*) para determinar os valores da resistência residual e da resistência residual normalizada destes laminados. O laminado do tipo *woven* foi o que apresentou uma maior resistência residual sob todas as diferentes energias de impacto. O laminado do tipo *quasi-isotropic* foi o que apresentou uma menor perda de resistência residual normalizada à medida que a energia de impacto aumentava.

Lee e Soutis (2005) estudaram o efeito da espessura dos compósitos laminados nos testes de compressão realizados em laminados unidireccionais e multi-direccionais de 2 a 8 mm de espessura. Estes autores concluíram que a espessura influencia as orientações ensaiadas de $[0_4]_{nS}$ e $[45_n/0_n/-45_n/90_n]_S$. Os principais factores devem-se aos vazios presentes na interface fibra/matriz e à ondulação das fibras que são responsáveis pela perda de resistência do laminado. É identificado que a ondulação da fibra é sensível à sequência de empilhamento do laminado e aumenta com o aumento de espessura das placas $[45_n/0_n/-45_n/90_n]_S$. O aumento de espessura das placas com sequência de empilhamento $[45/0/-45/90]_{nS}$ não demonstrou qualquer variação na resistência à compressão.

Zhang *et al.* (2006) analisaram placas laminadas com 2, 4 e 6 milímetros de espessura e sujeitas a compressão após impacto e observaram que para laminados com a mesma espessura e submetidos a um impacto equivalente, a redução de resistência encontrava-se dentro de um intervalo de 45 a 50 % quando comparadas com placas sem dano.

Aktaş M. *et al.* (2008) investigaram o efeito da CAI em compósitos de fibra de vidro à temperatura ambiente e a altas temperaturas sujeitos a diferentes energias de impacto. Concluíram que a máxima redução da resistência no teste CAI ocorreu a 100 °C com o aumento da energia de impacto, enquanto a mínima redução ocorreu à temperatura de 20°C. Para a mesma energia de impacto, a influência da temperatura na redução de resistência no teste CAI é maior para os laminados $[0/90/0/90]_S$, comparando com os $[0/90/45/-45]_S$. A resistência ao teste CAI é mais baixa nos provetes com dano de impacto horizontal do que com dano vertical, para todos os níveis de energia e todas as temperaturas no teste de impacto. Para maior resistência no teste CAI, a camada de cima e a camada de baixo devem estar orientadas a 0° ou na direcção de carregamento.

2.1. Resumo

Baseando-se em trabalhos anteriormente desenvolvidos por outros autores, pode-se constatar o seguinte:

- Laminados com mais camadas tendem a sofrer maior deformação à rotura que outros mais finos sujeitos ao mesmo tipo de impacto;
- A compressão após impacto pode originar três tipos de rotura: local, global e mista;
- A encurvadura das placas contendo delaminagens é muito sensível ao tamanho e à localização do dano;
- Quanto mais delaminagens tiver o compósito, menos resistência à compressão este irá suportar e a análise ao efeito de encurvadura terá maior complexidade;
- O efeito de encurvadura diminui com o aumento do tamanho da delaminação;
- A delaminação ocorre devido a dois tipos de fractura: separação das fibras com consequente rotura destas por esforço cortante; e encurvadura das lâminas despoletando fissuras na matriz;
- O crescimento da delaminação tende a orientar-se pela direcção paralela às fibras da camada abaixo da interface onde ocorre a delaminação, tendo aparência em forma de “amendoim”;
- O aumento da velocidade de impacto causa o aumento da área delaminada;
- Quanto maior for a energia de impacto aplicada na placa laminada menor será a força de compressão máxima suportada mesma;
- O comportamento mecânico da estrutura compósita sob impacto a baixa velocidade depende das dimensões da zona central do laminado;
- Os laminados unidireccionais e os multi-direccionais com sequência de empilhamento organizada por blocos de camadas suportam menos carga de compressão, em relação aos multi-direccionais organizados por sequência de sublaminados com diferentes orientações;
- Para uma maior resistência à compressão, a camada superior e a inferior do laminado devem estar orientadas a 0° ou na direcção do carregamento.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O presente capítulo descreve sucintamente o modo como se fabricaram as placas em estudo e as suas propriedades. Descreve-se também o equipamento e o procedimento utilizado nos ensaios de impacto.

3.1. Processamento das placas de material compósito laminado

O modo de fabrico para obtenção das placas em análise foi o processamento em autoclave no INEGI, a partir de pré-impregnados com a designação comercial TEXIPREG[®] HS 160 REM, com a dimensão de 300x300 mm.

O processo de moldação em autoclave (Figura 6) consiste em consolidar um componente pré-formado através da aplicação simultânea de temperatura, pressão e vácuo. É um processo utilizado no fabrico de laminados de elevado desempenho e sistemas de fibras – resina epóxida, como o caso em estudo nesta tese.

A primeira fase do processamento do laminado baseia-se no corte do pré-impregnado, nas dimensões desejadas, já que este é fornecido em forma de rolo de folha fina e comprida, formado por longas fibras unidireccionais de carbono, colocadas no seio de uma matriz de resina epóxida parcialmente curada. Este rolo deve ser mantido a baixas temperaturas antes de ser utilizado, garantindo desta forma que a resina epóxida não perca as suas propriedades e não exista possibilidade de curar totalmente, antes de ser realizado o empilhamento das lâminas com a espessura e orientação desejadas.

A fase seguinte consiste na preparação da superfície usada para o empilhamento das lâminas, de modo a acautelar que gorduras ou agentes exteriores não interfiram com o normal processo de cura da resina. Seguidamente faz-se o empilhamento das várias camadas até se atingir a espessura desejada, tendo sempre em atenção que se deve retirar o excesso de resina e eventuais bolhas de ar contidas em cada camada. Após se atingir o empilhamento desejado, o conjunto é inserido num saco de vácuo e sujeito a um ciclo de pressão e temperatura devidamente definido. No que se refere aos laminados em

estudo, a cura realizou-se a uma velocidade de aquecimento de 3 °C/min até se atingir a temperatura de 130 °C. A temperatura do autoclave, Figura 6, foi então mantida durante 60 minutos. O arrefecimento foi efectuado à mesma velocidade de 3 °C/min até ser atingida a temperatura de 30 °C, segundo Ramalho (2001).



Figura 6. Autoclave.

As placas foram produzidas com a dimensão de 300x300 mm. Posteriormente efectuou-se o corte das mesmas de forma a se obterem placas com dimensões de 125x100 mm, necessárias para a realização dos ensaios pretendidos para o estudo. Este corte foi efectuado com uma serra de disco de 300 mm de diâmetro e 2 mm de espessura, com rebordo diamantado e ranhuras de modo a promover a dissipação de calor libertado durante o corte. A utilização de uma serra de dentes diamantados, Figura 7, é justificada pela necessidade do corte ser o mais perfeito possível, prevenindo eventuais defeitos, tais como, o arrancamento de fibras.



Figura 7. Serra de disco de dentes diamantados.

3.2. Placas ensaiadas

As placas de carbono/epóxico ensaiadas apresentavam diferentes orientações e espessura. Estudaram-se placas com 20 camadas e com orientação simétrica de $[0_5, 90_5]_S$ e placas com 16 camadas com orientação simétrica de $[0_4, 90_4]_S$, duplamente simétrica de $[0, 90, 0, 90]_{2S}$ e anti-simétrica de $[0, 90]_8$.

A identificação dos provetes cortados das referidas placas foi feita com base numa codificação alfanumérica, em função do número de camadas que compõem a placa, do tipo de defeito existente nesse provete e da sua sequência de empilhamento.

O primeiro número desta codificação refere a quantidade de camadas que este provete possui. Seguidamente é identificado se o provete não possui defeito, “SD”, ou se possui defeito embebido, “DE”.

Seguidamente procedeu-se à numeração dos provetes pela ordem em que estes foram submetidos ao teste de compressão. Acrescentou-se no final o tipo de orientação identificada por letras, designadamente, “S” para orientação simétrica, “2S” para orientação duplamente simétrica e “AS” para orientação anti-simétrica.

Apresenta-se em seguida um exemplo desta identificação para melhor compreensão da codificação utilizada. O primeiro provete submetido ao ensaio de compressão, possuindo 16 camadas, contendo defeito embebido e que foi cortado da placa com a sequência de empilhamento simétrica $[0_4, 90_4]_S$, designou-se por “16DE1_S”.

Para uma melhor compreensão das sequências de empilhamento estudadas, elaboraram-se esquemas da vista transversal dos provetes, onde se identifica a orientação de cada camada constituinte do compósito laminado.

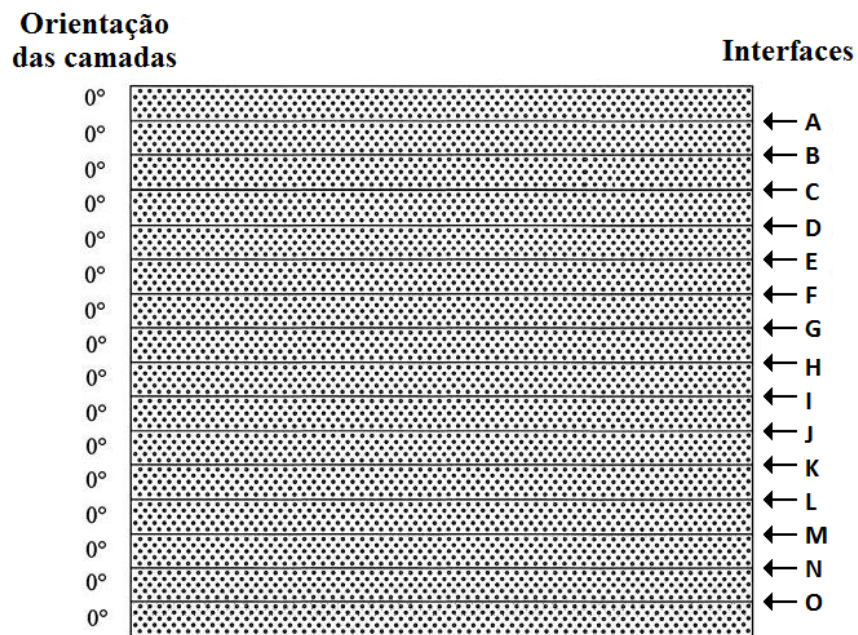


Figura 8. Esquema de empilhamento da placa de sequência de empilhamento $[0_{16}]$.

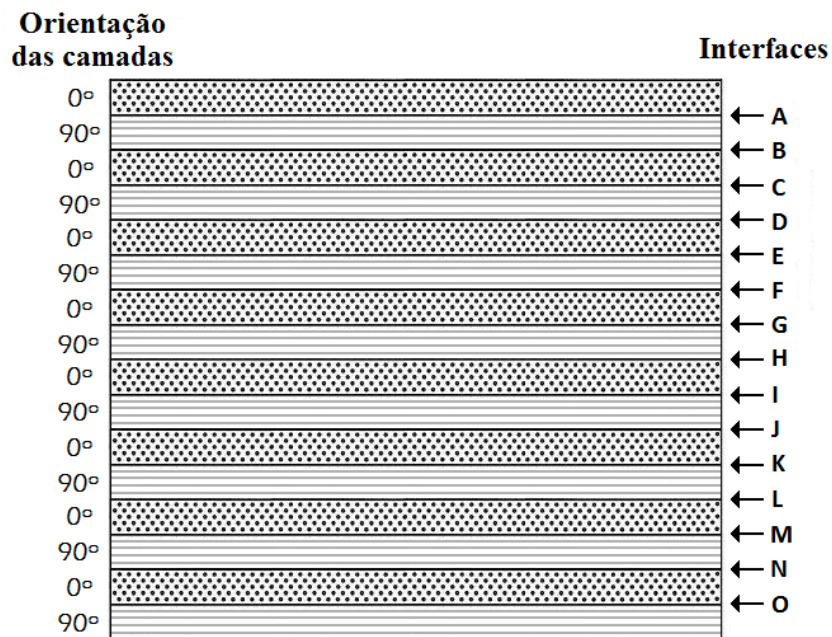


Figura 9. Esquema de empilhamento da placa de sequência de empilhamento $[0,90]_8$.

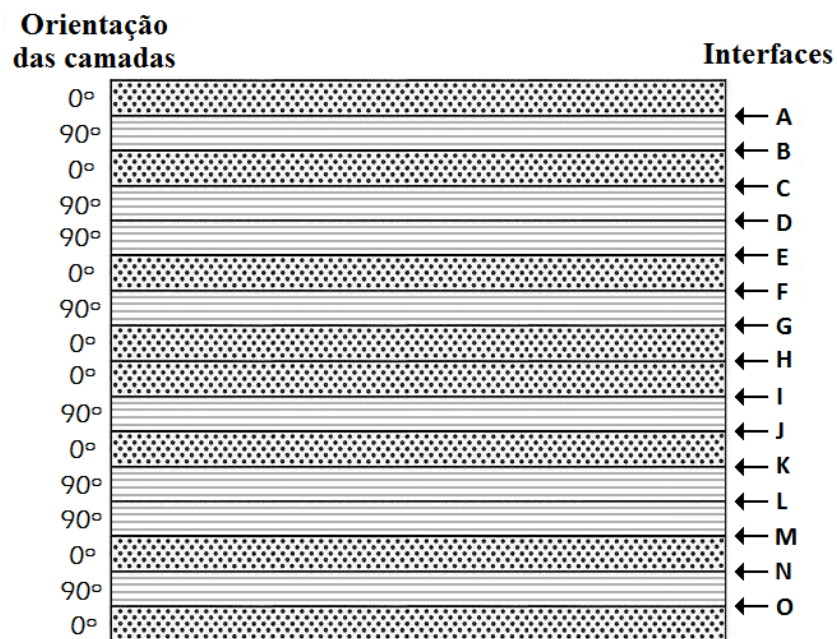


Figura 10. Esquema de empilhamento da placa de sequência de empilhamento $[0,90,0,90]_{2s}$.

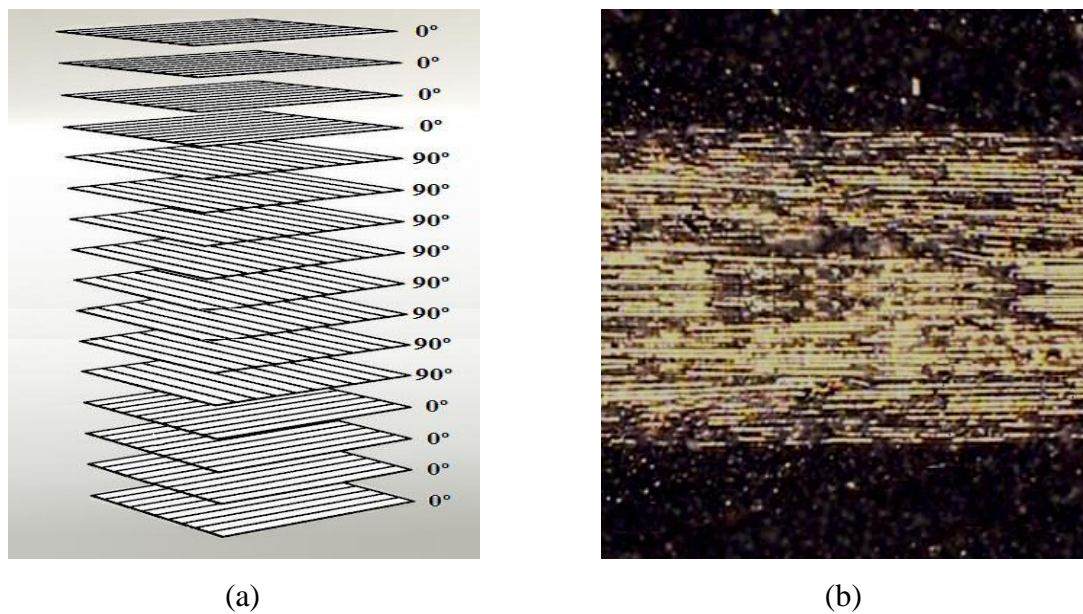


Figura 11. (a) – Esquema de empilhamento da placa com arranjo $[0_4,90_4]_s$; (b) – Seção transversal desta placa observada ao microscópio com ampliação de 10x.

3.3. Propriedades mecânicas do laminado de carbono-epóxico unidireccional

As propriedades mecânicas dos laminados com arranjo unidireccional estão resumidas na Tabela 1, (Amaro, 2003).

Tabela 1. Propriedades mecânicas do laminado carbono/epóxico unidireccional.

Módulo de elasticidade longitudinal	102 GPa
Módulo de elasticidade transversal	8,4 GPa
Módulo de corte	5,6 GPa
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0,33
Resistência à compressão	211 MPa

Estes dados servem como referência para comparar com os resultados que se irão obter para as placas em estudo de arranjo não unidireccional.

3.4. Ensaio de impacto a baixa velocidade

Os ensaios de impacto foram realizados no CEPEM (ESTA) usando o equipamento IMATEK-IM10, máquina de ensaio de impacto por queda livre de um peso (Figura 12). A máquina é composta por uma torre com duas colunas-guia, onde desliza um carrinho que suporta o impactor. O impactor pode ser elevado até à altura pretendida, sendo posteriormente solto na direcção vertical.

O impactor usado no presente trabalho caracteriza-se por ter uma massa de 2,545 kg e cabeça hemisférica com um diâmetro de 20 mm (Figura 13).

Este equipamento, IMATEK-IM10, encontra-se munido de um sistema de aquisição de dados através de uma célula de carga piezoeléctrica com uma capacidade de recolha de 32000 pontos, posicionada na raiz do impactor. Apresenta ainda um sistema designado por “safety road” que impede que o provete seja impactado duas vezes durante o mesmo ensaio. A análise de dados efectuou-se através de um “software” designado por *ImpAqt Versão 1.3*.

A energia de impacto deve-se exclusivamente à acção da gravidade, controlada pelo ajustamento da altura de queda, a qual pode atingir um máximo de 3,5 metros. Após se ter regulado a altura do impactor, este é solto deslizando verticalmente nas colunas-guia colidindo, no final da sua descida com a placa.

As placas foram colocadas na zona de impacto estando simplesmente apoiadas (Figura 14).



Figura 12. Máquina de ensaio ao impacto IMATEK-IM10.



Figura 13. Impactor de cabeça hemisférica utilizado.



Figura 14. Dispositivo de suporte das placas simplesmente apoiadas.

3.5. Análise por C-Scan

Antes de se proceder aos ensaios de impacto, todas as placas foram submetidas a inspeção por *C-Scan* tentando-se, desta forma, identificar as secções que apresentassem qualquer tipo de defeitos, por forma as que as mesmas fossem eliminadas dos provetes a serem ensaiados. Desta forma, garantia-se que as descontinuidades ocorridas na placa fossem, apenas, provocadas pela solicitação de impacto.

O controlo por ultra-sons é um método de análise baseado no estudo de modificações sofridas por ondas ultra-sónicas que, ao propagarem-se no interior dos materiais em análise, encontram impedimentos responsáveis por fenómenos de reflexão e atenuação. A propagação das ondas ultra-sónicas promove alguma perda de energia, designada por atenuação (Amaro, 2003). Esta atenuação é influenciada por espaços vazios, separação de lâminas, estado da cura da resina, fracção de volume da fibra, condição da interface fibra/matriz ou a inclusão de partículas estranhas. As ondas reflectidas são captadas por um sensor, o que permite a detecção de eventuais defeitos ou descontinuidades.

Algumas das vantagens desta técnica de análise não destrutiva consistem:

- Na sua profundidade de penetração, sendo que a detecção ou quantificação de defeitos é superior a outros métodos;
- Ser necessário ter apenas acesso a um dos lados quando é usada a técnica pulso-eco;

- Elevada exactidão na determinação da posição dos defeitos bem como na avaliação do seu tamanho e forma;
- Requerer uma preparação mínima das peças a inspeccionar.

Tem como desvantagens a necessidade dum meio de acoplamento para promover a transferência de energia para o material em inspecção, sendo também necessária a acessibilidade das superfícies para a transmissão de ultra-sons. O tipo de material a inspeccionar também condiciona o uso desta técnica, visto que os materiais com estrutura de grão grosseiro, heterogéneos, demasiado finos ou pequenos são de difícil inspecção, assim como as fissuras dos materiais que estejam orientadas paralelamente à propagação do feixe podem não conseguir ser detectadas (Santos, 2008).

Como o dano resultante de impactos a baixa velocidade em materiais compósitos é de difícil detecção a olho nu foi necessário recorrer a técnicas de análise não destrutiva para a sua detecção e quantificação. Assim efectuaram-se análises pelo método *C-Scan*, para se obter a posição em que se encontrava o defeito, bem como a sua dimensão. O resultado da inspecção por *C-Scan* é traduzido por imagens em código de cor, Figura 15, visualizadas num monitor de controlo. A Figura 16 apresenta as imagens obtidas em *C-Scan* de algumas das placas ensaiadas, com diferentes espessuras e orientações.

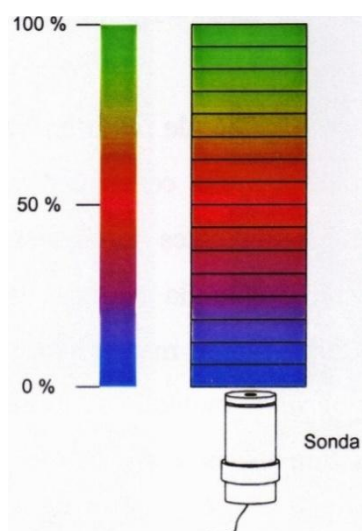


Figura 15. Escala de cores para analisar por *C-Scan*.

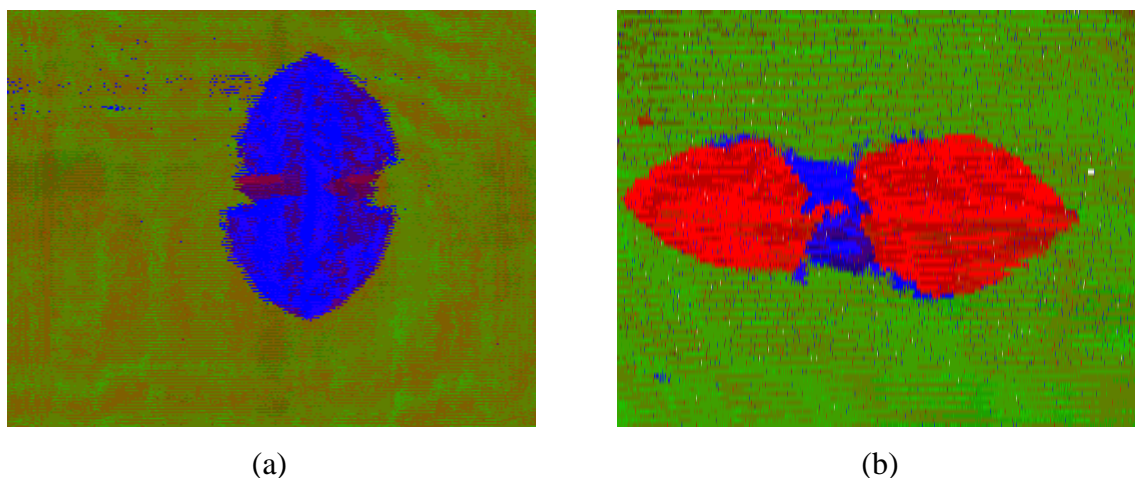


Figura 16. Imagens de *C-Scan* de placas com diferentes seqüências de empilhamento.
a) Placa com orientação $[0_4, 90_4]_S$; b) Placa com orientação $[0_5, 90_5]_S$

Pelas imagens obtidas pode-se observar que o defeito criado pelo impacto, apresenta uma “forma de amendoim”, cujo eixo principal está orientado segundo a direcção das fibras da camada abaixo da interface onde foi detectado o dano.

Além da posição e da dimensão do defeito pode-se saber a profundidade aproximada a que este se encontra, através da referida escala de cores, Figura 15.

De acordo com a Figura 15, verifica-se que a cor azul corresponde a um defeito próximo da superfície de inspecção, a encarnada identifica uma descontinuidade situada a cerca de 50% da espessura da placa, e as áreas alaranjadas aparecem à medida que o defeito se localiza próximo da superfície oposta àquela que se está a inspeccionar. O verde-claro, que surge nas imagens das áreas inspeccionadas, identifica zonas sem defeito. A placa a) da Figura 16 foi inspeccionada com a sonda de varrimento posicionada sobre a superfície oposta ao impacto, enquanto na placa b) o varrimento foi efectuado sobre a superfície impactada.

Com o auxílio do *C-Scan* consegue-se saber a posição em que se encontra o defeito. Isto torna-se imprescindível na altura de orientar a direcção de corte, para assim se obterem provetes, a serem submetidos a compressão, que não possuam defeito ou que contenham defeito no seu interior.

3.6. Provetes ensaiados

Após a realização dos ensaios de impacto e a posterior identificação do defeito através da técnica *C-Scan*, procedeu-se ao corte das placas com a serra de dentes diamantados referida no ponto 3.1. As placas a serem analisadas, previamente impactadas, possuíam as dimensões de 125x100 mm, sendo cortadas em três partes, de modo a obterem-se provetes com a largura aproximada de 25 mm de acordo com a norma ASTM D 3410/D 3410M-95.

Foram analisados provetes com defeito provocado pelo impacto e provetes sem defeito, para que se pudessem tirar conclusões acerca da influência da presença do defeito.

O corte foi realizado de modo a se obter três tipos de defeito: defeito embebido, que se encontra totalmente contido no provete; defeito parcial, encontrando-se este numa das extremidades do provete; e defeito a toda largura, prolongando-se de uma extremidade à outra do provete. Na Figura 17 pode-se observar a representação esquemática de cada tipo de defeito, assim como o sentido das forças de compressão a serem aplicadas durante a realização dos ensaios à compressão.

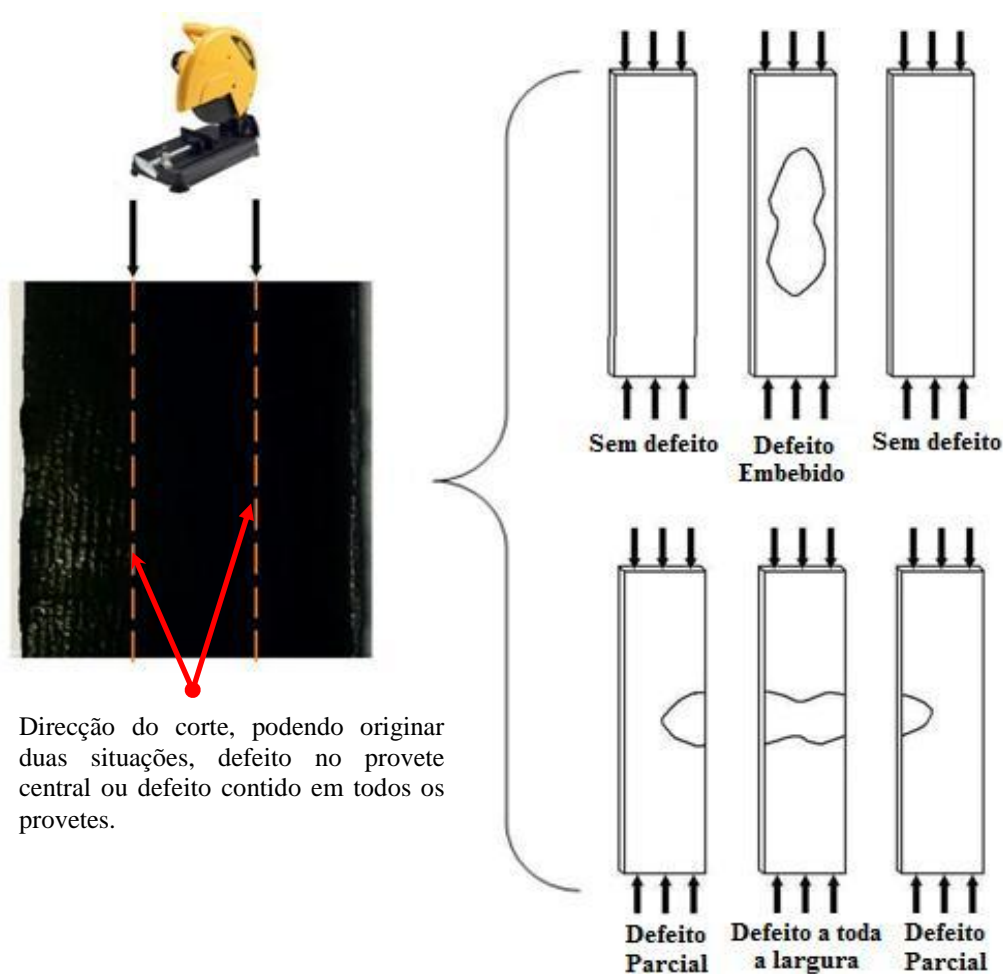


Figura 17. Representação dos diferentes tipos de defeito.

No presente trabalho optou-se por apenas estudar os provetes com defeito embebido e provetes sem qualquer defeito.

Utilizando um paquímetro digital determinou-se a largura e espessura dos provetes, para se determinar com a maior precisão possível a área da secção transversal. Após a recolha destes dados elaborou-se a Tabela 2. A área da secção transversal é necessária para se poder calcular a tensão de rotura à compressão, dada pela relação entre a força máxima de carga que um provete suporta antes de fracturar, sobre a área resistente, equação 1:

$$\sigma_{compressão} [MPa] = \frac{Força [N]}{Área [mm^2]} \quad (1)$$

Tabela 2. Propriedades geométricas dos provetes.

Sequência de empilhamento	Tipo de defeito	Designação	Espessura da seção [mm]	Largura da seção [mm]	Área da seção [mm ²]
[0 ₄ , 90 ₄] _s	Sem defeito	16SD1_S	2,31	25,1	57,98
[0 ₄ , 90 ₄] _s	Sem defeito	16SD2_S	2,37	25,2	59,72
[0 ₄ , 90 ₄] _s	Sem defeito	16SD3_S	2,30	25,15	57,85
[0 ₄ , 90 ₄] _s	Sem defeito	16SD4_S	2,31	23,80	54,98
[0 ₄ , 90 ₄] _s	Sem defeito	16SD5_S	2,35	24,20	56,87
[0 ₄ , 90 ₄] _s	Sem defeito	16SD6_S	2,34	24,68	57,75
[0 ₄ , 90 ₄] _s	Defeito embebido	16DE1_S	2,38	25,51	60,71
[0 ₄ , 90 ₄] _s	Defeito embebido	16DE2_S	2,35	25,15	59,10
[0 ₄ , 90 ₄] _s	Defeito embebido	16DE3_S	2,41	25,46	61,36
[0 ₄ , 90 ₄] _s	Defeito embebido	16DE4_S	2,35	24,71	58,07
[0, 90, 0, 90] _{2s}	Sem defeito	16SD1_2S	2,45	21,35	52,31
[0, 90, 0, 90] _{2s}	Sem defeito	16SD2_2S	2,45	23,7	58,07
[0, 90, 0, 90] _{2s}	Sem defeito	16SD3_2S	2,45	21,65	53,04
[0, 90, 0, 90] _{2s}	Defeito embebido	16DE1_2S	2,45	22,68	55,57
[0, 90, 0, 90] _{2s}	Defeito embebido	16DE2_2S	2,45	25,10	61,50
[0, 90] ₈	Sem defeito	16SD1_AS	2,25	20,55	46,24
[0, 90] ₈	Defeito embebido	16DE1_AS	2,25	25,15	56,59
[0 ₅ , 90 ₅] _s	Sem defeito	20SD1_S	2,23	25,69	57,29
[0 ₅ , 90 ₅] _s	Sem defeito	20SD2_S	2,22	23,34	51,82
[0 ₅ , 90 ₅] _s	Sem defeito	20SD3_S	2,25	23,99	53,98
[0 ₅ , 90 ₅] _s	Sem defeito	20SD4_S	2,31	24,20	55,90
[0 ₅ , 90 ₅] _s	Sem defeito	20SD5_S	2,18	22,61	49,29
[0 ₅ , 90 ₅] _s	Sem defeito	20SD6_S	2,20	20,82	45,80
[0 ₅ , 90 ₅] _s	Defeito embebido	20DE1_S	2,29	24,97	56,95
[0 ₅ , 90 ₅] _s	Defeito embebido	20DE2_S	2,33	24,98	58,20
[0 ₅ , 90 ₅] _s	Defeito embebido	20DE3_S	2,25	24,09	54,20

4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve o desenvolvimento e a concepção do equipamento utilizado para os ensaios de compressão, assim como o modo de realização destes ensaios.

4.1. Equipamento utilizado

A procura por equipamentos de compressão mais eficazes continua em permanente desenvolvimento, devido à dificuldade de realizar ensaios de compressão, sem haver rotura do provete por instabilidade geométrica. As variações da geometria do compósito, ainda que pequenas, originam excentricidades na carga aplicada, que fazem com que a rotura ocorra mais cedo do que era esperado, devido à encurvadura do provete.

Segundo de Moura (1995), dos dispositivos de fixação existentes, evidenciam-se dois que conduzem a resultados satisfatórios, sendo estes, o dispositivo *Celanese* e o dispositivo *IITRI*.

O dispositivo de fixação *Celanese* foi desenvolvido pelo *Celanese Research Center* e mais tarde foi adoptado como ASTM D-3410-95. Este sistema caracteriza-se pelo deslizamento relativo de amarras troncocónicas em mangas cilíndricas. Este sistema está envolvido exteriormente por um casquilho cilíndrico (Figura 18 e Figura 19).

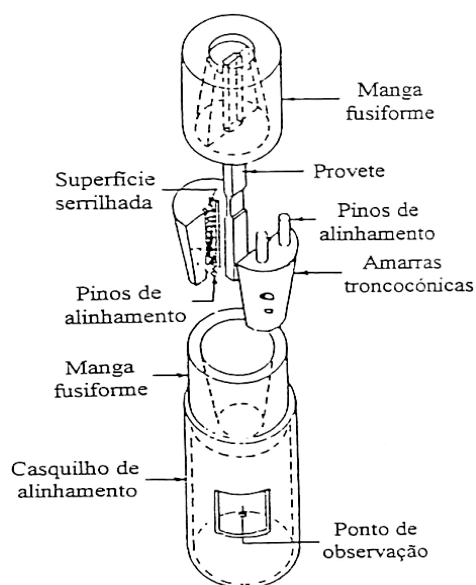


Figura 18. Esquema do sistema de fixação Celanese (Moura, 1995).



Figura 19. Sistema de fixação Celanese (Moura, 1995).

O sistema *IITRI* desenvolvido pelo *Illinois Institute of Technology Research Institute* aparece como uma necessidade de melhorar o sistema *Celanese*. Este novo sistema foi adoptado como ASTM D 3410M-95, em que as amarras troncocônicas do sistema *Celanese* são substituídas por amarras trapezoidais. Estas encontram-se inseridas em dois blocos maciços, cujo alinhamento é conseguido através de dois guiamentos de forma cilíndrica (Figura 20 e Figura 21).

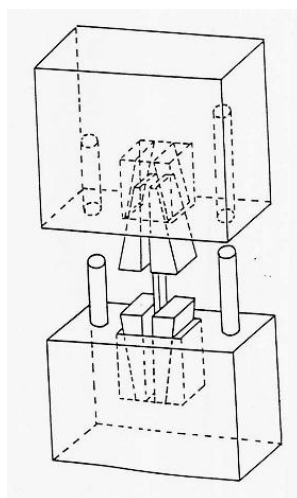


Figura 20. Esquema do sistema de fixação IITRI (Moura, 1995).

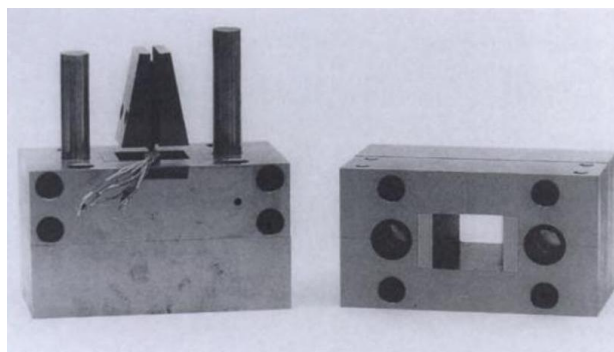


Figura 21. Sistema de fixação IITRI (Moura, 1995).

De acordo com estudos comparativos entre os dois sistemas anteriormente referidos, o que revelou melhor desempenho, no que diz respeito à dispersão de resultados experimentais, foi o sistema *IITRI* de acordo com Berg *et al* (1988). Devido à maior rigidez e por conseguinte um melhor alinhamento do sistema *IITRI*, os valores obtidos por este método de análise à compressão são, de um modo geral, superiores ao dispositivo *Celanese* segundo Wung *et al* (1992). O sistema *IITRI* tem ainda como vantagens ser de simples utilização e possuir maior flexibilidade à variação da espessura dos provetes. Tendo em consideração os estudos realizados por outros autores, adoptou-se, no presente estudo, o sistema *IITRI* para a realização dos ensaios de compressão.

Antes de se proceder aos ensaios de compressão dos laminados em estudo, houve a necessidade de melhorar o equipamento de compressão anteriormente desenvolvido por Figueiredo (2008). Esta necessidade ocorreu devido ao facto deste não

ter suportado todos os esforços envolvidos, deformando-se num ensaio de um provete sem defeito, levando à paragem dos testes.

Todo o equipamento foi projectado e concebido no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.

A causa do empenamento do equipamento anterior foi a falta de robustez deste. O material escolhido para a concepção do novo equipamento foi o aço P20 segundo designação AISI, possuindo uma tensão de cedência de 800 MPa. Sabendo que a máquina de testes utilizada suporta uma força máxima de 100 kN, o equipamento foi concebido de forma a suportar uma tensão máxima igual a metade da tensão de cedência, 400 MPa, utilizando-se, para este projecto, um coeficiente de segurança de 2.

Foi igualmente decidido que o novo equipamento de compressão não possuiria o furo roscado para o aparafusamento do sistema de rótula ao bloco superior, de modo a garantir a máxima robustez do novo equipamento. Esta alteração teve como finalidade eliminar o efeito de concentrações de tensões que se desenvolvia na zona roscada, diminuindo a resistência do equipamento. A maquinagem do aço foi efectuada de forma a que o sistema rótula/bloco superior fossem uma só peça.

Uma outra alteração efectuada em relação ao equipamento anterior diz respeito aos parafusos de aperto, que servem para fixar os provetes dentro das amarras. Devido à necessidade do aperto ser o mais forte possível para evitar escorregamento dos provetes durante o ensaio, os parafusos anteriores acabaram por se deformar pois o tipo de aço era macio demais. Houve então necessidade de substituir estes por parafusos de um aço mais duro e com cabeça sextavada mais larga.

Em relação às amarras não foi efectuada nenhuma alteração.

Devido à simetria do equipamento de compressão, apenas se analisou metade deste. Logo, a força considerada não foi de 100 kN, mas metade desta, 50 kN.

A carga aplicada é uniformemente distribuída pela amarra, mas considerou-se, por questões de simplificação, que seria pontual e estaria aplicada perpendicularmente à amarra no centro geométrico desta. Uma vez que as amarras possuem um ângulo de inclinação de 10° , a força anteriormente referida foi decomposta em duas componentes, uma delas segundo o eixo dos xx e outra segundo o eixo dos yy . A componente que representa a força mais significativa é a do eixo dos xx , sendo definida por F na Figura 22.

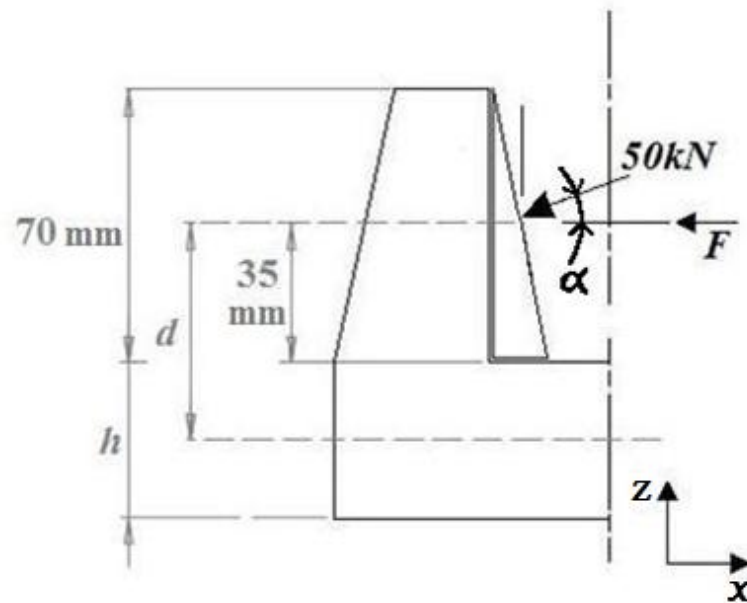


Figura 22. Força aplicada no equipamento.

A força F é calculada da seguinte forma:

$$F = 50 \times \cos \alpha \quad (2)$$

Sendo $\alpha = 10^\circ \Rightarrow F = 49,24 \times 10^3 N$.

Para determinar a espessura da base do equipamento, na Figura 22 referenciada como h , recorreu-se à fórmula da tensão exercida na peça, que neste caso se igualou à tensão máxima de 400 MPa. Assim, calculou-se a espessura necessária quando ocorre o caso mais crítico. Na expressão seguinte, M_y representa o momento flector em torno do eixo dos yy , a letra z representa a distância máxima ao ponto crítico e I_y representa o momento de inércia de área em relação ao eixo dos yy :

$$\sigma = \frac{M_y \times z}{I_y} \Leftrightarrow \quad (3)$$

$$\Leftrightarrow \sigma = \frac{F \times d \times \frac{h}{2}}{\frac{b \times h^3}{12}} \Leftrightarrow$$

$$\sigma \times b \times h^2 - 6 \times F \times d = 0 \quad (4)$$

Sabendo que F representa a força exercida na lateral do equipamento, d a distância do ponto de aplicação da força até ao centro geométrico da peça, σ a tensão a que o equipamento está submetido e b a largura do equipamento, e que:

- $F = 49,24 \times 10^3 \text{ N}$;
- $d = (35 \times 10^{-3}) + \frac{h}{2} \text{ m}$;
- $\sigma = \sigma_{m\acute{a}xima} = 400 \times 10^6 \text{ Pa}$;
- $b = 51 \times 10^{-3} \text{ m}$.

Vem, substituindo os valores na equação (4):

$$h = -0,0192 \text{ m} \wedge h = 0,0264 \text{ m}$$

Como a espessura tem de ser um valor positivo, o valor escolhido é 26,4 mm, pelo que, por questões de segurança, se escolheu o valor de 40 mm.

$$h = 26,4 \approx 30 \text{ mm} \Rightarrow \text{por questões de segurança} \Rightarrow 40 \text{ mm}$$

Para verificar se os cálculos estão correctos determina-se a tensão a que o equipamento estará submetido utilizando a espessura h calculada, substituindo na equação (3):

$$\sigma \cong 199 \text{ MPa} < \sigma_{m\acute{a}x} = 400 \text{ MPa}$$

Como se pode observar pelos cálculos de verificação, conclui-se que a espessura de 40 mm é válida porque o equipamento estará submetido a uma tensão inferior à tensão máxima admissível.

O novo equipamento encontra-se representado na Figura 23 e o equipamento anterior encontra-se representado na Figura 24. Por comparação dos dois equipamentos são possíveis observarem-se diferenças existentes entre estes. A espessura da base do bloco

superior, que foi redimensionada neste estudo, inicialmente de 25 mm no equipamento anterior foi alterada para 40 mm no novo projecto. Uma alteração ainda mais significativa teve a base do bloco inferior, em que a espessura deste foi alterada para 53,50 mm. Pode ser observado também nestas figuras que as laterais dos blocos do novo equipamento não têm espessura constante, como acontecia no equipamento anterior, sendo que a parte mais estreita tem 25 mm e parte mais larga tem 40 mm.

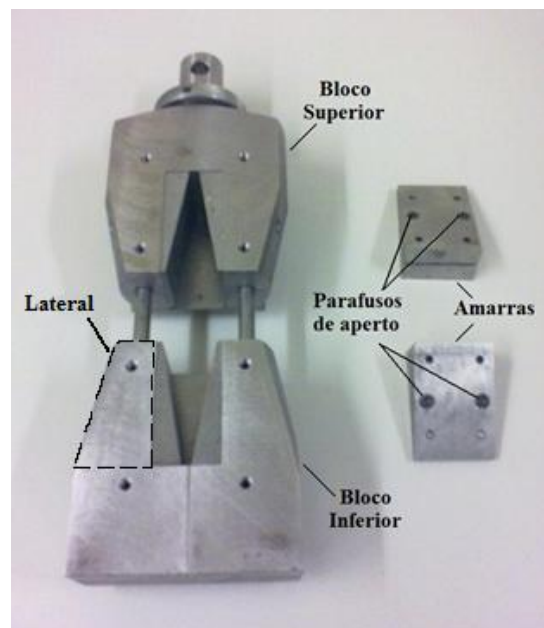


Figura 23. Imagem do novo equipamento.

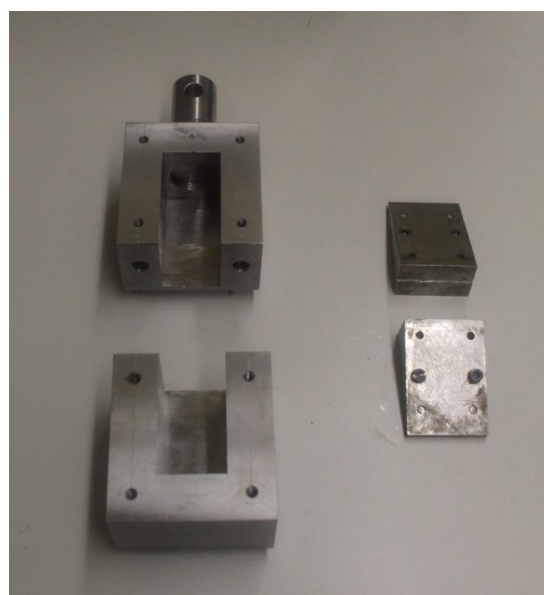


Figura 24. Imagem do equipamento anterior.

4.2. Ensaios de compressão

A primeira fase da realização dos ensaios de compressão foi a colocação dos provetes nas amarras. Cada extremidade do provete deve ser fixada no interior das amarras, deixando apenas um comprimento livre entre estas de 12,7 mm, segundo as especificações da norma ASTM D-3410M-95.

Após se verificar que o comprimento livre do provete cumpria a norma, procedeu-se ao aperto máximo dos parafusos que fixam o provete dentro das amarras. Este aperto terá de ser o suficiente de modo a que as amostras não se movam dentro das amarras ao realizar a compressão. Para garantir a não ocorrência de rotura da matriz por instabilidade geométrica, os quatro parafusos necessitavam de ter a mesma força de aperto, o que se torna difícil de assegurar, por o aperto ser realizado de forma manual. Por este motivo, alguns provetes ensaiados não resultaram em valores válidos, pelo que tiveram de ser excluídos da discussão de resultados.

A fase seguinte refere-se à colocação das amarras no equipamento de compressão. A realização dos testes de compressão efectuou-se utilizando uma máquina universal INSTRON 4206 existente no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, Figura 25.



Figura 25. Máquina de ensaios INSTRON 4206.

A máquina de ensaios encontra-se ligada a um computador que possui um *software* para o controlo dos ensaios, designado por *Bluehill 2*, Figura 26. Este *software* permite especificar e ajustar os factores fundamentais para a realização dos ensaios de compressão. Alguns destes factores são: a velocidade de compressão, as dimensões dos provetes, as calibrações, o momento em que a máquina deve interromper o ensaio, entre outros.

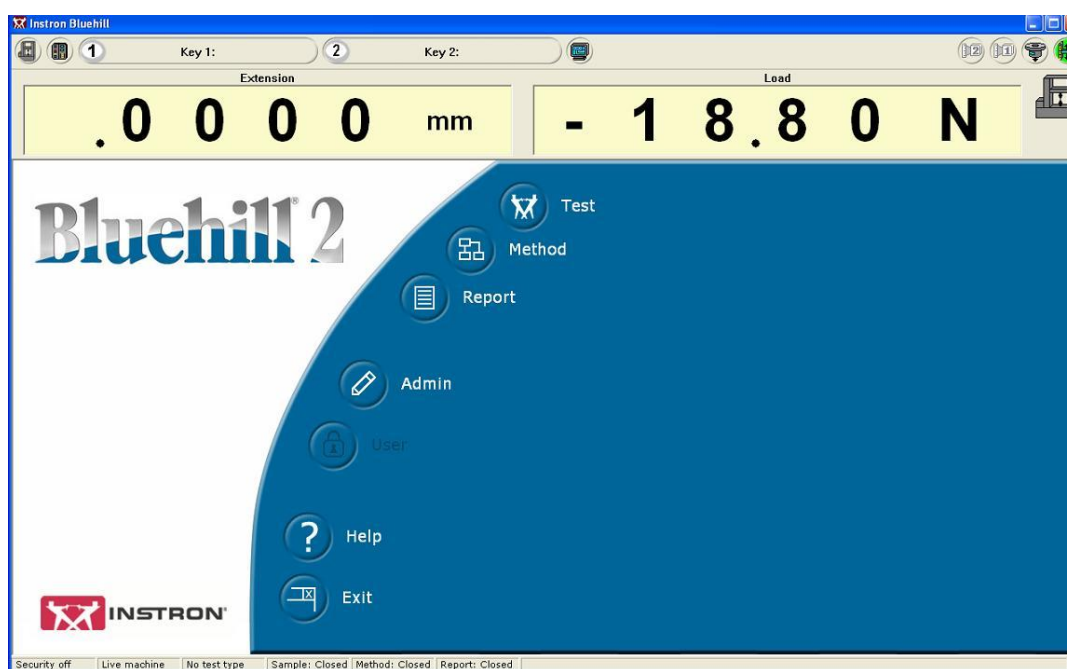


Figura 26. Programa utilizado para os ensaios (BLUEHILL 2).

Assim que as amarras são colocadas na máquina, faz-se uma aproximação manual rápida do equipamento, até à menor distância entre este e as amarras. De seguida procede-se à calibração automática através do *software*, em que este aproxima ainda mais o equipamento, até este estar em contacto com as amarras, mas sem exercer qualquer tipo de força nestas.

De seguida dá-se início aos ensaios de compressão, sendo estes realizados a uma velocidade constante de deslocamento do travessão da máquina de 1,5 mm/min até que ocorra variação brusca de carga superior a 40 %, indicativa da rotura do provete.

Após isto acontecer, o *software* origina um ficheiro *Excel* com os dados adquiridos a cada décima de segundo, nomeadamente, o valor do deslocamento do equipamento e a carga de compressão no instante medido. Com estes dados o programa

realiza uma curva de deslocamento em função da força aplicada. São estes dados que permitem determinar a carga de colapso de cada provete.

É de salientar que não foi realizado um passo da norma utilizada nestes ensaios. Este passo refere-se à colocação de extensómetros nas faces dos provetes, de modo a medir a deformação longitudinal destes. Decidiu-se pela não realização deste passo, visto que o objectivo principal não era saber a deformação longitudinal, mas a tensão de rotura à compressão de cada provete, sendo apenas necessário saber a carga de colapso para cada provete.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos testes à compressão dos provetes ensaiados.

5.1. Resultados

Para a obtenção da tensão de rotura à compressão, é necessário determinar a carga de colapso de cada provete. Através do quociente deste valor e da área de secção transversal, obtém-se a tensão de rotura à compressão.

Na Tabela 3 observam-se os valores obtidos para todos os provetes sem defeito.

Tabela 3. Valores obtidos para todos os provetes sem defeito.

Proвете analisado	Área da secção [mm ²]	Carga máxima [N]	Tensão [MPa]
16SD1_S	57,98	16295	281
16SD2_S	59,72	19839	332
16SD3_S	57,85	16912	292
16SD4_S	54,98	15624	284
16SD5_S	56,87	14615	257
16SD6_S	57,75	14454	250
16SD1_2S	52,31	22389	428
16SD2_2S	58,07	23774	409
16SD3_2S	53,04	23141	436
16SD1_AS	46,24	21248	460
20SD1_S	57,29	19047	332
20SD2_S	51,81	17492	338
20SD3_S	53,98	19678	365
20SD4_S	55,90	19987	358
20SD5_S	49,29	16864	342
20SD6_S	45,80	18142	396

Conforme referido atrás, na Tabela 3 estão indicados os valores da carga máxima suportada por cada provete e a respectiva área da secção, esta última calculada pela multiplicação da largura do provete pela sua espessura. Com os dados anteriores, é determinado o valor para a tensão de rotura à compressão suportada por cada provete sem defeito.

Outro dado que se pode retirar da observação dos provetes sem defeito após ter atingido a rotura, é o seu modo de colapso, sendo que este ocorre de modo global, ver capítulo 2. Este modo caracteriza-se por evidenciar uma instabilidade estendida ao longo do provete, o que provoca a sua deflexão lateral, como se pode observar na Figura 27.



Figura 27. Vista transversal do provete 16SD1_S após ser submetido ao ensaio de compressão.

Em seguida ensaiaram-se os provetes com a mesma orientação, mas agora contendo defeito embebido. Na Tabela 4 estão indicados todos os valores da tensão de rotura à compressão dos provetes com defeito embebido.

Tabela 4. Valores obtidos para todos os provetes com defeito.

Provete analisado	Área da secção [mm ²]	Carga máxima [N]	Tensão [MPa]
16DE1_S	60,71	14776	243
16DE2_S	59,10	15839	268
16DE3_S	61,36	16290	266
16DE4_S	58,07	17525	302
16DE1_2S	55,57	11866	214
16DE2_2S	61,50	14169	230
16DE1_AS	56,59	16311	288
20DE1_S	56,95	16370	287
20DE2_S	58,20	18588	319
20DE3_S	54,20	19100	352

Para o caso dos provetes com defeito embebido, observa-se pela análise destes após a compressão, que o tipo de colapso difere dos provetes sem defeito, sendo designado por modo local. Este tipo de rotura é caracterizado pela ocorrência de encurvadura do sublaminado delaminado, observado pela separação, devido a delaminagens, de algumas camadas em relação ao restante provete. Este tipo de colapso pode ser observado na Figura 28.



Figura 28. Vista transversal do provete 16DE3_S após ser submetido ao ensaio de compressão.

A média da tensão de rotura dos provetes sem defeito é de 340 MPa e dos provetes com defeito é de 278 MPa. Observa-se então que os valores desta tensão nos provetes com defeito embebido são mais baixos que os provetes que não foram sujeitos a impacto, ou seja, sem defeito, provando desta forma que o dano causado pelo impacto reduz a resistência à compressão dos compósitos laminados.

Esta média da tensão de rotura à compressão é meramente indicativa, dado que na Secção 5.2, Discussão de Resultados, será realizada uma filtragem, seleccionando apenas os valores que se aproximem dos valores centrais, desprezando-se os que se encontrem muito acima ou abaixo desta faixa. É de realçar também, que o âmbito deste estudo é a influência da sequência de empilhamento das camadas que constituem os compósitos no valor da máxima força à compressão suportada por estes. Devido a esta razão, o estudo será realizado analisando separadamente cada uma das sequências ensaiadas, para se poder inferir alguma conclusão plausível.

5.2. Discussão

Após a escolha dos valores mais coerentes, seleccionados da totalidade dos resultados obtidos, foi realizada a Tabela 5 com os resultados respeitantes aos provetes sem defeito, possuindo 16 camadas e de orientação $[0_4, 90_4]_S$. Em média, a tensão de rotura à compressão destes provetes é de aproximadamente 298 MPa.

Tabela 5. Valores obtidos para os provetes sem defeito de orientação $[0_4, 90_4]_S$.

Provete analisado	Área da secção [mm ²]	Carga máxima [N]	Tensão [MPa]
16SD1_S	57,98	16295	281
16SD2_S	59,72	19839	332
16SD3_S	57,85	16912	292
16SD4_S	54,98	15624	284

Em seguida ensaiaram-se os provetes com a mesma orientação, mas agora contendo defeito embebido, ou seja, contido em todo o interior do provete. Na Tabela 6 pode-se observar que os valores da tensão de rotura à compressão nos provetes com defeito embebido são mais baixos que os provetes que não sofreram impacto, sendo que em média, a tensão dos primeiros é aproximadamente 259 MPa.

Tabela 6. Valores obtidos para os provetes com defeito embebido de orientação $[0_4, 90_4]_S$.

Provete analisado	Área da secção [mm ²]	Carga máxima [N]	Tensão [MPa]
16DE1_S	60,71	14776	243
16DE2_S	59,10	15839	268
16DE3_S	61,36	16290	266

Posteriormente fizeram-se ensaios à compressão de placas com 16 camadas, duplamente simétrica, mas com orientação diferente dos primeiros, sendo que a sequência de empilhamento é $[0,90,0,90]_{2S}$. Realizou-se então a Tabela 7 com os dados referentes a estas placas. O valor médio da tensão de rotura destas placas é cerca de 424 MPa.

Tabela 7. Valores obtidos para os provetes sem defeito de orientação $[0, 90, 0, 90]_{2s}$.

Provete analisado	Área da secção [mm ²]	Carga máxima [N]	Tensão [MPa]
16SD1_2S	52,31	22389	428
16SD2_2S	58,07	23774	409
16SD3_2S	53,04	23141	436

Os valores dos ensaios de compressão após o impacto, em provetes com defeito embebido, encontram-se indicados na Tabela 8 para o empilhamento anterior. O valor médio da tensão de rotura destes provetes é aproximadamente 222 MPa.

Tabela 8. Valores obtidos para os provetes com defeito embebido de orientação $[0, 90, 0, 90]_{2s}$.

Provete analisado	Área da secção [mm ²]	Carga máxima [N]	Tensão [MPa]
16DE1_2S	55,57	11866	214
16DE2_2S	61,50	14169	230

Uma outra orientação foi testada para se poder obter mais conclusões. Embora possua também 16 camadas, este empilhamento é anti-simétrico, sendo designado por $[0,90]_8$. Só se conseguiu testar uma placa com esta orientação, estando os valores expostos na Tabela 9 para o provete sem defeito.

Tabela 9. Valor obtido para o provete sem defeito de orientação $[0, 90]_8$.

Provete analisado	Área da secção [mm ²]	Carga máxima [N]	Tensão [MPa]
16SD1_AS	46,24	21248	460

Os valores do provete com defeito embebido, com a configuração de empilhamento anterior são indicados na Tabela 10.

Tabela 10. Valores obtidos para o provete com defeito embebido de orientação $[0, 90]_8$.

Provete analisado	Área da secção [mm ²]	Carga máxima [N]	Tensão [MPa]
16DE1_AS	56,59	16311	288

A inclusão destes resultados é meramente comparativa, visto que tendo sido realizado apenas um ensaio não se podem retirar conclusões. O que é possível constatar é se esta sequência de empilhamento segue, ou não, a lógica das restantes sequências ensaiadas.

Seguidamente ensaiaram-se provetes com 20 camadas de orientação simétrica $[0_5, 90_5]_S$. Na Tabela 11 podemos observar os dados importantes para a caracterização da tensão de rotura à compressão dos provetes com esta orientação e sem terem sido sujeitos a impacto. Após análise desta tabela, observou-se que o valor médio desta tensão é aproximadamente igual a 342 MPa.

Tabela 11. Valores obtidos para os provetes sem defeito de orientação $[0_5, 90_5]_S$.

Proвете analisado	Área da secção [mm ²]	Carga máxima [N]	Tensão [MPa]
20SD1_S	57,29	19047	332
20SD2_S	51,81	17492	338
20SD3_S	53,98	19678	365
20SD4_S	55,90	19987	358
20SD5_S	49,29	16864	342

Foram também testados provetes de 20 camadas, mas possuindo defeito embebido. Os dados relativos a estes provetes estão apresentados na Tabela 12. Pela análise da referida tabela verifica-se que a média da tensão de rotura à compressão é cerca de 303 MPa, denotando-se uma diminuição em relação aos provetes sem defeito.

Tabela 12. Valores obtidos para os provetes com defeito embebido de orientação $[0_5, 90_5]_S$.

Proвете analisado	Área da secção [mm ²]	Carga máxima [N]	Tensão [MPa]
20DE1_S	56,95	16370	287
20DE2_S	58,20	18588	319

Por análise dos resultados obtidos é possível verificar que, a orientação das camadas dos compósitos laminados influencia a sua resistência à compressão. Através das tabelas comparativas das diferentes orientações, foi possível criar o gráfico da Figura 29 onde se pode observar, de um modo global, que as placas sem serem submetidas a impacto,

com orientação $[0,90]_8$ são as que têm uma maior tensão de rotura à compressão. A placa com orientação $[0,90,0,90]_{2s}$ apresenta uma tensão à compressão mais baixa que a anterior, e a placa com orientação $[0_4, 90_4]_s$ o menor valor de tensão à compressão, quando se comparam as diferentes sequências de empilhamento consideradas.

Colocou-se também a resistência à compressão dos laminados unidireccionais, 211 MPa (Amaro, 2003), de forma a haver um termo de comparação, utilizando para isso, provetes com as fibras orientadas numa única direcção.

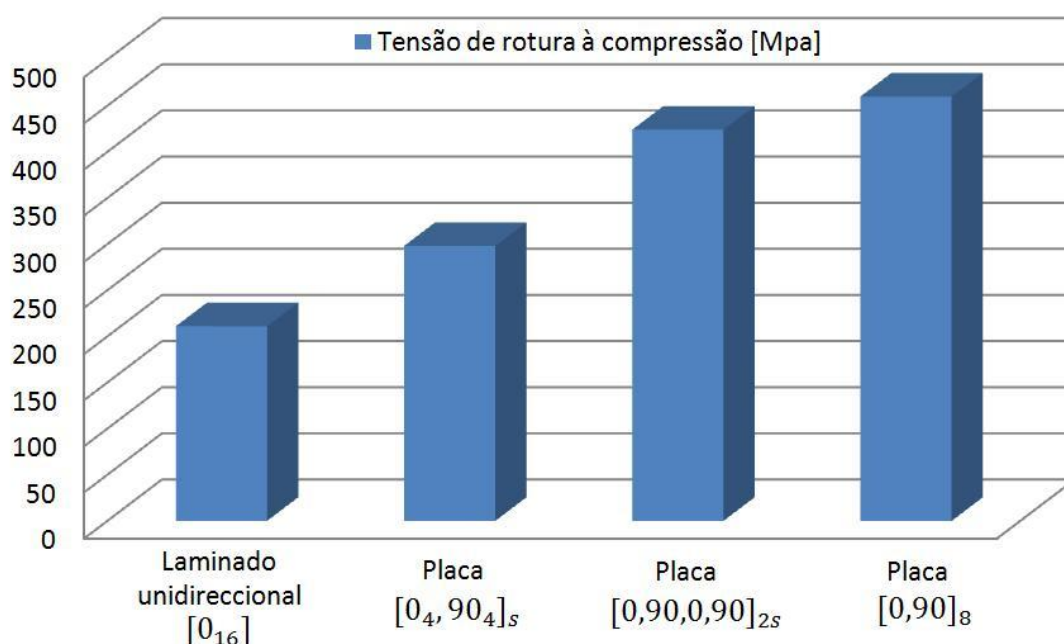


Figura 29. Relação da tensão de rotura à compressão [MPa] para cada tipo de empilhamento do laminado.

A Tabela 13 apresenta os valores obtidos para as sequências de empilhamento em estudo em termos de aumento de resistência à compressão, em relação ao laminado unidireccional.

Tabela 13. Aumento de resistência à compressão em função da orientação do material compósito.

Orientação da placa	Tensão média de rotura à compressão [MPa]	Aumento de resistência [%]
Laminado unidireccional [0 ₁₆]	211	--
[0 ₄ , 90 ₄] _s	298	41
[0, 90, 0, 90] _{2s}	424	101
[0, 90] ₈	460	118

Observa-se nesta tabela que o factor que determina a diferença dos valores da tensão de rotura à compressão, para as placas em análise, é a sequência de empilhamento que cada provete apresenta, visto que todos os provetes considerados têm 16 camadas.

Deste modo, pode-se inferir que na placa com sequência de empilhamento [0,90]₈, Figura 9, observa-se um aumento de resistência à compressão de 118 %, em relação ao laminado unidireccional, Figura 8. Este aumento deve-se aos sublaminados relativos a cada interface desta placa possuírem diferente orientação, resultando numa maior absorção de energia pelas fibras adjacentes, suportando desta forma uma maior carga de compressão.

A placa [0,90,0,90]_{2s} da Figura 10 propicia um aumento de resistência ligeiramente inferior ao da placa referida anteriormente, sendo de cerca de 101 % em relação ao laminado unidireccional. A razão deste aumento segue o mesmo critério da placa [0,90]₈, mas a diferença em relação a esta deve-se ao facto de, observando a Figura 10, ter sublaminados com igual orientação presentes nas interfaces identificadas com as letras D, H e L.

O menor aumento de resistência à compressão, 41 %, em relação ao laminado unidireccional, é observado na placa [0₄, 90₄]_s, Figura 11. Este facto deve-se, pela observação da respectiva figura, a uma aproximação de três conjuntos de laminados unidireccionais, o primeiro e o último com quatro sublaminados orientados a 0° e o do meio com oito sublaminados orientados a 90°. Sabendo que na fabricação dos sublaminados, estes foram feitos com cerca de 0,15 mm de espessura cada, a aproximação referida seria um conjunto de dois laminados com 0,6 mm e um central com 1,2 mm, apenas tendo orientação diferente nas interfaces onde estes conjuntos de agregam.

Concluiu-se também que a presença de defeito nos provetes de carbono/epóxico conduz a uma diminuição da resistência destes, em relação ao mesmo tipo de provetes sem qualquer tipo de dano. Estudou-se a influência deste aspecto em cada tipo de orientação testada no presente trabalho, elaborando-se a Tabela 14.

Tabela 14. Diminuição de resistência à compressão em função da presença de defeito.

Orientação da placa	Tensão de rotura à compressão de provete sem defeito [MPa]	Tensão de rotura à compressão de provete com defeito [MPa]	Diminuição da resistência [%]
$[0_4, 90_4]_s$	298	259	13
$[0_5, 90_5]_s$	342	303	11
$[0, 90, 0, 90]_{2s}$	424	222	48
$[0, 90]_8$	460	288	37

Pela análise da Tabela 14 observa-se que a mais acentuada diminuição de resistência ocorreu nas placas com orientação $[0,90,0,90]_{2s}$, perdendo a capacidade de sustentação da carga à compressão aplicada em cerca de 48%.

Também se verificou uma perda elevada de resistência à compressão nas placas que foram sujeitas a impacto, de orientação $[0,90]_8$, em cerca de 37%, em relação aos provetes provenientes destas placas, sem terem sido sujeitos a impacto.

Uma redução significativamente menor ocorreu nas placas com orientação $[0_4, 90_4]_s$ que, devido ao impacto, a sua resistência à compressão baixou em cerca de 13%.

Semelhante redução ocorreu nas placas de orientação $[0_5, 90_5]_s$ que devido ao defeito provocado pelo impacto, a sua tensão de rotura à compressão diminuiu em cerca de 11%.

Observa-se nesta análise que a sequência de empilhamento dos compósitos laminados influencia a tensão de rotura à compressão. Infere-se através desta análise que, nos provetes que foram sujeitos a impacto, a sua capacidade de sustentação da carga de compressão, é inferior à dos provetes que não sofreram o impacto.

De acordo com bibliografia consultada, uma possível justificação para a maior diminuição de resistência à compressão devido ao defeito, ocorrer nas placas com orientação $[0,90,0,90]_{2s}$ e nas placas de orientação $[0,90]_8$, deve-se a estas possuírem

mais interfaces entre camadas com diferentes orientações. Esta mudança na orientação dos sublaminados conduz à ocorrência de delaminagens após solicitação de impacto, uma das causas para a perda de integridade do provete. Era esperado que as placas de orientação $[0,90]_8$, tivessem uma perda de resistência à compressão superior às placas com orientação $[0,90,0,90]_{2S}$, pois estas possuem mais interfaces susceptíveis de ocorrência de delaminação, mas como só foi testado um provete com sequência de empilhamento $[0,90]_8$, não se podem tirar conclusões relativamente a este aspecto.

6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusões

Após a realização deste estudo pode-se afirmar que os objectivos propostos inicialmente foram cumpridos.

Um dos objectivos, ainda que secundário, foi o redimensionamento do equipamento de compressão. Este foi suficientemente robusto para aguentar os esforços envolvidos nos ensaios de compressão de provetes com e sem defeito, não apresentando qualquer tipo de deformação após a realização de todos estes ensaios.

O objectivo principal desta dissertação, que correspondia à análise experimental da redução da resistência residual à compressão, de placas compósitas sujeitas a impacto a baixa velocidade, com diferentes orientações de fibras e diferentes espessuras foi alcançado.

Fazendo uma síntese do estudo realizado, podem-se retirar as seguintes conclusões:

- O modo de colapso depende das características dos provetes. Provetes sem defeito possuem modo de colapso global, evidenciando-se por uma deflexão lateral. Provetes com defeito embebido, ao serem comprimidos, cedem por modo local, ocorrendo separação de sublaminados, designando-se este fenómeno por delaminação;
- Materiais compósitos sem defeito possuem maior resistência à compressão quando confrontados com materiais compósitos com defeito;
- A orientação das camadas constituintes dos compósitos laminados influencia o seu comportamento na resistência à compressão;
- Os materiais compósitos com arranjos unidireccionais possuem menor resistência à compressão do que os mesmos materiais com arranjos multi-direccionais;
- Para o mesmo número de camadas, placas sem terem sido sujeitas a impacto, com orientação $[0,90,0,90]_{2S}$ possuem maior tensão de rotura à compressão quando comparadas com as placas com orientação $[0_4, 90_4]_S$. O laminado unidireccional

$[0_{16}]$ é o que apresenta menor tensão de rotura à compressão quando comparado com as anteriores orientações;

– Em placas de material compósito sem defeito, o aumento do número de interfaces onde os sublaminados se encontram diferentemente orientados, conduz a uma maior tensão de rotura à compressão;

– O aumento de resistência à compressão em relação ao laminado unidireccional, em placas sem defeito com o mesmo número de camadas, foi de 101% para a sequência de empilhamento $[0,90,0,90]_{2s}$ e de 41% para a placa $[0_4, 90_4]_s$;

– O decréscimo na capacidade de suportar a carga de compressão nos provetes que foram sujeitos a impacto, em relação aos provenientes das mesmas placas que não sofreram dano, foi de 48% para a sequência de empilhamento $[0,90,0,90]_{2s}$, de 13% para a sequência $[0_4, 90_4]_s$ e de 11% para a sequência $[0_5, 90_5]_s$;

– A diminuição de resistência à compressão devido ao defeito, ocorrida nas placas de sequência de empilhamento $[0,90,0,90]_{2s}$ e $[0,90]_8$, pode ser justificada pela maior quantidade de interfaces susceptíveis de ocorrência de delaminagens, localizadas onde os sublaminados possuem diferente orientação.

6.2. Propostas para futuros trabalhos

No desenvolvimento de futuros estudos no seguimento do presente trabalho, seria importante analisar os seguintes aspectos:

- A análise de diferentes materiais compósitos, tais como vidro-epóxico, visto este também ser frequentemente utilizado;
- Estudar o mesmo material, carbono-epóxico, mas para outras sequências de empilhamento não estudadas na presente dissertação ou diferentes espessuras, para se poder inferir acerca do comportamento do material relativamente a estes aspectos;
- Análise do comportamento do material compósito sob diferentes condições de temperatura e/ou humidade;
- O estudo da influência das características do impactor, tais como a sua forma geométrica, o seu diâmetro, a sua massa ou a energia de impacto;
- Analisar com detalhe a diminuição de rigidez no provete ao longo da execução do ensaio de compressão;
- O estudo da rotura por análise microscópica após o ensaio da compressão, tentando apurar como ocorre o aparecimento desta e como se desenvolve.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

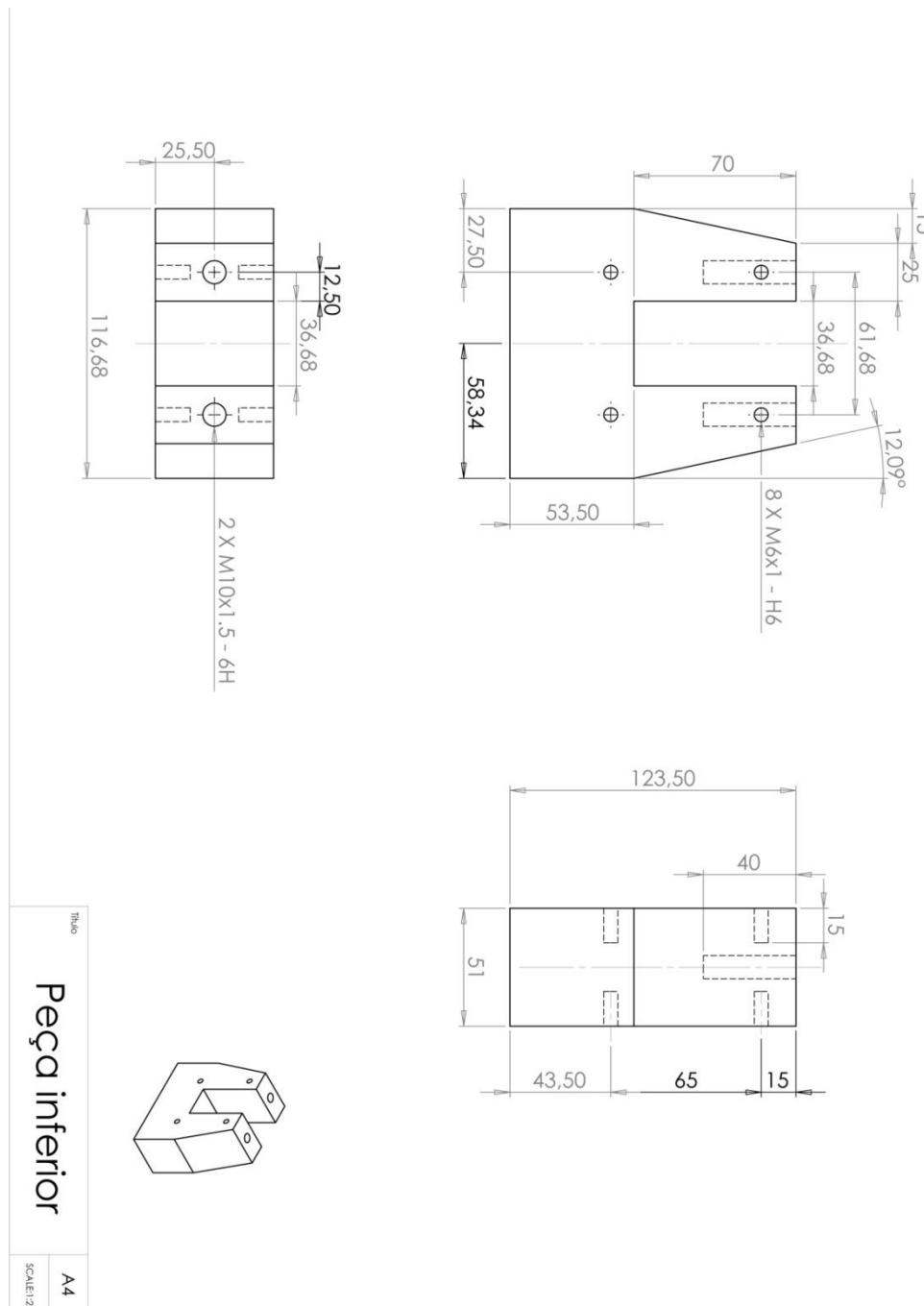
- Aktaş, M., *et al.* (2009), “Compression-After Impact Behavior of Laminated Composite Plates Subjected to Low Velocity Impact in High Temperatures”, *Composite Structures*, Vol. 89, 77 – 82.
- Amaro, A. P. B. M. (2003), “Estudo do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos: Utilização Conjugada do Método dos Elementos Finitos e de Técnicas de Interferometria Holográfica e Ultra-sonoras.”, Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC).
- Aslan, Z., Karakuzu, R. e Okutan, B. (2003), “The Response of Laminated Composite Plates Under Low-Velocity Impact Loading”, *Composite Structures* 59, 119 – 127.
- ASTM D 3410/D 3410M – 95 (1995). “Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading”. American Society for Testing and Materials.
- Berbinau, P., Soutis, C., Goutas, P., Curtis, P. T. (1999), “Effect of Off-Axis Ply Orientation on 0° - Fibre Microbuckling”, *Composites: Part A* 30, 1197 – 1207.
- Berg, J. S. e Adams, D. F. (1988), “An Evaluation of Composite Material Compression Test Methods”, *Composite Material Research Group*, University of Wyoming, Laramie, WY.
- Berthelot, J. M. (1992), “Matériaux Composites, Comportement mécanique et analyse des structures”, Masson.
- Choi, H. C., Chang, F. (1992), “A Model for Predicting Damage in Graphite/Epoxy Laminated Composites Resulting from Low-Velocity Point Impact”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 14, 2134 – 2169.
- de Moura, M.F.S.F. (1995), “Modelos de Previsão do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Carbono-Epóxico sujeitos a Impacto a Baixa Velocidade e da sua Resistência Residual à Compressão Após Impacto.”, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP/DEMEGI).
- de Moura, M. F. S. F., Morais, A. B., Magalhães, A. G. (2005), “Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico”, *Publindústria*.
- Ferreira, L. M. S. (2006), “Avaliação do Dano em Compósitos Laminados devido a Impactos de Baixa Velocidade”. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.

- Figueiredo, A. I. C. (2008), “Compressão de Placas Compósitas Após Submetidas a Impacto a Baixa Velocidade”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC).
- Guynn, E. G., and O’Brien (1985), “The Influence of Lay-up and Thickness on Composite Impact Damage and Compression Strength”, AIAA/ASCE/AHS, 26th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Orlando, Florida.
- Habib, F. A. (2002), “A New Method for Evaluating the Residual Compression Strength of Composites After Impact”, *Composite Structures* 53, 309 – 316.
- Hitchen, S. A. e Kemp, R. M. J. (1995), “The Effect of Stacking Sequence on Impact Damage in a Carbon Fibre/Epoxy Composite”, *Materials and Structures*, DRA Farnborough, Farnborough, Hants, GU14 6TD, UK, *Composites* 26, 207 – 214.
- Lee, J., Soutis, C. (2005), “Thickness Effect on the Compressive Strength of T800/924C Carbon Fibre – Epoxy Laminates”, *Composites: Part A* 36, 213 – 227.
- Pinto, F. M. P. M. (2009), “Compressão de Placas Compósitas com Defeito Provocados por Impacto a Baixa Velocidade”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC).
- Ramalho, M. J. F. O. D. (2001), “Determinação Teórica e Experimental das Propriedades Mecânicas de Laminados Compósitos”, Tese de Mestrado em Engenharia de Materiais, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC).
- Sanchez-Saez, Barbero, E., Zaera, R. e Navarro, C. (2005), “Compression After Impact of Thin Composite Laminates”, *Composites Science and Technology* 65, 1911 – 1919.
- Santos, J. B. (2008, Outubro), “Técnicas de Imagem por Ultra-sons”, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, FCTUC. Acedido a 16 de Dezembro de 2009, em: <https://woc.uc.pt/fisica/class/getmaterial.do?idclass=244&idyear=3>
- Steinmetz, G., Arendts, F. Z. e Nething, R. (1990), “Delamination Bucking of Laminated Plates”, *Developments in the Science and Technology of Composites Materials*, Fourth European Conference on Composite Materials, ECCM 4, Stuttgart, F. R. G., Ed by J. Fuller et al., pp. 495-502, September 25-28.
- Wang, X. W., Pont-Lezica, I., Harris, J. M., Guild, F. J., Pavier, M. J. (2005), “Compressive Failure of Composite Laminates Containing Multiple Delaminations”, *Composites Science and Technology* 65, 191 – 200.
- Wung, E. C. J., Chatterjee, S. N. (1992), “On the Failure Mechanisms in Laminate Compression Specimens and the Measurements of Strengths”, *Journal of Composite Materials*, vol. 26, No. 13, pp. 1885 – 1914.
- Yeh, M. K. e Tan C. M. (1994), “Buckling of Elliptically Delaminated Composite Plates”, *Journal of Composite Materials*, vol. 28, No. 1, pp. 36 – 52.
- Zhang, X., Hounslow, L. e Grassi, M. (2006), “Improvement of Low-Velocity Impact and Compression After Impact Performance by Z-Fibre Pinning”, *Composites Science and Technology* 66, 2785 – 2794.

8. ANEXOS

8.1. Partes do equipamento de compressão

8.1.1. Parte inferior



8.1.2. Parte superior

