

Comportamento ao Impacto a baixa velocidade de laminados de epóxido/fibra de vidro, com camadas de cortiça

Dinis Dias

Relatório do Projecto Final / Dissertação do MIEM

Orientador no INEGI: P.J.R.O. Nóvoa

Orientador na FEUP: Prof. A. Torres Marques



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Janeiro de 2009

Comportamento ao Impacto a baixa velocidade de laminados de epóxico/fibra de vidro, com camadas de Cortiça

Dinis Dias¹, P. J. R. O. Nóvoa², A.Torres Marques¹

¹ Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, R. Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal.

² Unidade de Pesquisa de Materiais Compósitos e Estruturas, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI), R. Dr. Roberto Frias 400, 4200-465 Porto, Portugal.

O dano causado por impactos a baixa velocidade é considerado como sendo uma das formas de dano mais perigosas a que os materiais compósitos podem ser sujeitos. São particularmente perigosos não só devido ao nível de dano que podem causar, mas também devido ao facto de poderem permanecer indetectáveis por inspecção visual.

Este trabalho descreve os estudos experimentais realizados de forma a atenuar o tipo de dano previamente referido, em materiais compósitos, baseando-nos numa estratégia de aumento de tenacidade interlaminar. De modo a atingir os objectivos traçados, foi seleccionada a cortiça para material interlaminar, devido às suas propriedades, nomeadamente a sua resistência ao impacto – resultante da sua elevada compressibilidade e elevada capacidade de absorção de energia. Por outro lado, o facto de a cortiça ser um material nacional, de baixa densidade, natural e renovável, foram factores que tornaram mais atractiva a utilização deste material.

As placas de material compósito foram produzidas através de um processo de moldação manual, e delas foram retirados os provetes necessários para a caracterização mecânica do conjunto material. Para a sua caracterização foram efectuados ensaios de corte, flexão, corte interlaminar e ensaios de impacto Charpy, de forma a compreender o efeito causado por diferentes configurações utilizadas.

Os objectivos iniciais consistiam em determinar se a cortiça seria uma opção viável a ser utilizada como reforço interlaminar, e em que condições a resistência ao impacto poderia ser maximizada. No entanto, os resultados obtidos apresentaram-se bastante diferentes do desejado, sugerindo que a cortiça provavelmente não seria uma boa opção para este tipo de aplicações, ou que a sua utilização neste trabalho foi ineficaz. Esta última possibilidade constitui uma motivação para a investigação do uso de cortiça neste tipo de aplicações, tendo em consideração diferentes combinações de parâmetros que permitam obter resultados mais encorajadores.

Low Velocity Impact Performance of Glass Fibre/Epoxy Composites Modified with Cork Film Interleaved Layers

Dinis Dias¹, P. J. R. O. Nóvoa² and A.Torres Marques¹

¹ Department of Mechanical Engineering and Industrial Management (DEMEGI), Faculty of Engineering, University of Porto, R. Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal.

² Composite Materials and Structures Research Unit, Institute of Mechanical Engineering and Industrial Management (INEGI), R. Dr. Roberto Frias 400, 4200-465 Porto, Portugal.

Low-velocity impact damage is counted as one of the most critical types of damage that composite materials can be subjected to. It is particularly harmful not only because of the degree of damage it can produce, but also due to the fact that it is usually undetected by visual inspection.

The present work describes an experimental study to decrease the referred type of damage in composite materials, based on the interlayer toughening strategy. In order to achieve the intended objectives, cork was selected as the interlayer film material due to particular performance features, namely, its excellent impact properties resulting from both high compressibility and high energy absorption. The additional fact that cork is a national, low density renewable natural product, adds up to the interest of its selection.

The composite plates were produced by the hand lay-up molding process, and all the necessary specimens were cut from those plates. The mechanical characterization included the evaluation of tensile, flexural, interlaminar shear and Charpy impact properties, in order to obtain a thorough knowledge of the overall mechanical performance of the different laminate configurations included in the study.

The work objective to determine if cork could be suitable option for an interlayer toughening material and, if so, under which conditions its performance could be maximized, failed to meet the initial expectations. In fact, the results obtained were somewhat far from the desired goal, suggesting that either cork isn't the best choice of material for the application, or that it was inefficiently used. This last possibility constitutes a motivation to further explore the use of cork in this application, considering new parameter combinations that might allow us achieving relevant improvements regarding low-velocity-impact damage in composite materials.

Agradecimentos

Gostaria de poder agradecer a todas as pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho e que manifestaram apoio e auxiliaram ao longo deste percurso:

Ao Prof. António Torres Marques, por permitir e aprovar realização deste trabalho, bem como pela orientação.

Ao Dr. Paulo Nóvoa, manifesto o meu sincero agradecimento por toda a paciência mostrada ao longo da realização deste trabalho, pela orientação e pela imensa disponibilidade.

Ao Ivo Costa, por todo o trabalho desenvolvido, e por ter participado activamente na ideia original deste projecto.

À Eng. Andreia Durães, pela realização dos ensaios de teores e cedência do laboratório para a realização de determinadas etapas do processo experimental.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pela extensa base de dados e bibliografia que disponibiliza aos alunos, bem como pelas excelentes condições de trabalho que oferece.

Ao INEGI e respectivo pessoal, por disponibilizarem espaço e equipamento fundamental à realização do processo experimental.

À empresa Sá Rosas, S.A. (Paços de Brandão, S. M. Feira, em especial ao Sr. Eduardo Ferreira Veiga de Macedo por ter disponibilizado as folhas de cortiça essenciais para o desenvolvimento do trabalho

Universidade do Minho, Pólo de Guimarães, por disponibilizarem os laboratórios e a máquina de ensaios Charpy para a realização deste trabalho

Ao CEMUP, em especial ao Professor Carlos Sá e à Dra. Daniela pelo auxílio prestado, e por fornecerem condições e equipamentos necessários para as observações efectuadas.

Por fim, deixo um agradecimento especial a família e amigos, que me foram acompanhando ao longo deste trabalho e do curso e que sempre estiveram presentes de uma forma ou de outra.

Índice

Capítulo I : Introdução 1

1.1 - Introdução	1
1.2 - Justificação do Estudo de Impacto a baixa velocidade ^[1.1;1.2;1.3]	2
1.3 – Aplicabilidade	3
1.4 - Motivos da Utilização de Cortiça ^[1.5]	4
1.5 – Objectivos do Trabalho	4
1.6 – Resumo dos Capítulos.....	5
1.7 - Bibliografia	6

Capítulo II : Fundamentação Teórica.....7

2.1 - Noções Base Sobre Materiais Compósitos ^[2.1;2.2]	7
2.1.1 - Classificação:	9
2.1.1.a) - Compósitos reforçados por partículas	10
2.1.1.b) - Compósitos reforçados por fibras	11
2.2 – Definição de Biocompósitos	13
2.3 – Cortiça: Características e Propriedades	14
2.3.1 - Estrutura	15
2.3.2 - Constituição Química.....	17
2.3.3 - Propriedades.....	18
2.3.3.a) – Densidade	18
2.3.3.b) - Comportamento Mecânico	19
2.3.3.c) - Molhabilidade	20
2.3.4 - Aplicações.....	21
2.3.4.a) Inovação	22
2.4 – Características da Resina	23

2.5 - Características da Fibra de Vidro.....	27
2.5.1 - Manta de Fibra de Vidro	28
2.5.2 - Tecido de Fibra de Vidro ^[2.13]	28
2.5.2.a) Alguns Tipos de Arquitectura de Tecido Utilizadas	28
2.6 – Definição de Impacto a Baixa Velocidade	30
2.6.1 - Diferenças entre Impacto de alta e baixa velocidade.....	30
2.7 – Dispositivos Experimentais / Ensaios	31
2.7.1 - Ensaios de tracção.....	31
2.7.2 - Ensaio de Flexão	32
2.7.3 Ensaio de Corte	33
2.7.4 - Ensaios de Impacto	34
2.7.4 a) Ensaios de Charpy e Izod	34
2.8 – Início e Propagação de Fractura	35
2.9 – Caracterização do Dano	37
2.9.1 - Quebra das fibras	37
2.9.2 - Deformação e Quebra da Matriz.....	37
2.9.3 - Separação entre fibra/matriz	37
2.9.4 - Arrancamento de fibra	38
2.9.5 - Fendas de delaminagem.....	38
2.10 - Bibliografia	39

Capítulo III: Estado de Arte.....41

3.1 – Aplicações Correntes em Materiais Compósitos de Base Polimérica	41
3.1.1 - Aplicações Estruturais:	41
3.1.1.a) - Indústria Aeronáutica	41
3.1.1.b) Indústria Automóvel.....	44
3.1.1.c) Outras Aplicações Estruturais	44
3.1.2 - Isolantes Eléctricos	45
3.1.3 - Aplicações Ambientais	45
3.1.4 - Aplicações Biomédicas	46

3.2 – Materiais BioCompósitos.....	46
3.2.1 - Aplicações.....	48
3.3 – Estudo de Impacto a Baixa Velocidade	50
3.3.1 Escolha de Materiais	50
3.3.1 a) Caracterização Geral	50
3.3.1 b) Comparação/Caracterização de Materiais.....	51
3.3.1 c) Compreensão de dano em fibra de vidro	52
3.3.1 d) Comparação de resina epoxida com outras resinas:.....	53
3.3.2 - Parâmetros de Fabrico.....	53
3.3.2 a) Efeito da fracção de fibra/resina.....	53
3.3.2 b) Efeito da Sequência de Empilhamento e Arquitectura do tecido.	55
3.3.2 c) Influência da Espessura	57
3.4 - Caracterização de dano de impacto a baixa-velocidade	59
3.5 - Técnicas Empregues	62
3.5.1 - Interlayer Toughening – Método em Estudo	62
3.5.2 - Uso de camadas amortecedoras	66
3.5.3 Outros Métodos em Desenvolvimento em compósitos laminados	67
3.5.3 a) Stitching – Redução de Delaminagem	67
3.5.3 b) Z – Pinning.....	69
3.5.3 c) – Aumento da Tenacidade da Matriz.....	71
3.5.3.d) Introdução de Nanopartículas.....	72
3.5.3 e) Hibridização	74
3.6 - Compreensão de Impacto a Baixa Velocidade Através de Métodos Numéricos	77
3.7 - Modificação Superficial de Fibras Celulósicas	78
3.8 - Bibliografia	79

Capítulo IV : Métodos Experimentais.....83

4.1 – Construção dos Laminados.....	83
4.1.1 - Preparação das folhas de Cortiça	84
4.1.2 - Preparação dos moldes.....	86
4.1.3 - Preparação da Resina	86
4.1.4 - Processo de Moldação Manual dos Laminados	87
4.2 - Preparação dos Provetes	91
4.3 - Métodos de Caracterização de Propriedades dos Materiais Utilizados:	93
4.3.1 - Ensaio de flexão	93
4.3.2 - Ensaio de Corte Interlaminar	93
4.3.3 - Ensaio de tracção	94
4.3.4 - Ensaio de Impacto Charpy.....	95
4.4 - Preparação de Novos Laminados:.....	97
4.5 - Tratamento Químico das Folhas de Cortiça	100
4.6 – Observação ao Microscópio das folhas de cortiça	101

Capítulo V: Resultados Obtidos.....103

5.1 – Ensaio de Flexão.....	103
5.2 - Ensaio de Corte	111
5.3 - Ensaio Charpy	119
5.4 - Teores Fibra/Resina.....	123
5.5 – Comparação Estrutural da Cortiça e Área de Delaminação	127

Capítulo VI : Discussão de Resultados.....135

6.1 – Introdução	135
6.2 – Variação da razão de fibra/resina.....	136
6.3 – Variação de Espessura das Placas Laminadas	137
6.4 – Variação da Espessura das Folhas de Cortiça	138
6.5 – Tratamento Superficial das Folhas de Cortiça	140
6.6 – Comparação Estrutural da Cortiça e Área de Delaminação	144

Capítulo VII: Conclusão 147

7.1 - Introdução	147
7.2 – Conclusões Retiradas	147
7.3 - Proposta de Trabalhos Futuros	150
7.4 – Nota	150

Índice de Imagens

Capítulo I : Introdução i

Fig. 1.1. – Formação de um material compósito à base de fibras e resina.....	1
Fig.1.2 – Quantidade de Materiais compósitos utilizados por diversas indústrias nos EUA.....	3
Fig.1.3 – Aplicação de Materiais Compósitos em Várias Indústrias	3

Capítulo II: Fundamentação Teórica 7

Fig.2.1 – Resposta típica para materiais isotrópicos, anisotrópicos ou ortotrópicos sujeitos a tensões axiais	8
Fig.2.2 – Classificação dos materiais compósitos.....	9
Fig. 2.3 – Representação de compósitos reforçados por partículas	10
Fig.2.4 – Representação de compósitos reforçados por fibras contínuas.	11
Fig.2.5 – Representação de uma lâmina unidireccional ou tecida	12
Fig.2.6 - Representação de um laminado	12
Fig.2.7 – Casca da Cortiça	14
Fig.2.8 – Sobreiro descortiçado.....	14
Fig. 2.9 – Representação esquemática da secção radial do sobreiro.....	14
Fig.2.10 – Desenhos de Robert Hooke da Estrutura da Cortiça ^[2.4]	15
Fig.2.11 – Estrutura celular da cortiça	15
Fig.2.12 – Estrutura celular da cortiça	15
Fig.2.13 – Representação esquemática da disposição celular na secção de crescimento	15
Fig.2.14 – Esquema Simplificado da Estrutura Celular da Cortiça ^[2.5]	16
Fig.2.15 – Esquema de uma célula de cortiça com paredes enrugadas ^[2.5]	16
Fig.2.16 – Curva Tensão-Deformação da Cortiça à Compressão	19
Fig.2.17 – Curva de Tensão-Deformação características num ensaio de tracção da cortiça.....	19
Fig.2.19 – Variação do ângulo de contacto ao longo do tempo do sistema poliéter – cortiça	21
Fig.2.20 – Diversas aplicações da cortiça	21

Fig.2.21 – Representação esquemática da evolução do processo de cura a nível molecular	24
Fig.2.22 – Desenvolvimento das propriedades mecânicas de uma resina durante processo de cura.....	24
Fig.2.23 – Comparação das propriedades mecânicas de resinas termoendurecíveis	25
Fig.2.24 – Curvas Deformação – Tensão de várias resinas termoendurecíveis	27
Fig.2.25 – Plain Weaving.....	28
Fig.2.26 – Twill Weaving	28
Fig.2.27 – Satin Weaving.....	29
Fig.2.28 – Basket Weaving	29
Fig.2.29 - Provetes utilizados em ensaios de tracção.....	31
Fig 2.30 a) – Ensaio de Flexão a 3 pontos	32
Fig 2.30 b) – Ensaio de Flexão a 4 pontos	32
Fig.2.31 – Esquema de um ensaio de corte de viga curta – flexão a 3 pontos.....	33
Fig.2.32 – Esquema de Ensaio Charpy	34
Fig 2.33 – Esquema de Ensaio Izod	32
Fig.2.34 – Curvas típicas Carga-Tempo e Energia-Tempo obtidas em ensaios de impacto.....	35
Fig.2.35 – Esquema de efeitos locais num material compósito fibroso devido a propagação de fenda	37
Fig.2.36 – Representação dos diferentes modos de cedência	38

Capítulo III: Estado de Arte.....41

Fig.3.1 – Introdução progressiva de materiais compósitos na indústria aeronáutica comercial.....	42
Fig.3.2 – Utilização de Materiais Compósitos no A380 a) Componentes que utilizam fibra de carbono e outros compósitos b) Distribuição percentual mássica dos constituintes do A380	43
Fig.3.3 – Fibras Naturais Utilizadas no Fabrico de Materiais Compósitos	46
Fig.3.4 – Utilização de Fibras Naturais em Compósitos, na indústria automóvel alemã, em toneladas (1996-2003).....	48

Fig.3.5 - a) Paineis do chão de Mercedes Classe A, utilizando fibras de banana como reforço.	49
b) Diversos componentes usados no Mercedes Classe S, utilizando biofibras como elemento de reforço.....	49
Fig.3.6 – Comparação de propriedades de impacto de diversos materiais, possuindo cerca de 60% de volume de fibra.....	51
Fig.3.7 – Graficos Força-Tempo, Força-Deslocamento e Energia-Deslocamento para ensaios realizados nos materiais:	
a) SMC1.....	52
b) SMC2.....	52
c) GMT.....	52
Fig.3.8 – Tensão máxima de corte interlaminar versus fracção volúmica de fibra	54
Fig.3.9 – Quantidade de energia absorvida vs fracção volúmica de fibra	54
Fig.3.10 – Relação entre a velocidade de impacto e dimensões de dano, para diferentes sequências de empilhamento.....	55
Fig.3.11 – Relação entre a velocidade de impacto e dimensões de dano, para diferentes sequências de empilhamento.....	55
Fig.3.12 – Fotografia da área danificada de um provete, após realizado ensaio de impacto. A utilização de forte iluminação em contra-luz facilita a identificação dos modos de dano	56
Fig.3.13 – Representação esquemática do contorno de área danificada utilizando sequencias de empilhamento e energias de impacto distintas	56
Fig.3.14 - Efeito da estrutura de reforço na capacidade de absorção de energia, medido através de ensaios de queda livre de peso.....	57
Fig.3.15 – Força e Energia necessárias para a ocorrência da primeira delaminagem, mediante diversos valores de espessura	57
Fig.3.16 – Força e Energia necessárias para a ocorrência da primeira delaminagem, mediante diversos valores de espessura	57
Fig.3.17– Relação entre energia absorvida/solicitação e deformação para diferentes espessuras.....	58
a) 4 camadas; b) 8 camadas; c) 16 camadas ¹	58
Fig.3.18 – Representação esquemática de modos de dano típicos, resultantes de uma situação de impacto a baixa velocidade em materiais compósitos laminados....	59

Fig.3.19 – Esquema de sequência de fractura a) para elevadas forças de corte interlaminar b) para baixas forças de corte interlaminar	60
Fig.3.20 – Representação esquemática de diferentes modos de dano ^I	60
Fig.3.21– Esquema da disposição de camadas interlaminares.....	62
Fig.3.22 – Secção de material compósito não reforçado e reforçado com camadas interlaminares.....	63
Fig.3.23 – Area danificada em material não reforçado e com diferentes tipos de reforço interlaminar	63
Fig.3.24 – Compressão após impacto de um material não reforçado, ou utilizando diferentes tipos de reforço interlaminar	64
Fig.3.25 – Micrografia da secção de um material compósito laminado, reforçado interlaminarmente por partículas	64
Fig.3.26 - Relação CAI com o numero de partículas, numa camada interlaminar de 1,90 mm ^[3.30]	65
Fig.3.27 - Relação CAI com separação de aglomerado de partículas , numa camada interlaminar de 1,90 mm.....	65
Fig.3.28 - Relação CAI com separação de diâmetro de partículas interlaminares, numa camada interlaminar de 1,90 mm.....	66
Fig.3.29 – Expansão de dano em laminado sem pontos	68
Fig.3.30 – Expansão de dano em laminado com pontos	68
Fig.3.31 – Stitching realizado por máquina	69
Fig.3.32 – Stitching manual	69
Fig.3.33 – Laminado Sem Stitching.....	69
Fig.3.34 – Força Residual de Compressão versus energia de impacto	69
Fig.3.35 – Quantidade de Energia Absorvida versus Energia de Impacto.....	70
Fig.3.36 – Área Danificada versus Energia de Impacto.....	70
Fig.3.37 – Vista lateral da zona de cedência num ensaio de compressão após impacto, em provetes de 6 mm de espessura a) provete sem pinos b) provete com pinos.....	70
Fig.3.38 – Aumento da resistência ao impacto de resina epoxida , misturada com elastómeros diferentes: a) CTBN ; b) HTPB	71
Fig.3.39 – Energia de Iniciação de fenda para duas espumas sintéticas sujeitas a impactos a 2 m/s , contendo diferentes percentagens de nanopartículas	73

Fig.3.40 – Carga máxima de impacto sustida por diversas espumas sintéticas, possuindo uma fracção volúmica de 60% de microbalões, para diferentes percentagens de nanopartículas.....	73
Fig.3.41 – Representação esquemática de diferentes configurações de materiais híbridos	74
Fig.3.42 – Energia absorvida em ensaios de impacto por materiais compósitos constituídos por a) apenas fibras de vidro (GF), b) Híbridos de GF-PP, c) híbridos de GF-PA e d) híbridos de GF-mPET	75
Fig. 3.43 - Diâmetro de dano nos diferentes materiais compósitos sujeitos a ensaios de impacto	76

Capítulo 4: Métodos Experimentais 83

Fig.4.1 – Processo de Limpeza das folhas de Cortiça.....	85
Fig.4.2 – Processo de Limpeza das folhas de Cortiça.....	85
Fig.4.3 – Folha de Cortiça antes de irem para a câmara de vácuo	86
Fig.4.4 – Preparação de laminados com cortiça.....	87
Fig.4.5 – Preparação de laminados com cortiça.....	87
Fig.4.6 – Preparação de laminados com cortiça.....	87
Fig.4.7 – Preparação de Laminados com Cortiça	88
Fig. 4.8 – Preparação de Laminados com Cortiça	88
Fig. 4.9 – Preparação de Laminados Com Cortiça.....	88
Fig. 4.10 – Preparação de Laminados Com Cortiça.....	88
Fig. 4.11 – Preparação de Laminados Com Cortiça.....	88
Fig. 4.12 – Preparação de Laminados Com Cortiça.....	88
Fig.4.13 – Aspecto final de um laminado de fibra de vidro e cortiça	89
Fig.4.14 – Aspecto final de um laminado de fibra de vidro e cortiça	89
Fig.4.15 – Folhas de cortiça unidas com haraldite.....	90
Fig.4.16 – Folhas de cortiça unidas com haraldite.....	90
Fig.4.17 – Preparação de Laminados com cortiça	91
Fig.4.18 – Preparação de Laminados com cortiça	91
Fig.4.19 – Conclusão do processo de moldação manual de um laminado.....	91
Fig.4.20 – Provetes de Tracção	92
Fig.4.21 – Provetes de Flexão	92

Fig.4.22 – Provetes para Ensaio de Impacto (Charpy).....	92
Fig.4.23 – Ensaio de Flexão	93
Fig.4.24 – Ensaio de Corte Interlaminar	94
Fig.4.25 – Ensaio de Tracção	94
Fig.4.26 – Máquina de Ensaio Charpy (INEGI).....	95
Fig.4.27 – Máquina de Ensaio Charpy (Universidade do Minho).....	95
Fig.4.28– Folhas de cortiça fina coladas com araldite	99
Fig.4.29 – Folhas de cortiça fina coladas com araldite	99
Fig.4.30 – Processo de moldação manual	99
Fig.4.31 – Processo de moldação manual	99

Capítulo 5: Resultados Obtidos.....103

Fig.5.1 – Curva Extensão vs Tensão (0M).....	103
Fig.5.2 – Curva Extensão Vs Tensão (45M).....	104
Fig.5.3 – Curva Extensão Vs Tensão (0C).....	105
Fig.5.4 – Curva Extensão Vs Tensão (0C+)	106
Fig.5.5 – Curva Extensão Vs Tensão 045(C).....	107
Fig.5.6 – Curva Extensão Vs Tensão 45(CF)	108
Fig.5.7 – Curva Extensão Vs Tensão 45(CFT).....	109
Fig.5.8 – Curva Extensão Vs Tensão 45 (CT)	110
Fig.5.9 – Curva Corte Tensão Vs Extensão (0M).....	111
Fig.5.10 – Curva Corte Tensão Vs Extensão (45M).....	112
Fig.5.11 – Curva Corte Tensão Vs Extensão (0C).....	113
Fig.5.12 – Curva Corte Tensão Vs Extensão (0C+).....	114
Fig.5.13 – Curva Corte Tensão Vs Extensão (45C).....	115
Fig.5.14 – Curva Corte Tensão Vs Extensão (45CF).....	116
Fig.5.15 – Curva Corte Tensão Vs Extensão (45CFT)	117
Fig.5.16 – Curva Corte Tensão Vs Extensão (45CT)	118
Fig.5.17 – Microestrutura da cortiça, espessura de 0,5 mm, sem tratamento	126
Fig.5.18 – Microestrutura da cortiça, espessura de 0,5 mm, com tratamento.....	126
Fig.5.19 – Microestrutura da cortiça, espessura de 0,2 mm, sem tratamento	127
Fig.5.20 – Microestrutura da cortiça, espessura de 0,2 mm, com tratamento.....	127

Fig.5.21 – Análise dos constituintes da cortiça, espessura de 0,5 mm, com tratamento	128
Fig.5.22 – Análise dos constituintes da cortiça, espessura de 0,2 mm, com tratamento	128
Fig.5.23 – Área de rotura de um provete 45C.....	129
Fig.5.24 – Área de rotura de um provete 45CT	129
Fig.5.25 – Área de rotura de um provete 45CF.....	130
Fig.5.26 – Área de rotura de um provete 45CFT	130

Capítulo 6 : Discussão de Resultados 135

Fig.6.1 – Resultados Obtidos em Ensaio de Impacto Charpy	135
Fig.6.2 – Comparação das propriedades de flexão de provetes com diferente razão de fibra/resina	136
Fig.6.3 – Comparação dos resultados obtidos em ensaios Charpy, em provetes com diferente razão de fibra/resina.....	137
Fig.6.4 – Ensaio de Flexão em provete 45CF	139
Fig. 6.5 – Pormenor de delaminagem em 45CF	139
Fig.6.6 – Curva Extensão vs Tensão do ensaio de flexão de 45CF	139
Fig.6.7 – Ensaio de Flexão em Provete 45CFT	140
Fig.6.8 – Pormenor de delaminagem em 45CFT.....	140
Fig.6.9 – Ensaio de Flexão em Provete 45CFT	140
Fig.6.10 – Pormenor de delaminagem em 45CFT.....	140
Fig.6.11 – Comparação entre curvas de tensão-deformação de 45CF e 45CFT..	141
Fig.6.12 – Ensaio de Flexão em Provete 45CT	141
Fig.6.13 – Pormenor de corte interlaminar em 45CT	141
Fig.6.14 – Comparação entre curvas de tensão-deformação de 45C e 45CT (flexão).....	142
Fig.6.15 – Comparação entre curvas de tensão-deformação de 45CF e 45CFT (corte).....	142
Fig.6.16 – Comparação entre curvas de tensão-deformação de 45C e 45CT (corte)	142
Fig.6.17 – Comparação dos Resultados de Ensaio de Impacto Charpy entre vários provetes	142

Índice de Tabelas

Capítulo 2: Fundamentação Teórica 7

Tab.2.1 - Dimensões das células de Primavera e de Outono em células de cortiça amadia cozida 16

Tab.2.2 - Composição média de cortiça, retirada a partir da avaliação de 10 árvores da região de Mora..... 17

Tab.2.3 – Temperaturas Operacionais máximas para vários tipos de resinas..... 26

Tab.2.4 – Temperaturas Operacionais máximas para vários tipos de resinas..... 26

Capítulo 3: Estado de Arte 41

Tab.3.1 – Crescente uso de materiais compósitos na industria automóvel (em milhares de toneladas) **Error! Bookmark not defined.**

Tab.3.2 – Matrices poliméricas biodegradáveis..... 47

Tab.3.3 – Características dos Materiais utilizados nos estudos de Dear e Brown 52

Tab.3.4 – Flexibilidade, dimensões e sequência de empilhamento dos provetes testados e respectivos resultados. DTL corresponde a delamination threshold loads **Error! Bookmark not defined.**

Tab.3.5 – Materiais utilizados nas camadas interlaminares no estudo de Duarte, Herszberg, et al 63

Tab.3.6 – Resultados de ensaios de tracção de um material laminado, com ou sem stitching..... 67

Tab.3.7 - Resultados de ensaios de impacto em compósitos com e sem pontos.... 68

Tab.3.8 - Valores de resistência à fractura e energia de fractura a impactos de baixa velocidade, em resinas epoxidas com e sem elastómeros 71

Tab.3.9 – Configuração dos provetes utilizados 76

Tab.3.10 – Valores de dano nos provetes, resultantes dos ensaios de impacto 76

Capítulo 4: Métodos Experimentais 83

Tab.4.1 – Constituintes das placas de material compósito.....	83
Tab.4.2 – Configuração das placas iniciais.....	84
Tab.4.3 – Dimensões das folhas de cortiça.....	84
Tab.4.4 – Constituintes das placas de material compósito.....	97
Tab.4.5 – Configuração das novas placas.....	97
Tab.4.6-Espessura das folhas de cortiça obtida através de medição em 3 pontos .	98
Tab.4.7- Espessura das folhas de cortiça obtida através de medição em 3 pontos	98
Tab.4.8-Espessura das folhas de cortiça obtida através de medição em 3 pontos .	98

Capítulo 5 : Resultados Obtidos.....103

Tab.5.1 – Dimensões dos provetes de flexão (0M).....	103
Tab.5.2 – Propriedades de flexão dos provetes (0M).....	103
Tab.5.3 – Dimensões dos provetes de flexão (45M).....	104
Tab.5.4 – Propriedades de flexão dos provetes (45M) Error! Bookmark not defined.	
Tab.5.5 – Dimensões dos provetes de flexão (0C). Error! Bookmark not defined.	
Tab.5.6 – Propriedades de flexão dos provetes (0C) Error! Bookmark not defined.	
Tab.5.7 – Dimensões dos provetes de flexão (0C2).....	106
Tab.5.8 – Propriedades de flexão dos provetes (0C2)	106
Tab.5.9 – Dimensões dos provetes de flexão (045C).....	107
Tab.5.10 – Propriedades de flexão dos provetes (045C)	107
Tab.5.11 – Dimensões dos provetes de flexão (45CF)	108
Tab.5.12 – Propriedades de flexão dos provetes (45CF)	108
Tab.5.13 – Dimensões dos provetes de flexão (45CFT).....	109
Tab.5.14 – Propriedades de flexão dos provetes (45CFT).....	109
Tab.5.15 – Dimensões dos provetes de flexão (45CT)	110
Tab.5.16 – Propriedades de flexão dos provetes (45CT).....	110
Tab.5.17 – Dimensões dos provetes de corte (0M).....	111

Tab.5.18 – Propriedades de corte dos provetes (0M).....	111
Tab.5.19 – Dimensões dos provetes de corte (45M).....	112
Tab.5.20 – Propriedades de corte dos provetes (45M).....	112
Tab.5.21 – Dimensões dos provetes de corte (0C).....	113
Tab.5.22 – Propriedades de corte dos provetes (0C)	113
Tab.5.23 – Dimensões dos provetes de corte (0C2).....	114
Tab.5.24 – Propriedades de corte dos provetes (0C2)	114
Tab.5.25 – Dimensões dos provetes de corte (45C).....	115
Tab.5.26 – Propriedades de corte dos provetes (45C)	115
Tab.5.27 – Dimensões dos provetes de corte (45CF)	116
Tab.5.28 – Propriedades de corte dos provetes (45CF)	116
Tab.5.29 – Dimensões dos provetes de corte (45CFT).....	117
Tab.5.30 – Propriedades de corte dos provetes (45CFT).....	117
Tab.5.31 – Dimensões dos provetes de corte (45CT)	118
Tab.5.32 – Propriedades de corte dos provetes (45CT).....	118
Tab.5.33 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy 0M	Error! Bookmark not defined.
Tab.5.34 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy 45M.....	119
Tab.5.35 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy 0C.....	120
Tab.5.36 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy 45C.....	120
Tab.5.37 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy 0C2.....	121
Tab.5.38 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy45CF.....	121
Tab.5.39 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy45CT	122
Tab.5.40 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy45CT	122
Tab.5.41 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 0M.....	123
Tab.5.42 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 45M.....	123
Tab.5.43 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 0C	124
Tab.5.44 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 45C	124
Tab.5.45 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 0C+	125
Tab.5.46 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 45CT	124
Tab.5.47 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 45CF	124
Tab.5.48 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 45CFT.....	125

Simbologia		
γ	tensão superficial	[MPa]
(γ_{L-ar})	tensão superficial relativa líquida-ar	[MPa]
(γ_{S-ar})	tensão superficial relativa sólido-ar	[MPa]
(γ_{S-L})	tensão superficial relativa sólido-líquido	[MPa]
θ	Ângulo de contato	[°]
P_{max}	Solicição máxima aplicada, até ocorrer a cedência	[N]
L	Comprimento	[m]
b	Largura	[m]
h	Espessura	[m]
F^{abs}	Força de ligação interlaminar	[MPa]
σ_f	Tensão longitudinal das fibras exteriores	[MPa]
v_f	Fracção volúmica de fibra	-
E_f	Modulo de Elasticidade da Fibra	[GPa]
P_h	Propriedade de um híbrido que se pretende estimar	-
P_1, P_2	Propriedades de constituintes de um híbrido	-
V_1, V_2	Fracções volúmicas dos constituintes de um híbrido	-
σ	Tensão	[MPa]
ε	Extensão	[%]
U	Energia Absorvida pelo provete	[J]
k_0	Perda de Energia por atrito	[J]
k	Energia Total Absorvida no Ensaio Charpy	[J]

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Introdução

Hoje em dia, devido à crescente competitividade a nível de inovação tecnológica, torna-se importante desenvolver novos materiais que consigam conjugar baixa densidade com boas propriedades específicas e bom desempenho em aplicações de elevada exigência a custos inferiores.

De forma a satisfazer essa crescente procura e exigência, os materiais tradicionais nas aplicações de engenharia, como o aço, o alumínio, etc..., têm vindo a ser recentemente substituídos por materiais compósitos de matriz polimérica.

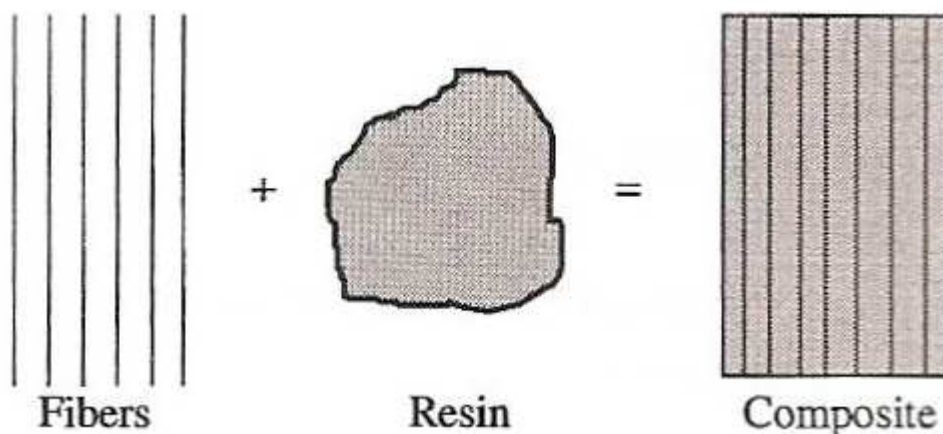


Fig. 1.1. – Formação de um material compósito à base de fibras e resina

Um material compósito pode ser definido como sendo um material formado pela combinação de dois ou mais elementos (geralmente fibra e matriz), resultando um material com melhores propriedades do que as dos constituintes base.

1.2 - Justificação do Estudo de Impacto a baixa velocidade^[1.1;1.2;1.3]

Uma característica bastante relevante que tem vindo a projectar o uso de materiais compósitos em grande escala, a nível mundial, é a sua elevada capacidade de absorção de energia e resistência ao dano mediante casos de impacto. Esta característica aliada à resistência à fadiga e elevada resistência à corrosão, faz com que os materiais compósitos sejam considerados como excelentes materiais para revestimentos que possam ser utilizados nos mais variados ambientes.

Os materiais compósitos estão sujeitos a impacto de baixa velocidade provenientes de várias origens, consoante a aplicação em que estão a ser utilizados. Projecção de pedras, embate contra destroços, ou a simples queda de uma ferramenta de uma superfície, pode constituir uma situação de impacto a baixa velocidade.

Todo o tipo de dano provocado por impacto num material compósito conduz à diminuição da capacidade de carga do material, pela alteração da distribuição interna dos esforços e pela introdução de defeitos no material, que podem provocar rotura por efeito da alteração do campo de tensões

O impacto a baixa velocidade surge como uma das solicitações mais perigosa, a nível dos efeitos que tem nos materiais compósito. Por um lado, pode ser responsável por uma área danificada de vasta extensão, onde se podem verificar os mais variados tipos de efeitos, como delaminação, aparecimento de fendas ou quebra de fibras nas zonas circundantes ao impacto. Por outro, os danos devido ao impacto a baixa velocidade nem sempre são visíveis a olho nú. Por vezes, um caso de impacto pode levar a danos internos (delaminação), sem a formação de qualquer dano superficial (indentação ou fissuras), sendo apenas visíveis se os materiais utilizados forem transparentes ou translúcidos. Caso contrário, será necessário recorrer a meios mais sofisticados para a detecção de dano.

1.3 – Aplicabilidade

O uso de materiais compósitos surge, nos dias de hoje, nas mais variadas indústrias, desde as interligadas a desportos e lazer (capacetes, protecções, pranchas de surf, etc...), indústria automóvel, aeronáutica e aplicações militares, onde este tipo de materiais tem vindo a ser aplicado inclusivamente no projecto de componentes estruturais.

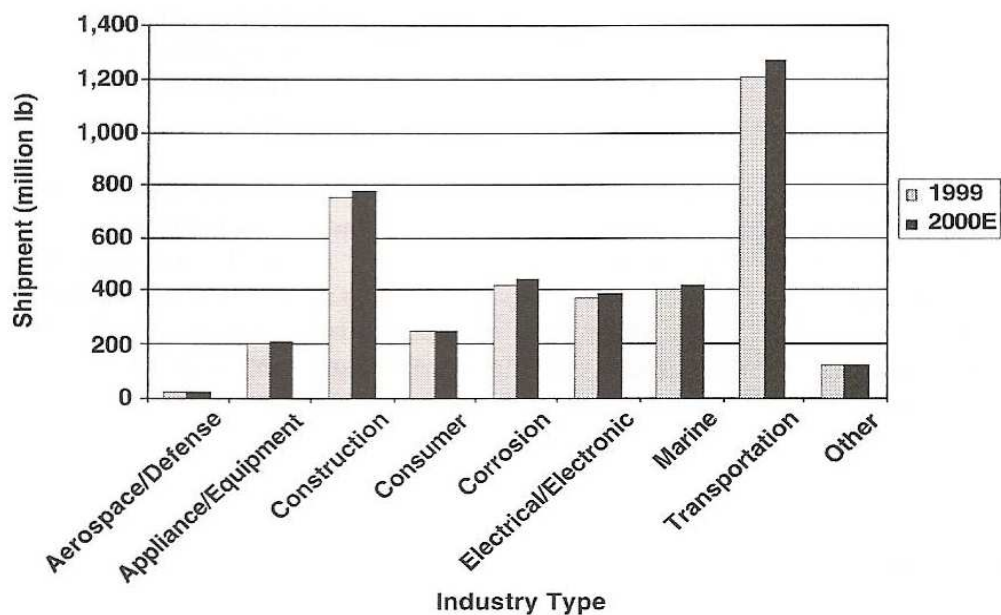


Fig.1.2 – Quantidade de Materiais compósitos utilizados por diversas indústrias nos EUA [14]

Em todas as aplicações referidas a resistência ao impacto surge como uma propriedade fundamental a ter em conta.



Fig.1.3 – Aplicação de Materiais Compósitos em Várias Indústrias

1.4 - Motivos da Utilização de Cortiça^[1.5]

Por outro lado, tem-se vindo a desenvolver, nos últimos anos, uma consciência global em relação aos problemas ambientais e a progressiva escassez de determinados recursos naturais, conduzindo recentemente a uma enorme procura de materiais alternativos aos tradicionais. Deste modo, assistimos, nos dias de hoje, a uma crescente procura de materiais que sejam abundantes e em constante renovação na natureza, que sejam recicláveis e envolvam processos de fabrico pouco poluentes.

Dentro dos requisitos previamente mencionados, a cortiça surge como um material bastante interessante para ser implementada na vasta gama de materiais compósitos existentes. A cortiça é um material 100% natural, com a vantagem da árvore de onde é retirada (sobreiro) ser capaz de regenerar completamente a sua casca após aproximadamente dez anos, sendo deste modo um recurso em constante renovação.

A nível de propriedades, a cortiça surge igualmente como sendo um material bastante interessante, sendo de destacar a sua baixa densidade, boa estabilidade química, bom isolamento térmico/acústico e óptima capacidade de absorção de energia.

Por outro lado, existe outro factor importante a ter em conta relativamente à produção de cortiça em Portugal. Cerca de 33% da área total da floresta de sobreiro encontra-se localizada em território nacional, sendo Portugal responsável por 55% da produção mundial de cortiça. Assim, a possibilidade de aplicação da cortiça não só como matéria-prima bruta, mas também para o fabrico de produtos de valor acrescentado, poderia trazer importantes benefícios a nível económico para o país.

1.5 - Objectivos do Trabalho

O trabalho apresentado nesta tese surge como continuação de um projecto iniciado no ano lectivo de 2007/2008, no âmbito da cadeira de Materiais Compósitos, integrada na área de Construções Mecânicas.

Este trabalho visa o estudo experimental de um novo material compósito, utilizando folhas de cortiça como elemento estrutural, de forma a ser possível compreender a sua influência na absorção de energia e resistência ao dano de um material compósito mediante casos de impacto a baixa velocidade.

Pretende-se, igualmente, encontrar um ponto de equilíbrio entre a melhoria da capacidade de resistência ao dano e a diminuição das propriedades mecânicas do compósito com introdução de folhas de cortiça, variando parâmetros de produção, de forma a ser possível avaliar a viabilidade de empregar este processo na produção de materiais compósitos resistentes a impactos de baixa velocidade.

1.6 – Resumo dos Capítulos

Capítulo 1 – O primeiro capítulo deste trabalho faz uma abordagem sucinta dos temas base em estudo (impacto a baixa velocidade, utilização de materiais compósitos e vantagens de utilização da cortiça), apresentando motivações e objectivos do trabalho em estudo

Capítulo 2 – Neste capítulo é feito um levantamento bibliográfico de conceitos teóricos inerentes a este trabalho.

Capítulo 3 – No terceiro capítulo, é feita uma exposição dos trabalhos que têm vindo a ser desenvolvidos relativamente ao estudo de materiais compósitos sujeitos a impactos de baixa velocidade, tendo como objectivo mostrar o ponto actual de desenvolvimento deste tema, bem como oferecer uma justificação de alguns dos parâmetros predefinidos para o início deste estudo experimental.

Capítulo 4 - No capítulo quatro são descritos os processos experimentais efectuados para a realização do estudo, focando os processos de fabrico das placas laminadas e realização de ensaios necessários para a caracterização do material.

Capítulo 5 – Neste capítulo é feita a exposição de todos os resultados obtidos através dos ensaios efectuados nas placas laminadas.

Capítulo 6 – No capítulo 6 é feita uma análise detalhada dos resultados apresentados no capítulo anterior, sendo apresentadas as conclusões que foram possíveis retirar deste estudo experimental, bem como sugerir trabalhos futuros que abordem o estudo desta temática.

Palavras Chave (Keywords) – Impacto baixa velocidade, cortiça, materiais compósitos, biocompósitos, laminados

Notação/Simbologia

1.7 - Bibliografia

- [1.1] – Moura, M. F. d. S. F. d. (1995). *Modelos de Previsão do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Carbono-Epóxico Sujeitos a Impacto de Baixa Velocidade e da Sua Resistência Residual à Compressão Após Impacto*. Faculdade de Engenharia. Porto, Universidade do Porto.
- [1.2] – LANDOLT, J. H. ; MAGALHÃES, J. H. “Estudo da Tolerância ao Dano de Impacto de Laminados de CFRP”, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, revista SPM, Ciência & Tecnologia dos Materiais, Vol.15, nº3 e 4, 2003
- [1.3] – F.Aymerich, P. P. (2006). "Characterization of fracture modes in stitched and unstitched cross-ply laminates subjected to low-impact and compression after impact loading." *International Journal of Impact Engineering*(35): 591-608.
- [1.4] – Mazumdar, S. K. (2002). *Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering*. PhD.
- [1.5] – <http://www.amorim.com>

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 - Noções Base Sobre Materiais Compósitos^[2.1;2.2]

Tal como já foi referido na introdução, um material compósito pode ser considerado composto por dois materiais ou duas fases materiais distintas. Os constituintes dos materiais compósitos estão geralmente arrançados de forma a que uma ou mais fases descontínuas estejam inseridas numa fase contínua. A fase descontínua é designada de reforço e a fase contínua é denominada de matriz. Geralmente, os materiais de reforço apresentam maior rigidez e tenacidade que a matriz.

As propriedades de um material compósito estão obviamente dependentes dos materiais constituintes, bem como a forma em como se encontram dispostos e respectiva interacção entre eles. Para a compreensão de um material compósito, é necessário ter em conta a fracção volumétrica de cada constituinte, da geometria, distribuição e orientação do material de reforço.

A concentração do material de reforço é geralmente considerada como o parâmetro que mais influencia as propriedades de um material compósito. Além disto, esta é uma variável que pode ser facilmente controlada e alterada, de forma a ser possível obter as propriedades mecânicas desejadas.

É importante ter em conta que materiais tradicionais, como o aço ou alumínio, são materiais isotrópicos e homogêneos, apresentando uniformidade de propriedades mecânicas em todas as suas direcções. O mesmo não acontece com os materiais compósitos, que geralmente não se apresentam como homogêneos nem isotrópicos, sendo na sua generalidade materiais anisotrópicos ou ortotrópicos.



Fig.2.1 – Resposta típica para materiais isotrópicos, anisotrópicos ou ortotrópicos sujeitos a tensões axiais

Para conferir uma certa homogeneidade de propriedades de um material compósito, deve-se ter em atenção a distribuição do material de reforço e garantir que esta seja o mais homogênea possível, caso contrário, as propriedades do material serão bastante distintas entre as áreas em que a concentração de reforço seja superior ou inferior, criando zonas frágeis indesejáveis.

Outra característica interessante a ter em conta é a orientação do material utilizado como reforço. Caso este seja constituído por partículas de dimensões idênticas, ou por fibras curtas, dispostas aleatoriamente, o material compósito pode ser considerado como sendo isotrópico. Podem ser igualmente utilizados como reforço, material fibroso, fortemente orientado, introduzindo alguma anisotropia no material compósito. Por vezes, dependendo do tipo de solicitação esperado, este tipo de anisotropia é vantajoso, e deliberadamente introduzido no material, sendo possível controlar esta característica durante a fase de desenho e fabrico do material compósito.

2.1.1 - Classificação:

A maior parte dos materiais compósito desenvolvidos têm em conta obter melhorias significativas em propriedades como resistência mecânica, rigidez e desempenho a elevadas temperaturas. Geralmente, os materiais compósitos são agrupados relativamente ao mecanismo utilizado para o melhoramento da resistência mecânica.

Deste modo, os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com o seguinte esquema:

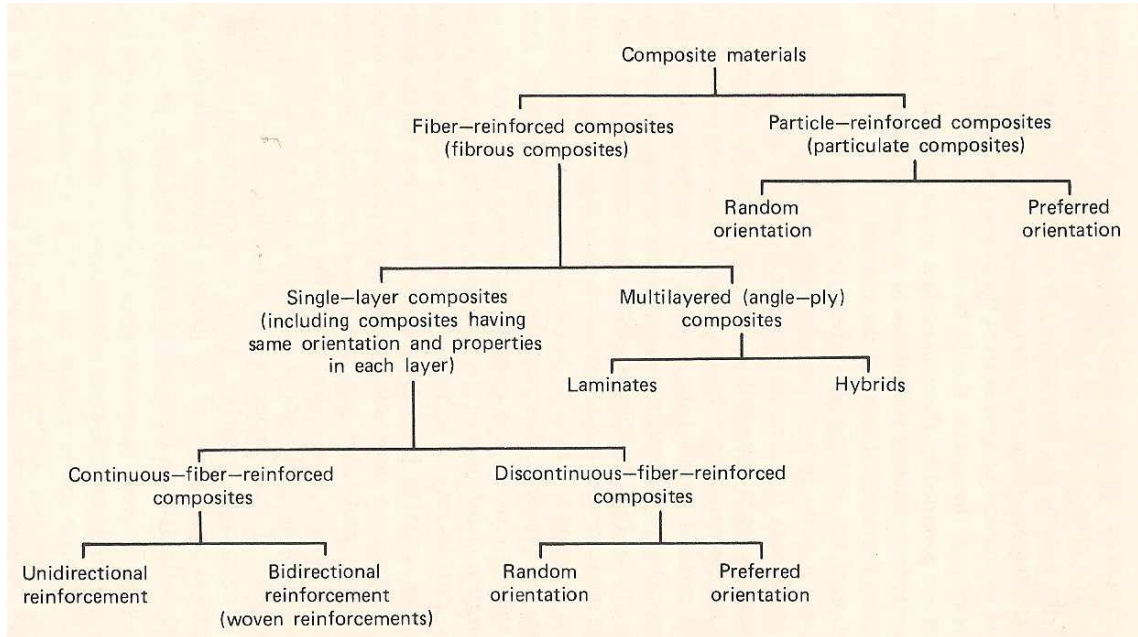


Fig.2.2 - Classificação dos materiais compósitos

Como é possível verificar, dentro da classificação de compósitos, podem ser considerados dois grandes grupos: compósitos reforçados por partículas, ou reforçados por fibras

2.1.1.a) - Compósitos reforçados por partículas

As partículas utilizadas para reforço de um material compósito são geralmente constituídas por um material não fibroso de pequenas dimensões. As partículas não são eficientes no que toca a melhorar a resistência à fractura. No entanto, as partículas promovem alguma resistência à deformação da matriz, devido à sua elevada dureza relativamente à matriz. Por outro lado, partículas elastoméricas em matrizes poliméricas frágeis podem conseguir uma boa melhoria no que toca ao aumento da resistência à fractura. Contribuem também para suportar as cargas aplicadas, apesar de, para esse efeito, a utilização de reforços fibrosos ser bastante mais eficaz.

Dentro do grupo de materiais compósitos reforçados por partículas, podemos agrupá-los em duas categorias distintas:

Reforçadas por flocos: Geralmente compostos por flocos com elevadas relações de área longitudinal – espessura, suspensas numa matriz

Reforçados por “Esqueleto”: Este tipo de compósitos é constituído por um esqueleto matricial, preenchido por um segundo material – por exemplo, uma estrutura ninho de abelha preenchida por material isolante.

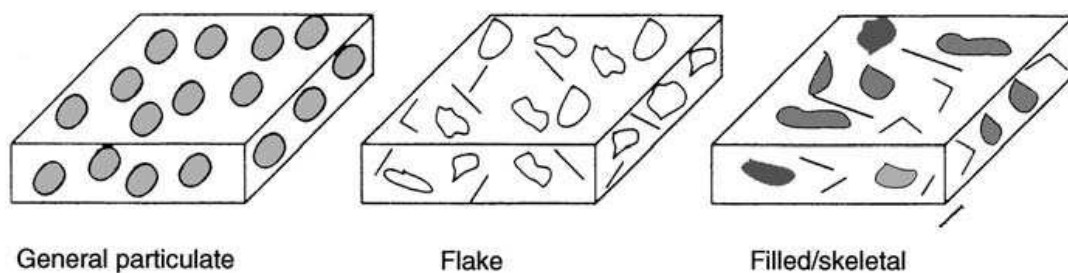


Fig. 2.3 – Representação de compósitos reforçados por partículas

Em suma, a utilização de um reforço por partículas permite obter um bom aumento de rigidez na matriz polimérica. No entanto, estas contribuem muito pouco para o aumento da resistência mecânica, até porque a presença de elementos muito rígidos, no seio de uma matriz frágil, conduz à existência de vários pontos de concentração de tensões.

2.1.1.b) - Compósitos reforçados por fibras

Um material compósito reforçado por fibras é constituído por fibras contínuas ou fibras curtas, suspensas numa matriz. Ambos podem ser divididos do ponto de vista geométrico:

Fibras Curtas: Este tipo de fibras possui relações de comprimento-diâmetro na ordem de $5 < l/d < 1000$, em que os diâmetros rondam valores de 0.02 a 100 μm .

No caso da utilização de fibras curtas, o efeito de transmissão de solicitação por parte da matriz polimérica é bem mais relevante do que no caso da utilização de fibras contínuas. Este tipo de compósitos surge com elevada importância, pois são capazes de suportar solicitações mais elevadas.

Fibras Contínuas: Este tipo de fibras é caracterizado pelo elevado comprimento em relação ao diâmetro. Estas fibras são geralmente mais resistentes e rígidas que material em bruto. O seu diâmetro encontra-se situado entre valores de 3 a 200 μm , dependendo do tipo de fibra. Na utilização de fibras compridas, ocorre transferência de carga para as fibras, de acordo com a sua orientação. Nestes casos, a principal função da matriz não é suportar solicitações, mas sim manter as fibras unidas.

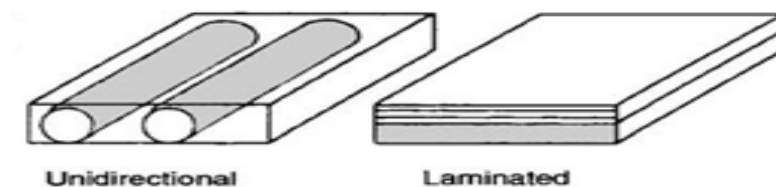


Fig.2.4 – Representação de compósitos reforçados por fibras contínuas.

É comum a utilização de compósitos com reforço de fibras contínuas em camadas unidireccionais. Este tipo de compósitos apresenta uma grande resistência mecânica, no caso da solicitação ser aplicada na direcção da orientação das fibras, mas resistência muito baixa, se a solicitação for perpendicular à orientação das fibras.

De forma a conseguir equilibrar as propriedades mecânicas de um material compósito, de acordo com a direcção da solicitação, pode-se utilizar reforço de fibras contínuas orientadas bidireccionalmente.

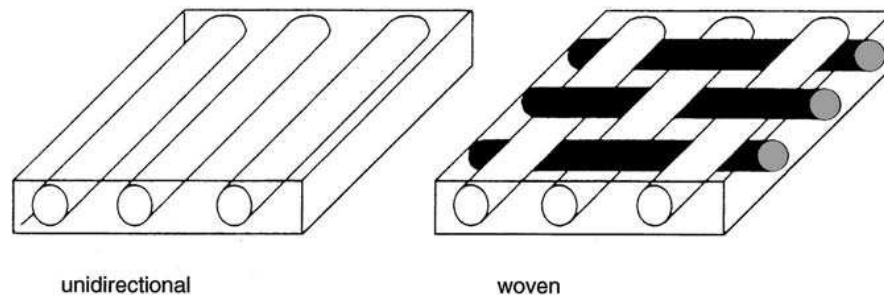


Fig.2.5 – Representação de uma lâmina unidireccional ou tecida

Os compósitos reforçados por fibras contínuas podem ser formados por camadas (laminas) unidireccionais ou multidireccionais. Quando as várias camadas são compostas por materiais idênticos, são denominados por laminados. No caso de existirem camadas formadas por materiais diferentes, são conhecidos como laminados híbridos.

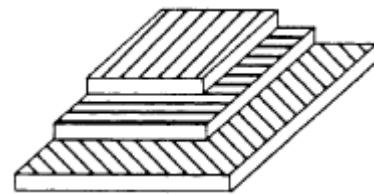


Fig.2.6 - Representação de um laminado

O desempenho mecânico de um material laminado é distinto de uma lâmina isolada. No entanto, o comportamento global do laminado depende das propriedades individuais de cada lâmina que o constitui, bem como da sequência de empilhamento das camadas

Dentro do tipo de fibras utilizados, a fibra de vidro apresenta elevada importância, devido ao seu baixo custo. Porém, fibras de boro, grafite ou aramidas são de utilização bastante interessante, devido à sua elevada rigidez.

Devido às pequenas dimensões das suas secções, é impossível a utilização isolada de fibras para aplicações ligadas a engenharia. Deste modo, elas aparecem geralmente associadas a matrizes poliméricas que servem de ligantes entre as fibras. Por outro lado, a matriz polimérica também é responsável pela transferência das solicitações aplicadas para as fibras, bem como responsável pela sua protecção relativamente a agressões do meio envolvente

As características mais relevantes dos compósitos reforçados com fibras são uma boa relação entre resistência mecânica e peso próprio, bem como a possibilidade de controlar o grau de anisotropia do material.

Relativamente aos metais, este tipo de materiais compósitos apresenta melhores valores de módulo e resistência específica. No entanto, relativamente a rigidez, ou propriedades absolutas, apresentam valores inferiores.

2.2 – Definição de Biocompósitos

Um biocompósito é um material formado por uma matriz (resina natural) e um material de reforço constituído por fibras naturais (geralmente derivadas de plantas ou elementos celulósicos).

Com o crescente aumento do preço do petróleo, bem como as preocupações a nível ambiental e reciclagem, que têm vindo a surgir nos últimos tempos, tem havido uma grande procura e investigação relativamente a este tipo de materiais.

As suas aplicações são as mais variadas, surgindo sob a forma de compósitos biodegradáveis ou podendo ser utilizados em aplicações biomédicas, devido à biocompatibilidade que alguns possuem.

Este tipo de compósitos pode ser caracterizado da seguinte forma:

- Substituição de uma resina petroquímica por uma resina vegetal ou animal
- Substituição do material de reforço (fibra de vidro, fibra de carbono), por fibras naturais (tais como madeira, cortiça, linho, cânhamo, etc)

2.3 – Cortiça: Características e Propriedades

A cortiça é um material celular natural, polimérico, relativamente complexo proveniente das cascas do sobreiro (*Quercus suber*). Este material apresenta uma notável combinação de propriedades físicas e mecânicas, tornando interessante o seu estudo, de forma a ser possível otimizar a sua aplicação.



Fig.2.7 – Casca de Cortiça



Fig.2.8 – Sobreiro descortiçado

Legenda:

- (A) – Cortiça (tecido de suberose)
- (B) – Transição Subero-Felogenica
- (C) – Felogénio
- (D) - Tecido Fibroso
- (E) – Transição Fibras-Madeira
- (F) – Madeira
- (G) – Casca
- (H) – Canais Lenticulares
- (I) – Area para a produção de rolhas
- (J) – Anéis de Crescimento Anual

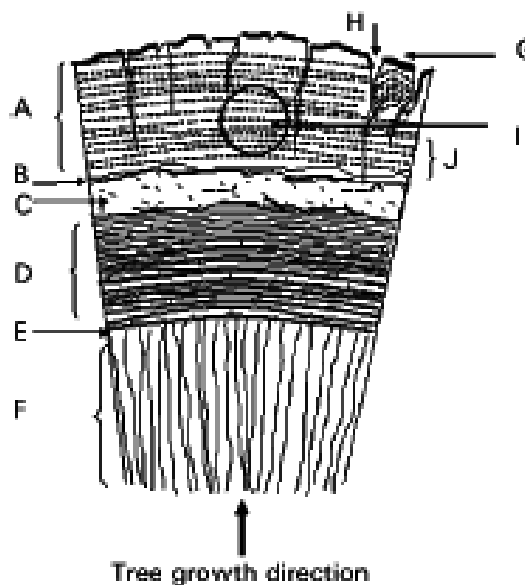


Fig. 2.9 – Representação esquemática da secção radial do sobreiro^[2,3]

2.3.1 - Estrutura

A cortiça foi dos primeiros materiais a ser observados ao microscópio, por Robert Hooke, em 1660. Os desenhos de Hooke mostravam que as células de cortiça aproximavam uma forma aproximadamente hexagonal, e encontravam-se empilhadas em filas de grande extensão, em paredes muito finas, de modo semelhante aos favos existentes em ninhos de abelhas. Com o desenvolvimento da tecnologia foi possível obter imagens da estrutura celular da cortiça, que se mostravam bastante semelhantes aos desenhos iniciais de Hooke.

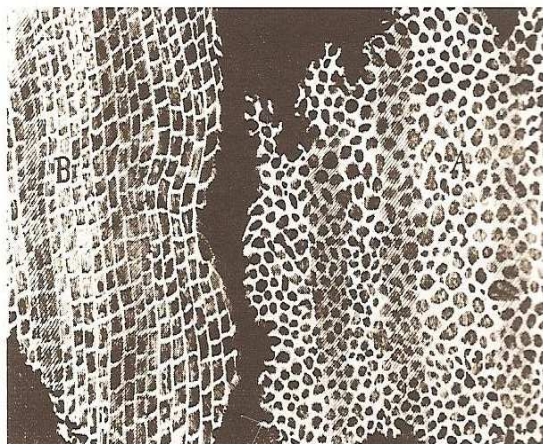


Fig.2.10 – Desenhos de Robert Hooke da Estrutura da Cortiça^[2,4]

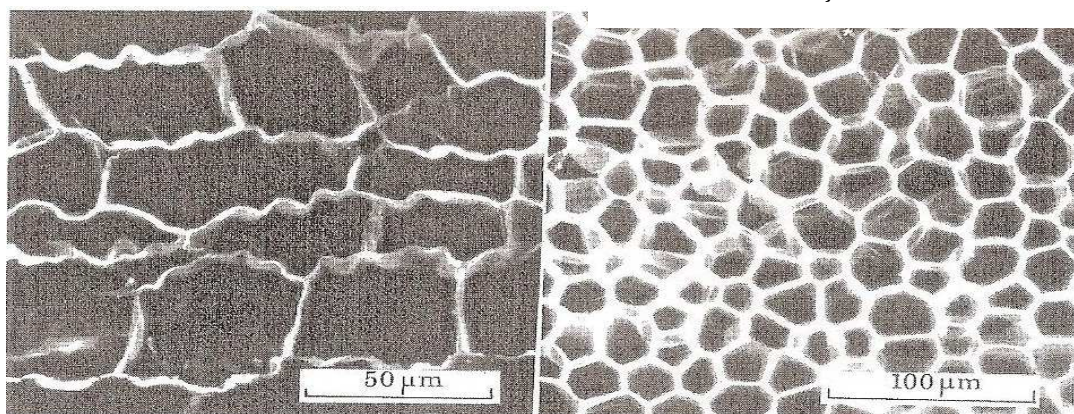


Fig. 2.11 e 2.12 – Estrutura celular da cortiça^[2,4]

Devido ao facto das células das paredes paralelas à direcção radial possuírem uma disposição aleatória considera-se, em primeira análise, que a cortiça é um material transversalmente isotrópico, o que leva a que seja considerado que as orientações perpendiculares ao eixo radial são aproximadamente equivalentes.

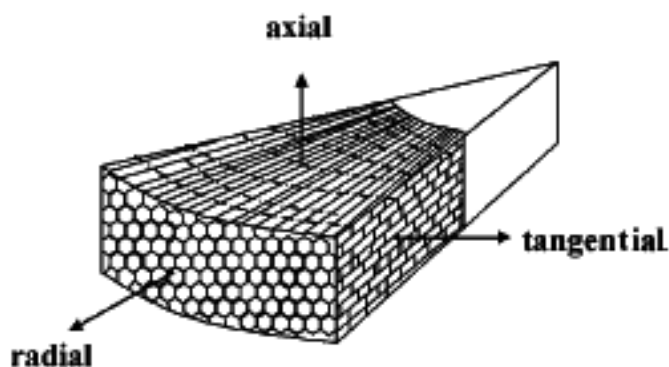


Fig.2.13 – Representação esquemática da disposição celular na secção de crescimento^[2,5].

Na generalidade dos materiais sólidos, estes apresentam-se compactos, com fracções em volume de sólido de 100% ou muito próximos deste valor. Por sua vez, os materiais celulares são constituídos por células ocas, abertas ou fechadas. Nesses materiais, o volume sólido que constitui as células não ultrapassa os 30%, rondando, no caso da cortiça, os 15%, sendo a restante fracção composta por elementos gasosos.

Esta combinação de elementos celulares/elementos gasosos vai conceder à cortiça uma elevada compressibilidade

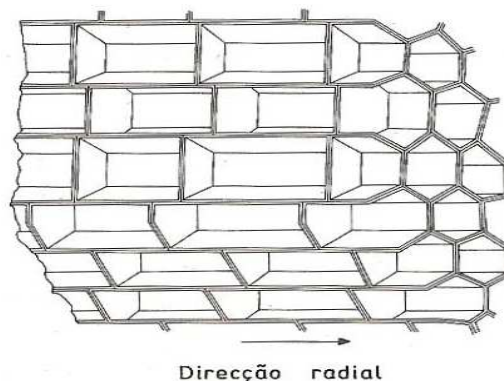


Fig.2.14 – Esquema Simplificado da Estrutura Celular da Cortiça^[2.5]

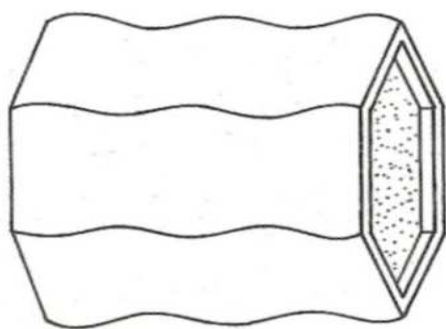


Fig.2.15 – Esquema de uma célula de cortiça com paredes enrugadas^[2.5]

Estudos recentes de Gibson (1981) vieram a mostrar que materiais celulares apresentavam geralmente uma densidade de 1150 kg/m^3 , enquanto a densidade da cortiça rondava os 170 kg/m^3 . Também observou que as células de cortiça deveriam ser consideradas como prismas hexagonais, em que as paredes das células são onduladas e enrugadas.

As dimensões das células de cortiça podem variar bastante, não só de cortiça para cortiça, mas até mesmo na mesma prancha de cortiça. Diferentes períodos de formação da casca de cortiça vão corresponder a diferentes dimensões das células. Células de início de estação vão apresentar-se mais longas radialmente e vão ter paredes mais delgadas. Células de final de estação vão ser mais curtas e têm paredes mais espessas. A maior espessura das paredes, e menor altura, torna as células mais resistentes à flexão, e à encurvadura.

Tab 2.1 - Dimensões das células de Primavera e de Outono em células de cortiça amadia cozida^[2.5]

Tipo de Célula	Altura	Espessura da Parede
Primavera	30-40	1-1,5
Outono	10-15	2-3

2.3.2 - Constituição Química

As propriedades específicas da cortiça resultam, em grande parte, da sua constituição química, que apresenta diferenças relevantes relativamente a outros materiais lenhocelulósicos, nomeadamente a madeira.

Tal como em células de outros tecidos, a constituição das paredes da cortiça também pode ser dividida em dois tipos de componentes: estruturais e não estruturais.

Entre os estruturais contam-se a suberina, lenhina, celulose e hemicelulose. Os não estruturais classificam-se como sendo extractivos ou componentes orgânicos

Tab. 2.2 - Composição média de cortiça, retirada a partir da avaliação de 10 árvores da região de Mora^[2.5]

Componentes	% em peso	
	Cortiça Virgem	Cortiça Amadia
Cinzas	0,9	1,2
Extractivos	16,9	14,2
Suberina	35,2	39,4
Lenhina	22,4	24,0
Polissacáridos	21,3	19,9

A suberina é o principal composto da parede celular da cortiça. É um biopolímero de carácter lipídico, do tipo poliéster, que confere a baixa permeabilidade da cortiça, encontrando-se geralmente associado a lenhina. Esta baixa permeabilidade faz com que as células da cortiça se tornem herméticas, ou seja, leva à retenção dos gases existentes no interior das células. Esta propriedade explica a fraca condutibilidade térmica e eléctrica da cortiça, e as suas boas capacidades como material isolador.

Por sua vez, a lenhina parece desempenhar a função de conferir dureza às paredes celulares da cortiça, evitando danos físicos e tornando-a menos vulnerável à degradação enzimática^[2.6].

Relativamente aos polissacáridos presentes na cortiça (celulose e hemicelulose), não se considera que a sua presença seja relevante nas propriedades das paredes celulares da cortiça^[2.7].

2.3.3 - Propriedades

A cortiça possui propriedades únicas que nenhum outro produto, seja natural ou artificial, conseguiu até hoje igualar ou ultrapassar:

- Baixa densidade
- Boa estabilidade química
- Impermeável a líquidos e gases
- Bom isolante térmico / acústico
- Resistente ao fogo, não liberta gases
- Baixa condutibilidade eléctrica
- Óptima capacidade de absorção de energia
- Grande coeficiente de fricção

2.3.3.a) – Densidade

A densidade da cortiça pode variar dentro uma vasta gama de valores, dependendo principalmente da sua idade (virgem ou reprodução) e de tratamentos a que foi sujeita (sem tratamento ou cozida.). A sua densidade pode variar entre os 120-240 kg/m^3 . Esta grande dispersão de densidades tem sido alvo de debate, uma vez que a densidade de células na parede celular parece ser relativamente constante. Deste modo, aponta-se como factores responsáveis por esta variedade a dimensão das células (altura e espessura), enrugamento das suas pares e fracção volúmica de canais lenticulares

Antes de se proceder ao uso da cortiça, é necessário sujeitá-la a tratamentos. Geralmente, este tratamento passa por efectuar a sua cozedura durante 1 hora a 100°C. Esta cozedura irá levar a uma expansão de 30% do volume inicial, acompanhada pela remoção de componentes solúveis em água presente na cortiça (taninos). Para além desta expansão, verifica-se igualmente uma redução do enrugamento das paredes celulares da cortiça, o que também conduz a uma diminuição de densidade.

Com efeito, este tratamento tem como consequência uma grande redução da densidade da cortiça, verificando-se diminuições de 25% de massa volúmica após cozedura.

2.3.3.b) - Comportamento Mecânico

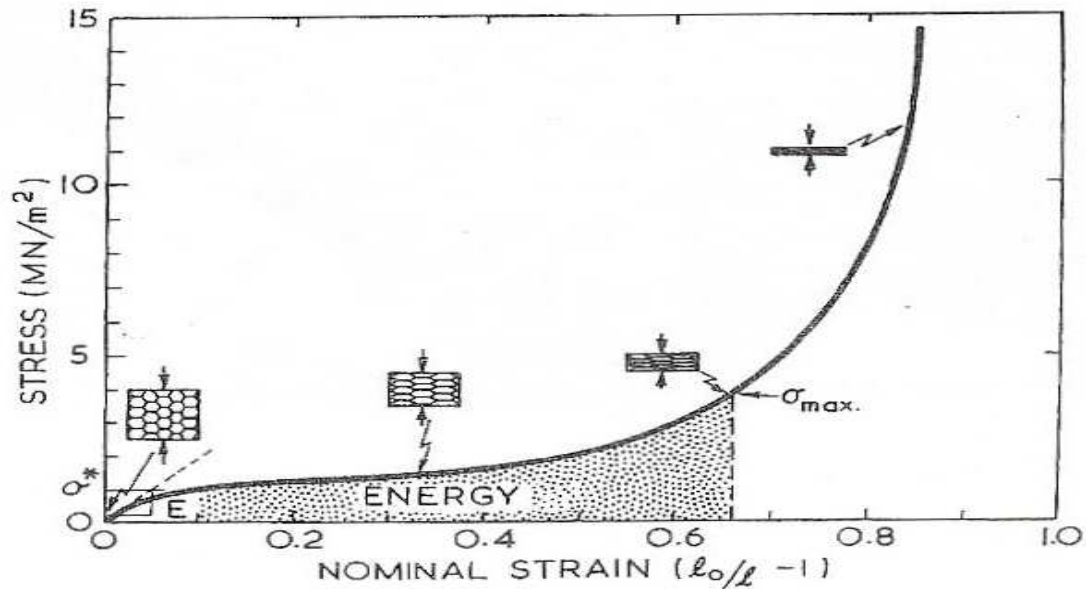


Fig.2.16 – Curva Tensão-Deformação da Cortiça à Compressão^[2.8]

Analisando a curva de tensão-deformação da cortiça à compressão, verifica-se que a cortiça apresenta um comportamento linear elástico, até 7%, seguido de um patamar praticamente horizontal até atingir deformações na ordem de 70%, ocorrendo de seguida o esmagamento das células e uma subida abrupta da curva. É possível observar que este comportamento leva a uma considerável absorção de energia, quando sujeita à compressão, sendo esta uma propriedade bastante interessante para o desenvolvimento deste trabalho.

A cortiça possui diferente comportamento relativamente a compressão e tracção. Foi verificado que o módulo de Young à compressão é bastante menor do que à tracção. Este maior módulo à tracção pode ser explicada devido à rigidez das paredes onduladas, que aumenta a medida de a ondulação diminui. Traccionar a cortiça leva à diminuição de ondulamento, enquanto comprimi-la leva ao seu aumento

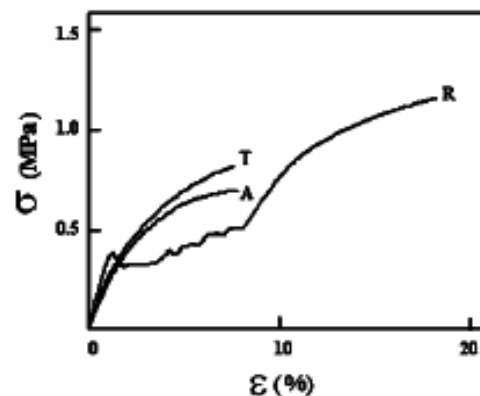


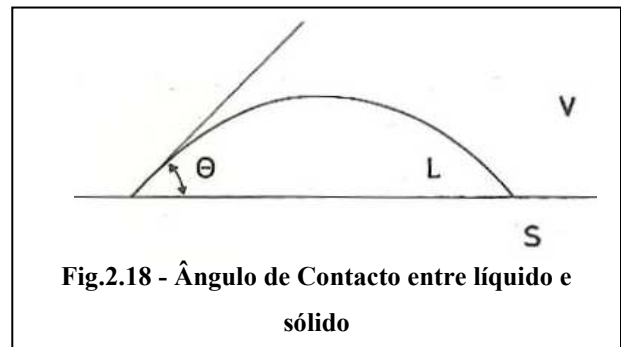
Fig.2.17 – Curva de Tensão-Deformação características num ensaio de tracção da cortiça^[2.3]

2.3.3.c) - Molhabilidade

No fabrico de laminados compósitos, algumas propriedades do material – sobretudo as propriedades mecânicas – vão depender da capacidade de adesão da resina à cortiça, ou seja, da sua molhabilidade.

Para que seja possível uma ligação forte, é necessário que a resina molhe e consiga espalhar-se sobre a superfície da cortiça, o que implica uma baixa viscosidade da resina e que o ângulo de contacto entre cortiça-adesivo seja pequeno.

Quando uma gota de líquido é colocada numa superfície sólida, pode espalhar-se, ou permanecer como uma gota, com um determinado ângulo de contacto θ , com a superfície sólida



O ângulo de contacto é determinado pelos valores de tensões superficiais, γ , relativas a três interfaces em contacto:

- líquido-ar (γ_{L-ar})
- sólido-ar (γ_{S-ar})
- sólido-líquido (γ_{S-L})

Sendo o ângulo de contacto θ determinado a partir da seguinte equação^[2.5]:

$$\gamma_{S-ar} = \gamma_{S-L} + \gamma_{L-ar} \cos \theta$$

Quando um ângulo de contacto é nulo, significa que o líquido espalha-se sobre o sólido. Para valores de $\theta < 90^\circ$, diz-se que o líquido molha o sólido e para $\theta > 90^\circ$ diz-se que o líquido não molha o sólido.

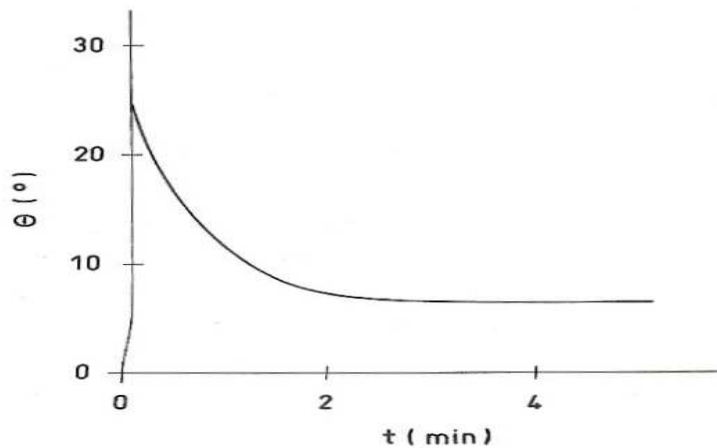


Fig.2.19 – Variação do ângulo de contacto ao longo do tempo do sistema poliéster – cortiça^[2,5]

A cortiça apresenta uma tensão superficial γ_{S-ar} muito baixa, semelhante à dos polímeros, quando comparada com outros materiais, como os materiais metálicos e cerâmicos. Valores baixos de tensão superficial implicam a fraca molhabilidade e elevados ângulos de contacto

2.3.4 - Aplicações

Devido às suas propriedades notáveis, o uso de cortiça estende-se a uma vasta gama de aplicações.

Entre as suas possíveis aplicações destacam-se

- Vedações de garrafas
- Juntas em instrumentos de sopro
- Pavimentos
- Isolamentos
- Quadros de afixação
- Embalagens



Fig.2.20 – Diversas aplicações da cortiça

Relativamente à sua capacidade de absorção de energia, a cortiça tem sido um material bastante utilizado para o fabrico de pavimentos e solas de sapato, devido à sua capacidade de absorver choques, ao andar. Também é um excelente material protector para ser usado em embalagens, uma vez que se comprime mediante casos de impacto, protegendo o conteúdo das embalagens deste tipo de solicitações

2.3.4.a) Inovação

Com a crescente investigação e crescimento da indústria corticeira em Portugal, surge como imperativo o máximo aproveitamento dos produtos e sub-produtos derivados da cortiça.

Produtos excedentários na produção e utilização de cortiça, como as águas de cozimento ou pó de cortiça, são hoje considerados não só como sendo apenas desperdício, mas como matéria prima com propriedades para novas aplicações.

A utilização de pó de cortiça tem vindo a crescer devido a dois motivos em particular:

Capacidade de Absorção: Devido ao seu baixo custo e bom desempenho na absorção de materiais contaminantes, o pó de cortiça tem sido recentemente utilizado para a remoção de metais pesados em águas residuais, sendo um excelente substituto para os materiais utilizados actualmente, que para além de ser caros têm a vantagem de não poder ser reutilizados.

Material de Enchimento: Outra utilização do pó de cortiça passa pela sua introdução como material de enchimento, de forma a melhorar propriedades de um determinado material base

Em algumas aplicações foi utilizado o pó de cortiça de forma a melhorar a resistência térmica e ao fogo, melhorar a estabilidade química e reduzir a permeabilidade de materiais. Também pode ser utilizado para obter melhorias das propriedades mecânicas, como por exemplo, resistência à compressão

Outros avanços da utilização de cortiça encontram-se relacionados com a indústria farmacêutica e a criação de ecocerâmicos.

2.4 – Características da Resina

Os compósitos de matriz polimérica são dos materiais compósitos que apresentam uma maior facilidade de fabrico, independentemente das resinas utilizadas serem termoplásticas ou termoendurecíveis. Isto acontece uma vez que as temperaturas necessárias para o processamento de uma matriz-polimérica são relativamente baixas^[2.9].

Ao ser escolhida a resina, deve-se ter em conta as seguintes características:

- Capacidade de Adesão
- Propriedades mecânica
- Resistência à micro-fissuração
- Resistência à fadiga
- Degradação devido ao contacto com água

Entre resinas termoendurecíveis destacam-se as resinas epoxidicas, fenólicas e de poliéster. A utilização deste tipo de resinas surge como vantajoso a nível de processamento devido aos seguintes pontos:

- Processamento mais fácil, uma vez que a resina encontra-se inicialmente em estado líquido
- Melhor molhabilidade das fibras, reduzindo o nível de porosidade e existência de vazios.
- Requisitos de pressão e temperatura inferiores às termoplásticas, tornando o processamento menos custoso e permitindo poupanças energéticas..
- Fáceis de maquinar

Como desvantagens apresentam:

- Ciclos de cura compridos, levando a menores cadências de produção
- Após curada e solidificada, é impossível a alteração da sua forma
- Dificuldade a nível de reciclagem.

Ao contrário dos termoplásticos, o processamento das resinas termo-endurecíveis necessita que ocorram reacções de cura. Este processo inicia-se com o crescimento e ramificação das cadeias moleculares. Este processo vai levar a um aumento do peso molecular, conduzindo a um aumento de viscosidade da resina. O processo de transformação de líquido viscoso para gel elástico ou borracha é irreversível e é denominado por ponto de gelificação.

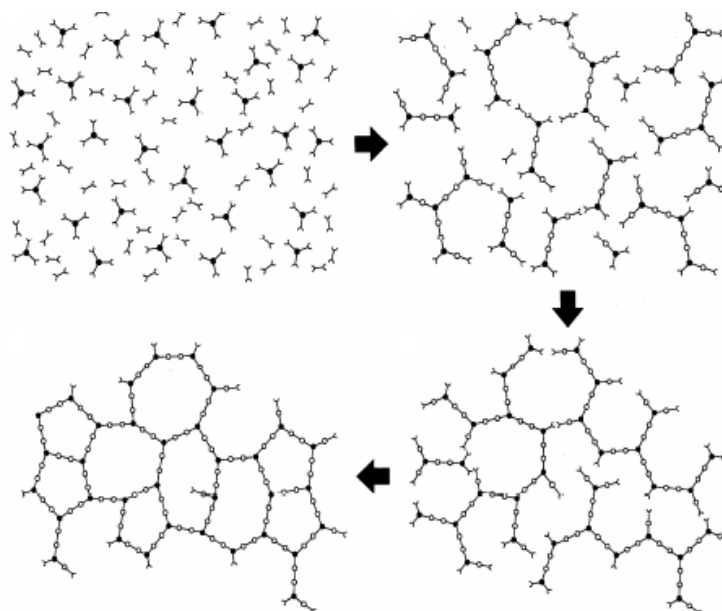


Fig.2.21 – Representação esquemática da evolução do processo de cura a nível molecular^[2.11]

A nível macroscópico, verifica-se, como já foi referido, o aumento progressivo da viscosidade. O ponto de gel coincide com um primeiro equilíbrio a nível de módulo de elasticidade. Há medida que a reacção de cura progride, as propriedades físicas do material (tais como o módulo de elasticidade) vão evoluindo até atingirem as suas características finais.

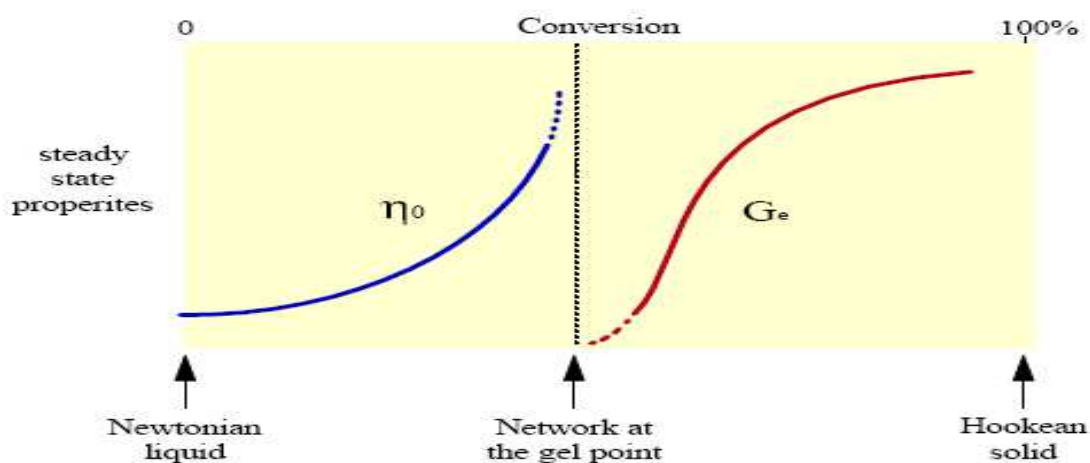


Fig.2.22 – Desenvolvimento das propriedades mecânicas de uma resina durante processo de cura^[2.11]

Existem vários tipos de resinas epoxídicas, que podem ser escolhidas consoante o desempenho e fiabilidade desejada para uma dada aplicação, sendo possível alterar as suas propriedades mecânicas, melhorar resistência a elevadas temperaturas, etc. A sua cura é feita através de reacções químicas, utilizando aminas, anidridos, ácidos carboxílicos, fenóis e alcools. A velocidade de cura pode ser facilmente controlada através da selecção adequada de endurecedores e/ou catalisadores.

A empresa Azom disponibiliza no seu site uma comparação entre vários tipos de resinas termoendurecíveis, demonstrando a influência das condições de cura nas propriedades mecânicas da resina.

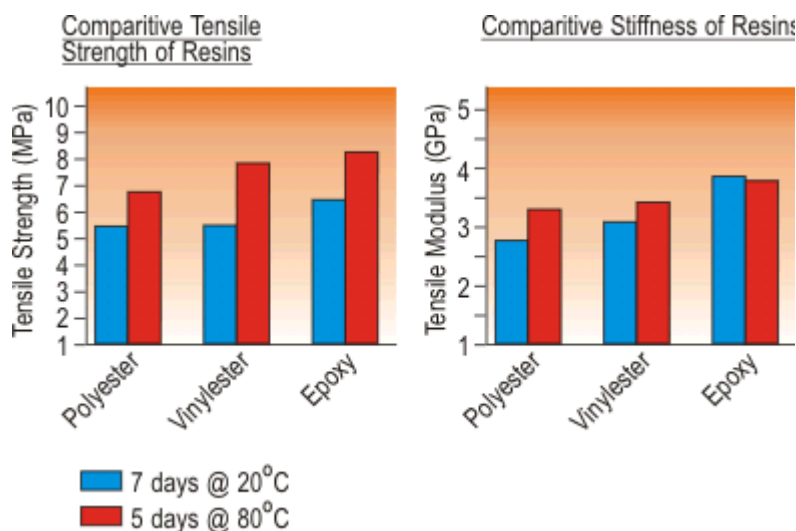


Fig.2.23 – Comparação das propriedades mecânicas de resinas termoendurecíveis^[2,12]

Durante o período de cura geralmente ocorre a diminuição volúmica da resina, devido ao rearrançamento e re-orientação das moléculas, enquanto estão no estado líquido ou de semi-gel. As resinas de poliéster e vinilester chegam a ter diminuição volúmicas na ordem dos 8%. O mesmo não acontece com as resinas epoxídicas, devido à natureza do seu processo de cura, e à quase inexistência de produtos voláteis, o que leva que apenas sofra reduções na ordem dos 2%. Esta baixa redução de volume é em parte responsável pelas melhores propriedades obtidas pelas resinas epoxídicas relativamente a outras resinas termoendurecíveis, uma vez que a variância dimensional das resinas durante o processo de cura está geralmente associada ao aparecimento de tensões internas e perturbações nas interfaces, que podem prejudicar as propriedades mecânicas do compósitos

Os materiais compósitos de matriz de epoxido oferecem bom desempenho a temperaturas ambiente e a temperaturas elevadas. Geralmente as resinas epoxidas podem ser utilizadas a temperaturas entre os 80°C-120°C, havendo resinas que podem mesmo operar a 240°C.

A obtenção de resinas epoxídicas próprias para elevadas temperaturas leva, obviamente, a um aumento de custo de produção. No entanto, este tipo de resinas pode ser vantajoso mediante determinadas aplicações, uma vez que também oferecem melhorias em termos de resistência a ataques químicos e corrosão.

As resinas epoxídicas são mais dispendiosas que as resinas de poliéster e vinilester, não sendo por isso geralmente utilizadas em indústrias em que se procura obter desempenhos razoáveis a baixo custo (como é o caso da indústria automóvel), a não ser que determinadas propriedades sejam exigidas.

Tab.2.3 – Temperaturas Operacionais máximas para vários tipos de resinas

Materials	Maximum Continuous-Use Temperature (°C)
Thermosets	
Vinylester	60–150
Polyester	60–150
Phenolics	70–150
Epoxy	80–215
Cyanate esters	150–250
Bismaleimide	230–320
Thermoplastics	
Polyethylene	50–80
Polypropylene	50–75
Acetal	70–95
Nylon	75–100
Polyester	70–120
PPS	120–220
PEEK	120–250
Teflon	200–260

Este tipo de resinas apresenta alguma fragilidade, tendo vindo a desenvolver-se recentemente métodos para melhorar a sua ductilidade, possibilitando a obtenção de um material com as propriedades térmicas de um termoendurecível, e a ductilidade de um termoplástico. A redução de fragilidade e aumento de ductilidade é obtida através da adição de termoplásticos na resina.

Tab.2.4 - Propriedades Típicas de Resinas Termo-Endurecíveis sem aditivos termoplásticos

Resin Material	Density (g/cm³)	Tensile Modulus GPa (10⁶ psi)	Tensile Strength MPa (10³ psi)
Epoxy	1.2–1.4	2.5–5.0 (0.36–0.72)	50–110 (7.2–16)
Phenolic	1.2–1.4	2.7–4.1 (0.4–0.6)	35–60 (5–9)
Polyester	1.1–1.4	1.6–4.1 (0.23–0.6)	35–95 (5.0–13.8)

Para que a resina consiga transmitir ao material compósito todo o seu potencial, em termos de propriedades mecânicas, é necessário que haja uma boa impregnação das fibras e do material de núcleo.

As resinas epoxídicas apresentam boa capacidade de impregnação, relativamente a outros tipos de resinas. Esta característica deve-se à sua composição e à presença de grupos de éteres e hidroxilos. Uma vez que, tal como anteriormente referido, o processo de cura das resinas epoxídicas é acompanhado por uma baixa variação dimensional, as superfícies de contacto entre a resina líquida e os aderentes não sofrem perturbações. As resinas epoxídicas têm grande relevo na produção de materiais compósitos com núcleo de estrutura do tipo ninho de abelha, uma vez que as superfícies de contacto são muito baixas.

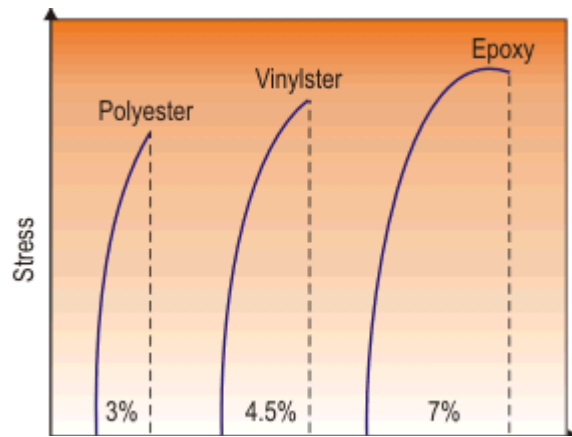


Fig.2.24 – Curvas Deformação – Tensão de várias resinas termoendurecíveis^[2,12]

No entanto, há que ter em conta que a força de adesão não depende unicamente da resina, mas também das fibras ou material a ser impregnado, e respectivos tratamentos superficiais que possa ter.

2.5 - Características da Fibra de Vidro

O único meio de garantir que uma resina polimérica consegue conter boa resistência mecânica e rigidez, passa pela introdução de material de reforço na resina

Um material que oferece possibilidades excepcionais para o reforço de uma matriz polimérica é a fibra de vidro

A Fibra de Vidro surge como material de reforço bastante interessante devido às seguintes características:

- elevada razão resistência/peso
- boa estabilidade dimensional
- boa resistência a calor, baixas temperaturas, humidade e corrosão
- boas propriedades de isolamento eléctrico

. Uma vez que este tipo de fibra pode ser associada com praticamente qualquer resina polimérica, a fibra de vidro revela-se como sendo um material indicado para conferir as propriedades mecânicas necessárias para reforçar uma matriz polimérica

Neste trabalho experimental recorreremos ao uso da fibra de vidro sob a forma de tecido e manta.

2.5.1 - Manta de Fibra de Vidro

Esta configuração é, geralmente, mais utilizada para laminados reforçados por fibra de vidro, visto que é fácil de manusear, é mais barato de produzir do que um tecido de fibra de vidro, e consegue obter níveis de impregnação semelhantes aos de tecidos de fibra de vidro. No caso da manta de fibra de vidro, verifica-se uma disposição aleatória das fibras e de variados comprimentos (em contraste com a forte orientação definida pelas fibras dos tecidos). Este tipo de disposição vai levar a um decréscimo da resistência mecânica, conferindo no entanto, propriedades isotrópicas ao tecido.

2.5.2 - Tecido de Fibra de Vidro^[2.13]

Geralmente utilizados para a criação de laminados mais resistentes, sendo por vezes difíceis de impregnar completamente. As boas propriedades à tracção obtidas por este tipo de configuração devem-se ao entrelaçamento dos vários feixes de fibras que os compõe. No entanto, pode surgir como consequência, uma fraca adesão interlaminar local, sendo recomendado usar tecidos mais grossos e um menor número de camadas para combater este problema.

Um inconveniente das configurações bi-dimensionais dos tecidos é que apresenta fragilidade a nível de espessura, originando geralmente cedência por delaminação. Relativamente ao tamanho das fibras utilizadas, verifica-se que o uso de fibras contínuas produz melhores propriedades mecânicas, resistividade eléctrica, condutividade térmica do que a utilização de fibras curtas.

2.5.2.a) Alguns Tipos de Arquitectura de Tecido Utilizadas

Plain Weaving

Este tipo de tecido é simétrico, possui boa estabilidade e uma porosidade razoável. No entanto é dos tipos de tecido mais difíceis de moldar a superfícies curvas, e devido a uma elevada ondulação das fibras, leva a que as suas propriedades mecânicas sejam inferiores quando comparados a outras configurações de tecido

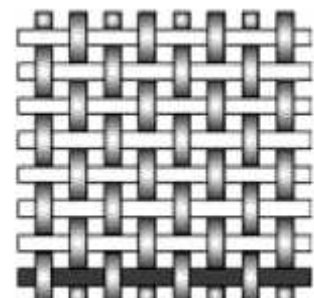


Fig.2.25 – Plain Weaving

Twill Weaving

Este tipo de configuração permite obter uma molhabilidade e capacidade de se moldar a superfícies curvas superior do que a configuração plain weaving, sofrendo apenas uma pequena redução a nível de estabilidade. Devido a uma ondulação inferior das fibras, esta configuração permite obter superfícies mais macias e propriedades mecânicas mais elevadas

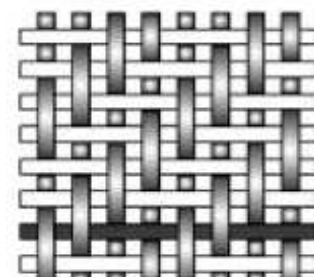
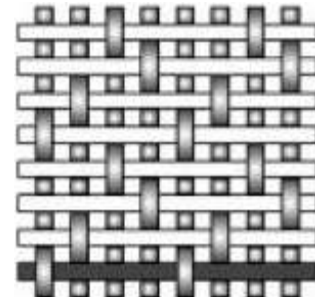


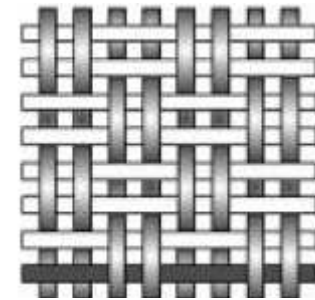
Fig.2.26 – Twill Weaving

Satin Weaving

Esta configuração é idêntica à twill weave, modificada de forma a que ocorram um menor numero de intersecções entre fibras. Este tipo de configuração é muito plano e a baixa ondulação das fibras produz boas propriedades mecânicas. Possui elevada molhabilidade e capacidade de ser moldada a superfícies curvas. Como desvantagens surgem a baixa estabilidade e assimetria.

**Fig.2.27 – Satin Weaving***Basket Weaving*

Este tipo de configuração é semelhante à Plain Weave, com a diferença que surgem duas ou mais fiadas de fibra interlaçadas. Esta configuração é mais plana, logo possui fibras menos onduladas que a plain weave, produzindo melhores propriedades mecânicas. No entanto, possui menor estabilidade

**Fig.2.28 – Basket Weaving**

2.6 – Definição de Impacto a Baixa Velocidade

Devido ao recente crescimento da utilização de materiais compósitos, em aplicações sujeitas a impactos dos mais variáveis tipos, o estudo do comportamento destes materiais relacionados com casos de impacto tem ganho recentemente grande relevo.

Nos últimos anos foram feitas várias tentativas para classificar diversos casos de impacto, parecendo no entanto bastante difícil chegar a uma definição consensual.

A hipótese que se revela mais consensual, passa pela caracterização do impacto segundo alta e baixa velocidade.

2.6.1 - Diferenças entre Impacto de alta e baixa velocidade

Segundo Gabriella Faur-Csukat^[2.15] são apresentadas as seguintes definições:

Baixa velocidade – período de contacto do projectil é maior que o período de tempo do modo vibracional mais baixo do material, correspondendo a uma resposta estrutural do componente e provocando uma extensa área danificada

Alta velocidade - a resposta é caracterizada pelo comportamento local e redondezas da zona de impacto (como o caso de perfuração), sendo a resposta ao impacto independente das condições de fixação. O tempo de contacto do projectil é muito menor do que o período do modo vibracional mais baixo da estrutura.

Em alguns trabalhos^[2.16; 2.17; 2.18] estabelece-se que os impactos de baixa velocidade podem ser considerados como eventos quasi-estáticos a rondar velocidades entre 1m/s e 100 m/s, consoante a rigidez do impactor.

Velocidades entre os 10 m/s e 20 m/s são várias vezes referenciados como valores limite aceitáveis para a generalidade dos materiais compósitos.

Nos estudos de Liu e Marvern^[2.19] e de Joshi e Sun^[2.20], é sugerido que o tipo de impacto seja classificado de acordo com a forma de dano provocada. Deste modo considera-se que impacto de alta velocidade é caracterizado por penetração induzida pela quebra de fibras, e que impacto de baixa velocidade pode ser caracterizado por delaminação e quebra de matriz.

Outros trabalhos sugerem ainda a existência de um tipo de impacto intermédio, denominado de impacto de média velocidade, em que a resposta da estrutura deve ser tida em consideração na análise do dano.

Recentes estudos avançam, no entanto, com a ideia que para a correcta avaliação dos efeitos de impacto, seja mais importante ter em consideração o ratio entre a massa da placa e do projectil do que a velocidade de impacto^[2.24].

2.7 – Dispositivos Experimentais / Ensaios

A caracterização experimental passa pela determinação das propriedades do material, realizadas numa amostra com parâmetros pré-definidos de acordo com o ensaio a realizar.

Os dados obtidos durante estes ensaios são tratados devidamente de forma a conseguir avaliar as suas propriedades mecânicas. Compreender o modo como o material responde, mediante uma vasta gama de solicitações, é fundamental de forma a ser possível utiliza-los eficazmente

Outra utilidade da caracterização experimental passa por verificar os processos de produção mais indicados, assegurar a uniformidade do material e fazer a análise comparativa de vários tipos de materiais.

2.7.1 - Ensaios de tracção

Este tipo de ensaios é provavelmente o ensaio mecânico mais simples e usado. É utilizado para determinar o módulo de elasticidade, tensão de rotura e coeficiente de Poisson de um material. No caso de materiais compósitos, os provetes utilizados são de pequena espessura e planos. Uma carga uniaxial é aplicada nas extremidades, em que estas são presas por um pino ou por duas garras.

As formas utilizadas são:

- Forma de haltere (a)
- Plano, com sobreespessura nas extremidades (b).

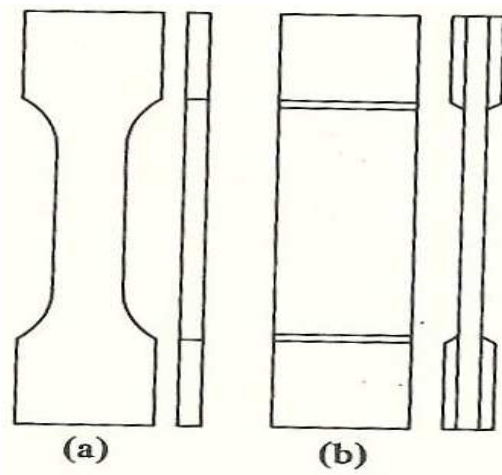


Fig.29 - Provetes utilizados em ensaios de tracção

Nos provetes com forma de haltere, a rotura dá-se geralmente no “pescoço” do material, devido à concentração de tensões introduzidas pelo raio de concordância. Nos provetes que são fixados com pinos na extremidade, geralmente cedem a baixas solicitações, devido a tensões de corte. Estes são muitas vezes substituídos por provetes que permitem utilizar vários pinos, de forma a fornecerem uma distribuição uniforme da carga. No entanto, para melhores resultados, é aconselhável utilizar provetes de secção constante com sobreespessura nas extremidades, e um sistema de fixação por garras.

Os dados obtidos consistem na medição da solicitação aplicada e da deformação nas direcções paralela e perpendicular relativamente à direcção da solicitação. A solicitação aplicada é geralmente obtida através de células de carga, e as deformações são medidas através de extensómeros.

Quando se procede ao ensaio num compósito unidireccional, é importante garantir que a carga aplicada esteja alinhada com a direcção das fibras.

2.7.2 - Ensaio de Flexão

As propriedades de flexão são determinadas pela norma ISO/FDIS 527-4. Neste ensaio, o provete de material compósito possui uma secção rectangular, e é solicitado através de uma flexão a 3 pontos ou a 4 pontos (ver figuras). Em qualquer dos tipos de ensaios realizados, é recomendado que haja uma relação comprimento-espessura do provete seja elevada. Neste trabalho o método utilizado foi o ensaio de flexão em 3 pontos.

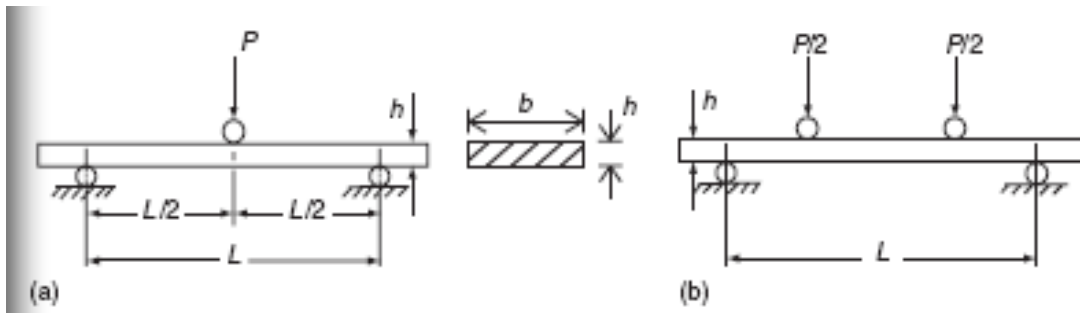


Fig 2.30 a) – Ensaio de Flexão a 3 pontos

Fig.2.30 b) – Ensaio de Flexão a 4 pontos

Num ensaio deste tipo, é considerada que a tensão máxima de cedência, situada na área do provete solicitada à tracção, corresponde à resistência à flexão de um dado material. Assim, utilizando a teoria de viga homogénea, a tensão à flexão dada por este tipo de ensaio é-nos fornecida através da seguinte fórmula^[2.26]:

$$\sigma_{UF} = \frac{3P_{max}L}{2bh^2}$$

Em que:

- P_{max} = Solicitação máxima aplicada, até ocorrer a cedência
- L = Comprimento do provete
- b = Largura do provete
- h = Espessura do provete

O módulo de flexão é calculado através da inclinação inicial da curva solicitação-deflecção.

2.7.3 Ensaio de Corte

Este método permite determinar a força de corte interlaminar de compósitos laminados reforçados por fibras. Para a realização deste ensaio, utilizam-se provetes curtos, podendo possuir espessuras até 6 mm. A aplicação de carga aplica-se sobre a forma de flexão em 3 pontos. Este método é aplicado unicamente a materiais compósitos reforçados por fibras contínuas ou descontínuas, cujas propriedades encontram-se balanceadas e simétricas ao eixo longitudinal do provete.

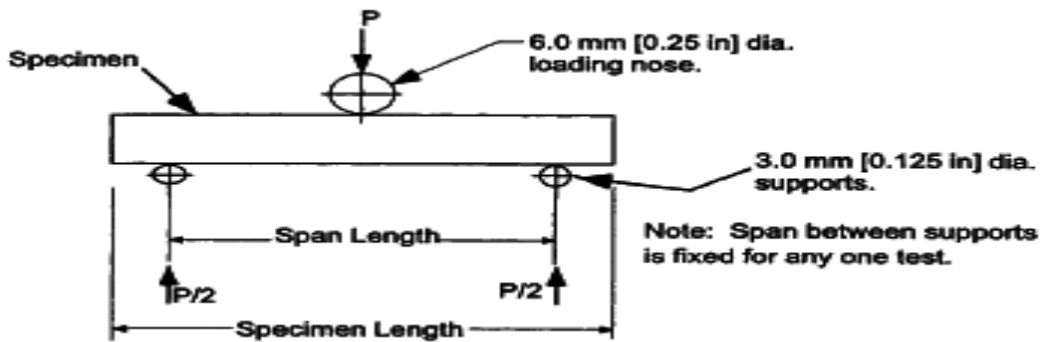


Fig.2.31 – Esquema de um ensaio de corte de viga curta – flexão a 3 pontos

Este tipo de ensaios revela-se bastante útil para a investigação, controlo de qualidade e comparação entre materiais compósitos. Geralmente a cedência dos provetes, neste tipo de ensaio devem-se à resina e às propriedades interlaminares, independentemente da geometria, conjugação de materiais ou sequência de empilhamento

De forma a ser possível determinar a força de ligação interlaminar, utiliza-se a seguinte fórmula^[2.26]:

$$F^{abs} = 0.75 \times \frac{P_m}{b \times h}$$

Em que:

F^{abs} = Força de ligação interlaminar (MPa)

P_{max} = Solicitação máxima aplicada observada durante o ensaio

b = Largura do provete

h = Espessura do provete

2.7.4 - Ensaio de Impacto

As propriedades de impacto de um material representam a capacidade de absorver e dissipar energias mediante casos de impacto. Casos tão dispersos como queda acidental de ferramentas ou colisões a elevadas velocidades são considerados casos de impacto, e as suas consequências vão desde danos localizados ou a desintegração completa do material^[2.27].

Os métodos utilizados para medir o comportamento ao impacto de um material são geralmente métodos destrutivos.

A maneira mais comum de avaliar este tipo de propriedades, passa por determinar a resistência do material através da medição da energia necessária para quebrar um dado material com uma geometria pré-definida.

2.7.4 a) Ensaio de Charpy e Izod

Os dois métodos mais comuns são os ensaios de Charpy e de Izod.

No método de Charpy, a amostra é simplesmente apoiada nas duas pontas, e atingida por um pêndulo no seu ponto médio, transferindo para o provete a sua parte da sua energia cinética, sendo a restante dissipada. A única diferença relativamente ao método de Izod reflecte-se no modo de fixação do provete, encontrando-se neste método, fixo numa extremidade e livre na outra.

Os provetes utilizados têm geralmente a forma de uma viga espessa, possuindo um entalhe no seu ponto médio.

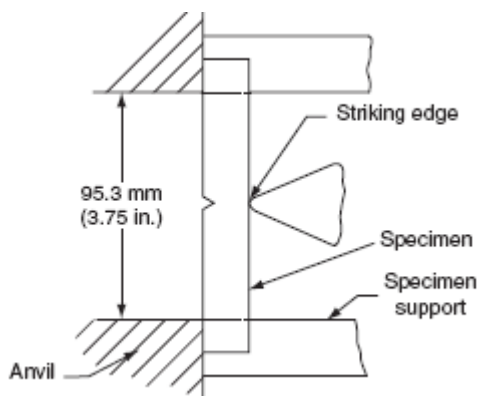


Fig.2.32 – Esquema de Ensaio Charpy

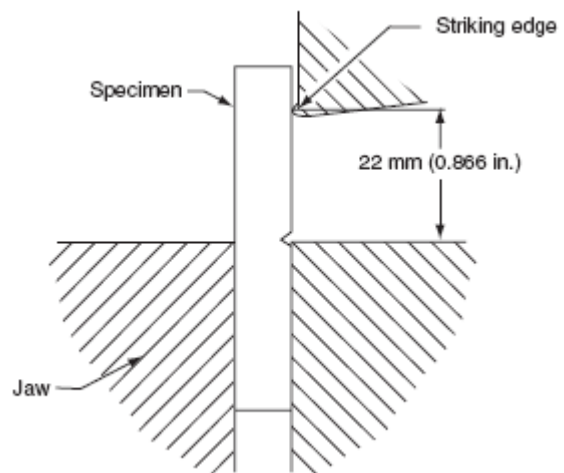


Fig.2.33 – Esquema de Ensaio Izod

A energia absorvida pelo provete é geralmente indicado pela posição do ponteiro numa escala circular, anexada à máquina de ensaios. A escala deve ser calibrada de forma a que a posição do ponteiro indique a diferença entre a energia cinética do pêndulo no instante em que se dá o impacto e a energia cinética contida no pêndulo pós-impacto.

Como principais vantagens da sua utilização, estes métodos destacam-se pela sua simplicidade e facilidade de instrumentação, sendo um método bastante útil, rápido e eficaz para estabelecer comparações entre vários materiais relativamente à capacidade de absorção de energia.

No entanto, este método apresenta algumas desvantagens que convem ter em conta, tais como:

- a curva força-tempo contém frequentemente oscilações de alta frequência resultantes da frequência natural do impactor
- geometria do provete não reflecte o tipo de estruturas sujeitas a este tipo de impacto
- Teste destrutivo, levando à rotura do material, não traduzindo os eventos que geralmente se verificam em situações reais de impacto de baixa velocidade.

2.8 – Início e Propagação de Fractura

Os ensaios de impacto previamente descritos, são geralmente instrumentados de forma a determinar a evolução dos efeitos do impacto, durante o ensaio.

Geralmente a evolução carga-tempo durante um ensaio pode ser dividida em duas regiões distintas:

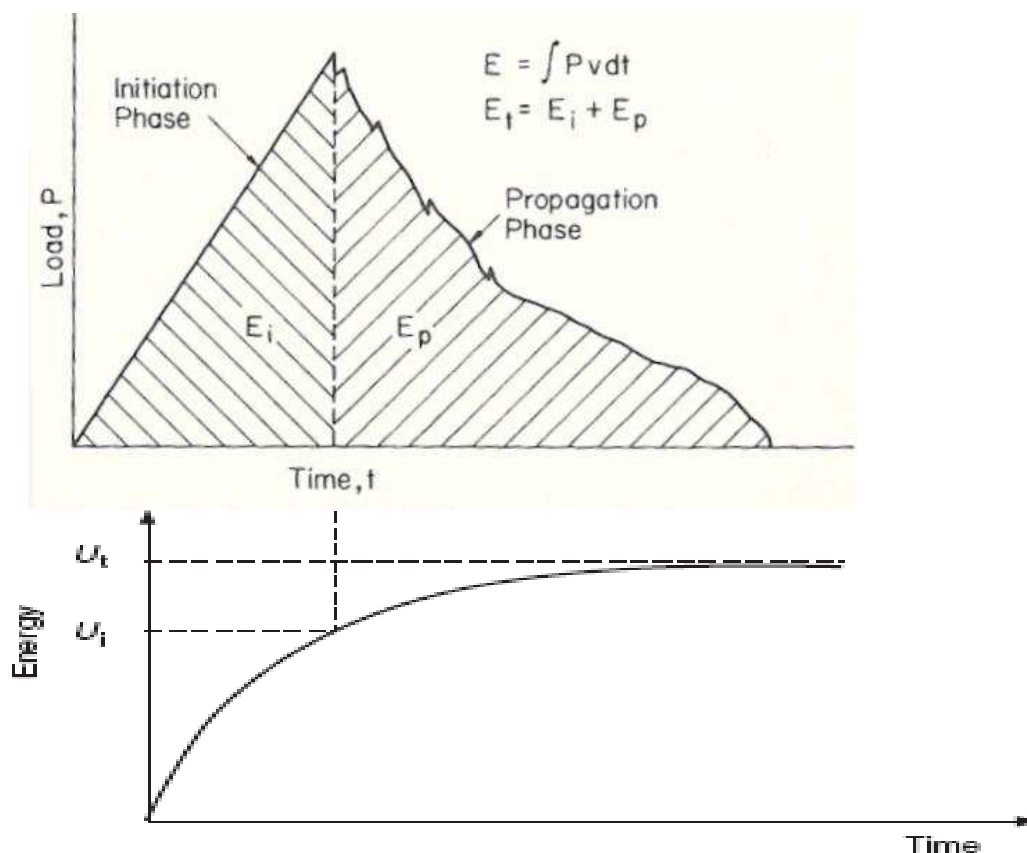


Fig.2.34 – Curvas típicas Carga-Tempo e Energia-Tempo obtidas em ensaios de impacto^[2.2]

Comportamento na zona de início de fractura: Esta zona representa a energia absorvida devido à extensão do provete até que ocorra a fractura. Esta energia é armazenada fundamentalmente pelas fibras, tendo a matriz um papel desprezável.

Em várias publicações é apresentada a seguinte fórmula para estimar a energia absorvida através da extensão das fibras^[2,27]:

$$U_f = \frac{\sigma_f^2}{6E_f} v_f,$$

Em que:

σ_f - Tensão longitudinal das fibras exteriores do provete

v_f - fracção volúmica de fibra

E_f - Modulo de Elasticidade da fibra

O que sugere que a capacidade de absorção de energia pode ser obtida através da utilização de fibras de baixa rigidez ou utilizando uma percentagem volúmica de fibra elevada.

A iniciação da fractura ocorre perto do pico de carga e manifesta-se através de cedência à tracção das fibras externas ou por corte inter-laminar.

Comportamento na zona de propagação de fractura: Nos compósitos reforçados por fibra de vidro, geralmente verifica-se uma sequência de acontecimentos, iniciados pela cedência de fibra, seguidos pelo arrancamento de fibra e delaminação das várias camadas. Dependendo do material e configuração de camadas, este processo repete-se várias vezes até que a fenda percorra toda a espessura do material. A energia absorvida por delaminação depende da energia necessária para se dar o corte inter-laminar, bem como o comprimento percorrido pela fenda para ocorrer delaminação e número de delaminações.

O conhecimento da energia total absorvida por um material não é suficiente para conhecer o seu comportamento ao impacto. Por exemplo, um material de elevada resistência mecânica e frágil necessita de uma energia elevada para iniciar uma fenda, mas absorve pouca energia durante a sua propagação. Por outro lado, um material mais dúctil, pode necessitar de pouca energia para iniciar a fenda, mas consegue absorver bastante energia durante a sua propagação. Em suma, esta situação pode representar dois materiais com comportamento ao impacto completamente distintos, mas com uma quantidade de energia absorvida idêntica.

2.9 – Caracterização do Dano

2.9.1 - Quebra das fibras

Quando a fenda se propaga numa direcção perpendicular à orientação da fibra, estas acabam eventualmente por quebrar, levando à separação completa do laminado. As fibras quebram quando atingem o seu limite máximo de deformação.

Apesar das fibras serem responsáveis pela resistência mecânica do material, a quebra destas representa uma percentagem de energia muito baixa relativamente à quantidade de energia absorvida pelo material compósito. No entanto, há que ter em conta que a presença de fibras influencia o modo de cedência do material, e por conseguinte, a energia total absorvida, após impacto.

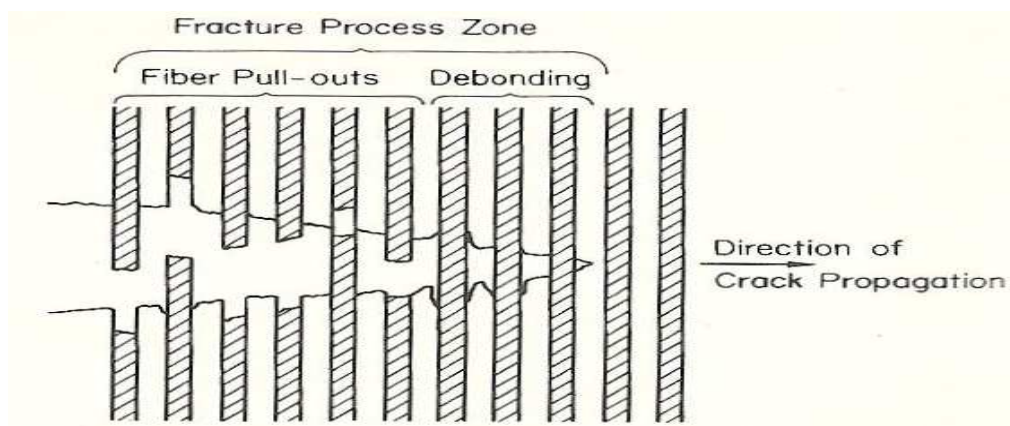


Fig.2.35 – Esquema de efeitos locais num material compósito fibroso devido a propagação de fenda^[2,2]

2.9.2 - Deformação e Quebra da Matriz

Para ocorrer a fractura total do compósito, o material da matriz que envolve as fibras deve fracturar completamente. Apesar de haver absorção de energia devido à deformação e quebra da matriz, a energia absorvida por deformação plástica é consideravelmente mais elevada. Uma vez que as resinas epoxidas e poliésteres são bastante frágeis, a quantidade de energia absorvida por estas, mediante impacto, é praticamente insignificante.

2.9.3 - Separação entre fibra/matriz

Durante a fractura, pode ocorrer a separação entre a matriz e as fibras, devido a fendas que se propagam paralelamente às fibras. Neste processo, as ligações químicas ou secundárias entre as fibras e a matriz são quebradas. Este tipo de fissura ocorre quando as fibras são bastante fortes e a matriz frágil. Se este tipo de separação for extenso, vai levar a um aumento significativo da energia absorvida durante impacto. O aumento de energia absorvida pode aumentar com a diminuição da força de ligação presente nas interfaces, uma vez que tal promove delaminação e separação entre fibra/matriz.

2.9.4 - Arrancamento de fibra

Este fenómeno ocorre quando fibras frágeis ou descontínuas estão embuidas numa matriz de elevada resistência. Dá-se a quebra das fibras, originando uma concentração de tensões no local onde a fibra foi quebrada. Esta concentração de tensões pode ser aliviada através da cedência da matriz, evitando que esta quebre. Nesta situação, as fibras são arrancadas do interior da matriz

A diferença entre arrancamento e separação da fibra/matriz assenta no seguinte princípio:

A separação de fibra/matriz ocorre quando a fenda na matriz é incapaz de se propagar através da fibra, enquanto o arrancamento de fibra deve-se à falta de capacidade da fenda iniciada na quebra da fibra se propagar pela matriz. Os arrancamentos de fibra são geralmente acompanhados pela deformação extensiva da matriz, o que não acontece na separação fibra/matriz. Apesar de estes fenómenos parecerem semelhantes por se darem na região da interface, estes acontecem mediante condições distintas. No entanto, ambos são responsáveis por um aumento de energia absorvida durante a fractura.

2.9.5 - Fendas de delaminação

Uma fenda que se propague por uma camada, pode deter-se quando atinge as fibras de uma camada adjacente. Devido às elevadas tensões de corte adjacentes à crista da fenda, a fenda pode dividir-se e propagar-se paralelamente ao plano das camadas. Estas fendas são chamadas fendas de delaminação. A delaminação ocorre frequentemente quando os laminados são testados à flexão.

É possível apurar genericamente, três modos diferentes de solicitação e cedência (Modo I, Modo II e Modo III) que originam delaminação:

- Forças de tracção - > abertura de fendas
- Forças de Corte no plano -> deslizamento
- Forças de Corte exteriores ao plano - > arrancamento

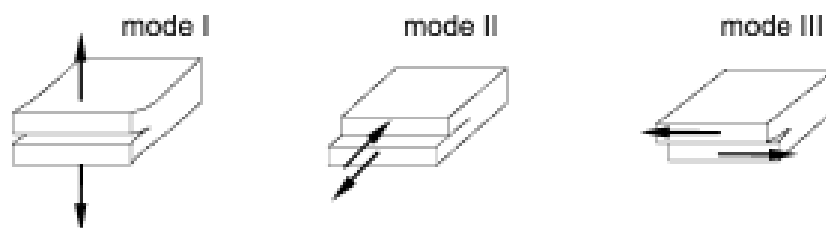


Fig.2.36 – Representação dos diferentes modos de cedência

2.10 - Bibliografia

- [2.1] - H.Staab, G. (1999). *Laminar Composites*, Butterworth-Heinemann.
- [2.2] – Agarwal, Bhagwan D. ; Broutman, Lawrence J. (1980). *Analysis and Performance of Fiber Composites*, Wiley-Interscience.
- [2.3] –Silva, S.P.; M. A. S., Fernandes, E.M.; Correlo, V. M.; Boesel, L.F; Reis, R.L. (2005). "Cork: Properties, Capabilities and Applications." 345-365.
- [2.4] – L.J.Gibson , M.F. Ashby – *Cellular Solids – Structure and Properties*
- [2.5] – Fortes, Manuel Amaral; Rosa, Emília Maria; Rosa, Helena (2004). *A Cortiça*, IST Press.
- [2.6] – Higuchi, T., 1980. Lignin Structure and Morphological Distribution in Plant Cell Walls: 1-19
- [2.7] - Pereira, H., 1988. Chemical composition and variability of cork from *Quercus Suber* L.. Wood Sci. Technol. 22: 211 – 218
- [2.8] – Ribeiro, C. C. (1995). Estudo do Processo de Fabrico de Rolhas de Cortiça Aglomerada Expandida. *Instituto Superior de Agronomia*. Lisboa, Universidade Técnica de Lisboa. Tese de Mestrado
- [2.9] - <http://www.amorim.com>
- [2.10] - Chung, D. D. L. (2002). *Composite Materials: Science and Applications - Functional Materials for Modern Technologies*, Springer-Verlag London Limited
- [2.11] – <http://www.primethermosets.com>
- [2.12] – <http://www.azom.com>
- [2.13] - Warring, R. H. (1971). *The New Glassfibre Book*, Model and Allied Publications.
- [2.14] - John, M. J. and S. Thomas (2007). "Biofibres and Biocomposites." *Carbohydrate Polymers*(71): 343-364
- [2.15] - Faur-Csukat, G. (2006). "A Study on the Ballistic Performance of Composites." *Macromol.Symp.*: 217-226
- [2.16] - Sjoblom, P.O., Hartness, J.T. and Cordell, T.M. On low-velocity impact testing of composite materials. *J. Compos. Mater.* 1988, 22, 30-52
- [2.17] - Shivakumar, K.N., Elber, W. and Illg, W. Prediction of low-velocity impact damage in thin circular laminates. **1985, 23(3), 442-449**
- [2.18] - Abrate, S. Impact on laminated composite materials. *Appl.Mech. Rev.* **1991,44(4), 155-190**
- [2.19] - Liu, D. and Malvem, L.E. Matrix cracking in impacted glass/epoxy plates. *J. Compos. Mater.* 1987, 21, 594-609

- [2.20] - Joshi, S.P. and Sun, C.T. *Impact-induced fracture initiation and detailed dynamic stress field in the vicinity of impact*. In 'Proc.American Society of Composites 2nd Tech. Conf.', DE, 23-25 September 1987, pp. 177-185
- [2.21] – Moura, M. F. d. S. F. d. (1995). *Modelos de Previsão do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Carbono-Epóxico Sujeitos a Impacto de Baixa Velocidade e da Sua Resistência Residual à Compressão Após Impacto*. Faculdade de Engenharia. Porto, Universidade do Porto.
- [2.22] – LANDOLT, J. H. ; MAGALHÃES, J. H. “Estudo da Tolerância ao Dano de Impacto de Laminados de CFRP”, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, revista SPM, *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, Vol.15, nº3 e 4, 2003
- [2.24] - Olsson, R. (1999). "Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates." *Composites - PartA: applied science and manufacturing*: 879-887.
- [2.25] - Norma ISO/FDIS 527-4, “Plastics – Determination of tensile properties, Part 4: Test Conditions for Isotropic and Orthotropic Fibre-Reinforced Plastic Composites”
- [2.26] - Norma ASTM_D2344/D 2344M -00^{e1}, “Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates
- [2.27] - Mallick, P. K. (2007). *Fiber-Reinforced Composites - Materials, Manufacturing and Design*, CRC Press, Taylor & Francis Group
- [2.28] - <http://www.instron.com/wa/products/impact/>

Capítulo 3

Estado de Arte

3.1 - Aplicações Correntes em Materiais Compósitos de Base Polimérica

A investigação e aplicabilidade de materiais compósitos têm ganho especial relevo nos últimos anos. Hoje em dia, estes materiais encontram-se incluídos numa vasta gama de aplicações, tais como:

3.1.1 - Aplicações Estruturais:

Podemos considerar que é no campo das aplicações estruturais que a utilização de materiais compósitos tem vindo a ganhar um importante relevo. É necessário garantir, neste tipo de aplicações, um bom desempenho mecânico dos materiais utilizados, em especial em casos que podem estar sujeitos a cargas directamente aplicadas nas estruturas.

Dentro das aplicações estruturais, é importante destacar os seguintes sectores:

3.1.1.a) - Indústria Aeronáutica

A indústria aeroespacial pode ser considerada como o principal impulsionador do estudo e investigação de materiais compósitos para aplicações estruturais. As motivações desta indústria prendem-se fundamentalmente com a constante procura de redução de peso estrutural, de modo a permitir atingir maiores velocidades e menores consumos de combustível

A primeira aplicação de materiais compósitos surgiu na década de 1970, em aviões militares, surgindo pouco mais tarde em aviões comerciais, em componentes estruturais secundários.

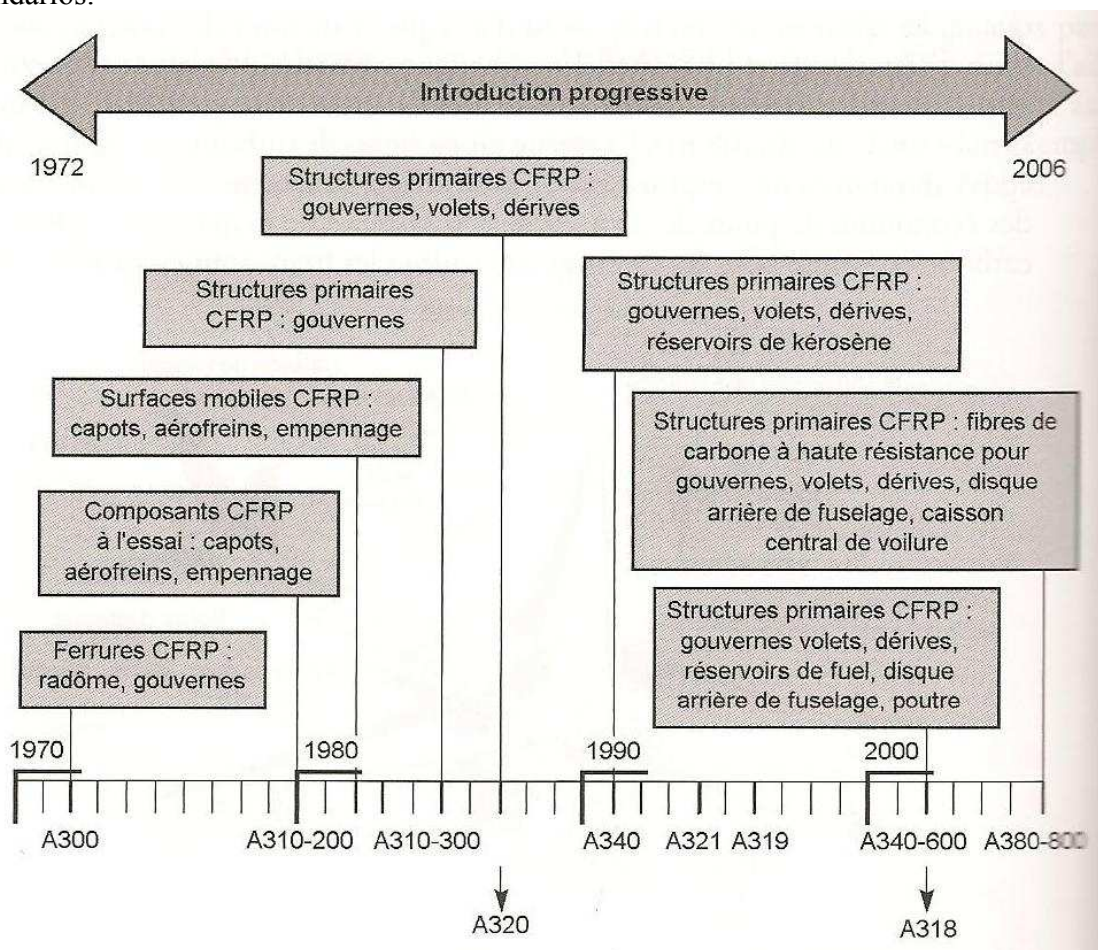


Fig.3.1 – Introdução progressiva de materiais compósitos na indústria aeronáutica comercial^[3,3]

Actualmente a utilização de materiais compósitos em componentes estruturais está bem estabelecida na indústria aeronáutica, como é possível constatar através da análise do A380, da Airbus, que possui cerca de 25% do seu peso em compósitos.

Para além de questões de diminuição de peso e consumo de combustível já mencionadas, a utilização de materiais compósitos na indústria aeronáutica oferece igualmente outras vantagens, tais como:

- Redução de componentes e elementos de ligação (parafusos, rebites, etc...), o que leva a redução de custos de fabricação e montagem, bem como redução do peso da estrutura
- Resistência à fadiga e corrosão dos materiais compósitos

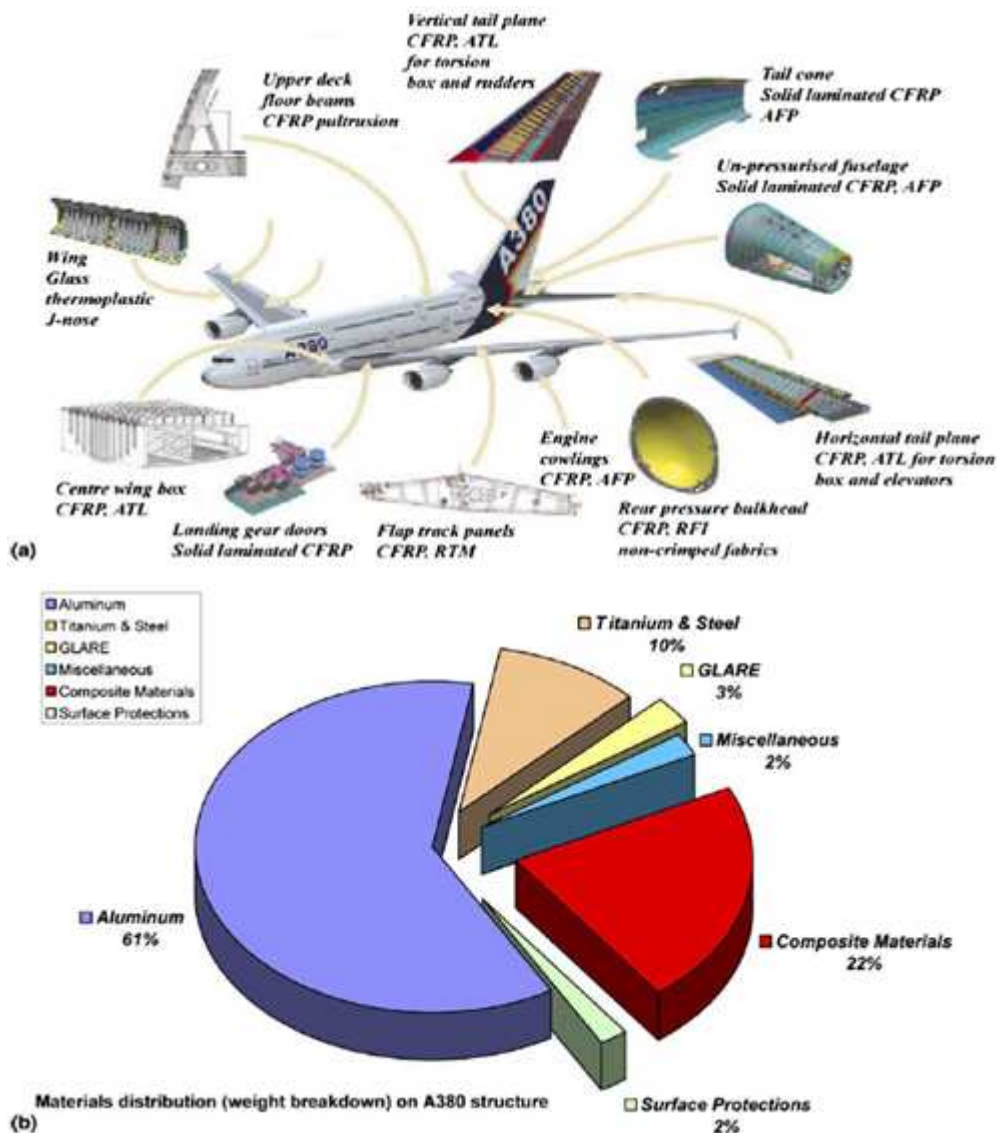


Fig.3.2 – Utilização de Materiais Compósitos no A380 a) Componentes que utilizam fibra de carbono e outros compósitos b) Distribuição percentual mássica dos constituintes do A380^[3,4]

O principal inconveniente deste tipo de materiais deve-se à sua susceptibilidade a danos causados por impacto.

3.1.1.b) Indústria Automóvel

Tal como na indústria aeroespacial, a redução de peso é o factor motivador que leva a ter em consideração a aplicabilidade de materiais compósitos na indústria automóvel. Na indústria automóvel comercial, as fibras de vidro apresentam maior relevância, uma vez que as componentes em fibras de carbono são bastante caras, sendo relegadas para um plano inferior em termos de importância e utilização. Por outro lado as elevadas cadências de produção exigidas pela indústria automóvel também limitam a utilização de resinas epoxidas, devido aos seus elevados tempos de cura.

Tab.3.1 – Crescente uso de materiais compósitos na indústria automóvel (em milhares de toneladas)^[3,5]

Type	Quantity				
	1985	1990	1995	2000	2005
Wovens	953	1125	1170	1221	1214
Nonwovens	95	109	107	111	114
Composite materials	284	443	521	736	976
Other	76	97	119	152	179

No entanto, no que diz respeito a desportos motorizados, em que a prioridade é permitir que o veículo atinja elevadas velocidades, sendo o custo um factor secundário, a utilização de fibras de carbono e resinas epoxidas apresentam elevada viabilidade. Por exemplo, hoje em dias os principais componentes do corpo, chassis, interior, suspensão dos carros de Formula 1 são constituídos por resinas epoxidas reforçadas por fibras de carbono.

3.1.1.c) Outras Aplicações Estruturais

Para além da indústria automóvel e aeronáutica/aeroespacial, podemos encontrar aplicações de materiais compósitos a nível estrutural em:

- aplicações desportivas (bicicletas, raquetes, capacetes, tacos de golfe) devido ao seu baixo peso, facilidade de conformação, resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas

- Indústria Naval, em cascos de navios, decks, interiores. Hoje em dia cerca de 90% de embarcações recreativas utiliza compósitos de poliéster reforçados por fibra de vidro e a utilização de fibras de carbono surge no fabrico de embarcações de competição, em que a redução de peso surge novamente como um facto fundamental

- Infra-estruturas: Outra aplicação recente de compósitos de matriz poliméricas reforçados por fibras está ligada à substituição de aço e cimento em pontes, edifícios e outras infra-estruturas relacionadas com a construção civil. Os materiais compósitos surgem como uma alternativa interessante devido à sua resistência à corrosão, o que permite prolongar a vida de estruturas e reduzir a custos de manutenção. O baixo peso de materiais compósitos surge igualmente como uma vantagem, pois vai permitir a redução de peso da estrutura, facilitar o transporte de materiais da fábrica ao local de construção da ponte, e permite a reduzir o perigo de lesões durante construção ou em caso terremotos. Menor peso estrutural também iria permitir projectar pontes com mais distância entre apoios.

3.1.2 - Isolantes Eléctricos

Materiais compósitos laminados, que contenham fibra de vidro como material de reforço ou aramida (Kevlar®) apresentam boas propriedades de isolamento eléctrico, devido à fraca condutibilidade das fibras que usam como reforço

3.1.3 - Aplicações Ambientais

Podem definir-se como aplicações ambientais aquelas que estão relacionadas com a protecção do ambiental. A diminuição de poluição pode ser obtida através da alteração de materiais ou processos, utilizando materiais biodegradáveis, materiais que possam ser reciclados ou utilizando outras formas de energia, substituindo combustíveis fósseis por energia solar, hidrogénio, baterias, etc. Por estes motivos, materiais compósitos com matrizes poliméricas biodegradáveis têm-se mostrado bastante atractivos.

Uma aplicação bastante comum de materiais compósitos em aplicações ambientais consiste em operações de saneamento, onde são utilizados compósitos porosos ou fibrosos para a remoção de partículas e filtragem de fluidos.

Outro tipo de poluição que tem vindo a crescer de importância é a poluição electrónica. Equipamentos como telemóveis, enviam para atmosfera ondas electromagnéticas, que podem interferir com o funcionamento de equipamentos electrónicos. Para prevenção e protecção deste tipo de poluição, geralmente revestem-se as fontes de radiação e equipamentos electrónicos por materiais que consigam absorver ou reflectir radiação, como é o caso de alguns compósitos de matriz polimérica.

3.1.4 - Aplicações Biomédicas

Entre aplicações biomédicas contam-se aquelas que envolvem o diagnóstico e tratamento de doenças, bem como a sua prevenção. Aplicações como implantes, aparelhos cirúrgicos e de diagnóstico, pacemakers, cadeiras de rodas, equipamentos de apoio à mobilidade, embalagens de determinados medicamentos e instrumentação para análises químicas, surgem entre aquelas em que os materiais compósitos se encontram presentes.

A introdução de implantes é uma das aplicações que coloca mais desafios, uma vez que o material utilizado deve ser biocompatível, resistente à corrosão, fadiga, e tem que ter a capacidade de manter as suas propriedades durante um longo período de tempo. Para este tipo de aplicações utilizam-se materiais com matriz de carbono e matrizes poliméricas biocompatíveis.

Compósitos com matrizes biodegradáveis são utilizados para embalagens de produtos farmacêuticos.

3.2 – Materiais BioCompósitos

Hoje em dia, devido à elevada competitividade do mercado, bem como restrições ambientais recentemente impostas, associadas à própria vontade de criar materiais “amigos do ambiente”, tem havido uma crescente investigação e inovação relativamente ao uso de materiais existentes na natureza^[3,6]

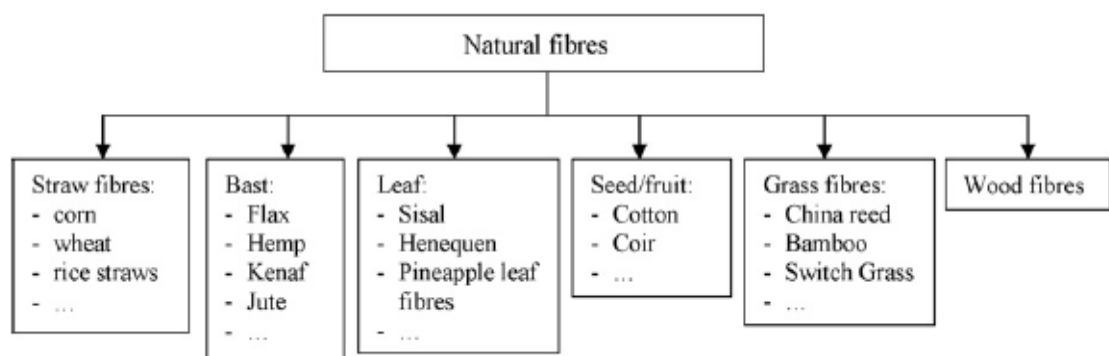


Fig.3.3 – Fibras Naturais Utilizadas no Fabrico de Materiais Compósitos^[3,7]

São vários os motivos estudados que levam a que este tipo de materiais tenha efeitos menos nocivos para o ambiente, contando-se entre eles os seguintes:

- Métodos de Produção Menos Poluentes
- Aumento de Áreas “verdes” para cultivo
- Possibilidade de Reciclagem total/parcial
- Diminuição de densidade relativamente a materiais tradicionalmente utilizados

A importância deste último ponto prende-se com o facto que menor densidade implica um menor consumo de energia e combustível no transporte de matérias-primas. Por outro lado, quando aplicados na indústria automóvel, apresenta vantagens não só para o ambiente mas também para o consumidor, uma vez que a redução de densidade vai reduzir de uma forma relativamente significativa o consumo de combustível.

Para além das vantagens a nível ambiental, que estes materiais oferecem, o seu baixo peso específico permite igualmente obter elevadas propriedades mecânicas específicas. Por outro lado, também oferecem condições de trabalho e manuseamento mais seguros que os compósitos sintéticos.

Outra vantagem bastante importante dos biocompósitos, se bem que apenas relacionada indirectamente, prende-se com o desenvolvimento de outras actividades económicas e indústrias, como é o caso da agricultura, indústria alimentar, vestuário, etc.

No entanto, a aplicação de biocompósitos surge associada a várias desvantagens, tais como:

- Elevada absorção de humidade, o que conduz a elevada variância dimensional e formação de vazios que vão afectar as propriedades mecânicas do material
- Degradação das fibras a temperaturas acima de 200°C
- Baixa Resistência das fibras a agressões biológicas
- Disparidade de propriedades mecânicas, dependendo da fonte de extracção das fibras.

Contudo, há que realçar que as vantagens oferecidas pelos biocompósitos superam facilmente as desvantagens a eles inerentes. Por outro lado, a possibilidade de eliminar ou reduzir o efeito das desvantagens previamente mencionadas, através de tratamentos químicos, surge como um importante argumento para o estudo e desenvolvimento da aplicabilidade dos biocompósitos.

Recentemente, têm vindo a ser desenvolvidos estudos e trabalhos de pesquisa centrados no fabrico de compósitos 100% biodegradáveis, através da associação de fibras naturais com resinas biodegradáveis.

Tab.3.2 – Matrizes poliméricas biodegradáveis^[3,8]

Biodegradable polymer matrices	
Natural	Synthetic
1. <i>Polysaccharides</i>	1. Poly(amides)
Starch	2. Poly(anhydrides)
Cellulose	3. Poly(amide-enamines)
Chitin	4. Poly(vinyl alcohol)
2. <i>Proteins</i>	5. Poly(vinyl acetate)
Collagen/gelatin	6. Polyesters
Casein, albumin, fibrogen, Silks	6.1 Poly(glycolic acid)
3. <i>Polyesters</i>	6.2 Poly(lactic acid)
Polyhydroxyalkanoates	6.3 Poly(caprolactone)
4. <i>Other polymers</i>	6.4 Poly(orthoesters)
Lignin	7. Poly(ethylene oxides)
Lipids	8. Poly(phosphazenes)
Shellac	
Natural rubber	

3.2.1 - Aplicações

Um tipo de aplicação corrente e em constante investigação deste tipo de materiais prende-se com a área da construção, sendo já utilizados no isolamento de edifícios – fabrico de portas, janelas e pavimentos^[3.7; 3.9] – bem como no fabrico de painéis lenho-celulósicos para retardar a progressão de fogo, ou até mesmo habitações e estruturas resistentes ao ataque de furacões.

Verifica-se igualmente uma crescente substituição da madeira por materiais compósitos reforçados por fibras naturais, na produção de peças de mobiliário.

Investigações recentes tem evoluído no sentido de desenvolver um biocompósitos com baixa constante dielétrica, de modo a encontrar um material de baixo custo de fabrico capazes de substituir os materiais dielétricos utilizados na produção de micro-chips

No entanto, é a indústria automóvel que surge como uma das principais interessadas neste tipo emergente de materiais, estudando recentemente a sua aplicabilidade e substituição de materiais convencionais para os seus interiores^[3.7; 3.10]

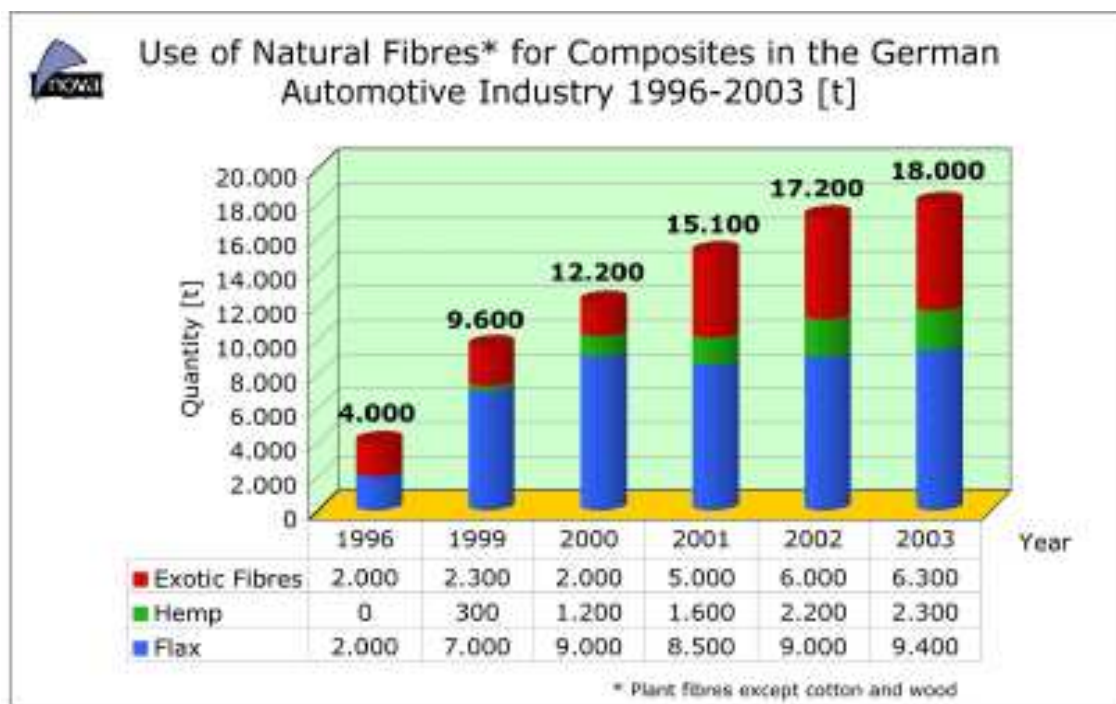


Fig.3.4 – Utilização de Fibras Naturais em Compósitos, na indústria automóvel alemã, em toneladas (1996-2003)^[3.11]

Materiais como a cortiça, madeira, linho e cânhamo revelam-se bastante mais atractivos, não só devido a aspectos puramente estéticos mas também porque possuem propriedades mecânicas interessantes, capazes de competir com os materiais tradicionalmente utilizados. Este tipo de materiais podem ser encontrados em modelos nas mais conceituadas marcas da indústria automóvel, como Mercedes, VW, Audi, BMW, Ford, Opel, etc...

Aliás, prevê-se que o uso de biocompósitos sofra um grande crescimento nesta indústria, uma vez que segundo a directiva europeia de fim de vida de veículo obriga que a partir 2015 os veículos automóveis sejam constituídos por 95% de material reciclável, sendo 85% desse material reciclado através de reutilização ou reciclagem mecânica e 10% reciclado através de recuperação de energia ou reciclagem térmica^[3.8].

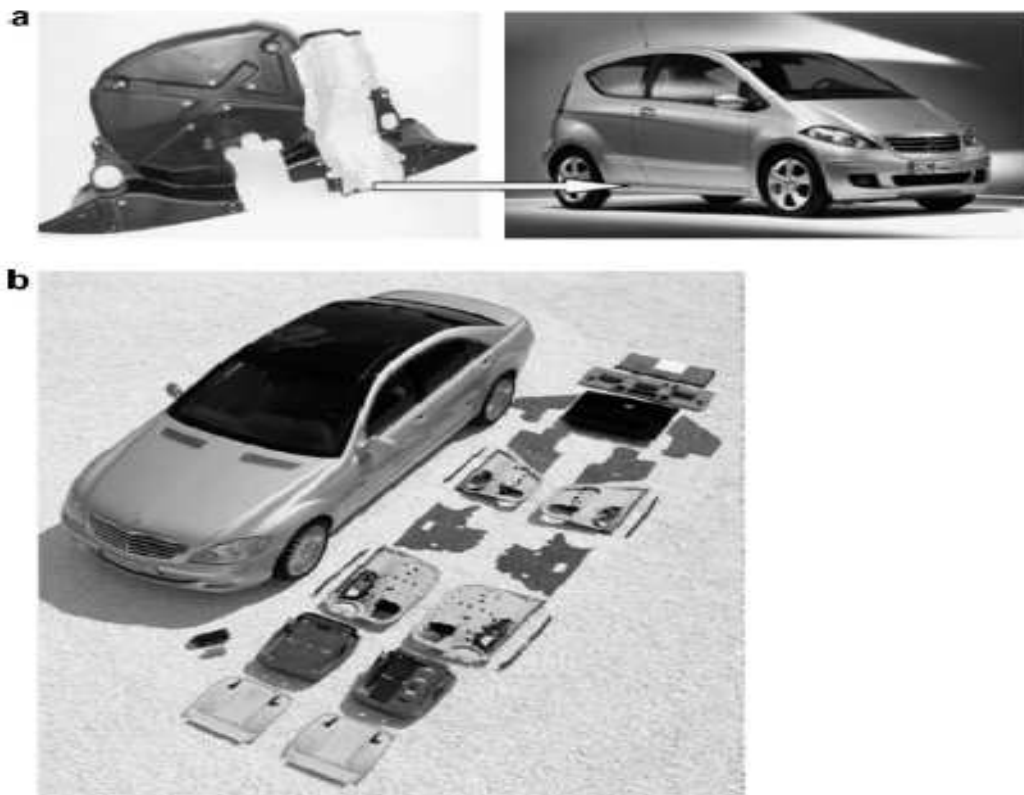


Fig.3.5 a) Paineis do chão de Mercedes Classe A, utilizando fibras de banana como reforço. b) diversos componentes utilizados no Mercedes Classe S, utilizando bio-fibras como elemento de reforço^[3.8].

3.3 – Estudo de Impacto a Baixa Velocidade

A crescente utilização de materiais compósitos nas mais diversas aplicações, tem levado a que, nas últimas décadas, o estudo e compreensão das suas propriedades, mediante as mais diversas solicitações, tenha ganho especial relevo.

Uma característica bastante interessante oferecida pelos materiais compósitos consiste na sua resistência ao impacto, e da facilidade e capacidade de se implementarem as mais variadas técnicas que permitam obter melhorias significativas desta propriedade em particular.

3.3.1 Escolha de Materiais

3.3.1 a) Caracterização Geral

Recorrendo aos ensaios de Charpy, e à utilização de diferentes materiais compósitos utilizando fibras de reforço distintas, é possível obter uma ideia aceitável do comportamento geral de materiais compósitos quando sujeitos a solicitações dinâmicas – ou seja, quando sujeitas a solicitações de impacto.

Segundo os resultados obtidos por Fernández-Canteli, A., A. Arguelles, et al.,^[3.12] apuraram-se as seguintes características:

- diminuição de resistência a impacto com o envelhecimento e perante ambientes quimicamente agressivos

- o método de processamento dos provetes a ser testados mostrou-se pouco influente nos resultados obtidos sendo, portanto, possível concluir que o recurso à moldação manual seria um método que permitiria obter bons resultados durante os ensaios

3.3.1 b) Comparação/Caracterização de Materiais

Para ser possível projectar de forma eficiente um material compósito com boa capacidade de absorção de energia e resistência ao impacto, é necessário ter conhecimento do comportamento mecânico de potenciais constituintes, para poder avaliar quais os mais indicados para o caso em estudo.

Em diversos estudos foram comparados o comportamento ao impacto de vários materiais compósitos, utilizando diferentes fibras como materiais de reforço, nomeadamente fibras de vidro, fibras de carbono e aramidas (Kevlar®).^[3.13]

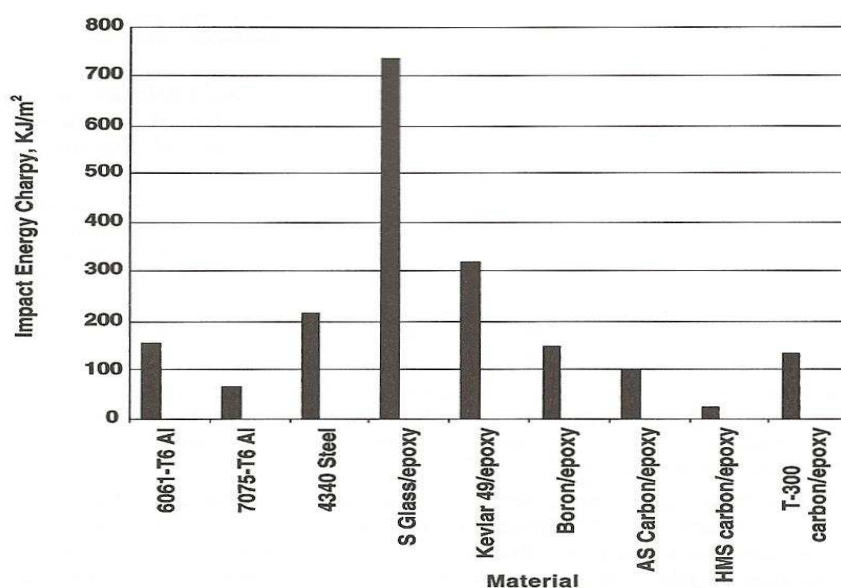


Fig.3.6 – Comparação de propriedades de impacto de diversos materiais, possuindo cerca de 60% de volume de fibra^[3.14]

Comparando vários materiais a utilizar para reforço, foi possível constatar que a fibra de vidro apresenta boas capacidades de absorção de energia em termos absolutos e que aramida (Kevlar®) apresenta melhor capacidade de absorção de energia em termos de propriedades específicas^[3.15]

É possível, ainda, distinguir diferentes modos de absorção de energia entre estes materiais. As fibras de carbono e de vidro, devido à sua natureza frágil, absorvem energia através de quebra de fibras. Por sua vez, a absorção de energia em compósitos que utilizem Kevlar como fibra de reforço, dá-se devido à ocorrência de delaminagens^[3.16].

3.3.1 c) Compreensão de dano em fibra de vidro

Um dos materiais mais geralmente utilizados como elemento de reforço, em materiais compósitos, tem sido a fibra de carbono. No entanto, como já foi demonstrado, a fibra de vidro possui boas capacidades mecânicas, e melhores capacidades de absorção de energia que a fibra de carbono, tornando-se importante conhecer melhor desenvolvimento do dano, mediante casos de impacto, na fibra de vidro.

Nos estudos de Dear e Brown^[3.17], foram efectuadas comparações entre os materiais com as configurações descritas na tabela seguinte.

Tab.3.3 – Características dos Materiais utilizados nos estudos de Dear e Brown^[3.17]

Constituents	SMC1	SMC2	GMT
Fibre	E-glass	E-glass	E-glass
Fibre length (mm)	25	25	Continuous
Fibre weight fraction (%)	62	30	30
Resin	Polyester	Polyester	Polypropylene
Resin weight fraction (%)	30	16	70
Filler (CaCO ₃) (%)	5	40.5	0
Shrinkage control additive (%)	0	12	0
Catalyst (%)	1	0.5	0
Pigment (%)	2	1	0
Structure	Random in-plane	Random in-plane	Random in-plane

Foi possível constatar que os materiais compósitos reforçados com fibra de vidro possuem um comportamento quase linear entre a energia absorvida e solicitação de pico.

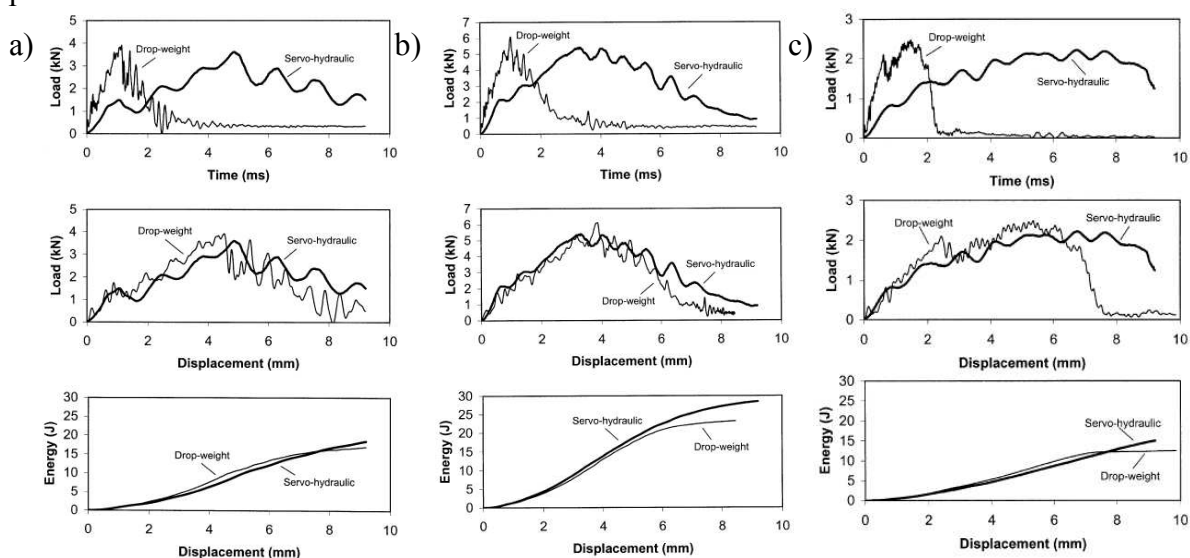


Fig.3.7 – Graficos Força-Tempo, Força-Deslocamento e Energia-Deslocamento para ensaios realizados nos materiais a) SMC1; b) SMC2; c) GMT^[3.17]

Por outro lado, também foi demonstrado que neste tipo de materiais compósitos sofrem uma extensão de dano considerável no seu interior, até se dar a rotura das camadas superficiais e ser possível detectar visivelmente o dano. Esta característica reforça a ideia que os impactos a baixa velocidade incluem-se entre o tipo de solicitações mais perigosa, uma vez que deles podem resultar graves danos estruturais antes que eles sejam detectados.

3.3.1 d) Comparação de resina de epoxido com outras resinas:

A escolha de resina é um passo imprescindível na fase de projecto de um compósito, sendo um componente determinante para as propriedades mecânicas do material.

Vários estudos têm sido desenvolvidos estabelecendo comparação entre vários tipos de resina.

Nos trabalhos de Lee e Cheon^[3.18], bem como as informações fornecidas pela empresa Azom^[3.19], parece ser consensual que através do uso resinas epoxidas é possível obter materiais compósitos propriedades mecânicas superiores, bem como maior absorção de energia devido a casos de impacto.

3.3.2 - Parâmetros de Fabrico

Os parâmetros que influenciam a resistência ao dano de um material compósito, encontram-se intimamente ligados com as suas características estruturais, bem como com os materiais que os constituem. Deste modo, é fulcral avaliar a influência da resistência a impacto da matriz, bem como a sua interacção com as fibras de reforço. A orientação das fibras, sequência de empilhamento e espessura do laminado são outros factores a ter em conta^[3.2]

3.3.2 a) Efeito da fracção de fibra/resina

Um parâmetro no fabrico de materiais compósitos que tem bastante importância reside na fracção de fibra/resina utilizada.

De forma a otimizar a capacidade de absorção de energia de compósitos de matriz polimérica, reforçada com fibra de vidro, foram realizados ensaios de impacto, variando a percentagem volúmica de fibra utilizada.

Para este tipo de materiais compósitos, foi demonstrado que maior tensão de corte e maior quantidade de energia de impacto absorvida era obtida utilizando uma percentagem volúmica de fibra a rondar os 60%. Verificou-se igualmente que os modos de dano predominantes eram a quebra, arrancamento de fibra e delaminação^[3.18].

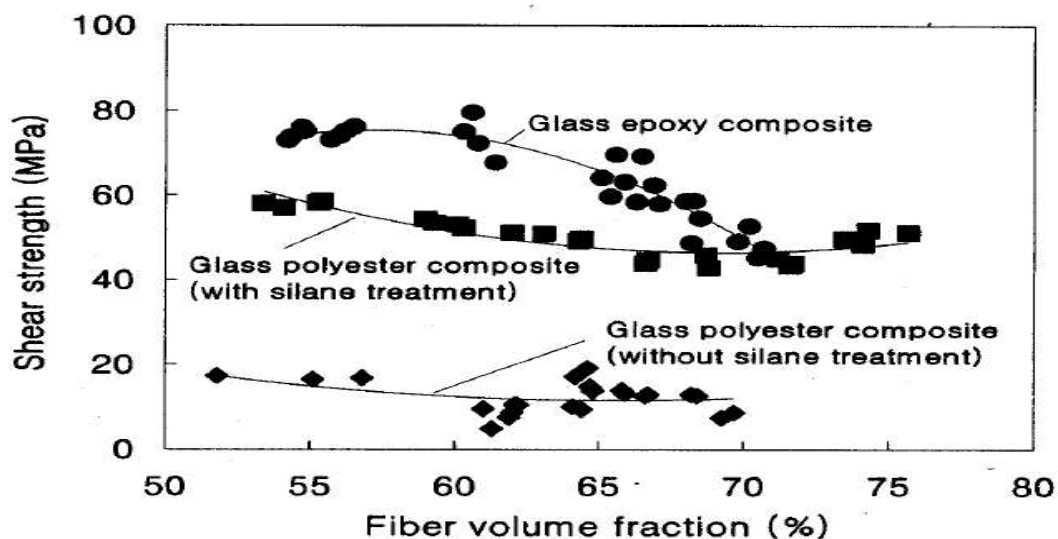


Fig.3.8 – Tensão máxima de corte interlaminar versus fração volúmica de fibra^[3.18]

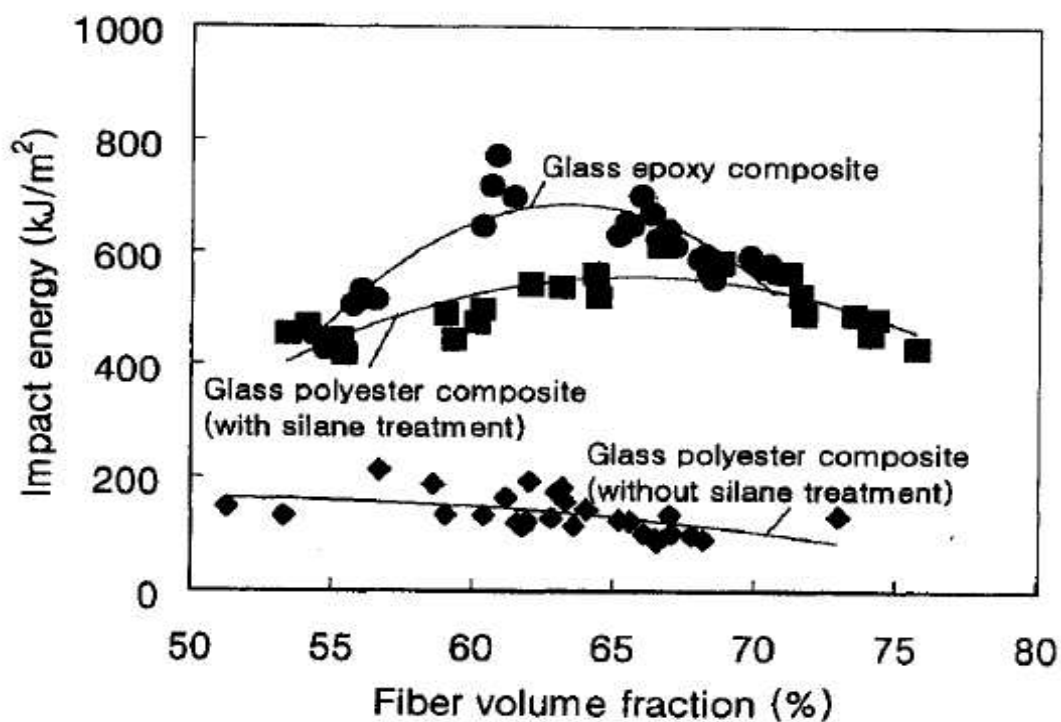


Fig.3.9 – Quantidade de energia absorvida vs fração volúmica de fibra^[3.18]

Resultados semelhantes já haviam sido atingidos por Williams e Rhodes^[3.20], revelando nos seus estudos que pelo menos uma percentagem de 40% de resina é necessária para que haja tolerância adequada ao dano.

3.3.2 b) Efeito da Sequência de Empilhamento e Arquitectura do tecido

Outro parâmetro a ter em conta, quando se projecta um laminado compósito, reside na orientação e sequência de empilhamento das camadas.

A origem de elevadas tensões normais e de corte nos bordos livres de um laminado deve-se, geralmente, a uma falta de correspondência entre os coeficientes de Poisson entre camadas adjacentes. A utilização de diversas sequências de empilhamento pode alterar algumas solicitações de compressão para tracção, de modo a reduzir o risco de delaminação.

Construindo um laminado utilizando diferentes orientações por camada (tornando-o quasi-isotropico), permite com que este suporte maiores cargas, verificando-se que é possível minimizar a área danificada garantindo uma rigidez à flexão semelhantes em ambas as direcções axiais e radiais.^[3.21; 3.22]

Tab.3.4 – Flexibilidade, dimensões e sequência de empilhamento dos provetes testados e respectivos resultados. DTL corresponde a delamination threshold loads^[3.21]

Flexibility	Plate dimensions [mm]	Stacking	Specimen	Quasi-static tests		
				Maximum Load [kN]	DTL [kN]	%
High	130 × 130 × 1.2 (108.3)	[45 ₂ /90 ₂ /-45 ₂ /0 ₂]	VE-A1	0.819	0.794	96.95
		[0 ₂ /90 ₂] _s	VE-B1	0.734	0.722	98.37
Medium	60 × 60 × 1.2 (50)	[45 ₂ /90 ₂ /-45 ₂ /0 ₂]	VE-A2	0.845	0.747	88.40
		[0 ₂ /90 ₂] _s	VE-B2	0.755	0.675	89.40
	130 × 130 × 2.4 (54.17)	[0 ₂ /45 ₂ /-45 ₂ /90 ₂] _s	VE-A3	1.948	1.708	87.68
		[0 ₂ /90 ₂] _{2s}	VE-B3	1.747	1.519	86.95
Low	60 × 60 × 2.4 (25)	[0 ₂ /45 ₂ /-45 ₂ /90 ₂] _s	VE-A4	2.198	1.794	81.62
		[0 ₂ /90 ₂] _{2s}	VE-B4	1.997	1.731	86.68
	75 × 75 × 4.8 (15.63)	[0 ₂ /45 ₂ /-45 ₂ /90 ₂] _{2s}	VE-A5	5.800	3.916	67.52
		[0 ₂ /90 ₂] _{4s}	VE-B5	5.067	3.959	78.13
	130 × 130 × 7.2 (18.06)	[0 ₂ /45 ₂ /-45 ₂ /90 ₂] _{3s}	VE-A6	10.525	7.015	66.65
		[0 ₂ /90 ₂] _{6s}	VE-B6	9.431	6.800	72.10

Foi igualmente verificado que a sequência empilhamento exerce alguma influência na dimensão e forma do dano provocado. No entanto, a energia de impacto surge como sendo a principal variável que afecta essa forma de dano^[3.22]

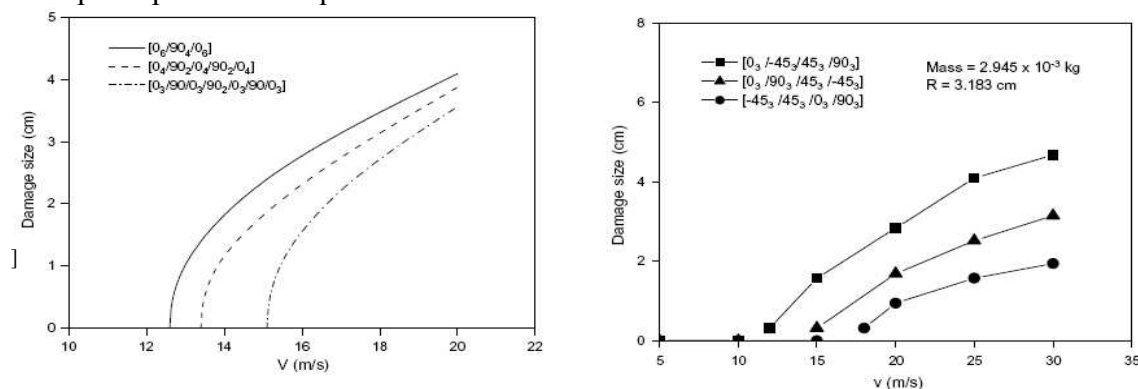


Fig.3.10 e 3.11 – Relação entre a velocidade de impacto e dimensões de dano, para diferentes sequências de empilhamento^[3.21]

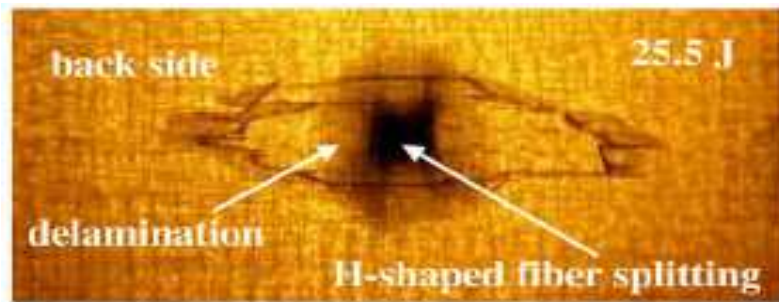


Fig.3.12 – Fotografia da área danificada de um provete, após realizado ensaio de impacto. A utilização de forte iluminação em contra-luz facilita a identificação dos modos de dano^[3,16]

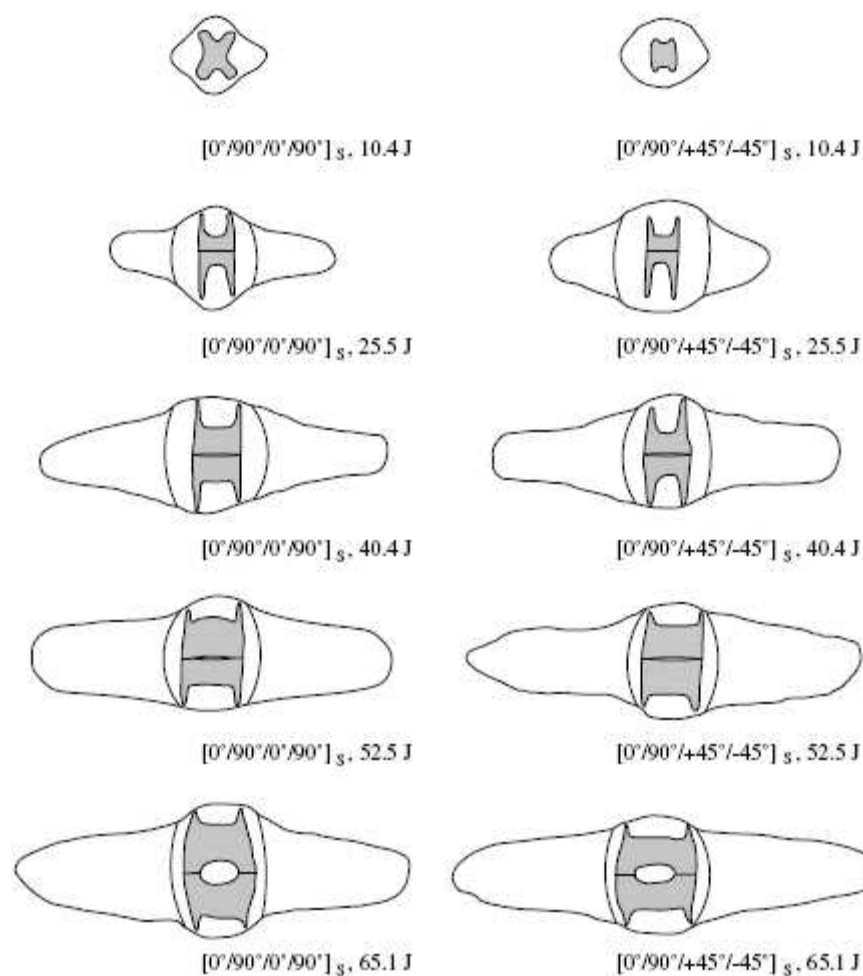


Fig.3.13 – Representação esquemática do contorno de área danificada utilizando sequencias de empilhamento e energias de impacto distintas^[3,16]

É importante igualmente ter em conta que a arquitectura do tecido utilizado tem uma importante influencia na capacidade de absorção de energia, sendo demonstrado que um entrelaçamento do tecido em cesto permite uma absorção de energia 10% superior do que uma configuração simples^[3.13.]

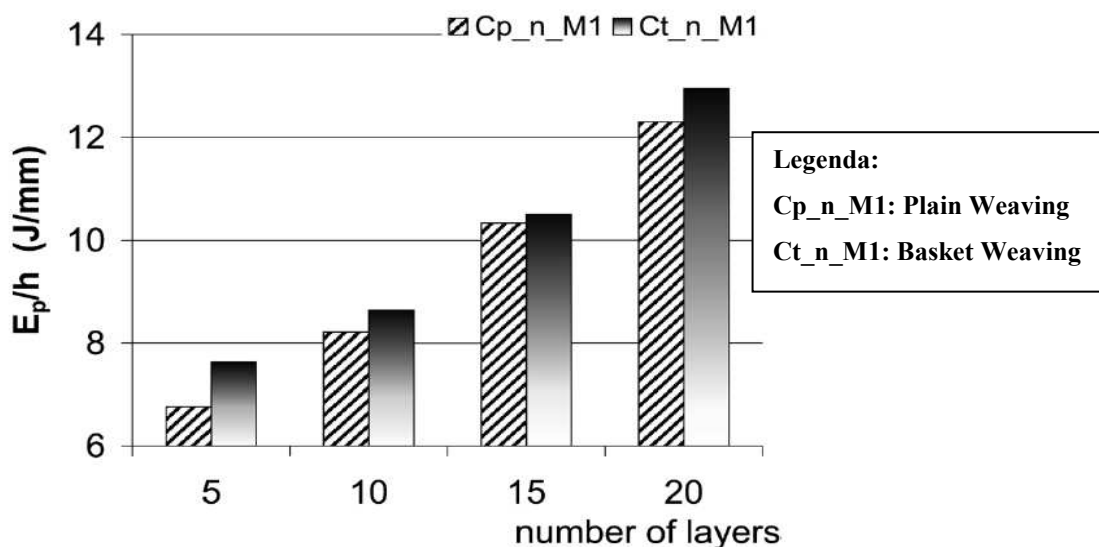


Fig.3.14 - Efeito da estrutura de reforço na capacidade de absorção de energia, medido através de ensaios de queda livre de peso^[3.13]

3.3.2 c) Influência da Espessura

A espessura do material laminado é um factor que tem sido alvo de estudo específico, de forma a compreender a sua influência no comportamento de um material compósito quando sujeito a impactos a baixa velocidade

Caprino, C., V.Lopresto^[3.23], verificaram a existência de uma relação directa entre a força necessária para o início de delaminação e a espessura de um material compósito, sendo necessário um impacto de maior intensidade para provocar a delaminação de um laminado mais espesso.

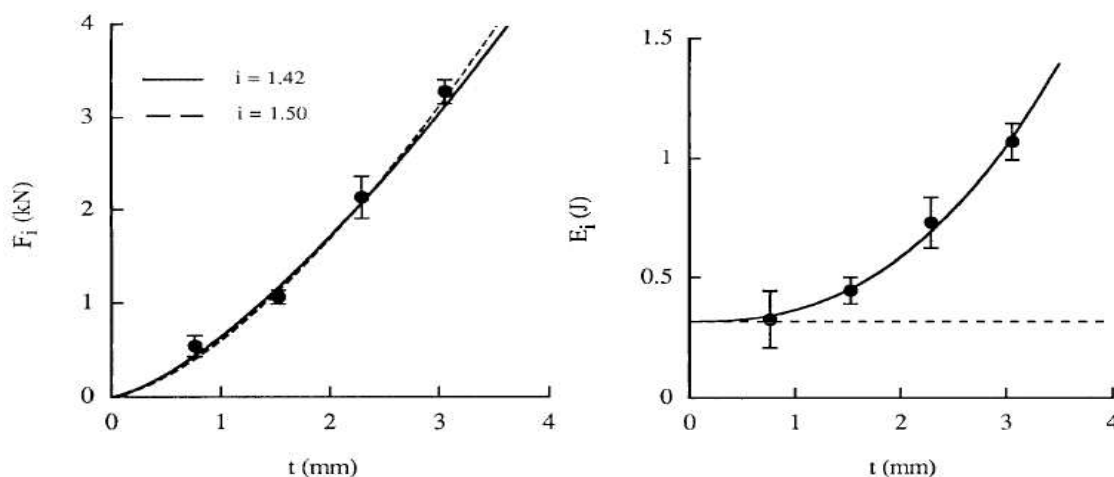


Fig.3.15 e 3.16 – Força e Energia necessárias para a ocorrência da primeira delaminação, mediante diversos valores de espessura^[3.23]

Por outro lado, também foi possível verificar que a energia necessária para que haja início de delaminação é resultante da combinação da deformação de flexão do provete e de deformação local na zona de impacto, sendo esta ganhando esta última maior importância com o aumento da espessura.

Outro aspecto demonstrado por Belingardi, G. e R. Vadori ^[3.24] prende-se com o facto que para laminados mais espessos, é necessária uma maior quantidade de energia para ocorrer perfuração.

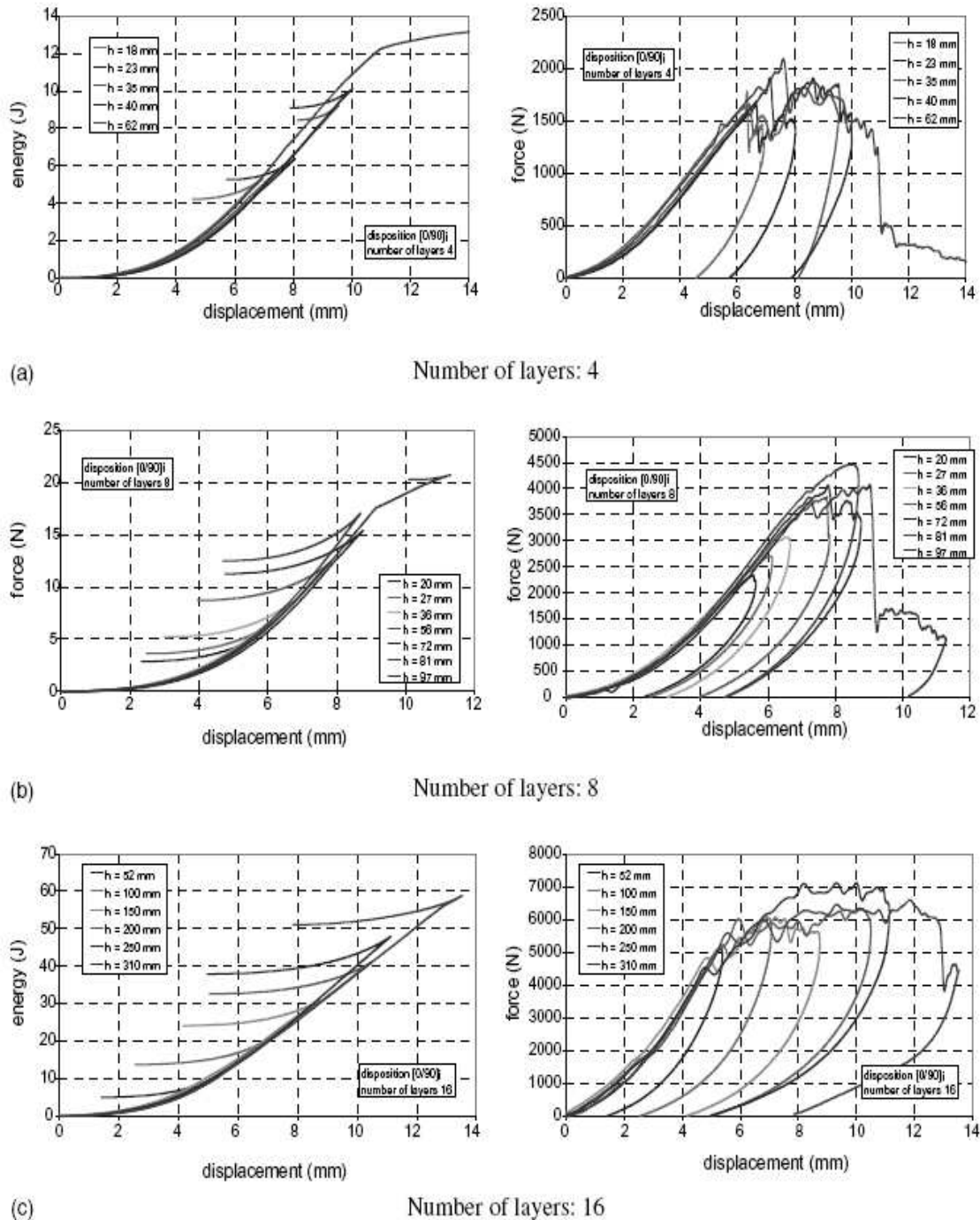


Fig.3.17– Relação entre energia absorvida/solicitação e deformação para diferentes espessuras

a) 4 camadas; b) 8 camadas; c) 16 camadas ^[3.24]

Nos estudos de Sutherland e Soares^[3.25], foram utilizados diversos materiais e diferentes espessuras, tendo sido possível concluir que o efeito da espessura é um factor mais influente do que o material utilizado como reforço, relativamente à rigidez de laminados que possuam massas idênticas.

Faur-Csulat^[3.13], mostrou ainda a influencia que o número de camadas utilizadas teria, verificando-se que à medida que o número de camadas utilizadas aumenta, a eficiência individual de absorção de energia também aumenta.

3.4 - Caracterização de dano de impacto a baixa-velocidade

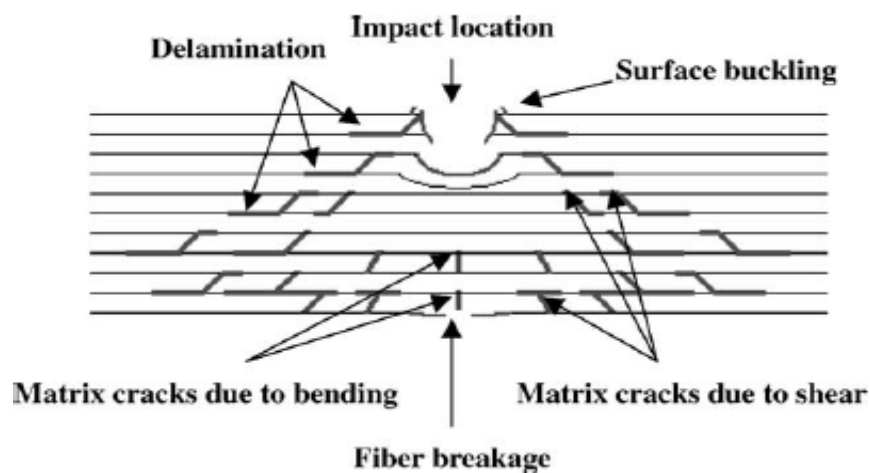


Fig.3.18 – Representação esquemática de modos de dano típicos, resultantes de uma situação de impacto a baixa velocidade em materiais compósitos laminados

Segundo Marcelo^[3.26] pode concluir-se que:

- o dano causado num impacto a baixa velocidade reflecte-se fundamentalmente na rotura da matriz, sendo a rotura nas fibras inexistente ou em pequena escala
- existe uma relação entre a rotura da matriz nas camadas e delaminação das interfaces

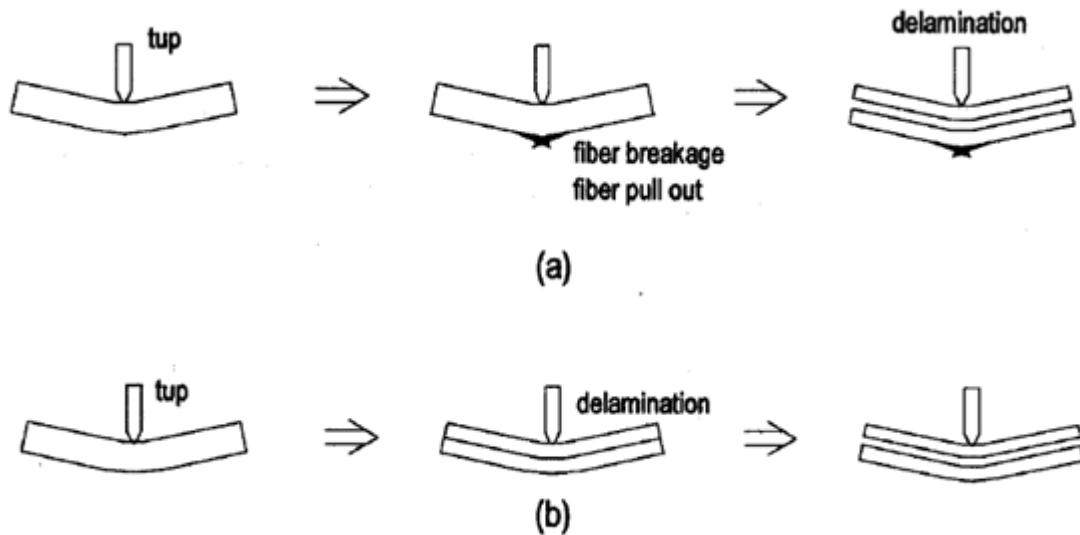


Fig.3.19 – Esquema de sequência de fractura a) para elevadas forças de corte interlaminar b) para baixas forças de corte interlaminar^[3.18]

- a delaminação apenas ocorre entre camadas com orientações distintas, sendo a ocorrência deste fenómeno mais propensa quanto maior for a diferença de orientação entre camadas

- o tamanho das delaminações é superior nas interfaces próximas à superfície solicitada e menor nas interfaces mais distantes.

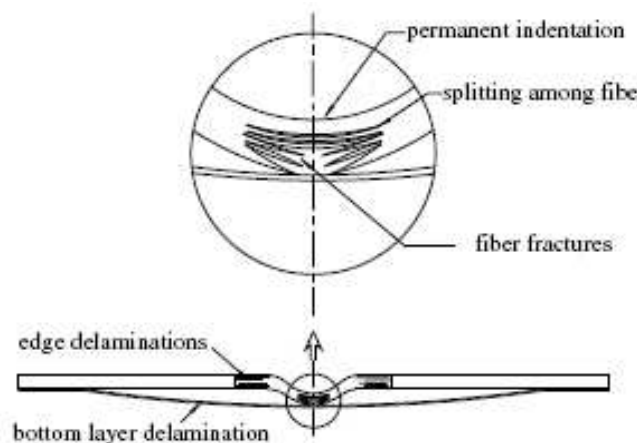


Fig.3.20 – Representação esquemática de diferentes modos de dano^[3.16]

Nos estudos de M. Aktas e al.^[3,16] foi ainda demonstrado que mediante um caso de impacto de baixa velocidade verificavam-se os seguintes fenómenos:

- Indentação permanente na região de impacto
- Separação de fibras não danificadas devido a deformação causada em torno da área onde ocorreu o impacto
- Quebra de fibras devido a tracção ou flexão. Com excepção da camada inferior, a quebra de fibras inicia-se nas camadas mais distantes da superfície de impacto, afectando as camadas mais internas à medida que a energia de impacto aumenta
- Delaminação nos bordos circundantes à região que sofreu o impacto
- Delaminação da camada inferior

3.5 - Técnicas Empregues

Com a crescente investigação relativamente ao melhoramento da capacidade de absorção de energia dos materiais compósitos, e aumento de resistência ao dano, têm sido desenvolvidas projectos que têm mostrado melhorias consideráveis nesta área específica.

A capacidade de tolerância ao dano de um material compósito pode ser bastante melhorada se a iniciação e crescimento de delaminação for prevenida ou retardada. Estudos realizados para controlar o efeito de delaminação têm-se centrado em obter melhorias na resistência à fractura por corte interlaminar e redução de tensões interlaminares.

3.5.1 - Interlayer Toughening – Método em Estudo

O processo de Interlayer Toughening (Aumento de tenacidade Interlaminar), consiste na introdução de um material entre as laminas do material compósito. Pode existir dois tipos de fortalecimento interlaminar – homogéneo e heterogéneo.



Fig.3.21– Esquema da disposição de camadas interlaminares

No trabalho realizado por Tsotsis ^[3.27] é estudado em maior profundidade os efeitos de fortalecimento interlaminar homogéneo. Este tipo de fortalecimento consiste na introdução de um filme de resina (termoplástico ou termoendurecível), entre camadas do material compósito, com tenacidade superior à resina utilizada na matriz.

Este material pode ser aplicado da seguinte forma:

- Laminando directamente o filme no pré-impregnado
- Espalhar uma película de filme na superfície da lâmina, após solidificação da resina.

É indicado que o material a ser utilizado deve apresentar uma elevada porosidade e permeabilidade suficiente, de forma a permitir que haja uma boa transferência e adesão de resina entre camadas.

Os materiais termoplásticos são mais indicados para este tipo de aplicação, uma vez que apresentam melhores propriedades ao impacto. Este trabalho permitiu atingir resultados bastante reveladores, que superaram mesmo as expectativas iniciais, mostrando que o uso de camadas interlaminares é um excelente método para a melhoria das propriedades de impacto de um material compósito.

Por outro lado, demonstrou ainda que a introdução de materiais interlaminares permitia uma estabilização das fibras estruturais do compósito, bem como a melhoria das suas propriedades à compressão.

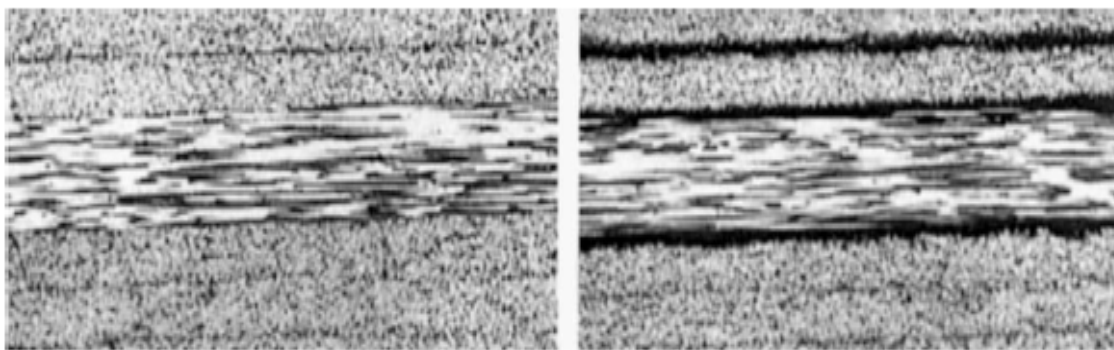


Fig.3.22 – Secção de material compósito não reforçado e reforçado com camadas interlaminares.
[3.28]

Nos estudos de Duarte, Herszberg, et al.^[3.28] foi possível verificar que utilizando camadas interlaminares de baixo modulo seria possível obter melhorias significativas a nível de resistência a impacto e redução de área danificada.

Tab.3.5 – Materiais utilizados nas camadas interlaminares no estudo de Duarte, Herszberg, et al.^[3.28]

Designation	Material	Manufacturer	Moulded thickness (mm)	Melting temperature (°C)
XAF2210	Polyolefin	XIRO	0.030	145
XAF2210P	Polyolefin	XIRO	0.030	145
XAF2065	Polyolefin	XIRO	0.039	125
1a8s18	Copolyamide	Protechnic	0.018	145
Uitem 1000	Polyetherimide	General Electric	0.048	225

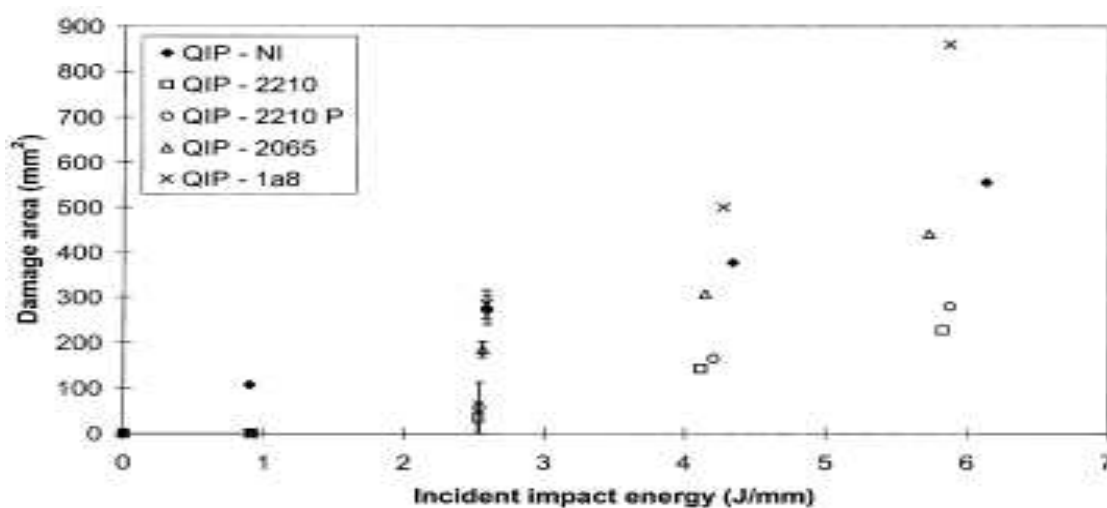


Fig.3.23 – Área danificada em material não reforçado e com diferentes tipos de reforço interlaminar^[3.28]

Por outro lado, também foi possível notar que usando um material com estas características iria levar a uma forte quebra nas propriedades de compressão, o que leva a concluir que este tipo de reforço interlaminar só deveria ser utilizado em componentes não solicitadas ou com baixa solicitação.

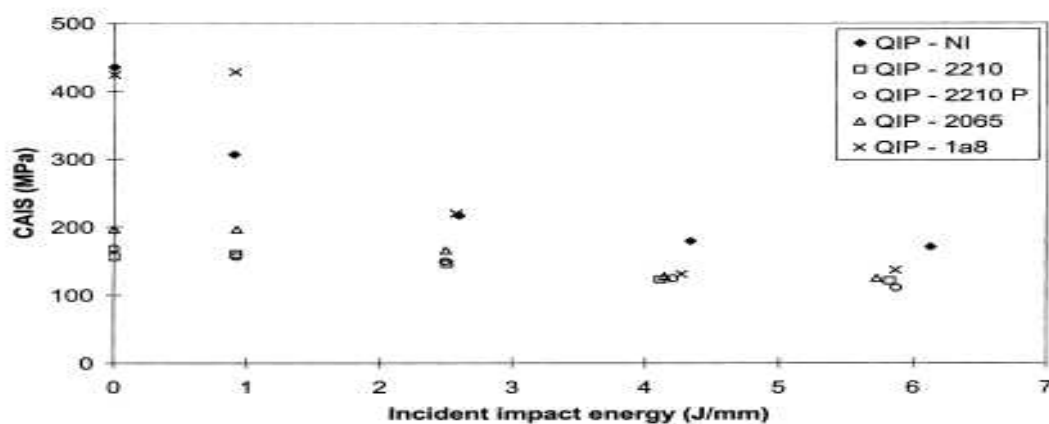


Fig.3.24 – Compressão após impacto de um material não reforçado, ou utilizando diferentes tipos de reforço interlaminar^[3.28]

Para melhorar as propriedades de impacto de um componente estrutural, podemos utilizar materiais com um módulo de corte superior, o que levaria igualmente a um aumento da resistência ao dano, mas iria permitir melhores características relativas à compressão após impacto.

Nos trabalhos de Landolt e Magalhães^[3.29] foram estudados o efeito de fortalecimento interlaminar heterogêneo, comparando a influência de diferentes materiais de reforço. Este tipo de fortalecimento consiste na introdução de partículas de borracha ou termoplástico entre as camadas do material compósito

Os resultados obtidos mostraram que a adição de material interlaminar iria levar à queda de propriedades mecânicas do material compósito, mas teriam um aumento significativo da resistência ao impacto. Foi demonstrado que a adição de pós de cortiça seria uma solução com boas potencialidades, apresentando uma boa relação de compromisso entre resistência ao impacto e propriedades mecânicas do compósito



Fig.3.25 – Micrografia da secção de um material compósito laminado, reforçado interlaminarmente por partículas^[3.30]

Trabalhos desenvolvidos por Derkowsk e Sue ^[3.30] estudaram a influência do tamanho das partículas utilizadas e do modo como se encontram dispersas nas camadas interlaminares, mostrando que para uma maior quantidade de partículas, dispostas com uma maior proximidade, seriam possíveis obter melhores propriedades de impacto.

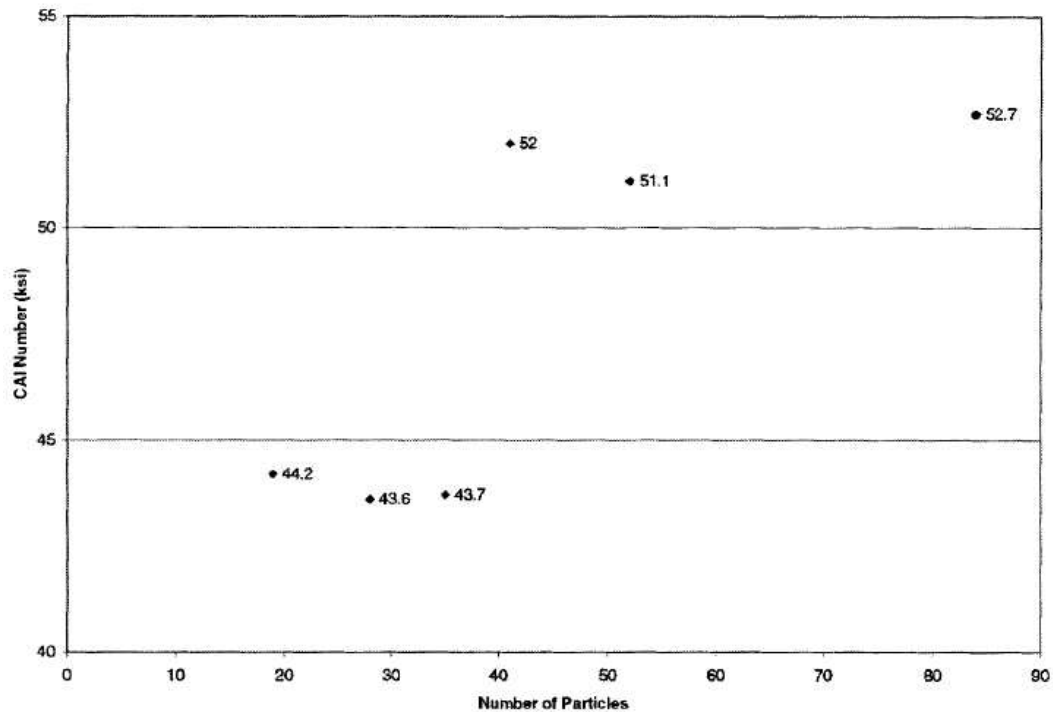


Fig.3.26 - Relação CAI com o numero de partículas, numa camada interlaminar de 1,90 mm ^[3.30]

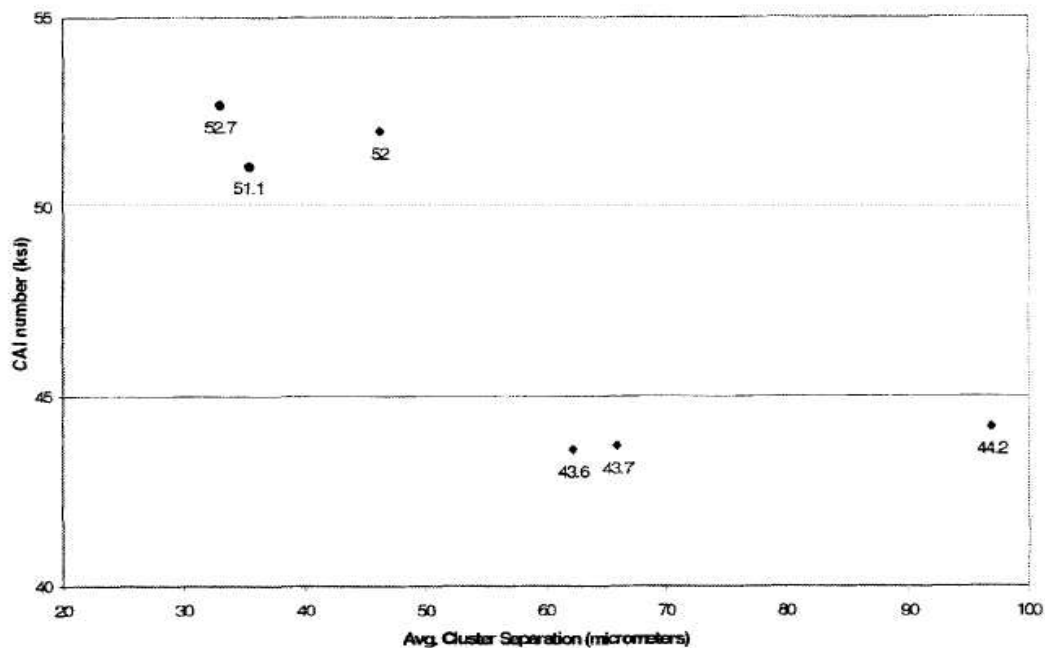


Fig.3.27 - Relação CAI com separação de aglomerado de partículas , numa camada interlaminar de 1,90 mm ^[3.30]

Por outro lado, também mostra que a dimensão das partículas influencia as propriedades de impacto, tendo sido observado que menores dimensões das partículas utilizadas e a obtenção de uma espessura constante nas camadas interlaminares permitem melhores propriedades ao impacto.

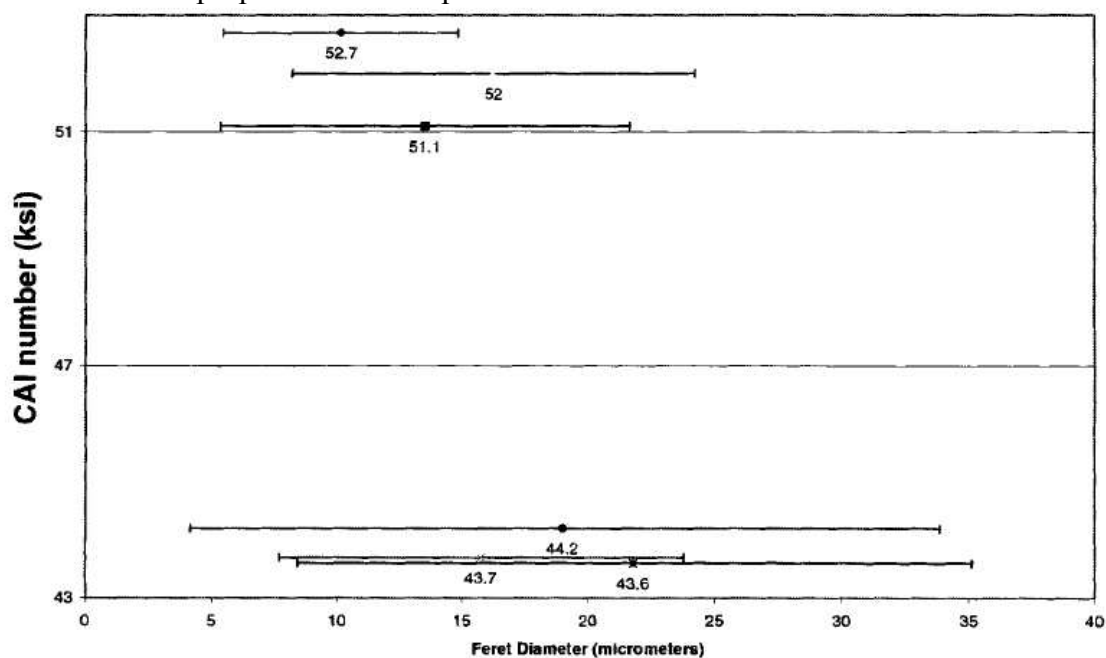


Fig.3.28 - Relação CAI com separação de diâmetro de partículas interlaminares, numa camada interlaminar de 1,90 mm^[3.30]

3.5.2 - Uso de camadas amortecedoras

Nos trabalhos de Kishore, Khan et al.^[3.3.1] foram estudadas formas de ser possível melhorar a absorção de energia de materiais rígidos mediante casos de impacto. Nestes trabalhos recorria-se à criação de regiões em que a aderência entre camadas fosse inferior, em vista de poder controlar o local de iniciação de fenda e o percurso percorrido pela mesma, de forma a esta percorrer a melhor distância possível e consequentemente, levar a uma maior absorção de energia

3.5.3 Outros Métodos em Desenvolvimento em compósitos laminados

3.5.3 a) Stitching – Redução de Delaminagem

Os materiais compósitos laminados estão sujeitos a sofrer danos devido a impactos, durante a sua fase de produção ou em serviço. Este tipo de danos podem ser fatais e limitativos relativamente ao tempo de vida útil de um material compósito. Neste tipo de materiais, a delaminagem surge como o modo de cedência mais comum, devido à pouca resistência mecânica e falta de reforço ao longo da espessura do material laminado. De forma a resolver esse problema podem-se recorrer a duas soluções:

- Utilizar tecidos fibrosos de arquitectura tridimensional
- Utilizar o método Stitching

O uso de tecidos fibrosos 3D tem o inconveniente da sua produção ser lenta e estar fortemente dependente da capacidade das máquinas têxteis responsáveis pela sua produção.

Deste modo, o método de “Stitching” surge como o processo mais viável e eficaz para aumentar a resistência mecânica de um material compósito ao longo da espessura.^[3.32]

Estudos realizados por Aymerich e Priolo^[3.33] permitiram verificar que o uso do método Stitching na produção de laminados não tem um efeito relevante na porção de fibras quebradas ou de dano interlaminar mediante casos de impacto. No entanto, o uso deste processo influencia consideravelmente a distribuição de dano por toda a espessura do laminado, retardando a delaminagem nas camadas mais próximas do local de impacto. Esta característica leva a que estes laminados consigam absorver maior quantidade de energia, mas sofram danos maiores a nível estrutural, para impactos de elevada energia.

Ainda no campos das desvantagens, a introdução de pontos (stitches) pode levar à danificação das fibras de reforço e pode haver uma concentração de resina nos locais onde os pontos são aplicados. Foi demonstrado no trabalho de Larsson^[3.34] que a introdução de pontos leva a consideráveis quebras no modulo de elasticidade e resistência à tracção de um material laminados.

Tab.3.6 – Resultados de ensaios de tracção de um material laminado, com ou sem stitching.^[3.34]

Direction ^b		Modulus of elasticity (GPa)	Tensile strength (MPa)	Fracture strain (%)
Stitching	Testing			
		53.3 (2.8)	449 (10)	0.93 (0.03)
⊥	⊥	47.0 (2.4)	428 (12)	1.04 (0.08)
⊥		54.0 (2.4)	447 (20)	0.93 (0.04)
⊥	⊥	51.9 (3.0)	454 (22)	0.95 (0.06)
—		55.6 (2.1)	568 (18)	1.08 (0.03)
—	⊥	53.1 (1.5)	566 (29)	1.13 (0.07)

^aValues are normalized to a fibre content of 60% by volume

^bA value in parentheses denotes the standard deviation of a single observation

Verifica-se que em placas utilizando Stitching, a expansão do dano tem a forma cilíndrica, enquanto em placas que não utilizem este método, o dano expande-se sobre uma forma cônica.^[3.35]

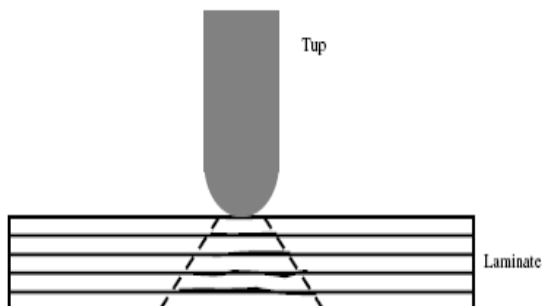


Fig.3.29 – Expansão de dano em laminado sem pontos

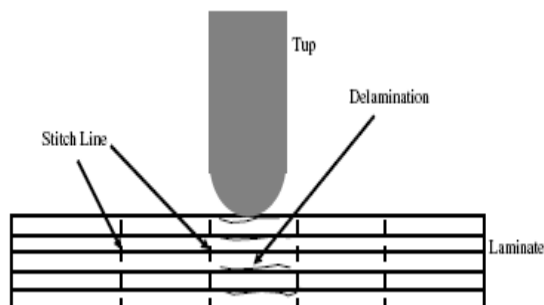


Fig.3.30 – Expansão de dano em laminado com pontos

Por outro lado, este método melhora consideravelmente a resistência à compressão após impacto do material, uma vez que os pontos mantêm-se intactos após impacto e diminuem a instabilidade das camadas delaminadas devido a solicitações de compressão.^[3.32; 3.33; 3.34; 3.35]

Tab.3.7 - Resultados de ensaios de impacto em compósitos com e sem pontos^[3.32]

Material types	Properties				
	Thickness	Impact energy/ thickness, [J/mm]	Impact energy loss/ thickness, [J/mm]	Damage area [mm ²]	Residual compressive strength [MPa]
ORT-SH (2D)	4.184	4.18	2.33	994 (±110)	201 (±7)
	4.780	5.23	2.95	1366 (±379)	193 (±26)
	4.793	6.26	3.39	1333 (±97)	187 (±12)
	4.841	7.32	4.27	1623 (±175)	174 (±10)
ORT-05 (3D)	4.376	4.57	2.22	656 (±83)	231 (±15)
	4.216	5.93	2.98	918 (±28)	202 (±23)
	4.043	7.42	3.66	798 (±79)	203 (±12)
	4.167	8.40	4.29	985 (±113)	171 (±15)
ORT-05H (3D)	4.016	4.98	2.51	735 (±138)	197 (±24)
	3.968	6.30	3.13	887 (±284)	178 (±2)
	3.968	7.56	4.00	988 (±46)	181 (±11)
	4.037	8.67	5.10	1537 (±120)	170 (±19)
ORT-10H (3D)	4.556	4.39	2.07	798 (±97)	232 (±22)
	4.488	5.57	3.00	996 (±213)	198 (±13)
	4.431	6.77	3.47	1118 (±254)	190 (±20)
	4.528	7.73	4.71	1293 (±116)	172 (±11)

Note: ORT-SH: 2D specimen of prepreg sheets; ORT-05: machine-stitched 3D specimens of 5 mm wide prepreg tapes; ORT-05H: hand-stitched 3D specimens of 5 mm wide prepreg tapes; ORT-10H: hand-stitched 3D specimens of 10 mm wide prepreg tapes.

No trabalho de Byun , Song, et al.^[3.32] realizaram-se testes em laminados de carbono/epoxido, tendo sido possível verificar que realizar Stitching por máquina obtinha melhores propriedades que Stitching manual. No entanto, no mesmo trabalho verificou-se que o método Stitching só é eficaz até uma determinada energia de impacto, e que para energias superiores a esse patamar, os resultados obtidos entre placas laminadas com pontos e sem pontos, é sensivelmente idêntico.

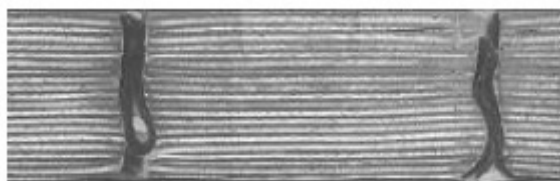


Fig.3.31 – Stitching realizado por máquina^[3.32]

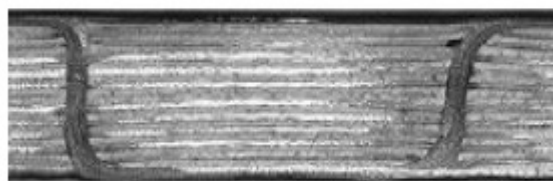


Fig.3.32 – Stitching manual^[3.32]



Fig.3.33 – Laminado Sem Stitching^[3.32]

3.5.3 b) Z – Pinning

Outro método recentemente estudado, que surge com objectivos idênticos ao método Stitching, ou seja, a melhoria das propriedades mecânicas ao longo da espessura com o objectivo de evitar ou reduzir o risco de delaminação, é o método de Z-Pinning. Este método passa pela inserção, de pinos metálicos ao longo da espessura da placa laminada.

Os trabalhos realizados por Zhang e Hounslow^[3.36] vieram a mostrar que este método melhorou realmente a resistência de impacto para as espessuras estudadas bem como para toda a gama de energia de impacto aplicado (entre 10 J e 40 J).

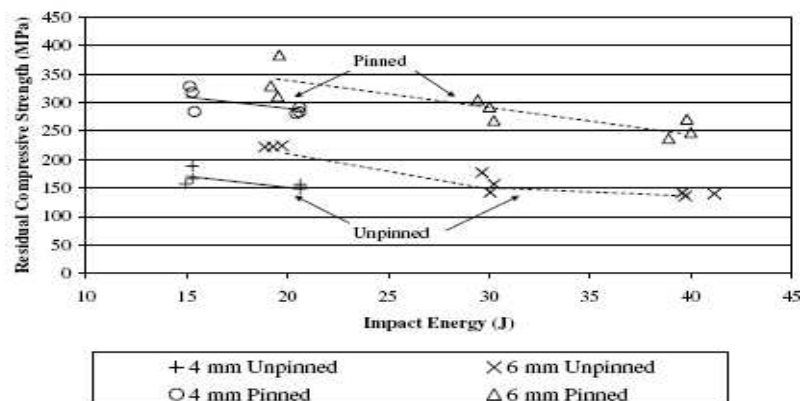


Fig.3.34 – Força Residual de Compressão versus energia de impacto^[3.36]

No entanto é preciso ter em conta que a inserção de pinos leva a uma ligeira diminuição na quantidade de energia absorvida.

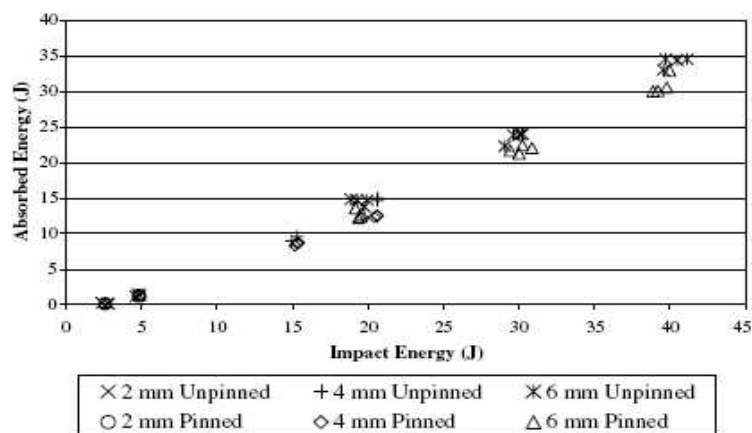


Fig.3.35 – Quantidade de Energia Absorvida versus Energia de Impacto^[3.36]

Foi possível verificar que houve reduções na área danificada até 64%, sendo este método mais eficaz quanto maior for a espessura da placa laminada e quanto maior for a energia de impacto aplicada. Por outro lado, este método também permite a melhoria de compressão após impacto, bem como aumentar a deformação de cedência do material.

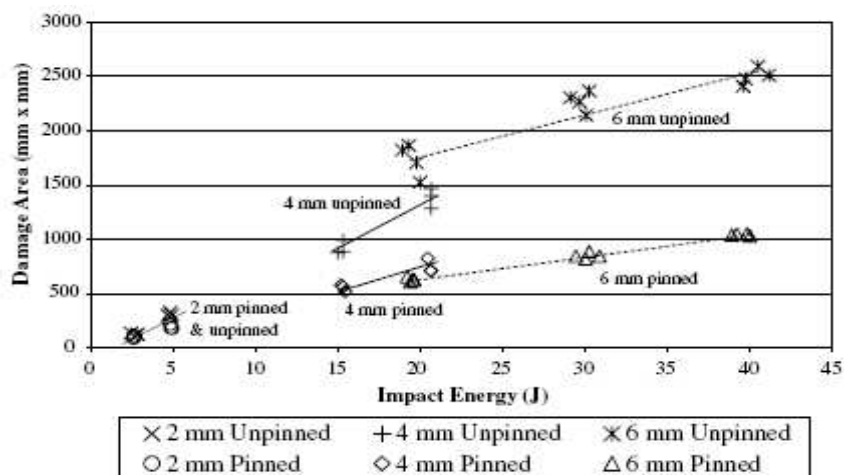


Fig.3.36 – Área Danificada versus Energia de Impacto^[3.36]

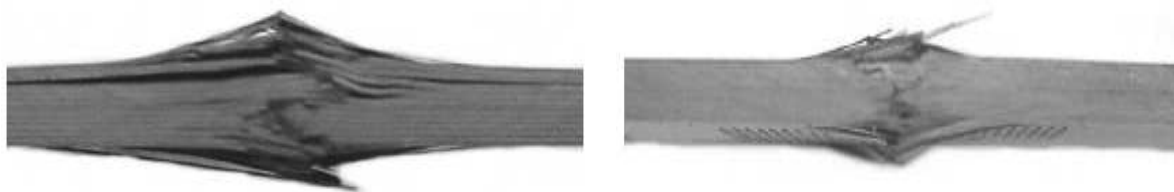


Fig 3.37 – Vista lateral da zona de cedência num ensaio de compressão após impacto, em provetes de 6 mm de espessura a) provete sem pinos b) provete com pinos^[3.36]

3.5.3 c) – Aumento da Tenacidade da Matriz

Nos trabalhos de Tsotsis^[3.27] e de Landolt e Magalhães^[3.29] é indicado que uma forma de melhorar a capacidade de absorção de energia passa pelo aumento da tenacidade do material compósito através do aumento de tenacidade da matriz. Para este efeito é sugerido a mistura de termoplásticos na resina. Após a cura, dependendo dos termoplásticos utilizados, pode-se obter uma mistura homogênea com a resina, separada por fase, ou podem surgir partículas sólidas dispersas pela matriz.

Estas considerações são confirmadas noutros trabalhos Williams e Rhodes^[3.20], e de Ramos, Costa, e tal.^[3.37] em que as resinas de epoxidoque continham aditivos termoplásticos e elastómeros apresentaram maior capacidade de absorção de energia de impacto.

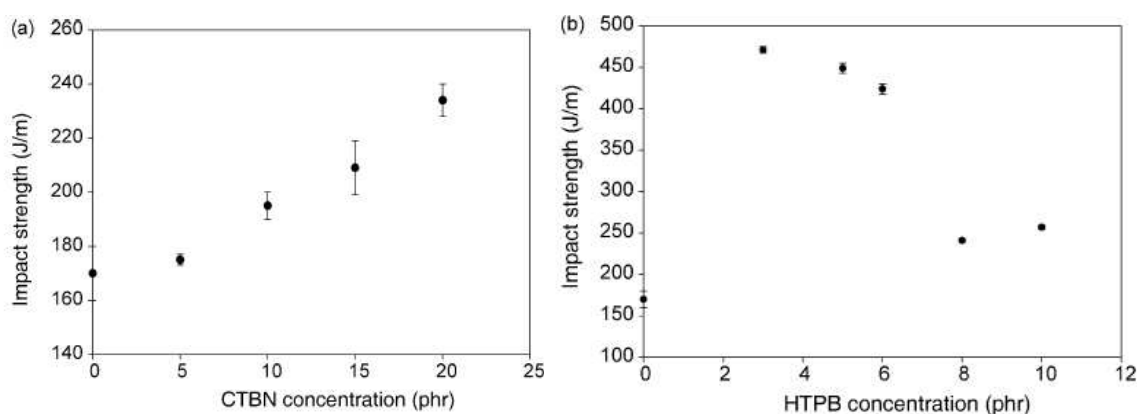


Fig.3.38 – Aumento da resistência ao impacto de resina de epoxido , misturada com elastómeros diferentes: a) CTBN ; b) HTPB^[3.37]

Tab.3.8- Valores de resistência à fractura e energia de fractura a impactos de baixa velocidade, em resinas epoxídicas com e sem elastómeros^[3.37]

Values of the fracture toughness, K_{Ic} , and the fracture energy, G_{Ic} , at low impact velocities				
Impact velocity (m sec ⁻¹)	Specimen	t_f (μ sec)	K_{Ic} (MPa m ^{1/2})	G_{Ic} (kJ m ⁻²)
<i>Unmodified epoxy</i>				
0.33	SENB	800	0.82	0.35
0.83	DEN	625	1.10	0.62
<i>Rubber-modified epoxy</i>				
0.50	SENB	930	1.45	1.12
0.99	DEN	750	1.61	1.38

3.5.3.d) Introdução de Nanopartículas

A introdução de nanopartículas em materiais compósitos, revela-se como sendo outro importante método a ter em consideração para obter melhorias significativas nas propriedades de impacto de um sistema material.

De certa forma, a introdução de nanopartículas pode ser incluída como um método de aumento de tenacidade da matriz (matrix toughening) uma vez que consiste na dissolução e nano-partículas de argila numa matriz polimérica.

Nos estudos realizados por Avila, Soares, et al^[3.38] foi mostrado que para baixas energias de impacto (20 J), a introdução de nano partículas levava a um importante aumento de absorção de energia próximo dos 48%. Para médias (60J) e elevadas energias (80J) de impacto, apesar de menos significativos, também foram observados aumentos na capacidade de absorção de energia, na ordem dos 15% e 4%, respectivamente

Por outro lado , a introdução de nanopartículas também conduz a uma alteração na morfologia do dano, passando este a ser predominantemente intralaminar, em vez se de manifestar interlaminarmente.

Outro aspecto observado neste trabalho prende-se com o facto do sistema material apresentar propriedades optimizadas com uma percentagem de nanopartículas na ordem dos 5%

Para além dos estudos realizados para a obtenção de melhores propriedades de impacto de materiais compósitos reforçados por fibras, também tem vindo a ser estudada a aplicabilidade de nanopartículas em materiais compósitos constituídos por espumas sintéticas. Este tipo de material possui baixa densidade, e é formado por microbolões ocultos de vidro, incorporados na matriz polimérica. Uma vez que a porosidade neste tipo de espumas existe na forma de partículas ocultas, estes materiais são classificados como espumas de poros fechados. Este tipo de estruturas confere várias vantagens como baixa densidade, elevada resistência mecânica e baixo coeficiente de absorção de humidade. Também possuem uma boa capacidade de manuseamento e de conferir formas desejadas. Devido ao crescente uso deste tipo de espumas, tem-se apostado no desenvolvimento da sua capacidade de resistir a impacto e absorver energia. Para além da adição de partículas de borracha para reforçar a matriz, previamente mencionada, têm surgido trabalhos em que se estuda a introdução de nano-argilas na espuma.

Os estudos feitos Woldeesenbet^[3.39] mostram que a introdução de partículas de argila é responsável pelo melhoramento da suportar maiores solicitações de impacto, sendo capazes de suportar maior quantidade de energia para que haja iniciação de fenda.

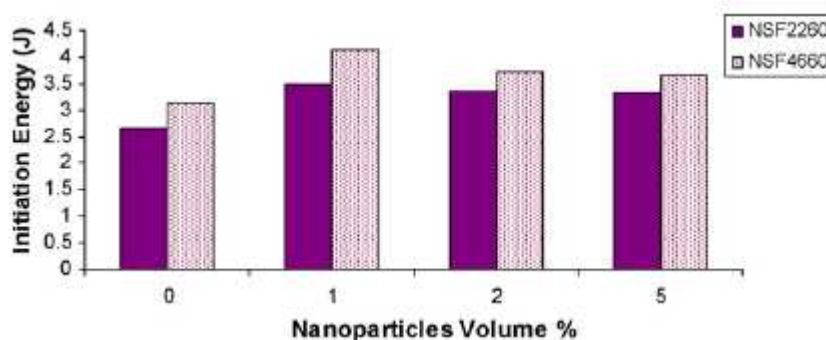


Fig.3.39 – Energia de Iniciação de fenda para duas espumas sintéticas sujeitas a impactos a 2 m/s , contendo diferentes percentagens de nanopartículas^[3.39]

No entanto, a sua introdução só é benéfica até 1% de fracção volumétrica, uma vez que para valores superiores levam a um aumento de fragilidade da matriz.

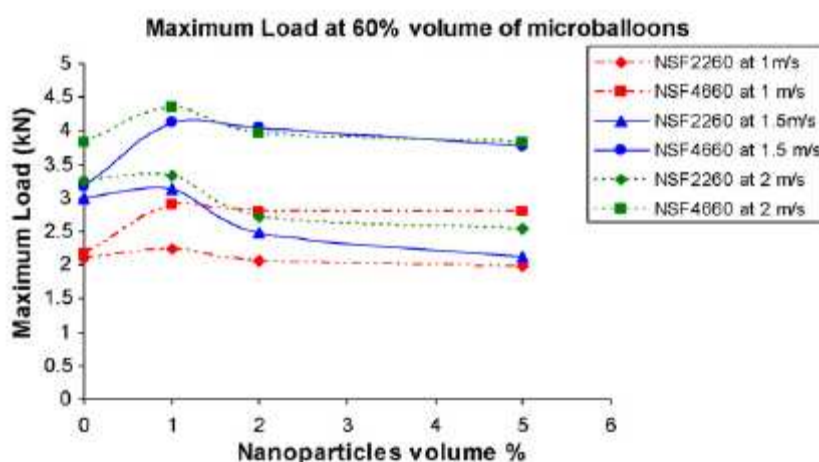


Fig.3.40 – Carga máxima de impacto sustida por diversas espumas sintéticas, possuindo uma fracção volúmica de 60% de microbalões, para diferentes percentagens de nanopartículas^[3.39]

A utilização de nano-partículas de argila rígida actuam como inibidores de propagação de fenda, obrigando as fendas a originarem-se e desenvolverem-se em locais diferentes.

3.5.3 e) Hibridização

O método de hibridização consiste na combinação de fibras estruturais de reforço e fibras com elevada deformação de cedência. A utilização de fibras com elevada deformação de cedência permite obter melhorias nas propriedades de impacto de um material compósito que seja reforçado por fibra de vidro.

Os materiais compósitos híbridos podem ser de três tipos:

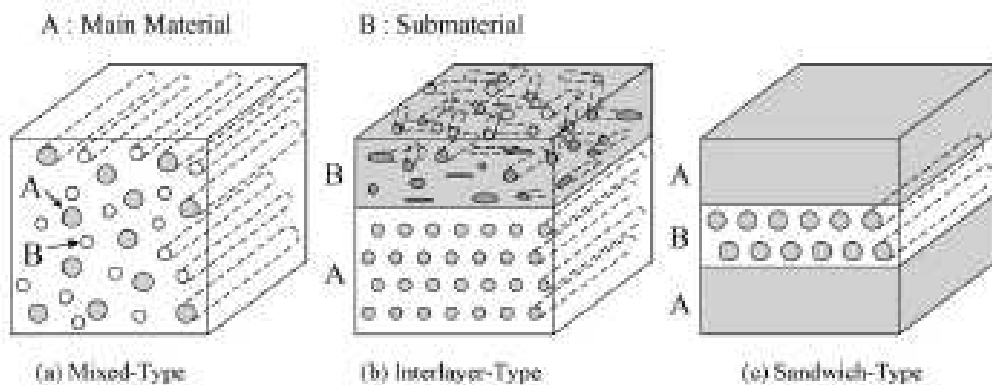


Fig.3.41 – Representação esquemática de diferentes configurações de materiais híbridos^[3,40]

Misto (a) – possui dois ou mais tipos de fibras unidireccionais na mesma matriz. A combinação de fibras diferentes permite obter uma situação de compromisso entre o módulo de elasticidade e deformação de cedência dos materiais conjugados

Interlaminar (b) – caracterizada pela inserção de uma camada interlaminar de fibras curtas, partículas ou de uma camada adesiva de elevada tenacidade entre laminas. Este tipo de hibridização tem como objectivo uma melhoria das propriedades interlaminares do material compósito, reduzindo no entanto a força de união entre camadas.

Sandwich (c) – Resulta de laminar alternadamente dois materiais homogêneos distintos, de modo a melhorar resistência ao crescimento de fendas de fadiga, levando no entanto a um decréscimo da força união entre camadas

As propriedades de um sistema híbrido formado a partir de duas componentes, podem ser estimadas através da lei das misturas^[3,8]:

$$P_H = P_1 V_1 + P_2 V_2$$

Em que P_H corresponde à propriedade que se pretende estimar, P_1 e P_2 correspondem à propriedade em estudo, relativamente aos dois materiais utilizados na formação do híbrido, V_1 e V_2 correspondem respectivamente à fracção volúmica dos constituintes, obedecendo à seguinte regra^[3,8]

$$V_1 + V_2 = 1$$

Foi estudado por Thanomsilp e Hogg^[3,41] que a introdução de fibras termoplásticas, misturadas com fibras de vidro estrutural iria melhorar a capacidade de absorção de energia do material compósito, acreditando-se que esta melhoria de absorção de energia devia-se essencialmente à deformação plástica das fibras termoplásticas.

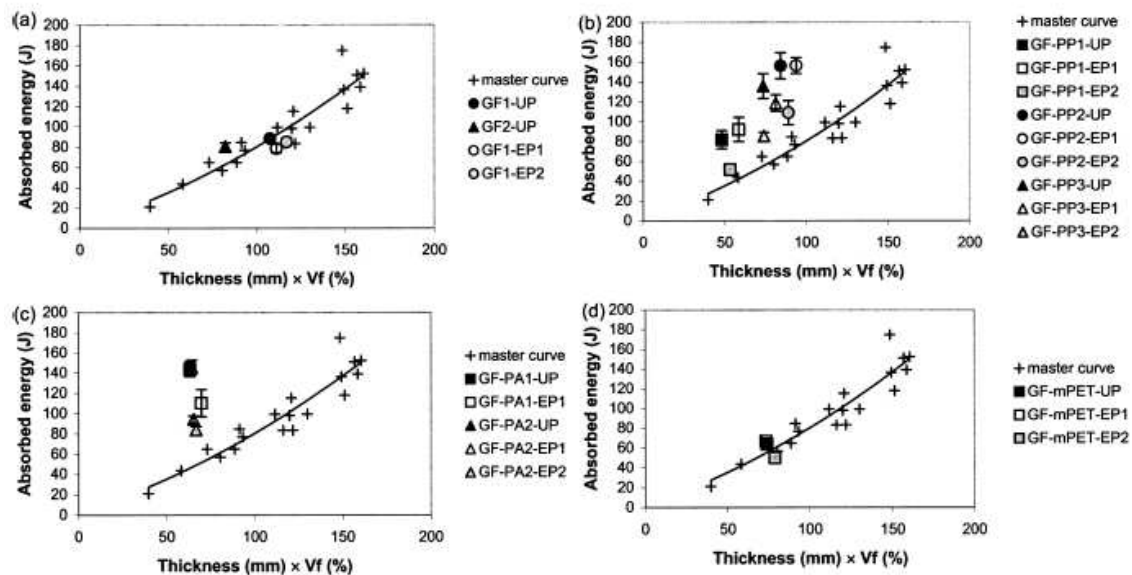


Fig.3.42 – Energia absorvida em ensaios de impacto por materiais compósitos constituídos por a) apenas fibras de vidro (GF), b) Híbridos de GF-PP, c) híbridos de GF-PA e d) híbridos de GF-mPET^[3,41]

Por outro lado, nos trabalhos de Hosseinzadeh, Shokrieh et al^[3.42], verificou-se que combinando fibras de carbono e fibras de vidro para a formação de um material compósito, seria possível obter um sistema material de menor densidade, com resistência ao dano de impacto semelhante ou superior a materiais compósitos que utilizam unicamente fibras de carbono ou fibras de vidro como material de reforço.

Tab.3.9 – Configuração dos provetes utilizados^[3.42]

Samples	Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Layers Config.
Thin Glass/Epoxy	2.4	2500	[45/−45] ₆
Thick Glass/Epoxy	4	2500	[45/−45] ₆
Carbon/Epoxy	2.8	1600	[0/90] ₄
Carbon/Glass/Epoxy	3	2150	[45/−45/0/90/45/−45] ₂

Tab.3.10 – Valores de dano nos provetes, resultantes dos ensaios de impacto^[3.42]

Impact energy (J)	Thin GFRP mean damage dia. (mm)	Thick GFRP mean damage dia. (mm)	CFRP mean damage dia. (mm)	CGFRP mean damage dia. (mm)
30 (2.5 kg impact mass)	5	4	No damage	No damage
50 (2.5 kg impact mass)	8	8	9	30
50 (5.5 kg impact mass)	31	15	Collapse (penetration)	40
100 (5.5 kg impact mass)	Collapse (penetration)	26	Collapse (penetration)	45

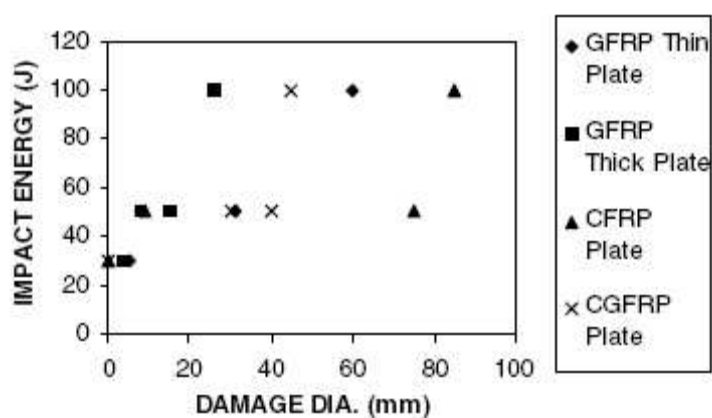


Fig. 3.43 - Diametro de dano nos diferentes materiais compósitos sujeitos a ensaios de impacto^[3.42]

3.6 - Compreensão de Impacto a Baixa Velocidade Através de Métodos Numéricos

Até à data, a maior parte dos trabalhos de investigação relativamente à compreensão de fenómenos de impacto a baixa velocidade têm sido de índole experimental. Mais recentemente, e tirando partido das novas ferramentas de modelação e análise que têm sido desenvolvidas, começam a surgir vários estudos e análise numérica do comportamento de materiais compósitos através de métodos numéricos, tirando partido nomeadamente do método de elementos finitos.

No entanto, devido a uma imensa quantidade de mecanismos de dano envolvidos em casos de impacto, e devido vasta gama de possíveis parâmetros a ter em conta no processo (massa dos projecteis, velocidade, energia cinética, forma do projectil, secção do alvo, condições de fronteira, etc), torna-se bastante difícil criar um modelo numérico completo, que seja capaz de contemplar todos os fenómenos intervenientes.

Em 2001, Serge Abrate^[3.43] apresentou uma revisão teórica dos modelos matemáticos utilizados para a análise de impacto, sugerindo um conjunto de etapas a seguir de forma a ser possível determinar o tipo de impacto e os respectivos efeitos, fundamentais para modelação de casos de impacto.

Em 2000, Robin Olsson^[3.44] apresentou um modelo em que seria possível a previsão do início e propagação de delaminação, numa situação de impacto quasi-estático (massa elevada), apresentando mais tarde, em 2003^[3.45] um modelo que permitia prever a carga de pico e respectiva deflexão, mediante impactos a baixa velocidade e de massas pequenas.

Em 2002 é apresentado por C.F.Li e al.^[3.46] um modelo numérico que inclui parâmetros tais como critérios de dano, alteração de rigidez das placas devido aos vários tipos de dano, solução eficiente de equações diferenciais de bola rígida, modelação detalhada de vários tipos de dano, o problema de contacto dinâmico entre camadas delaminadas, etc.

S.Li et Al.^[3.47] apresentam em 2004 um modelo capaz de prever delaminações múltiplas bem como o aparecimento de fendas transversais em materiais compósitos laminados, sujeitos a impactos a baixa velocidade

Em 2008 M.V. Donovan e al.^[3.48] sugerem um modelo tridimensional contemplando a resposta dinâmica de um material, mediante impacto, baseando-se na teoria de mecânica de dano contínuo, permitindo o controlo de energia dissipada, associado aos diversos modos de dano.

Como foi possível reparar, o processo de modelação numérica relativamente a casos de impacto, envolve inúmeras variáveis, estando ainda distante a obtenção de um modelo 100% preciso, que contemple todos os casos possíveis. Uma vez que este trabalho não envolve componente de modelação numérica, não foi feita uma descrição muito exaustiva das evoluções realizadas nos últimos anos, tendo apenas focado alguns aspectos para ter noção da complexidade que este tipo de modelação obriga.

3.7 - Modificação Superficial de Fibras Celulósicas

Na realização deste estudo experimental, somos confrontados com um problema comum quando se lida com materiais celulósicos associados a resinas epoxidas: a falta de compatibilidade superficial entre o elemento celulósico (neste caso, a cortiça) e a resina.

Uma vez que nos últimos anos têm existido determinados esforços na criação de materiais compósitos utilizando materiais biológicos, o estudo deste tipo de compatibilidade tem vindo a ganhar bastante relevo.

Em 2005, Alessandro Gandini e Mohamed Naceur Belgacem ^[3.49] apresentaram um artigo onde incluíam uma breve descrição dos métodos utilizados para modificação superficial das fibras de celulose, descrevendo resumidamente os mecanismos intervenientes em cada método, bem como as suas vantagens e desvantagens.

Mais tarde, em 2007, os estudos de Jue Lu, Per Askeland e al. ^[3.50] mostraram que tratando as fibras celulósicas com solução de silanos, seria possível modificar a superfície dos elementos celulósicos, melhorando o ângulo de contacto com a resina, favorecendo assim, uma melhor adesão/molhabilidade. Esta modificação traduzia-se em acentuar a cariz hidrófoba da superfície do material celulósico, que originalmente apresentam natureza essencialmente hidrófila por via dos grupos hidroxilos. Por outro lado o tratamento efectuado não afecta a estrutura da celulose, permitindo que esta mantivesse as suas propriedades mecânicas.

3.8 - Bibliografia

- [3.1] - Chung, D. D. L. (2002). Composite Materials: Science and Applications - Functional Materials for Modern Technologies, Springer-Verlag London Limited 2003
- [3.2] - Mallick, P. K. (2007). Fiber-Reinforced Composites - Materials, Manufacturing and Design, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [3.3] – Bathias, C., Ed. (2005). Matériaux Composites. Mécanique et Matériaux. Paris, Dunod.
- [3.4] - Ye, L., Y. Lu, et al. (2004). "Functionalized composite structures for new generation airframes: a review." Composites Science and Technology(65): 1436-1446.
- [3.5] - Bottcher, P., Textile composites, their use in motor vehicle manufactura and old care regulations, Industrial textile, ITS Publishing
- [3.6] - Matos, M. J. and M.H.Simplicio (2004). "Inovation and sustainability in mechanical design through materials selection." Materials and Design(27): 74-78.
- [3.7] - Xu, X., K. Jayaraman, et al. (2008). "Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites." Journal of materials processing technology(198): 168-177.
- [3.8] - John, M. J. and S. Thomas (2007). "Biofibres and Biocomposites." Carbohydrate Polymers(71): 343 - 364.
- [3.9] - (2004). "Natural Fibre Explores New Markets." Reinforced Plastics: 17.
- [3.10] - Farag, M. M. (2006). "Quantative methods of material substitution: Application to automotive components." Materials and Design(29): 374-380.
- [3.11] - Phys, M. K., S. O. Okon, et al. (2004). "Use of natural fibres in composites in the German automotive production 1996 till 2003." Nova Institut: 1-4.
- [3.12] - Fernández-Canteli, A., A. Arguelles, et al. (2002). "Dynamic fracture thoughness measurements in composites by instrumented Charpy testing: Influence of aging." Composite Science and Technology(62): 1315-1325.
- [3.13] - Faur-Csukat, G. (2006). "A Study on the Ballistic Performance of Composites." Macromol.Symp.: 217-226.
- [3.14] – Mallick, P.K., *Fiber Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*, Marcel Dekker, New York, 1993
- [3.15] - “Composite Materials Under Impact Conditions “ – I.Crivelli-Visconti, G. Caprino, R.Teti, F.Langella – First European Conference on Composite Materials and Exhibition – 1985 Bordeaux – France
- [3.16] - Aktas, M., C. Atas, et al. (2008). "An Experimental Investigation of the Impact Response of Composite Laminates." Composite Structures(87): 307-313.

- [3.17] - Dear, J. P. and S. A. Brown (2002). "Impact damage process in reinforced polymeric Materials." Composites - PartA: applied science and manufacturing: 411-420.
- [3.18] - Lee, D. G. and S. S. Cheon (2001). "Impact Characteristics of Glass Fiber Composites with Respect to Fiber Volume Fraction." Journal of Composite Materials **Vol. 35**(No. 01): 27-56.
- [3.19] – <http://www.azom.com>
- [3.20] - Williams, J.G. and Rhodes, M.D., "Effect of Resin on IMPact Damage Tolerance of Graphite/Epoxy Laminates," Composite Materials: Testing and Design (Sixth Conference), ASTM STP 787, I.M. Daniel, Ed., American Society for Testing and Materials, 1982, pp. 450-480
- [3.21] - Rilo, N. F. and L. M. S. Ferreira (2007). "Experimental study of low-velocity impacts on glass-epoxy laminated composite plates." International Journal of Material Design(4): 219-300.
- [3.22] - L.Reis and M. d. Freitas (1997). "Damage growth analysis of low velocity impacted composite panels." Composite Structures **vol.38**(No.1-4): 509-515.
- [3.23] - Caprino, C., V.Lopresto, et al. (1999). "Influence of material thickness on the response of carbon-fabric/epoxy panels to low velocity impact." Composite Science and Technology(59): 2279-2286
- [3.24] - Belingardi, G. and R. Vadori (2003). "Influence of the laminate thickness in low velocity impact behavior of composite material plate." Composite Structures(61): 27-38
- [3.25] - Sutherland, L. S. and C. G. Soares (1998). "Effects of laminate thickness and reinforcement type on the impact behaviour of E-glass/polyester laminates." Composite Science and Technology(59): 2243-2260.
- [3.26] – Moura, M. F. d. S. F. d. (1995). *Modelos de Previsão do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Carbono-Epóxido Sujeitos a Impacto de Baixa Velocidade e da Sua Resistência Residual à Compressão Após Impacto. Faculdade de Engenharia. Porto, Universidade do Porto.*
- [3.27] - Tsotsis, T. K. (2008). "Interlayer Toughening of Composite Materials." Polymer Composites
- [3.28] - Duarte, A., I. Herszberg, et al. (1999). "Impact resistance and tolerance of interleaved tape laminates." Composite Structures(47): 753-758.
- [3.29] – LANDOLT, J. H. ; MAGALHÃES, J. H. "Estudo da Tolerância ao Dano de Impacto de Laminados de CFRP", Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, revista SPM, Ciência & Tecnologia dos Materiais, Vol.15, nº3 e 4, 2003
- [3.30] - B.J.Derkowsk and H.-J.Sue (2003). "Morphology and Compression-After-Impact Strength Relationship in INterleaved Toughened Composites." Polymer Composites **Vol.24**(No.1): 158-170.
- [3.31] - KISHORE, B. KHAN, et al. (2000). "Impact Response of Carbon-Epoxy Laminates Containing Buffer-Strip Layers." Journal of Applied Polymer Science **85**: 752-761.

- [3.32] - Byun, J.-H., S.-W. Song, et al. (2006). "Impact properties of laminated composites with stitching fibers." Composite Structures(76): 21-27.
- [3.33] - F.Aymerich and P.Priolo (2006). "Characterization of fracture modes in stitched and unstitched cross-ply laminates subjected to low-impact and compression after impact loading." International Journal of Impact Engineering(35): 591-608.
- [3.34] - Larsson, F. (1996). "Damage Tolerance of a Stitched Carbon/epoxy Laminate." Composites Part A **28A**: 923-934.
- [3.35] - Hosur, M. V., M.R.Karim, et al. (2003). "Experimental Investigation on the response of stitched/unstitched woven S2-Glass/SC15 epoxy composites under single and repeated low velocity impact loading." Composite Structures(61): 89-102.
- [3.36] - Zhang, X., L.Hounslow, et al. (2005). "Improvement of low-velocity impact and compression-after-impact performance by z-fibre pinning." Composite Science and Technology(66): 2785-2784.
- [3.37] - D.Ramos, V., H. M. d. Costa, et al. (2005). "Modification of epoxy resin: a comparison of different types of elastomer." Polymer Testing(24): 387-394.
- [3.38] - Avila, A. F., M. I. Soares, et al. (2007). "A study on nanostructured laminated plates behavior under low-velocity impact loadings." International Journal of Impact Engineering(34): 28-41
- [3.39] - Woldeesenbet, E. (2008). "Low Velocity impact propertis of nanoparticulate syntactic foams." Materials Science and Engineering A(496): 217-222.
- [3.40] - Lee, S.-H., J.-H. Lee, et al. (2008). "A toughening and strengthening technique of hybrid composites with non-woven tissue." Journal of materials processing technology(207): 21
- [3.41] - Thanomsilp, C. and P. J. Hogg (2001). "Penetration Impact resistance of hybrid composites based on commingle yarn fabrics." Composite Science and Technology(63): 467-482.
- [3.42] - Hosseinzadeh, R., M. M. Shokrieh, et al. (2006). "Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected to drop weigh impacts." Composite Science and Technology(66): 61-68.
- [3.43] - Abrate, S. (2001). "Modeling of Impacts on Composite Structures." Composite Structures(51): 129-138
- [3.44] - Olsson, R. (2000). "Analytical Prediction of Large Mass Impact Damage in Composite Laminates." Composites - PartA: applied science and manufacturing(32): 1207-1215.
- [3.45] - Olsson, R. (2003). "Closed Form Prediction of Peak Load and Delamination onset Under Small Mass Impact." Composite Structures(59): 341-349.
- [3.46] - C.F.Li, N.Hu, et al. (2002). "Low-velocity impact-induced damage of continuous fiber-reinforced composite laminates. PartI. An FEM numerical model." Composites - PartA: applied science and manufacturing **33**: 1055-1062.

- [3.47] - S.Li, S.R.Reid, et al. (2004). "Modelling Damage of Multiple Delaminations and Transverse Matrix Cracking in Laminated Composites Due to Low Velocity Lateral Impact." Composite Science and Technology(66): 827-836.
- [3.48] - M.V.Donadon, L. Iannucci, et al. (2007). "A progressive failure model for composite laminates subjected to low velocity impact damage." Computers & Structures(86): 1232 - 1252.
- [3.49] - Gandini, A. and M. N. Belgacem (2005). "Surface Modification of Cellulose Fibres." Polimeros: Ciência e Tecnologia **15**(2): 114-121.
- [3.50] - Lu, J., P. Askeland, et al. (2007). "Surface modification of microfibrillated cellulose for epoxy composite applications." Polymer(49): 1285-1296.

Capítulo 4

Métodos Experimentais

4.1 – Construção dos Laminados

O primeiro passo do procedimento experimental passa pela criação de placas de material compósito.

Para uma abordagem inicial foi estabelecido a criação de 4 placas de material compósito, com dimensões de $300 \times 200 \text{ mm}^2$, formadas por diferentes constituintes e diferentes formas de empilhamento das camadas, conforme indicado nas seguintes tabelas.

Tab.4.1 – Constituintes das placas de material compósito

	Tecido Fibra de Vidro (0,3 mm)		Manta Fibra de Vidro (0,5mm) (300 g m ⁻²)	Folha de Cortiça (0,5 mm)
	[0 90]	[-45 +45]		
0M	6	-	4	-
0C	6	-	2	2
45M	4	2	4	-
45C	4	2	2	2

Tab.4.2 – Configuração das placas iniciais

Placa	Configuração
0M	$[(0 90)_2/manta_2/(0 90)]_s$
0C	$[(0 90)_2/manta/cortiça/(0 90)]_s$
45M	$[(0 90)_2/manta_2/(+45 -45)]_s$
45C	$[(0 90)_2/manta/cortiça/(+45 -45)]_s$

4.1.1 - Preparação das folhas de Cortiça

Uma vez que para a preparação de uma camada de laminado são precisas duas folhas de cortiça, é necessário que a espessura destas seja bem conhecida.

Deste modo, foram realizadas medições em três pontos distintos – extremidades e meio - de forma a ser possível calcular uma espessura média de cada folha de cortiça, e agrupá-las convenientemente, consoante a sua espessura.

Tab.4.3 – Dimensões das folhas de cortiça

Folha #	extr 1 (#)	meio	extr 2	Valor médio	
1	0,46	0,42	0,43	0,44	A
2	0,60	0,57	0,58	0,58	B
3	0,47	0,49	0,57	0,51	B
4	0,60	0,59	0,61	0,60	C
5	0,67	0,69	0,67	0,68	D
6	0,56	0,53	0,41	0,50	A
7	0,57	0,58	0,85	0,67	D
8	0,64	0,52	0,66	0,61	C
				0,57	

Valor médio	0,54	Laminado 1
Valor médio	0,61	Laminado 2

É conveniente realçar que cada laminado é formado por quatro folhas de cortiça (2 por camada, e que se pretende obter uma relativa uniformidade em termos de espessura, das camadas constituintes da placa laminada.

Em seguida efectuou-se uma limpeza superficial das folhas de cortiça, de forma a remover qualquer impureza ou partículas soltas presentes na sua superfície, para que a impregnação de resina seja mais eficaz.

A limpeza efectuada pode ser dividida em duas fases:

- Limpeza a Seco
- Limpeza usando uma solução de isopropanol e água (50:50, v/v)

O método de limpeza utilizado é bastante simples, consistindo apenas na passagem de um pano seco pela superfície da cortiça, e em seguida passando um pano ligeiramente humedecido com a solução álcool – água.



Fig.4.1 e 4.2 – Processo de Limpeza das folhas de Cortiça

A utilização do álcool, para além de permitir a limpeza, também vai levar ao desengorduramento da superfície em que é aplicada, sendo este aspecto importante para aumentar o nível de adesão.

Após efectuada a limpeza, as folhas de cortiça foram colocadas em vácuo, para a extracção eficaz de resíduos de solvente.

Por fim mantém-se a cortiça num saco fechado contendo gel de sílica para prevenir a absorção de humidade. No sentido de aumentar a eficácia do método o saco é mantido numa estufa à temperatura de 40°C até a utilização dos filmes de cortiça. Apesar de existirem métodos mais eficazes para este processo (e.g., pentóxido de fósforo), o gel de sílica apresenta-se como economicamente vantajoso, devido à possibilidade reutilização após secagem.



Fig.4.3 – Folha de Cortiça antes de irem para a câmara de vácuo

4.1.2 - Preparação dos moldes

De forma a permitir uma fácil desmoldação das placas laminadas, após o processo de cura, deve-se proceder à preparação conveniente das placas molde. Este processo é bastante simples, consistindo unicamente no revestimento e polimento de uma camada de cera na superfície das placas molde. De forma a assegurar a sua eficácia, foram feitas duas passagens de cera, neste trabalho experimental

4.1.3 - Preparação da Resina

Após determinada a sequência de empilhamento a utilizar, e concluídos os processos de tratamento das folhas de cortiça, torna-se possível proceder ao fabrico das placas laminadas. O primeiro passo deste processo passa pela selecção e preparação da resina a utilizar.

Para este trabalho experimental foi utilizado o sistema de resina epoxido SR1500 e endurecedor SD2505 (SICOMIN, França). A razão mássica de mistura de resina-endurecedor é de 100/33.

4.1.4 - Processo de Moldação Manual dos Laminados

Após a preparação da resina a ser utilizada, procedeu-se ao fabrico das placas laminadas, de onde viriam ser extraídos os provetes utilizados nos ensaios.

Podendo utilizar como exemplo a produção da placa 45C , com a seguinte sequência de empilhamento:

$$[(0|90)_2/manta/cortiça/(+45|-45)]_s$$

É possível dividir este processo nas seguintes fases:

- Passagem de uma camada de resina na superfície das placas molde
- Colocação de camadas de tecido e manta de fibra de vidro e respectiva impregnação, de acordo com a sequência de empilhamento pretendida



Fig.4.4,4.5,4.6 – Preparação de laminados com cortiça

- Colocação das camadas de reforço interlaminar (neste caso cortiça). Nas camadas de cortiça, é muito importante garantir uma boa impregnação e passagem de resina pelos poros. Uma vez que a cortiça possui fraca molhabilidade, será a resina que atravessa os seus poros que será a principal responsável pela união interlaminar, através de um dispositivo de ancoragem
- Colocação das camadas internas de tecido de fibra de vidro

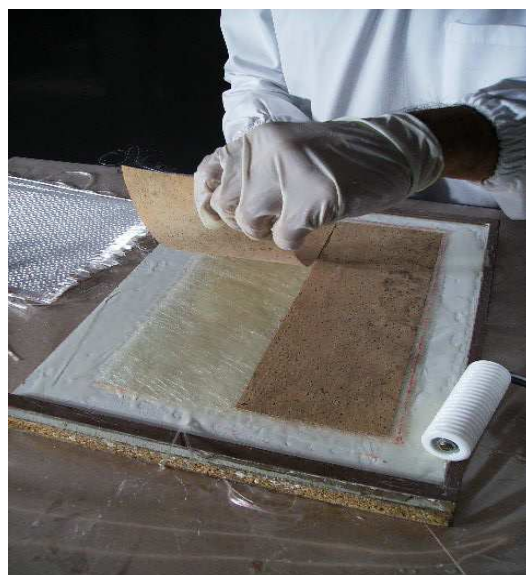




Fig.4.7 e 4.8 – Preparação de Laminados com Cortiça

- Repetição do processo previamente descrito, de acordo com a sequência de empilhamentos planeada, garantindo sempre uma boa impregnação das camadas laminadas.

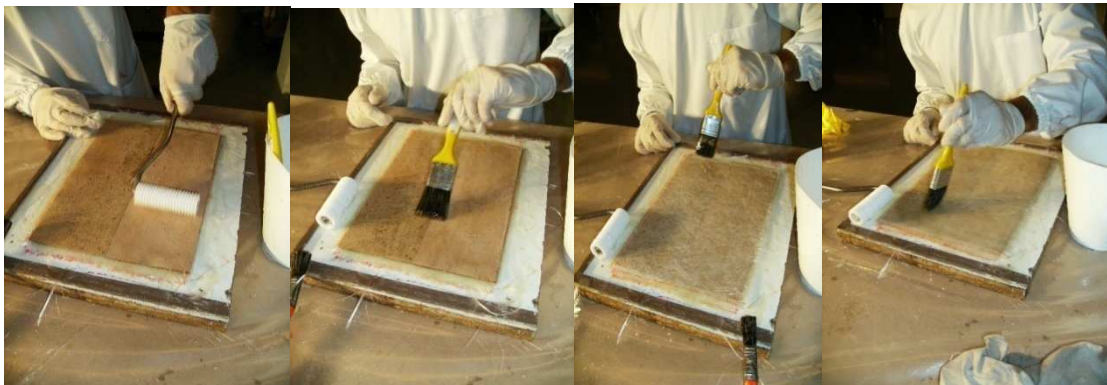


Fig.4.9, 4.10, 4.11, 4.12– Preparação de Laminados Com Cortiça

Uma vez que a resina leva pouco tempo a curar (entre 15 a 20 minutos), é necessário que todo este processo seja feito rapidamente e imediatamente após a preparação da resina epoxídica.

Realizados os procedimentos previamente descritos, podemos dar como concluído o processo de moldação manual do laminado.

Em seguida, efectuou-se um processo de pós-cura, que consistiu em manter a placa laminada a temperatura ambiente durante pelo menos 12 horas, seguido de uma pré-cura de 6 horas a 60°C

Após o processo de cura, procedeu-se à rebarbagem da placa laminada de forma a ser possível realizar uma planificação de corte para a obtenção dos provetes a serem utilizados nos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do material.

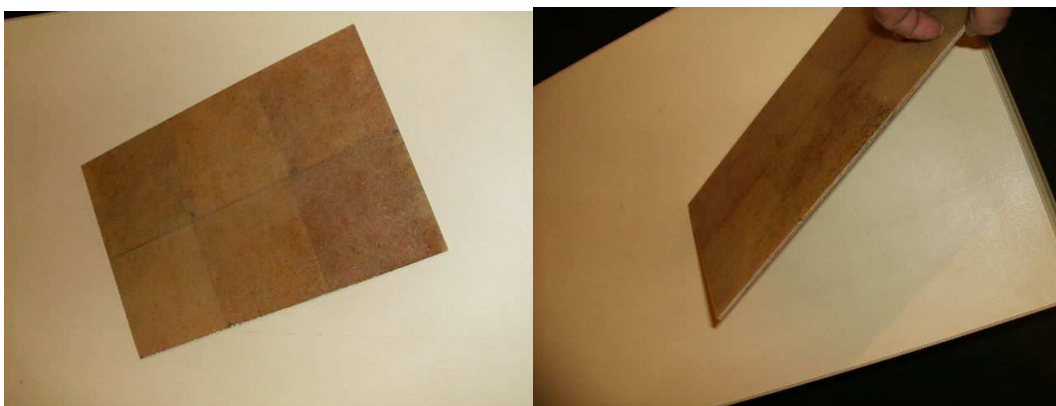


Fig.4.13 e 4.14 – Aspecto final de um laminado de fibra de vidro e cortiça

Durante a preparação da placa de 0 C ocorreu um erro enquanto se efectuava o empilhamento, tendo sido utilizadas 3 camadas de tecido 0/90 na região central do laminado, ao invés das 2 previstas. Devido a este acaso, foi necessário proceder à preparação de uma nova placa com a configuração 0C, de forma a ser possível prosseguir com os ensaios, segundo o plano inicial.

Deste modo, obtivemos um laminado com a seguinte configuração:

$$[(0|90)_2/manta/cortiça/(0|90)_2/cortiça/manta/(0|90)_2]$$

Este laminado, apesar de ter resultado de um erro de preparação, pode revelar-se com sendo bastante útil para o estudo da influência da espessura da camada central no comportamento geral do material a impacto de baixa velocidade.

Durante a preparação deste laminado, surgiu a particularidade do fornecedor ter fornecido a cortiça sob a forma de quadrados ($100 \times 100 \text{ mm}^2$). No sentido de facilitar o processo de moldação utilizaram-se três peças de cortiça para construir filmes com $300 \times 100 \text{ mm}^2$. Para o efeito utilizaram-se apenas três gotas de adesivo Araldite® de um modo geral, entre cada par de lados colados

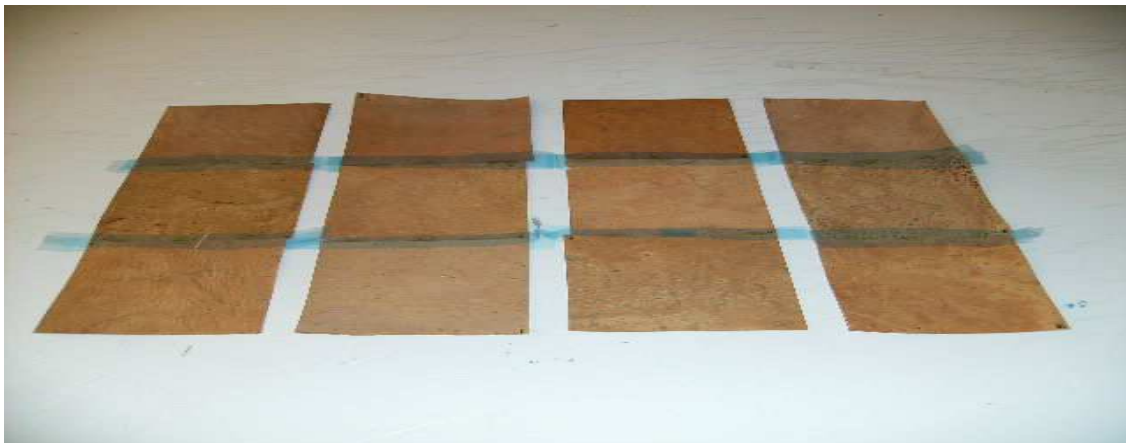


Fig.4.15 e 4.16 – Folhas de cortiça unidas com araldite®

Utilizando igualmente o processo de moldação manual para o fabrico desta placa laminada, tendo especial cuidado para não provocar a separação das várias folhas de cortiça, constituintes das camadas de reforço interlaminar.



Fig.4.17 e 4.18 – Preparação de Laminados com cortiça

Obtendo por fim, um laminado semelhante aos previamente fabricados:

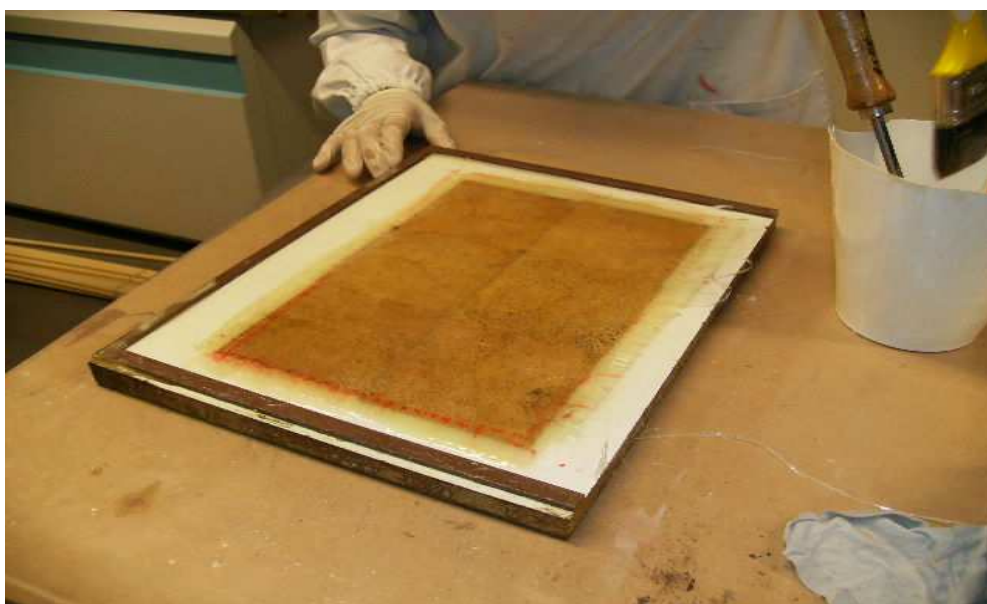
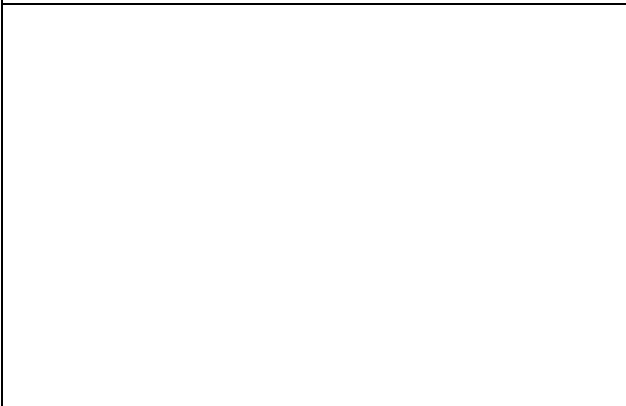


Fig.4.19 – Conclusão do processo de moldação manual de um laminado

4.2 - Preparação dos Provetes

Após concluído o processo de moldação manual e cura das placas de material compósito, procedeu-se ao corte dos laminados de forma a ser possível obter os provetes para os ensaios de tracção, flexão, impacto (ensaio Charpy) e corte interlaminar

Assim foram obtidos:

 Fig.4.20 – Provetes de Tracção	Tipo: Tracção
	Quantidade: 5
	Dimensões: 155 x 20 mm
	Norma: ISO 527-4
 Fig.4.21 – Provetes de Flexão	Tipo: Flexão
	Quantidade: 5
	Dimensões: $L = 16 \times h$ $B = 2 \times h$
	Norma: ISO 14125
	Tipo: Corte Interlaminar
	Quantidade: 6
	Dimensões: $L = 6 \times h$ $B = 2 \times h$
	Norma: ASTM D2344
 Fig.4.22 – Provetes para Ensaio de Impacto (Charpy)	Tipo: Impacto (Charpy)
	Quantidade: 11
	Dimensões: 50mm x 6 mm x 4 mm
	Norma: ISSO 179

4.3 - Métodos de Caracterização de Propriedades dos Materiais Utilizados:

4.3.1 - Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão foram feitos seguindo a norma ISSO 14125 realizados numa máquina universal de ensaios INSTRON, modelo 4208, existente no Laboratório de Ensaaios Mecânicos do INEGI. Foi colocado o provete nos apoios da máquina de ensaios, utilizando o afastamento determinado na norma anteriormente referida ($16 \times h$), em que h corresponde à espessura média dos provetes ensaiados. Para a realização de ensaio, foi predefinida uma velocidade de avanço da cabeça de 2 mm/min. Foram utilizados roletes com 10 mm de diâmetro nos apoios e no carregamento.



Fig.4.23 – Ensaio de Flexão

4.3.2 - Ensaio de Corte Interlaminar

Os ensaios de corte interlaminar seguem a norma ASTM D2344. A sua preparação e realização é idêntica à utilizada nos ensaios de flexão, diferindo apenas nas dimensões dos provetes e consequente distância entre apoios utilizada, sendo esta consideravelmente menor neste tipo de ensaio. Foi utilizado o mesmo equipamento de ensaio e a velocidade de avanço de cabeça utilizada foi de 1 mm/min. Para a realização deste ensaio, foram usados roletes de aço de 4 mm de diâmetro para apoio do provete, e um rolete de 6 mm de diâmetro para efectuar o carregamento



Fig.4.24 – Ensaio de Corte Interlaminar

4.3.3 - Ensaio de tracção

Os ensaios de tracção foram realizados seguindo a norma ISO 5274 tendo sido necessário proceder à maquinagem dos provetes após estes terem sido cortados, de forma a estes estarem de acordo com a norma utilizada. Para a realização destes ensaios, foi utilizado o mesmo equipamento com acessórios adequados ao tipo de ensaios pretendido. Utilizou-se uma velocidade de 2 mm/min. para a realização deste ensaio.



Fig.4.25 – Ensaio de Tracção

4.3.4 - Ensaaios de Impacto Charpy

Uma vez que a máquina de ensaios Charpy disponível no INEGI apenas é capaz de fornecer energias de impacto até cerca de 3J , foi necessário efectuar dois ensaios iniciais para verificar a viabilidade da utilização deste equipamento para a execução do



trabalho experimental. Para tal, testou-se a máquina com um provete para ensaios de impacto, utilizando fibra de vidro - cortiça, e outro constituído unicamente por fibra de vidro.

Foi possível verificar através destes ensaios iniciais que o equipamento presente no INEGI oferecia condições para o ensaio dos provetes de cortiça, mas que a energia disponível com a queda do pêndulo se revelou insuficiente para a quebra dos provetes contendo apenas fibra de vidro

Fig.4.26 – Máquina de Ensaios Charpy (INEGI)

Deste modo, para a realização dos ensaios de impacto, foi necessário recorrer à máquina de ensaios de impacto (CEAST , Itália) existente na Universidade do Minho – Polo de Guimarães, uma vez que esse equipamento permitia utilizar uma maior gama de energias de impacto. Para a realização deste ensaio utilizou-se um pêndulo permitindo medir energias de impacto até 4J

Fig.4.27 – Máquina de Ensaios Charpy (Universidade do Minho)



Relativamente aos ensaios de impacto, foi necessário efectuar um ensaio em branco, de forma a anotar o valor de energia absorvida devido a atritos entre ar/impactador, durante o seu percurso. Foi possível retirar que havia perda de energia na ordem dos 0.03 J, devendo esse valor ser retirado ao valor de energia absorvida medida no teste dos provetes.

4.4 - Preparação de Novos Laminados:

Após a caracterização experimental das propriedades mecânicas e ao impacto dos laminados inicialmente produzidos, foi possível retirarem algumas conclusões, que permitiram delinear a concepção de novos laminados, de forma a melhorar as propriedades de impacto deste tipo de laminados.

Deste modo, foi estabelecida a criação de 3 novas placas laminadas, uma delas com as dimensões de 300x200 mm², duas com dimensões 300x150 mm². A produção das placas laminadas com dimensões ligeiramente menores deveu-se unicamente a aspectos ligados à optimização da utilização das folhas de cortiça disponíveis para o desenvolvimento deste trabalho experimental.

As designações, constituintes e sequências de empilhamento destas novas placas laminadas podem ser encontradas nas tabelas 4.4 e 4.5

Tab.4.4 – Constituintes das placas de material compósito

	Tecido Fibra de Vidro (0,3 mm)		Manta Fibra de Vidro (0,5mm)	Laminas de Cortiça (0,5 mm)	Laminas de Cortiça (0,1 mm)
	[0 90]	[-45 +45]			
45 CF	4	2	4	-	2
45CFT	4	2	4		2
45CT	4	2	2	2	-

Tab.4.5 – Configuração das novas placas

Placa	Configuração
45CF	$[(0 90)_2 / manta_2 / cortiça\ 0.1mm / (+45 - 45)]_s$
45CFT	$[(0 90)_2 / manta_2 / cortiça\ 0.1mm(tratada) / (+45 - 45)]_s$
45CT	$[(0 90)_2 / manta_2 / cortiça\ 0.5mm(tratada) / (+45 - 45)]_s$

Para a preparação destas placas laminadas, foi necessário repetir os processos de preparação das folhas de cortiça, sendo efectuadas novamente medições em três pontos nos vários tipos de folhas de cortiça disponíveis (quadradas e rectangulares de espessura 0,5 mm ; rectangulares de espessura 0,1 mm). As medições efectuadas permitem que seja efectuado um agrupamento das folhas de cortiça para a formação de uma lâmina sem grandes variações de espessura ao longo da sua superfície

Tab.4.6, 4.7 e 4.8 - Espessura das folhas de cortiça obtida através de medição em 3 pontos

Geometria: Rectangular		Espessura: 0,5			
Folha #	extr1 (#)	meio	extr 2	valor médio	
1	0,7	0,6	0,54	0,61	A
2	0,54	0,64	0,62	0,60	A
3	0,65	0,65	0,68	0,66	B
4	0,62	0,66	0,74	0,67	B
5	0,58	0,61	0,66	0,62	A
6	0,55	0,54	0,52	0,54	B
					0,62

Geometria: Quadrangular		Espessura: 0,5			
Folha #	extr1 (#)	meio	extr 2	valor médio	
1	0,57	0,51	0,72	0,60	A
2	0,6	0,5	0,59	0,56	B
3	0,74	0,37	0,46	0,52	A
4	0,7	0,61	0,55	0,62	B
					0,58

Geometria: Rectangular		Espessura: 0,1			
Folha #	extr1 (#)	meio	extr 2	valor médio	
1	0,17	0,16	0,22	0,18	
2	0,17	0,18	0,18	0,18	
3	0,14	0,16	0,18	0,16	
4	0,2	0,17	0,17	0,18	
5	0,18	0,19	0,19	0,19	
6	0,17	0,18	0,19	0,18	
					0,18

Através das medições foi possível observar que as folhas de cortiça possuíam uma espessura aprox 0,1 mm acima do valor esperado. Por outro lado, uma vez que as folhas de cortiça de 0,1 mm possuíam valores de espessura constantes ao longo de toda a sua secção, não foi necessário predefinir o seu agrupamento, podendo este ser aleatório.

Relativamente à placa de designação 45CF, o método de fabrico foi idêntico ao anteriormente aplicado para produção dos laminados contendo folhas de cortiça (0C, 45C, 0C+).

Após terem sido feitas as medições e agrupadas as folhas de cortiça, foi necessário colar as folhas agrupadas, de forma a formar uma lâmina única:



Fig.4.28 e 4.29 – Folhas de cortiça fina coladas com araldite

Sendo por fim, novamente repetidos os passos do processo de laminagem manual:



Fig.4.30 e 4.31 – Processo de moldação manual

4.5 - Tratamento Químico das Folhas de Cortiça

Em seguida procedeu-se ao fabrico de mais dois laminados utilizando folhas de cortiça. Para a produção destes novos laminados, as folhas da cortiça foram sujeitas a um tratamento químico prévio, de forma a alterar as suas características superficiais, procurando não provocar modificações na sua estrutura interna. Esta alteração tem em vista aumentar a compatibilidade entre resina/cortiça, levando a uma melhor de adesão e consequente obtenção de propriedades mecânicas mais interessantes.

Como etapa inicial deste tratamento, foi preparada uma solução aquosa, com uma concentração de 2% v/v de um silano. Foi utilizado 3-aminopropilometildietoxisilano (APDES) do fabricante Aldrich com grau de pureza superior a 97%

O recipiente utilizado para a imersão das folhas de cortiça, possuía uma base de dimensões $300 \times 180 \text{ mm}^2$, tendo sido considerado que seria necessário um nível de 15 mm de forma a que as várias folhas sujeitas a tratamento ficassem totalmente imersas na solução preparada.

Devido às dimensões do recipiente, foi então necessário preparar uma solução de 800ml, constituída por 98% v/v (784 ml) de água destilada, e 2% v/v (16 ml) de APDES.

Em seguida, foram depositadas as folhas de cortiça na solução, sob uma grelha de plástico, de forma a garantir que estas se mantivessem totalmente imersas durante o período de tratamento. O período de tempo desta fase inicial de tratamento teve uma duração aproximada de 24 horas.

Uma segunda fase consistiu no aquecimento da solução a 80°C. Para tal, foi decantada a solução para um goblé, e aquecida, utilizando uma placa térmica eléctrica. Uma vez atingida a temperatura desejada, emergiram-se novamente as folhas de cortiça na solução, colocando o recipiente na estufa, onde permaneceu, a uma temperatura de 80°C durante um período aproximado de 3 horas.

Por fim, a terceira parte do tratamento consistiu na remoção das folhas de cortiça da solução, através de um processo de decantação, e respectiva lavagem para remoção de silanos residuais ou outros resíduos que possam estar contidos na cortiça. Após lavagens sucessivas com água, efectuou-se a secagem da cortiça, em vácuo, durante 30 mins, sendo posteriormente colocada numa estufa da 40°C, durante um período de 14 h

Após concluído o processo de secagem, foi possível constatar que a cortiça ainda se encontrava húmida, tendo sido necessário recoloca-la em vácuo, durante um período de 3-4 horas , de forma a assegurar a remoção completa de toda a humidade

Uma vez concluído o tratamento da cortiça, procedeu-se a uma nova limpeza superficial a seco, das folhas. Foi possível notar que as folhas de cortiça se apresentavam quebradiças, sugerindo a possibilidade do tratamento efectuado ter sido demasiado agressivo, face aos objectivos pretendidos.

Por fim, realizaram-se duas novas placas laminadas, utilizando as folhas de cortiça tratada, recorrendo ao processo de moldação manual, previamente descrito.

4.6 – Observação ao Microscópio das folhas de cortiça

De forma a ser possível compreender o efeito do tratamento efectuado nas folhas de cortiça, optou-se por proceder à preparação de amostras para observar ao microscópio electrónico, relativas à cortiça utilizada (0,5 e 0,2 mm de espessura, com e sem tratamento), bem como amostras das zonas de cedência por corte ou delaminação retiradas dos provetes após realização dos ensaios de caracterização mecânica. Numa primeira fase, recorreu-se à preparação de bases circulares para as amostras, a partir de resina de epóxi.

Em seguida, procedeu-se à colagem de amostras das folhas de cortiça e da área delaminada de provates, de forma a ser possível serem observadas a microscópio de varrimento.

Deste modo, obtivemos as seguintes configurações:

Base 1

- duas amostras de cortiça de 0,5 mm de espessura sem tratamento
- duas amostras de cortiça de 0,2 mm de espessura sem tratamento

Base 2

- duas amostras de cortiça de 0,5 mm de espessura, com tratamento
- duas amostras de cortiça de 0,2 mm de espessura, com tratamento

Base 3

- duas amostras da área delaminada de provetes 45C
- duas amostras da área delaminada de provetes 45CT

Base 4

- duas amostras da área delaminada de provetes 45CF
- duas amostras da área delaminada de provetes 45CFT

Base 5

- duas amostras da área delaminada de provetes 0C
- duas amostras da área delaminada de provetes 0C+

De forma a ser possível observar as amostras no microscópio de varrimento, foi necessário revestir as preparações por um material condutor. As observações foram realizadas no CEMUP, utilizando o microscópio de varrimento JSM-6301 F

Capítulo 5

Resultados Obtidos

5.1- Ensaios de Flexão

0M

Tab.5.1 – Dimensões dos provetes de flexão (0M)

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
Largura (mm)	15,07	15,02	15,11	15,11	15,11
Espessura (mm)	3,35	3,34	3,55	3,44	3,51
Espaçamento entre apoios (mm)	56	56	56	56	56
Orientação	1	1	1	2	2

Tab.5.2 – Propriedades de flexão dos provetes (0M)

Nº do Provete	Extensão (mm/mm) %	Tensão de Cedência (MPa)	Modulo (GPa)	Energia Absorvida até rotura (J)
1	3,215	442,26	15,740	2,356
2	3,221	444,76	16,059	2,397
3	3,123	399,30	14,971	2,230
4	3,411	472,28	15,680	2,725
5	3,245	441,77	14,176	2,429

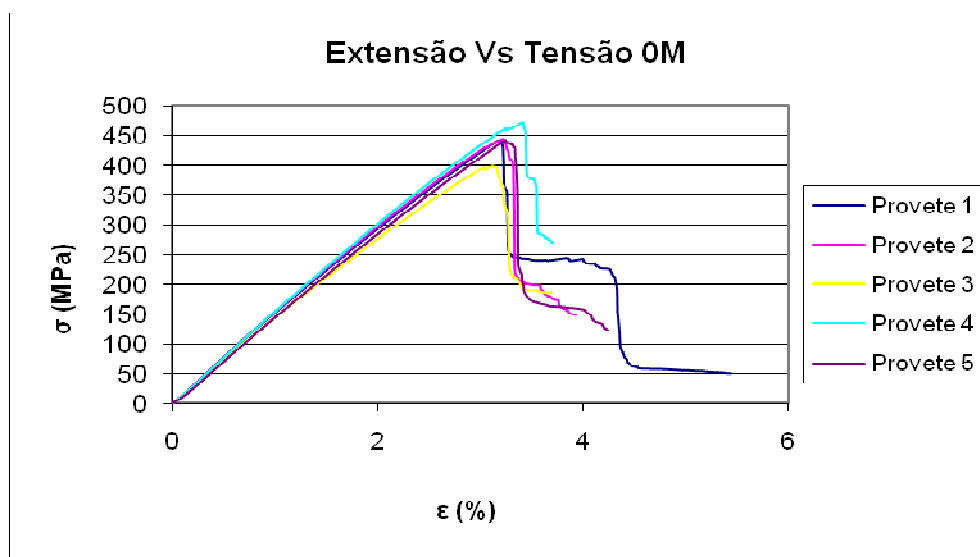


Fig.5.1 – Curva Extensão vs Tensão 0M

45M

Tab.5.3 – Dimensões dos provetes de flexão (45M)

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
Largura (mm)	14,01	14,65	14,76	14,85	13,89
Espessura (mm)	3,36	3,61	3,57	3,66	3,68
Espaçamento entre apoios (mm)	56	56	56	56	56
Orientação	1	1	1	2	2

Tab.5.4 – Propriedades de flexão dos provetes (45M)

Nº do Provete	Extensão (mm/mm)%	Tensão de Cedência (MPa)	Modulo (GPa)	Energia Absorvida até rotura (J)
1	3,357	433,13	14,100	2,389
2	3,383	416,33	14,314	2,497
3	3,431	367,40	13,180	2,062
4	3,319	404,96	12,867	2,373
5	3,478	420,16	13,397	2,451

Extensão Vs Tensão 045M

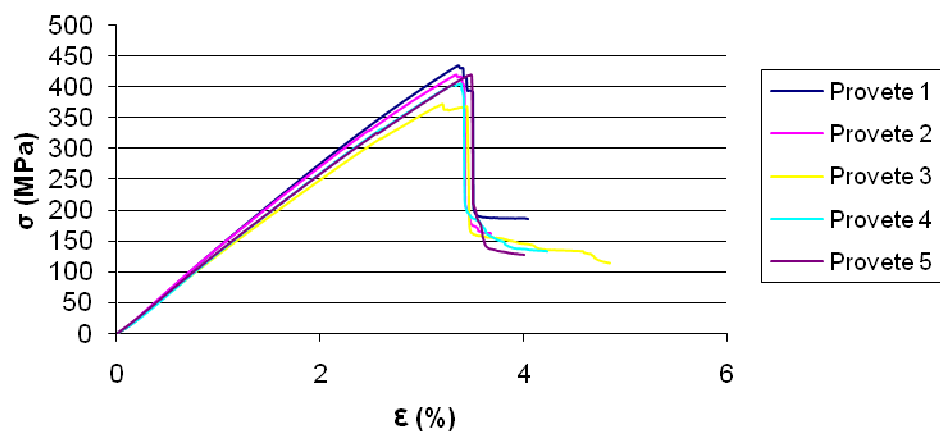


Fig.5.2 – Curva Extensão Vs Tensão 45M

0C

Tab.5.5 – Dimensões dos provetes de flexão (0C)

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
Largura (mm)	14,82	14,79	14,78	14,76	13,74	14,76
Espessura (mm)	3,43	3,45	3,57	3,66	3,68	3,21
Espaçamento entre apoios (mm)	56	56	56	56	56	56
Orientação	1	1	1	2	2	2

Tab.5.6 – Propriedades de flexão dos provetes (0C)

Nº do Provete	Extensão (mm/mm)%	Tensão de Cedência (MPa)	Modulo (GPa)	Energia Absorvida até rotura (J)
1	6,76	157.1	9,841	2,510
2	5,28	137.2	9.893	1.611
3	5,77	168.3	10.530	2.013
4	6,78	159.4	9.877	2.462
5	4,62	128.1	8.717	1.371
6	5,71	173.7	10.610	1.769

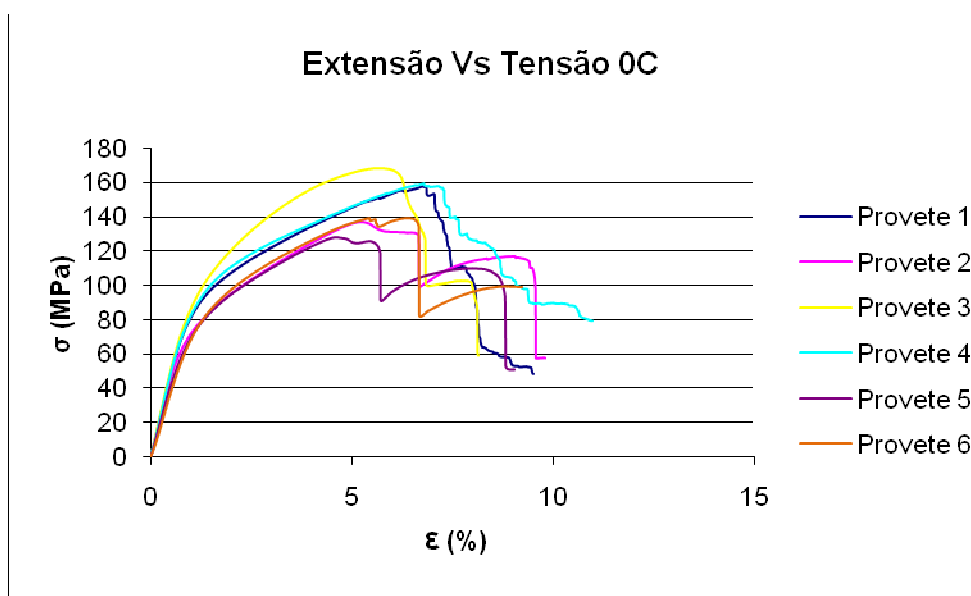


Fig.5.3 – Curva Extensão Vs Tensão 0C

0C2

Tab.5.7 – Dimensões dos provetes de flexão (0C2)

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
Largura (mm)	14,73	15,09	15,09	14,79	15,06
Espessura (mm)	4,87	4,94	4,15	4,24	4,87
Espaçamento entre apoios (mm)	72	72	72	72	72
Orientação	1	1	1	1	2

Tab.5.8 – Propriedades de flexão dos provetes (0C2)

Nº do Provete	Extensão (mm/mm)%	Tensão de Cedência (MPa)	Modulo (GPa)	Energia Absorvida até rotura (J)
1	6.55	137.4	6.881	3.700
2	6.71	132.9	6.565	3.699
3	4.38	144.8	9.005	2.097
4	4.68	147.7	9.578	2.34
5	6.17	135.0	7.179	3.375

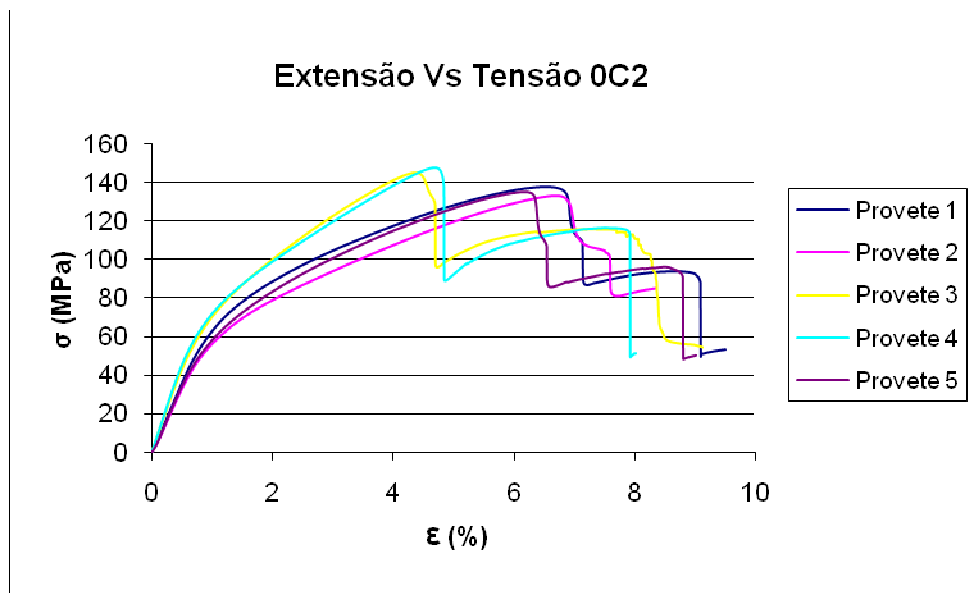


Fig.5.4 – Curva Extensão Vs Tensão 0C2

045C

Tab.5.9 – Dimensões dos provetes de flexão (045C)

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
Largura (mm)	14,99	14,57	14,90	15,01	14,87	14,90
Espessura (mm)	3,49	3,78	3,48	4,03	4,00	3,57
Espaçamento entre apoios (mm)	56	56	56	56	56	56
Orientação	1	1	1	2	2	2

Tab.5.10 – Propriedades de flexão dos provetes (045C)

Nº do Provete	Extensão (mm/mm)%	Tensão de Cedência (MPa)	Modulo (GPa)	Energia Absorvida até rotura (J)
1	7.22	102.7	6.691	1.772
2	3.25	159.0	9.213	1.126
3	7.52	136.6	8.271	2.343
4	6.62	133.1	5.884	2.242
5	6.42	139.5	7.007	2.394
6	7.56	146.9	8.376	2.666

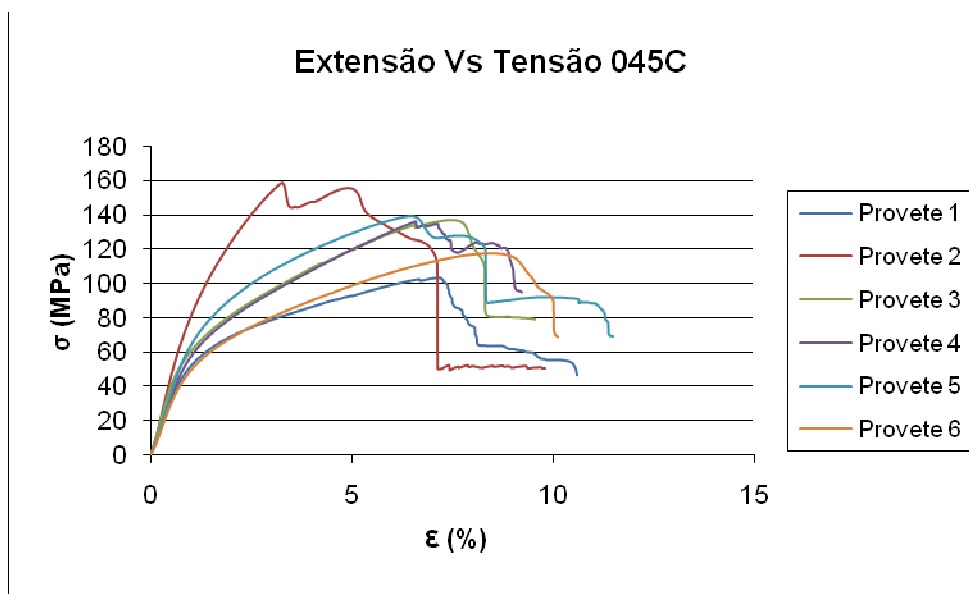


Fig.5.5 – Curva Extensão Vs Tensão 045C

45CF

Tab.5.11 – Dimensões dos provetes de flexão (45CF)

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
Largura (mm)	14,70	15,06	14,98	14,82	13,83
Espessura (mm)	3,37	3,64	3,17	3,08	3,64
Espaçamento entre apoios (mm)	56	56	56	56	56
Orientação	1	1	1	2	2

Tab.5.12 – Propriedades de flexão dos provetes (45CF)

Nº do Provete	Extensão (mm/mm)%	Tensão de Cedência (MPa)	Modulo (GPa)	Energia Absorvida até rotura (J)
1	2,10	186,39	13,779	0,742
2	2,19	183,80	12,995	0,840
3	2,00	205,37	15,083	0,703
4	2,28	205,22	12,645	0,756
5	2,41	192,46	13,115	0,892

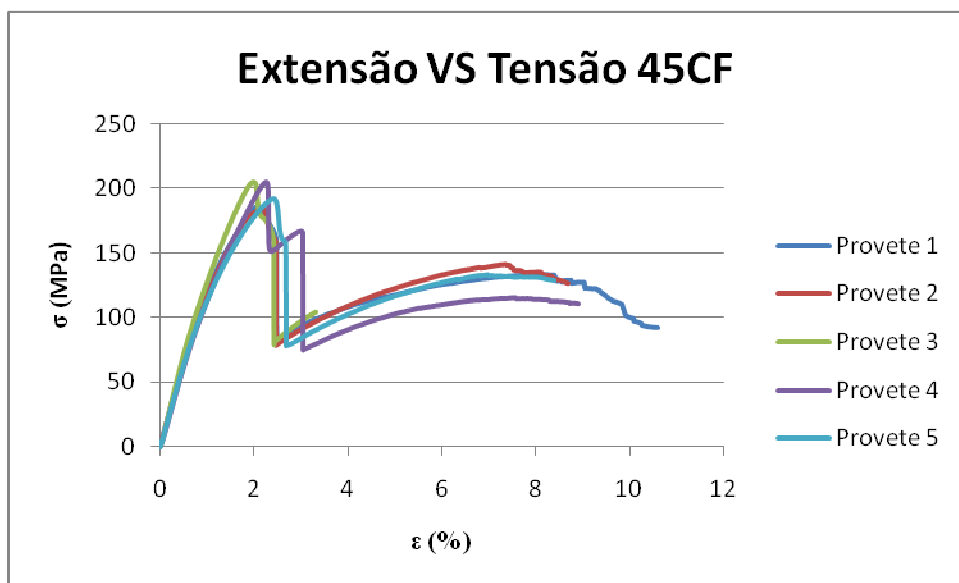


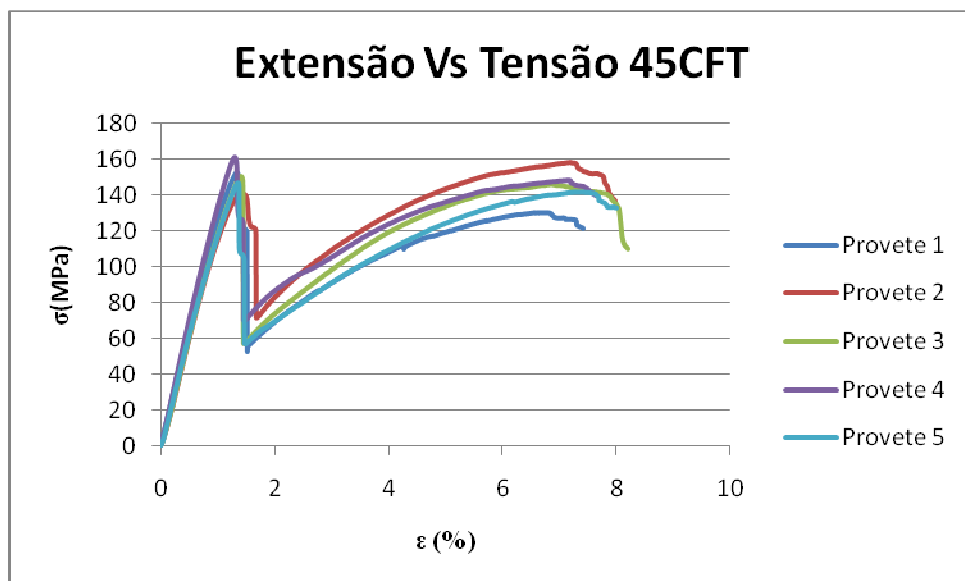
Fig.5.6 – Curva Extensão Vs Tensão 45CF

45CFT**Tab.5.13 – Dimensões dos provetes de flexão (45CFT)**

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
Largura (mm)	14,79	14,34	14,52	14,61	14,09
Espessura (mm)	3,31	4,02	3,89	3,32	3,53
Espaçamento entre apoios (mm)	56	56	56	56	56
Orientação	1	1	1	2	2

Tab.5.14 – Propriedades de flexão dos provetes (45CFT)

Nº do Provete	Extensão (mm/mm)%	Tensão de Cedência (MPa)	Modulo (GPa)	Energia Absorvida até rotura (J)
1	1,345	152,66	13,784	0,348
2	1,441	140,90	12,755	0,417
3	1,413	150,71	12,914	0,406
4	1,306	161,31	14,378	0,341
5	1,355	146,86	13,010	0,331

**Fig.5.7 – Curva Extensão Vs Tensão 45CFT**

45CT

Tab.5.15 – Dimensões dos provetes de flexão (45CT)

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provte 5
Largura (mm)	14,650	14,640	14,690	14,680	14,750
Espessura (mm)	3,570	3,330	3,640	3,420	3,250
Espaçamento entre apoios (mm)	56	56	56	56	56
Orientação	1	1	1	2	2

Tab.5.16 – Propriedades de flexão dos provetes (45CT)

N° do Provete	Extensão (mm/mm) %	Tensão de Cedência (MPa)	Modulo (GPa)	Energia Absorvida (J)
1	3,750	103,50	8,576	0,924
2	2,144	98,48	9,416	0,432
3	4,630	112,78	8,330	1,266
4	2,436	107,23	9,627	0,561
5	2,610	101,03	8,854	0,551

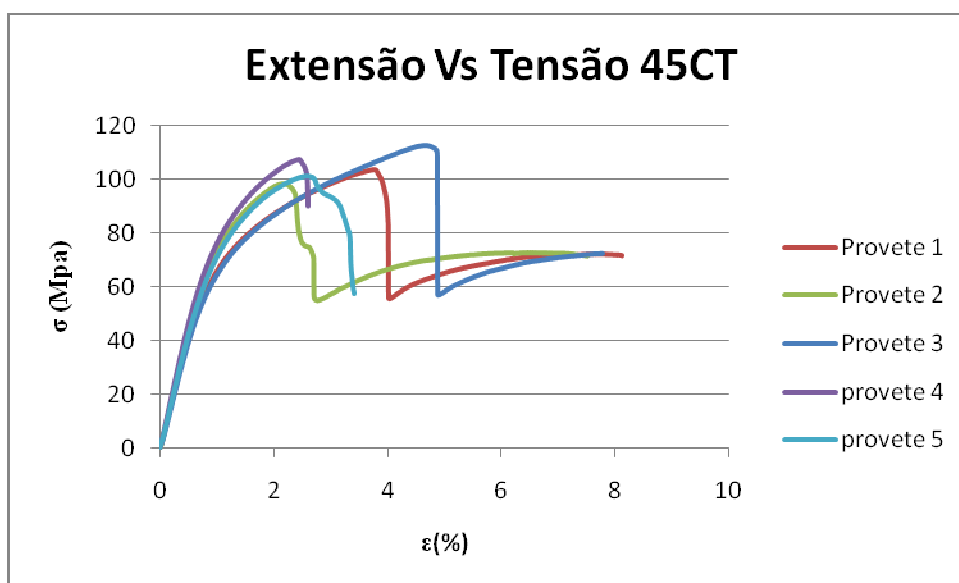


Fig.5.8 – Curva Extensão Vs Tensão 45CT

5.2 - Ensaio de Corte

0M

Tab.5.17 – Dimensões dos provetes de corte (0M)

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
Largura (mm)	7,03	7,06	7,00	6,92	7,09	6,95
Espessura (mm)	3,44	3,55	3,42	3,32	3,59	3,47
Espaçamento entre apoios (mm)	14	14	14	14	14	14
Orientação	1	1	1	2	2	2

Tab.5.18 – Propriedades de corte dos provetes (0M)

Nº do Provete	Extensão (mm/mm)%	Tensão de Corte Interlaminar (MPa)
Provete 1	6,968	29,07
Provete 2	8,554	30,38
Provete 3	9,158	31,26
Provete 4	9,48	30,68
Provete 5	9,058	32,41
Provete 6	6,853	27,52
	Média	30,22
	Desvio Padrão	1,72

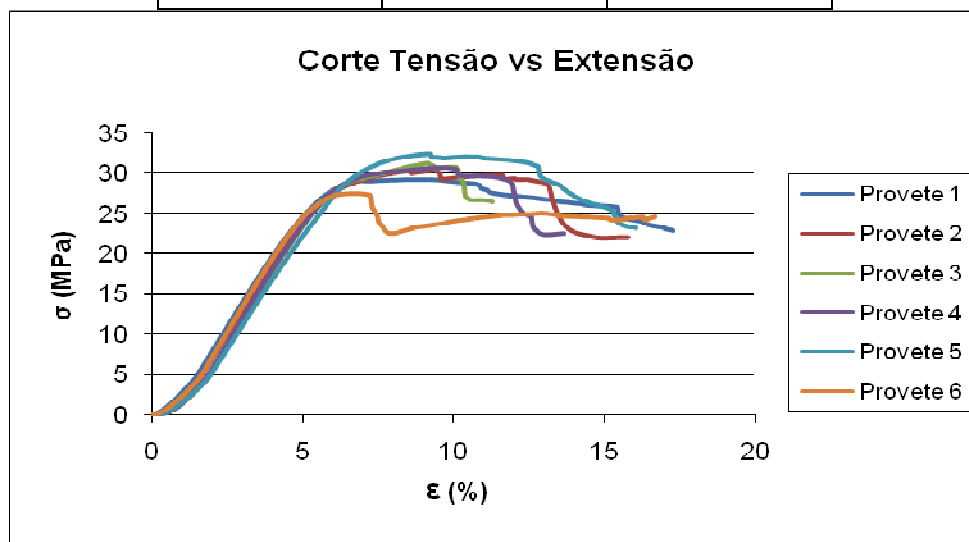


Fig.5.9 – Curva Corte Tensão Vs Extensão 0M

45M

Tab.5.19 – Dimensões dos provetes de corte (45M)

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
Largura (mm)	6,95	6,99	7,16	7,26	7,16	7,17
Espessura (mm)	3,74	3,69	3,65	3,60	3,63	3,57
Espaçamento entre apoios (mm)	14	14	14	14	14	14
Orientação	1	1	1	2	2	2

Tab.5.20 – Propriedades de corte dos provetes (45M)

Nº do Provete	Extensão (mm/mm)%	Tensão de Corte Interlaminar (MPa)
Provete 1	8,145	28,87
Provete 2	7,996	29,08
Provete 3	8,279	28,52
Provete 4	9,223	28,50
Provete 5	9,300	29,92
Provete 6	10,104	30,32
	Média	29,20
	Desvio Padrão	0,75

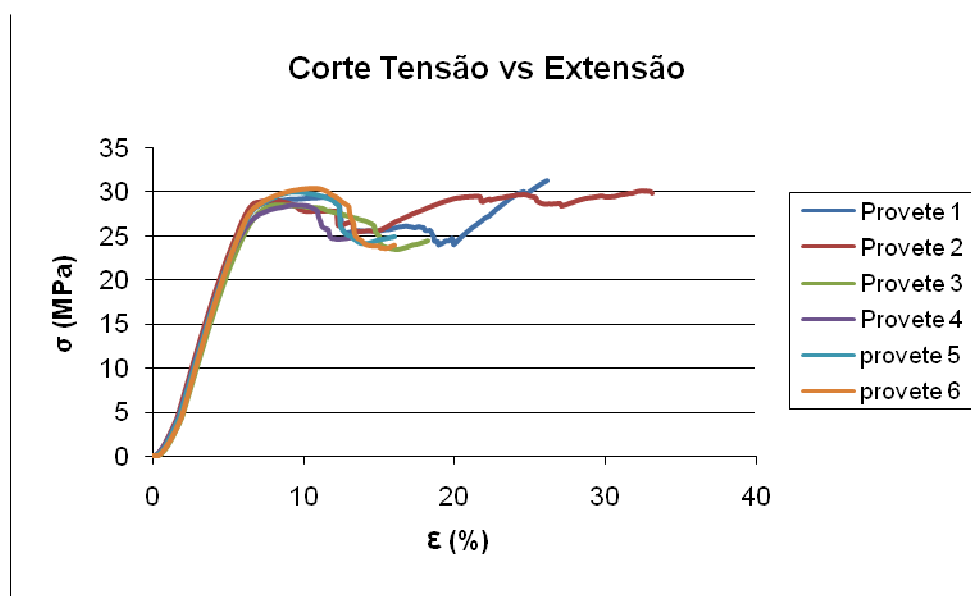


Fig.5.10 – Curva Corte Tensão Vs Extensão 45M

0C

Tab.5.21 – Dimensões dos provetes de corte (0C)

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
Largura (mm)	7,19	7,17	7,17	7,02	7,11	7,10
Espessura (mm)	3,58	3,48	3,26	3,23	3,37	3,31
Espaçamento entre apoios (mm)	14	14	14	14	14	14
Orientação	1	1	1	2	2	2

Tab.5.22 – Propriedades de corte dos provetes (0C)

Nº do Provete	Extensão (mm/mm)%	Tensão de Corte Interlaminar (MPa)
Provete 1	17,027	10,04
Provete 2	14,731	9,71
Provete 3	16,99	13,71
Provete 4	11,944	10,07
Provete 5	14,991	9,14
Provete 6	12,446	10,44
	Média	10,52
	Desvio Padrão	1,62

Corte Tensão vs Extensão

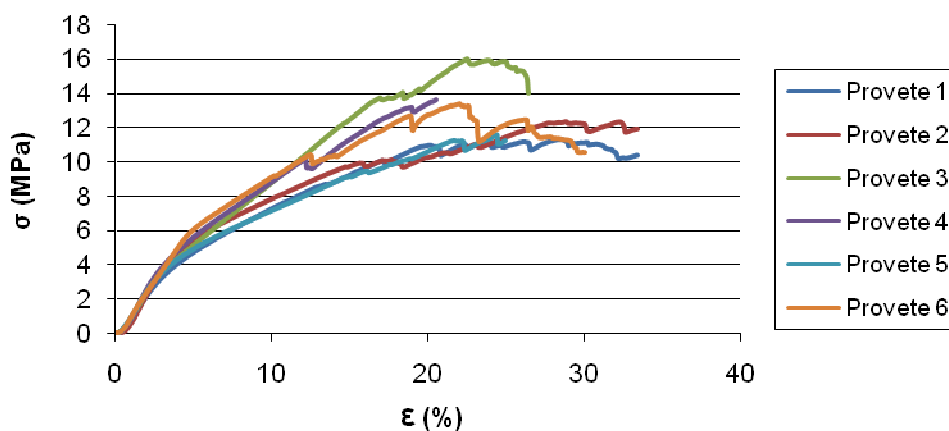


Fig.5.11 – Curva Corte Tensão Vs Extensão 0C

0C2

Tab.5.23 – Dimensões dos provetes de corte (0C2)

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
Largura (mm)	9,11	8,89	8,85	8,84	9,03	8,73
Espessura (mm)	4,42	4,36	4,80	4,33	4,38	4,70
Espaçamento entre apoios (mm)	18	18	18	18	18	18
Orientação	1	1	1	2	2	2

Tab.5.24 – Propriedades de corte dos provetes (0C2)

Nº do Provete	Extensão (mm/mm)%	Tensão de Corte Interlaminar (MPa)
Provete 1	18,992	12,01
Provete 2	20,68	13,84
Provete 3	23,14	12,60
Provete 4	18,24	13,12
Provete 5	23,62	14,22
Provete 6	23,50	12,54
	Média	13,10
	Desvio Padrão	0,84

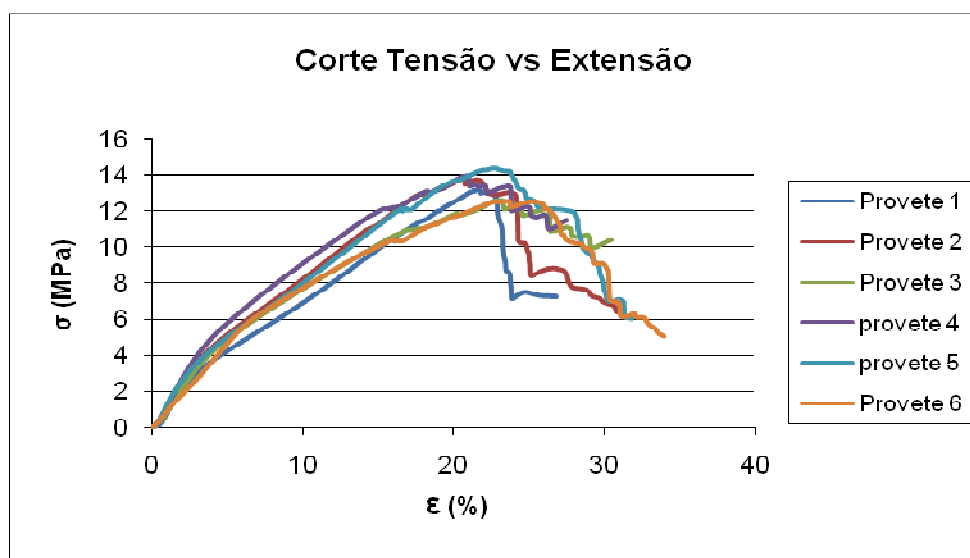


Fig.5.12 – Curva Corte Tensão Vs Extensão 0C2

45C

Tab.5.25 – Dimensões dos provetes de corte (45C)

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
Largura (mm)	7,19	7,15	7,15	7,18	7,2	7,15
Espessura (mm)	3,92	3,98	4,14	3,86	4,16	4,08
Espaçamento entre apoios (mm)	14	14	14	14	14	14
Orientação	1	1	1	2	2	2

Tab.5.26 – Propriedades de corte dos provetes (45C)

Nº do Provete	Extensão (mm/mm)%	Tensão de Corte Interlaminar (MPa)
Provete 1	19,547	10,16
Provete 2	19,125	7,72
Provete 3	24,603	12,13
Provete 4	20,271	10,78
Provete 5	17,023	11,09
Provete 6	19,552	11,78
	Média	10,61
	Desvio Padrão	1,58

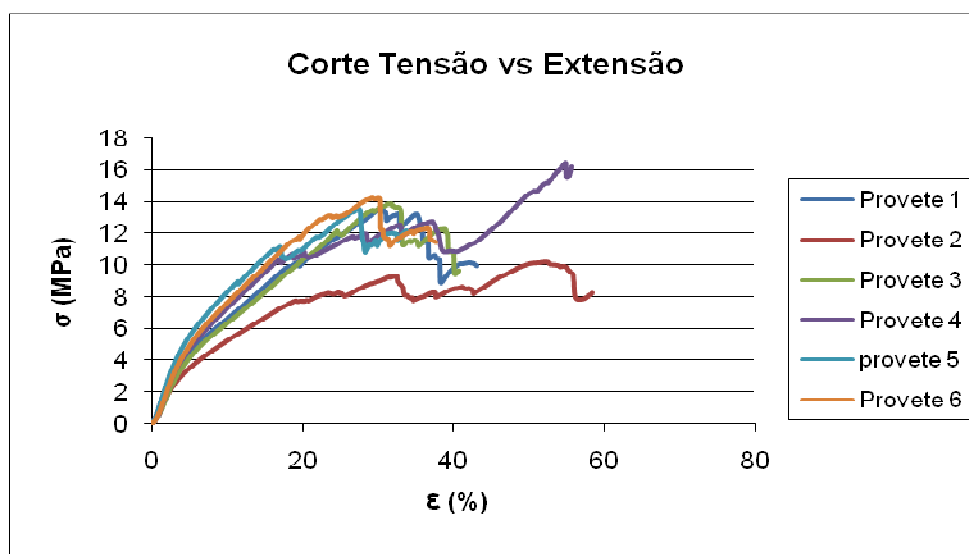


Fig.5.13 – Curva Corte Tensão Vs Extensão 45C

45CF

Tab.5.27 – Dimensões dos provetes de corte (45CF)

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
Largura (mm)	7,15	7,13	6,60	7,08	7,09	6,95
Espessura (mm)	3,52	3,20	3,55	3,19	3,29	3,65
Espaçamento entre apoios (mm)	14	14	14	14	14	14
Orientação	1	1	1	2	2	2

Tab.5.28 – Propriedades de corte dos provetes (45CF)

Nº do Provete	Extensão (mm/mm)%	Tensão de Corte Interlaminar (MPa)
Provete 1	9,37	18,91
Provete 2	10,90	20,45
Provete 3	11,00	18,72
Provete 4	9,67	19,15
Provete 5	11,37	19,79
Provete 6	12,33	22,25
	Média	19,88
	Desvio Padrão	1,32

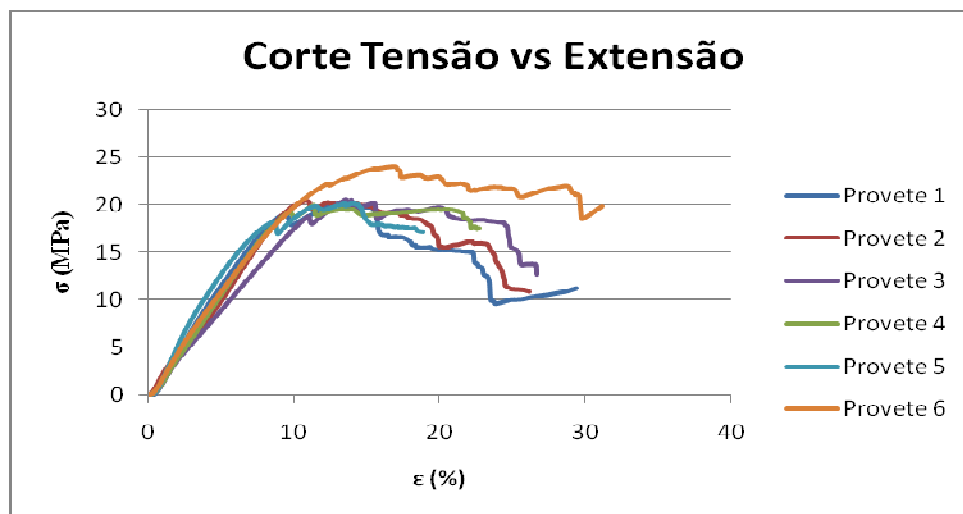


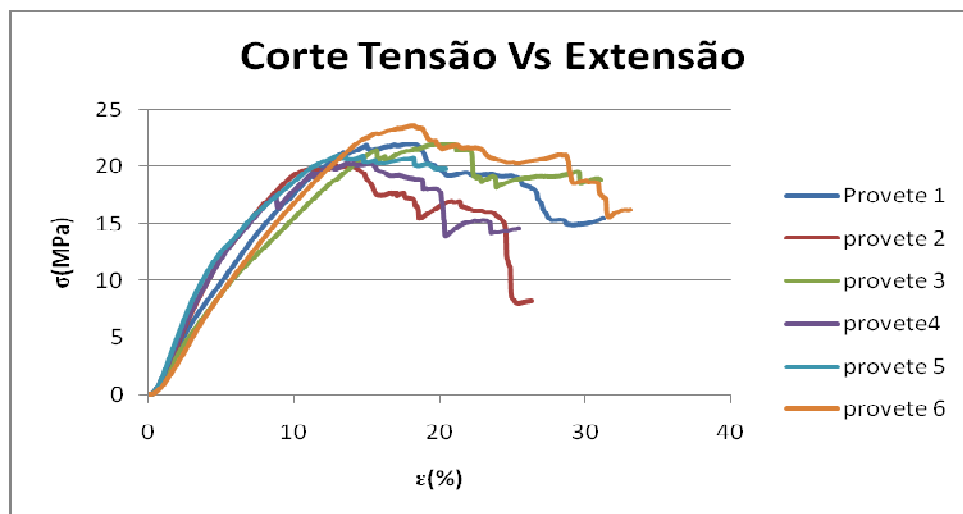
Fig.5.14 – Curva Corte Tensão Vs Extensão 45CF

45CFT**Tab.5.29 – Dimensões dos provetes de corte (45CFT)**

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
Largura (mm)	7,100	7,080	7,050	7,120	7,060	7,010
Espessura (mm)	3,790	3,400	3,780	3,420	3,260	4,380
Espaçamento entre apoios (mm)	14	14	14	14	14	14
Orientação	1	1	1	2	2	2

Tab.5.30 – Propriedades de corte dos provetes (45CFT)

Nº do Provete	Extensão (mm/mm)%	Tensão de Corte Interlaminar (MPa)
Provete 1	14,976	21,825
Provete 2	12,872	20,056
Provete 3	15,663	21,426
Provete 4	13,650	20,281
Provete 5	13,260	20,994
Provete 6	18,207	23,573
	Média	21,36
	Desvio Padrão	1,27

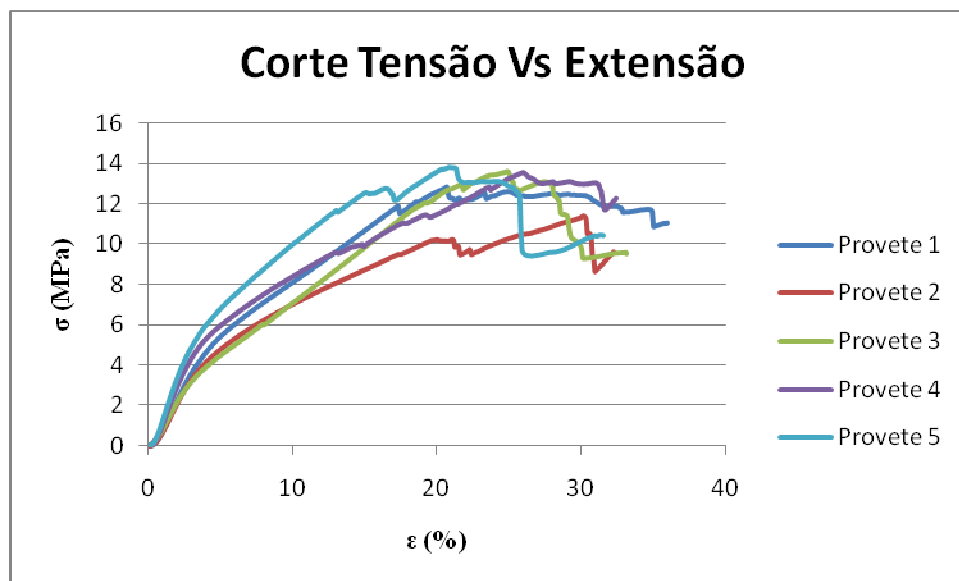
**Fig.5.15 – Curva Corte Tensão Vs Extensão 45CFT**

45CT**Tab.5.31 – Dimensões dos provetes de corte (45CT)**

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
Largura (mm)	7,100	7,080	7,050	7,120	7,060
Espessura (mm)	3,790	3,400	3,780	3,420	3,260
Espaçamento entre apoios (mm)	14	14	14	14	14
Orientação	1	1	1	2	2

Tab.5.32 – Propriedades de corte dos provetes (45CT)

Nº do Provete	Extensão (mm/mm)%	Tensão de Corte Interlaminar (MPa)
Provete 1	20,676	12,801
Provete 2	20,023	10,224
Provete 3	24,933	13,598
Provete 4	25,986	13,572
Provete 5	24,263	13,100
	Média	12,66
	Desvio Padrão	1,40

**Fig.5.16 – Curva Corte Tensão Vs Extensão 45CT**

5.3 - Ensaios Charpy

0M

Tab.5.33 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy 0M

Provete	Espessura (mm)	Largura (mm)	Ener. de Atrito (J)	Energia Total	Energia de Impacto	
					(J)	(kJ/m ²)
I01	3,41	6,10	0	2,550	2,5200	121,148
I02	3,31	6,41	0,03	2,630	2,6000	122,543
I03	3,35	6,09	0,03	2,530	2,5000	122,540
I04	3,55	6,10	0,03	2,830	2,8000	129,300
I05	3,41	6,17	0,03	2,990	2,9600	140,686
I06	3,47	6,02	0,03	2,510	2,4800	118,720
I07	3,33	5,85	0,03	2,510	2,4800	127,307
I08	3,57	5,85	0,03	2,480	2,4500	117,312
I09	3,22	5,87	0,03	2,590	2,5600	135,440
I10	3,46	6,00	0,03	2,690	2,6600	128,131
I11	3,40	6,00	0,03	3,250	3,2200	157,843
Média	3,41	6,04		2,69	2,66	129,18
D.P.	0,10	0,16		0,24	0,24	11,84

45M

Tab.5.34 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy 45M

Provete	Espessura (mm)	Largura (mm)	Ener. de Atrito (J)	Energia Total	Energia de Impacto	
					(J)	(kJ/m ²)
I01	3,45	5,95	0,03	2,600	2,5700	125,198
I02	3,76	5,92	0,03	3,220	3,1900	143,312
I03	3,63	5,92	0,03	3,260	3,2300	150,305
I04	3,34	5,91	0,03	2,760	2,7300	138,302
I05	3,56	5,90	0,03	2,610	2,5800	122,834
I06	3,68	5,93	0,03	3,240	3,2100	147,097
I07	3,70	5,99	0,03	2,410	2,3800	107,386
I08	3,56	5,88	0,03	2,840	2,8100	134,239
I09	3,64	5,97	0,03	3,140	3,1100	143,115
I10	3,54	6,00	0,03	3,080	3,0500	143,597
I11	3,53	5,95	0,03	2,990	2,9600	140,929
Média	3,58	5,94		2,92	2,89	136,03
D.P.	0,12	0,04		0,30	0,30	12,77

0C

Tab.5.35 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy 0C

Provete	Espessura (mm)	Largura (mm)	Ener. de Atrito (J)	Energia Total	Energia de Impacto	
					(J)	(kJ/m ²)
I01	3,42	5,96	0,03	1,060	1,0300	50,532
I02	3,45	5,86	0,03	1,090	1,0600	52,431
I03	3,29	5,97	0,03	1,160	1,1300	57,532
I04	3,47	5,88	0,03	2,000	1,9700	96,552
I05	3,28	5,89	0,03	1,290	1,2600	65,220
I06	3,28	5,85	0,03	1,080	1,0500	54,722
I07	3,46	5,91	0,03	0,940	0,9100	44,502
I08	3,46	5,88	0,03	0,960	0,9300	45,712
I09	3,52	5,94	0,03	1,240	1,2100	57,870
I10	3,43	5,92	0,03	1,010	0,9800	48,263
I11	3,31	6,14	0,03	1,330	1,3000	63,966
Média	3,40	5,93		1,20	1,17	57,94
D.P.	0,09	0,08		0,30	0,30	14,49

45C

Tab.5.36 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy 45C

Provete	Espessura (mm)	Largura (mm)	Ener. de Atrito (J)	Energia Total	Energia de Impacto	
					(J)	(kJ/m ²)
I01	3,73	5,91	0,03	1,760	1,7300	78,478
I02	3,84	5,96	0,03	1,510	1,4800	64,667
I03	4,08	5,97	0,03	1,530	1,5000	61,582
I04	4,30	5,75	0,03	1,480	1,4500	58,645
I05	4,23	5,87	0,03	1,420	1,3900	55,980
I06	3,57	5,87	0,03	1,040	1,0100	48,196
I07	3,70	5,90	0,03	1,510	1,4800	67,797
I08	3,99	5,98	0,03	1,710	1,6800	70,410
I09	3,80	5,94	0,03	1,400	1,3700	60,695
I10	4,06	5,90	0,03	1,380	1,3500	56,358
I11	4,10	5,83	0,03	0,545	0,5150	21,545
Média	3,95	5,90		1,39	1,36	58,58
D.P.	0,23	0,07		0,34	0,34	14,71

0C2**Tab.5.37 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy 0C2**

Provete	Espessura (mm)	Largura (mm)	Ener. de Atrito (J)	Energia Total	Energia de Impacto	
					(J)	(kJ/m ²)
I01	4,35	5,89	0,03	1,980	1,9500	76,108
I02	4,74	5,84	0,03	1,990	1,9600	70,805
I03	4,42	5,88	0,03	1,730	1,7000	65,411
I04	4,44	5,69	0,03	1,800	1,7700	70,061
I05	4,80	5,92	0,03	2,220	2,1900	77,069
I06	4,75	5,87	0,03	2,190	2,1600	77,468
I07	4,74	5,87	0,03	2,090	2,0600	74,037
I08	4,42	5,89	0,03	1,940	1,9100	73,366
I09	4,39	5,95	0,03	1,930	1,9000	72,740
I10	4,47	5,87	0,03	2,130	2,1000	80,034
I11	4,28	5,79	0,03	1,470	1,4400	58,109
Média	4,53	5,86		1,95	1,92	72,29
D.P.	0,19	0,07		0,22	0,22	6,20

45CF**Tab.5.38 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy 45CF**

Provete	Espessura (mm)	Largura (mm)	Ener. de Atrito (J)	Energia Total	Energia de Impacto	
					(J)	(kJ/m ²)
I01	3,43	6,16	0,03	2,240	2,2100	104,597
I02	3,15	5,81	0,03	1,700	1,6700	91,249
I03	3,35	6,14	0,03	2,240	2,2100	107,443
I04	3,65	6,13	0,03	2,320	2,2900	102,349
I05	3,25	6,17	0,03	2,330	2,3000	114,699
I06	3,36	6,10	0,03	2,300	2,2700	110,753
I07	3,26	6,19	0,03	2,050	2,0200	100,102
I08	3,38	5,97	0,03	2,570	2,5400	125,876
I09	3,64	6,28	0,03	2,060	2,0300	88,805
I10	3,53	6,21	0,03	1,870	1,8400	83,937
I11	3,19	6,12	0,03	2,320	2,2900	117,299
I12	3,57	6,12	0,03	1,880	1,8500	84,674
I13	3,30	5,01	0,03	1,960	1,9300	116,736
Média	3,39	6,03		2,14	2,15	103,73
D.P.	0,17	0,33		0,24	0,24	13,47

45CT

Tab.5.39 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy45CT

Provete	Espessura (mm)	Largura (mm)	Ener. de Atrito (J)	Energia Total	Energia de Impacto	
					(J)	(kJ/m ²)
I01	3,40	6,10	0,03	0,880	0,8500	40,984
I02	3,31	6,07	0,03	0,710	0,6800	33,845
I03	3,54	6,16	0,03	0,670	0,6400	29,349
I04	3,42	6,19	0,03	0,900	0,8700	41,096
I05	3,37	6,20	0,03	0,930	0,9000	43,075
I06	3,42	6,14	0,03	1,330	1,3000	61,908
I07	3,55	6,21	0,03	0,680	0,6500	29,484
I08	3,47	6,15	0,03	0,840	0,8100	37,956
I09	3,81	6,17	0,03	1,000	0,9700	41,263
I10	3,72	6,03	0,03	0,710	0,6800	30,314
I11	3,35	6,22	0,03	1,120	1,0900	52,311
I12	3,82	6,17	0,03	1,070	1,0400	44,125
Média	3,52	6,15		0,90	0,86	40,48
D.P.	0,18	0,06		0,20	0,20	9,62

45CFT

Tab.5.40 – Resultados do Ensaio de Impacto Charpy45CT

Provete	Espessura (mm)	Largura (mm)	Ener. de Atrito (J)	Energia Total	Energia de Impacto	
					(J)	(kJ/m ²)
I01	2,90	6,20	0,03	1,850	1,8200	101,224
I02	2,96	6,25	0,03	1,560	1,5300	82,703
I03	3,62	5,88	0,03	1,920	1,8900	88,792
I04	3,32	6,18	0,03	2,460	2,4300	118,435
I05	3,32	6,15	0,03	2,230	2,2000	107,748
I06	3,36	6,22	0,03	1,530	1,5000	71,773
I07	2,89	6,15	0,03	1,580	1,5500	87,208
I08	2,58	6,21	0,03	0,630	0,6000	37,449
I09	3,78	6,18	0,03	1,550	1,5200	65,067
I10	4,18	6,16	0,03	2,760	2,7300	106,024
I11	3,79	6,22	0,03	1,950	1,9200	81,446
I12	4,10	6,28	0,03	1,650	1,6200	62,918
	3,40	6,17		1,81	1,79	84,23
	0,51	0,10		0,54	0,56	22,75

5.4 Teores Fibra/Resina

Tab.5.41 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 0M

Tipo de Provete:

Data ensaio:

Provete	m(cad)/g	m(cad+prov)/g	m(prov)/g	m(cad+fibra)/g	m(fib)/g	m(res)/g	% Res	% Fib
1	24,9275	27,3825	2,4550	26,2110	1,2835	1,1715	47,72	52,28
2	24,8151	27,2106	2,3955	26,0567	1,2416	1,1539	48,17	51,83
3	24,1841	26,7133	2,5292	25,4961	1,3120	1,2172	48,13	51,87
4	22,1284	24,7011	2,5727	23,4777	1,3493	1,2234	47,55	52,45
5	14,6876	17,1360	2,4484	15,9850	1,2974	1,1510	47,01	52,99

Resultados médios	Média	D.P.
Resina	47,72	0,47
Fibra	52,28	0,47

Tab.5.42 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 45M

Material:

Data ensaio:

Provete	m(cad)/g	m(cad+prov)/g	m(prov)/g	m(cad+fibra)/g	m(fib)/g	m(res)/g	% Res	% Fib
1	24,9273	27,6909	2,7636	26,3163	1,3890	1,3746	49,74	50,26
2	24,8142	27,4975	2,6833	26,1233	1,3091	1,3742	51,21	48,79
3	24,1852	26,9965	2,8113	25,5963	1,4111	1,4002	49,81	50,19
4	22,1277	24,8276	2,6999	23,4445	1,3168	1,3831	51,23	48,77
5	14,6881	17,2881	2,6000	15,9425	1,2544	1,3456	51,75	48,25

Resultados médios	Média	D.P.
Resina	50,75	0,92
Fibra	49,25	0,92

Tab.5.43 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 0C

Material:

0 C

Data ensaio:

12-01-2009

Provete	m(cad)/g	m(cad+prov)/g	m(prov)/g	m(cad+fibra)/g	m(fib)/g	m(res)/g	% Res	% Fib
1	24,9748	26,2620	1,2872	25,6190	0,6442	0,6430	49,95	50,05
2	24,8710	26,0768	1,2058	25,5185	0,6475	0,5583	46,30	53,70
3	24,2498	25,5247	1,2749	24,9474	0,6976	0,5773	45,28	54,72
4	22,1862	23,6485	1,4623	22,9393	0,7531	0,7092	48,50	51,50
5	14,7547	16,2894	1,5347	15,5785	0,8238	0,7109	46,32	53,68

Resultados médios	Média	D.P.
Resina	47,27	1,90
Fibra	52,73	1,90

Tab.5.44 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 45C

Material:

45 C

Data ensaio:

14-11-2008

Provete	m(cad)/g	m(cad+prov)/g	m(prov)/g	m(cad+fibra)/g	m(fib)/g	m(res)/g	% Res	% Fib
1	24,9928	26,4926	1,4998	25,7456	0,7528	0,7470	49,81	50,19
2	24,8835	26,4902	1,6067	25,6908	0,8073	0,7994	49,75	50,25
3	24,2571	26,1165	1,8594	25,1734	0,9163	0,9431	50,72	49,28
4	22,1946	24,1509	1,9563	23,0422	0,8476	1,1087	56,67	43,33
5	14,7502	16,7165	1,9663	15,6481	0,8979	1,0684	54,34	45,66

Resultados médios	Média	D.P.
Resina	52,26	3,10
Fibra	47,74	3,10

Tab.5.45 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 0C+

Material:

Ø C +

Data ensaio:

05-01-2009

Provete	m(cad)/g	m(cad+prov)/g	m(prov)/g	m(cad+fibra)/g	m(fib)/g	m(res)/g	% Res	% Fib
1	24,9733	27,3069	2,3336	26,0038	1,0305	1,3031	55,84	44,16
2	24,8711	27,3030	2,4319	25,9303	1,0592	1,3727	56,45	43,55
3	24,2491	26,6702	2,4211	25,3095	1,0604	1,3607	56,20	43,80
4	22,1864	24,6004	2,4140	23,2133	1,0269	1,3871	57,46	42,54
5	14,7550	16,9039	2,1489	15,7519	0,9969	1,1520	53,61	46,39

Resultados médios	Média	D.P.
Resina	55,91	1,42
Fibra	44,09	1,42

Tab.5.46 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 45CT

Material:

45 CT

Data ensaio:

26-01-2009

Provete	m(cad)/g	m(cad+prov)/g	m(prov)/g	m(cad+fibra)/g	m(fib)/g	m(res)/g	% Res	% Fib
1	24,9735	26,2130	1,2395	25,5418	0,5683	0,6712	54,15	45,85
2	24,8718	26,5656	1,6938	25,7010	0,8292	0,8646	51,04	48,96
3	24,2493	25,4624	1,2131	24,9137	0,6644	0,5487	45,23	54,77
4	22,1866	23,4638	1,2772	22,8573	0,6707	0,6065	47,49	52,51
5	14,7542	16,6772	1,9230	15,6702	0,9160	1,0070	52,37	47,63

Resultados médios	Média	D.P.
Resina	50,06	3,64
Fibra	49,94	3,64

Tab.5.47 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 45CF

Material: 45CF

Data ensaio: 28-01-2009

Provete	m(cad)/g	m(cad+prov)/g	m(prov)/g	m(cad+fibra)/g	m(fib)/g	m(res)/g	% Res	% Fib
1	24,9738	26,3475	1,3737	25,7242	0,7504	0,6233	45,37	54,63
2	24,8720	26,2721	1,4001	25,5910	0,7190	0,6811	48,65	51,35
3	24,2496	25,4903	1,2407	24,9537	0,7041	0,5366	43,25	56,75
4	22,1868	23,5104	1,3236	22,9587	0,7719	0,5517	41,68	58,32
5	14,7543	15,9470	1,1927	15,5125	0,7582	0,4345	36,43	63,57

Resultados médios	Média	D.P.
Resina	43,08	4,54
Fibra	56,92	4,54

Tab.5.48 – Resultado dos ensaios de teores para o laminado 45CFT

Material: 45CFT

Data ensaio: 27-01-2009

Provete	m(cad)/g	m(cad+prov)/g	m(prov)/g	m(cad+fibra)/g	m(fib)/g	m(res)/g	% Res	% Fib
1	24,9732	27,4437	2,4705	26,1140	1,1408	1,3297	53,82	46,18
2	24,8717	26,8339	1,9622	25,9974	1,1257	0,8365	42,63	57,37
3	24,2497	26,2042	1,9545	24,2566	0,0069	1,9476	99,65	0,35
4	22,1868	23,9535	1,7667	23,0709	0,8841	0,8826	49,96	50,04
5	14,7547	15,9663	1,2116	15,7109	0,9562	0,2554	21,08	78,92

Resultados médios	Média	D.P.
Resina	53,43	28,77
Fibra	46,57	28,77

5.5 – Comparação Estrutural da Cortiça e Área de Delaminagem

De forma a ser possível obter uma melhor compreensão dos resultados obtidos, e do efeito provocado pelo tratamento de silanos, efectuado nas folhas da cortiça, foram realizadas várias observações no microscópio de varrimento, existentes nas instalações do CEMUP.

Através de uma comparação directa entre a cortiça de 0,5mm de espessura sem tratamento, com a de 0,5 mm de espessura com tratamento, é impossível detectar visualmente a presença de silanos, apresentando-se estruturalmente idênticas, acontecendo o mesmo quando comparadas as folhas de cortiça de 0,2 mm de espessura, com e sem tratamento.

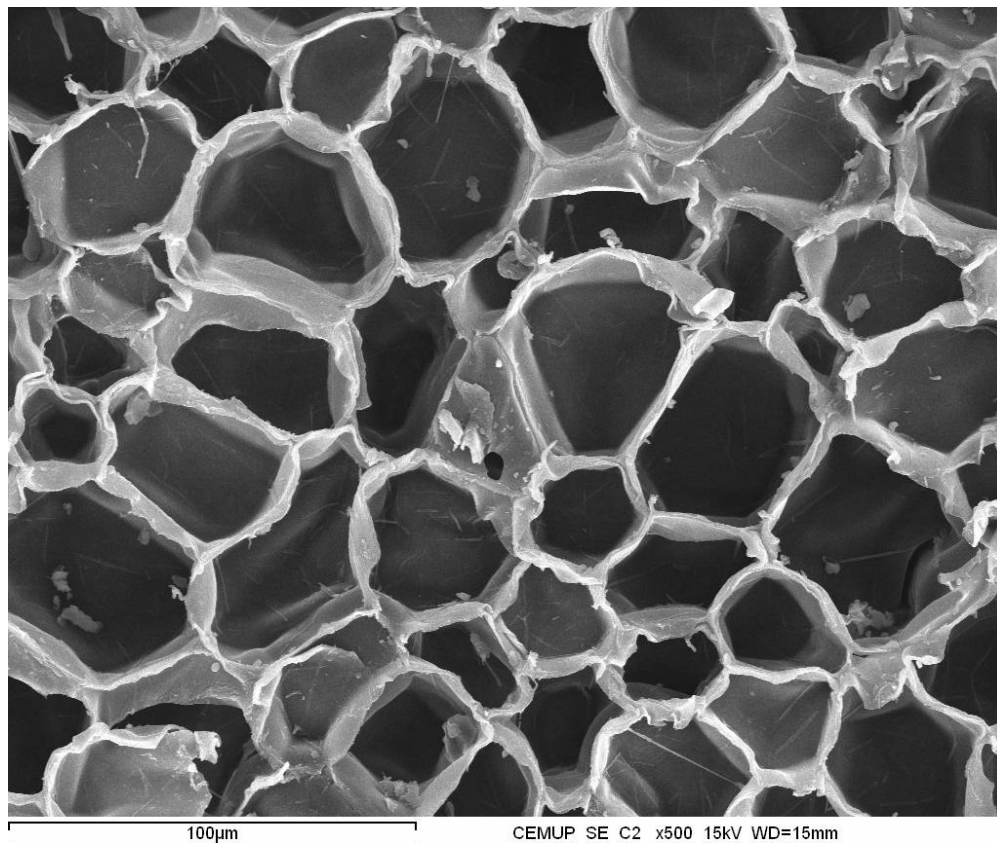


Fig.5.17 – Microestrutura da cortiça, espessura de 0,5 mm, sem tratamento

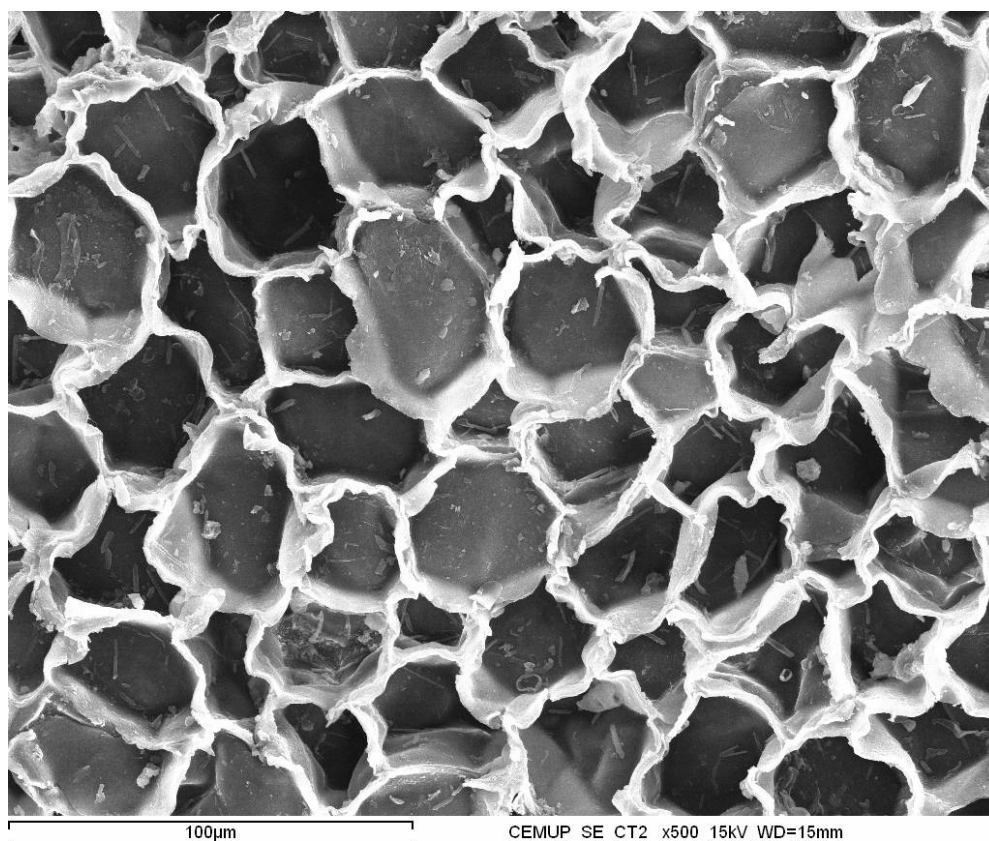


Fig.5.18 – Microestrutura da cortiça, espessura 0,5 mm, com tratamento

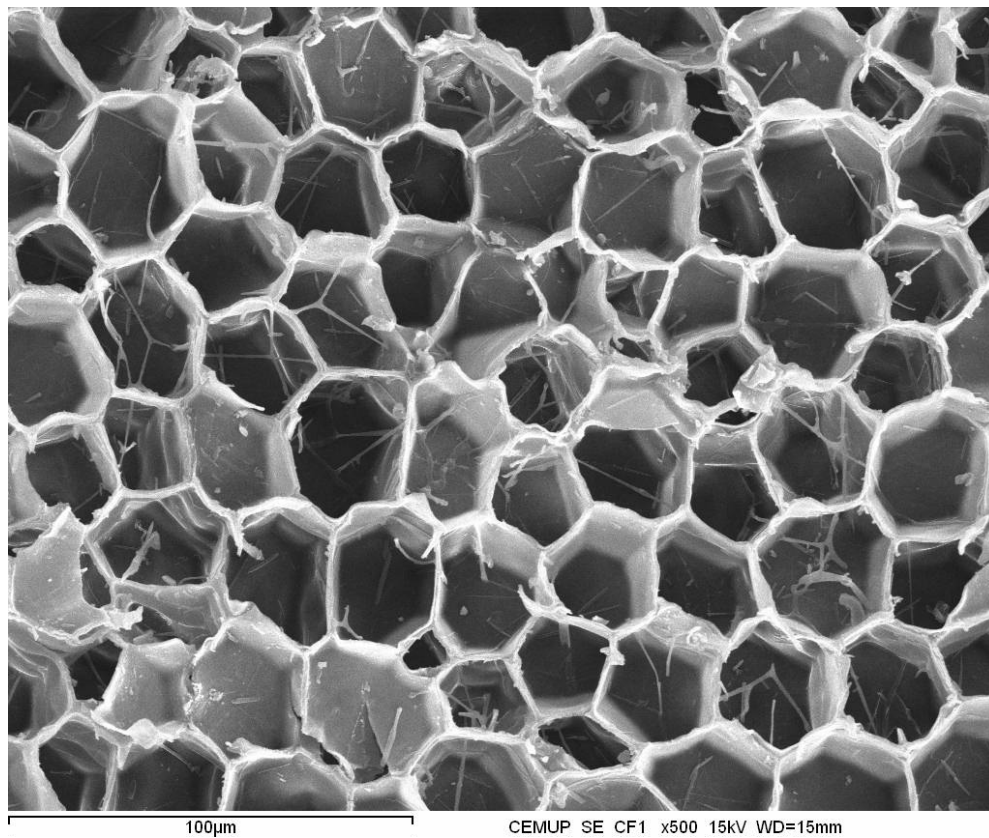


Fig.5.19 – Microestrutura da cortiça, espessura 0,2 mm, sem tratamento

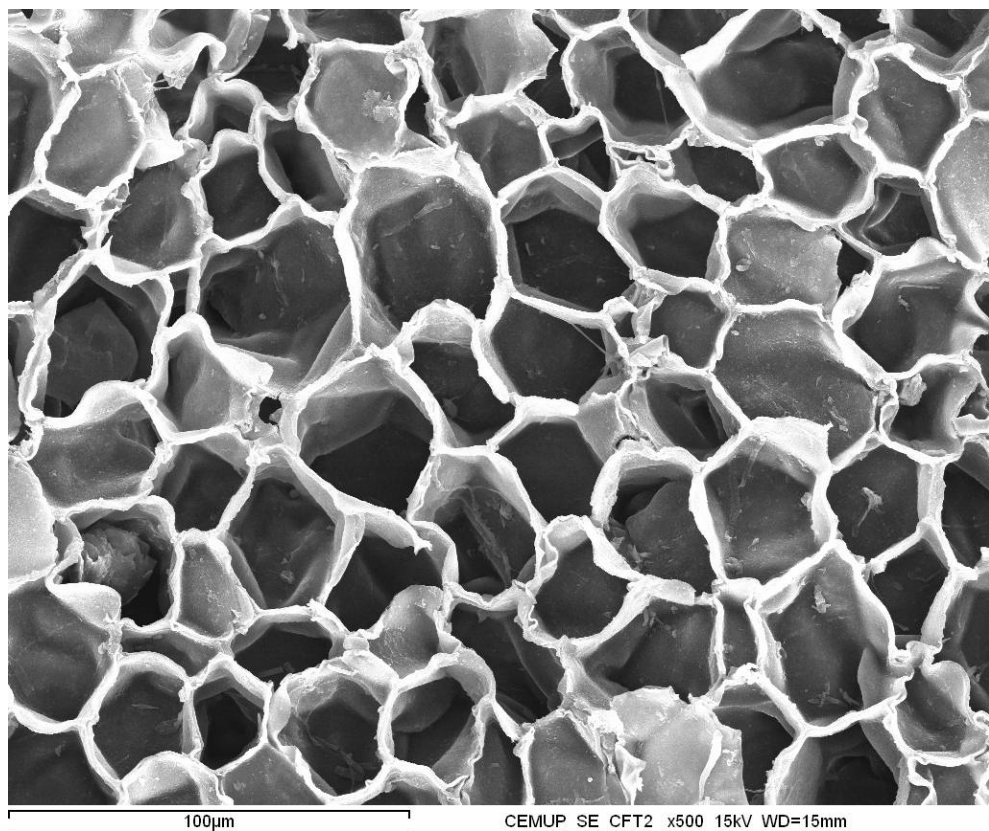


Fig.5.20 – Microestrutura da cortiça, espessura 0,2 mm, com tratamento

Apesar de visualmente ser impossível a detecção de qualquer efeito do tratamento da solução de silanos, na estrutura da cortiça, uma análise dos constituintes facilmente detecta a presença de sílica, sendo um factor indicativo dos efeitos do tratamento efectuado

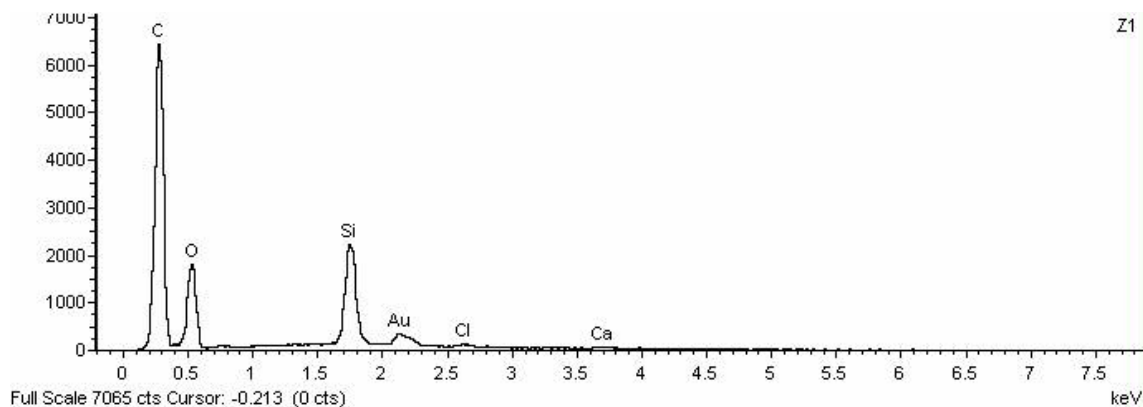


Fig.5.21 – Análise dos constituintes da cortiça, espessura 0,5 mm, com tratamento

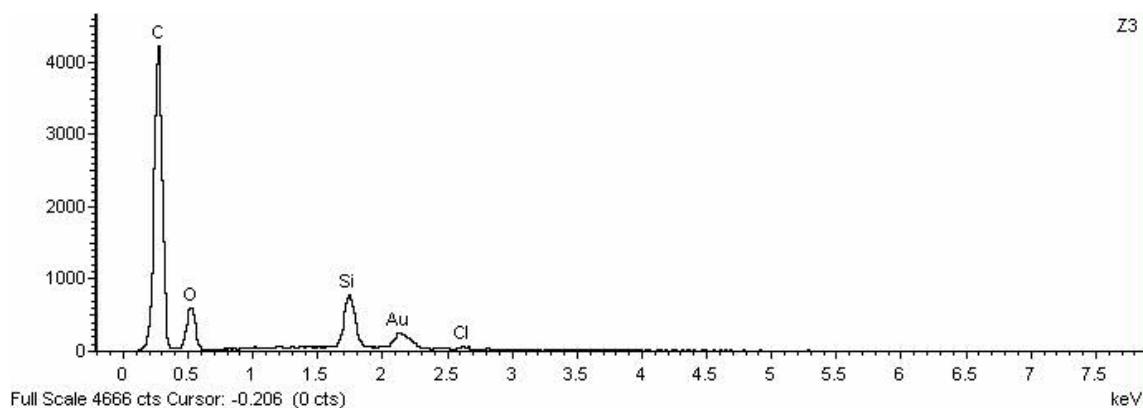


Fig.5.22 – Análise dos constituintes da cortiça, espessura 0,2 mm, com tratamento

A presença de cloro nesta análise poderá ser possivelmente devido ao facto da água utilizada na preparação da solução de silanos não estar completamente desionizada. A detecção de ouro deve-se ao revestimento utilizado na preparação das amostras, de modo a que estas fossem condutoras.

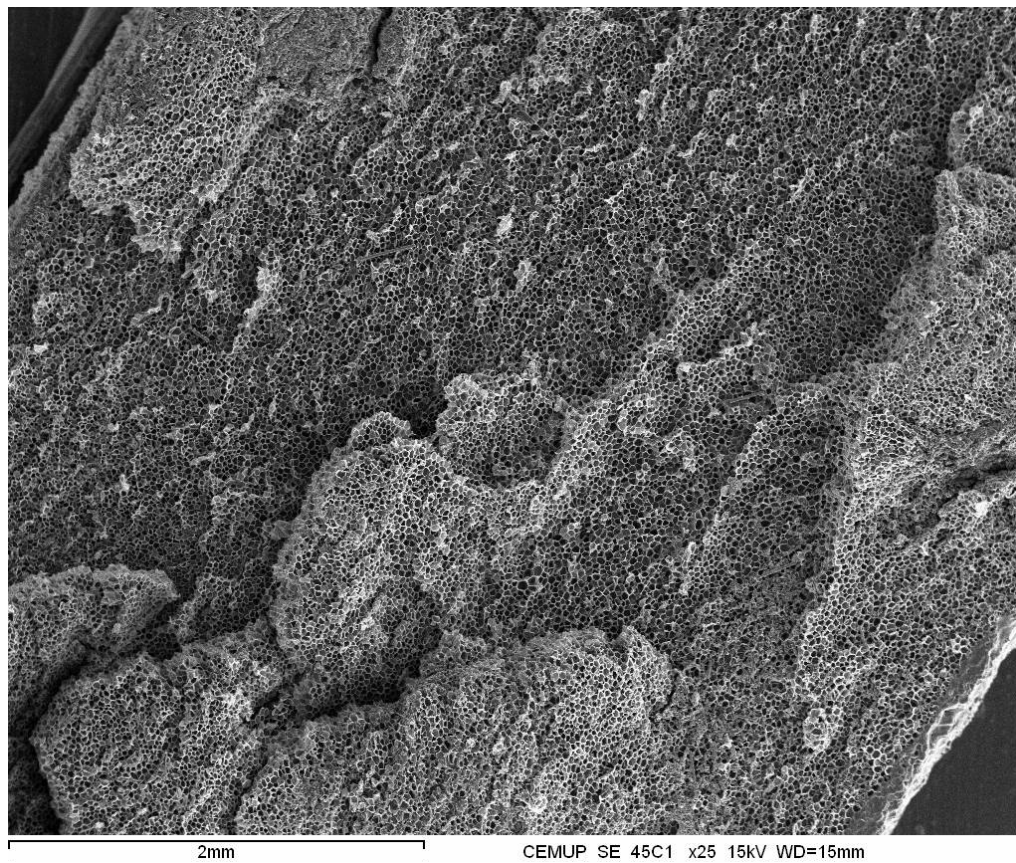


Fig.5.23 – Área de rotura de um provete 45C

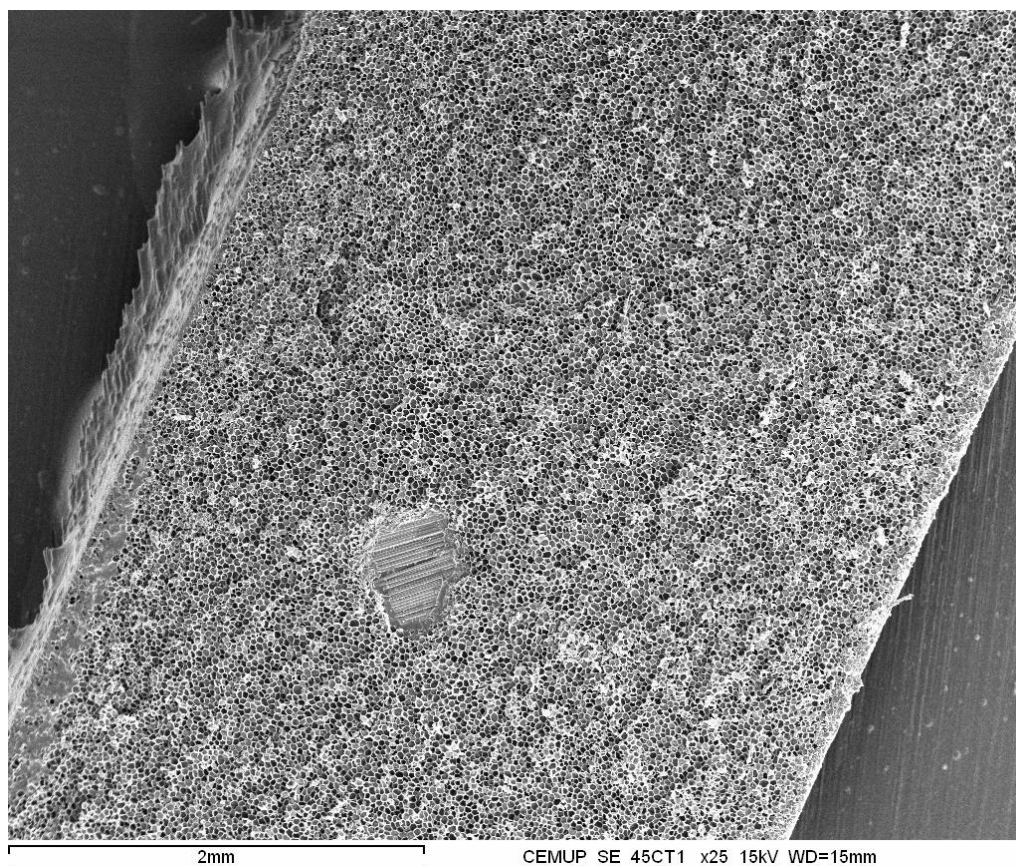


Fig.5.24 – Área de rotura de um provete 45CT

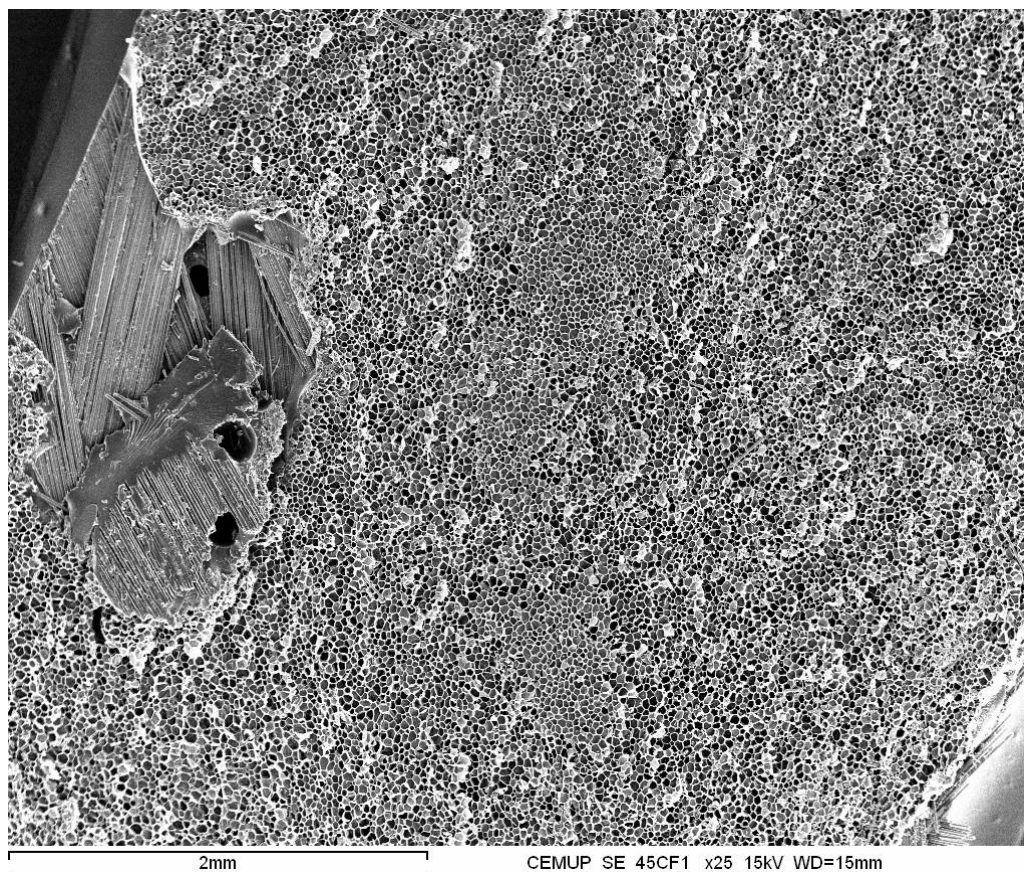


Fig.5.25 – Área de rotura de um provete 45CF

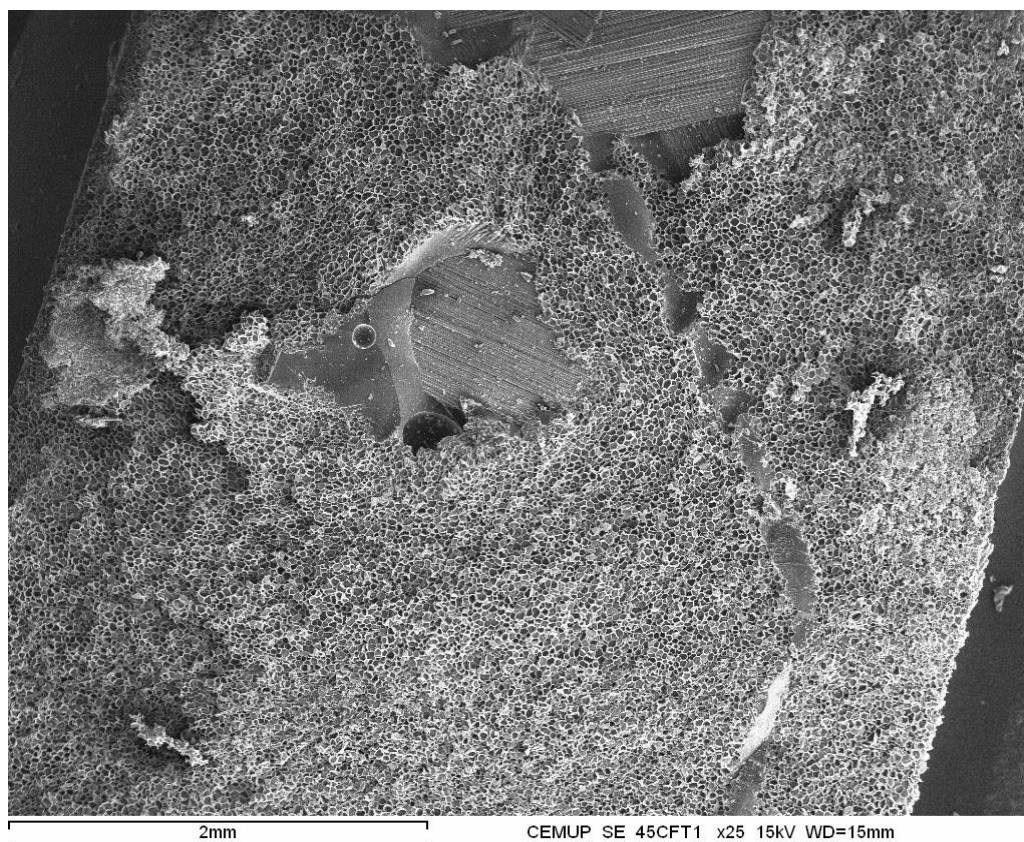


Fig.5.26 – Área de rotura de um provete 45CFT

As observações realizadas nas áreas delaminadas dos provetes, permitiram verificar os efeitos produzidos pelo tratamento superficial das folhas de cortiça.

Comparando as imagens obtidas dos 45C com os de 45CT, foi possível notar que a superfície dos provetes sem tratamento era bastante irregular, enquanto por outro lado, nos provetes de 45CT a superfície não aparenta ter grandes variações

Relativamente aos provetes de 45CF e 45CFT, verificamos que os provetes de 45CF apresentam uma superfície sem grandes irregularidades, o que seria de esperar, devido à pequena espessura da camada de filme de cortiça utilizada. Por sua vez, nos provetes de 45CFT, a cortiça apresenta-se bastante danificada e fendilhada.

Capítulo 6

Discussão de Resultados

6.1 – Introdução

Como foi anteriormente referido, este projecto experimental é originário de um trabalho iniciado na cadeira de Materiais Compósitos, do 5º ano de Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica, relativo estudo da resistência de materiais compósitos laminados a impactos de baixas velocidades. .

Foram igualmente fabricadas placas laminadas com configuração, sequências de empilhamento e espessuras idênticas às placas 0C, 45C, 0M, 45M utilizadas neste trabalho, diferenciando unicamente na fracção de fibra/resina. As percentagens mássicas dos constituintes variavam entre 60% a 70% de fibra e 30% a 40% de resina.

Ao contrário do esperado, as placas laminadas que continham cortiça, mostraram-se mais susceptíveis ao dano causado por impacto, tendo sido apontadas como potenciais causas desses resultados os seguintes motivos:

- Elevada percentagem de fibra em relação à resina, que indicava deficiente impregnação
- Espessura excessiva das folhas de cortiça dispostas nas camadas interlaminares, traduzindo elevado teor global de cortiça, sacrificando em demasia a rigidez do laminado

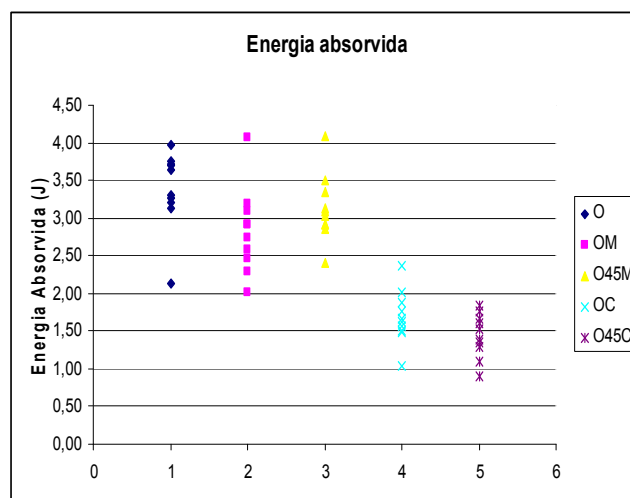


Fig.6.1 – Resultados Obtidos em Ensaios de Impacto Charpy

6.2 – Variação da razão de fibra/resina

De forma a conseguir eliminar os motivos que levaram a resultados inesperados no último trabalho, o processo experimental foi iniciado tendo em vista de conseguir obter uma melhor impregnação de resina nas fibras. Foram possíveis obter placas laminadas com fracções mássicas a rondar os 60% de resina e 40% de fibra.

Os resultados das propriedades mecânicas à flexão foram sensivelmente os esperados, verificando-se uma queda razoável nos valores de módulo de elasticidade e “tensão de cedência máxima”, sendo no entanto compensadas por um considerável aumento de tenacidade.

Com estes ensaios foi também possível verificar que as alterações operadas na percentagem de fibra/resina não exerceram uma influência significativa nas propriedades à flexão, tendo sido os resultados obtidos nos ensaios sensivelmente os mesmo daqueles que foram verificados no trabalho anterior.

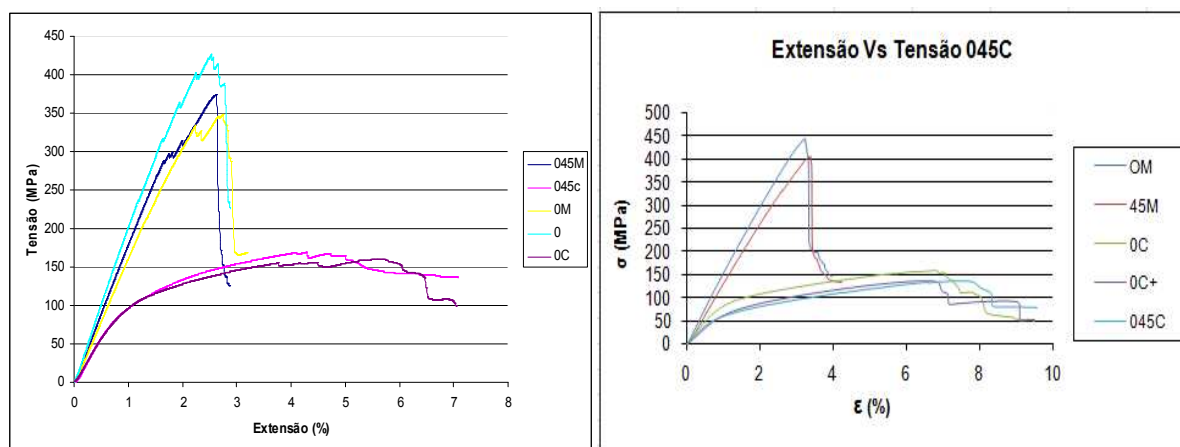


Fig.6.2 – Comparação das propriedades de flexão de provetes com diferente razão de fibra/resina

Os valores obtidos nos ensaios de corte interlaminar, vieram a confirmar os resultados obtidos nos ensaios de tracção e flexão, verificando-se a queda da tensão de corte interlaminar com a introdução das folhas de cortiça, acompanhado pelo respectivo aumento de tenacidade e energia absorvida. No entanto, durante os ensaios de corte realizados nesta primeira série de laminados com cortiça, foi possível observar que o mecanismo de cedência predominante residia no corte transversal das folhas de cortiça, sendo a delaminação entre camadas de cortiça e fibra um mecanismo secundário. Esta ocorrência leva a sugerir que o fraco comportamento ao impacto das placas de cortiça, realizadas no trabalho inicial, teria sido motivado fundamentalmente pela espessura das folhas de cortiça utilizadas, e não pela relação de fibra/resina.

Efectivamente, com a realização dos ensaios Charpy, vieram-se a confirmar as preocupações originadas pelos resultados dos ensaios de corte interlaminar, verificando-se novamente um fraco desempenho do comportamento ao impacto, nas placas contendo folhas de cortiça como camada de reforço interlaminar.

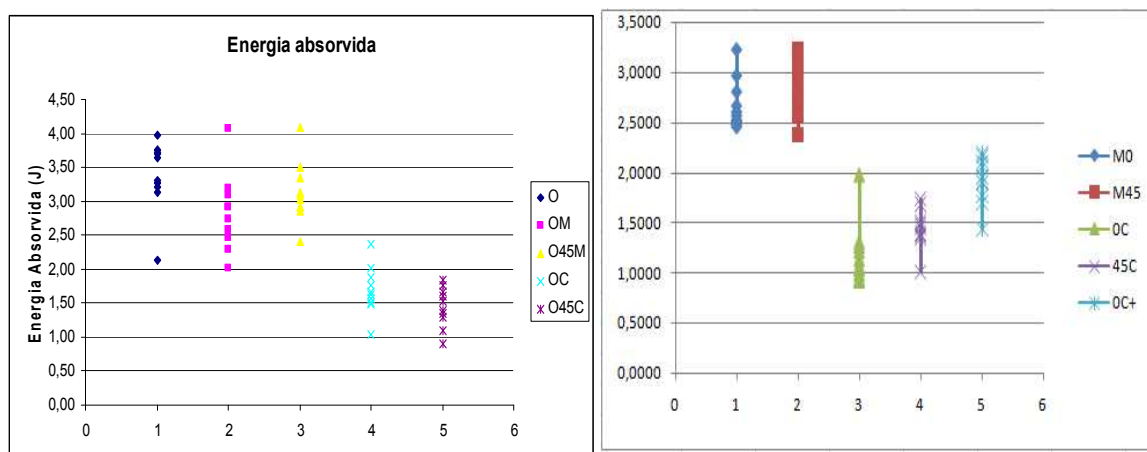


Fig.6.3 – Comparação dos resultados obtidos em ensaios Charpy, em provetes com diferente razão de fibra/resina

Os resultados obtidos com uma percentagem de fibra/resina de 60%-40% vieram a mostrar-se relativamente idênticos, em todos os aspectos, aos obtidos nos ensaios mecânicos e impacto das placas com percentagens de fibra/resina de 40% - 60%.

6.3 – Variação de Espessura das Placas Laminadas

Devido a um erro no fabrico das placas laminadas com cortiça, foi criada, inadvertidamente, uma placa (OC+) laminada com espessura e razão de fibra/cortiça superiores às placas inicialmente projectadas. O fabrico desta placa veio, no entanto, a revelar-se bastante útil, uma vez que permitiu estudar a influência da espessura relativamente às placas e ter ganhar alguma sensibilidade relativamente ao comportamento do material com uma maior razão de fibra/cortiça.

Após realizados os ensaios de flexão e corte verificou-se que a introdução de uma camada extra de fibra de vidro, na região central do laminado, não produzia alterações significativas nas propriedades de flexão e corte do material compósito. No entanto, os resultados de ensaio Charpy vieram a mostrar que este laminado (OC+) possuía uma melhor capacidade de absorção de energia do que os restantes laminados utilizando folhas de cortiça como reforço interlaminar. O aumento da energia absorvida, era desde já esperado, uma vez que o estudo da influência da espessura relativamente a

impacto a baixa velocidade, tem sido alvo de investigações extensivas ao longo dos últimos anos. Apesar de tudo, estes resultados vieram a introduzir uma nova questão, passível de ser estudada – até que ponto é que poderia ser benéfico aumentar a percentagem de fibra em relação à cortiça, mantendo constante a espessura total do laminado.

6.4 – Variação da Espessura das Folhas de Cortiça

Um dos aspectos apontados anteriormente como responsáveis pelo fraco desempenho dos laminados contendo cortiça ao impacto, residia no facto de estas serem sensíveis a solicitações de corte. Deste modo, mediante casos de impacto nos laminados contendo cortiça, o mecanismo de dissipação de energia consistia no corte interno das folhas da cortiça, sendo este mecanismo pouco eficaz para efeitos de absorção de energia de impacto.

De modo a eliminar ou atenuar este efeito, optou-se por uma nova abordagem, que consistia na redução da espessura das folhas de cortiça, substituindo as folhas de cortiça de 0.5mm por folhas de 0.1 mm

Com a realização dos ensaios de flexão e comparando-os com os resultados dos provetes com configuração mais semelhante (45M e 45C), foi possível constatar que introduzindo folhas de cortiça com menor espessura foi possível obter valores de módulo semelhantes às de 45M, apresentando uma quebra considerável nos valores de tensão de cedência. Apesar de tudo, os valores de tensão de cedência obtidos pelas placas de 45CF foram superiores às de 45C. Porém, na realização destes ensaios de flexão foram obtidos alguns resultados inesperados. Antes da realização dos ensaios, previa-se que os valores de extensão e energia absorvidos se situassem compreendidos entre os valores obtidos para os provetes de 45M e os de 45C. No entanto, foi possível constatar que os resultados obtidos nestas duas propriedades ficaram bastante distantes do esperado, uma vez que os valores de extensão e energia absorvida foram relativamente baixos.

Durante a realização do ensaio de flexão, verificou-se que houve uma quebra precoce das propriedades, devido a delaminação que ocorreram entre a camada de fibra/cortiça. Esta ocorrência pode ser considerado como um factor determinante pela baixa deformação que o material foi capaz de suportar, até ocorrer a cedência, bem como o baixo valor de energia absorvida.



Fig.6.4 – Ensaio de Flexão em provete 45CF

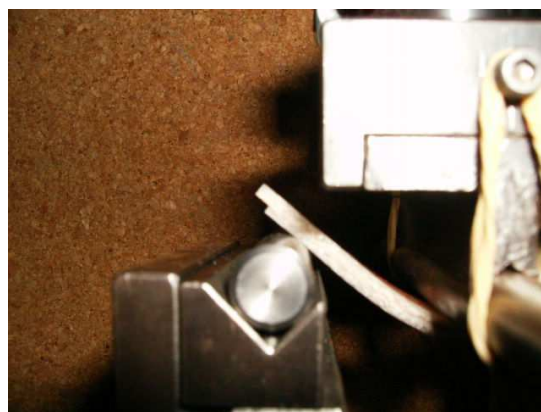


Fig. 6.5 – Pormenor de delaminação em 45CF

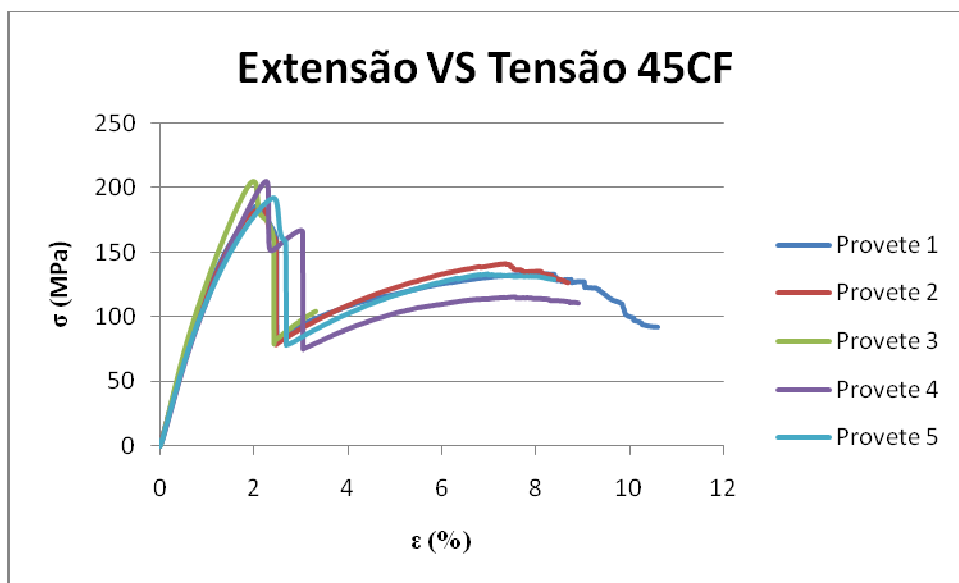


Fig.6.6 – Curva Extensão vs Tensão do ensaio de flexão de 45CF

6.5 – Tratamento Superficial das Folhas de Cortiça

De forma a ser possível atenuar o efeito de delaminação verificado nos ensaios, optou-se por recorrer a um tratamento superficial das folhas de cortiça, com uma solução de silano, de forma a promover uma melhor adesão entre cortiça/resina.

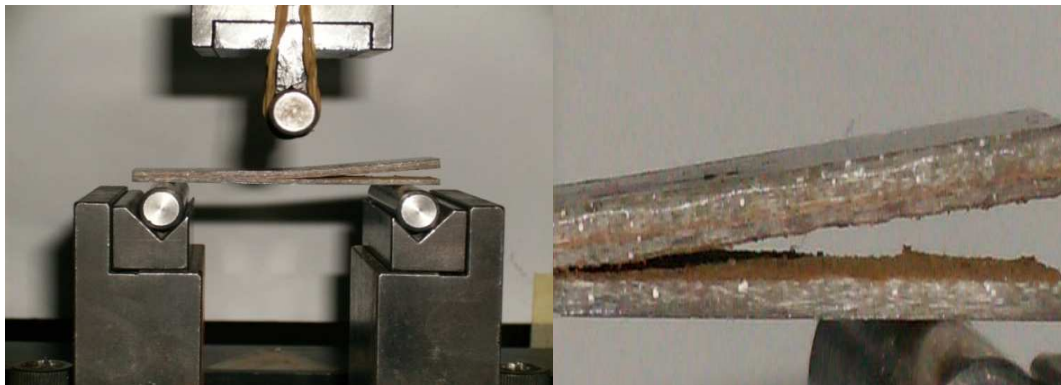


Fig.6.7 – Ensaio de Flexão em Provete 45CFT

Fig.6.8 – Pormenor de delaminação em 45CFT

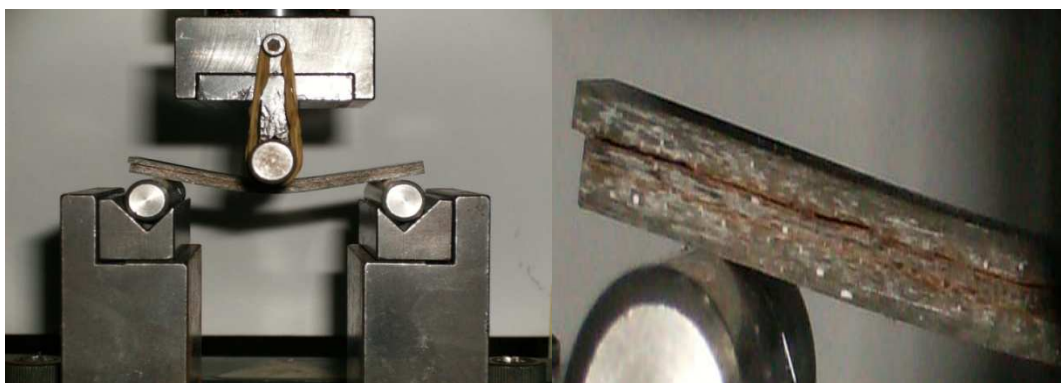


Fig.6.9 – Ensaio de Flexão em Provete 45CFT

Fig.6.10 – Pormenor de delaminação em 45CFT

Apesar dos esforços realizados, os resultados obtidos foram desanimadores. Comparando directamente os valores obtidos nos provetes 45CF e 45CFT e respectivas observações feitas durante a realização dos ensaios de flexão e corte, verificou-se que o tratamento para além de não conseguir atenuar o fenómeno de delaminação, levou igualmente a uma quebra das propriedades à flexão do material (tensão e deformação de cedência). A redução de tenacidade do material compósito foi em parte prevista, após concluído o processo de tratamento das folhas de cortiça, uma vez que estas se apresentaram ligeiramente quebradiças, sendo este um factor indicativo de aumento fragilização por via de tratamento químico.

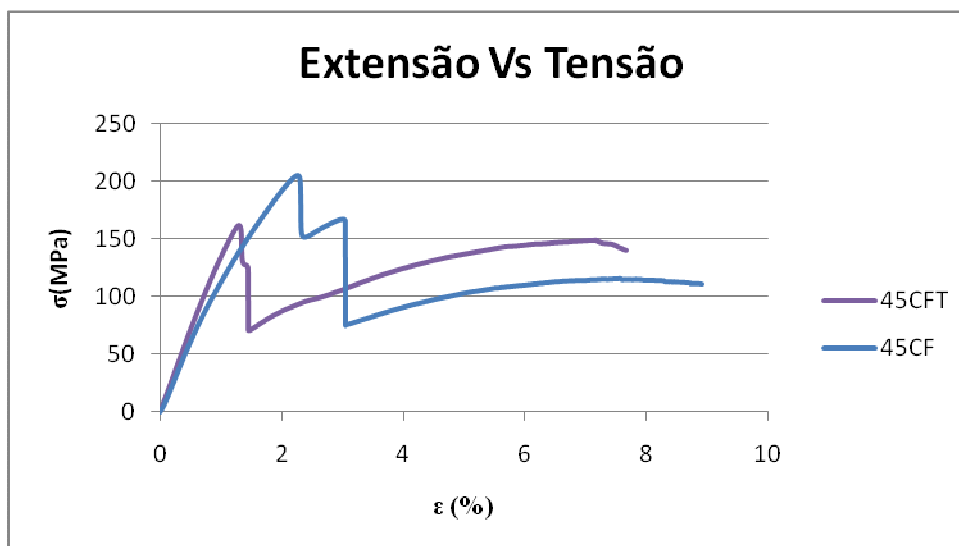


Fig.6.11 – Comparação entre curvas de tensão-deformação de 45CF e 45CFT

Verificou-se igualmente um ligeiro aumento no módulo de elasticidade do material.

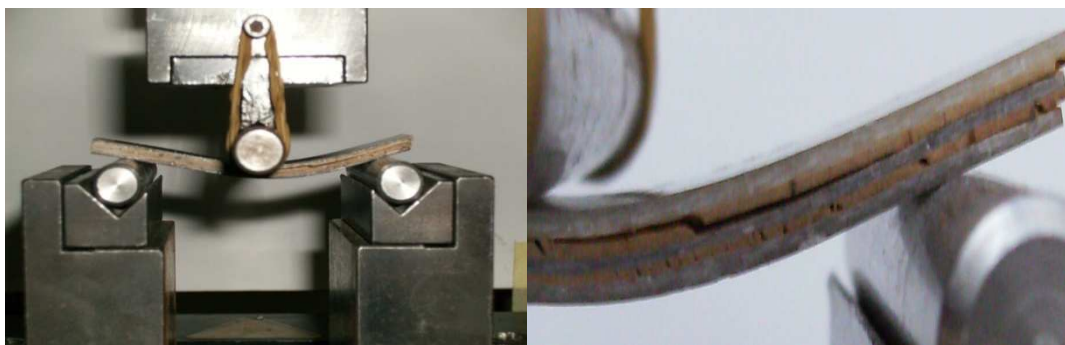


Fig.6.12 – Ensaio de Flexão em Provete 45CT Fig.6.13 – Pormenor de corte interlaminar em 45CT

Tal como foi observado nos provetes 45CFT em relação aos 45CF, também nos provetes 45CT verificaram-se perdas das propriedades de flexão, relativamente aos 45C, com um aumento ligeiro do módulo de elasticidade. Por outro lado, nestes provetes, o corte interno da cortiça permaneceu como mecanismo de dano predominante.

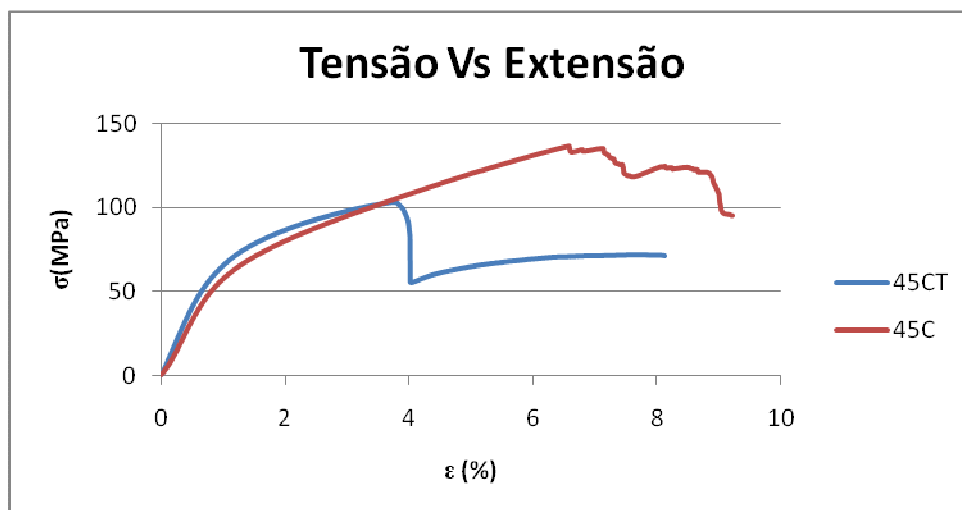


Fig.6.14 – Comparação entre curvas de tensão-deformação de 45C e 45CT (flexão)

Efectuando uma comparação entre os resultados obtidos entre os provetes 45CF e 45CFT, foi possível comprovar o efeito esperado com o tratamento efectuado com a solução de silanos nas folhas de cortiça

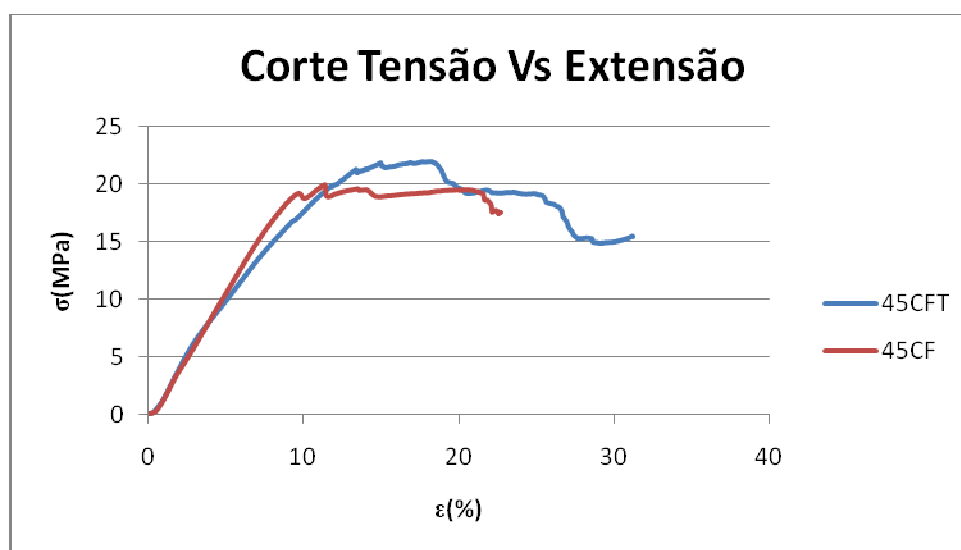


Fig.6.15 – Comparação entre curvas de tensão-deformação de 45CF e 45CFT (corte)

Efectivamente, o tratamento produziu uma ligeira melhoria nas propriedades de corte do material compósito, indicando uma menor susceptibilidade de delaminação entre as camadas de cortiça e fibra

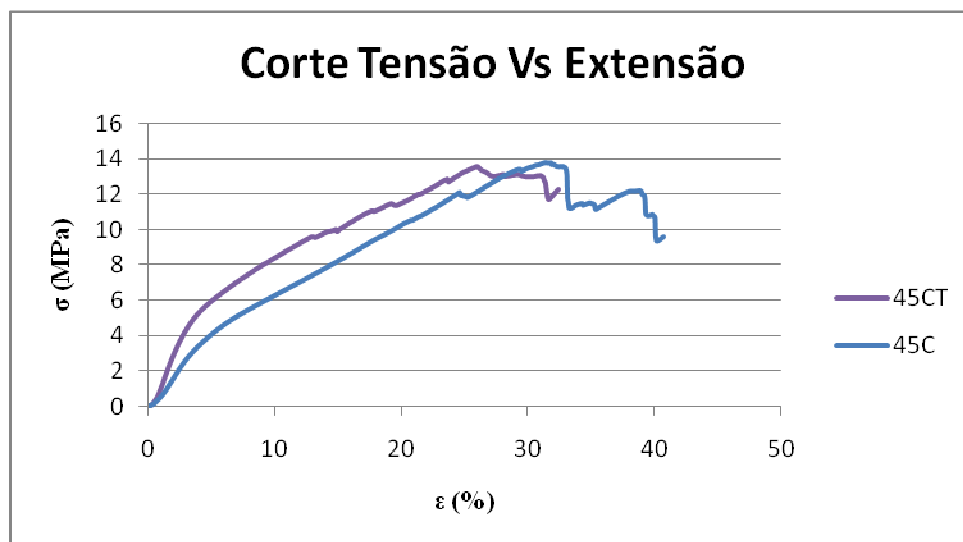


Fig.6.16 – Comparação entre curvas de tensão-deformação de 45C e 45CT (corte)

Por outro lado, tendo em conta os provetes de 45C e 45CT, os efeitos do tratamento, a nível da tensão de corte suportada são imperceptíveis, uma vez que neste tipo de provetes, a cedência do material deve-se ao corte interno da cortiça e não devido a delaminação.

Com efeito, os resultados obtidos através dos ensaio de impacto Charpy revelaram-se bastante desanimadores, acabando por confirmar as preocupações originadas pelos resultados dos ensaios de flexão e corte interlaminar.

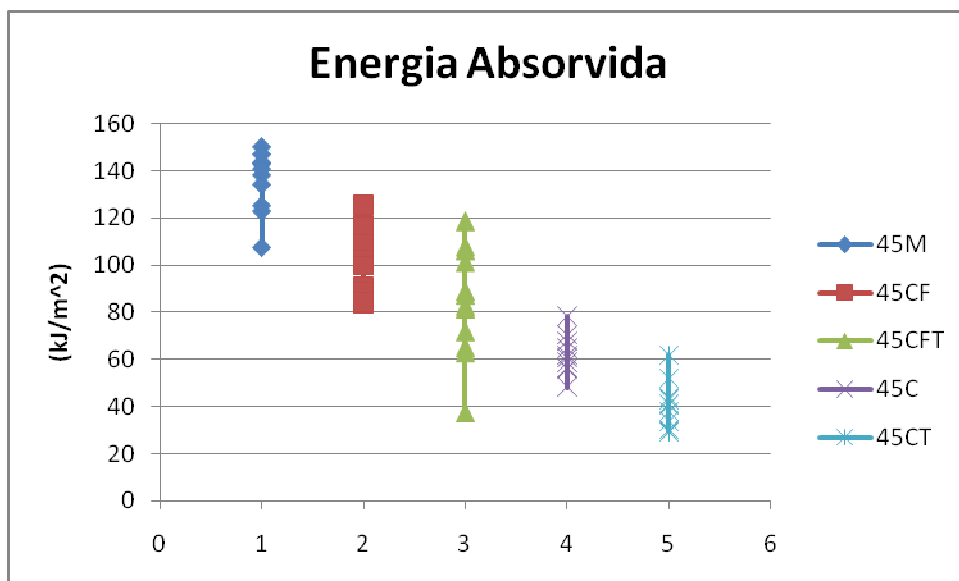


Fig.6.17 – Comparação dos Resultados de Ensaio de Impacto Charpy entre vários provetes

Como é possível observar, apesar da introdução da utilização de folhas de cortiça mais finas melhorar consideravelmente a energia absorvida com os ensaios de impacto charpy, é possível verificar, ainda assim, que um sistema de fibra de vidro/resina epoxida possui melhores propriedades mediante impacto.

Por outro lado, é possível notar que o tratamento superficial das folhas de cortiça, utilizando uma solução de silanos, levou a uma quebra das propriedades do material compósito ao impacto, quer no caso das folhas com 0,2 mm e 0,5 mm de espessura.

Tal como foi mencionado anteriormente, esta quebra pode ser explicada por uma fragilização (ou perda de elasticidade) das folhas de cortiça, reforçando a hipótese do tratamento utilizado teria sido demasiado agressivo.

Recorrendo à inspeção visual da área danificada dos provetes, após realização dos ensaios de impacto Charpy, foi possível verificar que nos provetes em que as folhas de cortiça foram tratadas, ocorreu muitos deles, uma separação completa através do plano das camadas de cortiça.

6.6 – Comparação Estrutural da Cortiça e Área de Delaminação

Através da comparação das imagens obtidas por microscópio de varrimento, dos provetes 45C e 45CT, foi possível observar algumas diferenças na superfície de fractura destes provetes.

Esta diferença pode indicar uma melhoria de adesão entre cortiça e fibra uma vez que a presença de irregularidades pode resultar de diferentes intensidades de adesão ao longo da interface dos dois materiais, enquanto por outro lado, no 45CT se verificaria uma situação de falta numa região intermédia do filme de cortiça.

Por sua vez, conforme pareceram demonstrar os resultados de flexão, o tratamento superficial poderá, além de aumentar a adesão, ter adicionalmente fragilizado a estrutura da cortiça, contribuindo assim para os resultados obtidos relativamente às superfícies de fractura.

Comparando os provetes 45CF e 45CFT, o facto do filme de cortiça se encontrar bastante danificado nos provetes em que foi aplicado um tratamento superficial à cortiça manifesta-se como um resultado directo da agressividade do tipo de tratamento utilizado

Estas fendas não foram detectadas nos provetes de 45CT, uma vez que provavelmente apenas ocorreram numa camada superficial do filme de cortiça, e devido a uma maior espessura do filme utilizado em 45CT, estas fendas tornam-se indetectáveis.

Capítulo 7

Conclusão

7.1 - Introdução

O trabalho apresentado nesta tese teve como ponto de partida um projecto iniciado no âmbito da cadeira de Materiais Compósitos, do 5º ano do MIEM. No trabalho efectuado inicialmente, os resultados obtidos estiveram longe de ser satisfatórios. No entanto, devido à vontade de levar o projecto a resultados positivos e à existência de dúvidas relativamente à influência de alguns parâmetros, várias estratégias foram delineadas de forma a corrigir eventuais erros que podessem ter surgido.

7.2 – Conclusões

A implementação de diversos parâmetros respeitantes à configuração e fabrico das placas permitiram retirar diversas conclusões:

- A percentagem de fibra/resina na gama coberta no presente estudo e o que o precedeu, parece exercer pouca influência nas propriedades mecânicas do material, ao contrário do que se esperava.

- A utilização de camadas de tecido de fibra de vidro com orientação +45/-45 na região mais próxima do núcleo da placa laminada permite obter valores de energia de impacto absorvida ligeiramente superiores às resultantes da utilização do tecido com orientação 0/90° em todas as camadas do laminado.

- A espessura surge naturalmente com um factor determinante na absorção de energia de impacto, sendo possível obter uma maior absorção de energia utilizando placas laminadas de maior espessura por via do aumento do momento de inércia da estrutura.

Relativamente à utilização da cortiça como material responsável pelo aumento da tenacidade interlaminar de um laminado, foi possível verificar os seguintes aspectos:

- A utilização de cortiça como camada interlaminar permite um aumento de tenacidade e energia absorvida pelo material à flexão, mas conduz a uma quebra considerável da rigidez e tensão de cedência máxima da placa laminada.

As propriedades relativamente ao corte também são fortemente afectadas, verificando-se igualmente um decréscimo da tensão de corte, mas um aumento da extensão, quando introduzidas as folhas de cortiça

- A introdução de folhas de cortiça como reforço interlaminar, conduz a uma quebra da energia de impacto absorvida, quando realizados os ensaios de impacto Charpy.

- A introdução de folhas de cortiça provoca uma alteração do modo de rotura do laminado de tracção para interlaminar ou misto interlaminar/tracção. Na realidade, as observações de microscopia demonstram a permanência de filme de cortiça cobrindo quase a totalidade de ambas as faces de rotura. Este facto indica não estarem na presença de uma rotura interlaminar clássica, mas que verdadeiramente a rotura ao longo do plano do laminado resulta quase exclusivamente das menores resistências ao corte e tracção do filme de cortiça

Variando a razão fibra/cortiça é possível verificar os seguintes aspectos:

- Quanto menor for a percentagem de cortiça, relativamente à percentagem de fibra de vidro, maior será o módulo e a tensão de cedência máxima do sistema material, mas menor será a tenacidade do material quando sujeito à flexão.

- O mesmo aspecto verificou-se relativamente aos ensaios de impacto Charpy, permitindo concluir que quanto menor fosse a percentagem de cortiça utilizada, maior seria a quantidade de energia absorvida.

No entanto, apesar dos resultados obtidos, surgia a dúvida se esta quebra de propriedades seria devido a uma fraca ligação e compatibilidade entre a interface de resina-cortiça, ou devido às fracas propriedades mecânicas (nomeadamente ao corte) relativamente à fibra de vidro.

Desta forma, foi implementado um tratamento à base de uma solução de silanos, de forma a garantir uma melhor molhabilidade da resina e cortiça. No entanto os resultados obtidos foram novamente desanimadores, observando-se uma quebra geral das propriedades mecânicas do material, não havendo qualquer alteração significativa das propriedades de corte. Na verdade, este tipo de tratamento provocou uma nova diminuição na capacidade de absorção de energia em casos de impacto no sistema laminado.

Conjugando os resultados obtidos nos ensaios, com as observações das superfícies de rotura e as imagens da estrutura, obtidas no microscópio de varrimento, foi possível concluir que este tipo de tratamento levou a um aumento da rigidez da cortiça, chegando mesmo a danificá-las.

Os resultados obtidos por estes novos ensaios remetem para duas hipóteses:

- O tratamento utilizado foi demasiado agressivo ou inadequado para este tipo de material
- A cortiça pode ser considerada como uma fraca escolha para melhorar as propriedades mecânicas do material.

Uma análise geral dos dados recolhidos aponta para que a hipótese mais provável justificativa do fraco comportamento ao impacto da placa laminada esteja directamente relacionada com os filmes de cortiça. Apesar deste elemento ser constituído por um material possuindo interessantes no que toca a absorção de energia, padece de deficiências noutras propriedades mecânicas (e.g., resistência à tracção e corte) cr'íticas para o aproveitamento das primeiras, quando os filmes são integrados numa estrutura laminada..

7.3 - Proposta de Trabalhos Futuros

Ao longo do processo experimental, foram surgindo várias hipóteses em que o seu estudo poderia conduzir a resultados interessantes, de forma a atenuar ou eliminar os problemas encontrados neste trabalho:

- A utilização de uma diferente sequência de empilhamento, utilizando a cortiça em camadas mais internas ou mais externas, de forma a compreender em que região esta se encontra mais vulnerável ao corte interno (factor que foi considerado mais limitativo, relativamente à utilização da cortiça)
- A implementação de um tratamento químico diferente nas folhas da cortiça, que promovesse a sua molhabilidade e consequente adesão a resinas utilizadas, sem que levasse à deterioração das propriedades mecânicas da cortiça
- Uma análise profunda sobre a superfície de contacto entre cortiça/resina, de modo a compreender se a área de contacto se limita unicamente às paredes celulares da cortiça, ou se existe infiltração de resina no interior dos alvéolos celulares, investigar em que condições este factor afecta as características da placa laminada e em que condições seria possível aumentar esta superfície de contacto.

7.4 – Nota

Devido a uma falha de disponibilidade da máquina de ensaios, aliada à proximidade do prazo de entrega, foi impossível a realização dos ensaios mecânicos de tracção em tempo útil. No entanto, uma vez que os resultados de tracção podem ser considerados como complementares, as curvas de tracção podem ser facilmente previstas (tendo em conta os trabalhos efectuados anteriormente e os resultados obtidos nos ensaios de corte e flexão), a execução destes ensaios não é essencial para um conhecimento geral das propriedades mecânicas do material. Deste modo, com os resultados obtidos através dos ensaios realizados, é possível atingir as respostas e conclusões relativas aos objectivos iniciais deste projecto.