



**José Pedro  
Esteves Tavares**

**Estudo das propriedades mecânicas de laminados  
com cortiça micro-aglomerada**





**José Pedro  
Esteves Tavares**

**Estudo das propriedades mecânicas de laminados  
com cortiça micro-aglomerada**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Ricardo José Alves de Sousa e do Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira, Professores Auxiliares do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



**o júri**

**presidente**

Prof. Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo  
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

**arguente**

Prof. Doutor José Luis Soares Esteves  
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade do Porto

**orientador**

Prof. Doutor Ricardo José Alves de Sousa  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Ao Professor Ricardo Sousa, pela orientação mas acima de tudo, amizade demonstrada ao longo deste trabalho.

Ao Professor Bastos, por toda a ajuda prestada relativamente aos ensaios realizados.

Ao Professor José Esteves, pela disponibilidade e boa disposição com que me recebeu e me ajudou neste trabalho.

À NELO, na pessoa do seu representante máximo, o Sr. Manuel Ramos, pela confiança em mim depositada a fim de realizar este trabalho.

À Amorim Cork Composites, por todo o apoio e material disponibilizado.

À FEUP e em particular ao INEGI pela disponibilidade e cedência de instalações aquando do fabrico das placas.

À ESAN e em particular ao Professor Daniel Afonso pela cedência de equipamento aquando do corte e dos ensaios de impacto das amostras.

Ao meu grupo de amigos, pelo forte companheirismo e grande amizade demonstrados neste percurso, assim como na vida.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio incondicional, paciência e amor que me demonstram a cada dia da minha vida. Amo-vos.

À Filipa, pelo carinho, dedicação e amor com que me trata e me faz feliz. Amo-te.





**palavras-chave**

Cortiça, aglomerados de cortiça, fibras naturais, fibras de linho, *sandwich*, ensaios de flexão, materiais sustentáveis.

**resumo**

Esta tese desenvolveu-se a partir de uma proposta de uma conceituada empresa portuguesa especializada em kayaks e consistiu em desenvolver um laminado de base natural e com núcleo de cortiça, capaz de se assemelhar em termos mecânicos aos de fibra de vidro e resina epóxi já utilizados. Após uma alargada pesquisa de materiais e fornecedores, procedeu-se ao fabrico de várias placas diferentes. Os materiais de base foram o núcleo de cortiça, peles em fibra de linho e bio-resina epóxi. De modo a avaliar as respostas mecânicas em regime estático e dinâmico, foram realizados ensaios de flexão e impacto. As conclusões obtidas após exaustiva análise dos resultados permitem concluir que os laminados naturais podem oferecer propriedades mecânicas interessantes e quiça rivalizar com os seus concorrentes sintéticos, mantendo as óbvias vantagens em termos de responsabilidade ambiental. Ficam também directrizes para o caso de se pretender o fabrico de um protótipo utilizando estes materiais.



**keywords**

Cork, agglomerated cork, expanded cork, static tests, dynamic loading, multiple impact, energy absorption, sustainable materials.

**abstract**

This work started from the demand of a renowned portuguese company specialized in kayaks. It focused the development of a fully natural composite material based on natural fibers and cork acting as a core, that showed similar mechanical properties when compared to synthetic materials based on fiberglass and epoxy resin. After a thorough search for materials, the choices relied on flax fibers and epoxy bio-resin, besides the agglomerated cork core. Several laminates were produced and then subjected to static and dynamic mechanical testing, carried out via bending and impacts tests respectively. After a careful analysis of the obtained results, it was possible to conclude that the proposed materials show compatible mechanical properties and can even rivalize against synthetic materials. On top of that, natural materials keep the obvious advantage of eco-friendliness. In the end, guidelines are given in case a prototype may be constructed using the proposed composites.



# Índice

---

Lista de figuras .....	iii
Lista de tabelas .....	v
1. Introdução.....	3
1.1 Guia de Leitura .....	3
1.2 Motivação.....	4
2. Estado da Arte.....	11
2.1 Estudos realizados .....	11
2.2 Norma ASTM C393 .....	16
2.2.1 Modos de Falha .....	18
3. Materiais e Métodos.....	23
3.1 Materiais .....	23
3.2 Procedimentos Experimentais .....	37
3.3 Metodologia.....	54
3.3.1 Ensaios de Flexão .....	54
3.3.2 Ensaios de Impacto .....	57
3.4 Resultados Experimentais .....	61
3.4.1 Ensaios de Flexão .....	61
3.4.2 Ensaios de Impacto .....	71
4. Avaliação de Resultados .....	77
4.1 Análise de Resultados .....	77
4.2 Conclusões.....	86
4.3 Trabalhos Futuros.....	88
Referências bibliográficas .....	91



---

## Lista de figuras

---

Figura 1 - Evolução da oferta disponível de produtos <i>eco-friendly</i> entre 2009 e 2010 [The Sins of Green Washing, 2011] .....	4
Figura 2 - Áreas de utilização da cortiça a nível nacional [apcor.pt, 2014] .....	5
Figura 3 - Evolução das exportações portuguesas de cortiça [apcor.pt, 2014] .....	6
Figura 4 - Aplicação de cortiça por parte de uma das marcas mais conceituadas de artigos desportivos [Nike, 2013] .....	7
Figura 5 - Embarcação da NELO com cortiça [NELO, 2013] .....	8
Figura 6 - Vista transversal das zonas afectadas pelo impacto [Castro <i>et al</i> , 2009]	12
Figura 7 - Provetes de aglomerado de cortiça depois e antes dos ensaios [Fernandes <i>et al</i> , 2014] .....	13
Figura 8 - Figura exemplificativa do ensaio relativo à norma ASTM C 393 .....	16
Figura 9 - Modos de carregamento previstos na norma ASTM C 273 .....	17
Figura 10 - Ensaio de flexão de três pontos .....	18
Figura 11 - <i>Sandwich</i> com núcleo de PMI Rohacell (à esquerda) e ninho de abelha (à direita) .....	24
Figura 12 - Padrão original do ninho de abelha [altairenlighten.com, 2014] .....	25
Figura 13 - Diferentes padrões do ninho de abelha [Gibson e Ashby, 1997] .....	27
Figura 14 - Exemplo de espuma PMI Rohacell [rohacell.com, 2014] .....	28
Figura 15 - Sobreiro [sol.pt, 2014] .....	28
Figura 16 - Desbóia [Fortes 2004] .....	29
Figura 17 - Pranchas de cortiça após a desbóia [jornalcores9.net, 2014] .....	30
Figura 18 - Artigos de moda fabricados à base de cortiça [lisbonsecrets.com, 2014] .....	30
Figura 19 - Pavimento isolante de aglomerado de cortiça [isolamentos.net, 2014] .....	32
Figura 20 - Grânulos de cortiça [1-1.pt, 2014] .....	33
Figura 21 - Exemplo de diversas mantas de fibras naturais .....	33
Figura 22 - Tapetes de interior fabricados com fibras naturais .....	34
Figura 23 - Fibra de Linho em grade (Plain Weave) (easycomposites.co.uk) .....	36
Figura 24 - Fibra de Linho em grade (Twill) (easycomposites.co.uk) .....	36
Figura 25 - Resina epóxi Sika e resina epóxi Super Sap .....	37
Figura 26 - Peça experimental com desmoldante .....	38
Figura 27 - Aplicação da cera desmoldante .....	39
Figura 28 - Pormenor de montagem da união “T” e da ponta do tubo de vácuo .....	39
Figura 29 - Aspeto final da moldura .....	40
Figura 30 - Corte das mantas de fibra de linho para laminagem .....	41
Figura 31 - Pesagem da bioresina epóxi .....	41
Figura 32 - Pesagem do endurecedor e mistura dos componentes .....	42
Figura 33 - Método de impregnação das mantas .....	43
Figura 34 - Finalização da impregnação de uma das faces da <i>sandwich</i> .....	44
Figura 35 - Colocação da placa de aglomerado de cortiça destinada ao núcleo .....	45
Figura 36 - Segunda face da <i>sandwich</i> já impregnada .....	46
Figura 37 - Sistema de vácuo já em funcionamento .....	47
Figura 38 - Pormenor da rede espaçadora e da pressão de vácuo .....	47
Figura 39 - Identificação das diferentes placas .....	48

Figura 40 - Comparativo de corte: em cima jato de água e em baixo serra de fita	50
Figura 41 - Máquina de corte por jato de água	51
Figura 42 - Posicionamento das placas na mesa da máquina de corte	52
Figura 43 - Máquina de corte por jato de água em funcionamento	52
Figura 44 - Marcação individual das amostras	53
Figura 45 - Pesagem individual das amostras	54
Figura 46 - Máquina de ensaios Shimadzu de 10kN	55
Figura 47 - Máquina de ensaios de impacto Ray-Ran XX/IMT	57
Figura 48 - Braços destinados aos ensaios de impacto	58
Figura 49 - Pormenor das características dos braços de impacto	59
Figura 50 - Posicionamento da amostra a ensaiar	60
Figura 51 - Separação dos provetes por placas	61
Figura 52 - Deslocamento máximo da placa 1 (em cima) e placa 2 (em baixo)	62
Figura 53 - Falha da face (em cima) e indentação (em baixo)	63
Figura 54 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 1	65
Figura 55 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 2	65
Figura 56 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 3	66
Figura 57 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 4	66
Figura 58 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 5	67
Figura 59 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 6	67
Figura 60 - Resumo da carga máxima e deslocamento correspondente em posição normal das placas submetidas à flexão	68
Figura 61 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 1 em posição invertida	68
Figura 62 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 2 em posição invertida	69
Figura 63 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 3 em posição invertida	69
Figura 64 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 4 em posição invertida	70
Figura 65 - Resumo da carga máxima e deslocamento correspondente em posição invertida	70
Figura 66 - Delaminagem (em cima) e Falha da face (em baixo)	73
Figura 67 - Valores médios e intervalos de dispersão da resistência ao impacto em posição normal	74
Figura 68 - Valores médios e intervalos de dispersão da resistência ao impacto em posição invertida	74
Figura 69 - Gráfico Força-Deslocamento de todas as placas	78
Figura 70 – Figura 67	79
Figura 71 – Figura 68	79
Figura 72 - Gráfico de força - deslocamento e energia absorvida das placas 2 e 3	80
Figura 73 - Gráfico de força - deslocamento e energia absorvida das placas 2 e 3 (invertidas)	81
Figura 74 - Gráfico de Força - Deslocamento das placas ECO	82
Figura 75 - Gráfico de Força - Deslocamento das placas ECO (invertidas)	83
Figura 76 - Gráfico de Energia absorvida das placas ECO	84
Figura 77 - Gráfico de Energia absorvida das placas ECO (invertidas)	84



## Lista de tabelas

---

Tabela 1 - Modos de falha possíveis em estruturas <i>sandwich</i> [Broughton, 2002] ...	19
Tabela 2 - Características essenciais do CoreCork NL10 .....	37
Tabela 3 - Composição das placas fabricadas.....	49
Tabela 4 - restrições às dimensões dos provetes.....	56
Tabela 5 - Valores das dimensões dos provetes.....	56
Tabela 6 - Percentagens de falha na face de carga e na face oposta .....	64
Tabela 7 - Espessura média das placas <i>sandwich</i> .....	71
Tabela 8 - Percentagens de falha na face de carga e na face oposta .....	72
Tabela 9 - Peso médio de 1m <sup>2</sup> de cada placa .....	85
Tabela 10 - Custo médio de 0,5m <sup>2</sup> de cada placa (€) .....	85



---

# Capítulo 1

---

Introdução

---



# 1. Introdução

## 1.1 Guia de Leitura

---

Esta tese é o culminar do trabalho desenvolvido pelo autor durante o último semestre. Impulsionado pelo desenvolvimento, inovação e desafio, descreve-se aqui a tentativa de melhorar um produto quer a nível mecânico quer a nível ambiental.

O capítulo 1 introduz o tema a ser abordado começando por este breve guia de leitura e também pela motivação que levou o autor a desenvolver este projeto. Nele são demonstrados indicadores económicos e ambientais que pesaram na escolha do tema e ajudaram a delinear o objetivo deste trabalho. Apresenta-se ainda o tema como uma área ainda pouco abordada e explorada.

No capítulo 2 começa-se por apresentar o estado da arte descrevendo os trabalhos desenvolvidos nesta área. Como atrás referido, sendo esta área pouco abordada, descrevem-se também alguns artigos apenas com alguns pontos de contacto com esta tese. Por fim resumem-se ao essencial as normas de ensaios para estruturas *sandwich* utilizadas aquando dos ensaios de flexão e impacto e também os modos de falha para estes compósitos.

No capítulo 3 encontra-se a informação relativa aos ensaios realizados. Neste identificam-se os materiais utilizados frequentemente em estruturas idênticas às investigadas e com maior ênfase os materiais utilizados na elaboração das placas das amostras. Este capítulo conta ainda com uma secção dedicada aos procedimentos experimentais como o modo de fabrico das placas e a metodologia.

Por fim apresentam-se os resultados experimentais relativos aos ensaios de flexão e de impacto onde se encontram os gráficos e tabelas com os valores obtidos.

Por último no capítulo 4 converge todo o trabalho sendo analisados todos os resultados e descrevendo-se as conclusões possíveis de retirar, bem como propostas de desenvolvimento futuro a fim de dar continuidade ao trabalho já realizado.

## 1.2 Motivação

Nos dias de hoje e cada vez com maior intensidade, a sociedade está atenta e desperta para os problemas sociais relacionados com o ambiente. Sustentabilidade, ecologia e reciclagem são temas usuais e muito discutidos em ambiente académico ou industrial. O sentimento de auto-responsabilização e a consciência da facilidade na mudança de hábitos trazem à ordem do dia pensamentos preocupados com o meio ambiente, a reutilização de recursos e a utilização de produtos renováveis em detrimento de produtos com impacte ambiental elevado. Este facto incrementa, no desenvolvimento de praticamente qualquer produto, a ideia de *eco-friendly*, seja por ordem regulamentar ou apenas publicitária.

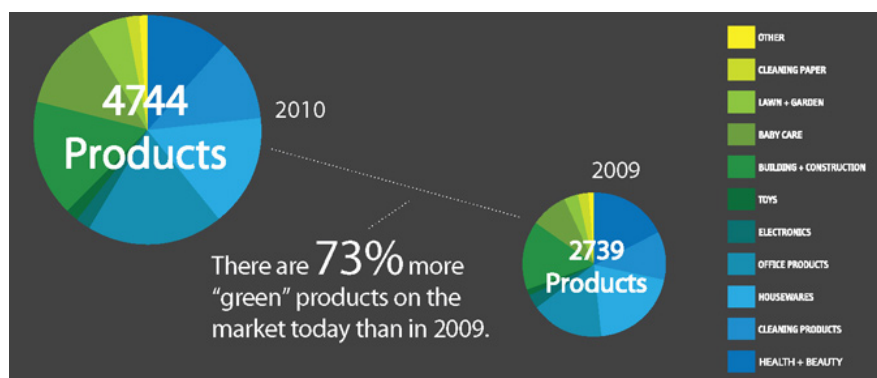


Figura 1 - Evolução da oferta disponível de produtos *eco-friendly* entre 2009 e 2010 [The Sins of Green Washing, 2011]

A investigação de novos compostos tenta, por norma, encontrar um equilíbrio entre o conceito sustentável, as vantagens dos materiais e o seu custo. Esta tese resume-se precisamente ao desenvolvimento de uma estrutura *sandwich* constituída

por materiais naturais ou de base ecológica, tentando tirar o maior partido das vantagens da cortiça a nível naval. Foram utilizadas mantas de fibra de linho nas faces desta estrutura a fim de comprovar vantagens e desvantagens do uso destes materiais. Sendo a cortiça um material com uma vasta gama de vantagens e na sua maioria com origem nacional, é legítimo o interesse e a tentativa de explorar tudo o que dela possa advir. A nível de propriedades o interesse divide-se por todas as áreas e empresas capazes de aproveitar os seus benefícios. E a nível económico-financeiro, os seus produtores e os órgãos políticos devem incentivar e apoiar a sua exploração e exportação, podendo ser um marco fundamental no desenvolvimento do país. Longe vão os tempos em que a cortiça apenas tinha como finalidade as rolhas para garrafas. Hoje em dia e apesar desta ser ainda a utilização com maior quota de mercado, cerca de 42,47% em 2012 (APCOR), são inúmeras as aplicações que tentam tirar partido das muitas vantagens deste produto seguindo-se outro tipo de rolhas com 25,94% em 2012 (APCOR) e os pavimentos, isolantes e revestimentos com 23,82% em 2102 (APCOR).

### Utilização de cortiça em Portugal

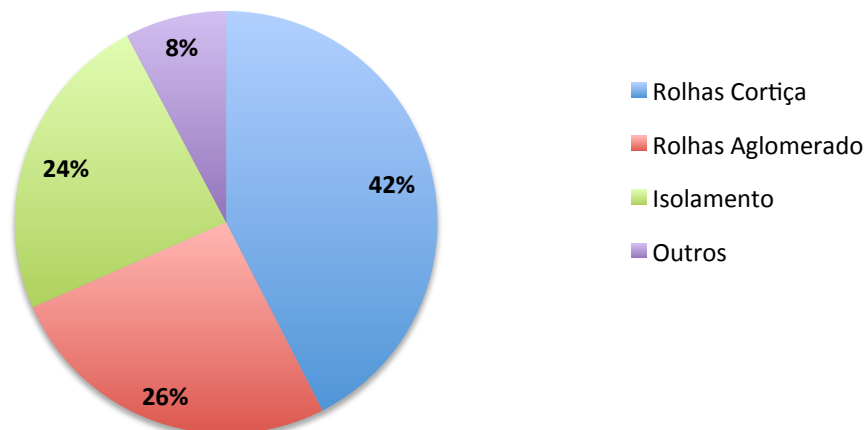


Figura 2 - Áreas de utilização da cortiça a nível nacional [apcor.pt, 2014]

Portugal é o maior produtor de cortiça a nível mundial, sendo responsável por mais de metade de toda a produção existente. A nível económico-financeiro, a exportação de cortiça tem crescido a um ritmo elevado e em 2012 a exportação de cortiça rondou os 850 mil €, estimando-se que em 2015 atinja 1 milhão € (APCOR

e INE). Fica assim patente o grande interesse internacional pela cortiça que encontra em Portugal o clima e as condições perfeitas para que os produtores nacionais possam tirar o maior partido deste produto.

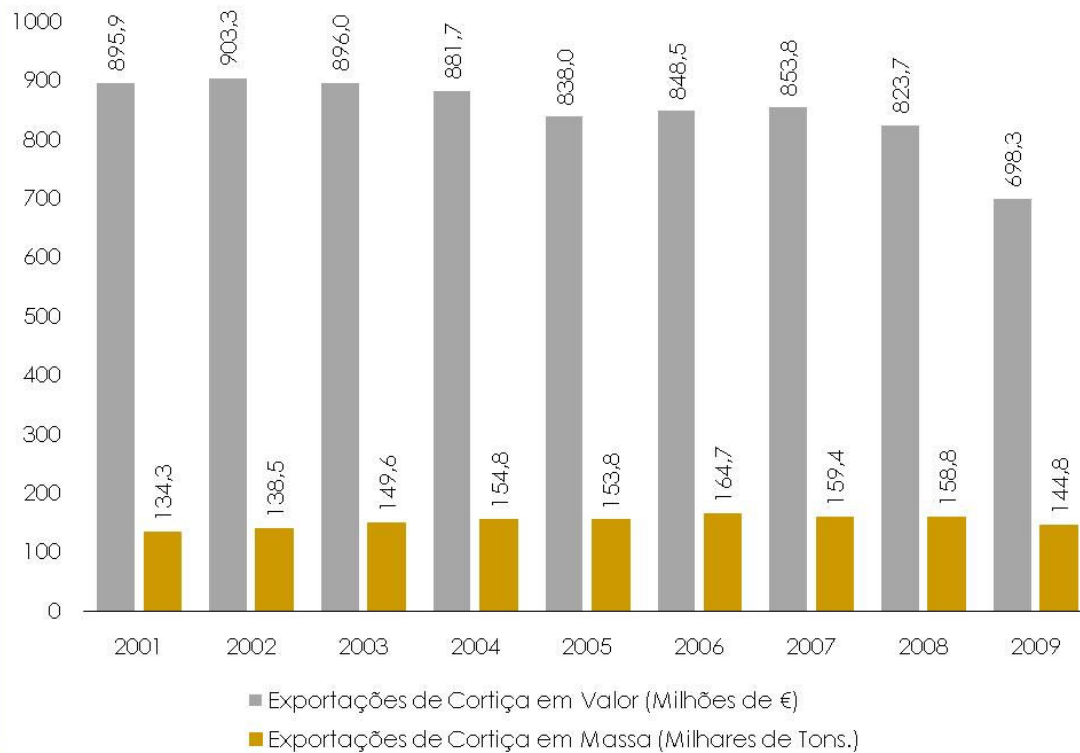


Figura 3 - Evolução das exportações portuguesas de cortiça [apcor.pt, 2014]

A investigação acerca de subprodutos da cortiça, apesar de bastante frequente, é hoje em dia ainda pouco abrangente quando tidas em conta as qualidades deste material. A aplicação mais conhecida tem como destino as rolhas mas também os isolamentos acústico e térmico têm sido largamente consagrados. Ao nível das propriedades a cortiça sugere-se como um produto natural, isolante térmico e acústico, renovável e portanto sustentável e de forma muito apreciada hoje em dia, como um material que ao absorver impacto retorna quase na totalidade à fase inicial. Esta característica torna a aplicação da cortiça perfeita em objectos sujeitos a impactos múltiplos no mesmo local. É portanto essencial o estudo e desenvolvimento de subprodutos da cortiça para que todas as vantagens possam ser aproveitadas da melhor forma.





Figura 4 - Aplicação de cortiça por parte de uma das marcas mais conceituadas de artigos desportivos [Nike, 2013]

Outro foco de interesse e também motivacional é o facto deste trabalho ter sido proposto pela NELO. Líder de mercado no que à competição diz respeito, esta empresa portuguesa é hoje em dia a atual líder em número de medalhas em campeonatos da Europa, do Mundo e também nos Jogos Olímpicos. Deste facto advém também o sentido prático e objetivo desta tese que será implementado pela empresa nos seus produtos.

A seleção dos materiais a utilizar nas estruturas *sandwich* tem de levar em conta as especificidades da aplicação, sendo uma fase crucial ao bom funcionamento do projeto. Após um longo período de pesquisa foram encontrados os fornecedores considerados mais corretos para os materiais necessários.

Tendo sido proposto pela NELO, o objetivo desta tese tem um propósito prático aliado. Com este trabalho tentou-se encontrar um compósito *sandwich eco-friendly* capaz de fazer face à *sandwich* já utilizada com frequência pela NELO composto maioritariamente por fibra de vidro. Esta estrutura é contudo bastante prejudicial em termos ambientais. Desde o processo de produção da fibra de vidro, à produção da resina, as agressões ambientais são muito comuns e demasiado evidentes a fim

de ter uma utilização frequente nos dias que correm. Desta forma, a proposta consciente da NELO recai sobre um compósito com melhoramentos significativos no que à questão ambiental diz respeito. Assim nesta tese apresentam-se os resultados da comparação simples entre as várias estruturas *sandwich* de base natural e a *sandwich* de fibra de vidro e resina epóxi já utilizada pela NELO.



Figura 5 - Embarcação da NELO com cortiça [NELO, 2013]

---

# Capítulo 2

---

Estado da Arte

---



## 2. Estado da Arte

### 2.1 Estudos realizados

---

Sendo a cortiça um material de ampla abrangência no que diz respeito às vantagens e aplicações, o seu estudo tem sido levado a cabo em muitas áreas de investigação. De extremo interesse para esta tese são os estudos relativos a este material em aplicações quotidianas, marítimas, como núcleo de estruturas *sandwich* ou apenas como componente na forma de pequenos grânulos. Devido à grande abrangência de áreas onde se estuda a incorporação da cortiça, e o interesse por este material ser relativamente recente, os estudos existentes tornam-se dispersos e pouco concretos. Este facto enaltece e valoriza esta tese, sendo uma área pouco estudada até ao momento, e de enorme potencial. Assim, apresentam-se neste capítulo os estudos de maior relevo, sendo que alguns apenas têm breves pontos de contacto com o caso estudado pelo autor desta tese. Segundo, [Soares *et al*, 2011] “a adopção de materiais naturais para o desenvolvimento sustentado começa com a caracterização completa do seu comportamento mecânico, a fim de determinar se um tal material é capaz de lidar com os parâmetros de projeto de qualquer concepção nova. Os testes mostram que compósitos de cortiça superam, por várias vezes, os materiais tradicionais e com um preço mais baixo. O seu comportamento mecânico impede-os de qualquer tipo de papel estrutural, mas, dada a sua densidade há um futuro pela frente para os compósitos de cortiça como material de núcleo em estruturas *sandwich*”.

[Alcântara *et al*, 2013] levou a cabo a incorporação de grânulos de cortiça no interior de um material polimérico ( resina epóxi ), que é um procedimento habitual na elaboração dos materiais conhecidos como “aglomerados de cortiça”. Durante o estudo foi ensaiado o composto resultante à compressão, concluindo

uma grande capacidade de absorção de energia sendo assim candidato a utilizações sujeitas a impacto. Prova desta vantagem é também o estudo realizado por [Castro *et al*, 2010] que testa a capacidade da cortiça como material de núcleo em estruturas *sandwich* leves. Neste estudo foram realizados ensaios de flexão a *sandwiches* de cortiça e fibra de carbono de onde foi possível concluir a influência de parâmetros como o tamanho dos grânulos de cortiça, a densidade do aglomerado e o processo de ligação usado para a coesão dos granulados, no desempenho da estrutura. A partir dos resultados dos ensaios de flexão de três pontos foi possível concluir que o tamanho de grão não influencia as tensões de corte existentes no núcleo do composto e que a região de propagação da fenda reduziu quando comparada com a amostra testada com núcleo favo de abelha Nomex. Relativamente aos ensaios de impacto, “todas as *sandwiches* à base de cortiça (independentemente do tipo de granulado) apresentaram valores de carga consideravelmente mais elevados do que os obtidos com espuma Rohacell como material de núcleo”, também a capacidade de retorno da cortiça após o impacto ficou demonstrada, o que pode ser favorável sendo possível a absorção de energia de forma eficaz num novo impacto.

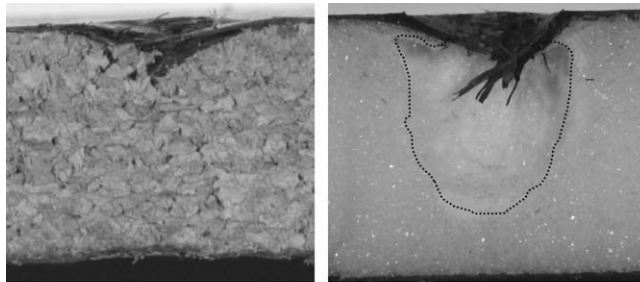


Figura 6 - Vista transversal das zonas afectadas pelo impacto [Castro *et al*, 2009]

Já os testes de condutividade térmica permitem concluir que, relativamente aos aglomerados de cortiça, quanto menor for a sua densidade, melhores isolantes térmicos estes compostos são. Este estudo complementa o anterior na medida em que ressalva a importância do retorno do material após a situação de impacto, esta que é uma característica da cortiça e em relação aos demais materiais, uma vantagem. Característica esta também explorada por [Fernandes *et al*, 2014] que

estudou a cortiça aglomerada de modo estático e dinâmico, onde concluiu a grande capacidade de retorno visco-elástico destes aglomerados e a quase imperceptível deformação permanente.



Figura 7 - Provetes de aglomerado de cortiça depois e antes dos ensaios [Fernandes *et al*, 2014]

Outro estudo com pontos comuns a esta tese é o [Hachemane *et al* 2013] onde foram realizados ensaios experimentais a fim de caracterizar um material sanduíche juta / epóxi - cortiça no que concerne a impacto e recuo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da energia de impacto e a densidade do aglomerado de cortiça sobre a placa sanduíche por testes estáticos e dinâmicos. Os resultados mostram que a força inicial, a força máxima e a dimensão dos danos são influenciados pela densidade do aglomerado de cortiça e da energia de impacto. [Sanchez-Saez *et al*, 2011] analisaram o comportamento do aglomerado de cortiça sujeito a impactos balísticos concluindo o aumento significativo da energia absorvida quando as amostras continham aglomerado de cortiça. [Sousa-Martins *et al*, 2013] os aglomerados de cortiça foram incorporados como núcleo de estruturas sanduíche cujas peles eram folhas de liga de alumínio. As amostras foram submetidas a ondas de choque provenientes da explosão de C4. “Em termos genéricos, observou-se uma diminuição do impulso transmitido para a estrutura com o aumento da espessura do núcleo da *sandwich*”. Também [Abdallah *et al*, 2010] por extrusão, misturaram os grânulos de cortiça por sua vez com polipropileno. Os compostos receberam tratamento superficial com silano e com hidróxido de sódio. Concluiu-se que a melhor adesão entre os grânulos de cortiça e o polipropileno aconteceu nas amostras com tratamento de silano. Este pode ser

um facto bastante interessante quando por algum motivo ocorrer delaminação em estruturas desta natureza, apontando assim uma possível solução a este problema. Com o intuito de modernizar as matrizes de materiais compósitos e de as tornar mais sustentáveis, [Vilela *et al*, 2013] investigaram a utilização de duas matrizes biodegradáveis. Concluíram que “os compósitos com teores mais elevados de cortiça são mais flexíveis e a resistência à tração diminui com o teor de cortiça”.

A par do objetivo desta tese, também [Kumar *et al*, 2011] teve como finalidade a aplicação naval de estruturas *sandwich*, mas neste caso em cascos de veleiros. Foram desenvolvidas estruturas *sandwich* compósitas usando composto de fibra de carbono biaxial como pele e aglomerado de cortiça como material de núcleo. De modo a caracterizar o seu comportamento à flexão, as estruturas foram testadas por meio de testes de flexão de quatro pontos. Estruturas sanduíche com núcleos de espuma de PVC e PMI e peles semelhantes, foram também analisadas para comparação. O comportamento destas estruturas de núcleo de espuma foi em tudo idêntico à estrutura objeto de estudo. Este facto dever-se-á à semelhança das estruturas internas dos núcleos de espuma e dos aglomerados de cortiça. No entanto em aplicações navais é importante ter em conta fatores como a humidade. [Yan *et al*, 2014] indicam que as fibras de linho têm características específicas comparáveis à fibra de vidro mas apontam a principal desvantagem como a variação nas suas propriedades mecânicas, muito afectadas pela humidade.

As fibras naturais surgem cada vez mais associadas a tentativas de substituição de outras fibras e também a melhoramentos relativamente ao reforço de estruturas. [Zhu *et al*, 2013] neste estudo foi investigado o efeito da configuração/orientação das fibras no desempenho mecânico dos compósitos de linho/tanino. [Fernandes *et al*, 2013] estudaram a incorporação de fibras de côco num material compósito de polietileno e pó de cortiça, concluindo que “esta adição resultou num aumento de 27% do módulo de elasticidade do material e de 47% na resistência à tração quando comparado com o material não reforçado”. Nesta investigação estudou-se ainda o uso da fibra de sisal em conjunto com grânulos de cortiça e uma matriz polimérica. Concluíram os melhores resultados mecânicos com o tratamento alcalino, isto é, a imersão da amostra em Hidróxido de Sódio (NaOH) e depois de 2h de secagem à temperatura ambiente recorre-se à lavagem das amostras com



água destilada e uma pequena quantidade de ácido acético. Os tratamentos químicos são não raras vezes propostos no que toca a laminados com fibras naturais e cortiça. Prova disto é o estudo [Kabir *et al*, 2012] onde foram utilizados laminados de fibra de cânhamo e resina poliéster e aplicados tratamentos de alcalinização, silano e acetilação às superfícies. Concluiu-se que “Um tratamento químico apropriado na superfície da fibra pode aumentar a resistência mecânica em cerca de 30%.” Ainda em relação às fibras, [Petrucci *et al*, 2013] comparou diferentes laminados de fibras de vidro, cânhamo, linho e basalto em ensaios de flexão. Verificaram, no final dos ensaios, a melhor performance dos laminados híbridos em comparação com os constituídos de apenas um tipo de fibras.

Assiste-se hoje em dia a uma emersão de estudos com o intuito de tornar o dia-a-dia mais verde. [Dweib *et al*, 2004] desenvolveram uma estrutura compósita totalmente natural para aplicação em telhados de habitação. Os materiais utilizados foram a resina à base de óleo de soja e fibras naturais como o linho, celulose, o papel reciclado e penas de galinha. Estas estruturas compósitas foram comparadas com as estruturas de madeira atualmente utilizadas na construção. Já [Shah *et al*, 2013] estudaram e compararam duas pás eólicas. Uma convencional de fibra de vidro e resina polyester e outra de fibra de linho e também resina de polyester. Concluíram a maior rigidez da pá convencional, porém, o menor peso (cerca de 10%) da pá de fibra de linho. Estes exemplos provam a capacidade destes materiais e também a abrangência de aplicações que até hoje não foram aproveitadas, mas que tendem a ser cada vez mais exploradas.

[Duigou *et al*, 2011] concluíram que a técnica de vácuo é a mais adequada para a fabricação de compostos *sandwich* de linho e núcleo de balsa de forma industrial. Concluíram ainda que apesar das propriedades mecânicas serem ligeiramente inferiores às da fibra de vidro, estas *sandwiches* são bastante promissoras e que poderão ter uma grande variedade de aplicações. Por outro lado, segundo os autores, “há vantagens ambientais significativas na utilização destes materiais e da *bio-sandwich*”.

## 2.2 Norma ASTM C393

Esta norma de ensaio prevê a determinação da resistência ao corte do núcleo, resistência à flexão das faces, resistência ao corte e o módulo de flexão da estrutura. Uma variante deste ensaio mas desta feita à fadiga, pode ser aconselhada quando a estrutura se sujeita a este tipo de esforço.

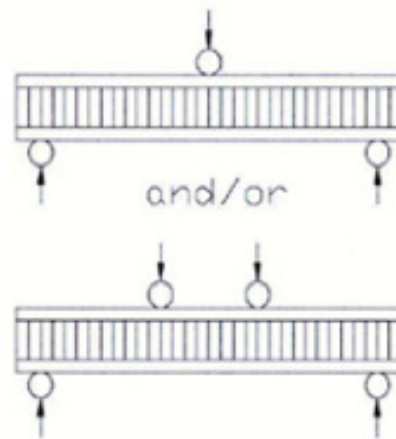


Figura 8 - Figura exemplificativa do ensaio relativo à norma ASTM C 393

Devido à diversidade de ensaios possíveis de efetuar às estruturas *sandwich*, houve o cuidado de analisar cada uma delas e comparar com os esforços aos quais é expectável que a embarcação esteja sujeita. Assim, e após análise das diversas normas disponíveis para ensaios de estruturas *sandwich*, optou-se por seguir a norma ASTM C393. Esta norma é utilizada para caracterizar o comportamento mecânico de estruturas *sandwich* sujeitas à flexão em três ou quatro pontos e desta consegue-se determinar:

- resistência à flexão da *sandwich* (força – deslocamento);
- tensão de corte do núcleo;
- módulo de rigidez ao corte do núcleo;
- propriedades de ligação núcleo – faces.

De salientar o facto de nesta tese se pretender efetuar uma caracterização dos materiais estudados e posteriormente a comparação com o material já utilizado.

Sendo que esta norma prevê ensaios de flexão de três e quatro pontos, prevê também a sua configuração e modo de carregamento dos provetes. Como é possível observar na figura seguinte.

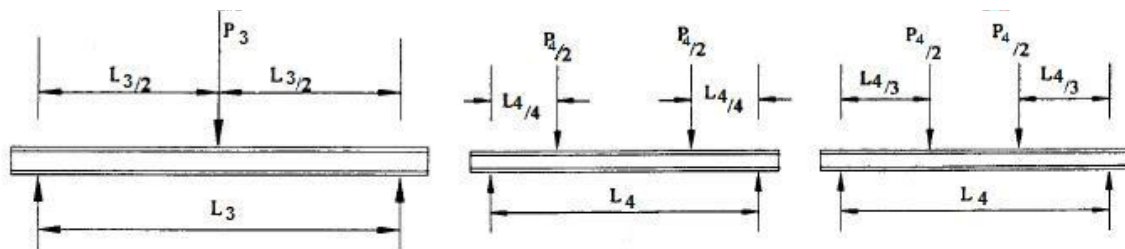


Figura 9 - Modos de carregamento previstos na norma ASTM C 273

O ensaio de três pontos apenas admite uma configuração, na qual o ponto de carregamento se situa no ponto médio entre os apoios. Já o ensaio de quatro pontos permite dois tipos de configuração na qual os pontos de carregamento se situam ou a 1/4 da distância dos apoios ou a 1/3.

Nos ensaios realizados optou-se pelo ensaio de flexão de três pontos tendo em conta o menor esforço de corte aos quais são sujeitas as amostras neste ensaio. Tentou-se ainda o ensaio de três pontos com uma placa de aço na zona de carregamento a fim de prevenir e evitar a falha por esmagamento. Rapidamente se concluiu a impossibilidade de levar a cabo o ensaio deste modo, o qual pretendia evitar a zona de falha por esmagamento, devido ao surgimento de duas zonas de falha por esmagamento através do qual se deduz um aumento das tensões de corte exercidas nas amostras.

A partir desta norma foi definida a largura das amostras, posteriormente cortadas a jato de água, a distância entre apoios e a velocidade dos ensaios. O ensaio efectuado foi o de três pontos como demonstrado na figura.

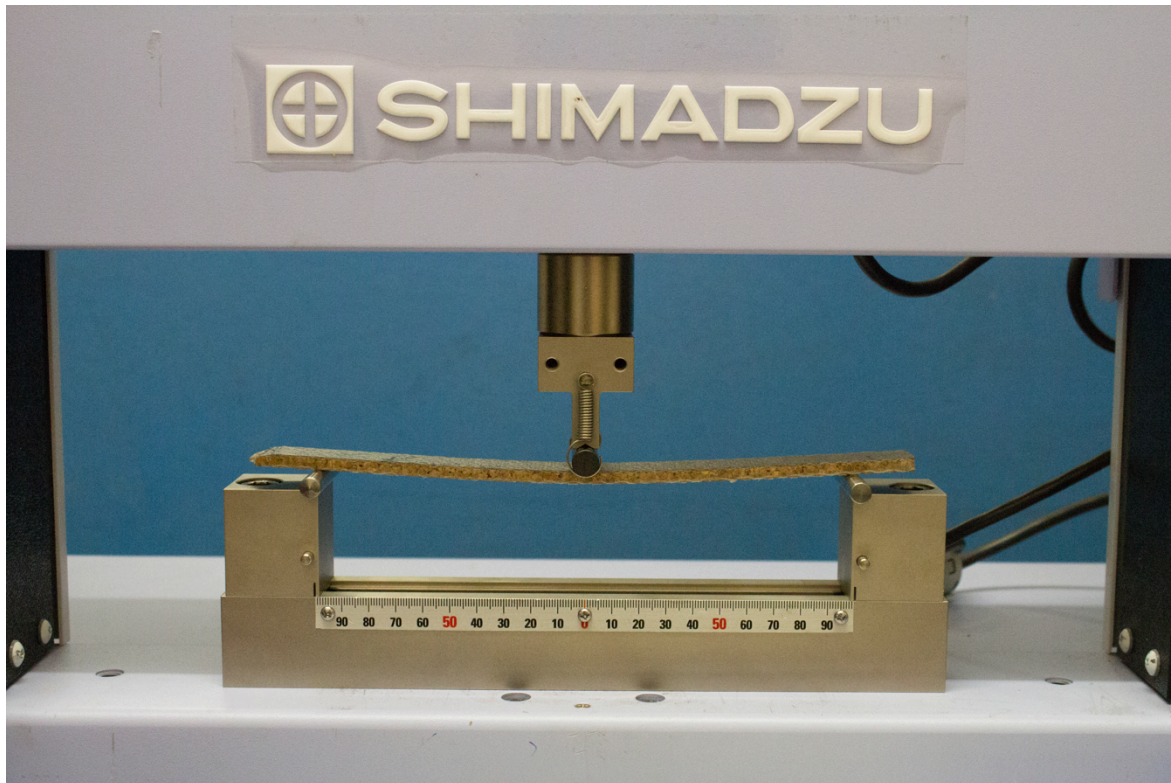


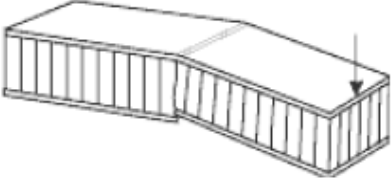
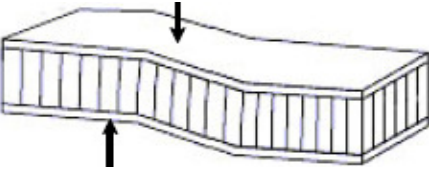
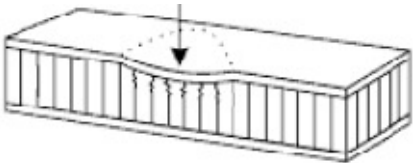




Figura 10 - Ensaio de flexão de três pontos

### 2.2.1 Modos de Falha

As falhas ocorridas nos ensaios de flexão ocorrem no local que se pretende estudar. Ou seja, se um ensaio pretender estudar o núcleo de uma estrutura *sandwich*, a falha deverá encontrar-se no núcleo. Se por sua vez o objetivo for o estudo das faces da estrutura, será aí que a falha deverá ocorrer.

Na tabela 1 encontram-se os modos de falha possíveis de ocorrer em estruturas *sandwich*.

Tabela 1 - Modos de falha possíveis em estruturas *sandwich* [Broughton, 2002]

	Espessura e/ou resistência das faces insuficiente(s)
	Espessura e/ou resistência ao corte do núcleo insuficiente(s)
	Resistência à compressão do núcleo insuficiente (Mais frequente nos ensaios realizados)
	Espessura e/ou resistência ao corte do núcleo insuficiente(s)
	Módulo de corte do núcleo e/ou resistência ao corte do adesivo insuficiente(s)
	Resistência à compressão do núcleo insuficiente
	Espessura das faces insuficiente

Sendo que o objetivo desta tese é o estudo da estrutura proposta e a comparação com o material já utilizado, refere-se que se pretende aferir qual o modo de falha mais comum. Assim, não foi colocada qualquer restrição a nível dos ensaios a fim da falha ocorrer apenas num local. Também por esta razão, a norma tomada em conta para os ensaios das amostras foi utilizada como guia inicial para dimensionar os provetes, determinar o vão e velocidade de ensaio.



---

# Capítulo 3

---

Materiais e Métodos

---





## 3. Materiais e Métodos

### 3.1 Materiais

---

A utilização de estruturas *sandwich* tem vindo a crescer devido à elevada relação resistência/peso. Nestas, as faces suportam os esforços de flexão, sujeitando uma das faces à compressão e a outra à tração. O núcleo da *sandwich* suporta os esforços de corte gerados impedindo assim o deslizamento das faces. A constituição destas estruturas inclui, em geral, dois materiais diferentes: a face que não é mais que uma fina camada exterior que confere a resistência à estrutura e o núcleo responsável pelo baixo peso da estrutura. Os materiais mais utilizados nas faces destas estruturas são os materiais compósitos como a fibra de carbono ou também o alumínio. No que ao núcleo diz respeito, os materiais são frequentemente de baixa densidade como o poliuretano, o ninho de abelha ou espumas poliméricas como a Rohacell. Hoje em dia é possível encontrar estas estruturas em inúmeras aplicações, tais como: aviões, pranchas de surf, *kayak's*, camiões frigoríficos, construção civil, etc.

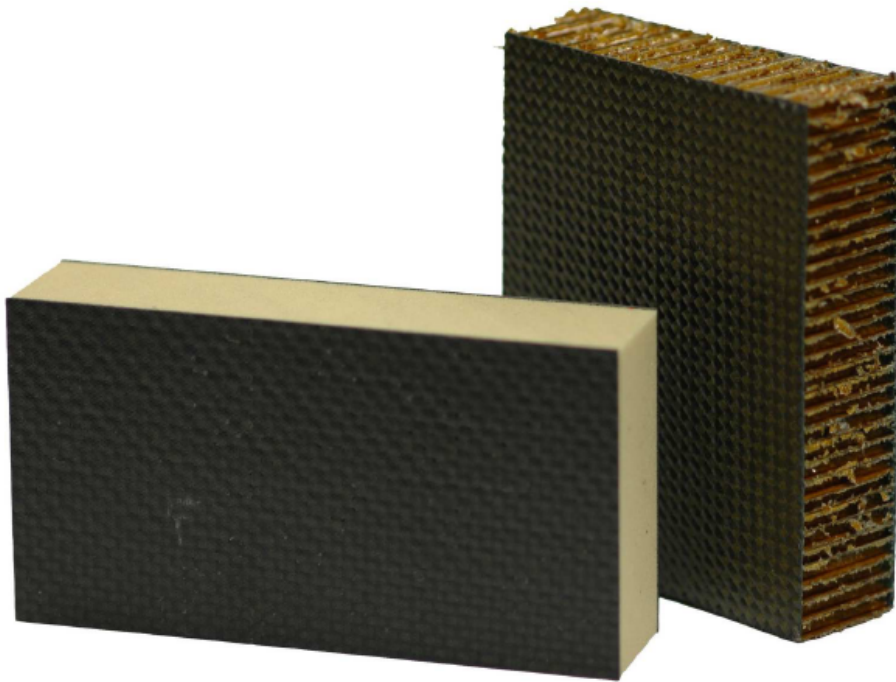


Figura 11 - *Sandwich* com núcleo de PMI Rohacell (à esquerda) e ninho de abelha (à direita)

Segundo [Curtis 1997] a escolha das estruturas *sandwich* deve ter em conta os seguintes critérios:

- a espessura das faces deve ser tal que suporte as tensões de tração e compressão assim como as tensões de corte no plano das faces provenientes da carga;
- a espessura do núcleo deve ser tal que suporte as tensões de corte provenientes da carga e evite engelhamento;
- o núcleo deve garantir resistência à flexão tal que impeça flexões excessivas;
- os materiais deverão resistir às zonas de concentração de tensões evitando falhas nestas.

Fazendo uma análise geral em termos de vantagens das estruturas *sandwich*, encontra-se: a elevada relação resistência / peso, o isolamento térmico e acústico, a capacidade de resistência à corrosão, a facilidade na construção de formas

complexas, a capacidade de absorção de energia sem rotura, a possibilidade de construção numa única peça e as múltiplas escolhas de materiais disponíveis.

Já no que às desvantagens diz respeito, encontra-se: a quase total impossibilidade de reciclagem dos materiais, o controlo de qualidade e a incompatibilidade de materiais.

Existe hoje em dia uma grande diversidade de materiais metálicos passíveis de implementar em estruturas *sandwich*. De entre esta variedade destaca-se o alumínio pela sua relação resistência/peso e também pelas inúmeras aplicações nas quais provou ser um óptimo material quer de face quer de núcleo. Este último em forma de ninho de abelha ou espumas metálicas.

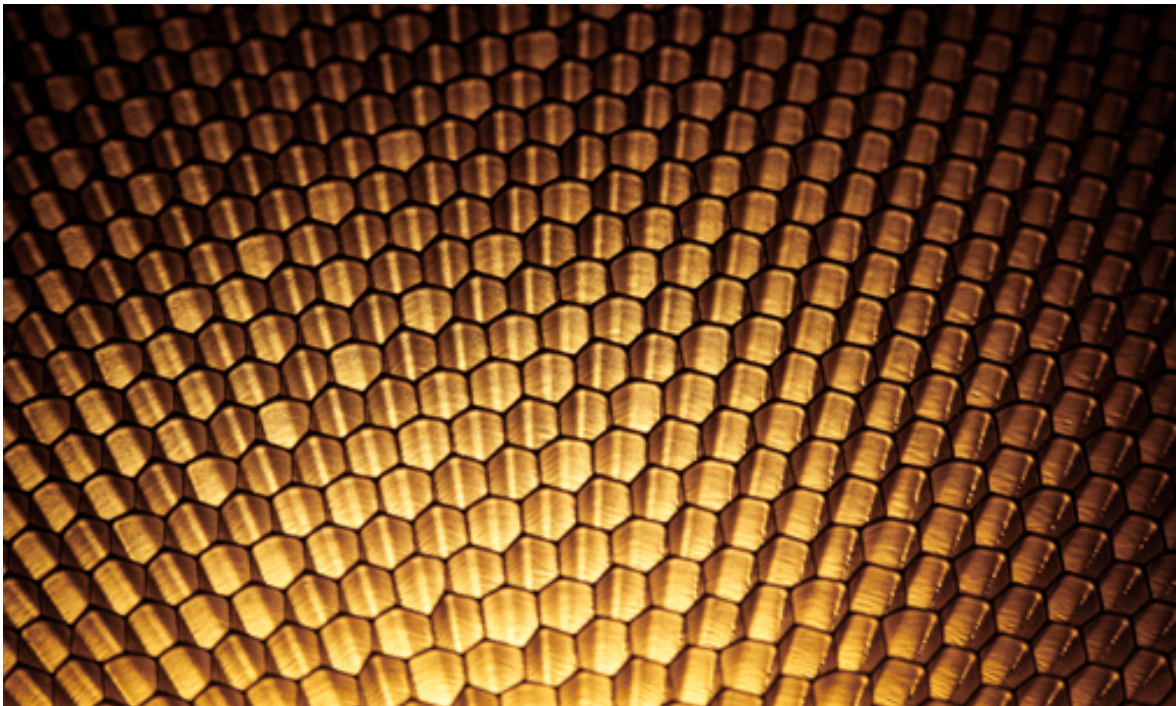


Figura 12 - Padrão original do ninho de abelha [altairenlighten.com, 2014]

Na sua maioria os materiais metálicos apresentam como vantagens a alta rigidez e resistência ao impacto, o bom acabamento e o baixo custo. No entanto apresentam também algumas desvantagens como a elevada densidade, a corrosão e a dificuldade de fabrico de formas complexas.

Apresentados, hoje em dia, como os materiais do futuro em diversas áreas de investigação, os materiais compósitos são estruturas compostas por uma matriz

polimérica e fibras de naturezas distintas. Devido às propriedades mecânicas de baixo nível a função estrutural da matriz é mínima, funcionando como material de adesão e responsável pela distribuição de forma conveniente das cargas às quais o compósito está sujeito. Tem ainda a vantagem de facilitar a obtenção de geometrias complexas. Atualmente as matrizes mais comuns são as resinas de poliéster, vinil ou epóxi.

Sendo que não se impõem propriedades mecânicas à matriz dos compósitos, estas têm obrigatoriamente de advir das fibras utilizadas. As utilizações mais frequentes dizem respeito às fibras de vidro, carbono e kevlar que podem ser dispostas de modo unidirecional, multiaxial ou em forma de manta entrançada ou em grade. As fibras são então as responsáveis pelo suporte da carga à qual o material está sujeito.

A escolha do material de núcleo de uma estrutura *sandwich* é sem dúvida a que mais pode influir no desempenho da mesma. Assim tem obrigatoriamente de se escolher conforme a aplicação pretendida e averiguar os prós e contras de cada material.

O Ninho de Abelha utilizado em núcleos de estruturas *sandwich* é formado por placas de espessura muito pequena e o material de composição pode ser de natureza metálica, polimérica ou até cerâmica. A escolha do material varia consoante a aplicação final da estrutura, na qual os cerâmicos saem em vantagem caso a aplicação sujeite o material a elevadas temperaturas e os metálicos quando o intuito é a absorção de energia. As geometrias mais comuns, como se pode verificar na figura 12 são as hexagonais, as quadradas e as triangulares. O ninho de abelha é uma opção muito eficaz quando se procura uma estrutura leve e com uma elevada resistência.

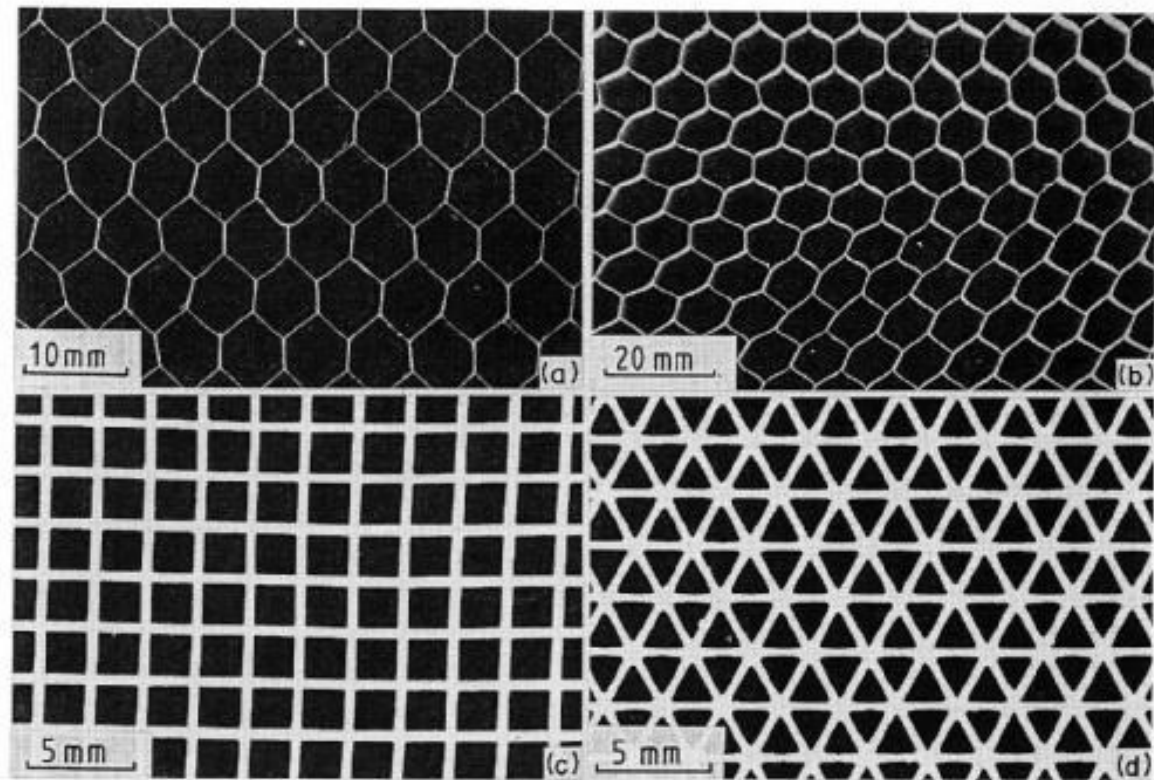


Figura 13 - Diferentes padrões do ninho de abelha [Gibson e Ashby, 1997]

A espuma Rohacell é, a par do ninho de abelha, um dos materiais mais utilizados nas estruturas *sandwich* criadas atualmente. A sua produção consiste na junção de ácido meta-acrílico e metacrilonitrilo sendo adicionado posteriormente formamida. Este composto é então polimerizado dando lugar a um rígido tabuleiro de plástico, onde a formamida se mantém sem reação. De seguida este tabuleiro é aquecido a 200°C onde a formamida irá reagir e produzir gás criando bolhas em todo o material, formando assim o composto final de polimetacrilimida (PMI). É possível encontrar este produto em diversas densidades a partir dos 30 kg/m<sup>3</sup>, até aos 200 kg/m<sup>3</sup>. A espuma Rohacell apresenta inúmeras vantagens na aplicação em estruturas *sandwich* pois é um material muito leve, resistente a temperaturas elevadas (até 200 °C) e que absorve pouca resina aquando da adesão às faces.



Figura 14 - Exemplo de espuma PMI Rohacell [rohacell.com, 2014]

Conhecida e apreciada em todo o mundo, a cortiça toma lugar no quotidiano da população há largas décadas. O Sobreiro é a árvore que produz este material e tem grande parte da sua distribuição na região sul de Portugal. Idealmente o Sobreiro desenvolve-se em regiões onde a temperatura média ronde os 15°C, em terrenos arenosos descalcificados e de pH neutro. A casca do sobreiro (*Quercus Sober*) vulgo cortiça, é natural, versátil e sustentável. Sendo de génese vegetal e renovável a cortiça apresenta características capazes de tornar esta matéria prima num caso de verdadeiro sucesso.



Figura 15 - Sobreiro [sol.pt, 2014]

Com uma densidade de 0,16g/cm<sup>3</sup>, a cortiça natural é um material muito leve pois mais de metade do seu volume é ar contido em câmaras celulares microscópicas, o que também a torna flutuável. A título de exemplo, um centímetro cúbico de cortiça pode conter até 40 milhões de células. Também por esta razão, a cortiça é elástica e compressível, sendo capaz de comprimir até 50% da sua largura e retornar à forma original. Impermeável, de combustão muito lenta e sem libertar

gases tóxicos, excelente isolante térmica e acústica e hipoalergénica. Muitas destas características advém dos constituintes presentes na cortiça como a Suberina e a Lenhina.

A produção da cortiça é cada vez mais estudada a fim de se entender de onde surge este material com potencialidades tão elevadas. O tecido celular responsável pela produção de cortiça é o felogénio. Este é danificado aquando do descortiçamento mas em apenas 30 dias (em média) surge o felogénio traumático capaz de produzir uma nova camada de cortiça em apenas 50 dias. Capaz de produzir cortiça durante 150 anos e aliada à forte resistência desta árvore, o sobreiro é um investimento seguro para os produtores.



Figura 16 - Desbóia [Fortes 2004]

O descortiçamento ou desbóia acontece de 9 em 9 anos e é levado a cabo por pessoas experientes e conhecedoras de modo a não ferir o tronco do Sobreiro. A primeira extração acontece entre os 25 e 30 anos de idade da árvore. A cortiça proveniente deste processo tem o nome de cortiça virgem. Esta é apenas aproveitada para aglomerados devido aos inúmeros sulcos e fendas, não sendo por isso ideal ao fabrico de rolhas. Decorridos 9 anos, a segunda extração retira a cortiça secundária. Ainda com bastantes fendas e por isso não utilizada em todas as aplicações. A cortiça da terceira extração e seguintes toma o nome de amadia. Esta apresenta uniformidade em toda a placa e por isso é utilizada para a indústria rolheira devido à inexistência de sulcos e fendas.



Figura 17 - Pranchas de cortiça após a desbóia [jornalcores9.net, 2014]

Historicamente a cortiça surge aplicada a nível quotidiano com populações com muitos anos. Em pleno século XXI, encontramos frequentemente a cortiça presente em desfiles de moda dos mais prestigiados estilistas do mundo.



Figura 18 - Artigos de moda fabricados à base de cortiça [lisbonsecrets.com, 2014]



Esta utilização remonta ao antigo Egito, bem como a utilização da cortiça na náutica, pesca e aplicações domésticas. Também o povo romano explorou as virtudes da cortiça. Desde as palmilhas para calçado, vedante em ânforas e revestimento de telhados e tectos, a cortiça teve neste período o seu abrir de horizontes. Nos descobrimentos portugueses e na II Guerra Mundial, a cortiça foi aplicada nos vários equipamentos militares.

Apesar de algumas referências à utilização de rolhas de cortiça mais antigas, a implementação desta prática atribui-se ao monge Dom Pérignon no século XVII por forma a preservar o seu champanhe. Este descobriu que as rolhas de cortiça não saltavam dos barris utilizados na fermentação e conserva de vinhos e espumantes. Este impulso fez com que hoje em dia a grande maioria das garrafas de vinho em todo o mundo sejam vedadas com rolhas de cortiça.

Sendo um material de ampla gama de aplicações, a cortiça é hoje em dia procurada por diversos nichos de mercado. Vulgarmente encontrada em materiais de isolamento, as vantagens da cortiça tornam este material o foco de maior procura quer em termos acústicos quer em termos térmicos. Hoje em dia é possível encontrar o aglomerado de cortiça em placas de pavimento, rolos de isolamento para aplicação por baixo de pisos flutuantes, placas de isolamento para paredes e também como núcleo em estruturas *sandwich* destinadas a pavimentos ou divisão de espaços.



Figura 19 - Pavimento isolante de aglomerado de cortiça [isolamentos.net, 2014]

Com a inovação, multiplicam-se as áreas nas quais este material é aplicado. As características de absorção tornaram possível a incorporação de cortiça em juntas de dilatação de pontes. Esta propriedade aliada ao retorno que a cortiça tem após o impacto levam a que se tente implementar em capacetes de motociclos muitas vezes sujeitas a diversos impactos na mesma área.

Mas nem só no terreno a cortiça dá mostra das suas vantagens. A NASA encontrou na casca do sobreiro o parceiro preferencial e incorporou-a em escudos térmicos e placas de revestimento das naves espaciais. Devido à excelente relação performance/peso, a cortiça assume um papel relevante no sucesso do lançamento e na operação bem-sucedida de todas as naves espaciais, devido às elevadas temperaturas às quais estes veículos estão sujeitos.

Os aglomerados de cortiça tornaram possível o aproveitamento de quase a totalidade da cortiça extraída. Estes dividem-se em dois grandes grupos: os aglomerados puros, aqueles que não têm qualquer aglomerante ou produto que não sejam grãos de cortiça e os aglomerados compostos nos quais se encontram aglomerantes como resinas, borracha ou óleos. Os aglomerados compostos são

também eles divididos em dois grupos consoante a origem dos grânulos que pode ser a trituração de desperdícios da indústria rolheira ou de pranchas de menor qualidade como a cortiça virgem ou secundeira.



Figura 20 - Grânulos de cortiça [1-1.pt, 2014]

As fibras naturais entram nesta tese por forma a substituir a fibra de vidro presente na *sandwich* comumente utilizada na construção de *kayak's* e assim tornar a estrutura o mais natural e ecológica possível. Com isto surgiram diversas origens para as fibras naturais como a mineral, animal e vegetal.



Figura 21 - Exemplo de diversas mantas de fibras naturais

Devido ao preço e às características promissoras, as mantas escolhidas foram de fibra de linho. Esta fibra é normalmente mais pesada que a fibra de vidro e tem também uma maior resistência. Factos estes que influenciaram a decisão da escolha das mantas a incluir nas amostras.

A produção do linho é favorável em climas temperados com solos frescos e ricos. Sendo semeado no princípio da primavera, a colheita inicia-se aproximadamente cem dias depois quando o talo se encontra amarelo. A colheita é tradicionalmente manual, apesar de já existirem máquinas industriais específicas para o efeito, e deve ser aproveitada toda a extensão do caule, ou seja, arrancando pela raiz. A fim de retirar a cola natural presente no caule, estes passam pelo processo de maceração que pode ser de três tipos:

- maceração por orvalho - espalham-se os talos num campo fazendo com que a chuva e o orvalho proporcionem condições favoráveis ao aparecimento de cogumelos microscópicos que irão decompor a cola;
- maceração de água fria - imergem-se os feixes de linho em água fria devidamente amarrados. Esta ação faz com que as bactérias eliminem a cola.
- maceração de água quente - em tudo idêntica à maceração de água fria mas consideravelmente mais rápida. Esta maceração exige um maior controlo devido à degradação das fibras quando imersas demasiado tempo em água quente.

Atualmente é muito comum encontrar diversos produtos feitos a partir de fibras naturais. Principalmente destinados a aplicações interiores, os fabricantes apoiam-se maioritariamente nas vantagens hipoalergénicas destas fibras a fim de publicitarem os seus produtos.



Figura 22 - Tapetes de interior fabricados com fibras naturais

Na tentativa consciente de tentar criar plásticos menos poluentes, as bio-resinas surgiram como a melhor alternativa. Apesar de não existirem normas estabelecidas para que um produto seja considerado “verde”, existem alguns fatores a nível de senso comum capazes de rotular qualquer produto como “*eco-friendly*”. São eles o controlo e eficiência energéticos no fabrico, a eliminação segura e a diminuição das emissões tóxicas.

Existem dois tipos diferentes de bio-resinas: a biodegradável e a compostável. A biodegradável é passível de ser dividida em partículas cada vez menores. Já a compostável não permite a redução a matéria orgânica como acontece com a biodegradável. A forma mais eficaz de eliminar as bio-resinas compostáveis é através do processo de compostagem no qual estas são misturadas com materiais orgânicos.

A resina epóxi convencional é o resultado de reações entre substâncias químicas e outras provenientes de refinarias. A consciencialização da população levou à criação e exploração de uma nova era de refinarias, as bio-refinarias. Estas instalações, através da conversão de biomassa, integram equipamentos e processos de produção de energia, combustíveis, calor e produtos químicos de valor acrescentado. A biorefinação foi definida pela Agência Internacional de Energia como: “processamento sustentável de biomassa num espectro de produtos de base biológica (alimentos, rações, produtos químicos, materiais) e bioenergia (biocombustíveis, energia e / ou calor)”. A bio-refinaria consegue assim acrescentar valor a todos os produtos que desenvolve pelo facto de todos terem uma origem biológica e para além disso utilizar ou vender energia eléctrica à rede de distribuição aproveitada nos processos de fabrico.

No futuro prevê-se que estas unidades desempenhem um papel fulcral na produção de produtos atualmente provenientes do petróleo.

Após uma análise das características das várias fibras disponíveis como a fibra de juta, linho e cânhamo, ficou clara a ideia de que a oferta disponível de fibra de linho iria ser determinante na escolha desta fibra como acertada para a *sandwich*. No que diz respeito à fibra de linho em concreto, houve o cuidado de escolher diferentes tipos de manta, a fim de comparar as suas propriedades mecânicas e concluir qual o mais adequado para implementação no *kayak*. Escolheram-se então

dois tipos de fibras de linho: a entrançada (twill) e em grade (plain weave).



Figura 23 - Fibra de Linho em grade (Plain Weave) (easycomposites.co.uk)

As mantas de fibra de linho utilizadas com a configuração em grade tinham como densidades: 500 g/m<sup>2</sup>, 200 g/m<sup>2</sup> e 100 g/m<sup>2</sup>.



Figura 24 - Fibra de Linho em grade (Twill) (easycomposites.co.uk)

Com esta configuração apenas foi utilizada a manta de fibra de linho com densidade de 400 g/m<sup>2</sup>. Já as duas densidades de fibra de vidro utilizadas foram: 500 g/m<sup>2</sup> e 200 g/m<sup>2</sup>, ambas com configuração em grade.

As resinas utilizadas foram a resina epoxy Sika Sikadur 330 e a Entropy Resins Super Sap CLR. A escolha da bioresina recaiu sobre a Super Sap CLR devido à base de origem biológica de 25 %.



Figura 25 - Resina epóxi Sika e resina epóxi Super Sap

Como material de núcleo foi utilizado o CoreCork NL 10. Fabricado pela corticeira Amorim, o CoreCork é um produto desenvolvido especificamente para o uso como núcleo em estruturas *sandwich*. Já utilizado pela NELO em algumas peças das suas embarcações, o CoreCork apresenta grande flexibilidade e facilidade de conformação, o que permite a manufatura tradicional e manual do *kayak*. Por ser pouco absorvente, o CoreCork diminui a quantidade de resina utilizada no processo de fabrico. É portanto o núcleo perfeito e essencial a fim de se atingir o objetivo desta tese.

Por forma a manter a espessura habitual do *kayak* e as propriedades mecânicas aconselhadas, o CoreCork utilizado tem a espessura de 3mm.

Tabela 2 - Características essenciais do CoreCork NL10

Densidade	Espessura	Impregnação	Absorção
120 kg/m <sup>3</sup>	3 mm	270 g	< 4 %

### 3.2 Procedimentos Experimentais

Nesta secção é descrito o modo como as placas foram fabricadas. Toda a metodologia de fabrico foi levada a cabo tendo em conta as primeiras placas

fabricadas nas instalações da NELO a fim de conseguir condições uniformes para todas as placas.

As placas das quais se obtiveram os provetes foram fabricadas por moldação manual e prensagem a vácuo a partir de mantas de fibra de vidro e linho adquiridas à empresa Easy Composites, e com o corecork NL10 de 3mm de espessura da corticeira Amorim. As resinas utilizadas foram a resina epóxi Sika e a bioresina epoxy Super Sap da Entropy Resins.

A primeira etapa consistiu num pequeno teste a fim de verificar a compatibilidade da resina SuperSap com o desmoldante a fim de se conseguir extrair a placa da base aquando da sua cura. Assim procedeu-se ao fabrico de uma pequena amostra de fibra de vidro com a resina SuperSap na base previamente encerada com o desmoldante. Após a cura verificou-se a compatibilidade entre os dois componentes devido à facilidade com que a amostra se soltou da base.

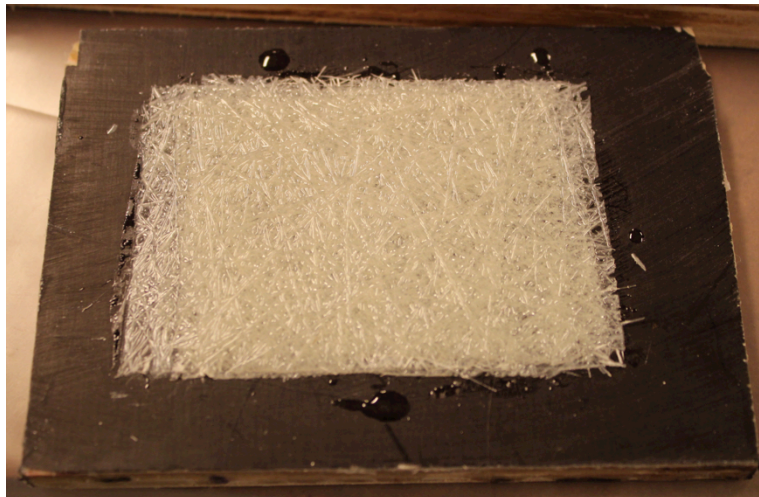


Figura 26 - Peça experimental com desmoldante

Da mesma maneira aplicou-se então a cera desmoldante na base destinada ao fabrico das placas. A aplicação foi feita com um pano e de seguida esperou-se cerca de quinze minutos de modo à cera secar e passar de brilhante a matte. Este período de espera é essencial para que a cera adira completamente à superfície e não à placa que será fabricada.



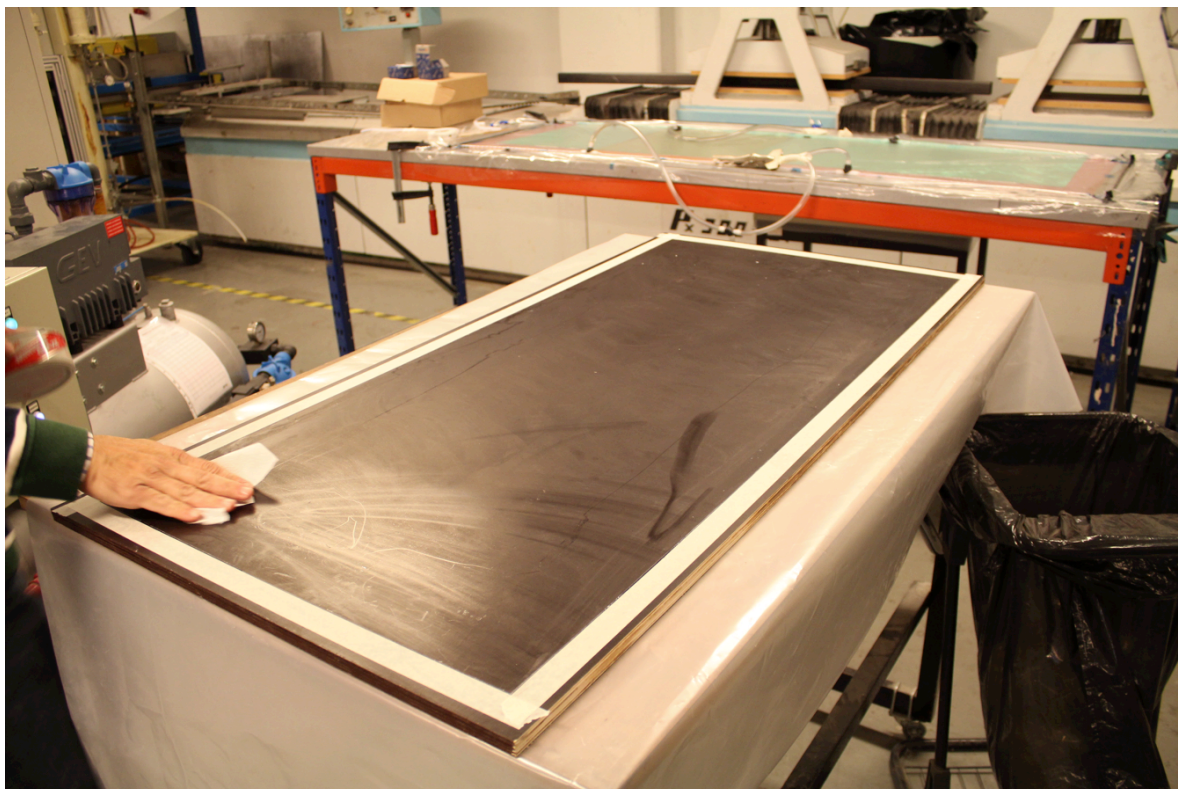


Figura 27 - Aplicação da cera desmoldante

O passo seguinte foi a preparação do sistema de vácuo começando por se colocar fita selante em toda a moldura da placa da base na qual foram aplicados dois tubos ligados à máquina de vácuo por intermédio de uma união “T”. Também estes tubos foram selados com a fita.



Figura 28 - Pormenor de montagem da união “T” e da ponta do tubo de vácuo

Assim, o aspeto final da moldura pronta para a laminagem é o seguinte.



Figura 29 - Aspeto final da moldura

De seguida passou-se ao corte das mantas a utilizar com as dimensões pretendidas. Assim como as primeiras placas fabricadas nas instalações da NELO, também estas têm como dimensão: 500mm x 500mm. Esta tarefa foi facilitada pelo facto das mantas utilizadas terem um metro de largura o que evita acertos na largura dos tecidos.



Figura 30 - Corte das mantas de fibra de linho para laminagem

Terminado o corte das mantas procedeu-se à preparação da resina. Seguindo as instruções do fabricante, e tratando-se de uma resina epoxy, a relação de resina e endurecedor é, em peso, 2:1. Assim realizou-se a mistura de aproximadamente 400g de resina e 200g de endurecedor.



Figura 31 - Pesagem da bioresina epóxi

De salientar o facto das imagens não ilustrarem estes números devido ao modo

faseado como a mistura da resina foi feita. Inicialmente misturaram-se apenas 300g de resina e 150g de endurecedor e só aquando da impregnação se percebeu que a quantidade iria ser insuficiente e optou-se por efectuar a mistura de mais 100g de resina e 50g de endurecedor perfazendo assim o total de 400g de resina e 200g de endurecedor.



Figura 32 - Pesagem do endurecedor e mistura dos componentes

Concluída a mistura da resina iniciou-se o processo de laminação das placas. Colocaram-se as mantas destinadas à primeira face na base e iniciou-se a impregnação das mesmas.

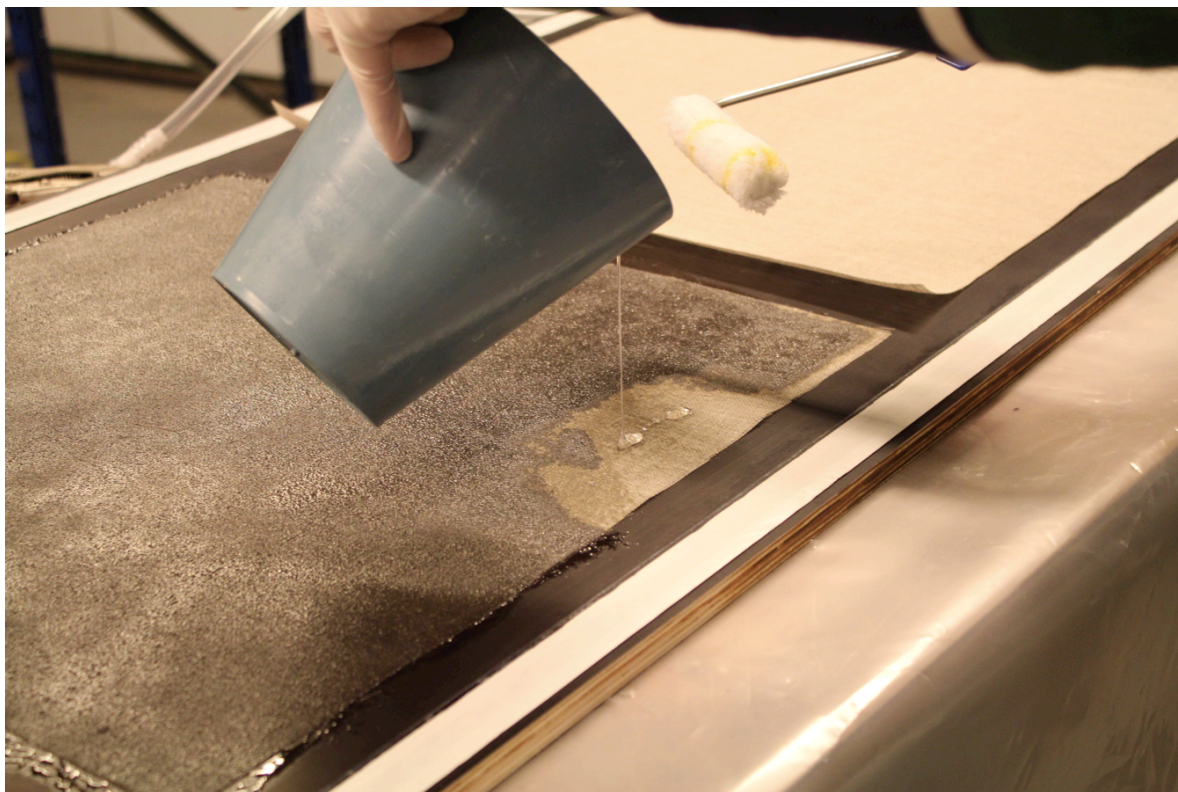


Figura 33 - Método de impregnação das mantas

A impregnação consistiu em deixar cair pequenas quantidades de resina, as quais foram de seguida espalhadas com a ajuda de um rolo permitindo assim uma melhor distribuição da resina por toda a manta. A constante inspeção visual é essencial à boa dispersão da resina por toda a superfície.

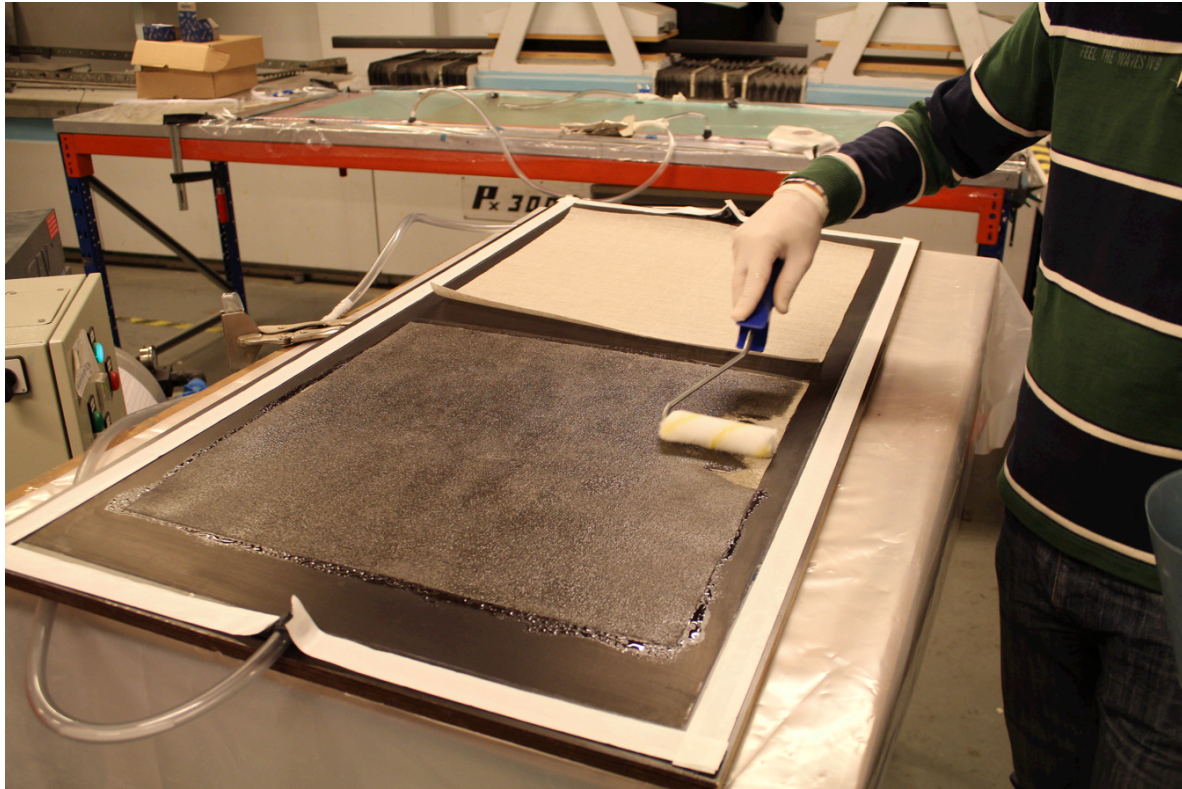


Figura 34 - Finalização da impregnação de uma das faces da *sandwich*

Finalizada a impregnação das duas mantas colocou-se o aglomerado de cortiça, também ele devidamente cortado sobre cada manta. Visto que cada manta absorve uma grande quantidade de resina, a impregnação do aglomerado não é necessária. Para além disso o sistema de vácuo será responsável pela distribuição uniforme da resina por toda a placa fazendo com que as zonas com menos resina rapidamente desapareçam ficando toda a placa bem impregnada e sem excesso de resina.

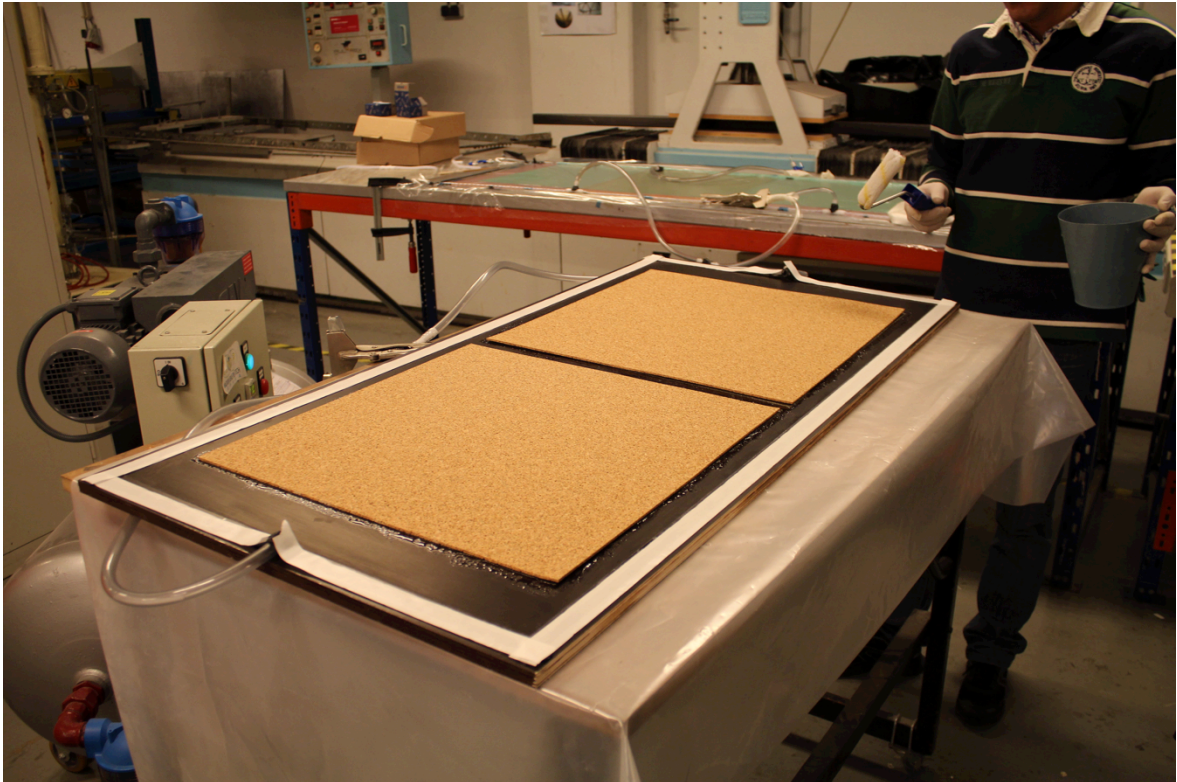


Figura 35 - Colocação da placa de aglomerado de cortiça destinada ao núcleo

Para concluir o empilhamento das diferentes camadas colocaram-se as mantas destinadas a cada placa no topo do aglomerado de cortiça e procedeu-se também a sua impregnação.



Figura 36 - Segunda face da *sandwich* já impregnada

O passo seguinte foi a colocação do plástico por cima das amostras ao qual foi aplicada manualmente uma pressão na zona da fita selante a fim de criar uma forte adesão entre a fita e o plástico.

Por fim a máquina de vácuo foi ligada, notando-se claramente a olho nu uma distribuição de resina por zonas onde inicialmente não estavam totalmente impregnadas.



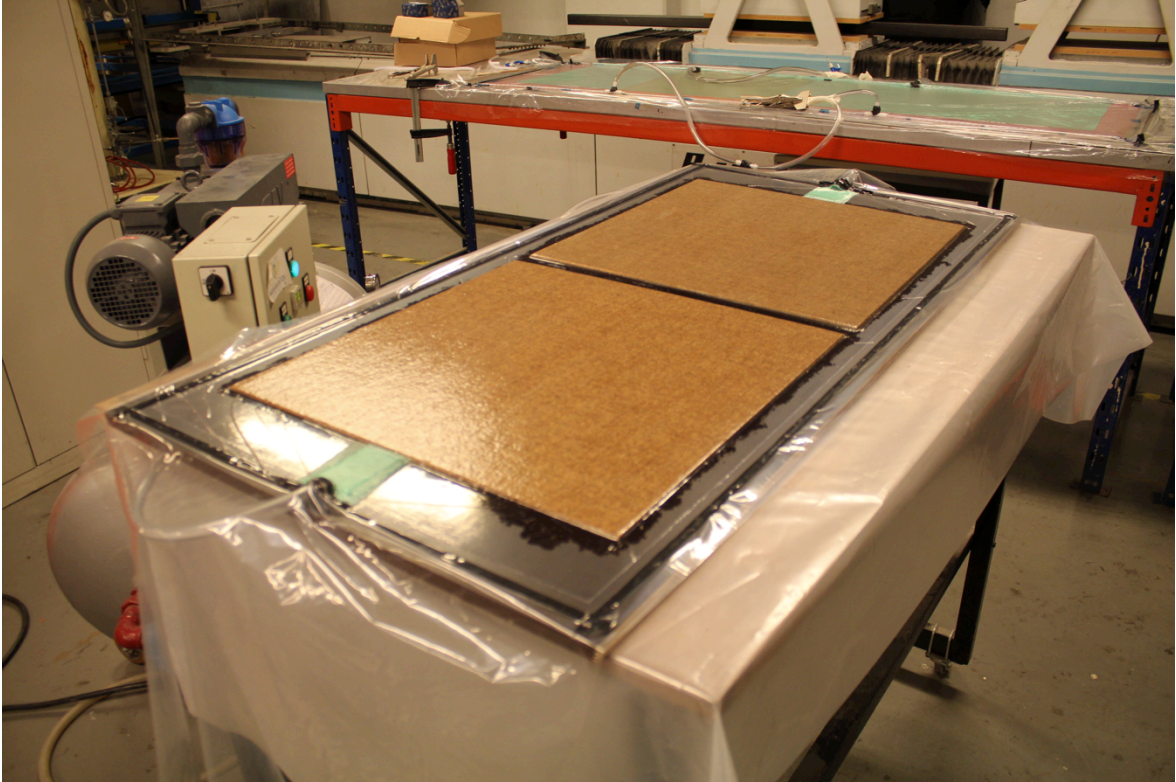


Figura 37 - Sistema de vácuo já em funcionamento

De referir que nas zonas entre os tubos e as amostras colocaram-se três camadas de rede com o objetivo de criar uma zona livre onde o ar pudesse continuamente ser extraído. A utilização do sistema de vácuo permite ainda retirar o excesso de resina presente nas placas. A pressão imposta ao sistema foi de 0,781 bar.



Figura 38 - Pormenor da rede espaçadora e da pressão de vácuo

Depois das placas terem curado totalmente retirou-se o plástico superior e também

as placas *sandwich*. Com o objetivo de identificar corretamente as placas procedeu-se de imediato à respectiva numeração de cada placa.



Figura 39 - Identificação das diferentes placas

Com estes materiais foram assim fabricadas as seguintes *sandwiches* descritas de forma detalhada na tabela 3.

Tabela 3 - Composição das placas fabricadas

<b>Placa</b>	<b>Face superior</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Face inferior</b>	<b>Resina</b>
<b>1</b>	Fibra vidro 500g	corecork nl10 3mm	2x fibra vidro 200g	Sika
<b>2</b>	Fibra linho 500g	corecork nl10 3mm	Fibra linho 400g	Entropy
<b>3</b>	Fibra linho 500g	corecork nl10 3mm	Fibra linho 400g	Sika
<b>4</b>	Fibra linho 100g	corecork nl10 3mm	Fibra linho 200g	Entropy
<b>5</b>	Fibra linho 200g	corecork nl10 3mm	Fibra linho 200g	Entropy
<b>6</b>	Fibra linho 100g	corecork nl10 3mm	Fibra linho 100g	Entropy

Em todas as placas a quantidade de resina não foi previamente calculada pois a aplicação desta com o rolo apenas terminou quando toda a manta estava bem impregnada.

Após a obtenção das placas das amostras foi necessário efetuar cortes de modo a conseguir os provetes com as dimensões pretendidas. Apesar de uma intuição inicial suspeitar que a serra de fita não seria ideal aos cortes, este método foi testado e veio a verificar-se correta a intuição. Ao cortar, os dentes da serra de fita puxaram várias fibras das faces e retiraram grânulos de cortiça do aglomerado do núcleo causando dano na extremidade do provete e podendo fragilizar o seu interior.



Figura 40 - Comparativo de corte: em cima jato de água e em baixo serra de fita

Assim optou-se então pelo corte por jacto de água, o qual se demonstrou completamente eficiente no cortes das amostras deixando a extremidade isenta de qualquer dano.

O corte dos provetes foi levado a cabo na oficina da ESAN (Escola Superior Aveiro Norte), pólo da Universidade de Aveiro em Oliveira de Azeméis, utilizando a máquina POWERJET Vision.



Figura 41 - Máquina de corte por jato de água

A primeira tarefa a executar foi o desenho dos provetes em CAD, utilizando o software SolidWorks. Concluído o desenho, importou-se o ficheiro para o software da máquina e introduziram-se os parâmetros necessários tais como a velocidade de corte de 2 m/min e a pressão de corte de 360 bar. De acrescentar ainda o facto de não ter sido necessária a utilização de um abrasivo para facilitar o corte, visto que a *sandwich* é relativamente fina e fácil de cortar.

Primeiramente posicionaram-se as placas na grelha da máquina mas devido ao baixo peso que apresentam teve que se acrescentar uma chapa metálica de modo a que a *sandwich* ficasse imóvel durante o processo de corte.

Após o posicionamento e já com o desenho no programa iniciou-se a máquina para efetuar os cortes.

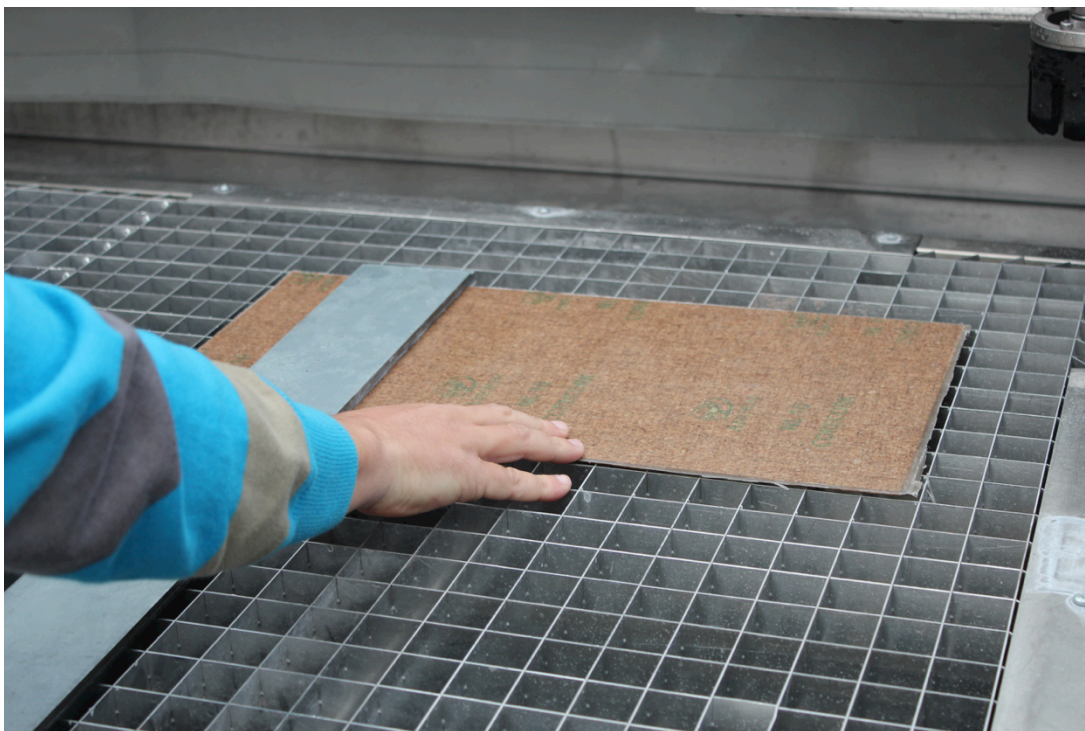


Figura 42 - Posicionamento das placas na mesa da máquina de corte

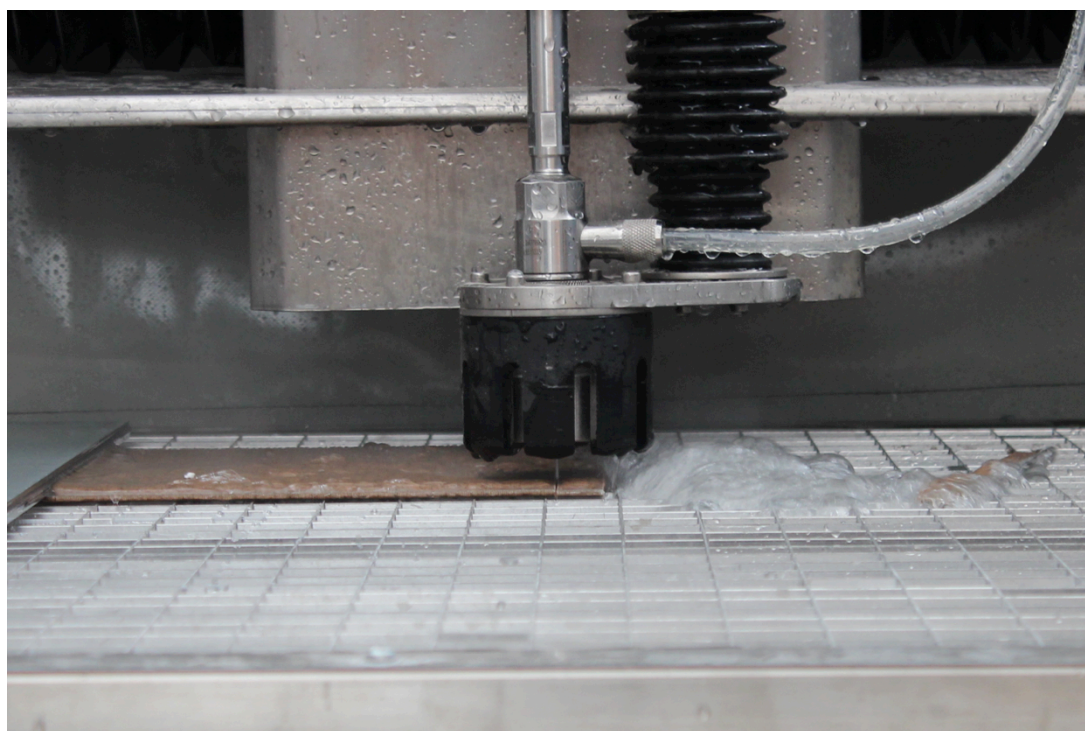


Figura 43 - Máquina de corte por jato de água em funcionamento

O processo de corte requereu atenção e cuidado devido ao pouco peso de cada amostra. Verificaram-se diversas situações onde as amostras acabadas de cortar saltaram para zonas onde a máquina iria passar a seguir e assim, manualmente por via de um bastão, foi necessário retirá-las desse local.



Figura 44 - Marcação individual das amostras

Finalizado o processo de corte das amostras procedeu-se de imediato à marcação individual das amostras de modo a facilitar a sua identificação.

Efetuuou-se também a pesagem das amostras de modo a obter valores de todas as placas quanto ao seu peso. Para isso utilizou-se uma balança de precisão do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica (DEMaC) da Universidade de Aveiro.



Figura 45 - Pesagem individual das amostras

Após a pesagem de três amostras de cada placa efetuou-se a medição do seu comprimento para assim ser possível ter um valor médio de massa por unidade de área. Os valores obtidos após os cálculos estão contemplados na tabela 36 na secção de análise de resultados.

### 3.3 Metodologia

#### 3.3.1 Ensaios de Flexão

A fim de caracterizar a *sandwich* com vista à utilização no *kayak*, optou-se por ensaiar as amostras à flexão. A escolha deste ensaio prende-se com o facto deste ser o esforço mais comum ao qual a embarcação está sujeita em utilização prática e também bastante comum em transporte. Para o ensaio de flexão foi utilizada a máquina de ensaios Shimadzu de 10 kN pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. A velocidade dos ensaios foi a aconselhada na norma utilizada, ASTM C 393, e tem o valor de 6 mm/min. O diâmetro dos rolos dos apoios foi de 8 mm e o do ponto flexor de 10 mm.





Figura 46 - Máquina de ensaios Shimadzu de 10kN

Começou por se ensaiar as cinco amostras da placa número um. Ou seja, fibra vidro 500g + corecork n10 3mm + 2x fibra vidro 200g + resina sika, servindo de parâmetro de comparação para os ensaios seguintes. No final dos cinco primeiros ensaios ficou patente a impossibilidade de validar os resultados através da norma escolhida devido à falha ocorrer no ponto de carregamento, em contacto com o ponto flexor da máquina. Decidiu-se, em todo o caso, avançar com os ensaios do mesmo modo tendo em conta o objetivo deste trabalho ser a comparação do comportamento das várias *sandwiches* perante as mesmas condições.

Prosseguindo com os ensaios, rapidamente ficou provada a maior resistência da amostra 2 em relação à referência, amostra 1. No entanto este facto indicou também um possível sobredimensionamento nos resultados, que aquando da análise de resultados se veio a verificar. Devido a este facto, e também aliando à vantagem em termos de peso decidiu-se fazer uma *sandwich* com fibra de linho menos densa onde se espera que os resultados não sejam tão elevados, mas com o benefício de baixar o peso da embarcação. Conseguir-se assim aproximar a resistência do

material em estudo à resistência do material já utilizado (fibra de vidro).

Como indicado anteriormente, cada amostra apresenta diferentes materiais na face superior e inferior. Aproveitando este facto, optou-se por ensaiar outros cinco provetes de cada amostra, mas desta vez de forma invertida de modo a aferir qual a face mais indicada no exterior e no interior da embarcação. Como esperado, devido às diferenças, os resultados dos ensaios variaram quando os provetes foram ensaiados de modo invertido.

As dimensões dos provetes foram calculadas com base nas restrições previstas na norma utilizada, sendo que nestas se inclui:

Tabela 4 - restrições às dimensões dos provetes

<b>Restrição à largura</b>	$b \geq 2 t$ $b \geq 3 c$	b - largura t - espessura c - núcleo
<b>Restrição ao vão</b>	$S \leq \frac{2 k \sigma t}{F_s}$	S - vão k - 1,3
<b>Restrição à tensão de corte</b>	$F_s \leq \frac{2 k \sigma t}{S}$	$\sigma$ - resistência da face $F_s$ - resistência do núcleo

Partindo de um vão de comprimento de duzentos milímetros ( $S=200$ ), por fim tomaram-se então como valores:

Tabela 5 - Valores das dimensões dos provetes

<b>b [mm]</b>	20
<b>S [mm]</b>	200
<b>F<sub>s</sub> [MPa]</b>	0,9

### 3.3.2 Ensaios de Impacto

Tendo em conta os esforços mais comuns aos quais uma embarcação do tipo *kayak* está sujeita, considerou-se de extremo relevo o ensaio das *sandwiches* em condições de impacto. Pensando na vida útil da embarcação, os impactos passíveis de ocorrer não serão em utilização prática mas sim em transporte ou acondicionamento. Tendo em conta este facto, o ensaio do tipo *Charpy* considerou-se o mais indicado sendo que consiste num pêndulo com uma certa massa e atinge o corpo de prova com uma velocidade determinada previamente. Como tal levaram-se a cabo estes ensaios nas instalações da ESAN com a máquina da figura 46.

Sendo que o objetivo desta tese prende-se com o facto de testar uma *sandwich* passível de aplicação em embarcações do tipo *kayak*, os ensaios a realizar terão de ser realizados em zonas de verdadeiro impacto em situações reais. Assim, e porque as normas de ensaio *Charpy* prevêm um impacto lateral e não na zona das faces, optou-se por se adaptar todo o processo e layout da máquina para este fim.

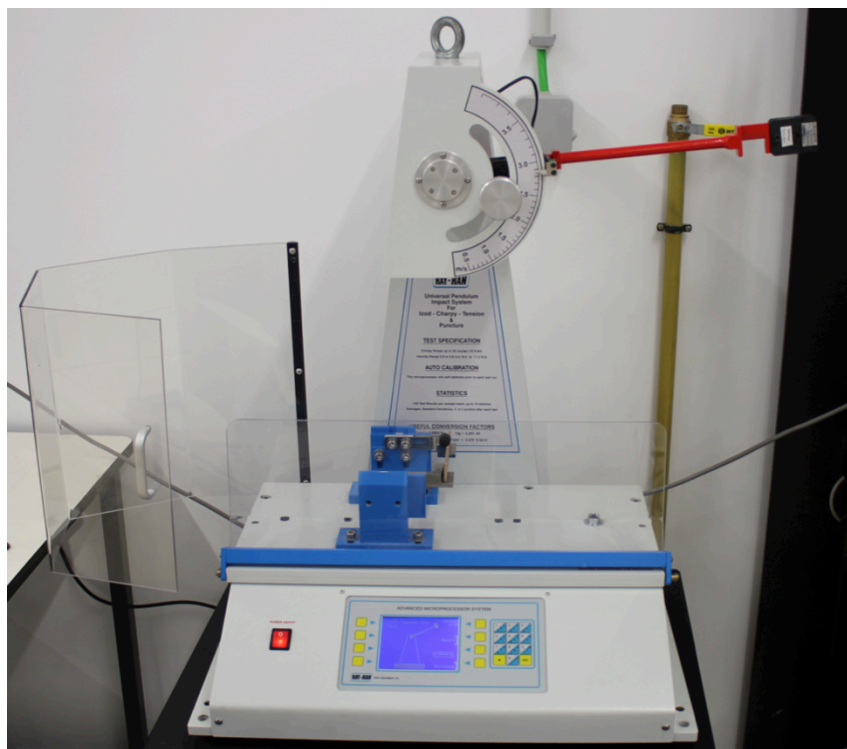


Figura 47 - Máquina de ensaios de impacto Ray-Ran XX/IMT

Nesta máquina foram realizados dois ensaios do tipo *Charpy* com pêndulos distintos. O primeiro com uma massa de 0,476 kg e o segundo com uma massa de 0,119 kg. Isto serve para verificar o modo de comportamento das *sandwiches* perante duas situações de impacto diferentes. As condições de teste foram iguais para os dois ensaios sendo ambas realizadas à temperatura ambiente na sala de ensaios e com a mesma velocidade, 2,9 m/s.



Figura 48 - Braços destinados aos ensaios de impacto



Figura 49 - Pormenor das características dos braços de impacto

Após a montagem do braço de ensaio na máquina procedeu-se à fixação à altura prevista para a velocidade de impacto desejada (2,9 m/s) e ao posicionamento dos apoios dos provetes com a medida standard de 6 cm. Esta medida permite a qualquer dos braços efetuar o impacto e de seguida continuar em frente não embatendo com nenhum dos apoios da máquina.

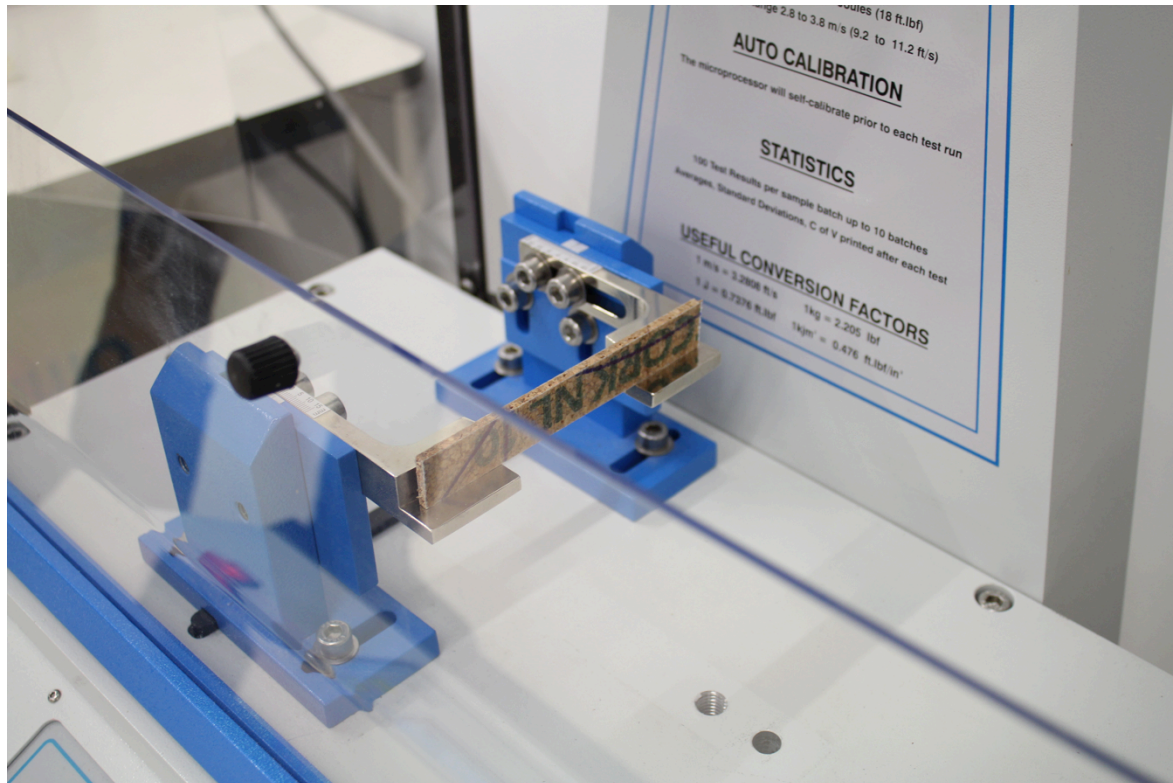


Figura 50 - Posicionamento da amostra a ensaiar

Tendo todo o processo pronto deu-se então início aos ensaios. Foram realizados, à semelhança dos ensaios de flexão, cinco ensaios para cada placa e ainda, para as placas 1, 2, 3 e 4 os ensaios invertidos devido às diferentes densidades das faces. Ao todo foram ensaiados cem provetes, cinquenta com cada pêndulo. Aquando dos ensaios de impacto tentou-se a adaptação dos provetes já existentes destinados à flexão. Assim e aliado ao facto da largura dos provetes de flexão (20 mm) ser própria à zona de impacto dos pêndulos, optou-se por cortar os provetes já existentes com 12 cm de comprimento, mantendo a largura e a espessura inalteradas.



Figura 51 - Separação dos provetes por placas

## 3.4 Resultados Experimentais

---

### 3.4.1 Ensaios de Flexão

---

A fim de avaliar e comparar a resistência de cada *sandwich* perante as mesmas condições de ensaio, é importante perceber quais os modos de falha obtidos aquando dos ensaios e se estes se podem enquadrar num padrão. É essencial perceber se uma *sandwich* quebra mais facilmente na face à tração ou na face à compressão, assim como a existência ou não de delaminação, tendo em conta a sua aplicação final. A figura 52 mostra dois ensaios típicos de provetes retirados das placas 1 e 2 na posição de carga máxima, onde é visível a clara diferença de capacidade de deformação.

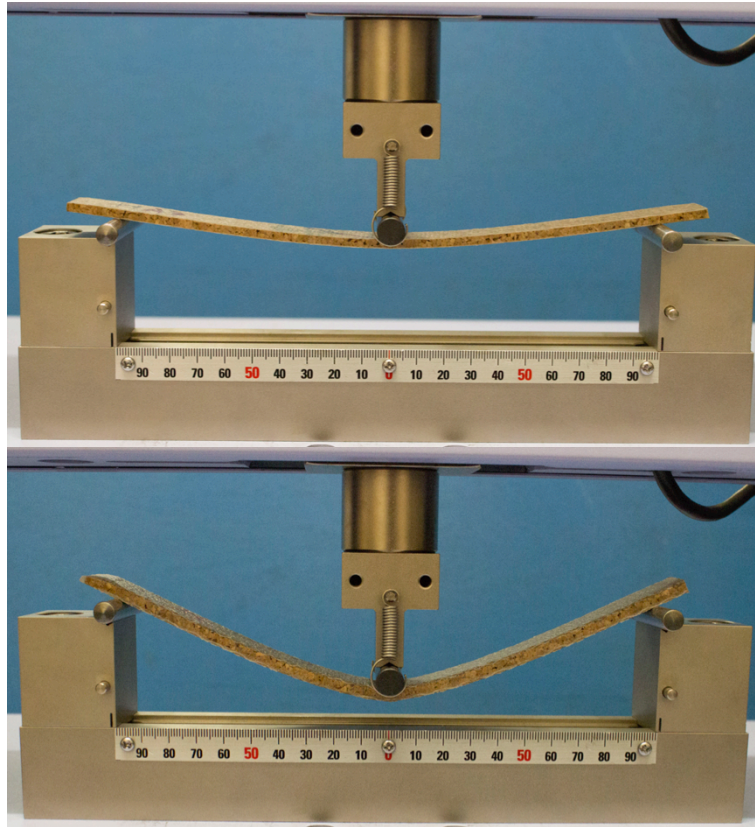


Figura 52 - Deslocamento máximo da placa 1 (em cima) e placa 2 (em baixo)

Apesar da norma ASTM C393 prever a determinação de propriedades mecânicas como a tensão de corte do núcleo e as tensões de tração e compressão das faces, neste trabalho pretende-se apenas definir qual o comportamento das diferentes amostras em termos de resistência à flexão. Sendo que essa avaliação deve ser feita à *sandwich* como um todo, optou-se por não se calcular estes parâmetros. Assim, os gráficos interpretados foram apenas os de Carga – Deslocamento. Com estes é possível determinar a flecha máxima sem rotura e ainda a carga necessária para atingir a rotura de uma face.

É de salientar que alguns provetes não eram simétricos em relação ao seu núcleo pelo que se efetuaram ensaios com carregamento nas duas faces. As placas 5 e 6, tendo faces iguais, apenas foram testadas em posição normal pelo que os seus dados apenas são apresentados na secção relativa à posição normal.

O processo de fabrico das placas deu origem a acabamentos distintos nos dois lados: (i) face rugosa do lado do saco de vácuo e; (ii) face lisa do lado da mesa.



Nos ensaios designados por posição “normal” os provetes tinham a face lisa apoiada no rolo de carregamento (virado para cima) e a face lisa nos apoios inferiores, enquanto os “invertidos” se posicionaram de forma oposta. Foram ensaiadas cinco provetes de cada tipo e posição de ensaio com um total de cinquenta amostra à flexão em três pontos.

Nos provetes testados surgiram três modos de falha: (i) indentação na face de carregamento, provavelmente devido à penetração do rolo na face da estrutura, com esmagamento localizado e (ii) rotura da face oposta ao carregamento, por tensões de tração (figura 53).



Figura 53 - Falha da face (em cima) e indentação (em baixo)

Os modos de falha dos vários provetes testados encontram-se resumidos na tabela 1. É notório que a falha se deu predominantemente no local do rolo de carregamento, facto que indicia que o provete suportaria uma carga superior desde que o rolo fosse de diâmetro superior ou tivesse sido usado um aplicador plano. No entanto, sendo o objetivo escolher as diferentes faces para o interior e exterior da embarcação, o método usado pode ser o adequado.

Tabela 6 - Percentagens de falha na face de carga e na face oposta

Placa	Lado do carregamento	Rotura na face de carga	Rotura na face oposta ao carregamento	Nenhum
1	Normal	100%		
	Invertido	100%		
2	Normal	80%	20%	
	Invertido		40%	60%
3	Normal	60%	40%	
	Invertido	100%		
4	Normal	20%		80%
	Invertido			
5		20%		80%
6				100%

As figuras 54 - 59 mostram as curvas força-deslocamento de provetes testados na designada posição normal, onde é notória a diferença de características mecânicas das placas. De facto, o gráfico apresentado na figura 60, que resume os valores de carga máximo e deslocamento nesse ponto, mostra uma clara tendência de aumento de carga quando aumenta também a densidade das fibras utilizadas.

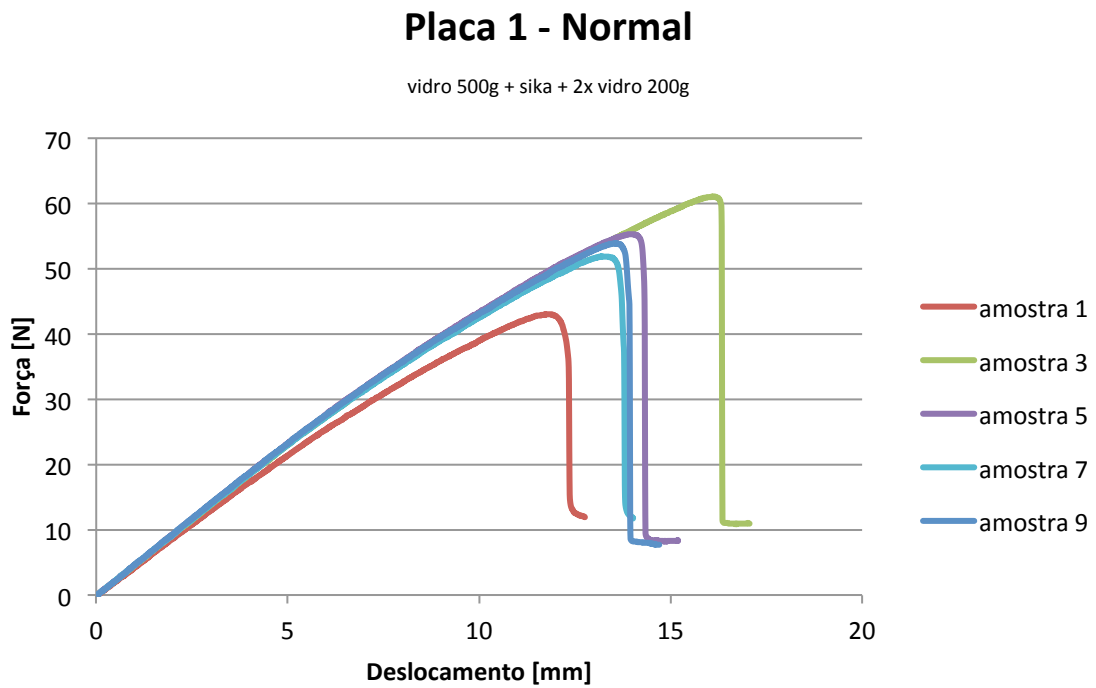


Figura 54 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 1

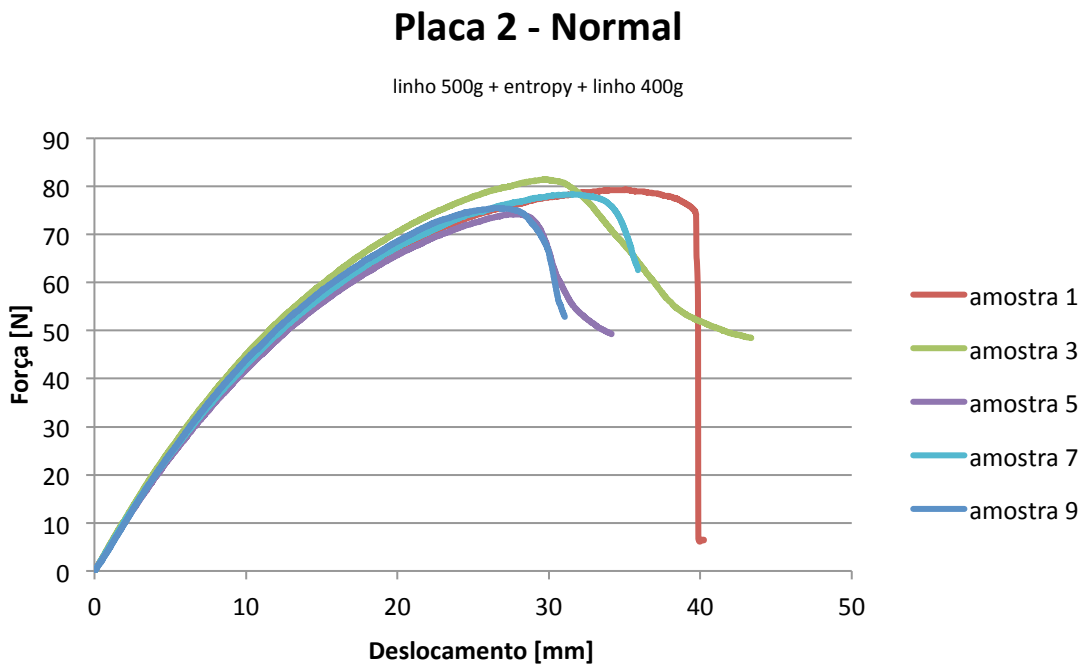


Figura 55 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 2

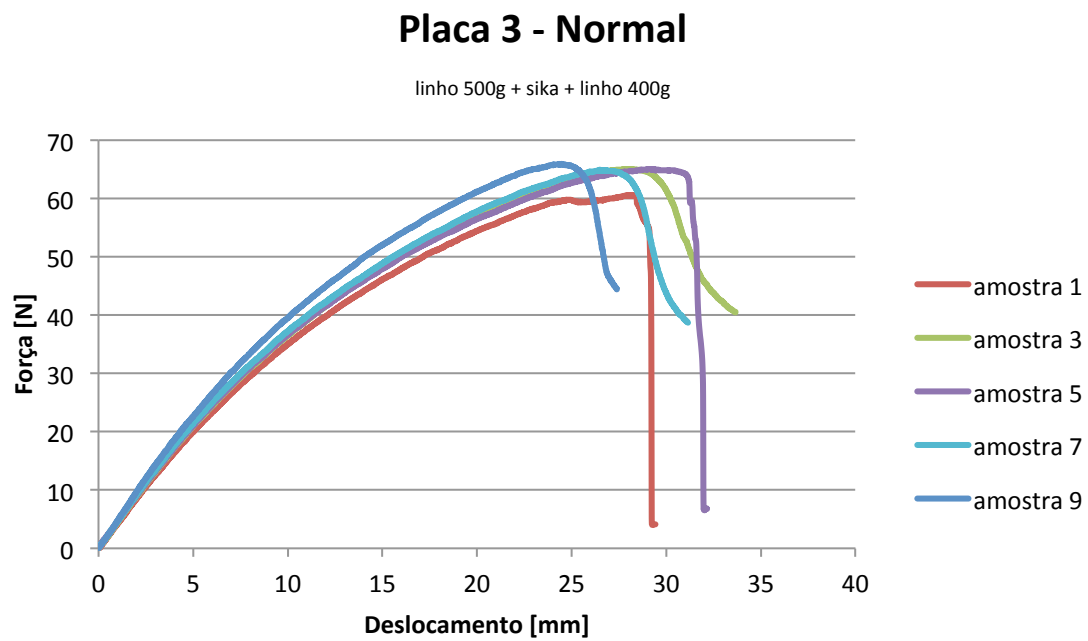


Figura 56 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 3

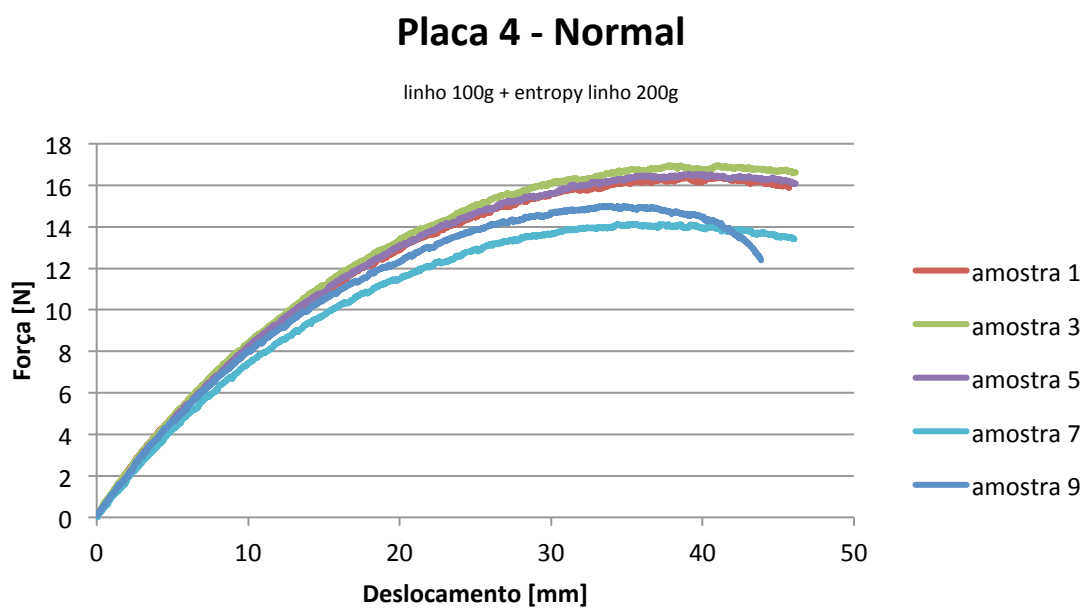


Figura 57 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 4

### Placa 5

linho 200g + entropy + linho 200g

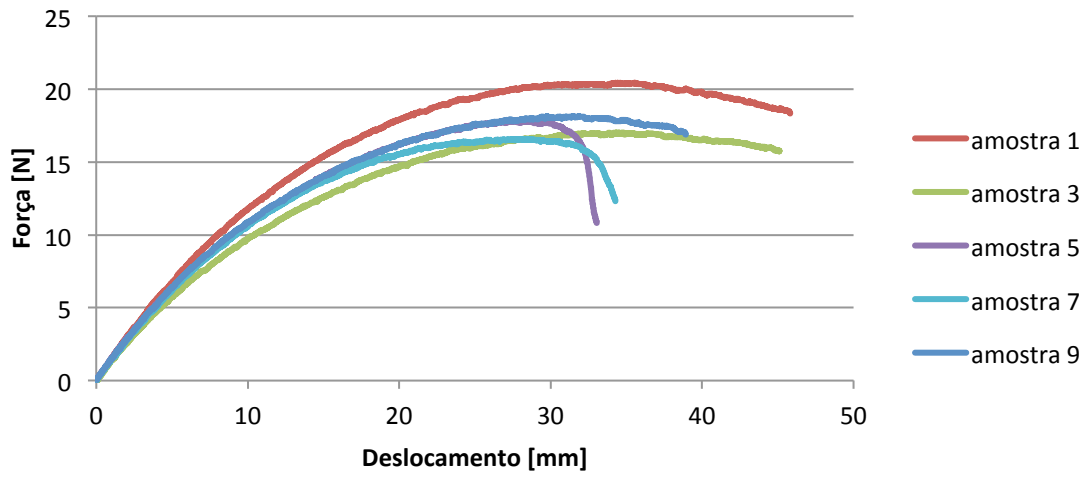


Figura 58 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 5

### Placa 6

linho 100g + entropy + linho 100g

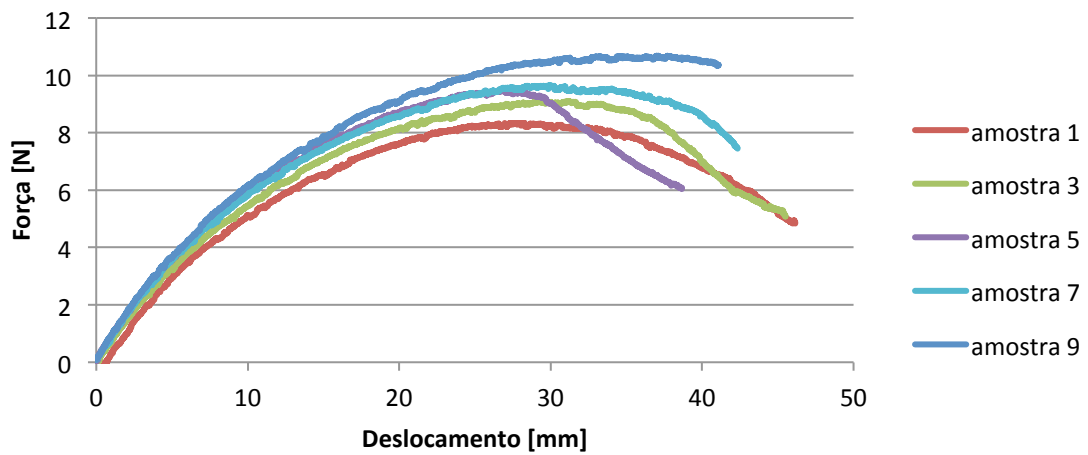


Figura 59 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 6

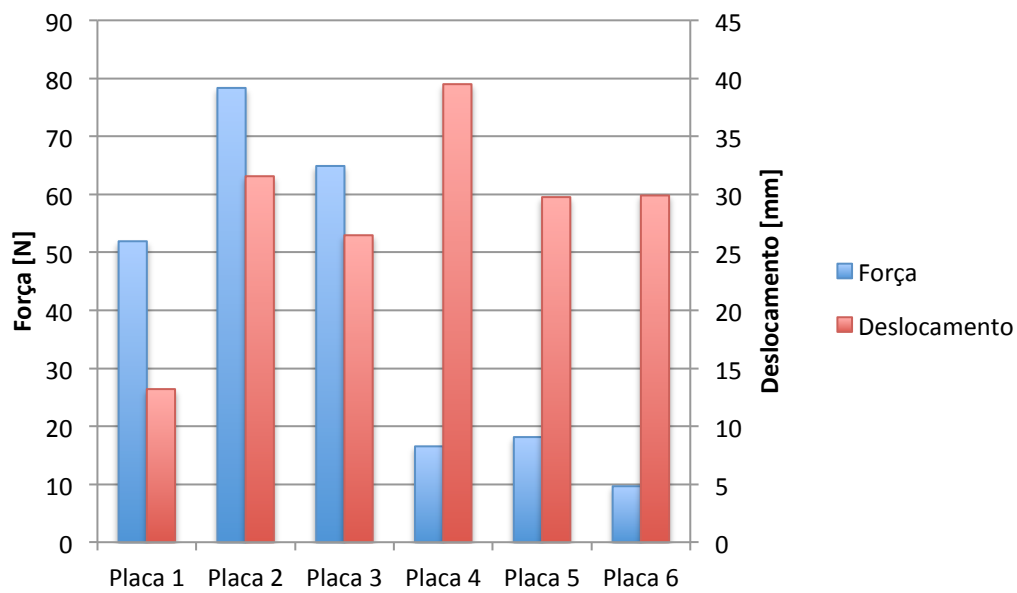


Figura 60 - Resumo da carga máxima e deslocamento correspondente em posição normal das placas submetidas à flexão

As figuras 61-64 mostram agora os resultados força-deslocamento dos provetes ensaiados na posição invertida. De modo igual, é notório que os provetes tiveram comportamentos substancialmente diferentes entre si como é visível por exemplo na figura 65.

### Placa 1 - Invertido

vidro 500g + sika + 2x vidro 200g

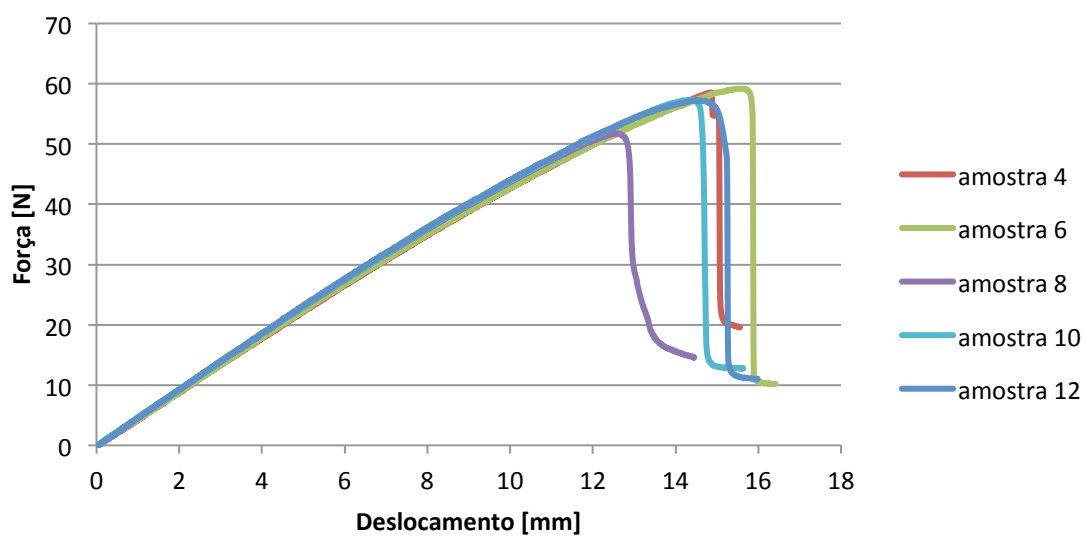


Figura 61 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 1 em posição invertida

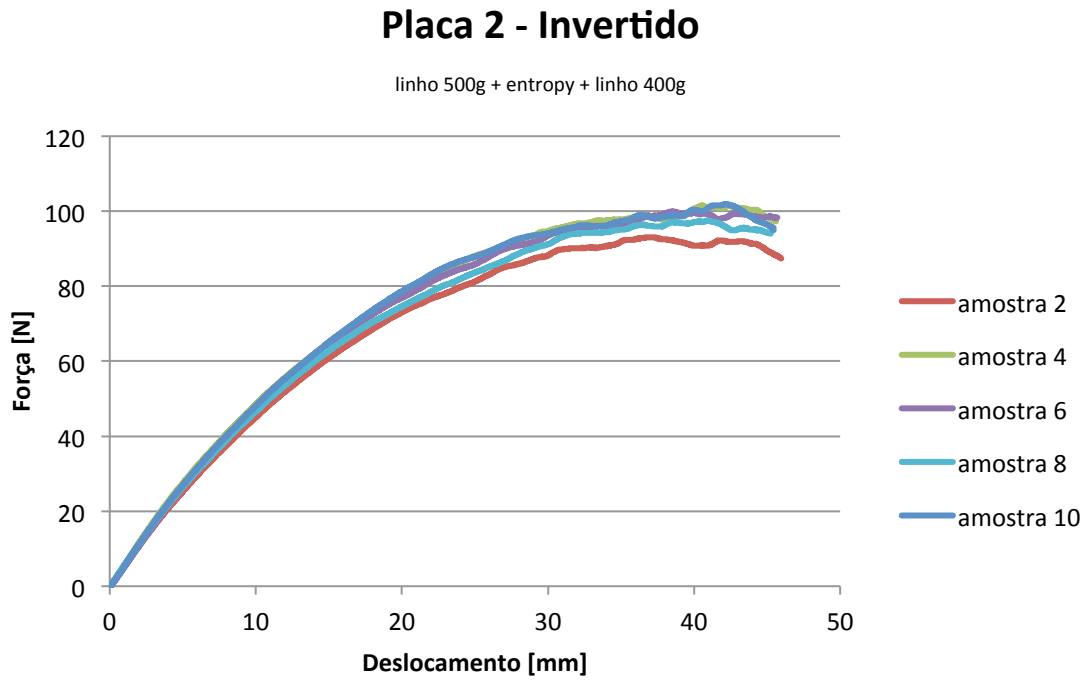


Figura 62 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 2 em posição invertida

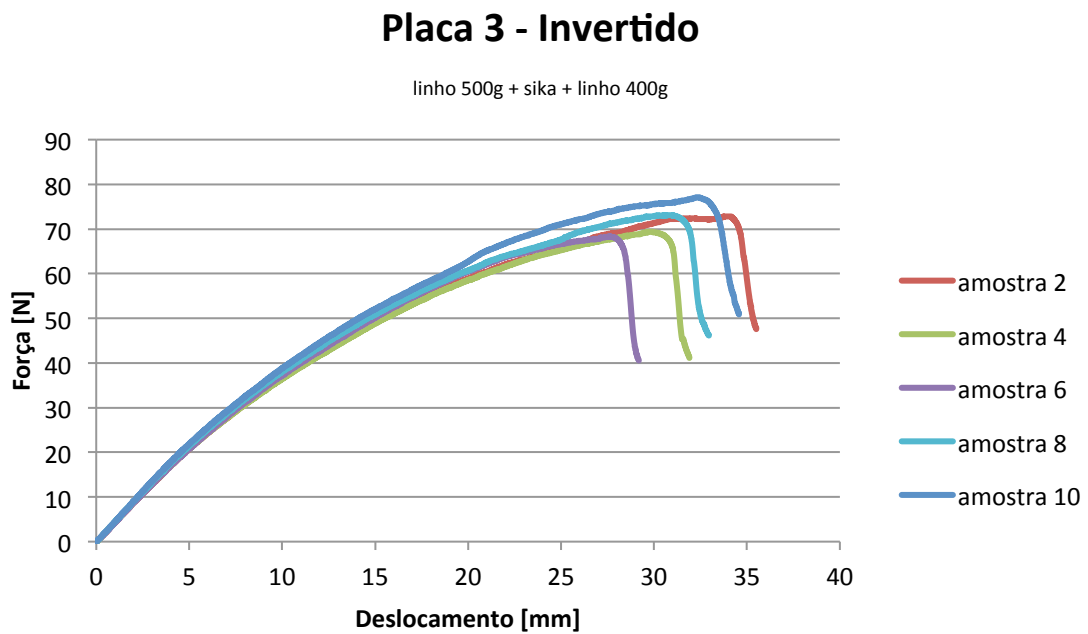


Figura 63 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 3 em posição invertida

### Placa 4 - Invertido

linho 100g + entropy + linho 200g

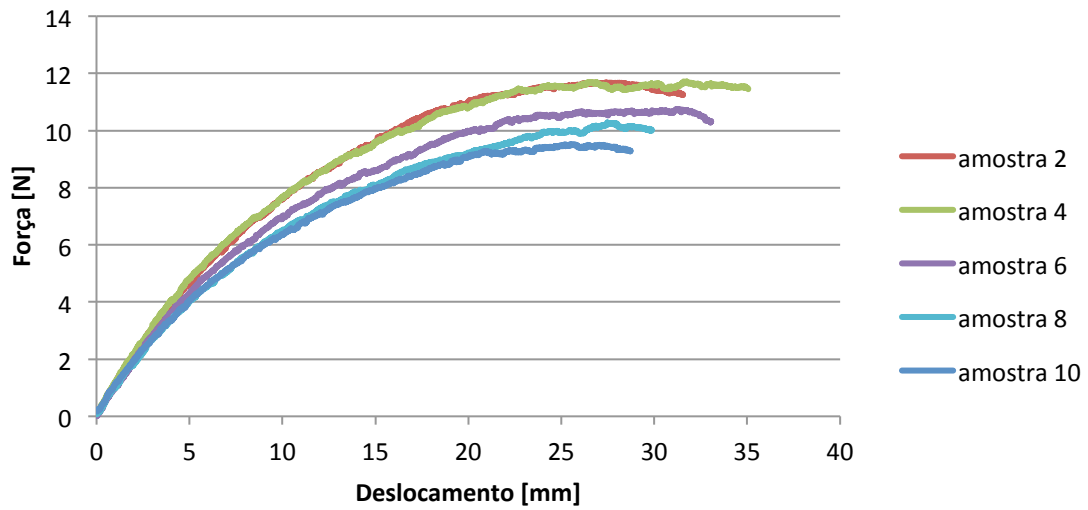


Figura 64 - Gráfico dos ensaios de flexão da placa 4 em posição invertida

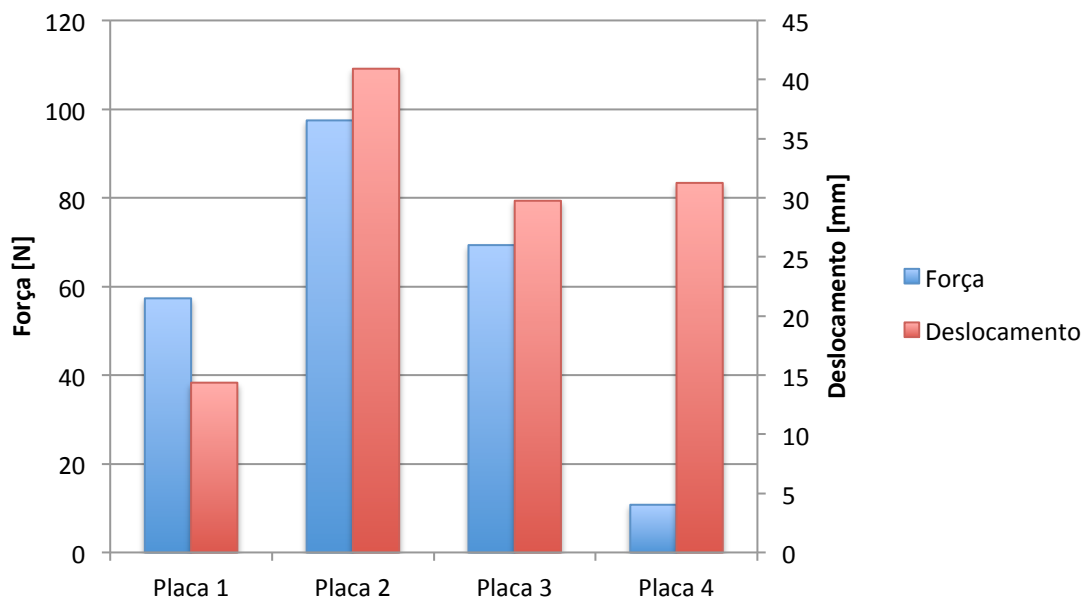


Figura 65 - Resumo da carga máxima e deslocamento correspondente em posição invertida



### 3.4.2 Ensaios de Impacto

Ao contrário da largura, que é igual e de valor 20mm para todos os provetes, a espessura difere por culpa das diferentes faces. Assim, efetuou-se a medição das espessuras e obtiveram-se os seguintes valores médios:

Tabela 7 - Espessura média das placas *sandwich*

Placa	Espessura [mm]
1 vidro 500g + sika + 2x vidro 200g	4
2 linho 500g + entropy + linho 400g	5
3 linho 500g + sika + linho 400g	5
4 linho 100g + entropy + linho 200g	4
5 linho 200g + entropy + linho 200g	4
6 linho 100g + entropy + linho 100g	4

À semelhança do que foi apresentado na secção anterior, também em relação aos ensaios de impacto foi feita uma análise macroscópica ao modo de fratura dos provetes.

Na tabela apresenta-se o levantamento dos diferentes modos de falha obtidos aquando dos ensaios de impacto utilizando o braço de impacto com a massa de 0,476 kg. Com este braço foram ensaiados um total de cinquenta amostras ao impacto.

Tabela 8 - Percentagens de falha na face de carga e na face oposta

Placa	Lado do carregamento	Rotura na face de carga	Rotura na face oposta ao carregamento	Delaminagem	Nenhum
1	Normal	80%		20%	
	Invertido	20%	80%		
2	Normal	60%	40%		
	Invertido	20%	20%		60%
3	Normal	100%			
	Invertido	20%	80%		
4	Normal				
	Invertido				
5			100%		
6		20%	80%		

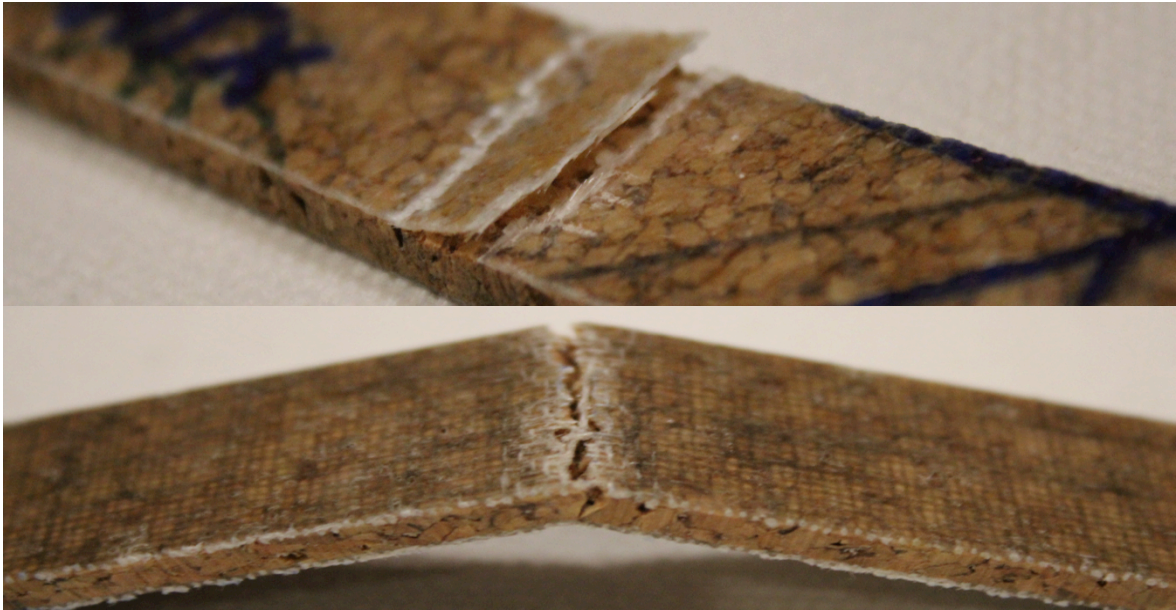


Figura 66 - Delaminagem (em cima) e Falha da face (em baixo)

Já com o braço de impacto de massa 0,119 kg os modos de falha obtidos foram, ao contrário do que sucedeu com o braço de maior massa, todos muito idênticos. Ou seja, sendo que o braço apresenta uma menor energia de impacto, a marca deixada em cada provete provou a sua resistência perante um ensaio menos energético. Com este braço foram também ensaiados um total de cinquenta amostras, no entanto os seus valores não serão apresentados ou analisados tendo em conta a ausência de teor prático pela falta de quebra dos provetes.

Apresentam-se agora os resultados obtidos aquando dos ensaios de impacto do tipo *Charpy* com o braço de massa 0,476 kg para a posição normal. As placas 5 e 6, tendo faces iguais, apenas foram testadas em posição normal pelo que os seus dados apenas são apresentados na secção relativa à posição normal. Nas tabelas de dados são apresentados os valores de resistência ao impacto lidos pela máquina de ensaios (em  $\text{kJ/m}^2$  e também o valor de energia absorvida associado (em J), calculado através da seguinte fórmula presente na norma ISO 179.

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h b} \cdot 10^3$$

$a_{cU}$  - resistência ao impacto

$E_c$  - energia absorvida

$h$  - espessura do provete

$b$  - largura do provete

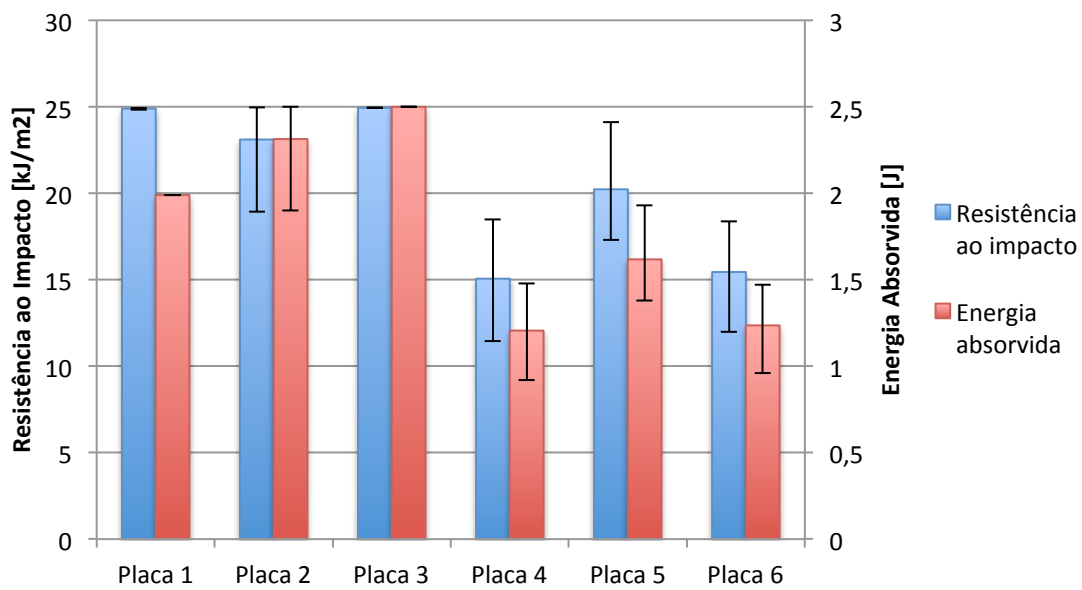


Figura 67 - Valores médios e intervalos de dispersão da resistência ao impacto em posição normal

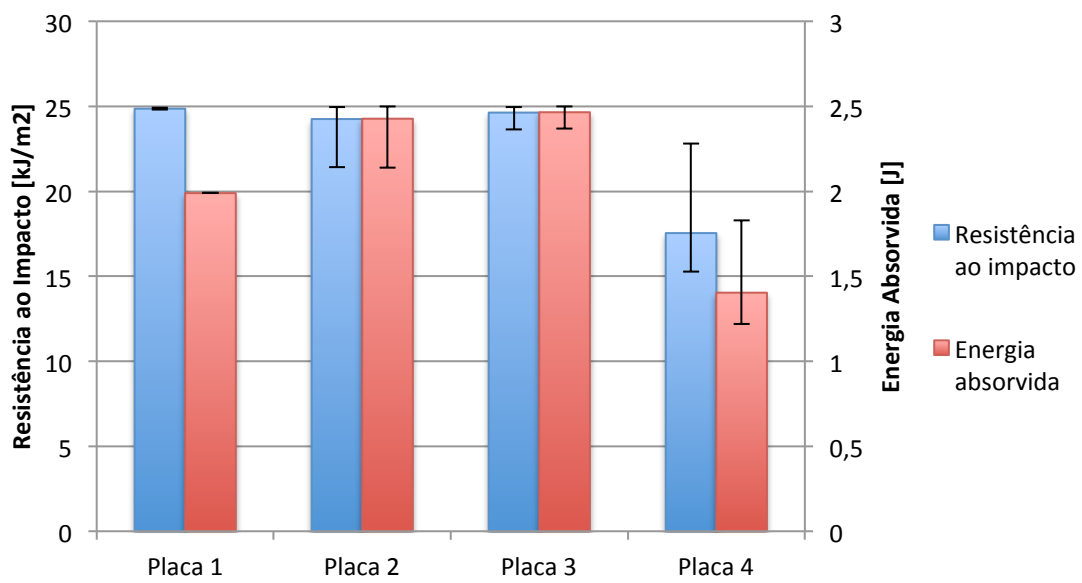


Figura 68 - Valores médios e intervalos de dispersão da resistência ao impacto em posição invertida

---

# Capítulo 4

---

## Avaliação de Resultados

---



## 4. Avaliação de Resultados

### 4.1 Análise de Resultados

---

Tendo em conta o intuito desta tese e as conclusões que se pretendem inferir, a análise dos resultados dos ensaios de flexão e impacto seguem uma linha comparativa a fim de se concluir a melhor performance de uma *sandwich* relativamente a outra.

Havendo placas diferenciadas pelos componentes é possível a análise de vários fatores que têm, ou podem ter, influência no desempenho das *sandwiches*. Assim esta análise de resultados inclui:

- estudo às diferentes faces presentes numa *sandwich*;
- estudo às duas resinas utilizadas;
- estudo às placas ecológicas;
- análise de peso;
- análise de custo.

Com estas comparações será possível, na secção seguinte, obter conclusões acerca da *sandwich* mais e menos vantajosa de cada análise.

Relativamente aos ensaios de impacto e porque o braço de massa menor não quebrou nenhuma amostra, nesta secção apenas são considerados os ensaios com o braço de massa maior.

Tendo as *sandwiches* diferentes faces, é possível efetuar uma análise de modo a verificar qual a face mais resistente quer à flexão quer ao impacto. De um modo simplista esta análise permite avaliar as mantas utilizadas como material das faces. Convém ressaltar o facto de nesta análise apenas serem tomadas em conta as *sandwiches* com faces diferentes não incluindo, portanto, as *sandwiches* 5 e 6.

Na figura seguinte condensam-se os gráficos Força – Deslocamento para cada um dos casos em análise. Para tal, usa-se a amostra mais representativa de cada caso.

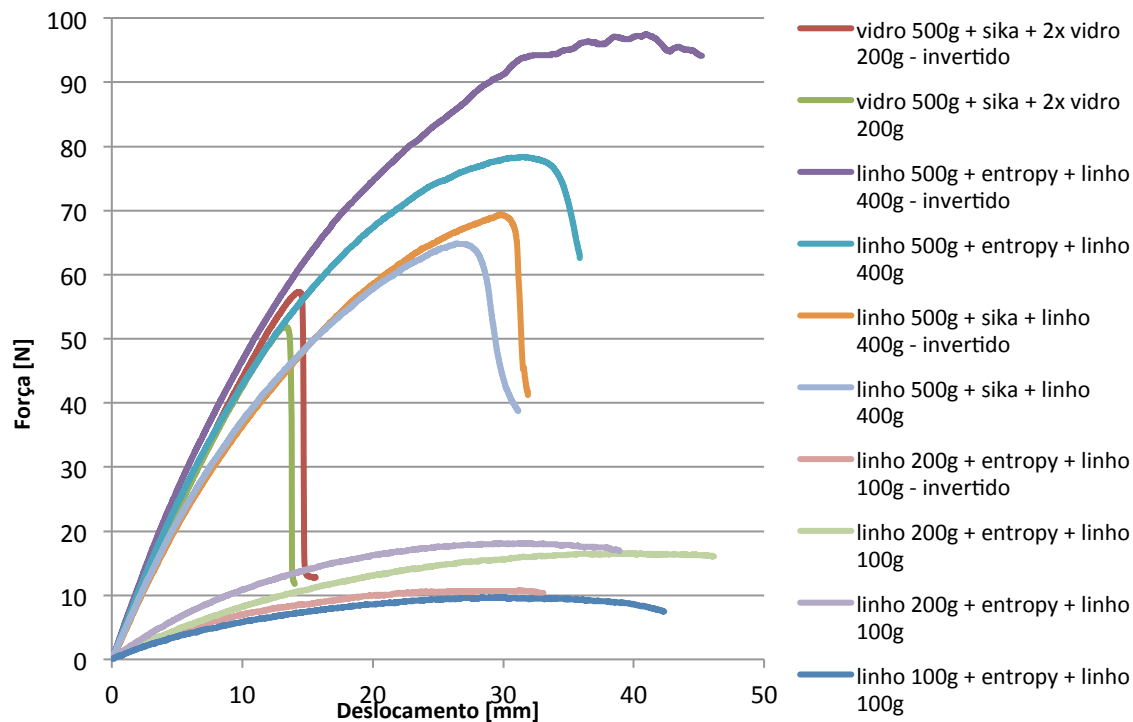


Figura 69 - Gráfico Força-Deslocamento de todas as placas

Pelo gráfico comparativo acima é possível comparar todas as curvas representativas das placas. Assim, acerca da placa 1 é possível verificar a maior resistência à flexão por parte da amostra testada em posição invertida. É no entanto notória a pouca diferença entre os dois valores máximos sendo que em termos de força apenas diferem cerca de 5 N e de deslocamento apenas 1mm. Em relação à placa 2 é visível uma grande diferença no comportamento das duas amostras sendo que o modo de falha é muito distinto. Pela trajetória da curva do ensaio em posição normal observa-se que esta atinge o valor máximo de carga e de seguida o provete falha de forma abrupta, enquanto no ensaio invertido vão ocorrendo pequenas falhas provenientes, provavelmente, de sucessivas quebras de fibras das suas faces. Em termos de valores máximos a diferença não é muito significativa tendo uma separação de aproximadamente 10 N e cerca de 10 mm.

Observando o gráfico acima rapidamente se conclui a grande semelhança entre as duas curvas da placa 3. A única diferença encontra-se na zona de falha onde a



amostra ensaiada em posição invertida suporta um maior deslocamento e uma maior força do que a amostra ensaiada em posição normal.

A placa 4 é a que demonstra maior diferença entre as faces. Com uma diferença de 6 N no valor de força e de 10 mm no valor de deslocamento esta placa apresenta claramente melhor resistência quando submetida a esforços em posição normal.

De modo a avaliar e analisar os resultados dos ensaios de impacto, toma-se a liberdade de repetir as figuras 67 e 68 para que este processo seja facilitado.

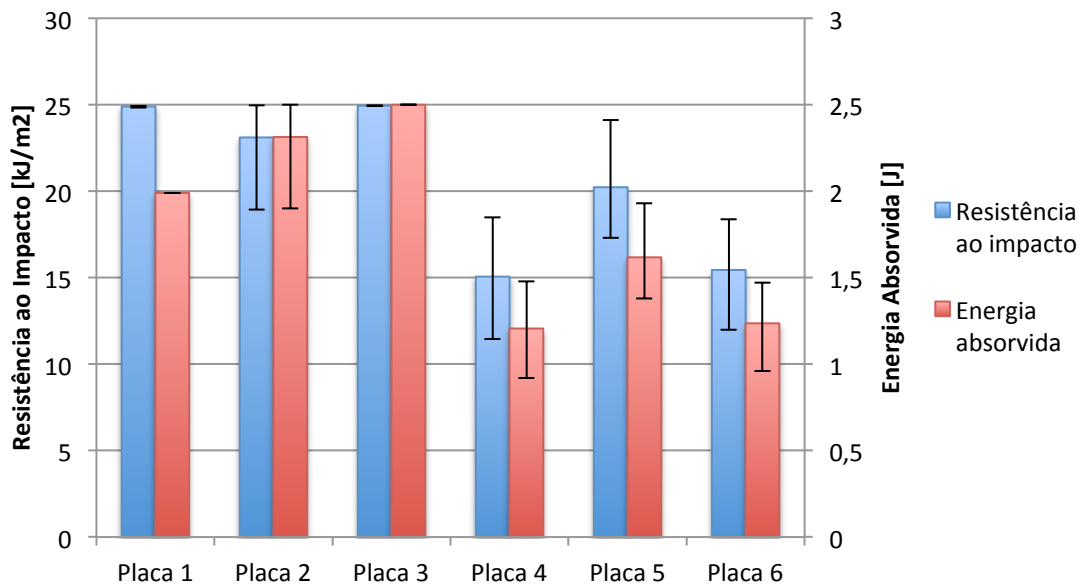


Figura 70 – Repetição da figura 67

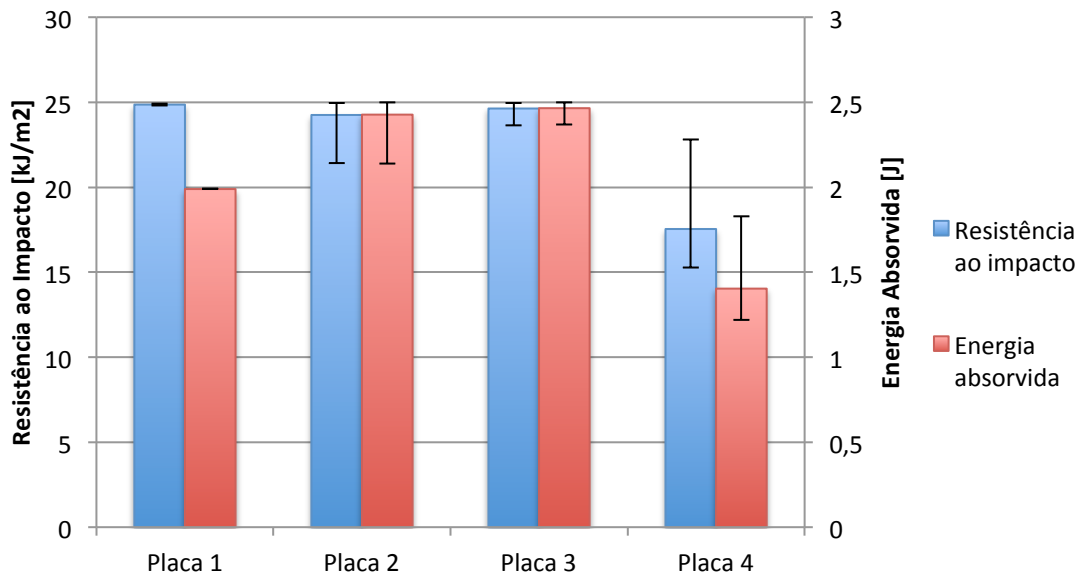


Figura 71 – Repetição da figura 68

Sendo que nenhum provete da placa 1 sofreu quebra aquando dos ensaios, quer em posição normal quanto invertida, considera-se que a energia de 1,99J nos dois casos não é suficiente para causar a falha desta *sandwich*. Demonstra assim um bom comportamento ao impacto. Através da figura 70 e 71 interpreta-se uma grande semelhança entre o comportamento ao impacto das duas faces da placa 2. No entanto em posição normal houve um provete que absorveu menos energia que os restantes o que em todo o caso não é considerado como sendo menos frágil devido ao facto de ser uma situação pontual, não sendo portanto, significativo.

Relativamente à placa 3, percebe-se que ambas as posições desta placa se comportam de igual forma quando submetidas ao impacto do braço de ensaio, não existindo portanto uma diferença apreciável. Quanto à placa 4 o gráfico demonstra uma maior resistência ao impacto por parte das amostras ensaiadas em posição invertida, visto que o valor de energia mais baixo deste ensaio coincide com o valor médio do ensaio em posição normal.

Tendo em conta que as *sandwiches* das placas 2 e 3 apenas diferem no tipo de resina utilizado, é possível avaliar a interferência deste componente no comportamento das placas quando sujeitas a esforços de flexão e impacto. Assim apresentam-se os gráficos de análise relativos aos ensaios das placas 2 e 3.

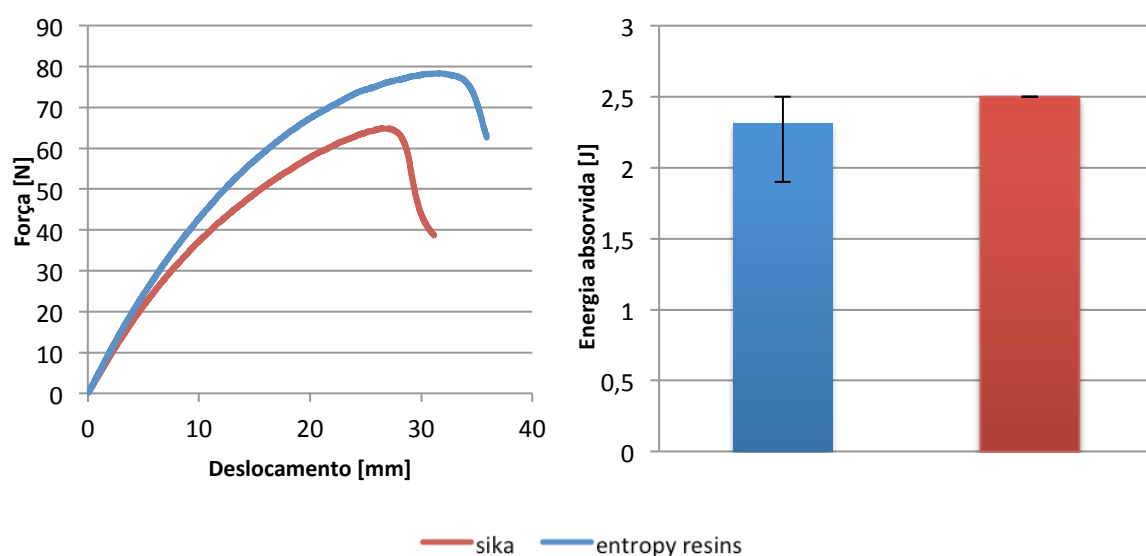


Figura 72 - Gráfico de força - deslocamento e energia absorvida das placas 2 e 3

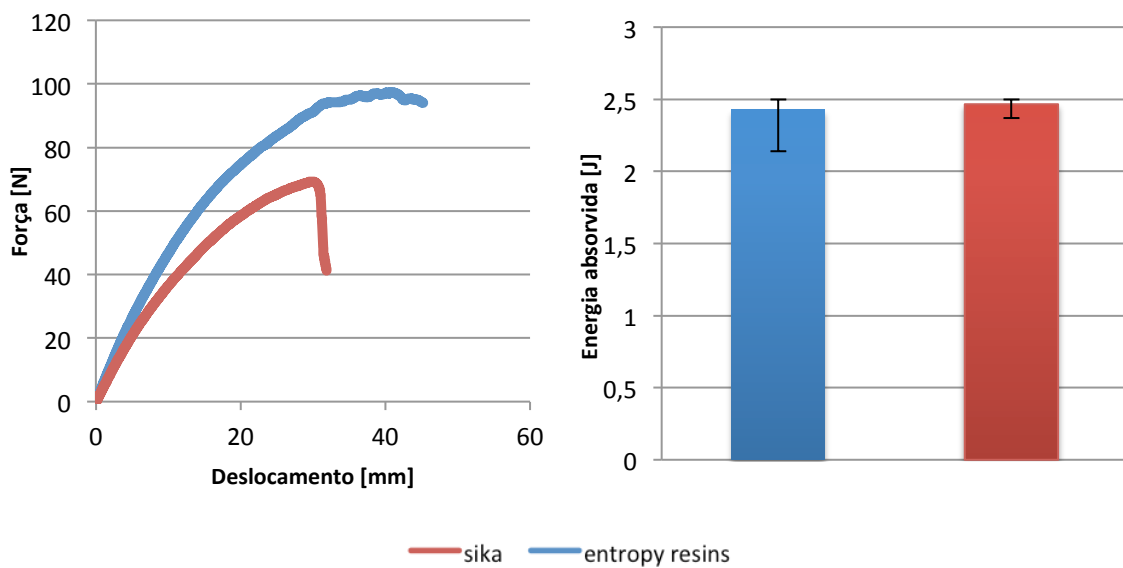


Figura 73 - Gráfico de força - deslocamento e energia absorvida das placas 2 e 3 (invertidas)

Analisando os gráficos acima, é possível entender que a amostra com maior resistência à flexão demonstrou ser aquela pertencente à placa número 2 em qualquer das duas posições ensaiadas. Sendo que em posição normal o modo de falha é idêntico, o mesmo não se passa quando as amostras foram ensaiadas em posição invertida onde o provete da placa com a bioresina não falhou de modo instantâneo, mas sim de modo contínuo.

Relativamente aos ensaios de impacto e avaliando os valores de energia absorvida, percebe-se uma grande semelhança entre estes. Ainda assim, é possível notar uma ligeira vantagem relativa à resina sika. Outra análise possível prende-se com o facto dos valores relativos à placa 2 se terem demonstrado mais oscilantes do que os da placa 3.

De seguida apresenta-se a análise de todas as placas ecológicas.

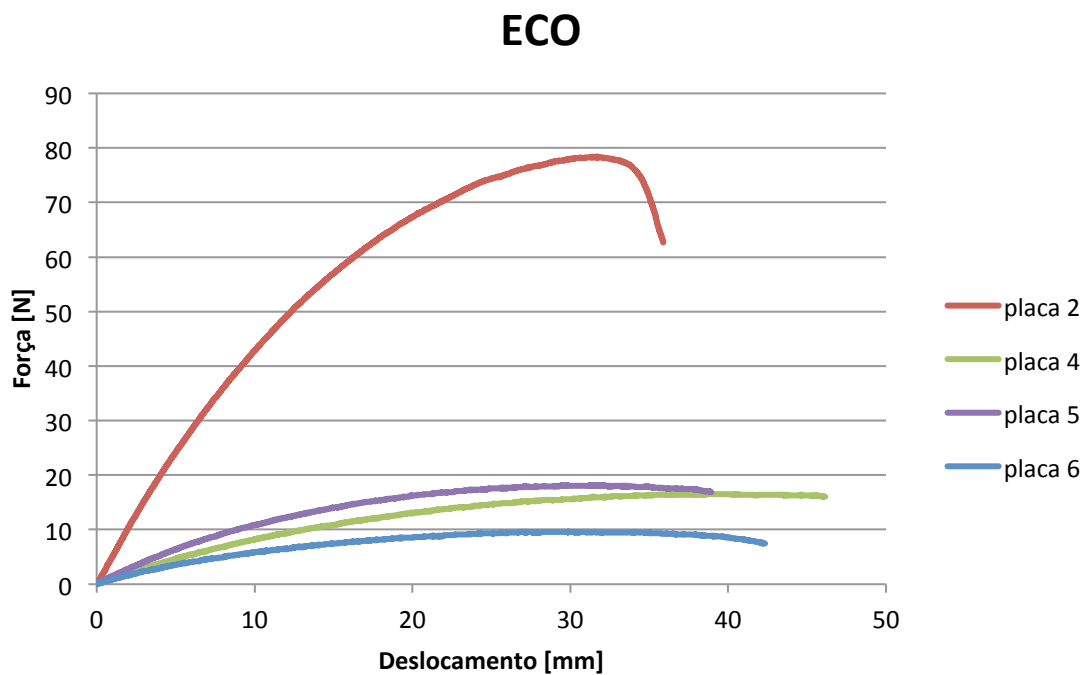


Figura 74 - Gráfico de Força - Deslocamento das placas ECO

Neste gráfico é notória a grande diferença da placa número 2 em termos de força, em relação às restantes. No entanto deve-se ressaltar uma questão. É pertinente referir que a placa 2 tem fibras de densidades 500 g e 400 g, enquanto as restantes apenas dispõem de fibras de 200 g e 100 g. Este facto pode estar na origem da grande disparidade entre a curva relativa à placa 2 e as outras três.

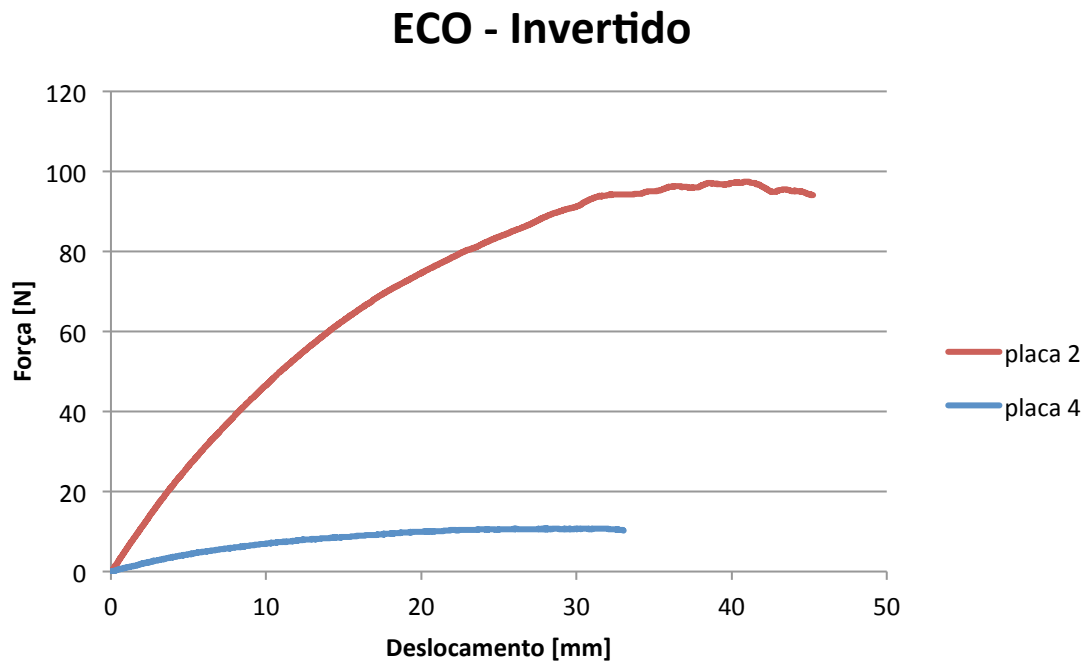


Figura 75 - Gráfico de Força - Deslocamento das placas ECO (invertidas)

Neste gráfico não foram adicionadas as curvas relativas às placas 5 e 6 devido ao facto destas serem simétricas. Assim incorporaram-se apenas as curvas cujas placas têm faces diferentes e por isso comportamentos possivelmente diferentes quando sujeitas a esforços de um dos lados ou do outro. Analisando o gráfico é clara a vantagem da amostra 2 em relação à amostra 4. Mais uma vez se presume como razão principal, o facto da placa 4 ter mantas de densidade muito menor que a placa 2.

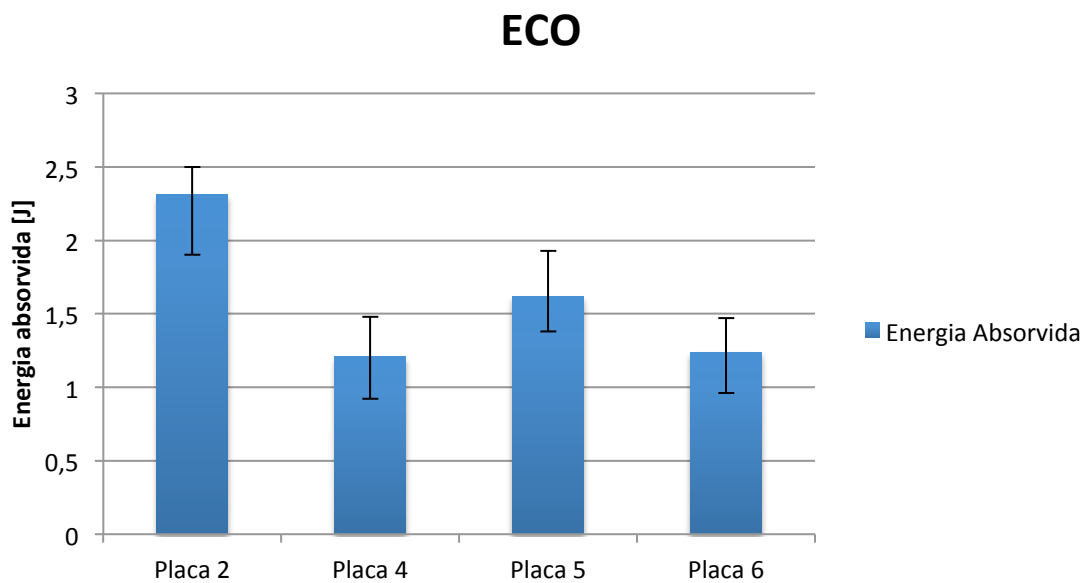


Figura 76 - Gráfico de Energia absorvida das placas ECO

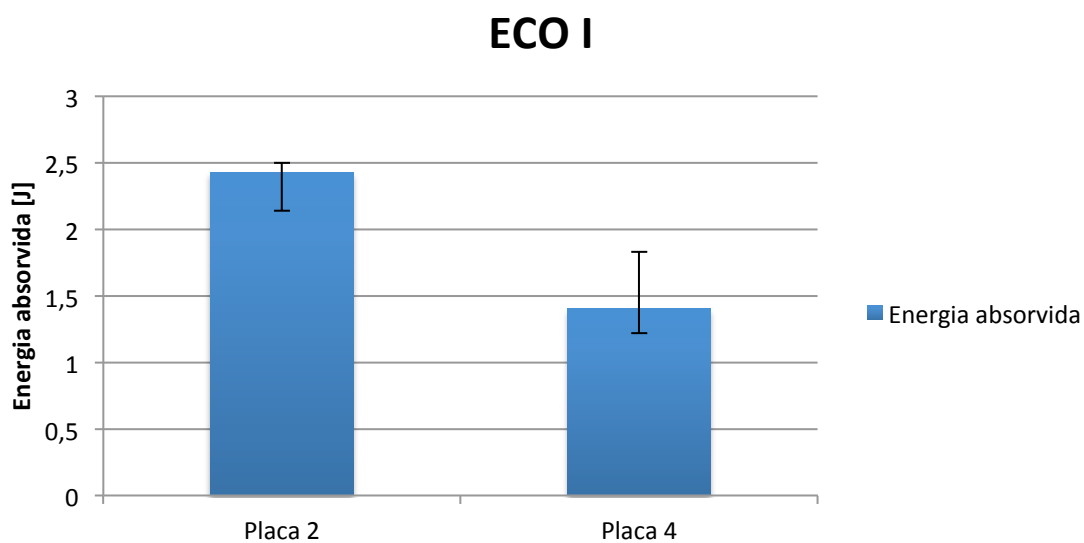


Figura 77 - Gráfico de Energia absorvida das placas ECO (invertidas)

No que diz respeito aos ensaios de impacto os valores demonstram uma tendência paralela ao aumento de densidade das faces. Assim os valores de energia absorvida aumentam com o aumento da densidade. Caso esta análise fosse completamente decisiva, interessava que as faces tivessem a maior densidade possível. No entanto há dois fatores tremendamente importantes na escolha do material destinado às faces que são o peso da placa e por consequente da embarcação, e também o custo do material que influencia o preço do produto final.

Tabela 9 - Peso médio de 1m<sup>2</sup> de cada placa

	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4	Placa 5	Placa 6
<b>Peso médio por m<sup>2</sup></b>	2,1 kg	3,3 kg	3,0 kg	1,8 kg	2,0 kg	1,6 kg

Os valores apresentados na tabela dizem respeito a 1 m<sup>2</sup>. Tendo em conta a tabela conclui-se que a utilização das placas 4, 5 e 6 significariam uma diminuição do peso do *kayak*. Já as placas 2 e 3 fariam com o peso final da embarcação aumentasse. É relevante referir que os valores apresentados demonstram uma relação quase linear com a densidade das mantas utilizadas o que pode significar, para além do maior peso das mantas, uma maior impregnação de resina quanto mais denso for o tecido.

Sendo o núcleo das *sandwiches* o denominador comum, considerou-se que para efeitos comparativos e de balanço não seria necessária a incorporação do seu valor nesta análise visto que irá ser feita de modo comparativo. Assim apresentam-se os custos dos materiais necessários ao fabrico de uma placa de 0,5 m<sup>2</sup> de cada amostra.

Tabela 10 - Custo médio de 0,5m<sup>2</sup> de cada placa (€)

	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4	Placa 5	Placa 6
<b>Manta Face Superior</b>	1,43 x2	6,81	6,81	3,19	4,37	3,19
<b>Manta face Inferior</b>	1,96	8,57	8,57	4,37	4,37	3,19
<b>Resina</b>	1,88	8	1,88	8	8	8
<b>TOTAL (€)</b>	<b>6,7</b>	<b>23,38</b>	<b>17,26</b>	<b>15,56</b>	<b>16,74</b>	<b>14,38</b>

Para fazer este balanço considerou-se uma quantidade de resina estimada de 1/3 L por cada placa e duas mantas de 0,5m<sup>2</sup> (uma por face).

---

## 4.2 Conclusões

---

A observação dos gráficos individuais das placas permite concluir o modo coerente como decorreram os ensaios. Apesar das muitas dúvidas iniciais devido à pouca informação existente relativa a materiais desta natureza, conseguiram-se resultados satisfatórios e uma análise completa das *sandwiches* produzidas.

Nos dias de hoje é muitas vezes abordada a questão dos materiais naturais e *eco-friendly*. Esta tese avalia de que modo esses materiais têm potencial para rivalizar com os materiais mais enraizados na indústria, visto que inúmeras vezes as vantagens apresentadas por quem os defende apenas têm um sentido abstracto e raramente indicam as vantagens em termos de características ou comportamento mecânico. O objetivo deste trabalho é precisamente a comparação destes materiais com aqueles já utilizados na indústria e para isso as análises feitas dizem respeito aos vários fatores importantes ao fabrico de produtos com estes materiais, quer sejam a nível de propriedades, peso e custo.

As conclusões a retirar deste trabalho passam pela observação dos gráficos e serão aqui apresentadas pela mesma ordem que na secção anterior. Posto isto as primeiras conclusões a retirar dizem respeito à análise de faces onde se consideraram apenas as *sandwiches* com faces diferentes. Assim pela observação dos gráficos das figuras 68-71, conclui-se uma melhor prestação das placas 1, 2 e 3 quando ensaiadas de modo invertido e a placa 4 quando ensaiada em posição normal. Estes factos permitem concluir que as faces mais resistentes têm sempre como material o tecido mais denso. Quanto ao impacto, os resultados são muito semelhantes para as placas 2 e 3 considerando-se insignificantes as diferenças entre as faces. No entanto a placa 4 apresenta um melhor comportamento ao impacto quando submetida de modo invertido, concluindo-se assim que a face mais densa tem um comportamento mais satisfatória que a oposta. Em relação à placa 1, esta foi a que melhores resultados apresentou tendo em conta que nenhum dos provetes quebrou na totalidade absorvendo a totalidade da energia. No entanto há um facto curioso e que permite retirar conclusões. Aquando dos ensaios em posição normal todas as quebras ocorreram na face sujeita ao impacto. Por outro lado os ensaios invertidos quebraram todos a face oposta o que permite concluir a maior



fragilidade da face composta pelo tecido de vidro mais denso e a maior resistência da face constituída pelas duas camadas de tecido menos denso. Este facto é muito importante pois permite concluir a vantagem em ter duas camadas de tecido menos denso sobrepostas, mesmo que a densidade total seja inferior a uma camada de tecido mais denso.

Sendo que a única diferença entre as placas 2 e 3 é a resina utilizada no seu fabrico e tendo em conta os gráficos da secção anterior, conclui-se que à flexão, a resina *eco-friendly* Entropy Resins Super Sap CLR permite melhores resultados do que a resina Sika. Este facto é particularmente interessante por aliar a vantagem ecológica à vantagem mecânica. No que ao impacto diz respeito e apesar da diferença ser muito diminuta, a resina Sika apresenta melhores resultados. Conclui-se assim a maior elasticidade da resina *eco-friendly* quando sujeita à flexão, mas também a maior fragilidade em situações de impacto.

A comparação, quer à flexão quer ao impacto, das placas ECO (2, 4, 5 e 6) demonstrou que quanto maior for a densidade das mantas utilizadas como material de face, melhor é o comportamento à flexão. Assim a placa com maior resistência foi a placa número 2 seguida da placa 5. Esta conclusão, no entanto, deve sempre ter em conta o aumento de peso do produto final pelo aumento da densidade das mantas das faces.

Relativamente ao peso as conclusões que se tiram indicam uma clara vantagem pelo uso das placas 4, 5 e 6 onde a diferença para a placa 1 se situa em, respetivamente, 0,3 kg, 0,1 kg e 0,5 kg. Já a utilização das placas 2 e 3 aumentariam o peso da embarcação, não tendo assim qualquer vantagem quanto à análise de peso. Convém referir que estes valores indicam as diferenças de peso das placas fabricadas, ou seja, placas com medidas de 50cm x 50cm.

Quanto ao custo e por culpa da pouca concorrência associada aos produtos *eco-friendly*, nenhuma das placas é mais vantajosa do que a placa 1. Este facto deve-se em larga escala ao custo da bio-resina, sendo que é 4,3 vezes mais cara que a resina epoxy Sika, mas também ao custo elevado dos tecidos de linho.

Com este estudo pretende-se facilitar a escolha de materiais por parte da indústria interessada, e neste caso particular pela NELO. O desenvolvimento do *kayak* poderá levar em conta todas as análises efectuadas ou apenas algumas, dependendo

do interesse e da relevância acrescentada a cada ponto. Sendo de carácter pessoal e subjectivo não se apresenta, assim, apenas um material como sendo “o melhor”, mas sim os melhores em diferentes campos.

### **4.3 Trabalhos Futuros**

---

Com esta tese iniciou-se um trabalho de índole prática e industrial. A continuidade e posterior desenvolvimento do mesmo considera-se essencial à obtenção de um produto final capaz de satisfazer fabricante e consumidor a nível prático mas com uma visão ecológica inerente. Assim, e mantendo esta visão, é de extremo interesse a obtenção de uma análise de ciclo de vida de cada placa de modo a entender o total impacte ambiental de cada uma das *sandwiches*. Posteriormente e utilizando a melhor *sandwich* em termos globais, a construção de um protótipo a fim de se avaliar de modo dinâmico, em utilização, o seu comportamento torna-se essencial e de fácil apreciação. Fatores como a sensação de conforto e a transmissão de sensações podem ser avaliadas recorrendo a ensaios de vibração da *sandwich* utilizada.

---

# Referências bibliográficas

---



## Referências bibliográficas

---

- [Abdallah et al 2010] Faiza Ben Abdallah, Ridha A Ben Cheikh, Mohamed A Baklouti, Zlatan A Denchev, Antonio M A Cunha, *Effect of surface treatment in cork reinforced composites*, Journal of Polymer Research, Volume 17, July 2010, Pages 519-528
- [Alcântara et al 2013] I. Alcântara, F. Teixeira-Dias, M. Paulino. *Cork composites for the absorption of impact energy*, Composite Structures, Volume 95, January 2013, Pages 16-27
- [Castro et al 2010] Osvaldo Castro, José M. Silva, Tessaleno Devezas, Arlindo Silva, Luís Gil, *Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures*, Materials & Design, Volume 31, Issue 1, January 2010, Pages 425-432
- [Curtis 1997] Curtis H D, *Fundamentals of Aircraft Structural Analysis*, Irwin. Chicago
- [Duigou et al 2011] Antoine Le Duigou, Jean-Marc A Deux, Peter A Davies, Christophe A Baley, *PLLA/Flax Mat/Balsa Bio-Sandwich Manufacture and Mechanical Properties*, Applied Composite Materials, Volume 18, October 2011, Pages 421-438
- [Dweib et al 2004] M.A. Dweib, B. Hu, A. O'Donnell, H.W. Shenton, R.P. Wool, *All natural composite sandwich beams for structural applications*, Composite Structures, Volume 63, Issue 2, February 2004, Pages 147-157
- [Fernandes et al 2013] Emanuel M. Fernandes, Vitor M. Correlo, João F. Mano, Rui L. Reis, *Novel cork-polymer composites reinforced with short natural coconut fibres: Effect of fibre loading and coupling agent addition*, Composites Science and Technology, Volume 78, 1 April 2013, Pages 56-62
- [Fernandes et al 2014] F.A.O. Fernandes, R.J.S. Pascoal, R.J. Alves de Sousa, *Modelling impact response of agglomerated cork*, Materials & Design, Volume 58, June 2014, Pages 499-507
- [Hachemane et al 2013] B. Hachemane, R. Zitoune, B. Bezzazi, C. Bouvet, *Sandwich composites impact and indentation behaviour study*, Composites Part B: Engineering, Volume 51, August 2013, Pages 1-10
- [Kabir et al 2012] M.M. Kabir, H. Wang, K.T. Lau, F. Cardona, T. Aravinthan, *Mechanical properties of chemically-treated hemp fibre*

- reinforced sandwich composites*, Composites Part B: Engineering, Volume 43, Issue 2, March 2012, Pages 159-169
- [Kumar et al 2011] S. Sathis Kumar, M. Milwich, B.L. Deopura, H. Plank, *Finite element analysis of Carbon composite sandwich material with agglomerated Cork core*, Procedia Engineering, Volume 10, 2011, Pages 478-483
- [Petrucci et al 2013] R. Petrucci, C. Santulli, D. Puglia, F. Sarasini, L. Torre, J.M. Kenny, *Mechanical characterisation of hybrid composite laminates based on basalt fibres in combination with flax, hemp and glass fibres manufactured by vacuum infusion*, Materials & Design, Volume 49, August 2013, Pages 728-735
- [Sanchez-Saez et al 2011] S. Sanchez-Saez, E. Barbero, J. Cirne, *Experimental study of agglomerated-cork-cored structures subjected to ballistic impacts*, Materials Letters, Volume 65, Issue 14, 31 July 2011, Pages 2152-2154
- [Shah et al 2013] Darshil U. Shah, Peter J. Schubel, Mike J. Clifford, *Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study*, Composites Part B: Engineering, Volume 52, September 2013, Pages 172-181
- [Soares et al 2011] B. Soares, L. Reis, L. Sousa, *Cork composites and their role in sustainable development*, Procedia Engineering, Volume 10, 2011, Pages 3214-3219
- [Sousa-Martins et al 2013] J. Sousa-Martins, D. Kakogiannis, F. Coghe, B. Reymen, F. Teixeira-Dias, *Behaviour of sandwich structures with cork compound cores subjected to blast waves*, Engineering Structures, Volume 46, January 2013, Pages 140-146
- [Vilela et al 2013] Carla Vilela, Andreia F. Sousa, Carmen S.R. Freire, Armando J.D. Silvestre, Carlos Pascoal Neto, *Novel sustainable composites prepared from cork residues and biopolymers*, Biomass and Bioenergy, Volume 55, August 2013, Pages 148-155
- [Yan et al 2014] Libo Yan, Nawawi Chouw, Krishnan Jayaraman, *Flax fibre and its composites – A review*, Composites Part B: Engineering, Volume 56, January 2014, Pages 296-317
- [Zhu et al 2013] J. Zhu, J. Njuguna, H. Abhyankar, H. Zhu, D. Perreux, F. Thiebaud, D. Chapelle, A. Pizzi, A. Sauget, A. de Larminat, A. Nicollin, *Effect of fibre configurations on mechanical properties of flax/tannin composites*, Industrial Crops and Products, Volume 50, October 2013, Pages 68-76

