

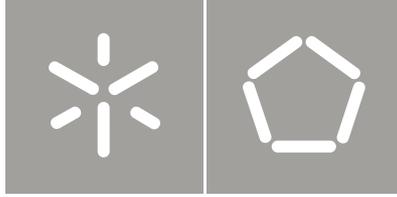


Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Pedro Miguel Fernandes Dias

Derivados de cortiça:  
Caraterização Mecânica e anti-vibratória

Pedro Miguel Fernandes Dias  
Derivados de cortiça:  
Caraterização Mecânica e anti-vibratória



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Pedro Miguel Fernandes Dias

Derivados de cortiça:  
Caraterização Mecânica e anti-vibratória

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Nuno Peixinho  
Professor Doutor José Meireles

Aos meus pais e irmão, e à Lia.

## **AGRADECIMENTOS**

Neste espaço gostaria de expressar a minha enorme gratidão a todas as pessoas que me ajudaram ao longo deste trabalho.

Aos meus orientadores, Professor Doutor José Meireles e Professor Doutor Nuno Peixinho, pelo apoio, pela paciência e pela disponibilidade demonstrada ao longo da realização deste trabalho.

À empresa Novacortiça, pela disponibilização de cortiça nas suas várias formas e informações importantíssimas deste material, imprescindível para a realização dos ensaios.

Ao Sr. Araújo, técnico do laboratório de ensaio de materiais, pela orientação e pela ajuda prestada na realização dos ensaios.

Ao meu Pai e à Dulce pela execução dos instrumentos necessários para a realização dos ensaios.

À Lia que em momentos de menor disposição da minha parte, mostrou-se sempre atenciosa e paciente, e por se demonstrar sempre disponível para me ajudar na escrita deste trabalho.

À minha família, pelo apoio prestado ao longo deste trabalho bem como em todo o meu percurso académico.

E porque este trabalho é o culminar de um percurso, não posso deixar de agradecer aos meus estimados colegas de curso: Carlos Oliveira, César Fernandes, Roberto Soares, José Dias, Pedro Miranda, Vasco Freitas, Tiago Carneiro, José Costa, Rui Mendes, Pedro Cunha e Eduardo Valente.

A todos, o meu sincero muito obrigado.

## **RESUMO**

A cortiça é um tecido vegetal formado de células mortas impregnadas de suberina e que constituem o elemento principal da casca do tronco do sobreiro. Esta árvore cresce na Europa Mediterrânica, sobretudo em Portugal, onde desde sempre assume uma elevada importância nos diversos setores da atividade económica.

A cortiça pode ser utilizada de forma virgem ou sob a forma de alguns derivados; como, o aglomerado branco, o aglomerado negro e o *rubbercork*, todos eles com importantes aplicações sobretudo na construção civil.

Face à importância da cortiça e dos seus derivados para o contexto nacional, é importante conhecer as suas características e compreender o seu comportamento mecânico, sendo que este se caracteriza através de um conjunto de propriedades, resultantes de ensaios mecânicos específicos.

Deste modo, a finalidade deste trabalho é caracterizar a cortiça de forma a contribuir para aumentar o leque de possíveis aplicações futuras deste material. Como tal, os objetivos específicos deste trabalho são: caracterizar o comportamento mecânico da cortiça e caracterizar o comportamento anti-vibratório da cortiça.

Para cumprir estes objetivos utilizou-se como método os ensaios experimentais em laboratório, nomeadamente ensaios de tração, compressão e estudo de vibrações.

Como principais resultados deste trabalho destaca-se; relativamente aos resultados de tração, poder-se-á dizer que a mistura “granulado de cortiça e aglutinante” influencia os valores de tensão de rotura e deformação, e com o aumento da granulometria aumenta a tensão de rotura. Nos resultados de compressão aos granulados destaca-se a ausência da região elástica, característica de muitos outros materiais, no gráfico de tensão-deformação e ainda no ensaio de compressão ao bloco de aglomerado um coeficiente de *Poisson* negativo. Em relação à caracterização de vibrações, alguns dos derivados de cortiça analisados apresentam valores de exposição diária próximos de materiais de referência.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Cortiça, derivados de cortiça, comportamento mecânico e comportamento anti-vibratório.

## **ABSTRACT**

Cork is a plant tissue composed of dead cells impregnated with suberin and constitute the main element of the bark of the cork oak. This tree grows in Mediterranean Europe, particularly in Portugal, where it always assumes high importance in various sectors of economic activity.

Cork can be used as virgin or as some derivatives, such as the white granulated, the black granulated and the rubbercork, all with particularly important applications in construction.

Given the importance of cork and derivatives thereof for the national context, it is important to know the characteristics and understand their mechanical behavior, and that is characterized by a set of properties resulting from specific mechanical tests.

Thus, the purpose of this study is to characterize cork in order to help increase the range of possible future applications of this material. As such, the specific objectives of this study are to characterize the mechanical behavior of cork and characterize its anti-vibrational behavior.

To meet these objectives was used the experimental method in the laboratory, including tensile and compression tests and a vibration study.

The main results of this work are: relatively to the traction it could be said that the mixing "of granulated cork and agglutinant" influences the values of tensile strength and deformation, and with the increasing of particle size increases tension breaking strength. In the results of compression of granulates there isn't elastic region in the stress-strain graph, characteristic in most other materials, in the block compression test can be seen one negative Poisson's ratio. Regarding the characterization of vibrations, some of the derivatives cork analyzed exhibit daily exposure values near reference materials.

## **KEYWORDS**

Cork, cork derivatives, mechanical behavior and anti-vibrational behavior.

## ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	iv
Palavras-Chave .....	iv
Abstract.....	v
Keywords .....	v
Índice .....	vi
Lista de Figuras .....	viii
Lista de Tabelas .....	x
Lista de Símbolos .....	xi
1. Introdução.....	1
2. A cortiça.....	3
2.1. O Setor Corticeiro .....	5
2.1.1. Produção Suberícola .....	5
2.1.2. Indústria Corticeira.....	6
2.1.3. Comercialização.....	7
2.2. Transformação da Cortiça.....	8
2.2.1. Descortiçamento .....	8
2.2.2. Repouso .....	9
2.2.3. Percurso Industrial .....	9
2.3. Características, Estrutura e Composição Química.....	11
2.3.1. Principais características .....	11
2.3.2. Estrutura Macroscópica.....	12
2.3.3. Estrutura Microscópica .....	13
2.3.4. Composição Química .....	15
2.4. Comportamento Mecânico .....	15
2.5. Aplicações da Cortiça .....	18
2.4.1. Rolhas .....	19
2.4.2. Materiais de Construção.....	19
2.4.3. Outras Aplicações .....	22
3. Metodologia Experimental .....	24

3.1. Ensaio de Tração.....	26
3.1.1. Ensaio de Tração – Laminado de Cortiça.....	27
3.2. Ensaio de Compressão .....	28
3.2.1. Ensaio de Compressão – Granulado.....	29
3.2.2. Ensaio de Compressão – Bloco de aglomerado .....	31
3.3. Estudo de Vibrações, Sistema Mão-Braço.....	32
3.3.1. Estudo de Vibrações – Granulado e Laminado de Cortiça.....	35
4. Apresentação e Discussão dos Resultados .....	38
4.1. Ensaio de Tração.....	38
4.2. Ensaio de Compressão – Granulado .....	41
4.3. Ensaio de Compressão – Bloco de aglomerado.....	44
4.4. Estudo de Vibrações .....	48
5. Conclusões e Trabalhos Futuros .....	50
Bibliografia e Referências.....	52
Apêndices.....	54
Apêndice I .....	55
Apêndice II .....	59

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do Montado de sobro na região mediterrânica (à esquerda); Montado de Sobro (à direita). .....	3
Figura 2 – Imagem microscópica de 1664, obtida por Robert Hooke, da cortiça na direção radial (A) e tangencial (B). .....	4
Figura 3 – Área de montado de sobro no território nacional. ....	5
Figura 4 – Exportações portuguesas de 2002 a 2011. ....	7
Figura 5 – Principais produtos à base de cortiça exportados (Milhões de €). ....	8
Figura 6 – Descortiçamento. ....	8
Figura 7 – a) rabaneação; b) brocagem. ....	10
Figura 8 – Granulado Branco – a); Negro – b); e <i>Rubbercork</i> – c). ....	10
Figura 9 – Estrutura macroscópica da cortiça. ....	12
Figura 10 – Representação esquemática de tronco de um sobreiro e células de cortiça, representados os seus eixos. ....	13
Figura 11 – Imagem microscópica de cortiça. ....	13
Figura 12 – Representação esquemática de uma célula de cortiça. ....	14
Figura 13 – Representação esquemática de células de cortiça. ....	14
Figura 14 – Curva de compressão, tensão-deformação, da cortiça. ....	16
Figura 15 – Curvas de tração (tensão-deformação) da cortiça, na radial (R), tangencial (T) e axial (A). ....	17
Figura 16 – Gráfico de seleção de materiais, coeficiente de perda – Módulo de Young. ....	18
Figura 17 – Rolhas de cortiça natural. ....	19
Figura 18 – Aplicações dos aglomerados na construção civil. ....	21
Figura 19 – <i>Kork</i> – capa de segurança para <i>ipad</i> . ....	22
Figura 20 – Aplicação de cortiça em pisos. ....	22
Figura 21 – Junta de cortiça. ....	23
Figura 22 – Utilização de cortiça e seus derivados na decoração e vestuário. ....	23
Figura 23 – Laminados de cortiça: a) Ag1; b) Ag2 e c) Ag3. ....	25
Figura 24 – Granulados de cortiça: a) Gr 3-7; b) Gr 2-3 e c) Gr 1-2. ....	25
Figura 25 – Granulados de cortiça: Gr 0,5-1; Gr negro e Pó. ....	25
Figura 26 – Aglomerado de cortiça – bloco de aglomerado. ....	25
Figura 27 – Representação esquemática de um provete sujeito a tração. ....	26
Figura 28 – Ensaio de tração. ....	27

Figura 29 – Representação esquemática de um provete sujeito a compressão. ....	28
Figura 30 – a) representação esquemática da ferramenta ( <i>SolidWorks</i> ); b) parte do desenho técnico do tubo. ....	29
Figura 31 – Ferramenta de compressão, em <i>SolidWorks</i> a) e durante um ensaio b). ....	30
Figura 32 – Ensaio de compressão - bloco de aglomerado .....	31
Figura 33 – Fenómeno de Raynaud. ....	32
Figura 34 – Sistema de coordenadas <i>standard</i> a utilizar no aperto de dispositivos cilíndricos. ....	33
Figura 35 – Representação esquemática da orientação ortogonal dos acelerómetros. ....	35
Figura 36 – Ensaio de vibrações – laminado de cortiça .....	36
Figura 37 – Bolsa para granulado .....	37
Figura 38 – Curva de tração (Tensão-Extensão) para os diferentes aglomerados de cortiça. ....	38
Figura 39 – Curva de tração e módulo Young para o aglomerado 2 a 3 mm. ....	39
Figura 40 – Curva de tração e módulo de Young para o aglomerado 2 a 3 mm, focando a região elástica. ....	39
Figura 41 – Curva de compressão (Tensão-Deformação) para os diferentes granulados. ....	41
Figura 42 – Curva de compressão (tensão deformação) para os granulados 3 a 7 mm e 2 a 3 mm... ..	42
Figura 43 – Curva de compressão (tensão deformação) para os granulados 1 a 2 mm e 0,5 a 1 mm. ....	42
Figura 44 – Curva de compressão (tensão deformação) para pó e aglomerado negro. ....	42
Figura 45 – Representação esquemática do ensaio à compressão realizado ao cubo de cortiça. ....	44
Figura 46 – Curvas de variação do coeficiente de <i>Poisson</i> – carga aplicada. ....	45
Figura 47 – Curva de compressão (carga - deslocamento) na direção axial. ....	45
Figura 48 – Curva de compressão (carga - deslocamento) na direção transversal. ....	45
Figura 49 – Curva de compressão e linha de tendência do bloco 1. ....	47
Figura 50 – Valores de exposição diária para os diferentes casos de estudo. ....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Área de montado de sobro mundial. ....	5
Tabela 2 – Distribuição das empresas do sector corticeiro, por número de trabalhadores e atividade... 6	6
Tabela 3 – Propriedades da cortiça.....	11
Tabela 4 – Diferentes de resultados de composição química da cortiça. ....	15
Tabela 5 – Valores de Módulo de <i>Young</i> obtidos na compressão. ....	16
Tabela 6 – Coeficiente de <i>Poisson</i> da Cortiça (adaptado de Silva et al., 2005).....	17
Tabela 7 – Características do Aglutinante.....	24
Tabela 8 – Fator de ponderação para transmissão de vibrações.....	34
Tabela 9 – Valores obtidos no ensaio de tração.....	40
Tabela 10 – Valores óbitos no ensaio de compressão.....	43

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área
$A_0$	Área de secção
$F$	Força
$\sigma$	Tensão
$\varepsilon$	Deformação
$E$	Módulo de <i>Young</i>
$l_0$	Comprimento inicial
$l_i$	Comprimento instantâneo
$\nu$	Coefficiente de <i>Poisson</i>
$d\varepsilon_t$	Deformação da direção transversal
$d\varepsilon_a$	Deformação da direção axial
$\eta$	Coefficiente de Perda
$W_{hi}$	Fator de ponderação
$a_{hi}$	Valor de aceleração eficaz
$a_{hw}$	Valor eficaz da aceleração ponderada
$a_{hv}$	Valor total de vibração
$A(8)$	Valor de exposição diária

## 1. INTRODUÇÃO

Desde sempre que o sobreiro e a cortiça fazem parte do quotidiano dos portugueses e estão presentes nos mais variados utensílios. A cortiça é um tecido vegetal formado de células mortas impregnadas de suberina e constitui o elemento principal da casca do tronco do sobreiro. Esta árvore cresce na Europa Mediterrânica, sobretudo em Portugal, onde existem 715 mil hectares de montado de sobreiro (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

Portugal sempre foi líder na produção, transformação e exportação de cortiça e no atual panorama económico, a produção de cortiça e a indústria corticeira têm uma grande expressão, sendo necessário continuar a desenvolver este ramo, descobrindo novas aplicabilidades e diferentes formas de utilização para a cortiça.

Este material pode ser utilizado de forma virgem ou sob a forma de alguns derivados; como, o aglomerado branco (que é composto por aglutinante e cortiça virgem triturada); o aglomerado negro (constituído por desperdícios de cortiça sujeitos a altas temperaturas) e o *rubbercork* (que consiste numa mistura de cortiça com borracha), todos eles com importantes aplicações sobretudo na construção civil.

A cortiça apresenta características únicas e inimitáveis, como a sua leveza, a impermeabilidade a líquidos e a gases, a elasticidade e compressibilidade, o facto de ser um notável isolante térmico e acústico, a sua combustão lenta e a sua extrema resistência ao atrito (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

Estas e outras características da cortiça serão aprofundadas neste trabalho, bem como o seu comportamento mecânico e anti-vibratório. O comportamento mecânico dos materiais caracteriza-se através de um conjunto de propriedades, resultantes de ensaios mecânicos específicos. Através desses ensaios é possível compreender como é que um material corresponde às diferentes solicitações mecânicas, nomeadamente à tração e à compressão.

Como já foi referido, a produção de cortiça e a indústria corticeira têm uma grande expressão no panorama económico português, pelo que importa caracterizar pormenorizadamente este material e compreender as suas potencialidades para que possa ser aplicado nos mais diversos contextos, nomeadamente na construção, na indústria, na decoração, entre muitas outras.

Foi no contexto desta necessidade que se desenvolveu a presente dissertação de mestrado, que se integra no curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, da Universidade do Minho, cujos objetivos específicos são:

- Caracterizar o comportamento mecânico da cortiça;

- Caracterizar o comportamento anti-vibratório da cortiça.

Estes objetivos visam contribuir para a finalidade deste trabalho que é caracterizar a cortiça de forma a contribuir para aumentar o leque de possíveis aplicações futuras deste material.

Para cumprir os objetivos do trabalho utilizou-se como método os ensaios experimentais em laboratório, nomeadamente ensaios de tração, compressão e estudo de vibrações.

Num ensaio de tração, um corpo de prova é submetido a um esforço que tende a alongá-lo ou esticá-lo até à rotura, tal permite verificar a capacidade de deformação e a resistência mecânica do material em estudo.

Um ensaio de compressão permite comprovar as características mecânicas do material, aplicando compressão sobre o de corpo de prova.

O estudo de vibrações possibilita perceber qual a resposta do material quando sujeito a solicitações vibratórias.

Relativamente à estrutura do trabalho, após a introdução segue-se o capítulo dois onde consta a revisão bibliográfica, que aborda a definição de cortiça, o sector corticeiro, o processo de produção e transformação deste material de onde resultam cortiça natural e os seus derivados; são ainda mencionadas as suas características, estrutura e composição química, o seu comportamento mecânico esperado e algumas das suas aplicações.

O capítulo três diz respeito ao trabalho desenvolvido e contempla a descrição dos materiais utilizados nos ensaios (granulado e aglomerado de cortiça) e os ensaios experimentais realizados, como o ensaio de tração e compressão e o estudo de vibrações.

No capítulo quatro realiza-se a apresentação e a discussão dos resultados obtidos nos diferentes ensaios.

No quinto e último capítulo apontam-se algumas conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

## 2. A CORTIÇA

A palavra cortiça deriva diretamente do latim – *Córtex*, que significa casca de árvore, pele de fruto ou ainda invólucro, assim a cortiça, tal como o seu significado em latim indica, é a casca do tronco e ramos do sobreiro (*Quercus Suber L.*) (Dicionário Priberam da Língua Portuguesa, 2012).

A cortiça além de 100% natural, reciclável e renovável possui outras qualidades bastante interessantes, tais como, material de baixa densidade, impermeável a gases e líquidos, elástica e compressível, isolante acústico e térmico e resistente ao fogo.

Como referido, a cortiça provém do sobreiro, árvore característica da região mediterrânica, crescendo essencialmente em Espanha, Marrocos, Argélia, França, Itália e em destaque Portugal, onde se encontra a maior extensão de sobreiros a nível mundial, 715 mil hectares de montado de sobreiro, que representa 33% de toda a extensão mundial (Figura 1) e onde se encontra protegido pelo Decreto-lei n.º 169/2001, que estabelece que o seu arranque ou corte carece de autorização da Direcção-Geral das florestas.

O montado de sobreiro (Figura 1), designação conferida às florestas de certas árvores protegidas, é composto predominantemente por espécie *Quercus*, entre outras pela azinheira (*Quercus Retundifolia*), pelo carvalho negral (*Quercus Pyrenaica*) e essencialmente por sobreiros (*Quercus Sauber L.*) (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

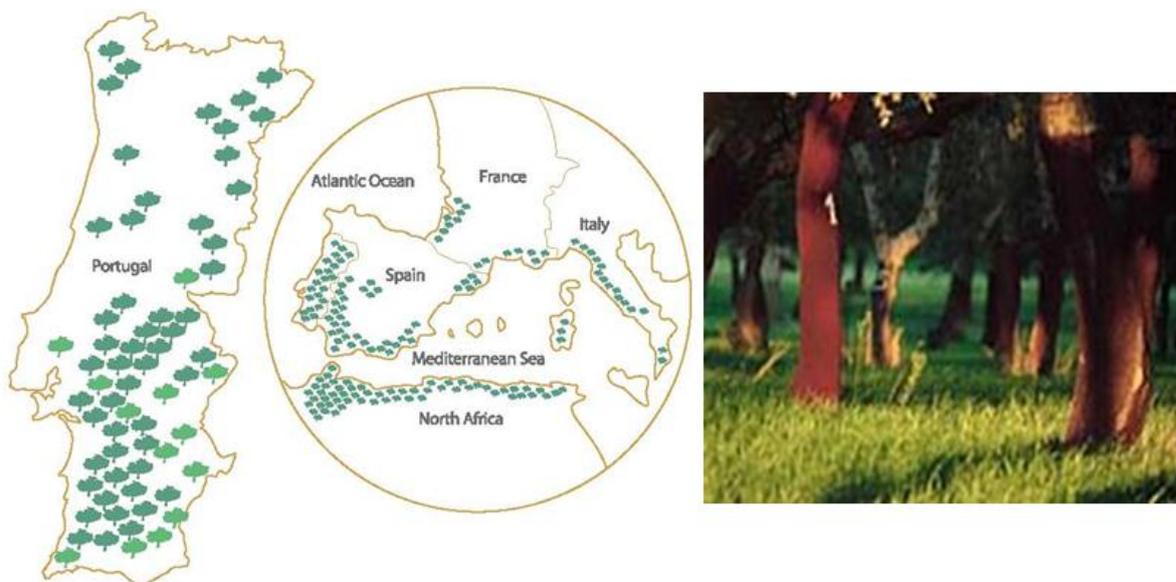


Figura 1 – Localização do Montado de sobreiro na região mediterrânica (à esquerda); Montado de Sobreiro (à direita) (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

As primeiras aplicações da cortiça destinavam-se a dispositivos relacionados com a pesca, sapatos de senhora e revestimentos de telhados, só mais tarde surgiu a cortiça aplicada em rolhas para garrafas.

A aplicação de cortiça em rolhas começou a evidenciar-se em França, quando se iniciou a utilização de rolhas de cortiça em garrafas de champagne, subsistindo até aos dias de hoje. Ao par desta aplicação, no século XVIII em Inglaterra, Robert Hooke obteve a primeira imagem microscópica de uma célula (Figura 2), descoberta que ficará para sempre associada à cortiça, pois a imagem registava células de cortiça (Gibson. 1997).

Nos últimos anos, os produtos com base em cortiça têm sido alvo de um forte investimento, desenvolvendo-se novos produtos, essencialmente devido à concorrência do mercado, mas também pela importância de se obterem novos produtos para outros campos de aplicação.

A indústria da cortiça Portuguesa é representada e promovida pela Associação Portuguesa de Cortiça (APCOR), fundada em 1956 e à qual qualquer empresa nacional de produção, comercialização e exportação de cortiça pode estar associada.

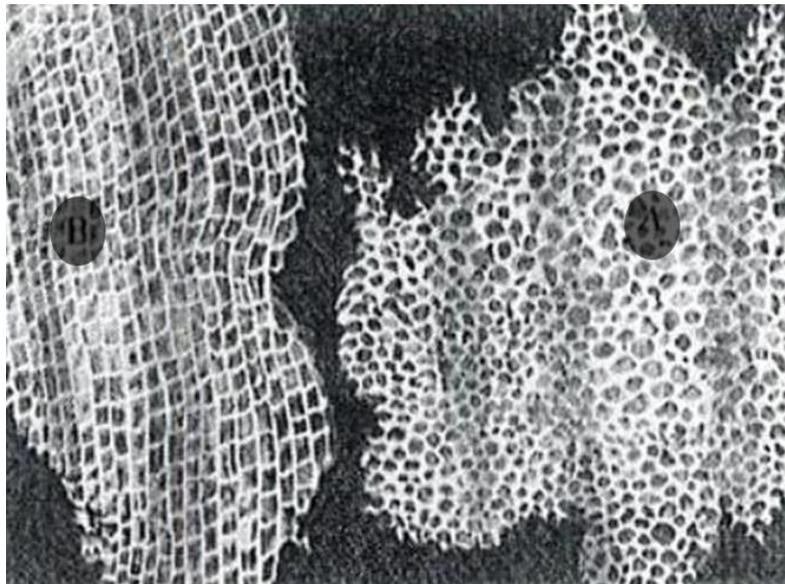


Figura 2 – Imagem microscópica de 1664, obtida por Robert Hooke, da cortiça na direção radial (A) e tangencial (B) (adaptado de Gibson, 1997).

## 2.1. O Setor Corticeiro

O setor corticeiro pode ser dividido em três: produção suberícola, indústria corticeira e comercialização; assim no presente capítulo expõe-se alguns dados relativos a cada um deles.

### 2.1.1. PRODUÇÃO SUBERÍCOLA

O setor suberícola abrange o cultivo e racionalização do montado de sobro, e a extração da cortiça.

O montado de sobro tem um papel importante na economia e na ecologia de vários países mediterrânicos, com uma área total a rondar os 211 9098 hectares, onde Portugal aparece em lugar de destaque com a maior área mundial, contribuindo com cerca de 715 000 hectares (cerca de 34% da área mundial), o que a nível nacional representa cerca de 22,5% de toda a área florestal. Em relação ao território nacional, o montado de sobro encontra-se por todo o território, sendo o Alentejo a região com a maior área, contribuindo com 84% de todo o montado, como pode ser observado na Figura 3.

Tabela 1 – Área de montado de sobro mundial (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

País	Área (hectares)	%
Portugal	715.922	34
Espanha	574.248	27
Marrocos	383.120	18
Argélia	230.000	11
Tunísia	85.771	4
França	65.228	3
Itália	64.800	3

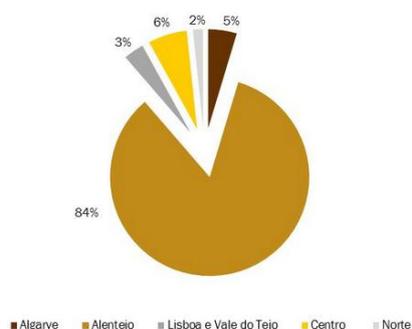


Figura 3 – Área de montado de sobro no território nacional (reproduzido de Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

Segundo dados de 2010 da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), a produção mundial de cortiça anual é cerca de 201 428 toneladas, onde mais uma vez, a lista é liderada por Portugal com uma produção anual de 100 000 toneladas, representando cerca de 50% da produção mundial, seguido da Espanha com uma produção de 61 504 toneladas (cerca de 31% da produção mundial) (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

## 2.1.2. INDÚSTRIA CORTICEIRA

A indústria corticeira é composta pelos subsectores, preparador, granulador, transformador e aglomerador.

O número de empresas deste tipo de indústria tem vindo a diminuir, segundo dados do Ministério da Solidariedade e da Segurança Social entre 2000 e 2009, a uma taxa de variação de 28% negativa. Já em relação ao comércio por grosso de cortiça em bruto, aumentou entre 2000 e 2008, mas registrou um ligeiro decréscimo entre 2008 e 2009.

Analisando as empresas do setor corticeiro, por atividade, em 2009 verificava-se que os produtores de rolhas representavam o grande número de empresas do setor (Tabela 2) (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

Tabela 2 – Distribuição das empresas do sector corticeiro, por número de trabalhadores e atividade (reproduzido de Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

Escalão de Pessoal ao Serviço	Indústria de Preparação da Cortiça (16293)	Fabrico de Rolhas de Cortiça (16294)	Fabrico de Outros Produtos de Cortiça (16295)	Total
De 1 a 4 pessoas	82	247	17	346
De 5 a 9 pessoas	27	71	4	102
De 10 a 19 pessoas	13	46	11	69
De 20 a 49 pessoas	6	34	9	49
De 50 a 99 pessoas	5	12	1	18
De 100 a 149 pessoas	1	4	2	7
De 150 a 199 pessoas	0	1	0	1
De 200 a 249 pessoas	0	1	0	1
De 250 a 499 pessoas	0	1	2	3
1000 e mais pessoas	0	1	0	1
<b>TOTAL Geral</b>	<b>134</b>	<b>417</b>	<b>46</b>	<b>597</b>
Proporção (%)	22%	70%	8%	100%

### 2.1.3. COMERCIALIZAÇÃO

A comercialização é a atividade que se ocupa das transações de produtos acabados de cortiça.

Portugal lidera o mercado de exportações de cortiça, com uma quota de 60% de todo o mercado. Analisando a o gráfico da Figura 4, pode-se observar que o valor gerado em exportações de cortiça em 2011 foi cerca de 806,1 milhões de euros, revelando um aumento em relação aos dois anos anteriores, mas ainda um pouco longe do valor gerado em 2002, cerca de 903 milhões de euros; facto que poderá estar relacionado com a crise económica atual. A nível interno, a exportação de cortiça representa 2% das exportações nacionais e 30% das exportações de produtos florestais, valores que representam 0,7% do Produto Interno Bruto (valores de mercado). Os principais destinos das exportações portuguesas de cortiça são a França (20,1%) e os Estados Unidos da América (15,6%), as percentagens representam o valor gerado nas exportações para os países em questão (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

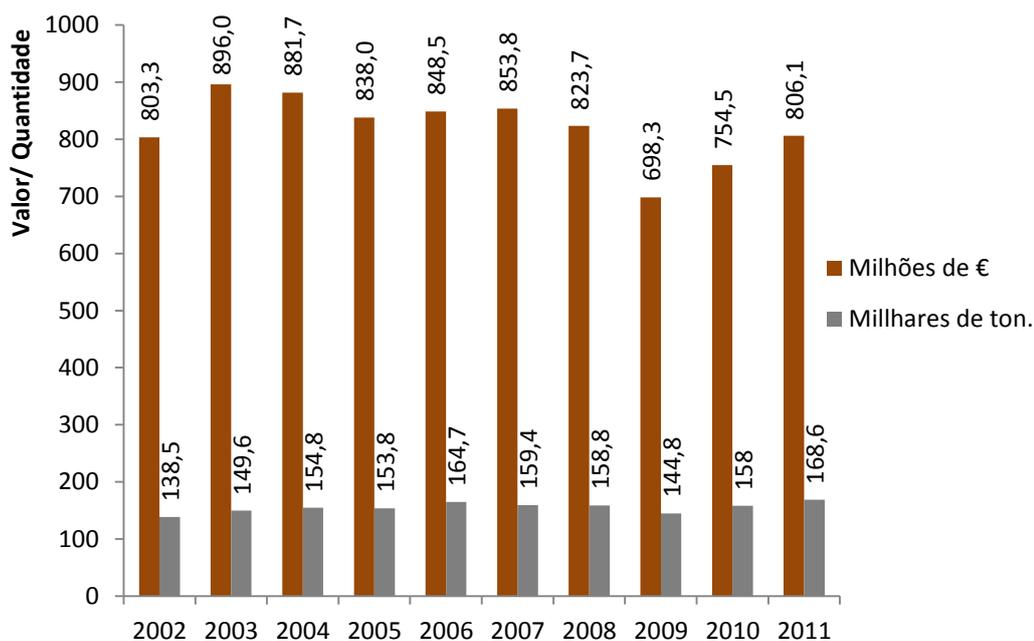


Figura 4 – Exportações portuguesas de 2002 a 2011 (adaptado de Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

O mercado de produtos à base de cortiça é liderado pelo setor rolheiro, representando 70% do valor de exportações de cortiça e com um valor gerado em 2011 (Figura 5) de 563,2 milhões de euros; seguido, ainda que de uma forma distante, pelos produtos utilizados na construção que no mesmo ano originaram cerca de 179,7 milhões de euros.

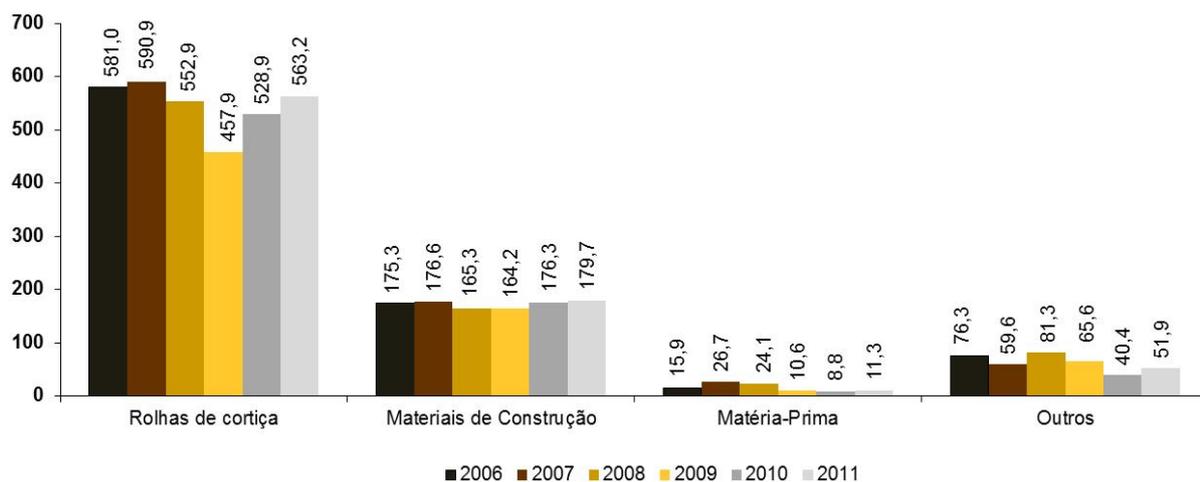


Figura 5 – Principais produtos à base de cortiça exportados (Milhões de €) (reproduzido de Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

Também nas importações Portugal é líder, importando cortiça sob a forma de matéria-prima que será posteriormente exportada sob a forma de produto final. A importação é algo inevitável, dado que a cortiça nacional é insuficiente para fazer face à capacidade de produção instalada a nível industrial. Em 2011, as importações atingiram 135 milhões de euros, revelando que a balança comercial do setor corticeiro é bastante positiva (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

## 2.2. Transformação da Cortiça

### 2.2.1. DESCORTIÇAMENTO

O processo de transformação de cortiça começa pelo descortiçamento (Figura 6), uma técnica realizada por especialistas que consiste na extração da casca (cortiça) dos sobreiros. Este processo é realizado em intervalos de nove anos.



Figura 6 – Descortiçamento (reproduzido de Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

O primeiro descortiçamento de um sobreiro, chamada a desbóia, deve ser realizado quando o perímetro do tronco atingir cerca de 70 cm quando medido a 1,5 m do solo, sendo que a cortiça proveniente deste descortiçamento, cortiça virgem, revela elevada irregularidade e dureza (pouca qualidade) devido ao processo de constante crescimento do sobreiro, a qualidade da cortiça está diretamente relacionada com a sua porosidade. Após um descortiçamento a árvore é marcada com o ano de realização do processo. Nove anos volvidos é tempo de realizar o segundo descortiçamento, obtendo-se a cortiça secundária, um material mais regular e menos duro, ainda assim obtendo uma cortiça com qualidade baixa. É apenas no terceiro descortiçamento que se obtém cortiça de boa qualidade, designada cortiça amadia, que ostenta uma estrutura regular com costas e barriga lisas, ideal para a produção de rolhas. Assim pode-se afirmar que após o terceiro descortiçamento, um sobreiro fornecerá cortiça de boa qualidade durante século e meio (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

#### 2.2.2. REPOUSO

O período de repouso, cerca de 6 meses, tem por objetivo garantir a estabilidade e a maturação da cortiça. A cortiça pode ser empilhada no interior de edifícios ou no exterior, onde fica às condições ambientais, mas nunca deverá estar em contacto com madeira, pois esta poderá transmitir fungos indesejáveis à cortiça (Esteves, 2010).

#### 2.2.3. PERCURSO INDUSTRIAL

Após o período de repouso, a cortiça segue para a indústria onde é preparada para a produção de vários produtos.

A primeira etapa da preparação da cortiça após repouso é colocá-la sob a forma de pranchas a cozer, em água limpa, durante cerca de uma hora, resultando uma cortiça limpa, isenta de substâncias hidrossolúveis, com espessura aumentada (resulta daqui a baixa densidade). Este procedimento permite tornar a cortiça mais elástica e macia. Após este processo é necessário que a cortiça volte a estabilizar, este período de cerca de três semanas garante que a cortiça ganhe a consistência necessária para poder ser trabalhada (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012 e Esteves, 2010).

As pranchas, depois de estabilizadas, seguem por norma para a indústria rolheira, onde numa primeira fase é rabaneada e posteriormente brocada. A rabaneação (Figura 7 – a)) consiste em cortar as pranchas em tiras com largura ligeiramente superior ao comprimento das rolhas; a brocagem (Figura 7 – b)) consiste em perfurar as tiras de cortiça com uma broca, obtendo-se a rolha. Daqui

resultam desperdícios, que são aproveitados para a obtenção de granulado, e as rolhas, que entram num processo de retificação para as dimensões pretendidas (Esteves, 2010).

As rolhas passam ainda por um processo de seleção, lavagem e desinfeção com ácido paracético ou água oxigenada.

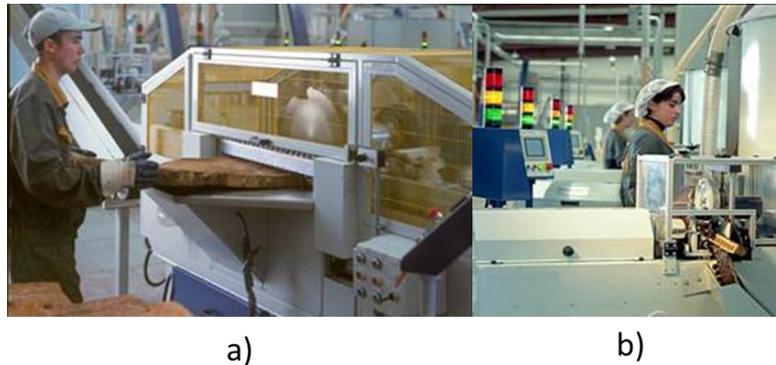


Figura 7 – a) rabaneação; b) brocagem (adaptado de Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

A cortiça tem outras aplicações além das rolhas. Os aglomerados são também um produto com bastante mercado, sendo obtidos a partir de desperdícios (cerca de 80% do total do peso do aglomerado) e de cortiça preferencialmente virgem, amadia, ou ainda de má qualidade.

Os aglomerados são produzidos com o objetivo de criar um produto com características semelhantes à cortiça original, sendo de três tipos; brancos, negros e *rubbercork*.

O aglomerado branco (Figura 8 – a)), ou composto, resulta da trituração de cortiça virgem com os grãos a serem ligados por substâncias naturais ou sintéticas, mas nunca com a própria cortiça.

O aglomerado negro (Figura 8 – b)), puro, resulta de desperdícios de cortiça que são triturados e sujeitos a altas temperaturas. Das elevadas temperaturas resulta um produto de cor negra, de onde advém o seu nome. A aglutinação é obtida graças à degradação térmica da cortiça que faz com que os grãos se unam uns aos outros, formando o aglomerado.

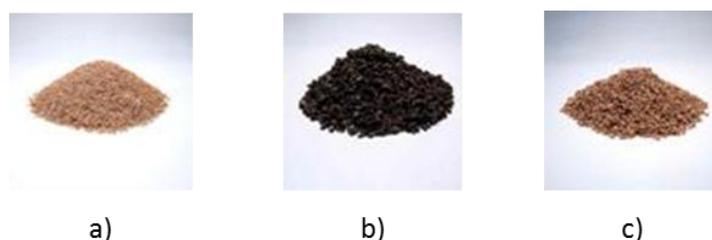


Figura 8 – Granulado Branco – a); Negro – b); e *Rubbercork* – c) (adaptado de Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

O *rubbercork* (Figura 8 – c)) consiste numa mistura de cortiça com borracha. A borracha atua como ligante e oferece a sua resiliência ao aglomerado, com fusão desta propriedade e com as propriedades da cortiça, como resistência mecânica e estabilidade dimensional, resulta um produto flexível, elástico e sólido (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012 e Esteves, 2010).

### 2.3. Características, Estrutura e Composição Química

Nesta secção apresenta-se de uma forma geral, as principais características da cortiça, a sua estrutura macroscópica e microscópica, e ainda a sua composição química.

#### 2.3.1. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

Na Tabela 3 apresentam-se algumas propriedades da cortiça (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012):

Tabela 3 – Propriedades da cortiça

<b>Características</b>	<b>Valor médio:</b>
Massa volúmica	18 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de <i>Young</i> (tração)	18 MPa
Módulo de <i>Young</i> (compressão)	13 MPa
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.18
Coefficiente de atrito	0.3
Calor específico	35 J/kg. K
Coefficiente de difusão de água (20°C)	$4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^3$
Difusividade Térmica	$1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Condutividade Térmica	0.045 W/m. K
Tensão de rotura	19 MPa

A cortiça possui as seguintes características (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012 e Esteves, 2010):

- Material de baixa densidade;
- Praticamente impermeável a líquidos e gases;
- Flexível, elástico, resiliente e compressível;
- Resistente à água e a diversos produtos químicos;
- Inócuo, acústico e isolante térmico;
- Resistente ao desgaste e ao atrito;
- Baixo coeficiente de *Poisson*,
- Baixa condutividade térmica;

- Bom comportamento ao fogo, não libertando gases tóxicos;
- Grande estabilidade dimensional;
- Grande capacidade de absorção de energia durante um impacto;
- Grande capacidade de dissipação de energia durante uma vibração;
- Reciclável, biodegradável e natural.

### 2.3.2. ESTRUTURA MACROSCÓPICA

A cortiça, como qualquer elemento biológico, cresce graças à formação de novas células. O processo de desenvolvimento de nova cortiça (Figura 9) recomeça com o descortiçamento; isto é, ao ser removida uma camada do sobreiro o entrecasco ficará exposto, no qual as novas células crescerão “empurrando” as suas antecessoras, originado numa primeira fase a raspa (camada protetora), principal constituinte da parte externa da cortiça (costas) e, depois, num processo natural, aumentando a espessura da prancha. A cortiça virgem não apresenta raspa. A parte interna tem um crescimento idêntico, designada por barriga ou ventre, possuindo menor elasticidade que as outras camadas.

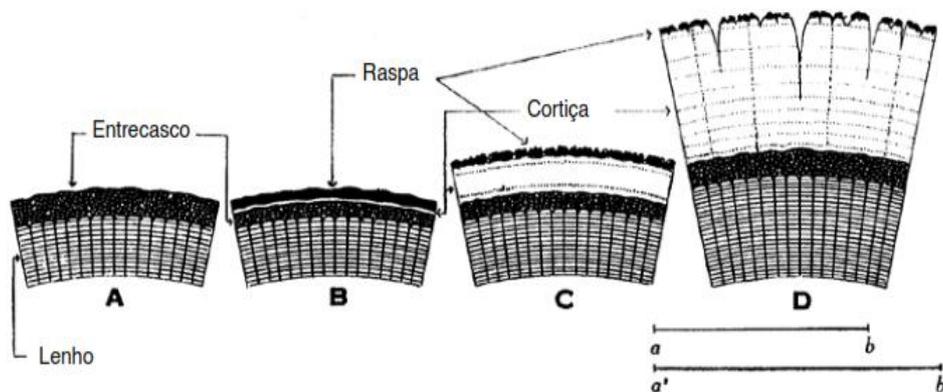


Figura 9 – Estrutura macroscópica da cortiça (reproduzido de Gil, [s.d.]).

A cortiça é um material com comportamento anisotrópico à semelhança de outros materiais naturais, isto é, o seu comportamento varia consoante a direção, radial, axial e tangencial (Figura 10), mas essa anisotropia não é verdadeira no caso de aglomerados, devido à orientação aleatória dos seus grãos (Gil, [s.d.] e Silva et al., 2005).

Tal como qualquer árvore, o sobreiro tem um crescimento diferente consoante as estações Primavera/Verão e Outono/Inverno, assim a estrutura da cortiça será também afetada por este comportamento, apresentando diferentes espessuras das suas camadas celulares.

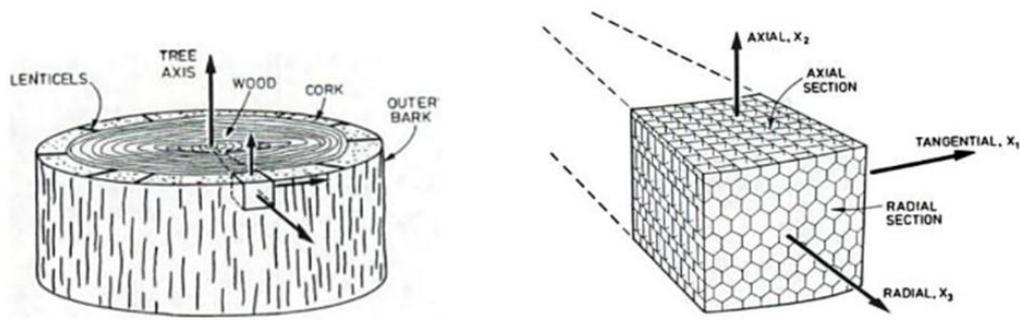


Figura 10 – Representação esquemática de tronco de um sobreiro e células de cortiça, representados os seus eixos (reproduzido de Gibson, 1997).

A análise de alguns aspetos exteriores da cortiça, como a cor, a lisura, a macieza e a porosidade permitem avaliar a sua qualidade.

### 2.3.3. ESTRUTURA MICROSCÓPICA

A nível microscópico a cortiça é descrita como um tecido homogéneo de paredes celulares finas, bastante compacta entre células, sendo que o tecido celular ocupa apenas 10 a 15% do volume total e os restantes 80 a 85% são ocupados por vazio (ar) contido no interior de cada célula.

A estrutura celular da cortiça (Figura 11) é em tudo idêntica a um favo de mel, as células podem ser representadas como primas, variando o número de contornos poligonais, com dimensões médias de 30 a 40  $\mu\text{m}$  de largura e 35 a 45  $\mu\text{m}$  de altura (Figura 12). As células empilham-se base-a-base paralelamente ao eixo radial da árvore. Em média 1  $\text{cm}^3$  de cortiça possui cerca de 30 a 42 milhões de células (Gil, [s.d.] e Silva et al.,2005).

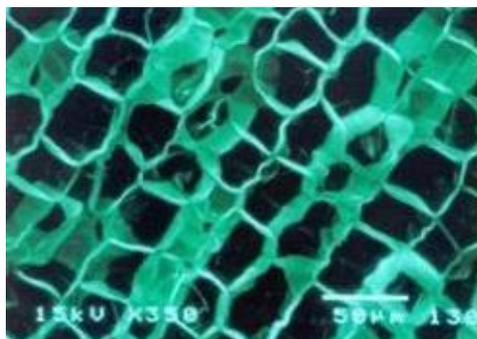


Figura 11 – Imagem microscópica de cortiça (reproduzido de Esteves, 2010).

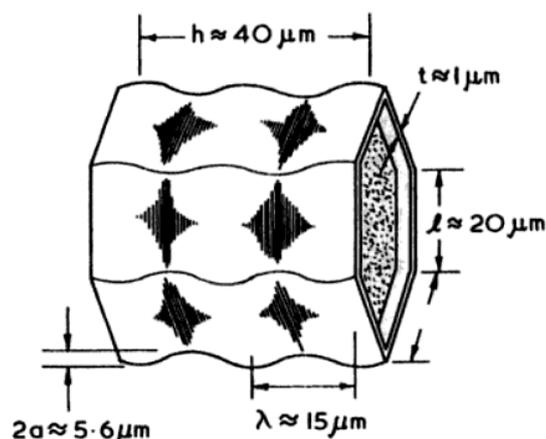


Figura 12 – Representação esquemática de uma célula de cortiça (reproduzido de Gibson, 1997).

As paredes celulares de uma célula de cortiça (Figura 13) são compostas por cinco camadas:

- duas camadas exteriores que forram as cavidades celulares – celulose;
- duas camadas intermédias que conferem impermeabilidade – suberina e ceras;
- uma camada média que concede rigidez e estrutura – lenhina.

Como já referido, as estações do ano têm influência no crescimento do tecido de cortiça; isto é, a espessura das paredes celulares varia consoante a estação, no Inverno/Outono a espessura tende a ser maior (2 a 2,5  $\mu\text{m}$ ) e menor na Primavera/Verão (1 a 1,25  $\mu\text{m}$ ), este facto intervém nas características físico-mecânicas da cortiça.

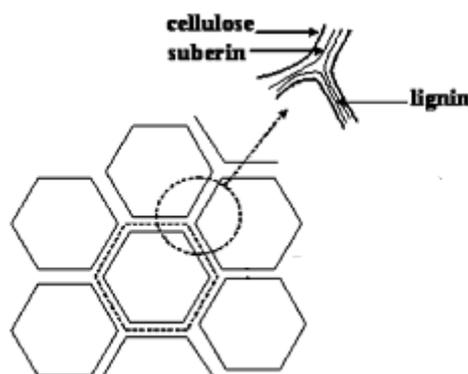


Figura 13 – Representação esquemática de células de cortiça (adaptado de Silva et al., 2005).

As características deste material como isolante térmico estão relacionadas com a dimensão das células de cortiça e o ar existente dentro das mesmas, pois a transferência de calor nas suas três vertentes é dificultada ou minimizada pelos aspetos mencionados; isto é, o ar afeta negativamente a transferência de calor por condução, e a dimensão e compacidade das células afeta tanto a transferência de calor por convecção como por radiação (Gil, [s.d.] e Silva et al., 2005).

#### 2.3.4. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química da cortiça não é totalmente conhecida visto que esta depende de vários fatores, tais como: origem geográfica, clima, dimensões e idade da árvore, ano (se é virgem ou de reprodução), origem genética e condições de crescimento.

A suberina (cerca de 40%) responsável pela compressibilidade e elasticidade, a lenhina (cerca de 22%) componente estrutural das paredes celulares, os polissacarídeos (cerca de 18%) também ligados à estrutura celular e as ceras extratáveis (cerca de 15%) responsáveis pela impermeabilização, cor e conservação, são os principais compostos celulares da cortiça.

Na Tabela 4 pode observar-se, em parte, o que foi referido em relação ao desconhecimento da composição química, pois a percentagem de cada composto varia consoante os dados obtidos pelos diferentes autores (Silva et al., 2005).

Tabela 4 – Diferentes de resultados de composição química da cortiça (adaptado de Silva et al., 2005).

Composto	Cortiça virgem		Cortiça de reprodução (Amadia)					
	Caldas (1986)	Pereira (1981)	Gil (1998)	Caldas (1986)	Pereira (1981)	Parameswaran (1981)	Holloway (1972)	Carvalho (1968)
Suberina	45	45	42	48	33,5	33	37	50
Lenhina	27	21	21,5	29	26	13	14,8	19
Polissacarídeos	12	13	16	12	25	6	0	13
Ceras extratáveis	10	19	13	8,5	13	24	15,8	15
Cinzas	5	1,2	0	2.1	2,5	(0)	0	3
Outras	(0)	0,8	7	(0)	(0)	6	(0)	(0)

Valores em percentagem

#### 2.4. Comportamento Mecânico

O comportamento mecânico da cortiça vai de encontro ao comportamento mecânico de materiais sólidos celulares, apresentando uma curva de compressão com três regiões distintas. Observe-se a Figura 14, na primeira região, até 0,7% da deformação, representa a região elástica, resultado da flexão elástica das paredes das células; a segunda região, até cerca de 70% de deformação, mostra um patamar muito próximo da horizontal, causado pela deformação progressiva das paredes celulares; a tensão máxima ou tensão de colapso corresponde ao fim do patamar

horizontal, visível na Figura 14. Na terceira e última região, a curva sofre uma subida acentuada causada pelo esmagamento e colapso das células (Gibson, 1997 e Silva et al., 2005).

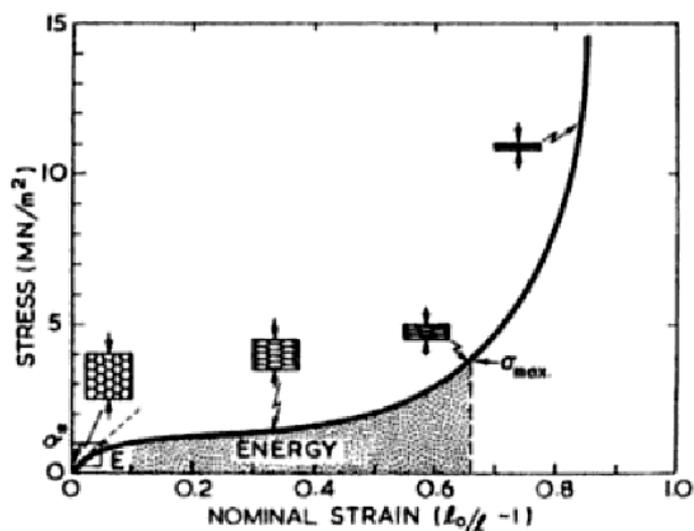


Figura 14 – Curva de compressão, tensão-deformação, da cortiça (reproduzido de Gibson, 1997).

Em Silva et al. (2005), 0,75 - 0,8 MPa na direção radial e 0,6 - 0,7 MPa na direção não radial, são os valores apontados para a tensão máxima de compressão da cortiça. São ainda apresentados valores do módulo de *Young* para diferentes espessuras de pranchas de cortiça nas diferentes direções, como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de Módulo de *Young* obtidos na compressão (adaptado de Silva et al., 2005).

Calibre	Módulo de <i>Young</i> , E [MPa]		
	Radial	Axial	Tangencial
Pequeno	11,5±1	10,9±0,6	8,6±0,7
Médio	13,2±0,7	12±1,5	9,6±1,4
Grande	9,9±0,4	9,2±0,5	7,9±1,3

Na tração a cortiça apresenta também um comportamento diferente nas várias direções, mas as curvas das direções axial e tangencial têm uma configuração idêntica, apenas na direção radial a cortiça apresenta um comportamento totalmente diferente das outras direções (Figura 15).

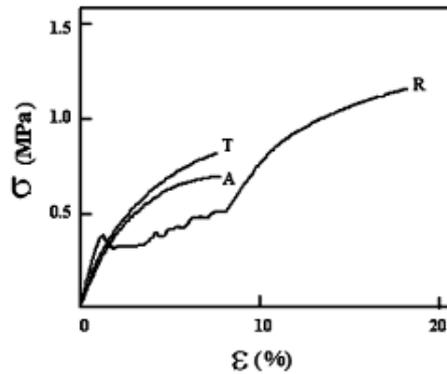


Figura 15 – Curvas de tração (tensão-deformação) da cortiça, na radial (R), tangencial (T) e axial (A) (reproduzido de Silva et al.,2005).

A tensão de rotura e a deformação da cortiça quando sujeita a tração na direção radial e não radial são respetivamente, 1 MPa e 5%, e 1,1 MPa e 9% (Silva et al.,2005).

O coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ) da cortiça, calculado segundo a equação 2.1, apresenta um comportamento muito particular; isto é, quando comprimida na sua direção radial apresenta uma ligeira expansão na direção perpendicular ao carregamento, resultando num coeficiente de *Poisson* positivo; mas se a cortiça for comprimida na direção não radial exibe uma ligeira contração da direção perpendicular ao carregamento, originado um coeficiente de *Poisson* negativo (Silva et al., 2005).

$$\nu = -\frac{d\varepsilon_t}{d\varepsilon_a} \quad (2.1)$$

Onde  $d\varepsilon_t$  representa a deformação na direção transversal ao carregamento e  $d\varepsilon_a$  representa a deformação na direção axial.

Na Tabela 6 são apresentados alguns valores para o coeficiente de *Poisson*, obtidos pelas relações entre a direção radial (R) e não radial (NR) da cortiça natural.

Tabela 6 – Coeficiente de *Poisson* da Cortiça (adaptado de Silva et al., 2005)

Coeficiente de <i>Poisson</i>	
$\nu_{R/NR}$	0 – 0,097
$\nu_{NR/R}$	0 – 0,064
$\nu_{NR/NR}$	0,26 – 0,5

A cortiça é um material com capacidades anti-vibratórias de excelência, como se pode observar no gráfico da Figura 16, a cortiça apresenta um coeficiente de perda bastante elevado quando comparado com outros materiais. O coeficiente de perda ( $\eta$ ) mede a capacidade que um material possui em dissipar energia vibracional (Ashby, 2005).

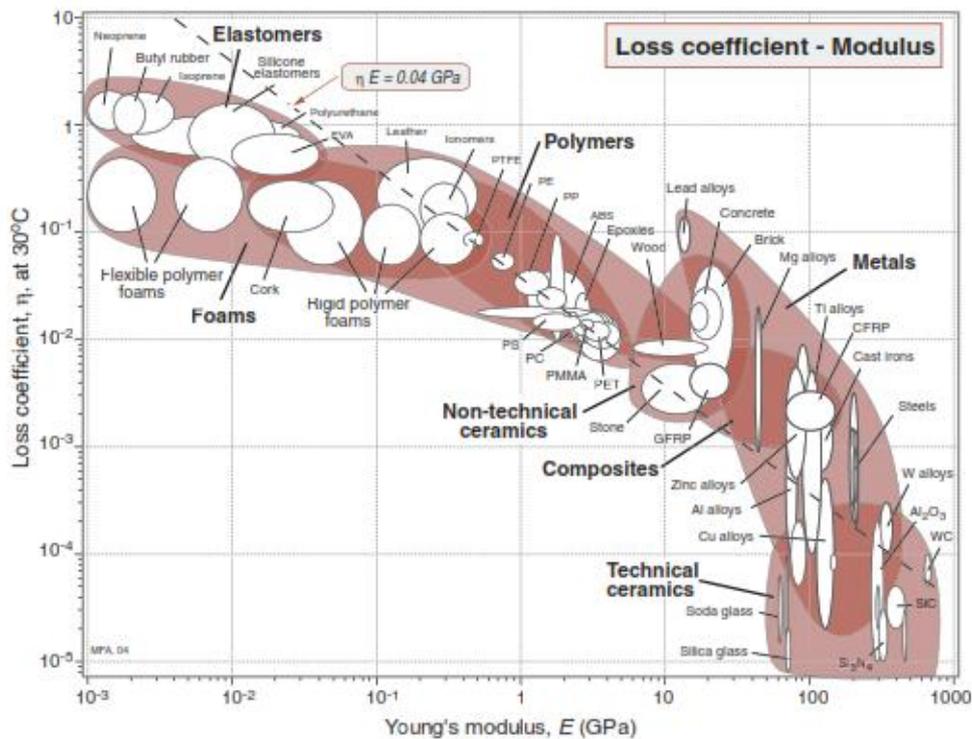


Figura 16 – Gráfico de seleção de materiais, coeficiente de perda – Módulo de *Young* (reproduzido de Ashby, 2005).

## 2.5. Aplicações da Cortiça

As primeiras referências à aplicação de cortiça datam do ano 3000 a.C., na China, no Egito, na Babilônia e na Pérsia, onde era empregue em dispositivos relacionados com a pesca. A utilização da cortiça como rolha surge apenas no 1º século a.C., cujas provas foram encontradas em Éfeso (Turquia) (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

Normalmente a cortiça está associada a rolhas para vinho e champagne, mas a sua aplicabilidade estende-se muito para além deste produto e é na tentativa de expor a sua vasta aplicabilidade que se desenvolve este subcapítulo, desde das rolhas até aplicações de menor relevo, passando pelo seu uso na construção civil.

#### 2.4.1. ROLHAS

As rolhas de cortiça são o produto mais conhecido e com maior mercado da indústria corticeira. Estas deixaram de ser apenas de cortiça natural para hoje existirem de uma grande variedade de tipos, de calibres e formatos para responder às exigências do mercado. Pode identificar-se sete categorias: Rolhas naturais (Figura 17); Rolhas naturais multipeça; Rolhas naturais colmatadas; Rolhas de Champagne; Rolhas técnicas; Rolhas aglomeradas e Rolhas capsuladas.

A escolha de rolhas de cortiça em detrimento de outras está relacionada com aspetos de maturação do vinho e pela qualidade, normalmente, associada a vinhos com rolha de cortiça (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).



Figura 17 – Rolhas de cortiça natural (reproduzido de Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

#### 2.4.2. MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

A cortiça, como já referido, possui propriedades interessantes enquanto isolante térmico, acústico e vibratório. São estas propriedades e o crescente interesse por parte de arquitetos, designers e decoradores em materiais naturais que tem levado a um crescimento notório da utilização de cortiça e seus derivados na construção civil (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

Os produtos com base de cortiça empregues na construção civil são diversificados e aplicados em várias situações (Figura 18). Estes podem ser divididos em dois grupos principais, aglomerados para revestimentos de pisos e aglomerados para isolamento.

Os produtos utilizados no revestimento podem agrupar-se em (Gil, [s.d.]):

- Pavimentos flutuantes com cortiça na camada superior e/ou inferior;
- Revestimentos vinílicos sobre suporte resiliente de aglomerado de cortiça e de aglomerado de cortiça com PVC no tardo;

- Revestimentos de *rubbercork*;
- Ladrilhos de aglomerado de cortiça;
- Ladrilhos de aglomerado de cortiça com elastómero;
- Ladrilhos de aglomerado de cortiça com PVC.

A utilização de cortiça em pavimentos torna os pisos confortáveis, silenciosos, quentes, fáceis de limpar e resistentes (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

Já em isolamento é utilizado com maior frequência o aglomerado expandido de cortiça, produzido com as sobras das restantes indústrias e com um processo produtivo que aumenta o volume das células da cortiça, o que faz com que, por exemplo, a taxa de transferência de calor por condução baixe. São diversas as possibilidades de aplicabilidade da cortiça em isolamentos, tais como (Gil, [s.d.]):

- Açoteias e terraços - isolamentos térmicos, de vibrações, de condensação de humidade, impermeabilização;
- Muros e telhados - isolamento térmico, prevenção de condensações;
- Tabiques e portas - isolamento térmico e acústico;
- Paredes e tetos - correção acústica, isolamento térmico, conforto ambiental, decoração;
- Solos - isolamento vibrátil e térmico;
- Pontes - isolamento térmico, juntas de descontinuidade/dilatação.

Os granulados e regranulados de cortiça são ainda utilizados em aplicações específicas da construção (Gil, [s.d.]):

- Enchimento leve na melhoria de situações de isolamentos;
- Inerte no fabrico de betões para redução de peso de painéis de betão;
- Termo-isolante em betão e betonilhas;
- Anti-condensação em paredes ou coberturas;
- Fono-isolante em pavimentos flutuantes;
- Enchimentos de parede dupla.

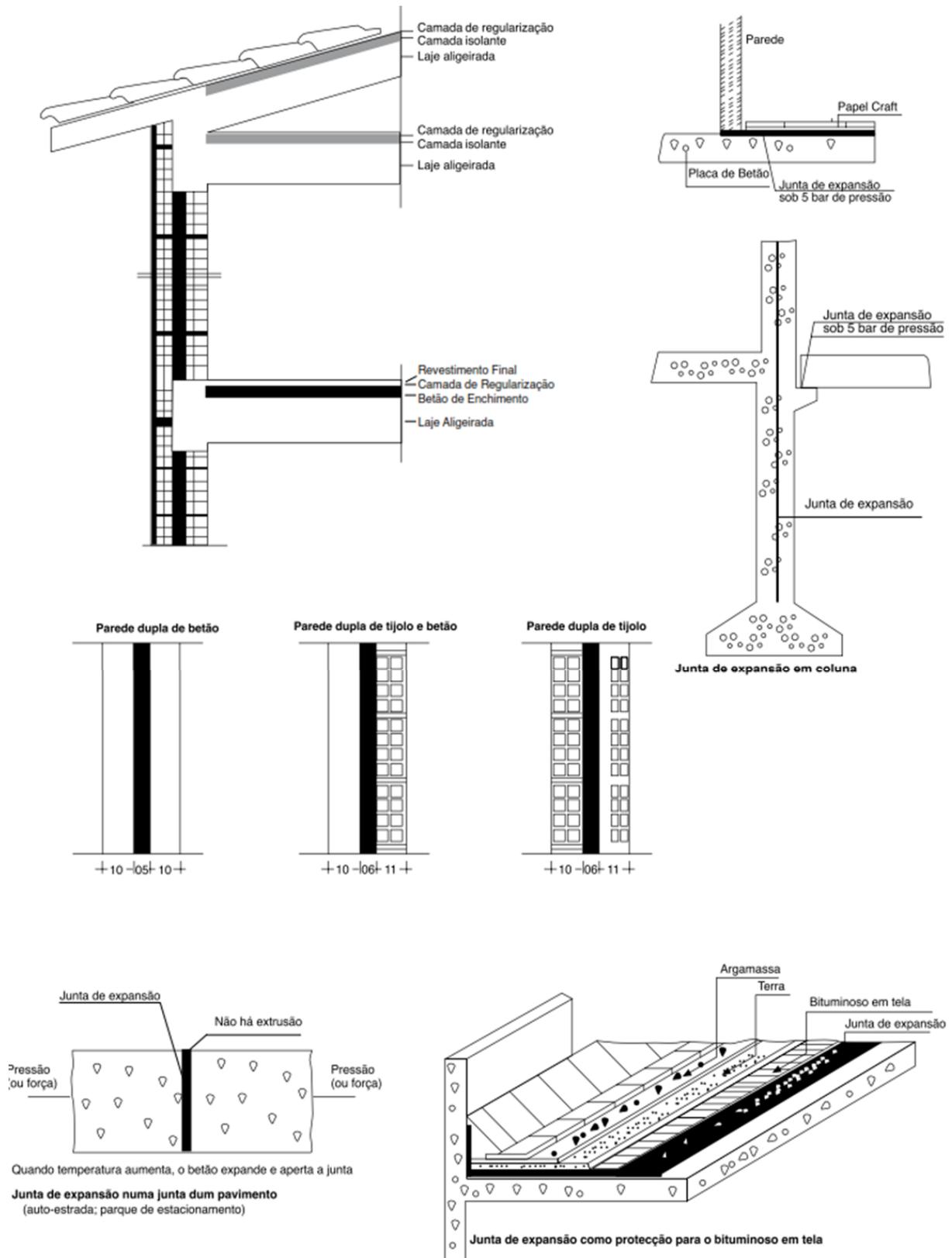


Figura 18 – Aplicações dos aglomerados na construção civil (Gil, [s.d.]).

### 2.4.3. OUTRAS APLICAÇÕES

São inúmeras as restantes aplicações da cortiça e seus derivados, desde o vestuário até ao setor espacial, assim expõe-se algumas dessas aplicações separadas pelo tipo de aglomerado utilizado.

O aglomerado branco resultante da trituração de cortiça virgem, possui um campo de aplicação enorme, desde de painéis de afixação, peças de calçado, caixas e tabuleiros, em capacetes de proteção, em bóias, coletes e flutuadores, punhos das canas de pesca, tapetes, malas e pastas, tecido para vestuário e capas de segurança para telemóveis e *tablet's* (Figura 19). Também no desporto o aglomerado branco é bastante utilizado, em bolas de hóquei, críquete, basebol e badmington, raquetes de ténis de mesa, nas pequenas bolas dos apitos, nos tacos de golfe, nos alvos para as setas e nas buchas para cartuchos. Este aglomerado pode ser ainda empregue em apoios anti-vibratórios em diversos equipamentos das diferentes indústrias.



Figura 19 – *Kork* – capa de segurança para *ipad* (reproduzido de Pplware, 2012).

O aglomerado negro é composto por desperdícios resultantes da poda e limpeza dos sobreiros, que são triturados e posteriormente submetidos a altas temperaturas. Este material é sobretudo utilizado como isolante térmico, acústico (Figura 20) e vibratório. No caso da absorção de vibrações, este tipo de material é utilizado em máquinas produtoras de vibrações com o objetivo de impedir a transmissão destas ao exterior e aos seus operadores. Pode, ainda, devido à sua cor ser empregue como elemento decorativo resultando num agradável impacto visual.



Figura 20 – Aplicação de cortiça em pisos (reproduzido de Acousticork, 2012)

O *rubbercork*, material que resulta da mistura de características da cortiça, como a elasticidade, com as da borracha, resistência mecânica, torna-se essencial para as indústrias automóvel e elétrica. Utilizado em juntas de máquinas (Figura 21), em motores, em transformadores e em pavimentos sujeitos a grande intensidade de tráfego.

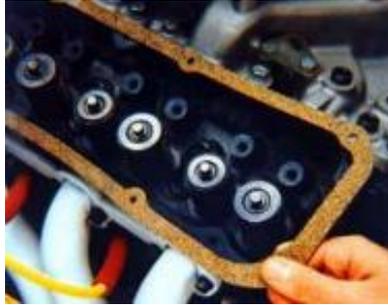


Figura 21 – Junta de cortiça (reproduzido de Bom, 2010).

Esta enorme aplicabilidade tem levado a investigação a procurar novas e inesperadas aplicações para este material, como exemplo, Santos ([s.d.]) no seu trabalho analisa e compara com outros materiais a capacidade da cortiça em absorver energia de impacto, tendo em vista a melhoria da segurança passiva automóvel.

Por último refira-se o aumento da utilização da cortiça e seus derivados na decoração (Figura 22), quer por parte de profissionais, quer no domínio do “do-it-yourself” (Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).



Figura 22 – Utilização de cortiça e seus derivados na decoração e vestuário (reproduzido de Associação Portuguesa de Cortiça, 2012).

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo comporta a parte prática do trabalho, constando os procedimentos experimentais realizados - tração, compressão e vibrações, bem como uma pequena abordagem teórica a cada um deles.

Porém, antes de avançar para os ensaios importa expor os derivados de cortiça utilizados.

Os derivados de cortiça utilizados encontram-se sob duas formas: granulado e aglomerado.

Os granulados utilizados são de várias granulometrias: 3 a 7 mm, 2 a 3mm, 1 a 2 mm, 0,5 a 1 mm e Pó. As diversas granulometrias correspondem a granulados brancos e na granulometria de 0,5 a 1 mm além de granulado branco possui-se também granulado negro. Assim atribui-se a seguinte nomenclatura:

- 3 a 7 mm – Gr 3-7 (Figura 24 – a));
- 2 a 3 mm – Gr 2-3 (Figura 24 – b));
- 1 a 2 mm – Gr 1-2 (Figura 24 – c));
- 0,5 a 1 mm - Gr 0,5 -1 (granulado branco) (Figura 25 – a)) e Gr negro (granulado negro) (Figura 25 – b));
- Pó – Pó (Figura 25 – c))

Os aglomerados utilizados encontram-se sob duas formas: laminado e bloco. Os laminados são constituídos de três granulometrias de granulado branco, 2 a 3mm, 1 a 2 mm e 0,5 a 1 mm. A espessura do laminado está associada a cada granulometria:

- Laminado de 2 a 3 mm tem 3,12 mm de espessura – Ag1 (Figura 23 - a));
- Laminado de 1 a 2 mm tem 2,82 mm de espessura – Ag2 (Figura 23 - b));
- Laminado de 0,5 a 1 mm tem 2,5 mm de espessura – Ag3 (Figura 23 - c));

O bloco de aglomerado de cortiça (Figura 26) com que se realizaram os ensaios é construído pelo granulado de 2 a 3 mm.

Os aglomerados são constituídos, como já referido, por granulado branco e por um aglomerante natural (resina) à base de óleo de girassol ou de milho. Os aglomerados utilizados são ligados com o aglutinante FRABICOL AG 213 com as seguintes características:

Tabela 7 – Características do Aglutinante.

Aspetto	Líquido transparente
Densidade	$1,05 \pm 0,001 \text{ kg/l}$
Teor em sólidos	$\geq 98,0 \%$
Teor em NCO	$\geq 3,5 \pm 0,5 \%$

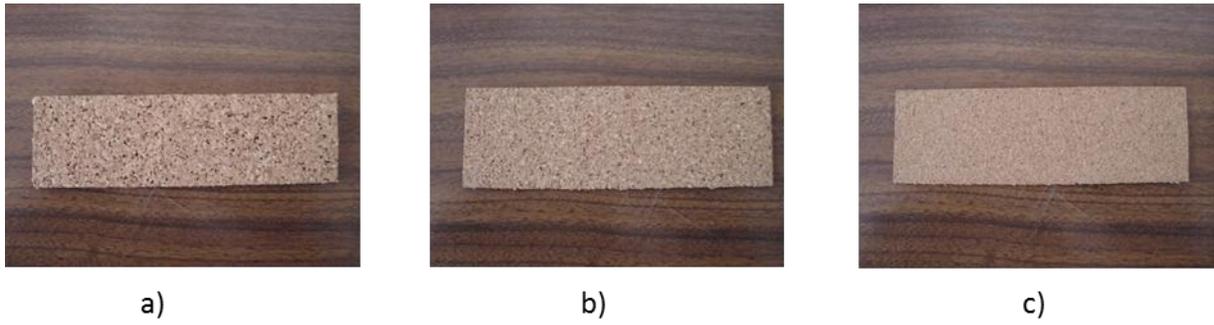


Figura 23 – Laminados de cortiça: a) Ag1; b) Ag2 e c) Ag3.

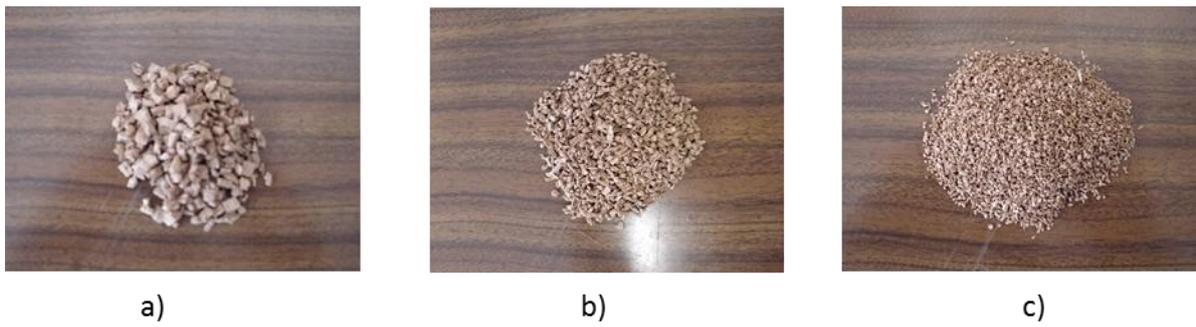


Figura 24 – Granulados de cortiça: a) Gr 3-7; b) Gr 2-3 e c) Gr 1-2

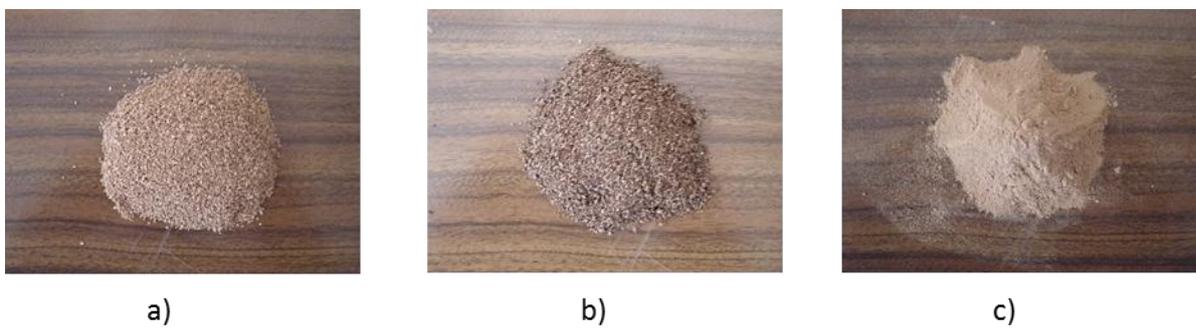


Figura 25 – Granulados de cortiça: Gr 0,5-1; Gr negro e Pó



Figura 26 – Aglomerado de cortiça – bloco de aglomerado.

### 3.1. Ensaio de Tração

Quando se está a desenvolver um projeto importa conhecer o material e perceber se este é eficaz para a tarefa que vai desenvolver; para tal recorreremos a vários ensaios, entre os quais o ensaio à tração, que permite conhecer as propriedades mecânicas do material, como a tensão de rotura, a extensão até rotura e a tenacidade.

Durante este tipo de ensaio um corpo de prova é sujeito a um aumento gradual da carga de tração ao longo do seu eixo axial (Figura 27), alongando-o normalmente até à rotura. Estes provetes obedecem habitualmente a *standards* estabelecidos pelas normas aplicáveis. As máquinas de ensaios de tração são desenvolvidas para alongar o corpo de prova a uma taxa constante, e capaz de avaliar e registar durante o teste a força/alongamento que o provete está a ser sujeito. Por norma, em engenharia, um ensaio à tração está associado a um gráfico de linhas, onde no eixo YY está representada a tensão e no eixo XX está a deformação (Callistar, 2001)

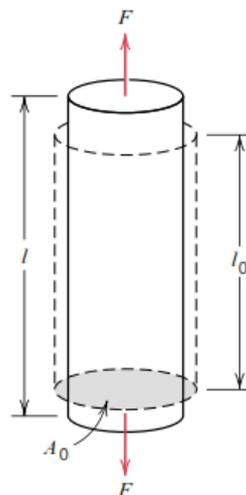


Figura 27 – Representação esquemática de um provete sujeito a tração. (reproduzido de Callistar, 2001)

A tensão,  $\sigma$ , é dada pela relação:

$$\sigma = F/A_0, [\text{Pa}] \quad (3.1)$$

Em que  $F$  é a força aplicada ao corpo de prova, expressa em Newton (N) e  $A_0$  a área da secção antes de aplicar a carga ( $\text{m}^2$ ).

A extensão,  $\epsilon$ , é definido como a variação de comprimento do provete e é dado pela equação:

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0}, [\%] \quad (3.2)$$

Em que,  $l_0$  representa o comprimento inicial do provete, antes de ser carregado, e  $l_i$  o comprimento instantâneo do mesmo.

### 3.1.1. ENSAIO DE TRAÇÃO – LAMINADO DE CORTIÇA

Os ensaios foram realizados na máquina de ensaios *Instron 8874* utilizando um transdutor de força *HBM Z30* de 500 N. A utilização deste transdutor obrigou à criação de alguns dispositivos para tornar possível a sua utilização na máquina em questão e podem ser consultados no APÊNDICE I. Na Figura 28 pode-se observar o transdutor já implementado na máquina de ensaios. A utilização de *HBM Z30* está relacionada com a incapacidade da célula de carga, incorporada na máquina de ensaios, para ler os valores de carga com que se estava a lidar (baixos), daí a opção por um dispositivo capaz de ler a carga durante o ensaio e que tivesse uma gama de leitura de valores mais baixos.



Figura 28 – Ensaio de tração.

Neste ensaio foram testados três laminados de aglomerado de cortiça (Ag1, Ag2 e Ag3) a uma velocidade de 0.15 mm/s, com dimensões dos provetes obedecendo à norma BS EN 10002-1:2001.

Os dados neste ensaio são obtidos de duas formas, a extensão é retirada da leitura realizada pela *Instron 8874* e a carga é obtida pela leitura do transdutor *HBM Z30*, sendo o cruzamento de dados realizado manualmente e tendo em conta o ponto de rotura. Este cruzamento é viável devido à mesma taxa de aquisição de dados (10 leituras por segundo), tanto na célula de carga como na máquina de ensaios, sendo o cruzamento destes dados foi realizado em Microsoft Excel 2010.

### 3.2. Ensaio de Compressão

À semelhança do ensaio de tração, o ensaio de compressão também permite conhecer algumas propriedades mecânicas dos materiais. Os ensaios de compressão são em tudo similares aos de tração, com exceção ao sentido da carga, neste caso realiza-se compressão sobre o provete, comprimindo-o, no seu eixo axial (Figura 29). O cálculo da tensão e da extensão é realizado usando as mesmas equações (3.1 e 3.2) da tração.

Os testes de compressão não são tão usuais como os de tração, visto ser mais complicado levar a cabo a sua realização e por acrescentar pouca informação à obtida nos ensaios de tração. Contudo, em algumas situações a sua realização é inevitável. (Callistar, 2001)

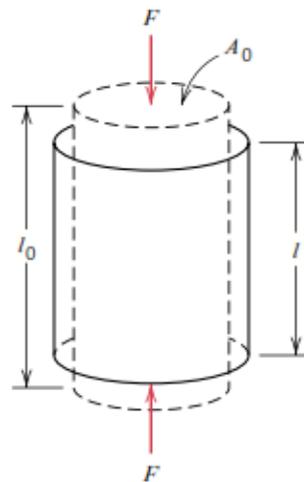


Figura 29 – Representação esquemática de um provete sujeito a compressão. (reproduzido de Callistar, 2001)

Foram realizados ensaios de compressão a duas formas de cortiça, num dos casos a cortiça encontrava-se na forma de granulado e no outro em blocos de aglomerado.

### 3.2.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO – GRANULADO

Os ensaios foram realizados no equipamento *Instron 8874*, incorporado com uma célula de carga de 25 kN, aproximadamente a carga a que todos os provetes foram submetidos.

Neste ensaio foram analisadas cinco granulometrias e dois tipos de cortiça, granulado de cortiça branco e negro, testados sempre à mesma velocidade (1 mm/s). Ensaaiaram-se:

- Gr 3-7;
- Gr 2-3;
- Gr 1-2;
- Gr 0,5-1;
- Gr negro;
- Pó.

Para a realização deste ensaio foi necessário conceber uma ferramenta capaz de conter o granulado durante o teste. Esta foi idealizada/concebida tendo em conta os seguintes aspetos: servir de recipiente para o granulado, facilidade de remoção do granulado após teste e ainda garantir que os vários granulados não escoassem entre a haste e o tubo (ver Figura 30 – a)), o que implicou uma conceção bastante rigorosa.

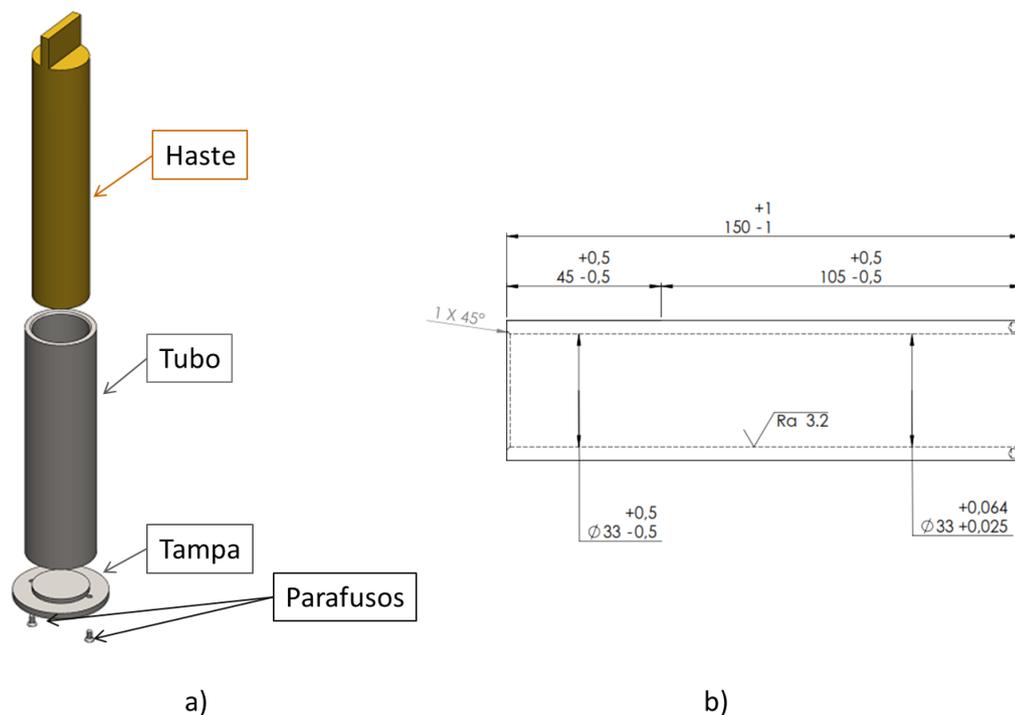


Figura 30 – a) representação esquemática da ferramenta (*SolidWorks*); b) parte do desenho técnico do tubo.

O ajustamento dimensional entre a haste/tampa e tubo foi realizado segundo o sistema ISO, através do qual se selecionou para uma montagem à mão e para aplicações de veios de êmbolos, a classe F8/h8 para uma dimensão nominal entre 30 a 50 mm.

Na Figura 30 – b), é possível observar que o diâmetro interno do tubo possui dois tipos de tolerâncias, isto para que durante o ensaio, inicialmente se garantisse um alinhamento entre o tubo e a haste mais fácil, e posteriormente não escoasse nenhum granulado entre a haste e o tubo.

Os materiais utilizados na ferramenta são todos metálicos, visto que estes possuem dureza e resistência mecânica superior à cortiça, impedindo qualquer tipo de dano na ferramenta. Assim na haste é utilizado latão, no tubo e na tampa aço de construção.

A haste foi obtida através de cavilha de latão com 33 mm de diâmetro, que já se encontrava dentro das tolerâncias pretendidas, apenas se utilizou uma fresadora para criar o entalhe onde a amarra da máquina de ensaios agarrava. Para a realização da tampa e do tubo utilizou-se um torno mecânico e um engenho de furar, a execução destes componentes esteve entregue a um profissional experiente.

Os desenhos técnicos de todos os componentes que constituem a ferramenta podem ser consultados no APÊNDICE II.

Na Figura 31 – b) pode-se observar a ferramenta durante um ensaio. No local indicado como “A” na Figura 31 – a) estava o granulado de cortiça durante os ensaios.

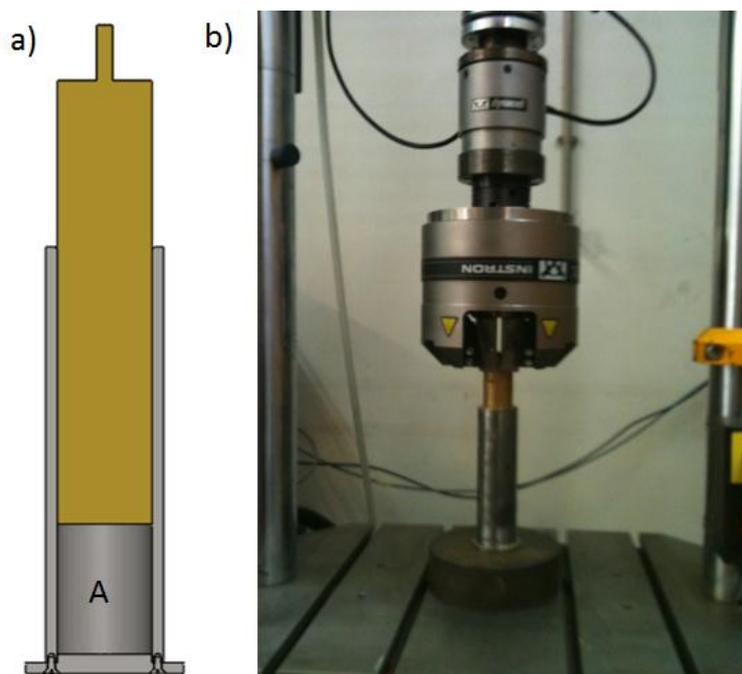


Figura 31 – Ferramenta de compressão, em *SolidWorks* a) e durante um ensaio b).

A máquina de ensaios exporta os dados em formato *.raw*, que são posteriormente trabalhados em *Microsoft Excel 2010*.

Independentemente da granulometria ensaiada, a quantidade de granulado foi sempre a mesma, cerca de 60 cm<sup>3</sup>. A medição deste volume foi realizada inicialmente por um balão volumétrico e posteriormente foi criado um recipiente com o volume definido.

### 3.2.2. ENSAIO DE COMPRESSÃO – BLOCO DE AGLOMERADO

Os ensaios ao bloco de aglomerado foram realizados na máquina de testes universal *DARTEC*, com uma célula de carga de 600 kN.

Os blocos de aglomerado de cortiça eram composto por granulado de 2 a 3 mm, com uma configuração cubica: 180x180x180 mm.

Este ensaio tinha por objetivo estudar o desempenho do coeficiente de *Poisson* e ainda realizar uma abordagem à capacidade da cortiça em absorver energia. Para avaliar o coeficiente de *Poisson* foi necessário foi essencial medir a variação dimensional do bloco na direção vertical e horizontal. Assim para medir a variação na direção vertical (axial) utilizou-se um comparador MITUTOYO ID-H0560 no qual a leitura foi realizada através de observação visual, e na horizontal (transversal), um extensómetro mecânico SANDNER EXA 100-10 que por sua vez estava conectado à máquina de ensaios (Figura 32).



Figura 32 – Ensaio de compressão - bloco de aglomerado

Para se poder utilizar o extensómetro na leitura da variação transversal foi necessário conceber uns dispositivos metálicos, os quais foram cravados na cortiça espaçados cerca de 100 mm um do outro e nos quais se acoplou o extensómetro.

Para a realização destes ensaios, estabeleceu-se um ensaio de compressão por rampas; isto é, estabeleceram-se determinadas percentagens de deformação do provete nas quais a máquina deveria manter a carga, possibilitando a leitura do valor do comparador para uma determinada carga. A velocidade nos vários patamares foi sempre a mesma, 0.05 mm/s. As percentagens de deformação do bloco foram: 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%, 18% e 20%.

Através do *software* da máquina obtiveram-se os dados da carga e do extensómetro mecânico. Como já foi referido, os dados da variação vertical foram obtidos pela leitura visual do comparador. O cruzamento destes foi realizado em *Microsoft Excel 2010*, onde foram trabalhados para obter o pretendido.

### **3.3. Estudo de Vibrações, Sistema Mão-Braço**

As vibrações mecânicas quando transmitidas ao corpo humano de uma forma frequente podem originar diversas patologias, no caso particular do sistema mão-braço, zona comumente associada à utilização de ferramentas criadoras de vibrações, a síndrome de *Raynaud* ou síndrome de dedo branco (Figura 33) é uma das doenças resultante dessa exposição. (Griffin,1990)

A transmissão de vibrações ao sistema mão-braço tem sido alvo de variadas investigações, que têm por objetivo perceber, quantificar e tentar reduzir a transmissibilidade de vibrações. (Griffin,1998)



Figura 33 – Fenómeno de Raynaud. (reproduzido de Silva et al., 2011)

Os métodos científicos de análise de transmissão de vibrações são dois, um método sistemático de análise a cada variável em jogo e/ou um método experimental, onde o “real” é simulado. (Griffin, 1998) No presente trabalho opta-se pelo método experimental para analisar o efeito de derivados da cortiça na absorção de vibrações no sistema mão-braço, sendo o método baseado na

Norma ISO 5349-1, na qual são definidos requisitos gerais para a medição da transmissão de vibrações ao sistema mão-braço e na qual é sustentada a explicação teórica deste tipo de ensaio.

Neste tipo de ensaio, a mão deve estar em contacto com a ferramenta vibratória e a força exercida para acoplar a mão à ferramenta deve ser a usualmente empregue em situações comuns de utilização da ferramenta.

A medição da transmissibilidade de vibrações deve ser realizada nas três direções de um sistema ortogonal de coordenadas, com recurso a acelerómetros, que por sua vez devem colocados e orientados segundo o esquema representado na Figura 34.

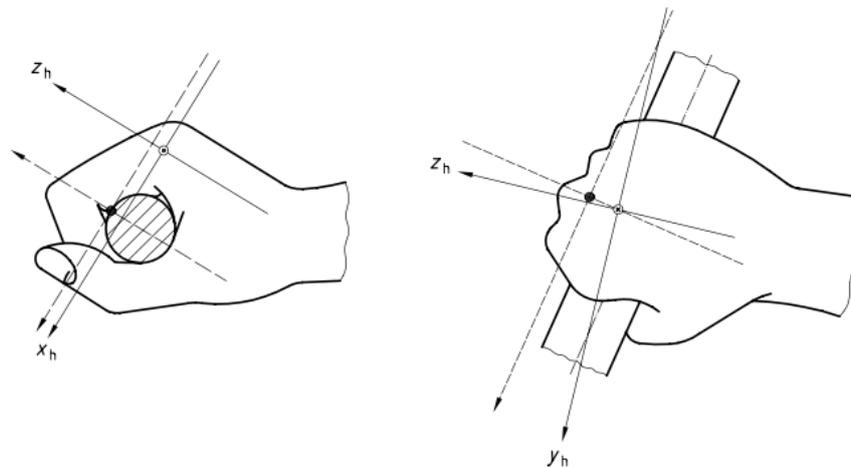


Figura 34 – Sistema de coordenadas *standard* a utilizar no aperto de dispositivos cilíndricos.  
(reproduzido de ISO 5349-1, 2001)

A transmissibilidade de vibrações é assim medida em três direções (X, Y e Z) e expressa em m/s<sup>2</sup>. Os valores da aceleração serão estudados em termos de aceleração eficaz por banda de um terço de oitava em frequências de 6,3 a 1250 Hz.

Os valores de aceleração nas várias frequências devem ser afetados por um fator de ponderação,  $W_{hi}$  (Tabela 8).

O valor eficaz da aceleração ponderada em frequência em cada eixo é calculado segundo a seguinte expressão:

$$a_{hw} = \sqrt{\sum (W_{hi} \times a_{hi})^2} \quad (3.3)$$

Onde:

$W_{hi}$ , é o fator de ponderação (Tabela 8);

$a_{hi}$ , é o valor da aceleração eficaz medida na banda de um terço de oitava, [m/s<sup>2</sup>].

Tabela 8 – Fator de ponderação para transmissão de vibrações (adaptado de ISO 5349-1, 2001)

Número da banda de frequência <sup>a</sup> <i>i</i>	Frequência Média Nominal Hz	Fator de Ponderação Whi
8	6,3	0,727
9	8	0,873
10	10	0,951
11	12,5	0,958
12	16	0,896
13	20	0,782
14	25	0,647
15	31,5	0,519
16	40	0,411
17	50	0,324
18	63	0,256
19	80	0,202
20	100	0,16
21	125	0,127
22	160	0,101
23	200	0,0799
24	250	0,0634
25	315	0,0503
26	400	0,0398
27	500	0,0314
28	630	0,0245
29	800	0,0186
30	1000	0,0135
31	1250	0,00894

a, o índice *i* é o número atribuído a cada banda de frequência de acordo com IEC 61260

A combinação das acelerações nos três eixos dará origem ao valor total de vibração,  $a_{hv}$ , obtido pela soma quadrática das três componentes.

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2} \quad (3.4)$$

O valor total de vibração é utilizado para calcular o valor de exposição diária, A(8), sendo este o valor de referência estabelecido na diretiva 2002/44/CE do Parlamento Europeu e do Conselho para a prevenção de riscos resultantes de vibrações mecânicas para a saúde

O valor de exposição diária é dado pela seguinte expressão:

$$A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T}{T_0}}, [m/s^2] \quad (3.5)$$

Onde:

$T$  o tempo de duração do ensaio;

$T_0$  o tempo de referencia, ou seja, 8 horas equivalente a um dia de trabalho.

Na mesma diretiva acima referida, são definidos valores de referência de exposição diária que trabalhadores sujeitos a riscos devidos a vibrações mecânicas, prevenindo eventuais problemas de saúde associados a esta ação.

Segundo a directiva 2002/44/CE (2002: p.14):

*“Para as vibrações transmitidas ao sistema mão-braço:*

*a) O valor-limite de exposição diária normalizada, correspondente a um período de referência de 8 horas, é fixado em  $5 \text{ m/s}^2$ ;*

*b) O valor de exposição diária normalizada, correspondente a um período de referência de 8 horas, que desencadeia a acção é fixado em  $2,5 \text{ m/s}^2$ .”*

### 3.3.1. ESTUDO DE VIBRAÇÕES – GRANULADO E LAMINADO DE CORTIÇA

Na realização deste ensaio recorreu-se a um berbequim com martelo, acelerómetros *PCB Piezotronics* modelo 333B30, sistema de aquisição de dados *LMS SCADAS Mobile SCM05* e o *software* de análise de dados *LMS Test.Xpress*.

Na realização do ensaio, a fonte vibratória foi obtida com o operar do berbequim na furação de um bloco de pedra. Os acelerómetros são acoplados a uma peça de alumínio (Figura 35) com a orientação devida.

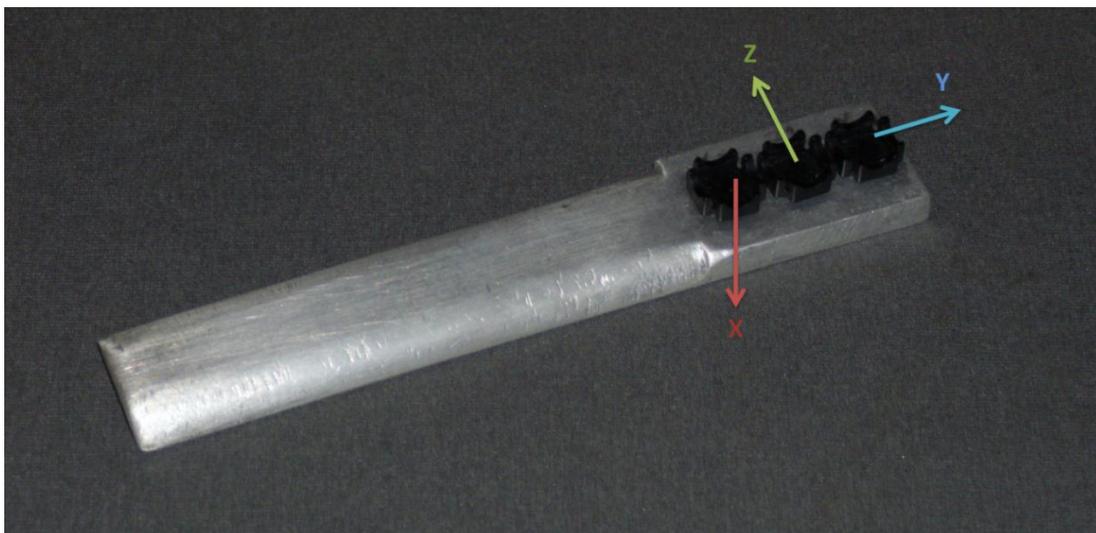


Figura 35 – Representação esquemática da orientação ortogonal dos acelerómetros.

Durante os ensaios, ao operar o berbequim, a mão do operador agarrava a peça de alumínio, o material absorvente e o berbequim, a forma de montagem é apresentada na Figura 36.

Por forma a possuir um ponto de referência e comparação foi realizado um ensaio sem material absorvente.

Foram ensaiados dois materiais absorventes, cortiça e gel, sendo que o gel foi testado apenas para se obter mais um valor de comparação, já para cortiça, realizaram-se ensaios aos seguintes derivados:

- Ag1;
- Ag2;
- Ag3;
- Gr 3-7;
- Gr 2-3;
- Gr 1-2;
- Gr 0,5-1;
- Gr negro
- Pó.



Figura 36 – Ensaio de vibrações – laminado de cortiça

A utilização de granulado de cortiça impôs a criação de uma bolsa (Figura 37), que fosse capaz de servir de recipiente para a cortiça e que também se ajusta-se ao punho do berbequim, a quantidade de granulado foi sempre igual, aproximadamente 60 cm<sup>3</sup>. Já os ensaios com laminado de cortiça, dada a flexibilidade da cortiça, foram recortados fragmentos com 11 cm por 8 cm que se ajustavam perfeitamente ao punho do berbequim.

Os valores de aceleração são obtidos pelos acelerómetros, que estão ligados ao sistema de aquisição de dados, que por sua vez faz a interface com o *software* de análise de dados, estes valores são posteriormente trabalhados e analisados em *Microsoft Office 2010*, sendo o valor de comparação entre os diversos materiais o valor de exposição diária, A(8), (equação 3.3).



Figura 37 – Bolsa para granulado

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente capítulo serão expostos e discutidos os resultados referentes aos vários ensaios de tração, compressão e vibrações.

### 4.1. Ensaio de Tração

Antes de tecer algum comentário convém clarificar a quantidade de ensaios realizados a cada aglomerado e o método de cálculo realizado para obter a extensão.

Assim para cada aglomerado foram realizados três ensaios e de seguida elaborada uma curva força-deslocamento para cada laminado, com o objetivo de verificar se os três ensaios a cada laminado possuíam o mesmo comportamento, o que se veio a verificar.

A extensão é calculada segundo a equação 3.1, em o comprimento inicial do provete ( $l_0$ ) é 120 mm e o comprimento instantâneo ( $l_i$ ) é obtido pela adição ao comprimento inicial do valor de deslocamento obtido pela máquina de ensaios.

Os resultados obtidos no ensaio de tração estão espelhados no gráfico da Figura 38.

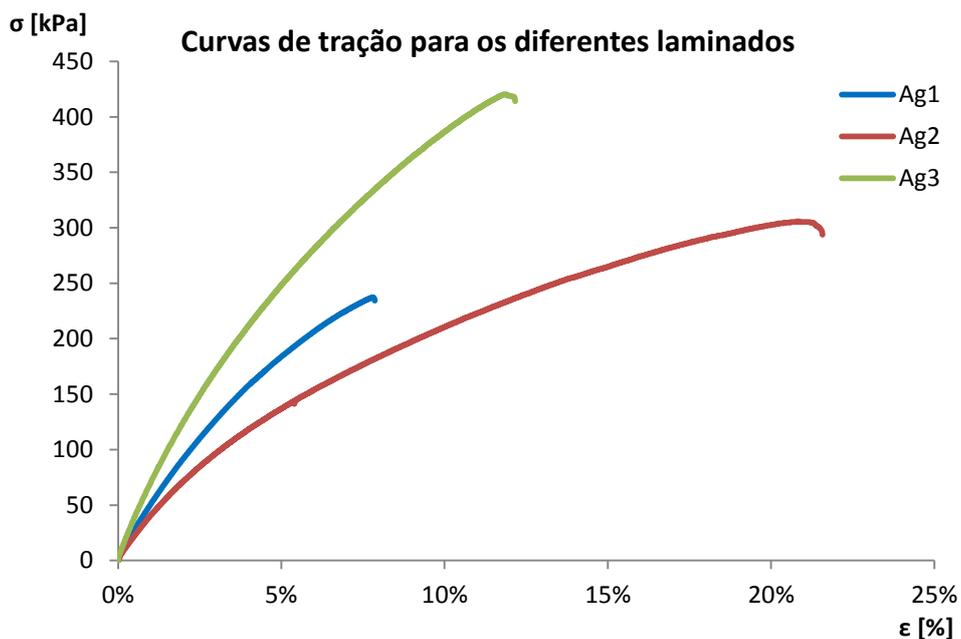


Figura 38 – Curva de tração (Tensão-Extensão) para os diferentes aglomerados de cortiça.

Observando o gráfico da Figura 38, pode-se constatar que a tensão de rutura do laminado de 2-3 mm é cerca de 237 kPa, correspondendo a uma extensão de cerca de 7,8%. Quanto ao laminado de 1-2 mm, a tensão de rutura é cerca de 305 kPa, deformando cerca de 21,1%. O laminado de 0.5-1 mm apresenta uma tensão de rutura de cerca de 420 kPa, correspondendo a uma extensão de 11,9% aproximadamente.

A curva de tensão-deformação não apresenta nitidamente uma região elástica, dificultando a apresentação do módulo de *Young*, mas numa forma de tentar apontar um número para o seu valor procedeu-se à criação de uma reta tangente à curva de tensão-extensão para valores muito baixos de extensão. Apresenta-se apenas o gráfico (Figura 39) do laminado de granulometria de 2 a 3 mm pois para as outras duas granulometrias foi realizado da mesma forma. Apresenta-se ainda o gráfico da Figura 40 onde se expõe os mesmos resultados mas focando os valores de extensão mais baixos.

Na Tabela 9 são apresentados os valores obtidos no ensaio de tração.

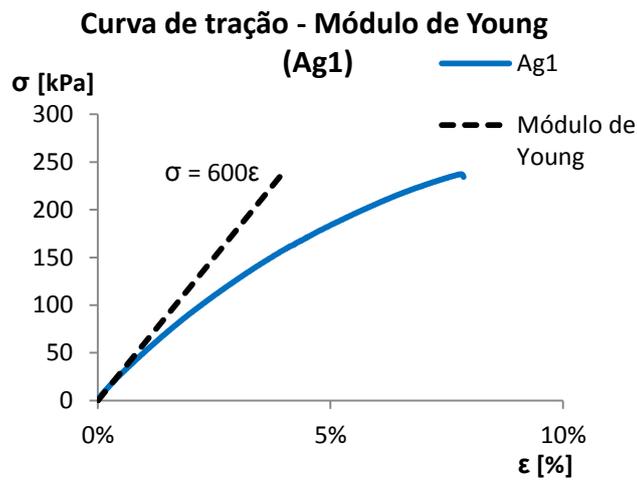


Figura 39 – Curva de tração e módulo *Young* para o aglomerado 2 a 3 mm.

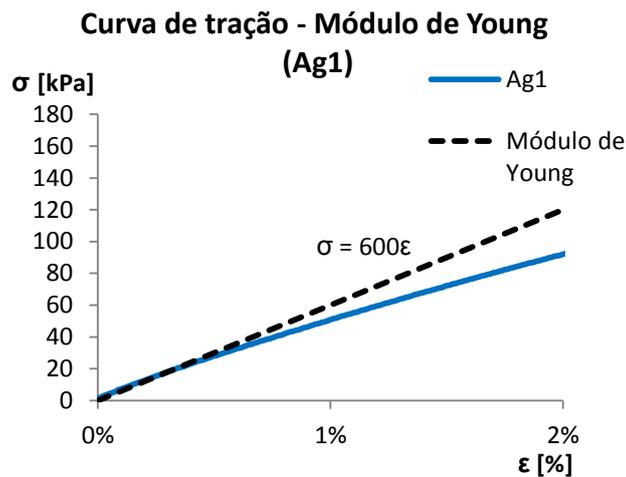


Figura 40 – Curva de tração e módulo de *Young* para o aglomerado 2 a 3 mm, focando a região elástica.

Tabela 9 – Valores obtidos no ensaio de tração.

Granulometria [mm]	Comprimento Inicial [mm]	Tensão de rotura [kPa]	Extensão até rotura [%]	Alongamento até rotura [mm]	Módulo de <i>Young</i> [MPa]
2 a 3	120	237	7,8	9,3	0,6
1 a 2	120	305	21,1	25,4	0,4
0,5 a 1	120	420	11,9	14,3	0,8

A configuração da curva obtida (Figura 38) nos ensaios realizados assemelha-se ao alcançado por Silva e colaboradores (2005) no seu estudo, nas direções tangencial e axial.

No que concerne à tensão de rotura, Silva et al. (2005) obtiveram valores situados na ordem de 1 MPa, enquanto no ensaio realizado se obtiveram valores ligeiramente inferiores. Relativamente, aos valores de extensão, os mesmos autores apontam valores entre 5 a 9%, sendo que no ensaio realizado apenas o laminado Ag1 obteve valores dentro do intervalo referido. Estes autores apresentam valores para módulo de elasticidade, nas várias direções, entre 7 MPa e 14 MPa, valores bastante superiores aos obtidos. Estes resultados podem ser justificados pelas diferenças na forma do material, visto que Silva e colaboradores desenvolveram os seus ensaios com cortiça em forma natural e os ensaios realizados neste trabalho terem utilizado aglomerado, e no caso do módulo de *Young* além destas diferenças pode ser ainda justificado pela forma como este é obtido no presente trabalho. No entanto, a discrepância entre os valores obtidos para tensão e extensão não é considerada expressiva.

Na tensão de rotura pode-se verificar que à medida que diminuimos o tamanho da granulometria do laminado, o seu valor aumenta. Pelo contrário, os valores de extensão parece ter um carácter incerto, isto é, parece não existir uma relação proporcional entre o tamanho da granulometria do laminado e a sua capacidade de deformação. Poder-se-á dizer que para os valores de tensão de rotura e extensão existe um valor ideal para a mistura de tamanho de granulado e a quantidade de aglutinante. Já o módulo de *Young*, à semelhança do que acontece com a extensão, possui um carácter incerto, diminuído de Ag1 para Ag2 e aumentando significativamente de Ag2 para Ag3.

Os resultados da tensão de rotura obtidos vão de encontro ao esperado, uma vez que, com a diminuição da granulometria do laminado, à semelhança do que acontece com outros materiais, aumenta a tensão de rotura. No entanto, a extensão escapa ao esperado, visto que, o que se previa era que aumentasse com a diminuição granulometria do laminado, o que não se verificou. Tal pode justificar-se devido ao facto do aglomerado de cortiça integrar na sua constituição resina, e dessa forma

quanto menor o tamanho da granulometria do aglomerado maior será a quantidade de resina que o integra. Assim este facto pode justificar o aumento da tensão de rutura e o conseqüente aumento da rigidez do material, levando a uma menor deformação.

#### 4.2. Ensaio de Compressão – Granulado

Neste teste a quantidade de ensaios realizados a cada granulado e o método de cálculo da extensão foram realizados da mesma forma que no ensaio de tração (secção 4.1), apenas se procede à atribuição de sinal positivo à extensão.

De salientar que novamente os três ensaios realizados a cada um dos granulados apresentaram sempre o mesmo comportamento.

Os resultados obtidos no ensaio de compressão para os diferentes granulados são apresentados no gráfico da Figura 41.

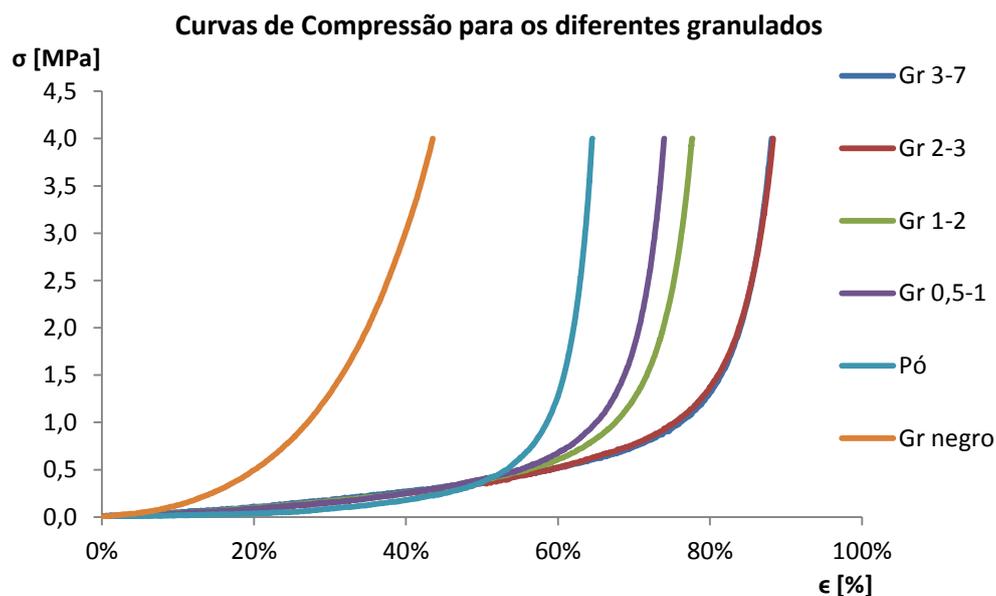


Figura 41 – Curva de compressão (Tensão-Deformação) para os diferentes granulados.

Para espelhar de uma forma mais clara os resultados do ensaio de compressão para os diferentes granulados fez-se uma divisão das várias curvas do gráfico da Figura 41, apresentando-se de seguida as curvas emparelhadas por semelhança, com exceção para o gráfico da Figura 44.

Na Tabela 10 são apresentados os principais valores obtidos no ensaio de compressão aos granulados.

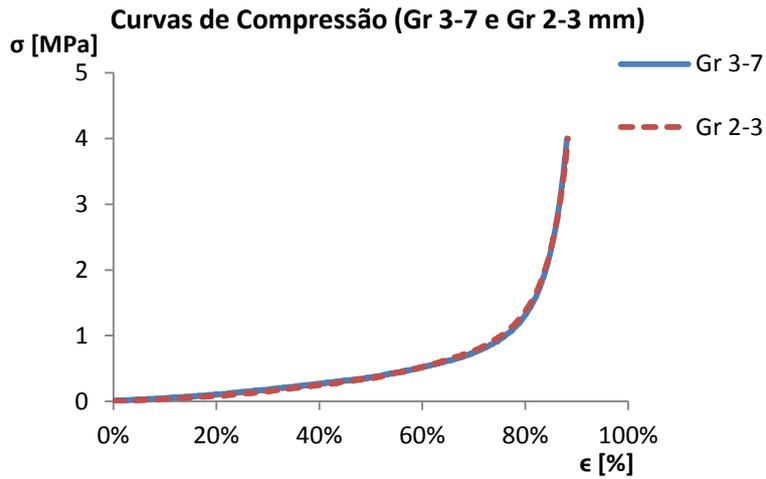


Figura 42 – Curva de compressão (tensão deformação) para os granulados 3 a 7 mm e 2 a 3 mm.

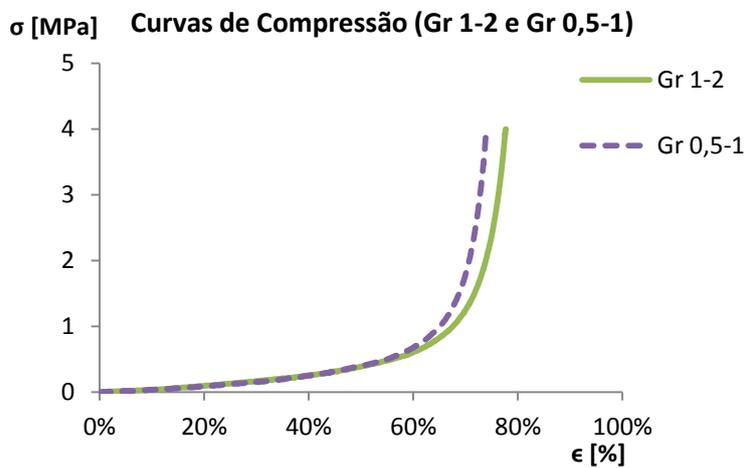


Figura 43 – Curva de compressão (tensão deformação) para os granulados 1 a 2 mm e 0,5 a 1 mm.

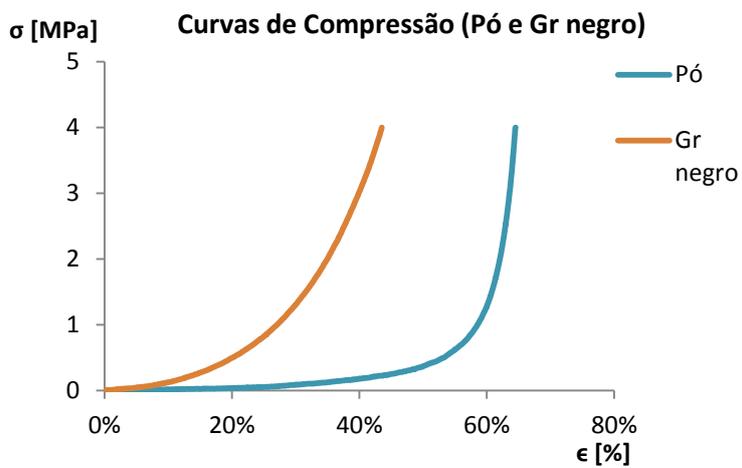


Figura 44 – Curva de compressão (tensão deformação) para pó e aglomerado negro.

Tabela 10 – Valores óbitos no ensaio de compressão

Granulado	Comprimento Inicial [mm]	Tensão de colapso [MPa]	Extensão até colapso [%]	Alongamento até colapso [mm]
Gr 3-7	70	0,82	72,4	50,70
Gr 2-3	70	0,86	72,4	50,69
Gr 1-2	70	0,75	64	44,80
Gr 0,5-1	70	0,65	61,3	42,90
Pó	70	0,29	41	32,90
Gr negro	70	0,61	22	15,40

A tipologia da curva de compressão obtida é diferente do apresentado por Gibson e Ashby (1997) no seu trabalho (secção 2.4).

Em relação à tensão de colapso, Silva et al. (2005) obtiveram valores entre 0,6 e 0,8 MPa nas diferentes direcções de cortiça natural. Observando a Tabela 10 percebe-se que os valores obtidos encontram-se dentro ou muito próximo do intervalo referido, com exceção para o pó que apresenta um valor inferior. Os mesmos autores apontam valores de extensão até colapso entre 40 a 60%, assim verifica-se que apenas o Pó possui extensão no intervalo em questão. Os granulados Gr 1-2 e Gr 0,5-1 encontram-se muito próximos desse intervalo. Mais uma vez estes resultados, ainda que muito próximo do apontado em Silva et al. (2005), podem ser justificados pela diferente forma da cortiça.

A configuração da curva de compressão obtida não apresenta a região elástica esperada para deformações iniciais, no entanto revela uma região com um patamar muito próximo do horizontal seguido de uma subida acentuada. Note-se que a transição entre a primeira região cujo comportamento se aproxima de uma reta, e a segunda região marcadamente de baixa compressibilidade, dá-se em todos os casos a uma tensão entre 0,5 e 1 MPa. Mesmo na zona de baixa compressibilidade se nota uma certa uniformidade de comportamento. Estes resultados podem ser explicados pela tipologia dos ensaios, e forma do material a ensaiar, visto que, nos ensaios realizados se estava a trabalhar com granulado e não com cortiça natural (utilizada por Silva e seus colaboradores (2005)) e o material utilizado estava confinado aos limites da ferramenta de compressão, invalidando qualquer tipo de expansão que o material, eventualmente, poderia sofrer.

Pode-se observar que os granulados de Gr 3-7, Gr 2-3, Gr 1-2, Gr 0,5-1 mm e o pó têm um comportamento muito semelhante. Visto que os dois granulados de granulometria superior têm um

comportamento muito semelhante, poder-se-á afirmar que, à medida que se baixa a granulometria, baixa também a tensão e extensão até colapso. Estes resultados vão de encontro ao esperado, uma vez que o espaço livre entre grãos e sua capacidade para absorver energia será tanto inferior quanto menor a granulometria. O único granulado com valores muito dispares dos outros é o granulado negro, sendo que esta diferença poderá estar relacionada com o seu processo produtivo que tornará o material mais rígido incapaz de se deformar na mesma ordem dos outros, ainda assim a sua tensão de colapso está muito próxima do granulado branco com a mesma granulometria.

### 4.3. Ensaio de Compressão – Bloco de aglomerado

Neste tipo de ensaio foram realizados dois ensaios a dois blocos de aglomerado com as dimensões definidas na secção 3.2.2 e os dados do deslocamento retirados diretamente da leitura realizada pela máquina de ensaios.

Na Figura 45 estão representadas as direções das leituras, onde  $d\epsilon_t$  representa a deformação na direção transversal (variação dimensional transversal) e representa  $d\epsilon_a$  a deformação na direção axial (variação dimensional vertical), e ainda F, que representa a direção da carga aplicada durante o ensaio.

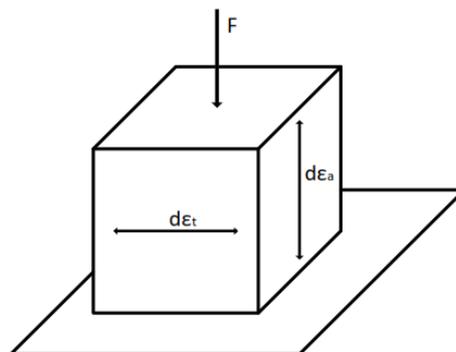


Figura 45 – Representação esquemática do ensaio à compressão realizado ao cubo de cortiça.

Os resultados obtidos através do ensaio de compressão do bloco de aglomerado para avaliar o comportamento do coeficiente de *Poisson*, estão espelhados no gráfico da Figura 46.

Importa ainda expor o comportamento à compressão dos blocos de cortiça, apresentando os resultados da variação dimensional axial e da variação dimensional transversal consoante a carga aplicada, espelhados nos gráficos da Figura 47 e Figura 48 respetivamente.

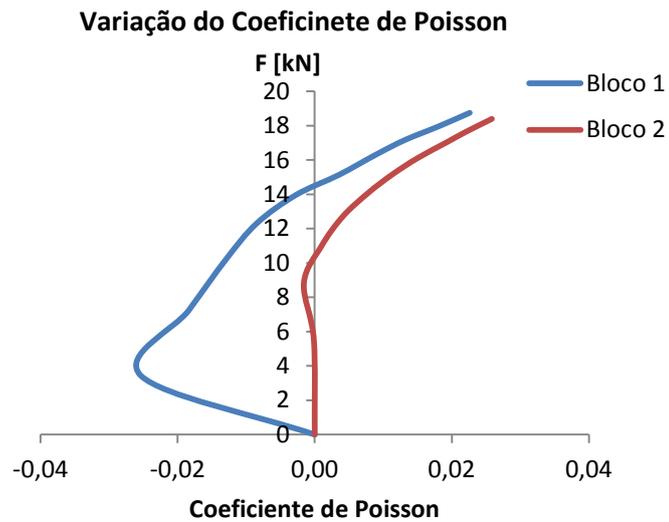


Figura 46 – Curvas de variação do coeficiente de *Poisson* – carga aplicada.

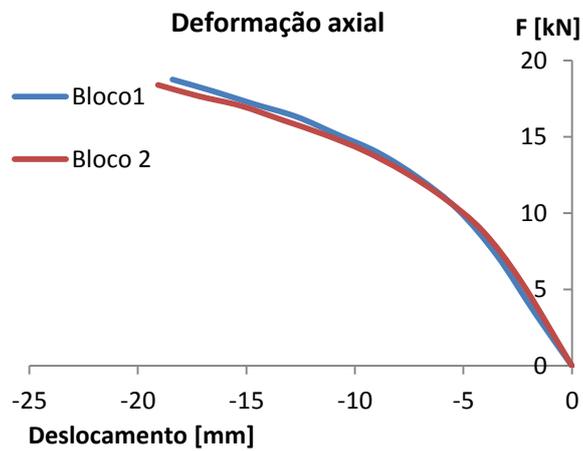


Figura 47 – Curva de compressão (carga - deslocamento) na direção axial.

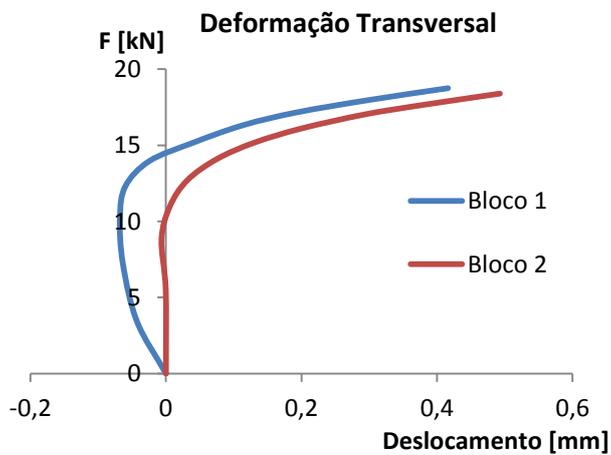


Figura 48 – Curva de compressão (carga - deslocamento) na direção transversal.

O coeficiente de *Poisson* dos dois blocos encontra-se nos seguintes intervalos:

$$-0,0254 \leq v_{bloco\ 1} \leq 0,00226$$

$$-0,0160 \leq v_{bloco\ 2} \leq 0,00258$$

No que respeita à variação do coeficiente de *Poisson*, Silva e seus colaboradores (2005) apontam para valores deste coeficiente baixos mas nunca negativos, determinados a partir das várias direções de cortiça natural, pelo que neste trabalho obtêm-se valores, para derivados de cortiça, ligeiramente abaixo do limite superior e com valores negativos para o limite inferior. Os mesmos autores referem no seu trabalho que a cortiça poderá obter um coeficiente de *Poisson* negativo, resultante das várias direções de caracterização do ensaio.

Observando o gráfico da Figura 46, verifica-se que a variação do coeficiente de *Poisson* é diferente nos dois casos (bloco 1 e bloco 2). No caso do bloco 1 a variação ocorre de uma forma mais acentuada, sendo negativa para valores iniciais de carga, mantendo-se negativa até cerca de 14 kN, valor após o qual passa para valores positivos de coeficiente de *Poisson*. No caso do bloco 2 a variação é menos acentuada e diferente do bloco 1, pois em valores iniciais de carga o coeficiente de *Poisson* é positivo e muito próximo de zero, passando para negativo após ser atingida a carga de cerca de 5,5 kN e mantendo-se negativo até cerca de 10 kN, após o qual o coeficiente de *Poisson* se torna positivo. Note-se ainda que a contração é superior à expansão do bloco de aglomerado de cortiça.

Pelos resultados obtidos, é de salientar, em primeiro lugar, a diferença de comportamento dos dois blocos, uma vez que nos dois casos foram obtidos a partir do mesmo aglomerado, admitia-se que detivessem um comportamento muito semelhante, o que não se veio a verificar. Este resultado poderá ser explicado pelas tensões internas do material provocadas pelo processo produtivo, dado que o aglomerado é prensado apenas numa direção poderá ter provocado uma deformação permanente nos favos do granulado e retendo tensões internas nessa direção que após polimerização do ligante impeçam o retorno dos favos à fase inicial. Por esta razão as propriedades do material podem ter sido alteradas, comportando-se não como um material isotrópico mas como um material anisotrópico. Destaca-se ainda a obtenção de um coeficiente de *Poisson* dinâmico, passando de negativo para positivo. Esta variação pode ser explicada pelo comportamento das células e pela influência do ligante, sabe-se que em materiais em forma de favo de mel as “células” podem ter um comportamento inicial de contração quando sujeitas a cargas de compressão (Gibson, 1997). Então poder-se-á afirmar que no caso em estudo, quando se sujeita a cortiça a cargas de compressão, inicialmente irá contrair, graças à contração das células e com o progressivo aumento da carga dá-se uma expansão do material, possivelmente graças à influência do ligante.

Relativamente à capacidade da cortiça em absorver energia, apresenta-se uma curva tensão-extensão de um dos blocos de aglomerado (bloco 1) e com o auxílio à função “linha de tendência” do Microsoft Excel 2010 calcula-se a área sob a curva, que representa a energia absorvida pelo material. No gráfico Figura 49 pode ser observado o resultado. Optou-se por uma “linha de tendência” polinomial de 3º grau, visto que foi a que mais se aproximou da curva tensão-extensão do bloco 1.

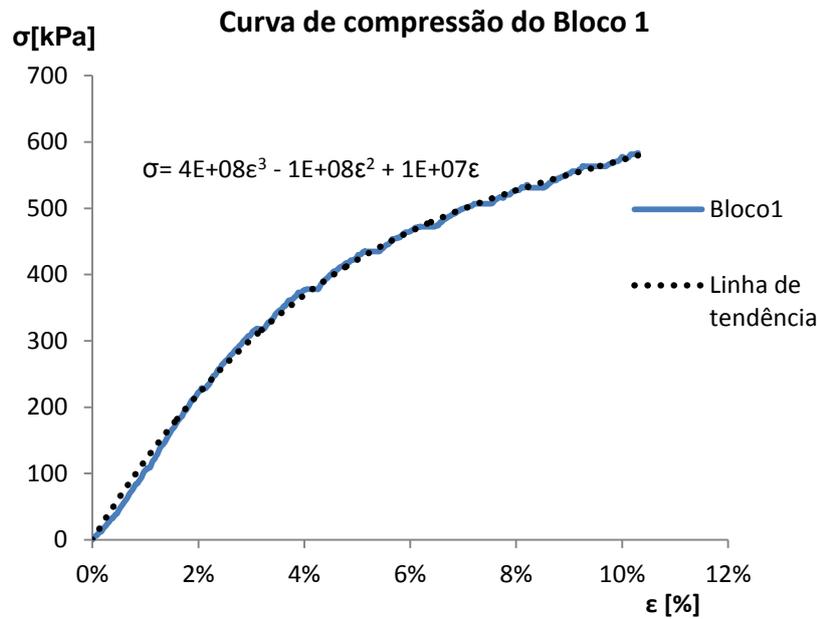


Figura 49 – Curva de compressão e linha de tendência do bloco 1.

A área (A) pode ser calculada pelo integral definido da equação da linha de tendência, representada no gráfico da Figura 49, no intervalo 0 e 0,103 da extensão.

$$A = \int_0^{0,103} 4 \times 10^8 x^3 - 1 \times 10^8 x^2 + 1 \times 10^7 x \, dx \Leftrightarrow A = 28 \text{ J/g}$$

Assim obteve-se que a energia absorvida pelo bloco de aglomerado durante o ensaio foi cerca de 28 J/g.

Visto que no ensaio realizado a deformação imposta do bloco foi reduzida e admitindo que este ainda poderia “aguentar” mais carga até que entrasse na zona de colapso, torna a comparação com outros materiais, em termos de energia absorvida, algo desapropriado, visto que os dados existentes relativamente à energia absorvida de outros materiais contemplam a energia absorvida até estes serem rotura ou colapso.

Ainda assim o cálculo deste valor ajudou a melhorar o conhecimento deste material e eventualmente ser útil em trabalhos futuros.

#### 4.4. Estudo de Vibrações

O resultado do ensaio de vibrações, em termos de valor exposição diária, é exibido no gráfico da Figura 50.

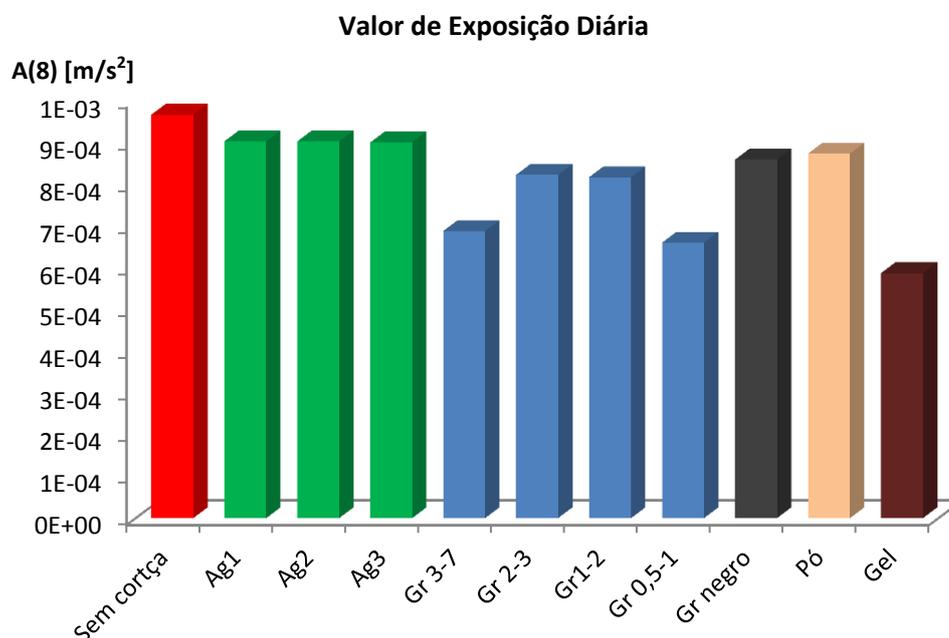


Figura 50 – Valores de exposição diária para os diferentes casos de estudo.

Na revisão bibliográfica não foram encontradas informações sobre estes dados.

Observando o gráfico da Figura 50, afirma-se que Ag1, Ag2, Ag3, Gr negro e Pó possuem uma capacidade de absorção de vibrações muito baixa, visto que os seus valores de exposição diária (0,0009 m/s<sup>2</sup>) estão muito próximos do valor registrado no ensaio realizado sem qualquer material absorvente (sem cortiça – 0,0010 m/s<sup>2</sup>). Pelo contrário os granulados, apresentados a azul no gráfico da Figura 50, apresentam uma capacidade de absorção de vibrações relativamente melhor, pois os seus valores de exposição diária encontram-se ligeiramente abaixo do valor registrado no ensaio sem cortiça mas ainda superior ao valor registrado no ensaio com gel. Ainda no que concerne a estes granulados, pode-se verificar que são os granulados com granulometrias de 3 a 7 mm e 0,5 a 1 mm que apresentam os valores de exposição diária mais baixos, 0,0007 m/s<sup>2</sup> nos dois casos.

De uma forma geral os resultados vão de encontro ao esperado, admitia-se que todos os ensaios realizados com material absorvente detivessem valores de exposição diária inferiores ao ensaio realizado sem material absorvente e ainda que o gel possuísse o valor de exposição diária dos mais baixos. Mas analisando cada tipo de material de forma particular pode-se constatar que alguns casos fogem ao esperado.

No caso dos laminados, esperava-se um efeito superior na absorção de vibrações e ainda que fosse notada alguma variação do valor de exposição diária com variação da granulometria dos laminados, o que não se verificou. Estes resultados podem ser explicados, pela reduzida espessura dos laminados de aglomerado de cortiça e ainda pela sua forma (aglomerado). O aumento da espessura do laminado poderia ser estudado, mas não se procedeu a um estudo, visto que espessuras mais elevadas não trariam aplicações práticas nesta aplicação por não serem compatíveis com as dimensões comportadas pela mão.

Quanto ao Pó e ao granulado negro, os resultados, em relação aos outros tipos, vão de encontro ao esperado; visto que, o granulado negro é um material mais rígido do que o granulado branco e a rigidez é nociva à absorção de vibrações, já os resultados do pó podem ser explicados pela reduzida granulometria implicando uma baixa capacidade de absorção de energia vibratória.

Em relação aos granulados brancos pode-se constatar que em parte os resultados ficaram aquém do esperado. Admitia-se que se verificasse um efeito mais acentuado da granulometria no valor diário de exposição, isto é, o aumento ou diminuição da granulometria provocasse um efeito mais influente no valor de exposição diária, o que não se veio a verificar. Por outro lado esperava-se que os valores mais baixos de valor de exposição diária ocorressem nos granulados brancos, dado serem um material menos rígido do que o granulado negro e ainda que a sua forma em granulado contribuísse de forma positiva na absorção de vibrações, o que se veio a verificar.

Assim poder-se-á afirmar que os granulados de cortiça possuem características favoráveis neste campo de aplicação, embora não consigam suplantam as soluções já existentes.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A cortiça é um material 100% vegetal, com enorme aplicabilidade e com um valor singular na economia portuguesa. Face à atual situação económica é essencial conhecer ainda melhor esta matéria-prima e compreender o seu comportamento para ser possível explorar ao máximo as suas potencialidades e aumentar o seu campo de aplicação. Nestas condições importa também aprofundar o conhecimento das características mecânicas da cortiça já numa fase mais adiantada da sua industrialização.

Posto isto, os objetivos deste trabalho eram: caracterizar o comportamento mecânico dos derivados de cortiça e caracterizar o seu comportamento anti-vibratório.

Neste sentido para caracterizar o comportamento mecânico de derivados de cortiça realizaram-se ensaios de tração e compressão.

No ensaio de tração concluiu-se que a tensão de rotura dos derivados de cortiça encontra-se ligeiramente abaixo dos valores de referência da cortiça natural. Pode concluir-se ainda que à medida que diminui a granulometria dos aglomerados de cortiça aumenta a sua tensão de rotura. Assim poderá ser interessante estudar outros ligantes alternativos, que favoreçam estas características do derivado.

Quanto aos ensaios de compressão, os resultados obtidos não demonstraram o patamar elástico esperado no gráfico de tensão-deformação. Observou-se ainda que os diversos granulados brancos possuem um comportamento mecânico à compressão idêntico, ao contrário do granulado negro, que apresenta um comportamento diferente. Relativamente aos ensaios de compressão realizados ao bloco de aglomerado de cortiça observou-se um coeficiente de *Poisson* negativo, que ao longo do ensaio passou a positivo.

Face aos resultados obtidos no ensaio de compressão ao bloco de aglomerado, que revelaram um coeficiente de *Poisson* peculiar, no futuro podem-se ponderar algumas aplicações práticas para este material.

Apesar de neste trabalho não se aprofundar as questões relativas à capacidade da cortiça e dos seus derivados absorverem energia, uma das aplicabilidades equacionadas foi a utilização de aglomerado de cortiça como espaçador entre o prumo e o rail de proteção, utilizados em vias automobilísticas.

Para caracterizar o comportamento anti-vibratório dos derivados de cortiça recorreu-se a um ensaio experimental baseado na Norma ISO 5349-1, de onde se concluiu que os resultados obtidos

nos aglomerados brancos de cortiça, com o pó e com o granulado negro não parecem ser relevantes, ao passo que, os resultados dos granulados de cortiça são relevantes.

Os resultados obtidos no estudo de vibrações podem ser o primeiro passo para aplicar derivados de cortiça em sistemas de proteção que preservem as pessoas de eventuais efeitos nocivos das vibrações na sua saúde. Tal como referido anteriormente, o sistema mão-braço é particularmente sujeito a vibrações, pelo que luvas de proteção que contenham cortiça ou derivados de cortiça poderão ser uma mais-valia para diminuir o impacto nocivo das vibrações nesse sistema.

Estes resultados permitem concluir que os derivados de cortiça possuem potencial para serem utilizados em diversas aplicações e em diferentes áreas. Contudo é necessário desenvolver mais estudos envolvendo estas matérias. Assim, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Observação do efeito da velocidade de ensaio de compressão e tração nos derivados de cortiça;
- Efeito do aglutinante no comportamento mecânico nos derivados de cortiça;
- Estudar o comportamento de derivados de cortiça na absorção da energia de impacto;
- Estudo do comportamento à compressão de aglomerados de cortiça;
- Aprofundar o comportamento anti-vibratório dos derivados de cortiça;
- Estudos que permitam encontrar um material que adicionado à cortiça otimize a sua capacidade anti-vibratória.

## BIBLIOGRAFIA E REFERÊNCIAS

ACOUSTICORK. *AcoustiCORK Installation Instructions*. [Em linha]. [s.l.], Grupo Amorim 2012. [Consultado em 09/11/2012]. Disponível em URL: <http://www.acousticork.eu/client/skins/english/pagina.asp?template=geral&produto=1>

ASHBY, Michael. *Materials selection in mechanical design*. 3<sup>a</sup> ed. Oxford: Pergamon Press. 2005. ISBN 0 7506 6168 2.

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE CORTIÇA. [Em linha]. [s.l.]: APCOR, 2012. [Consultado em 24/08/12]. Disponível em WWW: <http://apcor.pt>.

BOM, Luís. *Comportamento à compressão e tracção da cortiça: estudo numérico*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro 2010. Disponível em URL: [ria.ua.pt/bitstream/10773/2539/1/2010002064.pdf](http://ria.ua.pt/bitstream/10773/2539/1/2010002064.pdf)

CALLISTAR, William D. *Fundamentals of materials science and engineering*. 5<sup>a</sup> ed. New Yourk: Jonh Wiley & Sons, Inc. 2001. ISBN 0-471-39551-X

DICIONÁRIO PRIBERAM DA LÍNGUA PORTUGUESA. [Em linha]. [s.l.]: [s.n.], 2012. [Consultado em 24/08/2012]. Disponível em URL: <http://www.priberam.pt>

ESTEVES, Daniel. *Desenvolvimento, caracterização e avaliação do comportamento termo-mecânico de um novo material constituído principalmente por cortiça*. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Lisboa 2010. Disponível em URL: <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/805901/1/dissertacao.pdf>

GIBSON, Lorna; ASHBY, Michael. *Cellular solids, structure and properties*. 2<sup>a</sup> ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. ISBN 0-521-49911-9.

GRIFFIN, M.J. *Evaluating the effectiveness of gloves in reducing hazards of hand-transmitted vibration*. *Occupational and Environmental Medicine*. [Em linha]. Fevereiro 1998, vol. 55, nº2 [Consultado em 08/08/2012]. p. 73-89. Disponível em URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1757587/>.

GIL, Luís. A cortiça como material de construção – Manual Técnico. [Em linha]. Santa Maria de Lamas: APCOR, [s.d.]. p. 66 [Consultado a 20/08/2012]. Disponível em URL: <http://www.apcor.pt/userfiles/File/Caderno%20Tecnico%20F%20PT.pdf>

GRIFFIN, M.J. *Handbook of human vibration*. Londres: Elsevier. 1990. ISBN 0-12-303041-2.

ISO 5349-1, 2001. *Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand transmitted vibration – Part 1: General requirements*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

PPLWARE. Kork – *O iPad com um toque português* [Em linha]. [s.l.]: [s.n.], Dezenbro de 2010. [consultado em: 09/11/2012]. Disponível em URL: <http://pplware.sapo.pt/apple/kork-o-ipad-com-um-toque-portugues/>

SANTOS, Mariana. *Aplicação estrutural de cortiça para melhoria passiva em caso de impacto*. Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro. Aveiro [s.d.]. Disponível em URL: <http%3A%2F%2Fria.ua.pt%2Fbitstream%2F10773%2F2459%2F1%2F2008001822.pdf>

SILVA, S.P., et.al. *Cork: properties, capabilities and applications*. [Em linha]. International Materials Reviews. 2005. Vol. 50, nº6, p. 345-365 [Consultado a 22/08/2012]. Disponível em URL: <http%3A%2F%2Frepositorium.sdum.uminho.pt%2Fbitstream%2F1822%2F4005%2F1%2F0105.pdf>.

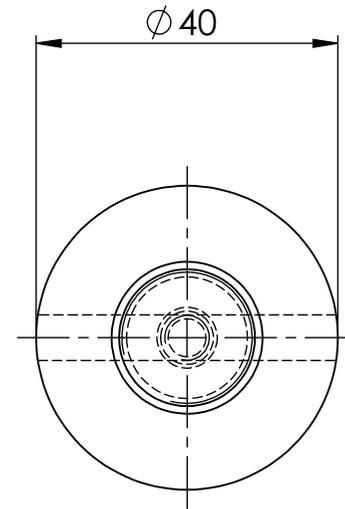
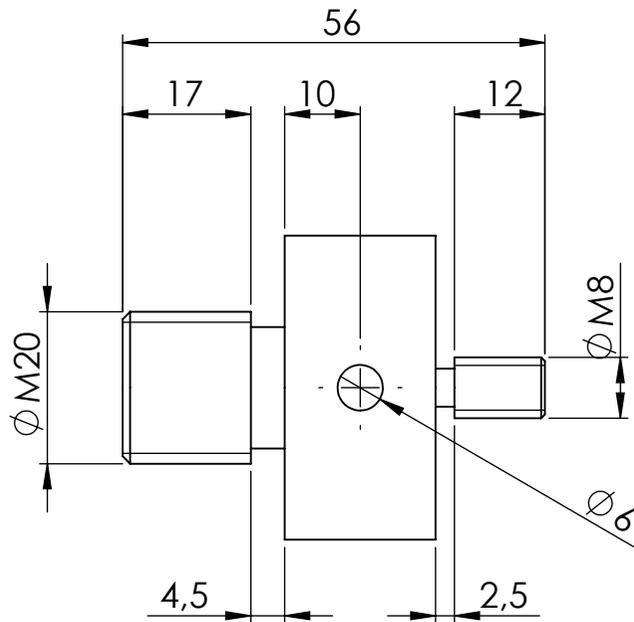
SHIGLEY, Joseph E.; NISBETT Keith J.; BUDYNAS, Richard G. *Mechanical engineering design*. 8ª ed. Rolla: McGraw-Hill. 2008. ISBN 0-390-76847-6.

SILVA, Ivone, et al. Fenómeno de Raynaud. *Angiologia e Cirurgia Vasculuar* [Em linha]. Março 2011, vol. 7, nº1 [Consultado em 18/08/2012]. pp. 13-20. Disponível em URL: <http://www.scielo.oces.mctes.pt/pdf/ang/v7n1/v7n1a02.pdf>

## **APÊNDICES**

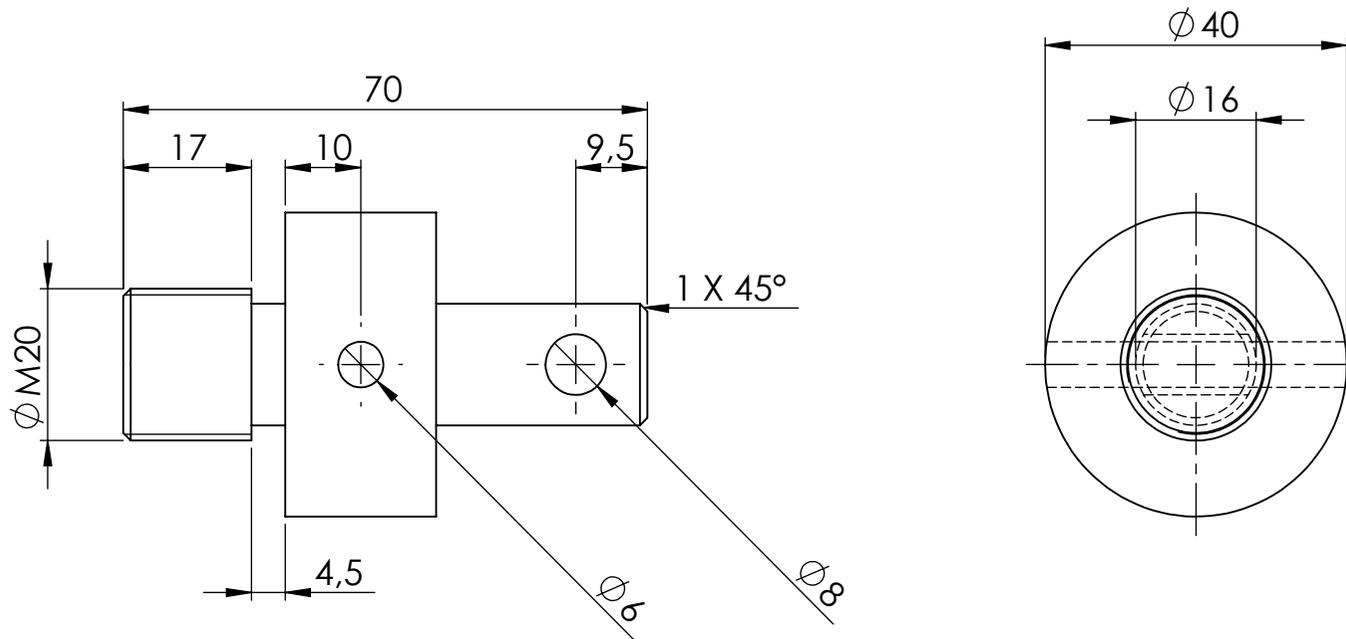
## **APÊNDICE I**

(Desenhos técnicos dos dispositivos criados para o ensaio de tração)



Pro.	29-05-12	Pedro Dias	UNIVERSIDADE DO MINHO Departamento de Engenharia Mecânica	Dissertação de Mestrado
Des.	29-05-12	Pedro Dias		
Cop.	29-05-12	Pedro Dias		Pedro Dias 46977
Ver.				
Esc.	Espaçador 1			
1:1				
Tol.				
0.5 mm				
				Substituiu:
				Substituído por:

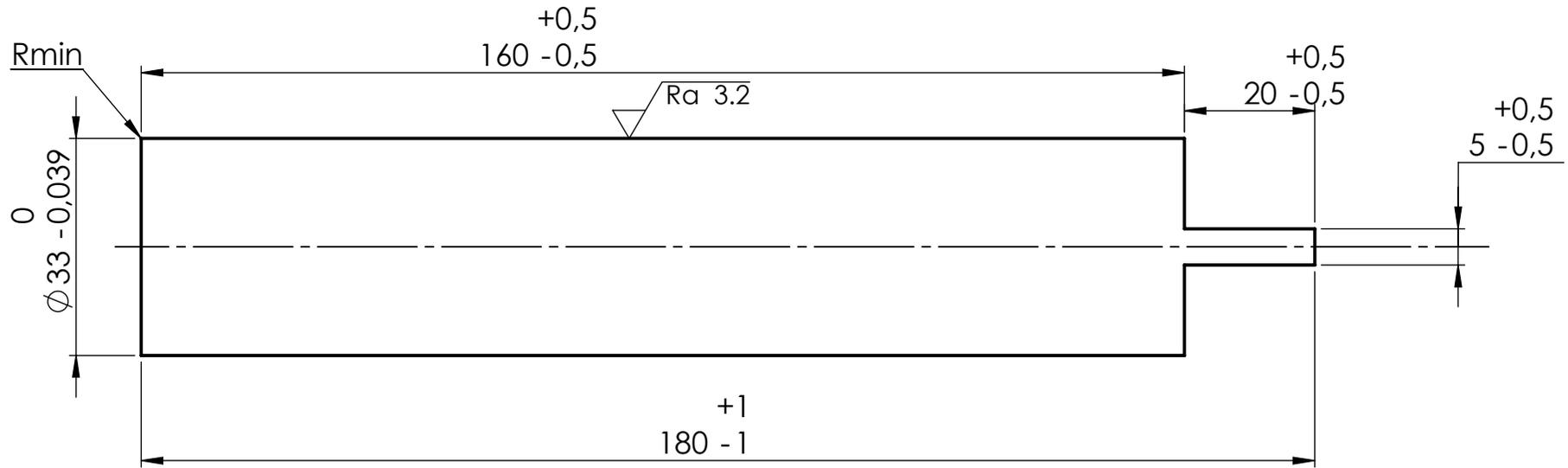




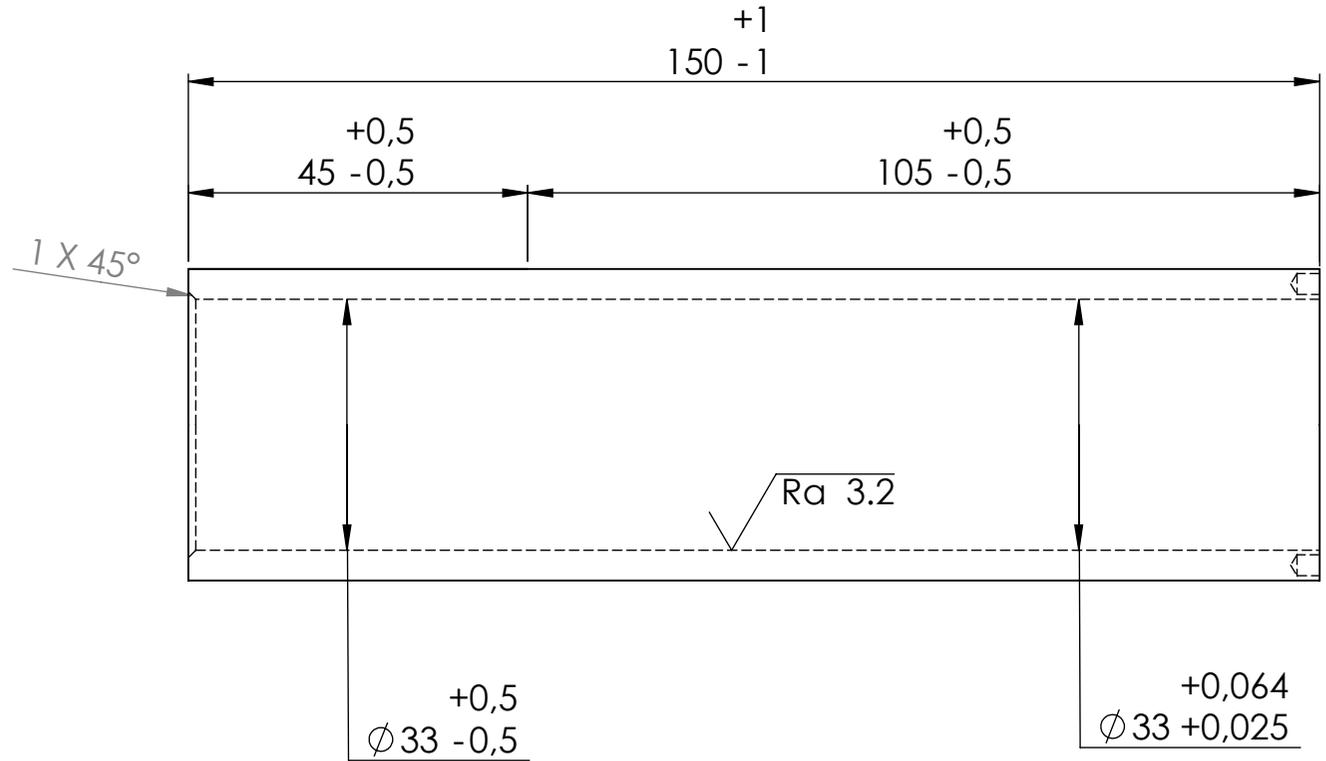
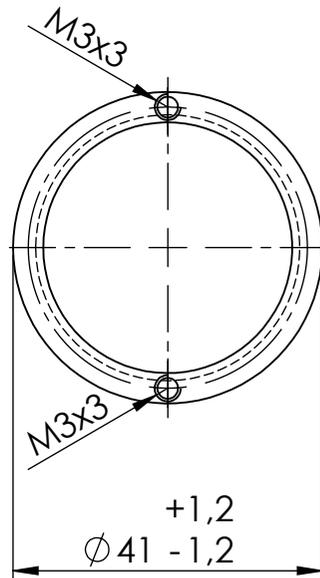
Pro.	29-05-12	Pedro Dias	UNIVERSIDADE DO MINHO Departamento de Engenharia Mecânica	Dissertação de Mestrado				
Des.	29-05-12	Pedro Dias		Pedro Dias 46977				
Cop.	29-05-12	Pedro Dias						
Ver.								
Esc.	1:1		Espaçador 3					
Tol.	0.5 mm							
			Substituiu:					
			Substituído por:					

## **APÊNDICE II**

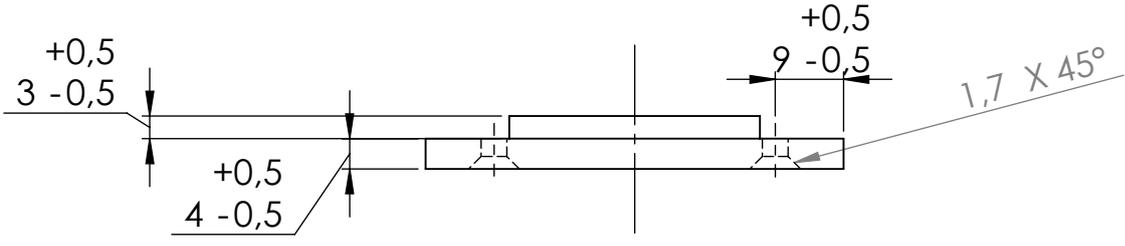
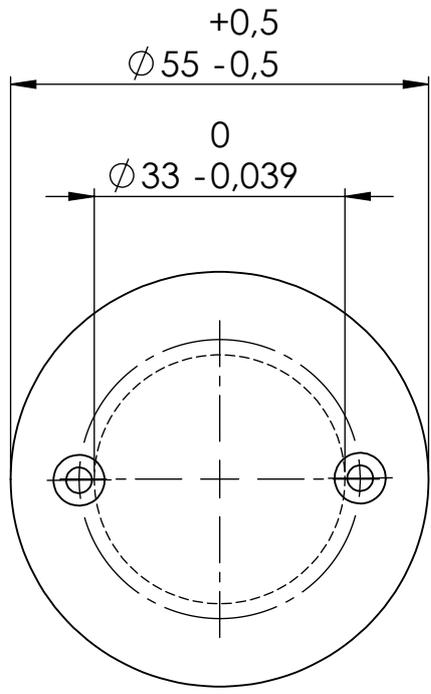
(Desenhos técnicos dos vários componentes da ferramenta concebida para o ensaio de compressão aos granulados)



Pro.	28-03-18	Pedro Dias	UNIVERSIDADE DO MINHO Departamento de Engenharia Mecânica	Dissertação de mestrado				
Des.	28-03-18	Pedro Dias		Pedro Dias 46977				
Cop.	28-03-18	Pedro Dias						
Ver.								
Esc.	Haste							
1:2								
Tol.								
				Substituiu:				
				Substituído por:				



Pro.	02-04-18	Pedro Dias	UNIVERSIDADE DO MINHO Departamento de Engenharia Mecânica	Dissertação de Mestrado				
Des.	02-04-18	Pedro Dias		Pedro Dias 46977				
Cop.	02-04-18	Pedro Dias						
Ver.								
Esc.	Tubo							
1:1								
Tol.								
				Substituiu:				
				Substituído por:				



Pro.	02-04-12	Pedro Dias	UNIVERSIDADE DO MINHO Departamento de Engenharia Mecânica	Dissertação de Mestrado	
Des.	02-04-12	Pedro Dias		Pedro Dias 46977	
Cop.	02-04-12	Pedro Dias			
Ver.					
Esc.	Tampa				
1:1					
Tol.					
				Substituiu:	
				Substituído por:	